

Nordmeier, V. & Grötzebauch, H. (Hrsg.)

PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung

Fachverband Didaktik der Physik

Würzburg 2018

Zur Zeitschrift

Die Zeitschrift *Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung* (PhyDid B) ist eine leicht referierte open-access Internetzeitschrift. Sie beinhaltet die Tagungsbeiträge der Frühjahrstagung des Fachverbands *Didaktik der Physik* der *Deutschen Physikalischen Gesellschaft* (DPG). Alle Beiträge sind frei verfügbar. In der herunterladbaren Gesamtausgabe erscheinen nur die Artikel. Weitere Zusatzdateien wie z. B. Poster oder Filme sind über das open-access Portal www.phydid.de verfügbar.

PhyDid B umfasst Beiträge zu den Hauptvorträgen sowie den Rubriken *Anregungen aus dem Unterricht für den Unterricht, Astronomie, Grundschule, Hochschuldidaktik, Lehreraus- und Lehrerfortbildung, Lehr- und Lernforschung, Neue Konzepte, Neue Medien, Neue Versuche und Praktika* und weitere Themen.

Zitierweise:

Nordmeier, V. & Grötzebauch, H. (Hrsg.) (2018). PhyDid B, *Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Dresden 2018*. Berlin, 486 S.
Url.: <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/issue/view/285>

ISSN 2191-379X

Copyright Hinweise

Der Autor ist für die rechtmäßige Verwendung von eingereichten Beiträgen, Abbildungen, Hyperlinks und Zusatzmaterialien verantwortlich und trägt das alleinige Haftungsrisiko. Die Verantwortlichkeit für die Inhalte verlinkter fremder Webseiten liegt alleine bei dem Anbieter der Webseite. Wir distanzieren uns hiermit ausdrücklich von deren Inhalt und machen uns ihre Inhalte nicht zu Eigen.

Impressum

Die Veröffentlichung der Tagungsbände in PhyDid B erfolgt im Auftrag des Fachverbandes der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/index>

ISSN: 2191-379X



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>

Inhaltsverzeichnis

Plenarvorträge

Wiesner

Wie man den Lernschwierigkeiten im Physikunterricht wirksam begegnen kann. Ergebnisse aus 50 Jahren fachdidaktischer Forschung 1

Anregungen aus dem Unterricht für den Unterricht

Grusche

Qualitative Schulbuchanalyse zum Thema Linsenabbildung 11

Horn

Lorentz-Transformationen mit GAALOP 21

Wilhelm, Fösel

Modularer Aufbau eines induktiv aufladbaren Modell-Elektroautos 41

Astronomie

Carmesin

A Model for the Dynamics of Space – Expedition to the Early Universe – 45

Carmesin, Helmcke, Sprenger, Brüning

Three methods for the observation of the Big Bang with our school telescope 55

Carmesin, Sprenger

A Computer Simulation of Cosmic Inflation 61

Hochschuldidaktik

Bauer, Sacher

Kompetenzorientierte, universitäre Laborpraktika - Das Paderborner Physik Praktikum (3P) – 65

Dohrmann, Nordmeier Professionalität im Lehr-Lern-Labor anbahnen - Ergebnisse zu verschiedenen Facetten von Reflexion und Selbstwirksamkeitserwartungen	73
Giel Videoclips als Musterlösungsformat	81
Horn Die Geometrische Algebra mit GAALOP im Schnelldurchgang	85
Nagel, Scholz, Weber Umfrage zu den Lehr/Lernzielen in physikalischen Praktika	97
Rubitzko, Laukenmann, Starauschek Kumulatives Lehren der Mechanik in der Lehramtsausbildung	111
Woitkowski Fachwissen und Problemlösen im Physikstudium: Vorstellung des Forschungsprojektes KEMΦ	125
 Lehreraus- und Lehrerfortbildung	
Breuer, Vogelsang, Reinhold Implementation fachdidaktischer Innovation am Beispiel des Münchener Unterrichtskonzepts zur Quantenmechanik	133
Hohmann, Quast Astronomie in der Lehrerausbildung	141
John, Starauschek Kumulatives Lehren und Lernen im Lehramtsstudium Physik - Entwicklung eines Modells zur professionsorientierten Fachausbildung von Physiklehrkräften	149
Kurth, Wodzinski Messwerterfassung mit dem Arduino in der Lehramtsausbildung	159
Milster, Nordmeier Qualifizierung von Quereinsteiger*innen – Professionelle Kompetenzen der Q-Master-Studierenden	163
Schulz, Brackertz, van de Sand Schülerlabore in Deutschland: Ein ideologiekritischer Blick	169
Steffentorweihen, Theyßen Diagnostische Fähigkeiten fördern im Lehr-Lern-Labor Physik	179

Lehr- und Lernforschung

Behle, Wilhelm

Ein Testinstrument zur Analyse von Schülervorstellungen zur Energie 185

Brüggemann, Nordmeier

Naturwissenschaftliches Denken im Lehramtsstudium – Computeradaptive Leistungsmessung 191

Dopatka, Spatz, Burde, Wilhelm, Ivanjek, Hopf, Schubatzky, Haagen-Schützenhöfer

Design-Based Research: Elektrizitätslehre mit Potenzial und Kontexten EPo-EKo 197

Fromme

Fehlvorstellungen bei Studienanfängern: Was bleibt vom Unterricht der Sekundarstufe I? 205

Hofmann, Erb

Zur Überzeugungskraft von Experimenten zum Teilchenmodell 217

Jaeger, Müller

Repräsentation als kognitiv entlastende Strategie beim Problemlösen? 227

Jaimes-Paredes

Teaching basic metrology concepts. A multiple intelligences didactical approach. 235

Köster, Nordmeier

LemaS-DiaMINT: Diagnosebasierte individuelle Förderung leistungsstarker und potentiell leistungsfähiger Schülerinnen und Schüler im Sach-, Naturwissenschafts- und Physikunterricht 241

Lewing, Schneider

Das Schulbuch im fächerübergreifenden naturwissenschaftlichen Unterricht 245

Möhrke, Pampel, Runge

Konzepte Studierender zur Unsicherheit von Messdaten 251

Morris, Ivanjek, Burde, Dopatka, Haagen-Schützenhöfer, Schubatzky, Spatz, Wilhelm, Hopf

Weiterentwicklung eines Testinstruments zum einfachen Stromkreis 255

Spatz, Lippmann	
Interviewstudie zu den Mindsets von Physiklehrkräften	261
Teichrew, Erb	
Implementierung modellbildender Lernangebote in das physikalische Praktikum	269
Viefers, Theyßen, Schreiber	
Experimentelle Fähigkeiten in der Grundschule diagnostizieren und individuell fördern	277
Winkelmann, Wenzel, Horz, Ullrich, Weber, Erb	
Experimentieren im Physikunterricht: Wechselwirkung zwischen Überzeugungen von Lehrkräften und unterschiedlichen Experimentiersituationen	285
Neue Konzepte	
Bliesmer, Komorek	
Elementarisierungen zu Strömungen und Strukturbildungen	289
Burde, Wilhelm	
Das Elektronengasmodell aus Sicht der Lehrkräfte	297
Fütterer, Krey, Rabe	
Der Feldbegriff im Physikunterricht. Ein Analogieversuch: Magnetisches Feld als Energiespeicher und Wechselwirkungspartner	305
Grusche	
Entwurf einer phänomenbasierten Modellmethode	313
Grusche, Rang, Müller	
Wie wird die Ansicht durch eine Kugellinse verformt? – Entwicklung einer Phänomenreihe	323
Haase, Pfaff, Ermel, Kirstein, Nordmeier	
Interaktive Bildschirmexperimente als Systemkomponente der webbasierten Lernplattform tet.folio	333
Holz, Heinicke	
Alles Reibung oder was? Welchen Effekt oft genannte Einflüsse tatsächlich auf Messergebnisse haben	339
Horn	
Verallgemeinerte Matrizeninverse und Moore-Penrose-Matrizeninverse aus physikdidaktischer Sicht	345

Keuchel, Kraus, Zahn	
Die Vermittlung von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie mittels Sektormodellen: Die Konstruktion von Geodäten	355
Kraus	
Die Beobachtung im Gefüge des Erkenntnisprozesses der Physik	363
Laumann, Kerk, Pusch, Suhr	
Physik des Skateboardings - Materialabhängige Elastizitätseigenschaften des Skateboard Decks	371
Ubben, Heusler	
Ein haptischer Zugang zu Moden von Kugelschwingungen	379
Wilhelm, Diehl	
Ein Dynamik-Lehrgang in der Sekundarstufe II unter Verwendung der Videoanalyse	381
Zügge, Passon, Grebe-Ellis	
Entwicklungssensibilität als Zugang zur Elementarteilchenphysik	387
Neue Medien	
Dorsel, Staacks, Hütz, Heinke, Stampfer	
Smartphone-Experimente mit externen Sensoren	393
Ermel, Haase, Pfaff, Kirstein, Nordmeier	
Storyboards für die Erstellung von Mixed-Reality- Experimentierumgebungen	399
Hütz, Staacks, Stampfer, Heinke	
Gelingensbedingungen von Innovationen in der Hochschullehre am Beispiel des Einsatzes der App phyphox	405
Joußen, Heinke	
Entwicklung eines Echtzeit-Feedback-Systems für die Durchführung von Realexperimenten	411
Kremser, Spatz, Ploch	
Nutzung von mobile devices im naturwissenschaftlichen Unterricht	417
Laumann, Ries, Schulz-Schaeffer, Heusler	
Interdisziplinäre Konzeptentwicklung interaktiver digitaler Lehr- Lernmedien durch Fachdidaktik und Design	423

Oppermann, Nagel	
Effiziente Produktion von Lernvideos - Vorstellung einer erfolgreichen Strategie zur Entwicklung und Produktion effektiver audiovisueller Lernmaterialien für das Physikpraktikum	433

Neue Versuche und Praktika

Nagel, Matousek	
Schutz vor Strahlung – Abschirmung durch Aluminium - Ist die Bestimmung des Massenabschwächungskoeffizienten von Aluminium mit einer Mischprobe bestehend aus: Cs-137, Am-241 und Sr-90 mit einem Geiger-Müller-Zählrohr möglich?	441
Schüttler, Groll, Girwidz	
Satellitenortung realitätsnah im Klassenzimmer nachempfunden	447
Weber, Scholz	
Statistische Optik – Messung von Lichtfluktuationen mit einer programmierbaren LED –	455
Wilhelm, Stein	
Experimente mit Luftkissenpucks	459

Weitere Themen

Grebe-Ellis	
Zukunft des Physikunterrichts – Bericht vom Workshop über die DPG-Schulstudie am 19. März 2018 in Würzburg	467
Kraus, Zahn, Moustafa	
General relativity in German secondary schools	471
Schorn, Heinke	
Programm MLeNa zur MINT-Lehrer-Nachwuchsförderung: Weiterentwicklungen des Programms für größere Teilnehmendenzahlen	477
Wilhelm	
Stolpersteine überwinden im Physikunterricht – ein Buch zu fachgerechten Elementarisierungen	483

Tagungsprogramm

Url: <https://www.dpg-verhandlungen.de/year/2018/conference/wuerzburg/part/dd>

Wie man den Lernschwierigkeiten im Physikunterricht wirksam begegnen kann. Ergebnisse aus 50 Jahren fachdidaktischer Forschung (*)

Hartmut Wiesner

Ludwig-Maximilians-Universität München
hartmut_wiesner@t-online.de

Kurzfassung

Das Lernen von Physik bereitet erhebliche Schwierigkeiten. Darauf wurde bereits vor mehr als 100 Jahren in der fachdidaktischen Literatur hingewiesen. Bis etwa 1950 sah man in der intuitiven und aus der Lehrerfahrung begründeten Entwicklung von Sachstrukturen und Experimenten die erfolgversprechende Lösung. Mit der „kognitiven Wende“ vor etwa 50 Jahren erfolgte ein grundlegender Wechsel hin zu einer informationsverarbeitenden Auffassung: die Lernschwierigkeiten wurden nun vor allem auf die vorunterrichtlichen Wissens- und Denkstrukturen der Schülerinnen und Schüler und die darauf basierende Informationsverarbeitung zurückgeführt. Die Untersuchung der Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten und die darauf fußende parallel erfolgende Ausarbeitung und Evaluation von Unterrichtskonzepten wurde ein zentrales Forschungsfeld der Physikdidaktik. Diese Forschungen und Entwicklungen haben inzwischen zu einer Reihe von erfolgreichen Unterrichtskonzepten geführt. Theoretisch fundiert wird diese Forschungsrichtung durch eine moderat-konstruktivistische Sicht auf das Lehren und Lernen und die Entwicklung verschiedener Theorien des Conceptual Change.

1. Einführung

In der ersten deutschsprachigen Didaktik und Methodik schrieb E. Grimsehl 1911 „... Daß natürlich die Schüler bei gedankenloser Anwendung die beiden Begriffe (v , a ; Erg. H.W.) dennoch miteinander vertauschen, darf kein Wunder nehmen; *antworten sie doch ... selbst in der Oberprima ... noch auf die einfachsten Fragen den unglaublichsten Unsinn – aber nicht nur im physikalischen Unterricht.*“ (Ausl. und Hervorh. H.W.) [1] Inzwischen sind mehr als 100 Jahre praktizierten Physikunterrichts vergangen und die Frage ist berechtigt, ob die Schülerinnen und Schüler noch immer Schwierigkeiten haben, Physik zu lernen. Die vorläufige Antwort ist: Ja. Aber es gibt inzwischen auch einige bemerkenswerte Teilerfolge. Zunächst einige Beispiele zur Verdeutlichung welche Art von Lernschwierigkeiten gemeint ist.

Beispiel 1: Der elektrische Stromkreis

Stellt man Grundschulkindern (oder älteren Anfängern) eine Batterie, Drähte und ein Lämpchen zur Verfügung mit der Aufforderung, das Lämpchen zum Leuchten zu bringen, versuchen sie es in der Regel mit *einer* Verbindung zwischen Batterie und Lämpchen. Den Misserfolg erklären sie damit, dass das Lämpchen defekt, die Batterie leer oder der Draht verstopft sei. Diese Erklärungen sind nachvollziehbar, aber dass man sie auch bei Studierenden einer Eliteuniversität findet, ist schon verblüffend. In einem Lehrfilm für angehende Lehrkräfte [2] werden Studierende der Ingenieurwissenschaften des MIT aufgefordert mit einer Stabbatterie und einem Draht ein Lämpchen zum Leuchten zu bringen. Einige scheitern und greifen zu genau den gleichen

Erklärungen wie die Grundschul Kinder. Wenn letztere durch Probieren herausfinden, dass nur ein geschlossener Stromkreis funktioniert, konstruieren sie durchweg spontan als Erklärung eine Zweizuführungsvorstellung (Abb. 1): Aus beiden Batterielaschen kommt die gleiche Elektrizitätssorte und bei zwei Anschlüssen kommt davon genug zum Lämpchen, bei einem Anschluss reicht es nicht. Diese Vorstellung ist so suggestiv und überzeugend, dass sie von den Kindern, wenn sie im Unterrichtsgespräch auftaucht, sofort übernommen wird und sie nur noch mit großem Aufwand – wenn überhaupt – die erwünschte Stromkreisvorstellung akzeptieren.

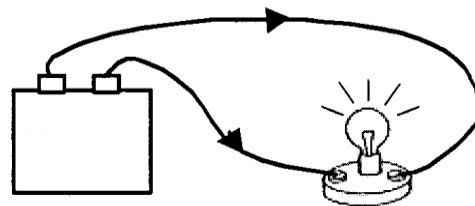


Abb. 1: Zweizuführungsvorstellung

Für Anfänger ist zudem eine Zweisubstanzvorstellung einleuchtender als die Stromkreisvorstellung: aus den Laschen kommt jeweils eine andere Substanz heraus, die im Gerät zusammentreffen und dort den Vorgang auslösen.

Beispiel 2: Optik

Bis etwa 1985 waren Schülervorstellungen zur Optik recht umfassend untersucht worden. Ein zentrales Ergebnis war, dass die Schülerinnen und Schüler die

Vorstellung vehement ablehnen, dass sichtbare Gegenstände durch das Beleuchten angeregt werden, selber Licht abstrahlen und dass von diesem Licht ein Teil ins Auge fallen muss, um dort den Wahrnehmungszusatz auszulösen (Sender-Strahlungs-Empfänger-Vorstellung, SEV; Abb. 2).

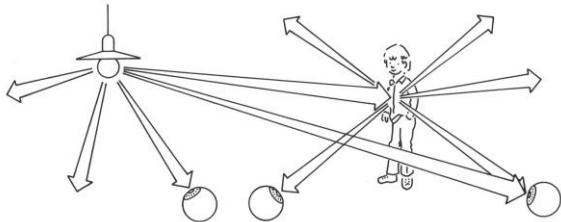


Abb. 2: Das Schema der Sender-Strahlungs-Empfänger-Vorstellung für das Sehen beleuchteter Objekte (aus [3,1993])

Vor allem dieser Befund der Ablehnung der SEV macht es verständlich, dass der traditionelle Unterricht mit Schwerpunkt auf den strahlengeometrischen Konstruktionen weitgehend erfolglos ist. Diese Konstruktionsvorschriften bleiben für die Schülerinnen und Schüler ein weitgehend bedeutungsloser Algorithmus. Wenn es die feste Schülerüberzeugung ist, dass von den Gegenständen, von denen sie z.B. ein Spiegelbild sehen, kein Licht zum Spiegel hin und von dort ins Auge gelangt, ist das Ergebnis zu dem Item in Abb. 3 aus einer Vergleichsuntersuchung [4] nachvollziehbar: Nach „normalem“ Optikunterricht können nur 13,9% der Schülerinnen und Schüler den Ort des Spiegelbildes richtig angeben und nur 1,5% eine Erklärung liefern.

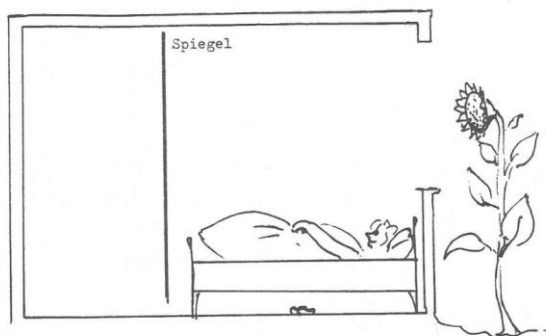


Abb. 3: Wo sieht Claudia das Spiegelbild der Sonnenblume? Erkläre, wie das Spiegelbild zustande kommt! (aus [4])

Beispiel 3: Kurvenfahrt

Aufgabe: Ein Auto fährt mit gleichbleibendem Tempo (konstante Tachoanzeige) um eine Kurve (Abb. liegt den Befragten vor). Zeichne die Kräfte ein und die resultierende Kraft.

Am Ende eines Leistungskurses Mechanik zeigte sich in mündlichen Befragungen folgendes Antwortverhalten: Als erstes wird eine Zentrifugalkraft eingezeichnet, dann eine „Motorkraft“, manchmal eine Reibungskraft und eine Zentripetalkraft. Die resultierende Kraft zeigte oft nach außen. Auf die Frage, ob dann das Auto nicht nach außen fahren müsste,

reagierten die meisten Befragten mit Unsicherheit. Selbst nach der Einsicht, dass die Resultierende radial nach innen zeigen muss, gibt es Bedenken, dass die Straße diese Zentripetalkraft ausübt: „Ja, ja, aber das verstehe ich nicht. Denn die Straße/die Asphaltdecke kann doch keine Kraft ausüben. Die liegt doch nur so da!“

Beispiel 4: Wechselwirkungsprinzip

Lange bekannt ist, dass *actio = reactio* sehr häufig falsch verstanden wird: die Wechselwirkungskräfte greifen am gleichen Körper an. Traditionell werden im Unterricht und im Studium zur Verständnisvertiefung Anwendungen besprochen, z.B. welche Kräfte greifen wo an, wenn eine Person einen Wagen oder einen Schlitten zieht. Auf Anregung eines Kollegen in München stelle ich in den Didaktikveranstaltungen den Studierenden in höheren Semestern seit Jahren das folgende Problem mit der Aufforderung, bewusst zu registrieren, welche Vorstellungen ihnen bei der Lösungssuche spontan einfallen: Jemand will klingeln und drückt mit einer Kraft \vec{F}_2 gegen den Klingelknopf. Die Reaktionskraft \vec{F}_1 wirkt genauso stark entgegen und kompensiert \vec{F}_2 . Folglich kann der Klingelknopf nicht in Bewegung gesetzt werden. Wo liegt der Fehler in der Argumentation?

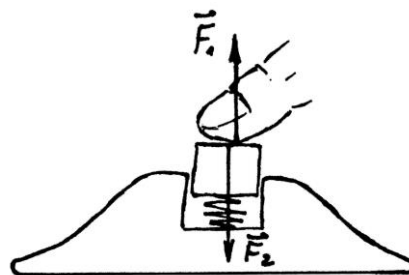


Abb. 4: Tafelbild zum „Klingelproblem“

Interessant ist, dass in den letzten Jahrzehnten so gut wie keiner der Studentinnen und Studenten eine physikalisch angemessene Lösung anbieten konnte. Die häufigste Argumentation setzte das Wechselwirkungsprinzip in der Anfangsphase außer Kraft: Zunächst ist die angreifende Kraft etwas größer als die Reaktionskraft und der Klingelknopf bewegt sich. In der anschließenden Phase werden beide Kräfte gemäß dem WW-Prinzip gleich groß. Warum findet man *nach* Studium der Mechanik dieses Antwortverhalten?

Beispiel 5: Elektrische und magnetische Felder

In einer aktuellen Untersuchung in der Oberstufe zu statischen elektromagnetischen Feldern [5] zeigt sich deutlich, dass hier synthetische Modellvorstellungen (s. Abschnitt 4) gebildet und benutzt werden:

I: Sehr gut, bleiben wir gleich bei den Magneten.

Was würde passieren, wenn ich den Magneten in die Nähe des geladenen Luftballons bringe?

S: Hm. (...) Das wird von der Ladung des Luftballons abhängen.

I: Kannst Du mir das genauer erklären? Nehmen wir mal an, der ist negativ geladen.

S: Dann wird das Positive, also das Rote, anziehen und das Grüne wird abstoßen, den Luftballon.“

2. Die kognitive Wende als Paradigmenwechsel – die Akzeptanz der Informationsverarbeitung beim Lernen

Wir können auf ca. 130 Jahre Physikunterricht zurückblicken, praktiziert von vielen klugen und engagierten Lehrkräften, die sicherlich ähnliche Erfahrungen der eben angeführten Art hatten und nach Lösungen zur Reduzierung der Lernschwierigkeiten gesucht haben. Warum ist es so schwierig erfolgreiche Unterrichtsangebote zu entwickeln? Und warum hat es so lange gedauert, bis die Lernschwierigkeiten systematisch erforscht wurden und wenigstens punktuell einigermaßen befriedigend bearbeitet wurden? Ein wesentlicher Grund dafür ist die bis in die 1970er Jahre dominierende Auffassung vom Lehren und Lernen: der vorwiegend in den USA entstandene Behaviorismus als Verhaltens- und Lernpsychologie. Für den Behaviorismus kennzeichnend ist die Beschränkung auf beobachtbares Verhalten und damit auf den Verzicht auf Theorien über innere Prozesse. Als Konsequenz ergab sich, dass die kognitiven Prozesse, die im Kopf der Lernenden bei der Aufnahme und Verarbeitung von Informationen ablaufen, nicht von Interesse waren. Es ist nachvollziehbar, dass die inhaltspezifischen Schwierigkeiten beim Lernen von Physik und das Lösen physikalischer Probleme in diesem Rahmen nicht angemessen betrachtet und bearbeitet werden konnten.

Mit der sogenannten kognitiven Wende ab Anfang der 70er Jahre vollzog sich ein entscheidender und grundlegender Wandel. Das Verstehen kognitiver Prozesse, die im menschlichen Gehirn ablaufen, wird nun zum Interessensschwerpunkt. Wichtige Impulse kamen von der Entwicklung der Computer und der damit durchgeführten Informationsaufnahme und -verarbeitung.

Der moderat-konstruktivistische Ansatz, der inzwischen weithin akzeptiert ist, nimmt die Sicht des Kognitivismus auf, fügt aber eine wichtige Annahme hinzu: Die Informationsaufnahme, -verarbeitung, vor allem aber die Bedeutungsgebung, erfolgt mit Hilfe der bei den Lernenden bereits vorhandenen Wissens- und Denkstrukturen. Neuen Informationen kann nur mit Hilfe des aus dem Langzeitgedächtnis abgerufenen Wissens eine Bedeutung gegeben werden. Es kommt damit auch eine subjektive Komponente hinzu, denn die Lernenden konstruieren ihre eigene Realität. Dass dieser individuelle Konstruktionsprozess auch leicht in eine aus Sicht der Physiklehrkraft unerwünschte Richtung laufen kann, ist verständlich und erklärt weitgehend die anfangs beschriebenen Lernschwierigkeiten.

Mit der kognitiven Wende begann in der Fachdidaktik eine intensive Erforschung der Schülervorstellungen (und der sich daraus ergebenden Lernschwie-

rigkeiten), auf die die Schülerinnen und Schüler im Unterricht zurückgreifen, um Physik zu verstehen. Inzwischen sind weite Inhaltsbereiche der Physik sehr detailliert untersucht. [6]

3. Entwicklung von Unterrichtseinheiten, ausgehend von Lernschwierigkeiten

Die Kenntnis und die Berücksichtigung der bisher ermittelten Schülervorstellungen und der Lernschwierigkeiten ist die unabdingbare Voraussetzung für die Konstruktion von erfolgversprechenden Unterrichtseinheiten. Und bisherige Ergebnisse belegen, dass dieser Weg auch zu relativ guten Lernerfolgen führen kann.

Beispiele: Einführung in die Optik, Energie und Wärmelehre

Neben der oben beschriebenen entschiedenen Ablehnung der Streuung von Licht ergab sich aus den Untersuchungen der Schülervorstellungen zur Optik als eine weitere bedeutende Schwierigkeit die Idee der holistischen Abbildung: Danach wandert nach Schülermeinung das Bild als Ganzes von der Figur zur Projektionsfläche.

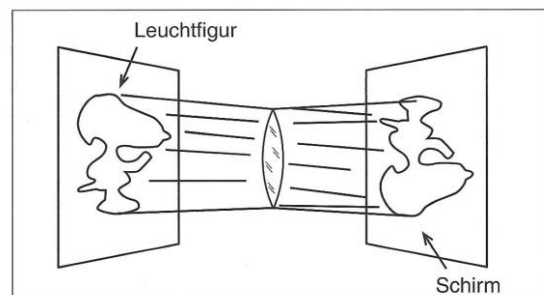


Abb. 5: Schülerskizze - holistische Abbildung durch eine Sammellinse (aus [3,1996])

Nach mehreren vorangegangenen Entwicklungsstufen seit 1980 haben Herdt u.a. einen Optiklehrgang entwickelt [3], der von Herdt in einer Vergleichsuntersuchung bezüglich seiner Wirksamkeit überprüft wurde [4]. Die Vermittlung der SEV (Abb. 2) und ihre konsequente Anwendung im gesamten Lehrgang ist ein wesentliches Kennzeichen des Konzeptes. Dass bei der anfänglichen Ablehnung eine zielgerichtete Führung durch die Lehrkraft und überzeugende Demonstrationen erforderlich sind, liegt auf der Hand (ausführliche Beschreibung des Unterrichtsvorschlags in [3;1993,1996]).

Bei den abbildenden Systemen wird als didaktische Reaktion auf die holistische Vorstellung die Fleck-zu-Fleck-Abbildung durch Lichtbündel eingeführt (Abb. 6). Dabei wird als erster Schritt besonderer Wert auf das Einüben einer qualitativen Vorstellung gelegt. Die Fleck-zu-Fleck-Abbildung erklärt, wie ein Bild z.B. bei der Sammellinse entsteht, aber noch nicht *wo* genau und wie groß es ist. Der von einem Gegenstandsfleck ausgehende Lichtkegel wird durch die Linse gebündelt und gibt auf dem Schirm aufge-

stellten Schirm einen Bildfleck. Später wird wie üblich durch geeignet ausgewählte Randstrahlen der Bündel durch formale Konstruktion der Ort und die Größe des Bildes bestimmt.

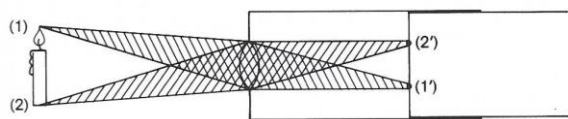


Abb. 6: Schema der qualitativen Fleck-zu-Fleck-Abbildung (aus [3,1996])

Über den gesamten Unterricht von fast einem Schuljahr Optik ergab sich folgende höchst signifikante Überlegenheit des neuen Lehrgangs (6 Versuchs- und 9 Kontrollklassen; mittlere Lernerfolge: Versuchsgruppe 24,8 und Kontrollgruppe 9,7 von max. 40 Punkten). [4]

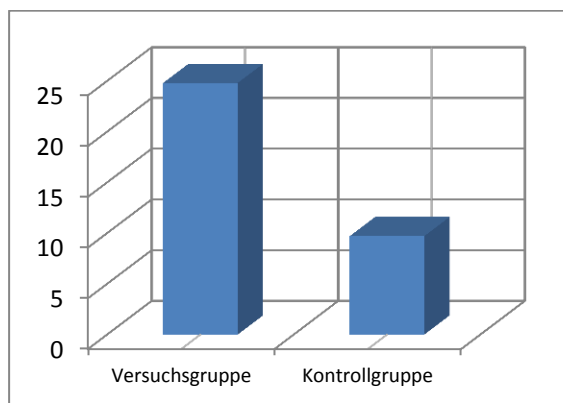


Diagramm 1: Ergebnisse einer Vergleichsuntersuchung zur Einführung in die Optik [4]

Bemerkenswert war weiterhin, dass auch die Items mit strahlengeometrischen Konstruktionen erheblich erfolgreicher von der Versuchsgruppe gelöst wurden. Beim Spiegelbilditem ergab sich z.B.:

	„Üblicher“ Physikunterricht	Neues Konzept
Ort des Spiegelbildes	13,9 %	76,9%
Erklärung für das Zustandekommen des Spiegelbildes	1,5 %	28,7%

Tabelle 1: Ergebnisse zum Spiegelbild-Item (Abb. 3) aus der Vergleichsuntersuchung [4] zur elementaren Optik

Vergleichbare Erfolge wurden ebenfalls nach der Entwicklung von Unterrichtseinheiten zu den Inhaltsbereichen *Energie* und *Wärmelehre* erreicht. [7] Bei diesen beiden Themen wurde auch ein Vergleich zwischen Mädchen und Jungen durchgeführt. Erreichen die Mädchen der Versuchsgruppe statistisch vergleichbare Lernleistungen wie die Jungen, ergibt sich bei der Vergleichsgruppe – wie häufig beobachtet – ein deutlicher Unterschied zuungunsten der Mädchen.

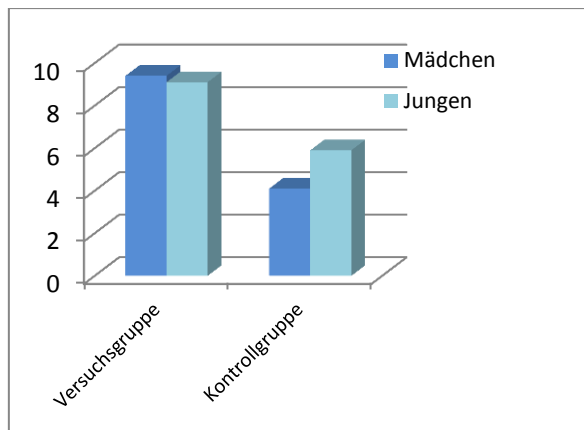


Diagramm 2a: Ergebnis des Lernerfolgs in der Vergleichsuntersuchung von Bader [7] zu Energie (maximal erreichbare Punktzahl im Abschlusstest: 14)

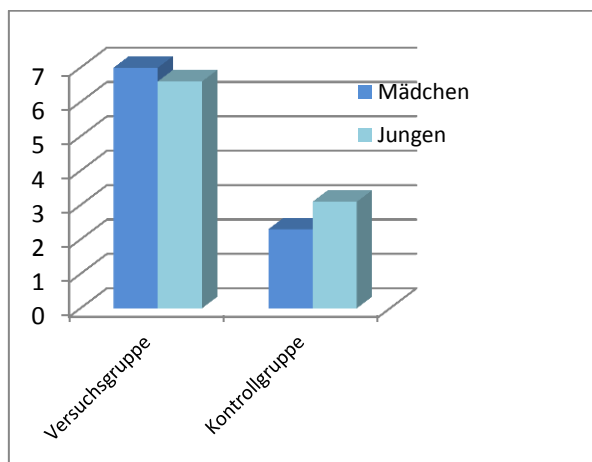


Diagramm 2b: Ergebnis des Lernerfolgs in der Vergleichsuntersuchung von Bader [7] zur Wärmelehre (erreichbare Punkte im Abschlusstest maximal 13)

Für die *Quantenphysik* wurde in dem Projekt mit den Adressatenkreisen Oberstufe und Lehrerfortbildung eine Lernumgebung entwickelt, die für die Oberstufe als erfolgreich zu bewerten ist. [8]. B. Schorn [9] hat nachgewiesen, dass mit den grundlegenden Ideen von milq mit beachtlichem Lernerfolg auch ein Unterrichtskonzept für eine Einführung in die Quantenphysik in der 10. Klassenstufe entwickelt werden kann.

4. Ergänzungen zum theoretischen Hintergrund

Bei diesen und folgenden Beispielen wurden die Arbeiten nicht nur durch die konstruktivistische Lernauffassung gelenkt. Sie orientierten sich weiterhin an einem Forschungs- und Entwicklungsprogramm, in den letzten Jahren als Design-based Research (DBR) bezeichnet. DBR ist u.a. eine Reaktion auf die – nicht ganz unberechtigte Kritik von Seiten der Lehrkräfte – dass die Forschungsergebnisse der Fachdidaktiken und der Pädagogen hinsichtlich der realen Probleme im Unterricht zu wenig von Nutzen sind. DBR strebt eine fruchtbare Synthese zwischen Grundlagenforschung und dem Lösen authentischer, praktischer Probleme an. Es geht

darum, sowohl gute funktionierende Lernumgebungen zu gestalten als auch gleichzeitig an den Theorien des Lehren und Lernens zu arbeiten. Dies erfolgt in einem zyklischen Prozess von Design – Erprobung – Analyse und Redesign. [10]

Als Beispiel für ein typisches und erfolgreiches DBR-Projekt wurde vor 10 Jahren über die Entwicklung der *zweidimensionalen Dynamik* für den Physikanfangsunterricht berichtet [11], beginnend mit den Arbeiten von W. Jung u.a. vom Anfang der 1970er über zahlreiche Zwischenprojekte bis zu den aktuellen Lehrerhandreichungen [12]. Zentrale Ideen sind: Geschwindigkeit von Anfang an als vektorielle Größe (in Pfeildarstellung), Newton'sche Bewegungsgleichung in der Kraftstoßformulierung $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$ und mit ihr qualitatives Argumentieren. Schlüsselphänomen ist der senkrechte Stoß auf eine von zwei parallel laufenden Kugeln (s. Abb. 7), Verzicht auf den Beschleunigungsbegriff, Reduzierung der Kinematik.



Abb. 7: Simulation des senkrechten Stoßes als Ergänzung zum Realexperiment

Ein Vergleich mit typischem Unterricht mit eindimensionaler Mechanik ergab eine statistisch hoch signifikante Überlegenheit des zweidimensionalen Zugangs [13;14].

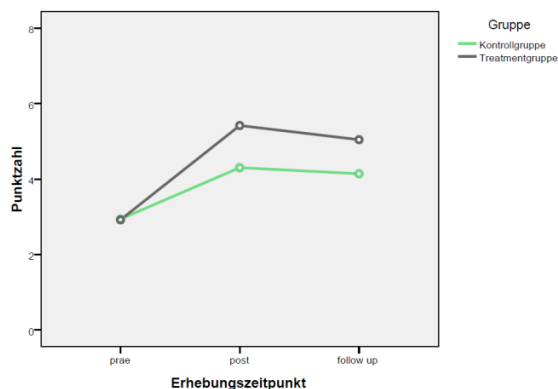


Diagramm 3: Ergebnisse aus der Vergleichsuntersuchung zur Einführung in die Mechanik [13]

Eine weitere Orientierung für die physikdidaktische Forschung und Entwicklung ergibt sich aus den Theorien darüber, warum und wann es so schwierig ist, die physikalischen Begriffe zu lernen und wie man vorgehen sollte. Es gibt inzwischen mehrere Theorien zum Begriffswechsel (oder vielleicht treffender ausgedrückt zur Begriffsentwicklung), die jeweils unterschiedliche Aspekte in das Zentrum stellen. Nach der Theorie von Chi u.a. (z.B. [15]) sind ausgeprägte Lernschwierigkeiten zu erwarten, wenn der physikalische Begriff einer anderen Kategorie als nach der Alltagsvorstellung zugeordnet werden muss. Kraft z.B. wird im Alltag in die Kategorie Eigenschaft (eines Körpers) eingeordnet („Der Ringer hat Kraft.“). In der Physik beschreibt er die Relation zwischen einwirkendem Körper und dem Körper, auf den eingewirkt wird. Licht ist im Alltagsverständnis ein Zustand („hell“) oder eine (hellmachende) Substanz, in der Physik ein Prozess, eine elektromagnetische Strömung.

Als eines der Ergebnisse der Forschung über Schülervorstellungen fanden sich Vorstellungen, die relativ stabil sind und solche, die häufig auftreten. Es gibt aber auch Schüleräußerungen, die sich im Verlauf eines Interviews allmählich oder auch abrupt ändern oder die stark vom Kontext abhängen. Auf die erste Variante hebt besonders die Framework Theory von Vosniadou u.a. (z.B. [16]) ab. In dieser Theorie wird angenommen, dass die Kinder schon sehr früh theorieähnliche, kohärente Wissensstrukturen entwickeln, die durch zahlreiche Alltagserfahrungen bestätigt wurden und deshalb tiefverwurzelt und schwer zu verändern sind. „We claim that children construct a naive physics which is based on observation in the context of lay culture and which forms a relatively coherent conceptual system — i.e., a framework theory — that can be used as a basis for explanation and prediction of everyday phenomena. Learning science requires fundamental ontological, epistemological, and representational changes in naive physics. These conceptual changes take a long time to be achieved, giving rise to fragmentation and synthetic conceptions. We also argue that both fragmentation and synthetic conceptions can be explained to result from learners' attempts assimilate scientific information into their existing but incompatible naive physics.“ [17]

Synthetische Modelle werden von den Kindern gebildet, um Widersprüche zwischen neuen Informationen und ihrer bisherigen „naiven“ Theorie aufzulösen. Vosniadou u.a. beschreiben z.B., wie Kinder, ausgehend von der Erde als Scheibe mit klarer Orientierung oben und unten, diese Theorie mit der Information, dass die Erde eine Kugel ist, verknüpfen: sie bilden eine Hohlwelttheorie. Dann kann man auch nicht von der Kugel herunterfallen. [16]

Diese weit verbreitete Conceptual Change-Theorie ist hinsichtlich des relativ kurzfristigen Lernens eher skeptisch, die „naiven“ Rahmentheorien werden bezüglich des Physiklernens tendenziell als lernhin-

derlich angesehen. Andererseits können die bereits angeführten Unterrichtsprojekte zu Optik, Energie und Wärmelehre als Hinweis verstanden werden, dass eine optimistischere Sicht angebracht erscheint. Eine solche Theorie wurde im Rahmen des „Knowledge-in-pieces“-Ansatzes von diSessa u.a. ausgearbeitet. Hier wird das Vorwissen der Schülerinnen und Schüler nicht in gleichem Maße als Hindernis für den Konzeptwechsel gesehen, sondern als Anknüpfungsmöglichkeit. Sie passt auch besser zu dem Befund, dass Schülervorstellungen des Öfteren instabil, fluide und stark kontextabhängig sind. In diSessas Theorie der p-primes und coordination classes wird angenommen, dass das Wissen von Novicen aus eine Vielzahl von nur lose oder gar nicht verbundenen Elementen besteht, den phenomenological primitives oder p-primes. „...p-primes ... can be understood as simple abstractions from common experiences that are taken as relatively primitive in the sense that they generally need no explanation; they simply happen.“ [18] Lässt man z.B. einen Gegenstand los, fällt er nach unten. Das ist normal und wird nicht hinterfragt, so ist es eben. P-primes sind quasi die atomaren Grundbausteine des Alltagsverständnisses und werden je nach Situation unterschiedlich stark aktiviert.

Viele der bekannten Schülervorstellungen können als p-primes eingeordnet werden. In diSessa [19] werden eine Reihe von p-primes aus dem Bereich Mechanik angegeben, z.B.:

- (1) Ohm's p-prime: Increased effort ... leads to more results.
- (2) Force as a mover
- (3) Force as deflector
- (4) Intrinsic resistance
- (5) Dying away
- (6) Change takes time
- (7) Equilibrium (A return to equilibrium is the natural result of removing a disequilibrating influence. It needs no further explanation.

An die p-primes (1), (3) und (6) kann konstruktiv angeknüpft werden, die anderen Beispiele bereiten eher Lernschwierigkeiten.

Lernen erfolgt durch Verändern der Aktivierungsstärke von p-primes, durch Verknüpfen und durch Bilden neuer p-primes. Lernschwierigkeiten gibt es, wenn im Lernangebot Reize dominant sind, die ungeeignete p-primes aktivieren. Als Lehrstrategie und für die Konstruktion von Unterrichtskonzepten bietet sich an: Finde solche Situationen, die aus dem Pool der nur lose organisierten p-primes geeignete anknüpfungsfähige p-primes aktivieren und gleichzeitig die Aktivierung lernhemmender p-primes unterdrückt. Konstruiere davon ausgehend die Lernumgebung, die die erwünschte Aktivierungsstärke und die Neuordnung der p-primes zur Folge haben. Die Kernaufgabe besteht somit darin, empirisch herauszufinden welche p-primes für einen bestimmten Inhaltsbereich vorhanden sind und welche davon für die Entwicklung eines bestimmten Begriffs mit

einer ausreichenden Aktivierungsstärke anknüpfungsfähig sind. Dies ist keineswegs eine einfache Aufgabe. Die bisher angesprochenen relativ erfolgreichen Projekte wurden in Anlehnung an eine solche Strategie entwickelt.

Ein weiteres Beispiel für ein nach der eben beschriebenen Strategie entwickeltes Lernangebot ist eine Einführung in die *Elektrizitätslehre*. Stromverbrauch ist bekanntlich eine hartnäckige Vorstellung und ein angemessenes Verständnis der elektrischen Spannung noch immer eine große Herausforderung. Anknüpfend an eine Reihe von Vorläuferprojekten hat Späth [20] ein Unterrichtskonzept entwickelt und evaluiert, das die Spannung schwerpunktmäßig als Differenz des elektrischen Potentials einführt (die magnetische Wirkung hat sich als gutes Argument gegen die Stromverbrauchsvorstellung erwiesen), mit sehr guten Lernerfolgen, wie das folgende Diagramm zeigt.

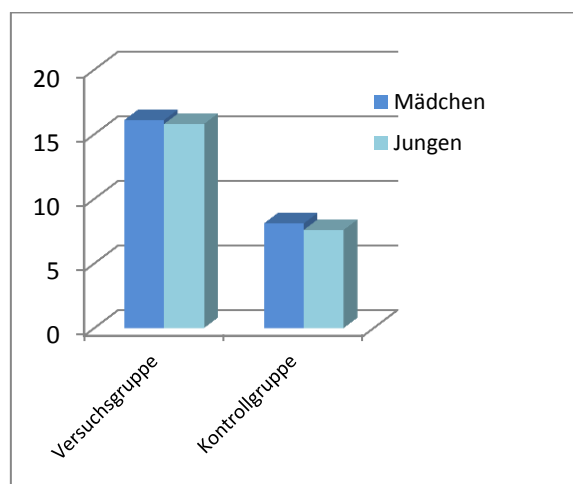


Diagramm 4: Lernerfolge in der Vergleichsuntersuchung von Späth [20]

Burde hat in einer gerade abgeschlossenen Dissertation eine Erweiterung vorgenommen, mit der dem Potential eine anschaulichere Deutung gegeben wird: das Potential ist so etwas wie der (elektrische) Druck in dem Elektronengas. Die empirische Vergleichsuntersuchung hat ebenfalls sehr gute Ergebnisse nachgewiesen. [21;22]

5. Überlegungen zu weiterführender fachdidaktischer Forschung

Auch wenn in den bisher angeführten Beispielen recht beeindruckende Verbesserungen in den Lernleistungen erreicht werden konnten, besteht noch immer ein erhebliches Potential für Steigerungen. Um dieses Potential zu nutzen, müssen nach meiner Einschätzung für weiterführende Forschungen und Entwicklungen die Lernprozesse systematischer und mehr ins Detail gehend als bisher untersucht werden. Das wir sehr viel feiner nachschauen müssen, was in den Köpfen der Lernenden vorgeht, verdeutlicht das folgende Beispiel. Physikstudierenden wurde nach

Veranstaltungen über Drehmomente und Drehmomentgleichgewicht folgendes Problem vorgelegt [23]:

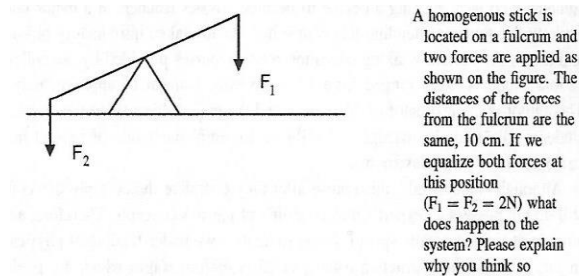


Abb. 8a: Teilaufgabe zu Drehmoment und Drehmomentgleichgewicht

Alle Probanden geben die korrekte Antwort und begründen sie physikalisch richtig mit Hilfe des Drehmomentbegriffs und des Drehmomentgleichgewichts. Oft wird zusätzlich formal mit der Gleichung für das resultierende Drehmoment argumentiert. Den gleichen Studierenden wurde nun das folgende Problem vorgelegt, das physikalisch grundsätzlich gleich ist:

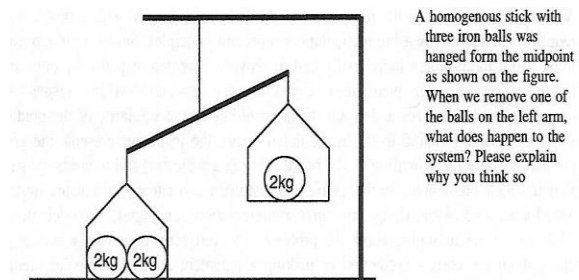


Abb. 8b: Teilaufgabe 2

Jetzt antworten nur noch 20% richtig, für 80% dreht sich der Balken nach Entfernen des Zusatzgewichts in die horizontale Position. Was steckt hinter dieser Änderung des Antwortverhaltens bei „Experten“? Warum greifen sie jetzt auf die Balkenwaagenanalogie zu und verlassen die physikalische Sicht?

Eine sehr nützliche, wichtige Ergänzung zur Theorie der p-primen und in Hinblick auf eine theoriegeleitete „feinkörnige“ Analyse haben diSessa et al. mit dem Konstrukt der „coordination class“ entwickelt. Es ist als eine erste Antwort auf die Frage anzusehen, wann wir sagen können, jemand „hat“ den physikalischen Begriff xy (z.B. Kraft, Drehmoment, Geschwindigkeit, ...).

Die Kernfunktion einer coordination class ist: „A coordination class is a particular concept whose principal function is to allow people to read a particular class of information out of situations in the world.“ [25] Wenn man den Newton’schen Kraftbegriff „hat“ und damit die Welt in Newtonscher Gestalt sieht, liest man bestimmte Informationen aus

dem Geschehen ab, koordiniert sie und zieht andere Schlussfolgerungen als aus der Perspektive des Alltagsdenkens: Ändert sich die (vektorielle) Geschwindigkeit? Wenn ja, welches ist der Wechselwirkungspartner, der den entsprechenden Einfluss ausübt? Man „sieht“ dann das wechselwirkende System und nicht nur ein sich bewegendes Teilsystem.

Eine coordination class ist zusammengesetzt aus mehr oder weniger zusammenhängenden p-primen aus der Wissensbasis und hat strukturelle und Fertigkeitaspekte. [25]

Struktural elements	Readout Strategies
	Causal Net
Performance criteria	Integration
	Invariance

Tabelle 2: Elemente einer coordination class

Die readout strategies sind quasi die Brille – oder der Filter – mit dem die Aufmerksamkeit in der speziellen Situation auf die bedeutsamen Elemente in der Welt fokussiert wird. Das causal net stellt das System der Schlussregeln dar, die die Verbindung zwischen den Beobachtungen und der benötigten Information herstellt. “The ways in which one does more or less directly observe information in die world, though not necessarily the information characteristic of the coordination class, we call *read out strategies*. In addition, the total set of inferences one can use to turn information readouts into the particular information at issue is included in the knowledge component we call the *causal net*.” [24]

Unter integration und invariance wird verstanden: ...“coordinating observations within a single situation (integration), and coordinating different features in different situations to find the same information (invariance).” [25]

Die meisten Schwierigkeiten bei einem Begriffswechsel treten nach diSessa und Sherin im causal net auf. Einige spätere Untersuchungen zu coordination classes deuten ebenfalls in diese Richtung.

Wie diSessa et.al. bin ich der Meinung, dass eine sehr feinkörnige Analyse der Lernprozesse erforderlich ist, um noch erfolgreicher Lernschwierigkeiten reduzieren zu können. Auf jeden Fall verdeutlicht eine feinkörnige Analyse, wie anspruchsvoll das Lernen von Physik ist. Betrachten wir dazu die schon angesprochene 2-dimensionale Dynamik. Das Schlüsselphänomen dort ist der senkrechte Stoß auf eine von zwei parallel laufenden Kugeln (vorgeschlagen von Jung u.a. in [26,27], Abb. 9). Aus diesem zumindest auf den ersten Blick einfachen und durchsichtigen Versuch können zentrale Aspekte der Dynamik abgelesen werden. [27]

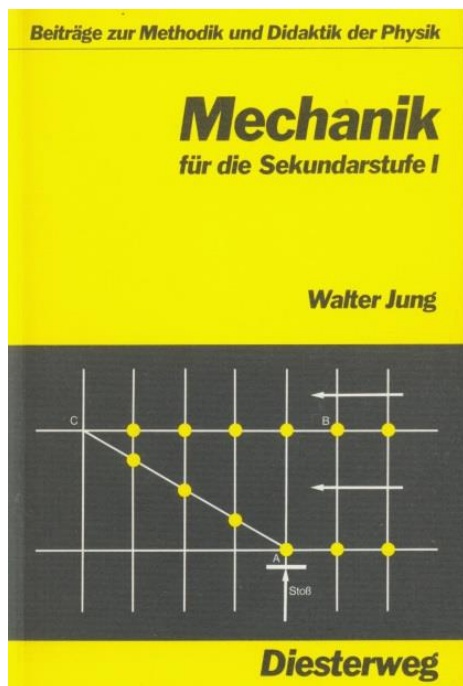


Abb. 9: Titelseite des Lehrgangs von Jung mit der symbolischen Darstellung des senkrechten Stoßes

Eine Liste von *readout-Strategien* für diesen senkrechten Stoß, die noch nicht empirisch belastbar belegt ist und auch keinen Anspruch auf Vollständigkeit und Stringenz erhebt, lautet:

- (1) Die nichtgestoßene Kugel behält ihre Bewegung bei
- (2) Die gestoßene Kugel ändert ihre Bewegungsrichtung
- (3) Die gestoßene Kugel trifft die andere Kugel
- (4) Die Entfernung zwischen aufeinanderfolgenden Orten (Stroboskopbilder) ist ein Maß für das Tempo der Bewegung
- (5) Die gestoßene Kugel trifft die andere Kugel immer (unabhängig von der Stoßstärke, der Kugelmassen und der Anfangsgeschwindigkeit)
- (6) Beide Kugeln laufen vor und nach dem Stoß „auf gleicher Höhe“
- (7) Das Tempo der gestoßenen Kugel ist nach dem Stoß größer als das ursprüngliche Tempo
- (8) Der Ort des Zusammentreffens hängt ab von der Stoßstärke, den Kugelmassen und der Anfangsgeschwindigkeit

Eine Liste für das *causal net* lautet:

- (1) Die nichtgestoßene Kugel behält ihre Geschwindigkeit \vec{v}
- (2) Die Geschwindigkeit der gestoßenen Kugel ändert sich
- (3) Die Geschwindigkeit der gestoßenen Kugel bleibt in der ursprünglichen Richtung erhalten

- (4) Die gestoßene Kugel erhält durch den Stoß in Stoßrichtung eine zusätzliche Geschwindigkeit \vec{v}_{zus}
- (5) Oder: Durch den Stoß ändert sich die Geschwindigkeit um $\Delta\vec{v}$ in \vec{v}_E
- (6) Die Endgeschwindigkeit ergibt sich als (vektorielle) Summe $\vec{v}_E = \vec{v}_A + \vec{v}_{zus}$
- (7) Die Zusatzgeschwindigkeit hängt ab von der Stoßstärke und der „Massigkeit“ m der Kugel

Wenn man diese Listen betrachtet, wird einem bewusst wie anspruchsvoll das Lernen der Dynamik ist, wenn bereits bei diesem relativ durchsichtig erscheinenden Phänomen eine eindrucksvoll große Zahl an Einzelinformationen und Schlussregeln von den Schülerinnen und Schülern koordiniert werden muss. Solche Listen, aus der feinkörnigen Analyse von Lernprozessen extrahiert, sind m.E. ein wertvolles Instrument zur systematischen und detaillierten Aufdeckung der Lernprobleme und vermutlich von hoher Bedeutung für die Konstruktion und die Entwicklungszyklen von Unterrichtskonzepten.

6. Schlussbemerkungen

Die Berücksichtigung der Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten im Rahmen des moderaten Konstruktivismus, der Variante des Knowledge-in-Pieces-Ansatzes von diSessa u.a. und des Design-based-Research-Forschungs- und Entwicklungsprogramms führten für mehrere Inhaltsbereiche der Schulphysik zu deutlichen Verbesserungen des Lernerfolgs. Mit den entsprechenden Unterrichtskonzeptionen sind natürlich auch – wie bei jedem anderem Unterrichtsentwurf - bestimmte Lernziele verbunden, die man akzeptieren oder ablehnen kann. Wenn man die mit den angesprochenen Unterrichtskonzepten angestrebten Ziele akzeptiert, bleibt noch immer ein erheblicher Spielraum für Verbesserungen des Lernerfolgs. Die in den letzten Jahren im Rahmen der Theorie der coordination classes durchgeführten Untersuchungen zum Verständnis physikalischer Begriffe (z.B. [23]) lassen vermuten, dass für weiterführende Forschungen und Entwicklungen systematischer und mehr ins Detail gehend als bisher die Lernprozesse untersucht werden müssen. Inhaltsspezifische Feinheiten, die uns bisher entgangen sind und zu Lernschwierigkeiten führen - oder im günstigen positiven Fall erfolgreiche Anknüpfungsmöglichkeiten bieten -, könnten damit besser als bisher möglich als Voraussetzung für die Entwicklung erfolgreicherer Unterrichtskonzepte aufgedeckt werden. Das ist sicherlich ein sehr aufwändiges Arbeitsprogramm, das die Didaktik der Physik aber für den nächsten großen Schritt zu einer Steigerung des Lernerfolgs des Physikunterrichts leisten sollte.

7. Literatur

- [1] Grimsehl, E. (1911): Didaktik und Methodik der Physik. Beck'sche Verlagsbuchhandlung, München
- [2] A Private Universe. Minds of our own. Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, 1987
- [3] Wiesner, H., Engelhardt, P., Herdt, D.: Unterricht Physik, Optik I (1993), Optik II (1996), Aulis Verlag Deubner, Köln
- [4] Herdt, D. (1990): Einführung in die elementare Optik. Vergleichende Untersuchung eines neuen Lehrgangs. Westarp, Essen
- [5] Aschauer, W. (2016): Elektrische und magnetische Felder – eine empirische Studie zu Lernprozessen in der Sekundarstufe II. Dissertation, Universität Wien
- [6] In der Bibliographie zu Schülervorstellungen von Pfundt und Duit waren 2009 mehr als 8440 Arbeiten zu Schülervorstellungen registriert: <http://archiv.ipn.uni-kiel.de/stcse/>. (Stand 6/2018) Eine weitere Zusammenstellung und Hinweise für den Umgang mit den Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten im Unterricht ist: R. Driver, A. Squires, P. Rushworth: Making Sense of Secondary Science: Research into children's ideas. Routledge, mehrere Auflagen
- [7] Bader, M. (2001): Vergleichende Untersuchung eines neuen Lehrganges „Einführung in die mechanische Energie und Wärmelehre“, Dissertation Universität München
- [8] Müller, R. (2003): Quantenphysik in der Schule. Logos, Berlin; Das Projekt milq ist aufrufbar unter: <http://milq.tu-bs.de/>
- [9] Schorn, B. (2014): Quantenphysik in der Schule. Eine Unterrichtskonzeption zur Einführung in die Quantenphysik für die 10. Jahrgangsstufe. Dissertation TU Dresden
- [10] Hopf, M., Wiesner, H. (2007): Paradigmen für physikdidaktische Forschung – ein Rück- und Ausblick: Physikdidaktik und Design Based Research. In: S. Kolling (Hrsg.): Beiträge zur Experimentalphysik, Didaktik und computer-gestützten Physik. Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr. Hans-Josef Patt. Logo, Berlin, S. 37-57; auch: Design-Based Research Collective: Design-based Research: an emerging paradigm for educational inquiry. Educational Researcher 32 (2003), S. 5-8
- [11] Wiesner, H., Tobias, V., Waltner, C., Hopf, M., Wilhelm, Th., Sen, A. (2010): Dynamik in den Mechanikunterricht. Vortrag auf der Jahresversammlung des FA Didaktik der DPG, Hannover
- [12] Wiesner, H., Wilhelm, Th., Waltner, C., Tobias, V., Rachel, A., Hopf, M. (2011): Mechanik I: Kraft und Geschwindigkeitsänderung; Wilhelm, T., Wiesner, H., Hopf, M., Rachel, A. (2013): Mechanik II: Dynamik, Erhaltungssätze, Kinematik, Aulis Verlag
- [13] Tobias, V. (2010): Newton'sche Mechanik im Anfangsunterricht. Die Wirksamkeit einer Einführung über die zweidimensionale Dynamik auf das Lehren und Lernen. Logos, Berlin
- [14] Hopf, M., Wilhelm, Th., Wiesner, H., Tobias, V., Waltner, C. (2013): Mit der Zweiten lernt man mehr. Ein dynamisches Unterrichtsmodell bietet einen zweidimensionalen Zugang zur Mechanik und zeigt viele Erfolge. Physik Journal 12 (2013), Nr. 1, S. 35-38
- [15] Chi, M., Slotta, J., de Leeuw, N. (1994): From things to processes: A theory of conceptual change for learning science concepts. Learning and Instruction, pp.27-43
- [16] Vosniadou, S. (1994): Capturing and modelling the process of conceptual change. Learning and Instruction, Vol. 4, S.45-69
- [17] Vosniadou, S., Skopeliti, I. (2014): Conceptual change from the Framework Theory Side of the Fence. Science and Education 23, S.1427-1445
- [18] diSessa, A. (1988): Knowledge in Pieces. In: G. Forman, P. Putfall (Eds.): Constructivism in the Computer Age, Hillsdale, Lawrence Erlbaum Publishers, S. 49-70
- [19] diSessa, A. (1993): Toward an Epistemology of Physics. Cognition and Instruction 10, S. 105-225
- [20] Späth, S. (2009): Überarbeitung und empirische Untersuchung eines Unterrichtskonzeptes zur Einführung in die Elektrizitätslehre. Zulassungsarbeit Universität München
- [21] Burde, J.-P. (2018): Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzeptes zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells. Dissertation Universität Frankfurt
- [22] Burde, J.-P., Wilhelm, Th. (2018): Einfache Stromkreise mit Potenzial. Physik Journal 17, Nr. 5, S. 27-30
- [23] Ozdimir, O. (2013): Transfer and conceptual change: the change process from the theoretical perspectives of coordination classes and phenomenological primitives. Instr. Sci, 41, S. 81-103
- [24] diSessa, A., Wagner, J. (2005): What Coordination has to say about Transfer. In: Transfer of Learning from a Modern Multidisciplinary Perspectives, edited by J. Mestre, p. 121-154
- [25] diSessa, A., Sherin, B. (1998): What changes in conceptual change? Int. J. Sci. Educ., 20, p. 1155-1191
- [26] Jung, W., Reul, H., Schwedes, H. (1977): Untersuchungen zur Einführung in die Mechanik in den Klassen 3-6. Diesterweg, Frankfurt am Main

[27] Dieses "reine" Phänomen hat W. Jung in seiner „Mechanik für die Sekundarstufe I“ (Diesterweg, Frankfurt am Main, 1980) als Schlüsselphänomen vorgeschlagen. Die Simulation hat A. Rachel programmiert.

(*) Erweiterte Fassung eines Beitrags für das Physik Journal, basierend auf einem Vortrag anlässlich der Auszeichnung mit dem Robert-Wichard-Pohl-Preis 2018.

Qualitative Schulbuchanalyse zum Thema Linsenabbildung

Sascha Grusche*

*Didaktik der Physik, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden
sascha.grusche@tu-dresden.de

Kurzfassung

Schulbücher bilden eine Brücke zwischen Lehrplan und Unterricht. An ihnen lassen sich lehrplan-konforme und unterrichtstypische Zugänge zu einem gegebenen Thema ablesen. Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, schulbuchgemäße Zugänge zur Linsenabbildung herauszuarbeiten. Es wird qualitativ analysiert, wie das Phänomen des Linsenbildes und das Modell des Strahls zueinander in Bezug gesetzt werden. Dementsprechend werden die Schritte der phänomenologischen Methode und der verallgemeinerten Modellmethode als Analyseraster auf die Strukturelemente der Schulbücher gelegt. Bei der Kategorisierung der nahegelegten Lernhandlungen und bei der diagrammatischen Darstellung der vorgesehenen Lernwege werden einige Schwachpunkte deutlich. Der schulbuchgemäße Zugang zur Linsenabbildung sollte dementsprechend umstrukturiert, ergänzt oder ersetzt werden.

1. Einleitung

Kinder erleben Linsenabbildung täglich—beim Sehen, Fotografieren und Filmen. Deshalb entwickeln sie Vorstellungen zur Linsenabbildung, noch ehe sie dazu unterrichtet werden.

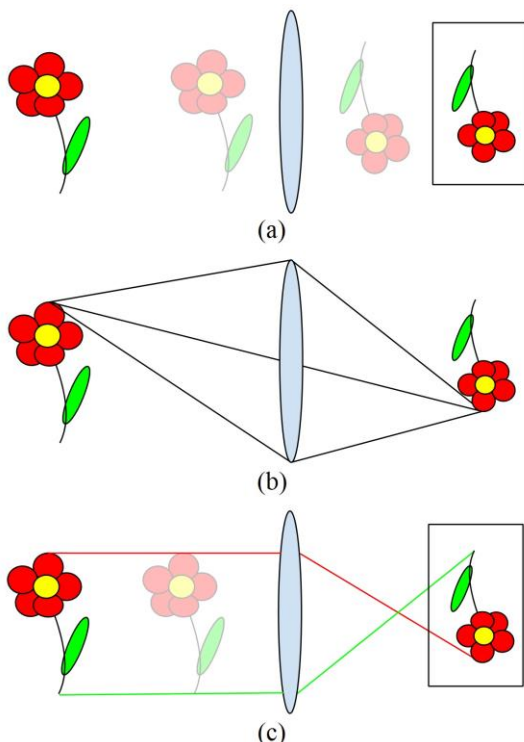


Abb. 1: Vorstellungen zur Linsenabbildung. (a) Holistische, (b) analytische, (c) hybride Denkfigur.

Vor dem Optikunterricht nutzen viele Lernende eine bildbezogene, *holistische Denkfigur* (Abb. 1(a)): Sie stellen sich vor, dass vom Gegenstand her ein vollständiges Bild kommt und durch die Linse bis zum Auffangschirm geht [1-4].

Im Optikunterricht vermittelt die Lehrperson eine strahlenbezogene, *analytische Denkfigur* [1-4] (Abb. 1(b)). Demnach divergieren von jedem einzelnen Gegenstandspunkt unzählige Strahlen, die auf Grund der Linse in einem entsprechenden Bildpunkt konvergieren [5].

Nach dem Unterricht nutzen viele Lernende eine Mischung aus ihrer holistischen und der analytischen Denkfigur (Abb. 1(c)): Sie stellen sich vor, dass das Bild als Ganzes vom Gegenstand durch die Linse zum Schirm geht, und dass dabei jeder Bildpunkt von je einem Strahl getragen wird [1-4].

Aus fachlicher Sicht ist diese *hybride Denkfigur* [1-4] in doppelter Hinsicht falsch:

- Es kommt zu einem Fehlbezug zwischen Bildpunkten und Strahlen.
- Der geometrische Strahl wird als körperhafter Lichtbestandteil fehlgedeutet.

Aus Sicht der Lernenden ist die hybride Denkfigur nutzlos und verwirrend: Eine korrekte Vorhersage von Bildeigenschaften ist nicht möglich und der Bezug zum Wellen- und Teilchencharakter des Lichts bleibt unklar.

Aus didaktischer Sicht entsteht die hybride Denkfigur im Wechselspiel zwischen vorunterrichtlichen Vorstellungen und unterrichtlichen Lernhandlungen. Somit trägt der herkömmliche Optikunterricht zu den Lernschwierigkeiten und Fehlvorstellungen bei.

Deshalb wollen wir herausfinden, wie herkömmlicher Unterricht zur Linsenabbildung abläuft. Hierfür analysieren wir Schulbücher, denn Lehrpersonen gestalten die Unterrichtsstruktur oft in Anlehnung an die Schulbuchstruktur (Abschnitt 2).

Bei unserer Analyse von gymnasialen Schulbüchern [6-11] zum Thema Linsenabbildung (Abschnitt 3) lautet die **Hauptfrage:**

Wie werden das *Phänomen des Bildes* und das *Modell des Strahls* aufeinander bezogen?

Dementsprechend lauten unsere **Teilfragen**:

1. Welche Arten von phänomenbasierten oder modellorientierten Lernhandlungen werden in den Schulbüchern nahegelegt?
2. Welche Abfolge von Lernhandlungen wird durch die Struktur der Schulbücher nahegelegt?

Auf Grundlage der Analyseergebnisse (Abschnitt 4) werden wir diskutieren, wie schulbuchgemäßer Optikunterricht zu Lernschwierigkeiten und Fehlvorstellungen beiträgt (Abschnitt 5). Sobald wir die lernhinderlichen Unterrichtselemente erkannt haben, können wir sie durch lernförderliche ersetzen (Abschnitt 6).

2. Strukturelemente eines Schulbuches

„Die einzelnen Buchabschnitte haben eine Gliederung ähnlich wie eine Schulstunde: Motivation und Problemstellung am Anfang, Versuch und Versuchsauswertung im Mittelpunkt, daraus hergeleitet das Ergebnis (die Problemlösung), schließlich Anwendung und Übung.“ ([12], S. 28).

Die Struktur eines Schulbuchs besteht aus folgenden Elementen: Leiteinrichtungen, Text, Abbildungen, Experimentierangaben, Tabellen, Merkstoff und Aufgaben [12].

Leiteinrichtungen umfassen das Inhaltsverzeichnis, das Register und Überschriften ([12], S. 24). Das Inhaltsverzeichnis dient dem Überblick über die Gesamtstruktur ([12], S. 24).

Text dient dazu,

„den gesamten Unterrichtsstoff umfassend darzustellen. Dazu gehören Beobachtungen, Phänomene, Gesetze, Theorien der Physik und ihrer Nachbardisziplinen. Der gedankliche Weg zu den Gesetzen wie auch Folgerungen und Anwendungen, die sich aus ihnen ergeben, sollen deutlich werden.“ ([12], S. 17)

Abbildungen umfassen Fotografien und bildhafte Zeichnungen, schematische Zeichnungen sowie Diagramme ([12], S. 18).

- Fotos und bildhafte Zeichnungen verweisen meist auf Alltags-Situationen oder experimentelle Unterrichtsphasen ([12], S. 20).
- Schematische Zeichnungen stellen oft Schulerperimente oder Modellvorstellungen dar ([12], S. 21). Sie „leisten [...] einen Beitrag im Lernprozeß zu fachspezifischer Kodierung und Abstraktion“ ([12], S. 20), also auch zur Modellierung.
- Diagramme stellen mathematische Funktionen dar ([12], S. 21).

Experimentierangaben umfassen Anleitungen zu Schülerversuchen und Schilderungen von Demonstrationsversuchen ([12], S. 22).

Tabellen dienen der Fakten-Auflistung ([12], S. 21-22).

Merkstoff ist im Text meist hervorgehoben und dient der Formulierung von Gesetzen, der Erklärung von Begriffen oder der Zusammenfassung ([12], S. 22).

Aufgaben zur Ergebnissicherung befinden sich meist am Ende eines Abschnitts oder Kapitels ([12], S. 23).

3. Vorgehen bei der Schulbuchanalyse

Als Analysematerial wurden gymnasiale Schulbücher verwendet, die laut Bildungsstandards aktuell in Baden-Württemberg zugelassen sind:

- *Dorn-Bader Physik* [6]
- *Duden Physik* [7]
- *Fokus Physik* [8]
- *Impulse Physik* [9]
- *Spektrum Physik* [10]
- *Universum Physik* [11]

Bei der Qualitativen Inhaltsanalyse [15] der Schulbücher wurden die Schritte der Zusammenfassung, Explikation und Strukturierung umgesetzt.

3.1. Zusammenfassung

Bei der *Zusammenfassung* [15] wurden die verschiedenen Strukturelemente [12] des jeweiligen Schulbuches dem Lesefluss folgend einzeln bearbeitet.

- *Paraphrasiert* wurden Text und Experimentierangaben.
- *Wörtlich übernommen* wurden Kapitel- und Abschnitts-Überschriften, Merkstoff sowie Abbildungs-Unterschriften und Tabellen-Überschriften, stellenweise auch Text oder Experimentierangaben.

Ausgelassen wurden Aufgaben und Experimentierangaben *nach diesbezüglich zusammenfassendem Merkstoff*, denn sie dienen weder der Einführung noch der Erarbeitung und sind somit nicht charakteristisch für den didaktischen Zugang.

Ausgelassen wurden ebenso Buchabschnitte über das Auge und andere *komplexe Linsensysteme* wie Fernrohr, Mikroskop, Kamera und Projektor, denn in den Schulbüchern folgen sie erst nach den Grundlagen zur Linsenabbildung und ändern somit nichts am grundsätzlichen Zugang zur Linsenabbildung.

3.2. Explikation

Eine *Explikation* [15] erfolgte vor allem für Abbildungen und Tabellen, da sie erläuterungsbedürftig sind. Die Erläuterung erfolgte vor dem Hintergrund des zugehörigen Schulbuchtextes, und zwar aus kritischer, fachlicher Sicht.

3.3. Strukturierung

Bei der *Strukturierung* [15] kam es auf den schulbuchgemäßen Zusammenhang zwischen dem *Phänomen* des Bildes und dem *Modell* des Strahls an. Dementsprechend wurden die phänomenologische Methode [13] und die verallgemeinerte Modellmethode [14] als Analyseraster genutzt.

Die *phänomenologische Methode* [13] besteht aus vier Schritten (P1-P4), deren Schwerpunkt in der Phänomenwelt liegt: Alltagsnahe Erscheinungen beschreiben (P1); Erscheinungen experimentell abwandeln (P2); Erscheinungsweisen geordnet darstellen (P3); Ausgewählte Zusammenhänge formal beschreiben (P4).

Die *verallgemeinerte Modellmethode* [14] besteht aus vier Schritten (M0-M3), deren Schwerpunkt in der Modellwelt liegt: Phänomen beobachten (M0); Modell entwickeln (M1); Modell anwenden (M2); Modell bewerten (M3).

Durch Zusammenführung beider Methoden wurde ein grobes Analyseraster erstellt (Tab. 1).

Kategorie	Definition
P1	Alltagsnahe Erscheinungen beschreiben
P2	Erscheinungen experimentell abwandeln
P3	Erscheinungsweisen geordnet darstellen
P4	Ausgewählte Zusammenhänge formal beschreiben
M1	Modell entwickeln
M2	Modell anwenden
M3	Modell bewerten

Tab. 1: Hauptkategorien von Lernhandlungen.

Zur Herausarbeitung von Lernhandlungen wurde dieses Kategoriensystem auf das zusammengefasste und explizierte Schulbuchmaterial angewandt. Jedem Strukturelement wurde mindestens eine der Hauptkategorien zugeordnet (z.B. P1), und für die schulbuchgemäßen Lernhandlungen wurden Unterkategorien gebildet (z.B. P1L1 und P1L2).

Zur Darstellung schulbuchgemäßer Lernwege wurden die Lernhandlungen in ein Koordinatensystem eingetragen: Die horizontale Achse gibt die Abfolge der Strukturelemente an, die vertikale Achse stellt die Kategorien P1-M3 dar.

4. Ergebnisse

4.1. Schulbuchgemäße Lernhandlungen

Insgesamt liefern die Schulbücher vielfältiges Material für phänomenbasierten [16] und modellorientierten Unterricht [14] zur Linsenabbildung (Tab. 2-8).

Kategorie	Definition	Ankerbeispiel
P1L1	Lichtfleck mit Linse im Sonnenlicht erzeugen	„Mit einer Linse kann man Sonnenlicht in einem Punkt bündeln.“ ([11], S. 72)
P1L2	Linse oder Wassertropfen als Lupe nutzen	„Die ‚Flohlupe‘ [...] war ein notwendiger Gebrauchsgegenstand.“ ([9], S. 65)

Tab. 2: Lernhandlungen zur Beschreibung von alltagsnahen Erscheinungen der Linsenabbildung.

Kategorie	Definition	Ankerbeispiel
P2L1	Ausgedehnte Lichtquelle unscharf abbilden	„Wird hinter das Loch im Vorhang eine Sammellinse gehalten, so wird das Bild heller, aber in den meisten Fällen auch undeutlicher.“ ([10], S. 79)
P2L2	Ausgedehnte Lichtquelle scharf abbilden	„Mit einer Sammellinse erzeugen wir [...] das Bild einer brennenden Kerze.“ ([9], S. 70)
P2L3	Punktförmige Lichtquelle(n) mit großer Lochblende abbilden	„Eine Lochkamera bildet jeden Lichtpunkt als kleinen Bildfleck ab.“ ([8], S. 60)
P2L4	Punktförmige Lichtquelle(n) unscharf abbilden	„Der Glühdraht stellt annähernd eine punktförmige Lichtquelle dar. [...] Stelle den Schirm dicht hinter die Linse und schiebe ihn langsam weg. Wie verändert sich der Lichtfleck?“ ([8], S. 59)
P2L5	Punktförmige Lichtquelle(n) scharf abbilden	„Erzeuge mit einer Sammellinse das Bild einer kleinen Glühlampe.“ ([8], S. 59)
P2L6	Durch Linse schauen	„Ein Betrachter sieht allerdings beim Blick durch die Linse virtuelle Bilder, [...]“ ([9], S. 73)
P2L7	Linse teilweise abdecken	„Dann wird die obere Hälfte der Linse mit einem undurchsichtigen Gegenstand abgedeckt.“ ([9], S. 70)
P2L8	Breites Lichtbündel durch Zylinderlinse lassen	„Zur genauen Betrachtung ist es zweckmäßig, das [breite] Lichtbündel mit geeigneten Blenden in schmalere Teilbündel zu zerlegen.“ ([10], S. 77)
P2L9	Schmale(s) Lichtbündel durch Zylinderlinse lassen	„Wir lassen schmale Lichtbündel mit parallelen Begrenzungen aus verschiedenen Richtungen auf eine Linse treffen und beobachten die Lichtwege.“ ([9], S. 66)

Tab. 3: Lernhandlungen zur experimentellen Abwandlung von Erscheinungen der Linsenabbildung.

Kategorie	Definition	Ankerbeispiel
P3L1	Qualitative Zusammenhänge zwischen Messgrößen formulieren	„Je kleiner die Gegenstandsweite ist, desto größer ist das Bild.“ ([11], S. 73)
P3L2	Abbildungsfälle unterscheiden	„Die Tabelle [...] zeigt, dass es dabei ganz besondere Abbildungsfälle für spezielle Werte von g und b gibt.“ ([10], S. 79)

Tab. 4: Lernhandlungen zur übersichtlichen Darstellung von Erscheinungsweisen der Linsenabbildung.

Kategorie	Definition	Ankerbeispiel
P4L	Formel aus Messergebnissen herleiten	„Messungen [...] ergeben die Werte in Tabelle 3. Ein Vergleich der Quotienten $b : g$ und $B : G$ zeigt, dass beide etwa gleich sind. Es gilt das Abbildungsgesetz: $B/G = b/g = A$ [...]. Werden [...] die Abstände vom Gegenstand bzw. Bild zum Brennpunkt betrachtet [...], so folgt mit denselben Messwerten die [...] Beziehung: $(g - f) \cdot (b - f) = f^2$ “ [9], S. 73)

Tab. 5: Lernhandlungen zur formalen Beschreibung von ausgewählten Zusammenhängen bei der Linsenabbildung.

Kategorie	Definition	Ankerbeispiel
M1L1	Schmale Lichtbündel als Strahlen denken	„Wir denken uns schmale Lichtbündel als Lichtstrahlen.“ ([11], S. 73)
M1L2	Ausgezeichnete Strahlen definieren	„Ein Parallelstrahl wird so gebrochen, dass er dann durch den Brennpunkt verläuft. [...] Ein Brennpunktstrahl wird so gebrochen, dass er dann parallel zur optischen Achse verläuft. [...] Ein Mittelpunktstrahl geht ungebrochen durch eine Sammellinse.“ ([7], S. 112)

Tab. 6: Lernhandlungen zur Entwicklung des Strahlenmodells an der Linse.

Kategorie	Definition	Ankerbeispiel
M2L1	Lichtausbreitung beschreiben	„Wir betrachten einen Lichtstrahl, der auf eine Glaskugel trifft [...].“ ([9], S. 68)
M2L2	Bildentstehung erklären / vorhersagen	„Mithilfe von Parallelstrahl, Brennstrahl und Mittelpunktstrahl lässt sich das bei einer Linse entstehende Bild ganz leicht konstruieren.“ ([10], S. 77)
M2L3	Formel aus Strahlenkonstruktion herleiten	„Aus dieser Konstruktion des optischen Bilds wird die Linsengleichung hergeleitet.“ ([6], S. 160)

Tab. 7: Lernhandlungen zur Anwendung des Strahlenmodells an der Linse.

Kategorie	Definition	Ankerbeispiel
M3L	Ausgezeichnete Strahlen als reine Konstruktionslinien einstufen	„Dabei spielt es keine Rolle, ob die eingezeichneten Lichtstrahlen überhaupt die Linse treffen oder nicht, denn es handelt sich nur um Hilfslinien zur Konstruktion.“ ([11], S. 73)

Tab. 8: Lernhandlungen zur Bewertung des Strahlenmodells an der Linse.

4.2. Schulbuchgemäße Unterrichtsgänge

In den einzelnen Schulbüchern sind die verschiedenen Arten von Lernhandlungen ansatzweise so angeordnet, dass ein Übergang von optischen Phänomenen zum Strahlenmodell stattfindet (Abb. 2-7).

Der Schwerpunkt liegt meist in der Modellwelt. Besonders modell-lastig sind der *Dorn-Bader* [6], der *Duden* [7] und die *Impulse* [9], siehe Abbildungen 2, 3 und 5.

Gemäß allen Schulbüchern—außer *Fokus Physik* [8]—sollen zunächst schmale Lichtbündel verwendet werden, um den Strahlenverlauf durch die Linse zu untersuchen. Danach sollen der Brennpunktstrahl, Mittelpunktstrahl und Parallelstrahl genutzt werden, um Bildpunkte als Strahlenschnittpunkte zu konstruieren.

Nur im *Fokus*-Schulbuch [8] wird die Strahlengeometrie auf Grundlage des erzeugten Bildes erarbeitet: In Experimentierangaben wird der Mittelpunktstrahl als geradlinige Verbindung zwischen Gegenstands- und Bildpunkt eingeführt; in schematischen Zeichnungen werden Randstrahlen als Verbindungen zum Linsenrand angedeutet, vgl. [19].

M3	M3L	
M2	M2L3	
	M2L2	
	M2L1	
M1	M1L2	
	M1L1	
P4	P4L	
P3	P3L2	
	P3L1	
P2	P2L9	
	P2L8	
	P2L7	
	P2L6	
	P2L5	
	P2L4	
	P2L3	
	P2L2	
	P2L1	
P1	P1L2	
	P1L1	

Abb. 2: Unterrichtsgang gemäß Dorn-Bader [6].

M3	M3L	
M2	M2L3	
	M2L2	
	M2L1	
M1	M1L2	
	M1L1	
P4	P4L	
P3	P3L2	
	P3L1	
P2	P2L9	
	P2L8	
	P2L7	
	P2L6	
	P2L5	
	P2L4	
	P2L3	
	P2L2	
	P2L1	
P1	P1L2	
	P1L1	

Abb. 3: Unterrichtsgang gemäß Duden [7].

M3	M3L	
M2	M2L3	
	M2L2	
	M2L1	
M1	M1L2	
	M1L1	
P4	P4L	
P3	P3L2	
	P3L1	
P2	P2L9	
	P2L8	
	P2L7	
	P2L6	
	P2L5	
	P2L4	
	P2L3	
	P2L2	
	P2L1	
P1	P1L2	
	P1L1	

Abb. 4: Unterrichtsgang gemäß Fokus [8].

M3	M3L	
M2	M2L3	
	M2L2	
	M2L1	
M1	M1L2	
	M1L1	
P4	P4L	
P3	P3L2	
	P3L1	
P2	P2L9	
	P2L8	
	P2L7	
	P2L6	
	P2L5	
	P2L4	
	P2L3	
	P2L2	
	P2L1	
P1	P1L2	
	P1L1	

Abb. 5: Unterrichtsgang gemäß Impulse [9].

M3	M3L	
M2	M2L3	
	M2L2	
	M2L1	
M1	M1L2	
	M1L1	
P4	P4L	
P3	P3L2	
	P3L1	
P2	P2L9	
	P2L8	
	P2L7	
	P2L6	
	P2L5	
	P2L4	
	P2L3	
	P2L2	
	P2L1	
P1	P1L2	
	P1L1	

Abb. 6: Unterrichtsgang gemäß Spektrum [10].

M3	M3L	
M2	M2L3	
	M2L2	
	M2L1	
M1	M1L2	
	M1L1	
P4	P4L	
P3	P3L2	
	P3L1	
P2	P2L9	
	P2L8	
	P2L7	
	P2L6	
	P2L5	
	P2L4	
	P2L3	
	P2L2	
	P2L1	
P1	P1L2	
	P1L1	

Abb. 7: Unterrichtsgang gemäß Universum [11].

5. Diskussion

Anhand der schulbuchgemäßen Lernhandlungen und Lernwege wollen wir nun diskutieren, wie herkömmlicher Unterricht zu Lernschwierigkeiten und Fehlvorstellungen beiträgt.

5.1. Brennpunkt statt Sonnenbild

Bei einer Linse im Sonnenschein wird die Erscheinung in der Brennebene als heller Fleck, helle Stelle, oder sogar als Punkt bezeichnet:

„Lenke Sonnenlicht durch eine [...] Linse auf ein Blatt Papier. [...] In einem bestimmten Abstand zwischen Linse und Papier entsteht ein sehr kleiner, heller **Fleck** [Herv. SG].“ ([9], S. 66)

„Hält man ein Brennglas geschickt in die Sonne, dann kann man damit ein Stück Papier entzünden [...]. [...] Brenngläser gehören zu den Sammellinsen. [...] Sammellinsen lenken durch Brechung alle zur Achse parallelen Lichtstrahlen ungefähr durch einen **Punkt** [Herv. SG] auf der anderen Seite der Linse.“ ([6], S. 156)

„Fallen Lichtbündel auf einen solchen Glaskörper [wie die Lupe], so wird das Licht gebündelt und es entsteht eine **Stelle** [Herv. SG], die besonders hell ist. [...] Durch eine Lupe wird also ein Lichtbündel so gebrochen, dass es hinter dem Glaskörper in einem **Punkt** [Herv. SG] zusammenläuft, gesammelt wird.“ ([10], S. 76)

„Mit einer Linse kann man Sonnenlicht in einem **Punkt** [Herv. SG] bündeln.“ ([11], S. 72)

„Mit einem Brennglas kannst du Papier ‚ankokeln‘. In einem bestimmten Abstand wird jedes parallele Lichtbündel im **Brennpunkt** [Herv. SG] zusammengeführt.“ ([8], S. 60)

„Bei intensivem Licht kann sich an diesem **Punkt** [Herv. SG], in dem das Licht gebündelt wird, ein Gegenstand entzünden.“ ([7], S. 101)

Dass es sich um ein Abbild der Sonne handelt, wird nicht erwähnt. Somit wird von Anfang an kein klarer Zusammenhang zwischen Strahlen und Bild hergestellt.

5.2. Konfrontation statt Anknüpfung

Ein schulbuchgemäßer Unterrichtsgang geht weniger von eigenen Bild-Beobachtungen der Lernenden aus, sondern vielmehr von Keplers [5] strahlenoptischer Theorie. Dadurch wird kaum an die holistische Denkfigur angeknüpft; die Lernenden werden mit der analytischen Denkfigur konfrontiert.

5.2.1. Theorie vor Experiment

Im *Duden*-Physikbuch wird die fertige Theorie mit fertiger Strahlenzeichnung schon vor jeglichem Experiment geliefert:

„Licht, das von einem Gegenstandspunkt P ausgeht und durch eine Sammellinse fällt, trifft hinter der Linse in einem Bildpunkt P' zusammen. Bringt man an diese Stelle einen Schirm, so erhalten wir ein scharfes Bild des Gegenstandspunktes bzw. des ganzen Gegenstands.“ ([7], S. 112)

Hier kommt Keplers Theorie der Linsenabbildung [5] wie aus dem Nichts.

5.2.2. Sprung vom Phänomen zum Modell

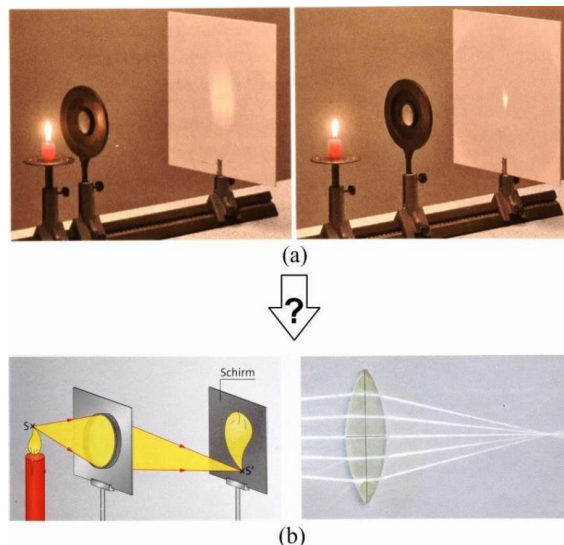


Abb. 8: Gedankenprung vom ganzen Linsenbild zum einzelnen Strahlenbündel. (a) Beobachtungen eines unscharfen und scharfen Kerzenabbildes. Bildzitat (gemäß § 51 UrhG) aus [11], S. 70. (b) Theorie der Punkt-zu-Punkt-Abbildung durch beidseitige Lichtkegel. Bildzitat (gemäß § 51 UrhG) aus [11], S. 71.

In vielen Schulbüchern geht es zwar zunächst um die Beobachtung von Linsenbildern, aber in vier der sechs analysierten Bücher [8-11] erfolgt dann ein gedanklicher Sprung zu Lichtkegeln. Die Vorstellung von Lichtkegeln ist im Experiment kaum darstellbar; sie wird deshalb durch schematische Zeichnungen (Abb. 8) und Text vermittelt:

„Linsen erzeugen Bilder, indem sie das Licht, das von einem Gegenstandspunkt auf sie trifft, in einem Bildpunkt vereinigen.“ ([11], S. 71)

„Alles Licht, das von einem Punkt P der Kerzenflamme auf die Linse fällt, wird von dieser im Punkt P' gesammelt.“ ([10], S. 79-80)

Der Zusammenhang zwischen dem ganzen Bild und einzelnen Lichtkegeln ist aus der holistischen Sicht der Lernenden [1-4] nicht unmittelbar nachvollziehbar:

- Der Gegenstand soll gedanklich in *leuchtende Punkte* zerlegt werden (dies fällt vielen Lernenden besonders schwer [17,18]),
- es soll angenommen werden, dass jeder Gegenstandspunkt *kegelförmig* zur Linse leuchtet (dies ist grundsätzlich nicht beobachtbar);
- ebenso soll das ganze Bild in *einzelne Punkte* zerlegt werden (dies widerspricht der holistischen Denkfigur [1-4] der Lernenden),
- und es soll angenommen werden, dass zu jedem Bildpunkt ein *Lichtkegel* führt (dies wäre nur bei Nutzung einer punktförmigen Lichtquelle in einem vernebelten Raum zu sehen).

Es fehlen Zwischenschritte, die von der Beobachtung des ganzen Bildes zur Vorstellung von einzelnen Strahlenkegeln führen. Damit die Lernenden von ihrem alltäglichen Standpunkt zum wissenschaftlichen Standpunkt gelangen, müssen sie also einen großen Sprung machen.

5.2.3. Strahlen vor Bildpunkten

Nicht ganz so groß ist der Gedankensprung, wenn man erst die Strahlenverläufe an der Linse untersucht und dann das Bild einer Punktlichtquelle als Strahlenschnittpunkt deutet:

„Die drei **ausgezeichneten Strahlenverläufe** sind: **a)** achsenparalleler Strahl \rightarrow Brennpunktstrahl **b)** Brennpunktstrahl \rightarrow achsenparalleler Strahl **c)** Mittelpunktstrahl bleibt Mittelpunktstrahl [...] Nach *Versuch 1* schneiden sich alle von einem Punkt A ausgehenden Lichtstrahlen, die durch die Linse gehen, hinter der Linse in einem Punkt A'. An dieser Stelle muss der Schirm stehen, damit A scharf abgebildet wird. Die maßstäbliche Zeichnung verdeutlicht, dass unter den Lichtstrahlen, die sich im Bildpunkt A' schneiden, auch die drei ausgezeichneten Strahlen sind.“ ([6], S. 157-158, Herv. im Original)

In diesem Fall wird der Strahlengang an der Linse erarbeitet, bevor ein Verständnis der Linsenabbildung angestrebt wird. Dieses Vorgehen entspricht jedoch nicht der ganzheitlichen Sicht [1-4] der Lernenden, sondern der analytischen Sicht [5] von Johannes Kepler.

5.3. Vertauschung von Phänomen und Modell

In allen Schulbüchern—bis auf eins [8]—wird das Strahlenmodell durch schmale Lichtbündel zum Phänomen gemacht; im Gegenzug muss das ursprüngliche Phänomen des Bildes hinzugedacht werden.

5.3.1. Das Lichtbündel als Anschauungs-Modell

In fünf der sechs analysierten Schulbücher werden die Strahlen bei Linsenversuchen nicht nur hinzugedacht, sondern durch schmale Lichtbündel angeblich auch beobachtbar gemacht (Abb. 9):

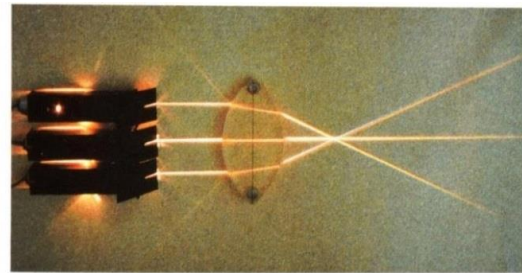
„Wir lassen schmale Lichtbündel mit parallelen Begrenzungen aus verschiedenen Richtungen auf eine Linse treffen und beobachten die Lichtwege.“ ([9], S. 66)

„Um Bildpunkte bei Linsen leicht konstruieren zu können, [...] denken [wir] uns schmale Lichtbündel als Lichtstrahlen.“ ([11], S. 73)

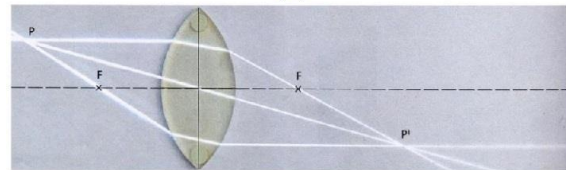
Aus didaktischer Sicht handelt es sich um ein *Anschauungs-Modell*: Die Lehrperson nutzt die schmalen Lichtbündel, um das *Denkmodell* der Strahlen zu veranschaulichen.

Aus Sicht der Lernenden erscheinen die Lichtbündel jedoch nicht als Modell, sondern als Phänomen. Wenn Lernende die schmalen Lichtbündel als Strahlen denken sollen, deuten sie Strahlen oft als Lichtbestandteile fehl [3]—zumal die Unterrichtssprache diese Fehldeutung nahelegt: In vielen Schulbüchern

ist von Strahlen die Rede, die von einem Gegenstandspunkt *ausgehen*, dann die Linse *treffen*, dort *eintreten* und *hindurchgehen*.



(a)



(b)

Abb. 9: Feine Lichtbündel an der Zylinderlinse. Bildzitate (gemäß § 51 UrhG) aus (a) [7], S. 101, und (b) [11], S. 72.

5.3.2. Das Lichtbündel als Ersatz-Phänomen

Aus fachlicher Sicht sind die schmalen Lichtbündel auf der Tafel oder dem Tisch eigentlich Schattenbilder der durchleuchteten Spaltblenden. Das ursprüngliche Phänomen des konkreten Bildes eines Gegenstandes wird somit ersetzt durch das modellhafte Phänomen abstrakter Spaltbilder. Die Spaltbilder werden im Schulbuch aber nicht als solche, sondern als Lichtbündel bezeichnet.

Das Strahlenmodell wird also anhand verkappter Spaltbilder in die Phänomenwelt geholt; gleichzeitig wird das Phänomen der Linsenabbildung anhand eines theoriebeladenen Versuchsaufbaus in die Modellwelt entrückt (Abb. 9):

- Ein *einzelner* Gegenstandspunkt wird anhand *mehrerer* Spaltleuchten modelliert,
- der Querschnitt einer *sphärischen* Linse wird als *zylindrische* Linse modelliert,
- das Bild eines *punktförmigen* Gegenstands wird als Schnittpunkt von *linienförmigen* Spaltbildern modelliert.

Während die Lehrperson die Lichtwege *veranschaulicht*, müssen sich die Lernenden den Gegenstand, dessen Bild und die dritte Dimension der Linse *hinzudenken*.

Hierbei sind Fehlzuordnungen zwischen Gegenstandspunkt, Strahlen und Bildpunkt fast unvermeidbar, denn die Lehrperson modelliert die Leuchtwirkung eines einzelnen Gegenstandspunkts anhand mehrerer Spaltleuchten:

- Für einen *unendlich fernen* Gegenstandspunkt verlaufen die Strahlen vor der Linse ungefähr parallel. Dementsprechend muss die Lehrperson die Spaltleuchten parallel zueinander ausrichten. Sie erzeugt somit mehrere

Lichtbündel, die vor der Linse parallel zueinander verlaufen und hinter der Linse sich annähernd im Brennpunkt schneiden (Abb. 9(a)). In diesem Fall befindet sich jede der Spaltleuchten wesentlich näher an der Linse als der darzustellende Gegenstandspunkt.

- Für einen *nahen Gegenstandspunkt* verlaufen die Strahlen vor der Linse divergent. Um dies mit den Spaltleuchten darstellen zu können, muss die Lehrperson die Lichtbündel zunächst zum angedachten Gegenstandspunkt hin konvergieren lassen, ehe sie zur Linse hin divergieren (Abb. 9(b)). In diesem Fall ist jede der Spaltleuchten ferner von der Linse als der darzustellende Gegenstandspunkt.

In beiden Fällen nutzt die Lehrperson mehrere Spaltleuchten, um mehrere Strahlen von *ein und demselben Gegenstandspunkt* zu veranschaulichen.

Aus Sicht der Lernenden liegt es jedoch nahe, unterschiedliche Spaltleuchten als *unterschiedliche Gegenstandspunkte* zu deuten. Aus dieser Sicht wird klar, wie die hybride Denkfigur entsteht: Die Lernenden missverstehen die Anordnung der Spaltleuchten als Anordnung von Gegenstandspunkten; somit ordnen sie verschiedenen Lichtbündeln fälschlicherweise verschiedene Bildpunkte zu, vgl. Abb. 9(a) und 1(c). Dementsprechend fällt es vielen Lernenden schwer, mit Strahlenkonstruktionen Bildeigenschaften vorherzusagen [3,20-23].

5.4. Vernachlässigte Modell-Bewertung

Die Bewertung des Strahlenmodells kommt bei der Linsenabbildung zu kurz. Zum einen wird nicht diskutiert, ob die schmalen Lichtbündel im Experiment tatsächlich die Lichtwege anzeigen. Zum anderen wird oft nicht erklärt, warum man einen Bildpunkt mit Strahlen konstruieren kann, die an der Linse vorbeigehen.

5.4.1. Der Strahl als Lichtweg



Abb. 10: Lichtwege an der Spaltleuchte. Zwischen Spaltblende und Spaltbild muss man sich mehrere Lichtwege vorstellen; sie sind als gestrichelte Linien dargestellt.

Genau genommen sind die Lichtwege mit der Haft- oder Tischoptik nicht beobachtbar. Ein Lichtweg verläuft nämlich nicht entlang der Lichtspur an der Tafel oder auf dem Tisch. Vielmehr verläuft ein Lichtweg jeweils schräg von einem Punkt der durchleuchteten Spaltblende zum entsprechenden Punkt des Spaltbildes (Abb. 10). Folglich ist anhand der Haft- oder Tischoptik nur eine verzerrte Version des Strahlenverlaufs ablesbar.

Diese Modellkritik fehlt in den Schulbüchern. Sie würde dabei helfen, zwischen dem Modell des Strahls (also des hinzugedachten Lichtweges) und dem Phänomen des feinen Lichtbündels (also des beobachtbaren Spaltbildes) zu unterscheiden.

5.4.2. Der Strahl als Konstruktionslinie

Nur in vier der sechs analysierten Schulbücher [6,9-11] werden Strahlen als reine Konstruktionshilfen bezeichnet:

„Dabei spielt es keine Rolle, ob die eingezeichneten Lichtstrahlen überhaupt die Linse treffen oder nicht, denn es handelt sich nur um Hilfslinien zur Konstruktion.“ ([11], S. 73)

Hier wird den Lernenden jedoch nicht erklärt, wieso man Parallel- und Brennpunktstrahlen auch dann verwenden kann, wenn sie die Linse verfehlen.

Nur in einem der sechs Schulbücher wird die Nutzung von vorbeigehenden Strahlen begründet, und zwar mithilfe eines Umkehrschlusses:

„Deckt man einen Teil der Linse ab, [...] dann wird das [...] Bild [...] dunkler, bleibt aber vollständig [...]. Zur Bildkonstruktion darf man deshalb auch Lichtstrahlen verwenden, die in Wirklichkeit gar nicht durch die Linse gehen würden.“ ([9], S. 72)

In einem anderen Schulbuch wird das Problem der vorbeigehenden Strahlen umgangen, indem man nicht den Querschnitt der Linse, sondern nur dessen Mittellinie einzeichnet:

„Fotografiert man einen hohen Turm [...], dann wird klar, dass die Ausdehnung der Linse für die Abbildung von untergeordneter Bedeutung ist. Bei der Konstruktion zeichnet man deshalb nur die Mittelebene und die optische Achse. Die Linse selbst kann man andeuten oder ganz weglassen.“ ([6], S. 159)

In keinem der Schulbücher wird den Lernenden eine Konstruktionsmethode für beliebige Strahlen [19,24,25] gezeigt, mit der man die tatsächlichen Lichtwege durch die Linse zeichnen könnte. Solch eine alternative Konstruktionsmethode wäre jedoch plausibler, da Strahlen zuvor als Lichtwege eingeführt worden sind: Lichtwege, die an der Linse vorbeiführen, können nämlich nicht abknicken – bei der herkömmlichen Konstruktion tut man jedoch so, als ob sie es können.

6. Zusammenfassung und Ausblick

In allen analysierten Schulbüchern—außer *Fokus Physik* [8]—wird Keplers strahlenoptische Theorie der Linsenabbildung durch Modellversuche mit schmalen Lichtbündeln vermittelt. Auf diese Weise trägt schulbuchgemäßer Unterricht dazu bei, dass viele Lernende eine hybride Denkfigur entwickeln:

Bei der Veranschaulichung der Strahlengeometrie anhand schmaler Lichtbündel ist die Fehldeutung von Strahlen als Lichtbestandteile fast unvermeidbar—zumal meist so geredet wird, als ob sich Strahlen bewegen.

Zudem erschweren die Spaltleuchten zur Erzeugung der schmalen Lichtbündel die richtige Zuordnung zwischen Strahlen und Bild, vgl. Abb. 9(a) und 1(c).

Aber wie sieht eine Alternative zu diesem strahlenbasierten Zugang aus? Wie kann die Lehrperson die Strahlengeometrie an der Linse *ohne* Lichtbündel veranschaulichen? Wie kann die Lehrperson an die holistische Sicht der Lernenden *anknüpfen*, statt die Lernenden vorschnell mit der analytischen Sicht Keplers zu konfrontieren?

Die Lehrperson kann einen *bildbasierten* Zugang zur Linsenabbildung anbieten [24], vgl. [25]. Hierbei betrachten die Lernenden das Gesamtbild als Überlagerung von vollständigen Einzelbildern; anhand von Verbindungslinien zwischen diesen Einzelbildern erarbeiten sie die Strahlengeometrie. Dadurch können die Lernenden den Modellcharakter der Strahlen erkennen und den Zusammenhang zwischen Bildern und Strahlen verstehen [25-27].

7. Literatur

- [1] Galili, I., Bendall, S., & Goldberg, F. (1993). The effects of prior knowledge and instruction on understanding image formation. *J. Res. Sci. Teach.* 30, 271-301.
- [2] Galili, I. (1996). Students' conceptual change in geometrical optics. *Int. J. Sci. Educ.*, 18, 847-868.
- [3] Galili, I., & Hazan, A. (2000). Learners' knowledge in optics: interpretation, structure and analysis. *Int. J. Sci. Educ.* 22, 57-88.
- [4] Hubber, P. (2005). Explorations of Year 10 students' conceptual change during instruction. *APFSLT*, 6(1), 1-27
- [5] Kepler, J. (1904). *Dioptrik oder Schilderung der Folgen, die sich aus der unlängst gemachten Erfindung der Fernrohre für das Sehen und die sichtbaren Gegenstände ergeben.* (F. Plehn, Übers.). Leipzig: Wilhelm Engelmann.
- [6] Bader, F., & Oberholz, H.-W. (Hrsg.). (2003). *Dorn-Bader Physik: Gymnasium, Sekundarstufe I.* Hannover: Schroedel.
- [7] Meyer, L., & Schmidt, G.-D. (Hrsg.). (2015). *Physik: Lehrbuch für die Sekundarstufe I, Gymnasium, Baden-Württemberg, Band 1.* Berlin: Duden.
- [8] Boysen, G., Heise, H., Lichtenberger, J., Schepers, H., Schlichting, H. J., & Schön, L.-H. (Hrsg.). (2007). *Fokus Physik: Gymnasium, Baden-Württemberg, Band 1.* Berlin: Cornelsen.
- [9] Dekorsy, K., Gutjahr, U., Höfer, T., Karsten, F., Maier, J., Mittag, A., ... Wolf, M. (Hrsg.). (2006). *Impulse Physik 1 für die Klassen 7 / 8 der Gymnasien in Baden-Württemberg.* Stuttgart: Klett.
- [10] Appel, T., Eiselt, F., Küchenberg, F., Lechner, H., Müller, M., Serret, R., ... Ulrich, P. (Hrsg.). (2006). *Spektrum Physik 1 – Neubearbeitung: Baden-Württemberg 7/8, Gymnasium.* Braunschweig: Schroedel.
- [11] Kienle, R., & Pardall, C.-J. (Hrsg.). (2014). *Universum Physik: Gymnasium, Baden-Württemberg, Band 1.* Berlin: Cornelsen.
- [12] Merzyn, G. (1994). *Physikschulbücher, Physiklehrer und Physikunterricht: Beiträge auf der Grundlage einer Befragung westdeutscher Physiklehrer.* Kiel: Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel.
- [13] Müller, M. (2017). *Grammatik der Natur: Von Wittgenstein Naturphänomene verstehen lernen.* Berlin: Logos. doi:10.5281/zenodo.343889
- [14] Leisner-Bodenthin, A. (2006). Zur Entwicklung von Modellkompetenz im Physikunterricht. *ZfDN*, 12, 91-109.
- [15] Mayring, P. (2010). *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken. 11., aktualisierte und überarbeitete Auflage.* Weinheim; Basel: Beltz.
- [16] Westphal, N., Schön, L.-H., Grebe-Ellis, J. (2011). Die Merkmale phänomenbasierten Physikunterrichts. *PhyDid B*, DD 23.02.
- [17] Kiupel, M. (2000). Geometrische Optik – ohne Lichtstrahlen. *NiU Physik*, 11, 44-46.
- [18] Wiesner, H. (1986): Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten im Bereich der Optik. *NiU. Physik/Chemie* 34(13), 25-29.
- [19] Muckenfuß, H. (1996). Vorschläge zur Komplexitätsreduktion bei der Abbildung mit Sammellinsen. *Praxis der Naturwissenschaften. Physik*, 45(8), 14-16.
- [20] Goldberg, F. M., & McDermott, L. C. (1987). An investigation of student understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirror. *Am. J. Phys.*, 55, 108-119. doi: 10.1119/1.15254
- [21] Kaltakci-Gurel, D., Eryilmaz, A., & McDermott, L. C. (2016). Identifying pre-service teachers' misconceptions and conceptual difficulties about geometrical optics. *Eur. J. Phys.*, 37, 045705. doi: 10.1088/0143-0807/37/4/045705
- [22] Tural, G. (2015). Cross-grade comparison of students' conceptual understanding with lenses in geometric optics. *Sci. Educ. Int.*, 26, 325-343.
- [23] Mavanga, G. G. (2001). *Entwicklung und Evaluation eines experimentell- und phänomenorientierten Optikcurriculums: Untersuchung zu Schülervorstellungen in der Sekundarstufe I in Mosambik und Deutschland.* Berlin: Logos.
- [24] Grusche, S. (2016). Seeing lens imaging as a superposition of multiple views. *Phys. Educ.*, 51, 015006.
- [25] Razpet, N., & Kranjc, T. (2017). Partially covered lenses and additive color mixing. *Phys. Teach.* 55, 537-540.
- [26] Grusche, S. (2016). Präkonzepte zur Projektion eines unscharfen Bildes mit einer Linse. *PhyDid B*, DD 05.30.
- [27] Grusche, S. (2017). Developing students' ideas about lens imaging: Teaching experiments with an image-based approach. *Phys. Educ.*, 52, 044002.

Lorentz-Transformationen mit GAALOP

Martin Erik Horn

Hochschule für Wirtschaft und Recht Berlin
Badensche Str. 52, 10825 Berlin
e_hornm@doz.hwr-berlin.de, mail@martinerikhorn.de

Kurzfassung

Lorentz-Transformationen können in der vierdimensionalen Raumzeit als hyperbolische Rotationen modelliert werden. Diese wiederum lassen sich als Hintereinanderausführung hyperbolischer Reflexionen deuten.

Da Reflexionen in der Geometrischen Algebra und insbesondere hyperbolische Reflexionen in der Raumzeit-Algebra nach Hestenes durch Sandwich-Produkte beschrieben werden, lassen sich auf dieser Grundlage Lorentz-Transformationen didaktisch elegant und mathematisch sehr einfach durch simple Multiplikationen von Vektoren darstellen.

Diese Multiplikationen können entweder von Hand oder aber mit Computerhilfe durchgeführt werden. Im Beitrag wird gezeigt, wie Lorentz-Transformationen auf mathematisch unterschiedlichen Niveaustufen mit Hilfe des Programm-Tools „Geometric Algebra Algorithms Optimizer“ (GAALOP) verstanden und berechnet werden können. Dabei kommt GAALOP die Rolle eines speziell-relativistischen Taschenrechner-Ersatzes zu.

1. Was wäre, wenn ...

Was wäre passiert, wenn Einstein in eine Menschheit hineingeboren worden wäre, die die Algebra **nicht** erfunden hätte? Hätte die Spezielle Relativitätstheorie formuliert werden können, wenn das Aufstellen algebraischer Gleichungen und die Verwendung von Variablen uns Menschen nicht bekannt gewesen wäre?

Die Antwort auf diese Frage lautet mit Sicherheit doppelt: Ja! Zum einen: Ja, Einstein hätte auch ohne algebraische Kenntnisse die Spezielle Relativitätstheorie physikalisch korrekt formulieren und fachsprachlich vollständig beschreiben können.

Und ein zweites Ja lautet sicherlich: Hätte ein Einstein in einer solchen algebra-freien Welt die Relativitätstheorie nicht formuliert, wären seine Kolleginnen und Kollegen irgendwann ganz automatisch per Experiment und durch die Kraft der Erfahrung auf Allgemeine und Spezielle Relativitätstheorie gestoßen.

Dabei müssen wir uns vor Augen halten, dass es ein sehr und wirklich sehr, sehr großer historischer Zufall war, ein singuläres Ereignis geradezu überwältigender Dimension, dass ein Diophantus und seine Kolleginnen und Kollegen um die Zeitenwende des Jahres Null herum (nicht einmal das genaue Jahrhundert ist bekannt, in dem Diophantus lebte [1, S. 31, S. 34]) die Nutzung von Variablen und das Aufstellen abstrakter Gleichungen in die Mathematik einführten.

Die Babylonier, die Ägypter, die Inder, die Chinesen, die südamerikanischen und viele weitere Kultu-

ren dieses Erdballs betrieben schon vor Jahrtausenden eine sehr anspruchsvolle, eine sehr wirkungsmächtige und eine sehr effektive Mathematik [2], [3], die – siehe Gauß-Algorithmus [4], [5] – auch inhaltlich äußerst modern strukturiert war.

Dennoch gilt auch, was Derbyshire schreibt: „We started in 1800 BC with the Babylonians solving quadratic equations written as word problems, and now here we are 2600 years later with al-Khwarizmi ... solving quadratic equations written as word problems.“

It is, I agree, all a bit depressing. Yet it is also inspiring, in a way. The extreme slowness in putting together a symbolic algebra testifies to the very high level at which the subject dwells. The wonder, to borrow a trope from Dr. Johnson, is not that it took us so long to learn how to do this stuff; the wonder is that we can do it at all” [1, S. 51].

Dieses Wunder hätte auch ausbleiben können – beispielsweise dadurch, dass die Römer das ihnen eigene gewisse mathematische Desinteresse vielleicht stärker als politische Maxime durchgesetzt hätten.

Die Römer sind, wie viele andere technisch hoch entwickelten Kulturen der letzten Jahrtausende auch, in der Tat ein typisches Beispiel dafür, dass auch ohne algebraisch-abstrakte Mathematisierungen großartige kulturelle und technische Leistungen (wie Aquädukte und die technische Infrastruktur der Wasserbeförderung, Hochbauten aus Beton, Brückenkonstruktionen, Hochseeschifffahrt, Metallverarbeitung, etc.) gelingen können.

Es ist also durchaus vorstellbar, dass in einer Welt

ohne Diophantus ein rein anwendungsbezogener, ingenieurmäßiger Gebrauch der Mathematik ohne Algebra sich bis heute hätte halten können.

In einer solchen Welt hätten Tüftler und Experimentatoren dann auch das Prinzip des Rückstoßes (Raketen), das Prinzip der leitungslosen Signalübertragung (Telegraphie) und das Prinzip der kosmischen Fluchtgeschwindigkeiten (Satellitenbahnen) ohne tiefer gehende mathematische Fundierung allein durch Ausprobieren und strukturiertes Experimentieren aufgefunden.

Und wenn dann ein erster GPS-Satellit die Erde umkreist, wäre wohl aufgefallen, dass Raum und Zeit experimentell-messbar von bisherigen Erwartungen abweichen [6, S. 80/82], [7, S. 46]. Spätestens dann steht in einer solchen algebra-freien, technisch aber entwickelten Welt ein Einstein vor der Aufgabe, das Gemessene algebra-frei darzustellen und bei weiteren Anwendungen zu berücksichtigen.

Die eingangs gestellte Frage kann aber auch unter einem zweiten, zeitlich ebenso fiktiven Rahmen diskutiert werden: Was wäre, wenn Einstein tatsächlich zu Zeiten der Spät-Babylonier geboren worden wäre? Wie hätte Einstein in dieser damaligen Welt ohne Algebra die Relativitätstheorie formulieren und darstellen können?

Zur Beantwortung dieser Frage lohnt ein Blick in diese spät-babylonische Zeit, in der anspruchsvolle mathematische Konzepte ohne eine Nutzung der Algebra, die erst später erfunden werden sollte, entwickelt und genutzt wurden.

Ein mathematischer Meilenstein dieser Epoche war insbesondere die Entwicklung einer Vorstufe der Integration [8].

Diese babylonische Art der Integration knüpft ebenso wie im modernen Fall an die Flächenberechnung real existierender Objekte an. Über Jahrtausende hinweg wurde dabei immer auf Flächen tatsächlich flächenhafter Größen (also im Wesentlichen Grundstücke) Bezug genommen.

In der Spätphase der babylonischen Mathematik – der Berliner Wissenschaftshistoriker Ossendrijver untersuchte mathematisch-astronomische Keilschrifttexte, die zwischen 350 v.Chr. und 50 v.Chr. entstanden sein dürften [9] und damit zeitlich parallel zu Aristoteles [48, S. 52/53] liegen – begannen einzelne babylonische Mathematiker und Astronomen, physikalische Größen wie beispielsweise die variierende Geschwindigkeit Jupiters zeitlich aufzutragen und die zurückgelegte Strecke als Fläche unter der gewonnenen Kurve und somit als Integral zu bestimmen.

Den zentralen Erkenntnisfortschritt fasst Ossendrijver dabei so zusammen: „Trapezberechnungen konnten sie (die Babylonier) zwar schon um 1.800 v. Chr. vornehmen, allerdings an realen Objekten wie zum Beispiel Gärten oder Feldern. (...) In diesem Fall haben sie die Methode in einem abstrakten

Raum angewandt, indem sie Geschwindigkeit und Zeit eines Objektes auftrugen. Das ist ein großer Fortschritt“ [10].

Wenn das Konzept eines abstrakten mathematischen Raums, in dem Größen graphisch gegeneinander aufgetragen werden können, einem zwei Jahrtausende zu früh geborenen, spät-babylonischen Einstein bekannt gewesen wäre, dann hätte er damit auch die spezielle Relativitätstheorie und insbesondere die Lorentz-Transformationen als deren zentralem mathematischen Kern mathematisch vollständig und korrekt beschreiben können – und zwar algebra-frei mit rein geometrisch-graphischen Werkzeugen, wie im folgenden Abschnitt beispielhaft gezeigt werden soll.

Notwendig dazu wären die gedankliche Kraft und Imaginationsschärfe Einsteins. Und diese unglaubliche Erkenntnistiefe Einsteins ist im Jahre 1905 gleichermaßen unterwartet wie sie auch zwei Jahrtausende zuvor unerwartet zu Tage getreten wäre, wie aus einem mittlerweile berühmt gewordenen Zitat Plancks abzuleiten ist, der prä-faktisch 1909 die bereits erfundene Spezielle Relativitätstheorie über die noch nicht erfundene Allgemeine Relativitätstheorie stellt: „...diese neue Auffassung des Zeitbegriffs stellt an die Abstraktionsfähigkeit des Physikers die allerhöchsten Anforderungen; sie übertrifft an Kühnheit wohl alles, was bisher in der spekulativen Naturforschung ... geleistet wurde; die nicht-euklidische Geometrie ist Kinderspiel dagegen“ [11, S. 120], deutsche Fassung des Zitats in [12, S. 78].

In der Schweiz des Jahres 1905 ist sie es somit kaum weniger kühn als im Babylon 2000 Jahre zuvor, eine Relativitätstheorie zu entwickeln.

Und folgt man Pauli, dann wäre es für einen babylonischen und somit vor-kantianischen Einstein sogar weit einfacher, eine Relativitätstheorie zu erfinden, als es für den modernen europäischen Einstein gewesen sein muss, denn Pauli merkte in einem Brief an Fierz einst an: „Bekanntlich hat es dann einer ganz außerordentlichen Anstrengung bedurft, um Raum und Zeit (... die Newton quasi zur rechten Hand Gottes gesetzt hat ...) aus diesem Olymp wieder herunterzuholen. Diese Arbeit wurde noch künstlich erschwert durch Kants philosophischen Versuch, den Zugang zu diesem Olymp für die menschliche Vernunft zu sperren. Deshalb ist für mich die Zeit besonders interessant, wo Raum und Zeit noch nicht dort oben waren“ [13, S. 219].

In der Schweiz des Jahres 1905 mag es somit möglicherweise ungleich kühner gewesen sein als im Babylon 2000 Jahre zuvor, eine Relativitätstheorie zu entwickeln – zumal Bondi zufolge Einstein beim Verfassen seiner „Elektrodynamik bewegter Körper“ 1905 [14] „überhaupt noch nichts von Michelson und Morleys Experiment gewusst“ habe [15, S. 27].

Die Spezielle Relativität ist deshalb in den Anfängen kaum experimentell und nahezu ausschließlich verstandesmäßig durch Gedankenexperimente fundiert.

2. Eine modifizierte Abituraufgabe

Da die Babylonier keine algebraischen Formeln notieren konnten, „machten sie ein Beispiel nach dem anderen“ [16, S. 70]. Von dieser Vorgehensweise zieht Feynman eine direkte Linie zur Physikdidaktik, wenn er schreibt: „Heute besitzen wir nicht die Fähigkeit, einem Studenten zu zeigen, wie er Physik *physikalisch* verstehen kann! Wir können die Gesetze aufschreiben, aber wir können immer noch nicht sagen, wie man sie physikalisch versteht. Mangels einer Ausdrucksmöglichkeit ist der einzige Weg, Physik physikalisch zu verstehen, auch heute noch der langweilige, Babylonische Weg, viele Beispiele zu machen, bis man es verstanden hat“ [16, S. 70].

Diese physikdidaktische Schlussfolgerung, die Feynman hier formuliert, zieht er auch deshalb, weil er die Physik selbst in grundlegender Weise fachphysikalisch (und nicht lediglich fachdidaktisch) als babylonisch-beispielhaft und nicht griechisch-axiomatisch zugänglich erachtet: „In physics we need the Babylonian method, and not the Euclidean or Greek method“ [17, S. 47].

Der Grund ist die derzeitige Unvollständigkeit der Physik: Weil wir noch nicht alle physikalischen Gesetze kennen, können wir diese nicht axiomatisch fassen. Und erst, wenn eines Tages die Gesamtheit aller physikalischen Gesetze bekannt sein sollte, kann in der Fachphysik von der babylonisch-beispielhaften auf die griechisch-axiomatische Sichtweise übergegangen werden [17, S. 50].

Ein babylonischer Einstein würde also vollkommen legitim und physikalisch einwandfrei agieren, wenn er nicht formelhaft, sondern beispielhaft agiert und argumentiert.

Im Folgenden wird deshalb auf ein Beispiel Bezug genommen, das die Lorentz-Transformation in typischer Weise darstellt und das geringfügig modifiziert aus [18] übernommen wurde.

Dabei handelt es sich dabei um die Teil-Aufgabe 2.2d [18, S. 12] der schriftlichen Abiturprüfung 2009 des Leistungskurses Physik der Otto-Hahn-Gesamtschule Berlin/Neukölln (siehe Abb. 1), die noch vor Einführung des Zentralabiturs gestellt werden konnte. Diese Aufgabe baut auf einer Unterrichtsreihe zur Speziellen Relativitätstheorie auf, in der die Raumzeit-Algebra [19, Kap. 9], [20], [21, Kap. 5] als didaktische Umformung der Dirac-Algebra [22] zur Mathematisierung speziell-relativistischer Gesetze genutzt wurde [23], [24], [25].

In der ursprünglichen Fassung dieser Aufgabe wurde die spätere Position der Rakete von Dr. Pau mit $r_2 = 12 \text{ Lj } \gamma_t + 3 \text{ Lj } \gamma_x$ anstelle der hier in Abb. 1 gewählten Position $r_2 = 4 \text{ Lj } \gamma_t + 1 \text{ Lj } \gamma_x$ angegeben¹. Die modifizierte Position führt auf eine identische Rela-

¹ Die neu gewählten Werte bieten die Möglichkeit einer allgemeineren Diskussion, da sich die Supernova aus Sicht von Dr. Wolf nun nicht mehr zum vorgegebenen Zeitpunkt von r_2 ereignet.

Dr. Pau führt eine längere wissenschaftliche Expedition durch. Dr. Wolf beobachtet ihn dabei.

Dr. Pau startet seine Rakete im Ursprung des Inertialsystems von Dr. Wolf. Die Beschleunigungsphase ist dabei so kurz, dass sie vernachlässigt werden kann, da die Rakete von Dr. Pau innerhalb kürzester Zeit ihre konstante Endgeschwindigkeit erreicht.

Einige Zeit später befindet sich die Rakete von Dr. Pau im Inertialsystem von Dr. Wolf an der Position

$$r_2 = 4 \text{ Lj } \gamma_t + 1 \text{ Lj } \gamma_x$$

Im Koordinatensystem von Dr. Pau findet eine Supernova-Explosion an der Position

$$r_3' = 10 \text{ Lj } \gamma_t' + 5 \text{ Lj } \gamma_x'$$

statt. Berechnen Sie die Koordinaten dieser Explosion im Inertialsystem von Dr. Wolf.

Abb.1: Abitur-Teilaufgabe 2.2d zur Lorentz-Transformation aus [18].

tivgeschwindigkeit von ebenfalls $v = 0,25 \text{ c}$ und damit auf eine vollkommen identische Lösung dieser Abituraufgabe.

Eine typische Lösung der Abituraufgabe besteht darin, nach Ermittlung der Geschwindigkeit von Dr. Pau im Inertialsystem von Dr. Wolf (Teil-Aufgabe 2.2a, siehe Abb. 2) alle nun bekannten Größen in die zuvor im Unterricht hergeleiteten [24, AB 25, S. 33] und ausführlich diskutierten Formeln der Lorentz-Transformation [24, AB 26, S. 34] für zeitliche (siehe Abb. 3) und räumliche (siehe Abb. 4) Koordinatenwerte einzusetzen.

Aus Schülersicht wird diese Art der Aufgabenlösung als die wohl einfachste erscheinen, da sie zum einen im Unterricht ausführlich eingeübt wurde.

Zum anderen kommt diese Art der Aufgabenlösung einem üblichen, naiv ergebnisorientierten Schülerhandeln entgegen, das oft sehr konsequent lediglich

2.2a) $s = 3 \text{ Lj}$ $t = \frac{72 \text{ Lj}}{c}$
 Ansatz: $v = \frac{s}{t}$
 $v = \frac{3 \text{ Lj}}{\frac{72 \text{ Lj}}{c}} = \frac{1 \text{ Lj}}{4 \text{ Lj}} \cdot c$
 $= \frac{1}{4} \cdot c$
 $= 0,25 \cdot c$
 $= 7,5 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Abb.2: Beispiellösung zur Geschwindigkeitsberechnung der Rakete von Dr. Pau aus Sicht von Dr. Wolf.

darin besteht, zu vorgegebenen Größen eine der Oberflächenstruktur nach offenkundig passende Formel aus einem im Laufe der Schuljahre angefüllten Korb unterschiedlichster Gleichungen und Formeln herauszusuchen und dann gegebene Größen mehr oder auch weniger reflektiert einzusetzen.

Sofern bei der Aufgabenlösung kein Transfer erwartet wird, ist diese Lösungsstrategie in vielen Fällen sowohl zeitlich effektiv wie auch inhaltlich erfolgreich. Dies zeigt auch die Schülerlösung dieser Aufgabe, die am Ende zu einem korrekten Ergebnis von $r_3 = (45 \text{ Lj } \gamma_t + 30 \text{ Lj } \gamma_x) / \sqrt{15} \approx 11,62 \text{ Lj } \gamma_t + 7,75 \text{ Lj } \gamma_x$ (siehe letzte Zeile von Abb. 4) führt.

Dr. Wolf misst also die Supernova in seinem Koordinatensystem 11,62 Jahre nach Start der Rakete von Dr. Pau in einer räumlichen Entfernung von 7,75 Lichtjahren.

3. Der speziell-relativistische Satz des Pythagoras

Physikalisch betrachtet beschreiben Lorentz-Transformationen nicht den physikalischen Kern der Speziellen Relativität. Lorentz-Transformationen sind in erster Linie mathematische Transformationen und keine physikalischen.

Physikalisch relevant sind dagegen Messungen, die aus unterschiedlichen Perspektiven erfolgen – und zwar in der Speziellen Relativität üblicherweise Messungen, die in zwei sich zueinander mit konstanter Relativgeschwindigkeit bewegenden Koordinatensystemen vorgenommen werden.

Lorentz-Transformationen beschreiben auch nicht den mathematischen Kern der Speziellen Relativität. Der mathematische Kern besteht stattdessen in einer raumzeitlichen Umformulierung bzw. Erweiterung des Satzes des Pythagoras.

Während der klassische Satz des Pythagoras die Berechnung des Längenquadrats eines rein räumlichen Vektors in einem Euklidischen Koordinatensystem beschreibt

$$r^2 = (x \sigma_x + y \sigma_y)^2 = x^2 + y^2 \quad \{1\}$$

beschreibt der relativistische Pythagoras die Berechnung des Längenquadrats eines raumzeitlichen Vektors in einem pseudo-Euklidischen Koordinatensystem:

$$r^2 = (ct \gamma_t + x \gamma_x)^2 = (ct)^2 - x^2 \quad \{2\}$$

Der räumliche, auf der Geometrischen Algebra des dreidimensionalen Raums (Pauli-Algebra) aufbauende Fall [24, AB 1–7] wurde deshalb im Rahmen der damaligen Unterrichtsreihe vor Erörterung der Raumzeit-Algebra (Dirac-Algebra) ausführlich im Unterricht behandelt und mit den Schülern diskutiert.

Den Babylonischen Mathematikerinnen und Mathematikern war der klassische Satz des Pythagoras nicht nur wohlbekannt [2, S. 33-35], [3, S. 134-139], sondern er war ein zentraler geometrischer Eckpfei-

$$t = \frac{t' + \frac{x' \cdot v}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$t = \frac{10 \text{ Lj}}{c} + \frac{5 \text{ Lj} \cdot \frac{1}{2} \cdot c}{c^2}$$

$$= \frac{10a + 1,25a}{\sqrt{1 - \frac{1}{16}}}$$

$$= \frac{11,25a}{\sqrt{\frac{15}{16}}}$$

$$= 11,62 a$$

$$ct = 11,62 \text{ Lj}$$

Abb.3: Beispiellösung zur Bestimmung des zeitlichen Koordinatenwertes der Supernova auf der ct-Achse im Inertialsystem von Dr. Wolf.

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$x = \frac{5 \text{ Lj} + \frac{1}{2} c \cdot \frac{10 \text{ Lj}}{c}}{\sqrt{1 - \frac{1}{16}}}$$

$$= \frac{7,5 \text{ Lj}}{\sqrt{\frac{15}{16}}}$$

$$= 7,75 \text{ Lj}$$

$$r_3 = 11,62 \text{ Lj } \gamma_t + 7,75 \text{ Lj } \gamma_x$$

Abb.4: Beispiellösung zur Bestimmung des räumlichen Koordinatenwertes der Supernova auf der x-Achse im Inertialsystem von Dr. Wolf. Ganz unten wurde vom Schüler der vollständige Dirac-Vektor angegeben.

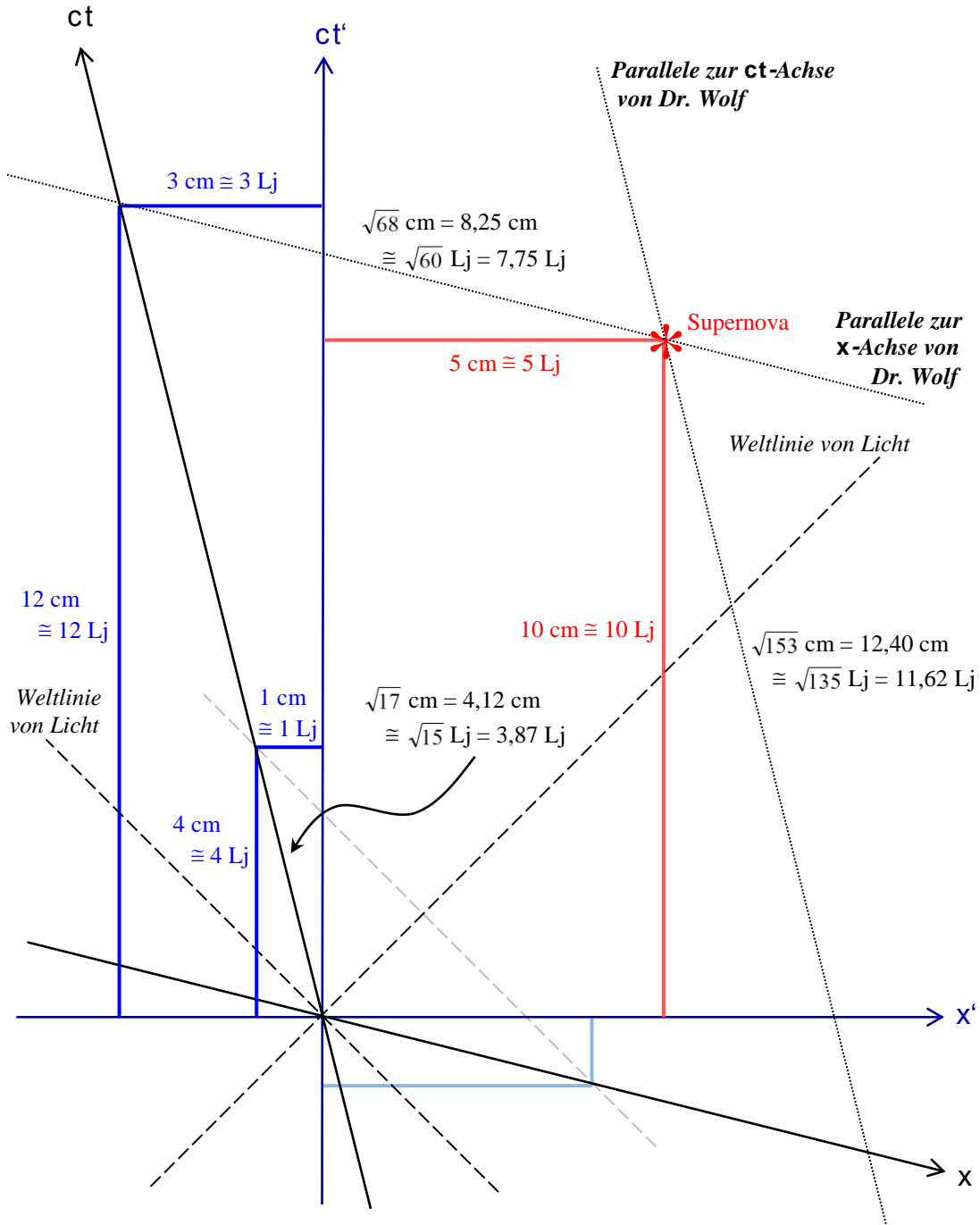


Abb.5: Graphische Ermittlung der Lösungswerte $x = 7,75 \text{ Lj}$ und $ct = 11,75 \text{ Lj}$ der Abitur-Teilaufgabe 2.2d.

ler ihrer Mathematik: „Auffällig ist das häufige Vorkommen der Berechnung der Diagonale von Rechtecken mittels des pythagoreischen Lehrsatzes – viele Jahrhunderte vor Pythagoras!“ [27, S. 17]

Es ist somit durchaus denkbar, dass ein weitsichtiger alt-babylonischer Einstein eine raumzeitliche Erweiterung des Satzes des Pythagoras kognitiv fassen konnte, denn eine solche Erweiterung ist ja in der rechnerischen Umsetzung nicht allzu schwierig. Schwierig ist einzig und allein die kognitive Fundierung.

Mit Hilfe des Konzepts abstrakter mathematischer Räume, in denen Größen graphisch gegeneinander aufgetragen werden können, kann ein zwei Jahrtausende zu früh geborener, spät-babylonischer Einstein dann Ergebnisse dieser und ähnlicher Aufgaben auf Grundlage des relativistischen, raumzeitlichen Pythagoras und einer einfachen Dreisatz-Rechnung (bzw. eleganter als Anwendung eines naiven raumzeitlichen Strahlensatzes) gänzlich ohne Formelnutzung bestimmen und so die gesuchten Koordinatenwerte graphisch fundiert ermitteln.

4. Durchführung von Lorentz-Transformationen ohne Formel-Nutzung

Algebra-freie Durchführungen von Lorentz-Transformationen ohne Nutzung der Lorentz-Transformationsformeln (... und ohne überhaupt etwas transformiert zu haben...) werden in den Diagrammen von Abb. 5, Abb. 6 und Abb. 7 gezeigt.

Es wird einzig und allein die Kenntnis des relativistischen Pythagoras benötigt, der einem babylonischen Einstein – ebenso wie der klassische Pythagoras – dann algebra-frei zur Verfügung gestanden haben sollte.

Auch in moderner Zeit wird dies immer wieder erfolgreich praktiziert, wobei moderne Bücher (wie z.B. [26]) nicht konsequent auf Formeln verzichten, sondern die graphische Deutung meist als motivierendes Element für einen Vergleich mit formelbezogenen Ansätzen nutzen.

Folgende Schritte sind dann durchzuführen:

- Zeichnung der in Abb. 5 blau eingefärbten, gestrichenen Achsen des Koordinatensystems von Dr. Pau.
- Einzeichnen der Position von Dr. Wolf, der sich in negativer Richtung von Dr. Pau entfernt und nach $ct' = 4 \text{ Lj}$ (4 cm) genau $x' = -1 \text{ Lj}$ (1 cm) entfernt ist.
- Zeichnung der Weltlinie von Dr. Wolf in Form einer Geraden durch den Ursprung des gestrichenen Koordinatensystems und des in b) aufgefundenen Punktes als ungestrichene, in Abb. 5 schwarz eingefärbte zeitliche ct -Achse des Koordinatensystems von Dr. Wolf.
- Zeichnung einer Senkrechten zur ct -Achse des ungestrichenen Koordinatensystems durch den Ursprung und einen an der Weltlinie von Licht gespiegelten Punkt $ct' = -1 \text{ Lj}$ (1 cm) und $x' = 4 \text{ Lj}$ (4 cm, siehe hellblaue Linien in Abb. 5) als ungestrichene, schwarz eingefärbte räumliche x -Achse des Koordinatensystems von Dr. Wolf.
- Einzeichnen der gegebenen Position der Supernova im gestrichenen Koordinatensystem von Dr. Pau mit $ct' = 10 \text{ Lj}$ (10 cm) und $x' = 5 \text{ Lj}$ (5 cm, siehe rote Linien in Abb. 5).
- Zeichnung von Parallelen zur ungestrichenen ct -Achse und zur ungestrichenen x -Achse durch die Position der Supernova. Die Entfernung der Schnittpunkte dieser Parallelen mit den Achsen des ungestrichenen Koordinatensystems von Dr. Wolf zum Ursprung gegen die gesuchten, lorentz-transformierten Koordinatenwerte an, die nun lediglich abgemessen werden müssen.
- Messung der Entfernung der in b) eingezeichneten Position von Dr. Wolf vom Ursprung.
Ergebnis: $ct_0 \cong 4,12 \text{ cm}$.
- Anwendung des relativistischen Pythagoras: Die in g) abgemessene Strecke entspricht einer zeitlichen Distanz von $\sqrt{4^2 - 1^2} \text{ Lj} = \sqrt{15} \text{ Lj} = 3,87 \text{ Lj}$,

so dass aus $4,12 \text{ cm} \cong 3,87 \text{ Lj}$ der Maßstab für Entfernungen im Koordinatensystem von Dr. Wolf zu $1 \text{ cm} \cong 0,94 \text{ Lj}$ folgt.

- Messung der Entfernung des in f) aufgefundenen Schnittpunktes der Parallelen mit der ungestrichenen ct -Achse von Dr. Wolf vom Ursprung.
Ergebnis: $ct \cong 12,40 \text{ cm}$.
- Umrechnung des Ergebnisses von i) mit Hilfe des in h) ermittelten Maßstabs.
Ergebnis: $ct = 12,40 \text{ cm} \cdot 0,94 \text{ Lj/cm} = 11,62 \text{ Lj}$
Dieser Wert gibt den gesuchten Zeitpunkt an, an dem aus Sicht von Dr. Wolf die Supernova stattfindet.
- Messung der Entfernung des in f) aufgefundenen Schnittpunktes der zweiten Parallelen mit der ungestrichenen x -Achse von Dr. Wolf vom Ursprung.
Ergebnis: $x \cong 8,25 \text{ cm}$.
- Umrechnung des Ergebnisses von k) mit Hilfe des in h) ermittelten Maßstabs.
Ergebnis: $ct = 8,25 \text{ cm} \cdot 0,94 \text{ Lj/cm} = 7,75 \text{ Lj}$
Dieser Wert gibt die gesuchte räumliche Entfernung an, in der aus Sicht von Dr. Wolf die Supernova stattfindet.

Zur Ermittlung der Lösungswerte war die Nutzung des relativistischen Pythagoras unumgänglich. Eine formelhafte Nutzung der Lorentz-Transformation war dagegen nicht notwendig.

5. Lorentz-Reflexionen

In moderner Sichtweise überführt eine Lorentz-Transformation ein raumzeitliches Koordinatensystem in ein anderes raumzeitliches Koordinatensystem. Bezogen auf die hier diskutierte Aufgabe müsste somit die ungestrichene Zeitachse von Dr. Wolf so transformiert werden, dass sie auf der ursprünglichen, gestrichenen Zeitachse von Dr. Pau zu liegen kommt.

Und die ungestrichene räumliche x -Achse von Dr. Wolf müsste so transformiert werden, dass sie auf der gestrichenen räumlichen x' -Achse von Dr. Pau zu liegen kommt.

Eine solche Transformation transformiert selbstredend jeden Punkt der Raumzeit und damit auch den raumzeitlichen Ort und Zeitpunkt der Supernova².

Die gerade beschriebene Überführung der beiden Koordinatenachsen soll im Folgenden aufgeteilt werden: In einem ersten Schritt werden die zeitlichen Koordinatenachsen ineinander überführt.

² Es handelt sich somit ausdrücklich nicht um eine sogenannte passive Transformation (bei der die Koordinatenachsen ihre Lage ändern und das Ereignis unverändert am gleichen Raumzeit-Punkt verbleibt) und nicht um eine sogenannte aktive Transformation (bei der die Koordinatenachsen unverändert ihre Lage beibehalten, während das Ereignis einem neuen Raumzeit-Punkt zugewiesen wird). Sowohl die Koordinatenachsen wie auch das Ereignis ändern ihre Lage.

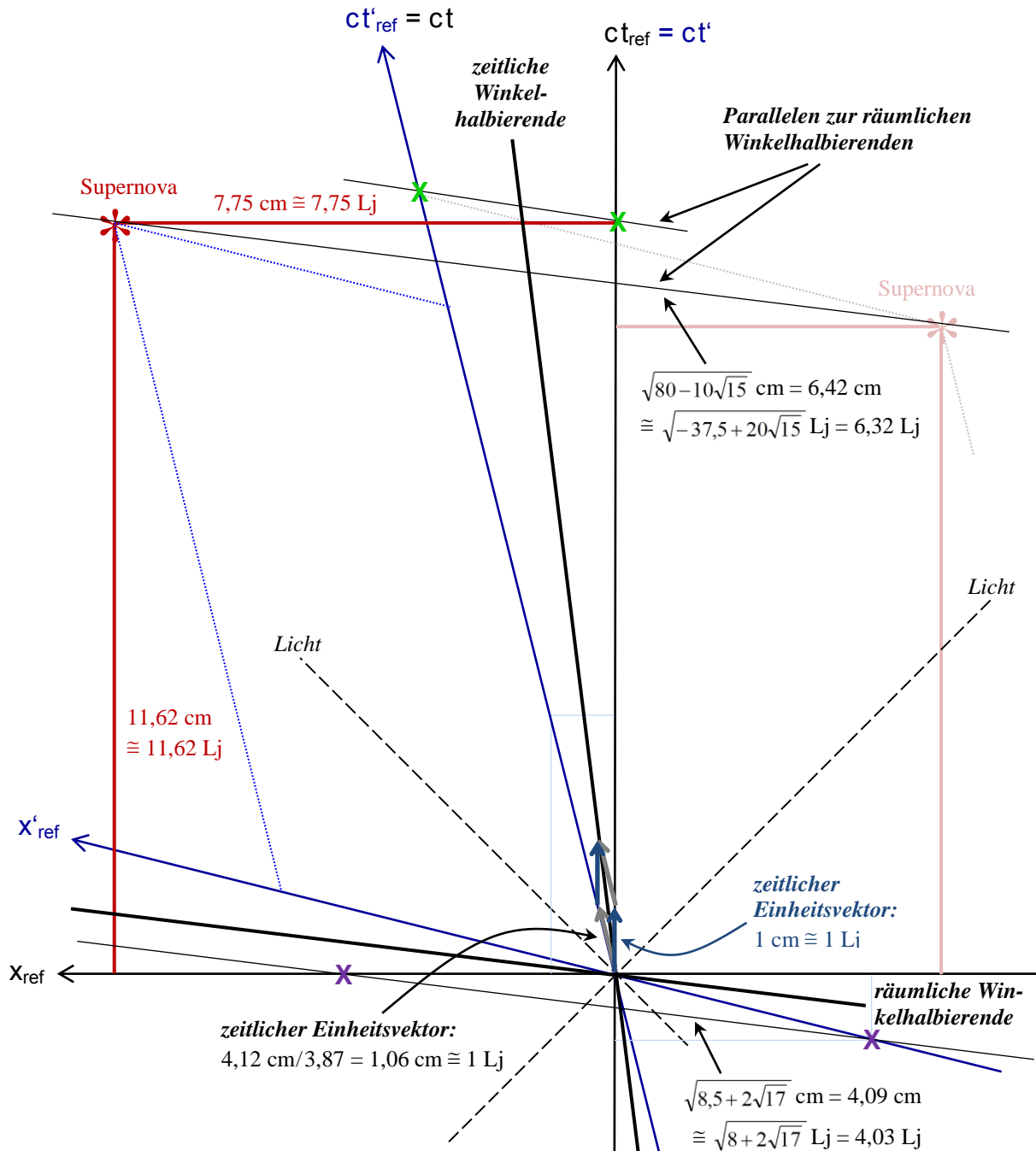


Abb.6: Graphische Darstellung der Reflexion an der zeitlichen Winkelhalbierenden zur alternativen Ermittlung der Lösungswerte $x = 7,75 \text{ Lj}$ und $ct = 11,75 \text{ Lj}$ der Abitur-Teilaufgabe 2.2d.

Und erst in einem zweiten Schritt werden die räumlichen Achsen in geeigneter Weise transformiert.

Die Überführung der beiden zeitlichen Koordinatenachsen gelingt sehr einfach durch eine Reflexion an der Winkelhalbierenden der beiden Zeitachsen.

Diese Reflexion kann algebraisch durchgeführt werden, was später mit Hilfe der Raumzeit-Algebra (Dirac-Algebra) und mit Hilfe von GAALOP geschehen soll. Zur didaktischen Fundierung soll in diesem Abschnitt jedoch wieder von einem fiktiven Einstein oder einem fiktiven Minkowski spät-baby-

lonischer Prägung ausgegangen werden, der diese Reflexion algebra-frei und rein geometrisch am vorliegenden Beispiel (siehe Abb. 6) durchführt.

Folgende Schritte sind dann durchzuführen:

- a) Geometrische Ermittlung der Lage der zeitlichen Winkelhalbierenden, indem beispielsweise dem Vektor der Länge von $4,12 \text{ cm}$ in ct -Richtung ein Vektor der Länge von $3,87 \text{ cm}$ in ct' -Richtung angefügt wird. Oder beide Vektoren werden normiert, so dass ein zeitlicher Einheitsvektor der Länge von $1,06 \text{ cm}$ in ct -Richtung dem zeit-

- lichen Einheitsvektor der Länge von 1 cm in ct' -Richtung angefügt wird. Für diesen Zeichenschritt ist die Kenntnis des relativistischen Pythagoras notwendig, da beide Vektoren die gleiche raumzeitliche Länge aufweisen müssen.
- b) Da beide Vektoren aus a) gleich lang sind, verläuft die zeitliche Winkelhalbierende durch den Endpunkt der aufaddierten Vektoren. Sie kann nun eingezeichnet werden, indem eine Linie durch diesen Punkt und den Ursprung gezogen wird.
- c) Geometrische Ermittlung der Lage der räumlichen Winkelhalbierenden, indem analog zu a) und b) räumliche Einheitsvektoren aufaddiert werden. Oder aber die räumlichen und zeitlichen Koordinaten eines beliebigen Punktes auf der zeitlichen Winkelhalbierenden werden vertauscht, so dass ein Punkt auf der räumlichen Winkelhalbierenden gebildet wird.
- d) Da nun ein Punkt auf der räumlichen Winkelhalbierenden bekannt ist, kann diese eingezeichnet werden, indem eine Linie durch diesen Punkt und den Ursprung gezogen wird.
- e) Durch einen beliebigen Punkt auf der ct -Achse (z.B. den grünen Punkt in Abb. 6 oben) wird eine Parallele zur räumlichen Winkelhalbierenden gezogen, da die räumliche Winkelhalbierende die Senkrechte der zeitlichen Winkelhalbierenden ist.
- f) Die Entfernung des in e) gewählten Punktes zum Schnittpunkt dieser Parallelen mit der zeitlichen Winkelhalbierenden wird gemessen.
- g) Die Entfernung wird auf der anderen Seite der Winkelhalbierenden in Fortsetzung der Parallelen abgetragen, so dass der Bildpunkt des in e) gewählten Punktes (in Abb. 6 ebenfalls grün markiert) eingezeichnet werden kann.
- h) Die an der zeitlichen Winkelhalbierenden reflektierte ct_{ref} -Achse kann eingezeichnet werden, indem der in g) aufgefundene Bildpunkt mit dem Ursprung verbunden wird. Wie erwartet, entspricht die reflektierte ct_{ref} -Achse der ursprünglichen ct' -Achse.
- i) Da der in g) aufgefundene Bildpunkt auf der ct' -Achse liegt, folgt automatisch, dass auch die reflektierte ct'_{ref} -Achse der ursprünglichen ct -Achse entsprechen muss.
- j) Durch einen beliebigen Punkt auf der x -Achse (z.B. den violetten Punkt in Abb. 6 unten) wird eine Parallele zur räumlichen Winkelhalbierenden gezogen, da die räumliche Winkelhalbierende die Senkrechte der zeitlichen Winkelhalbierenden darstellt.
- k) Die Entfernung des in j) gewählten Punktes zum Schnittpunkt dieser Parallelen mit der zeitlichen Winkelhalbierenden wird gemessen. Im Beispiel von Abb. 6 sind dies 4,09 cm.
- l) Die Entfernung von 4,09 cm wird auf der anderen Seite der zeitlichen Winkelhalbierenden in Fortsetzung der Parallelen abgetragen, so dass der Bildpunkt des in j) gewählten Punktes (in Abb. 6 ebenfalls violett markiert) eingezeichnet werden kann.
- m) Die an der zeitlichen Winkelhalbierenden reflektierte x_{ref} -Achse kann eingezeichnet werden, indem der in l) aufgefundene Bildpunkt mit dem Ursprung verbunden wird. Die reflektierte x_{ref} -Achse liegt ebenfalls auf der ursprünglichen x' -Achse, ist jedoch entgegengesetzt orientiert.
- n) Da der in l) aufgefundene Bildpunkt auf der x' -Achse liegt, folgt automatisch, dass auch die reflektierte x'_{ref} -Achse auf der ursprünglichen x -Achse liegen muss. Und sie muss ihr ebenfalls entgegengesetzt orientiert sein.
- o) Nun wird der Bildpunkt der in Abb. 6 hellrot markierten Supernova konstruiert, indem durch die Position der Supernova eine Parallele zur räumlichen Winkelhalbierenden (die wie bekannt die Senkrechte der zeitlichen Winkelhalbierenden ist) gezogen wird.
- p) Die Entfernung der Supernova zum Schnittpunkt dieser Parallelen mit der zeitlichen Winkelhalbierenden wird gemessen. Im Beispiel von Abb. 6 sind dies 6,42 cm.
- q) Die Entfernung von 6,42 cm wird auf der anderen Seite der zeitlichen Winkelhalbierenden in Fortsetzung der Parallelen abgetragen, so dass der Bildpunkt der Supernova (in Abb. 6 dunkelrot markiert) eingezeichnet werden kann.
- r) Durch den Bildpunkt der Supernova werden die beiden Parallelen zur ct_{ref} -Achse und zur x_{ref} -Achse eingezeichnet. Nun können die lorentztransformierten Koordinatenwerte direkt als Streckenlängen in Abb. 6 gemessen werden.
- s) Die Messung der Entfernung der Supernova von der ct_{ref} -Achse gibt die räumliche Entfernung an. Ergebnis: $x_{\text{ref}} \cong 7,75$ cm.
- t) Die Messung der Entfernung der Supernova von der x_{ref} -Achse gibt die zeitliche Entfernung an. Ergebnis: $ct_{\text{ref}} \cong 11,62$ cm.
- u) Da die senkrecht zueinander stehenden reflektierten räumlichen und zeitlichen Achsen auch auf dem Papier senkrecht zueinander stehend mit einem Winkel von 90° eingezeichnet werden konnten, ist der Umrechnungsfaktor 1. Die gemessenen Längen entsprechen somit direkt räumlichen und zeitlichen Distanzen.
Endergebnisse: $x_{\text{ref}} = 7,75$ Lj und $ct_{\text{ref}} = 12,62$ Lj
Die Supernova findet aus Sicht von Dr. Wolf somit 12,62 Jahre nach Start der Rakete von Dr. Pau in einer räumlichen Entfernung zur Erde von 7,75 Lj statt.
- Das also ist der zentrale und wichtigste Beweggrund, wieso die Menschheit Lorentz-Transforma-

tionen nutzt: Es ist in Punkt u) keine Umrechnung mehr nötig. Eingezeichnete Längen können direkt als Koordinatenwerte gemessen und interpretiert werden.

Die Umrechnung bzw. Normierung zu Einheitsvektoren fand ja bereits in den Schritten a) und c) statt.

Und es ist auch keine Lorentz-Rotation notwendig, eine Lorentz-Reflexion reicht zur korrekten Ermittlung der transformierten Koordinatenwerte vollkommen aus.

Es wird dann lediglich in einem linkshändigen Koordinatensystem gemessen, was aber schlicht Gewöhnungssache ist und an der Korrektheit der Ergebnisse nichts ändert.

6. Lorentz-Rotationen

Die Nutzung von hyperbolischen Rotationen im Sinne einer Lorentz-Transformation bei der Bearbeitung speziell-relativistischer Aufgabenstellungen ist somit logisch überflüssig.

Dennoch soll sie – da wir Menschen offenkundig durch eine Jahrhunderte alte Bildungstradition auf rechtshändige Koordinatensysteme eingepägt sind – im Folgenden dargestellt und diskutiert werden.

Dieser letzte Schritt, der dazu führen soll, dass die ungestrichene räumliche x -Achse von Dr. Wolf so transformiert wird, dass sie auf der ursprünglichen, gestrichenen räumlichen x' -Achse von Dr. Pau zu liegen kommt, kann leicht durch eine zweite Refle-

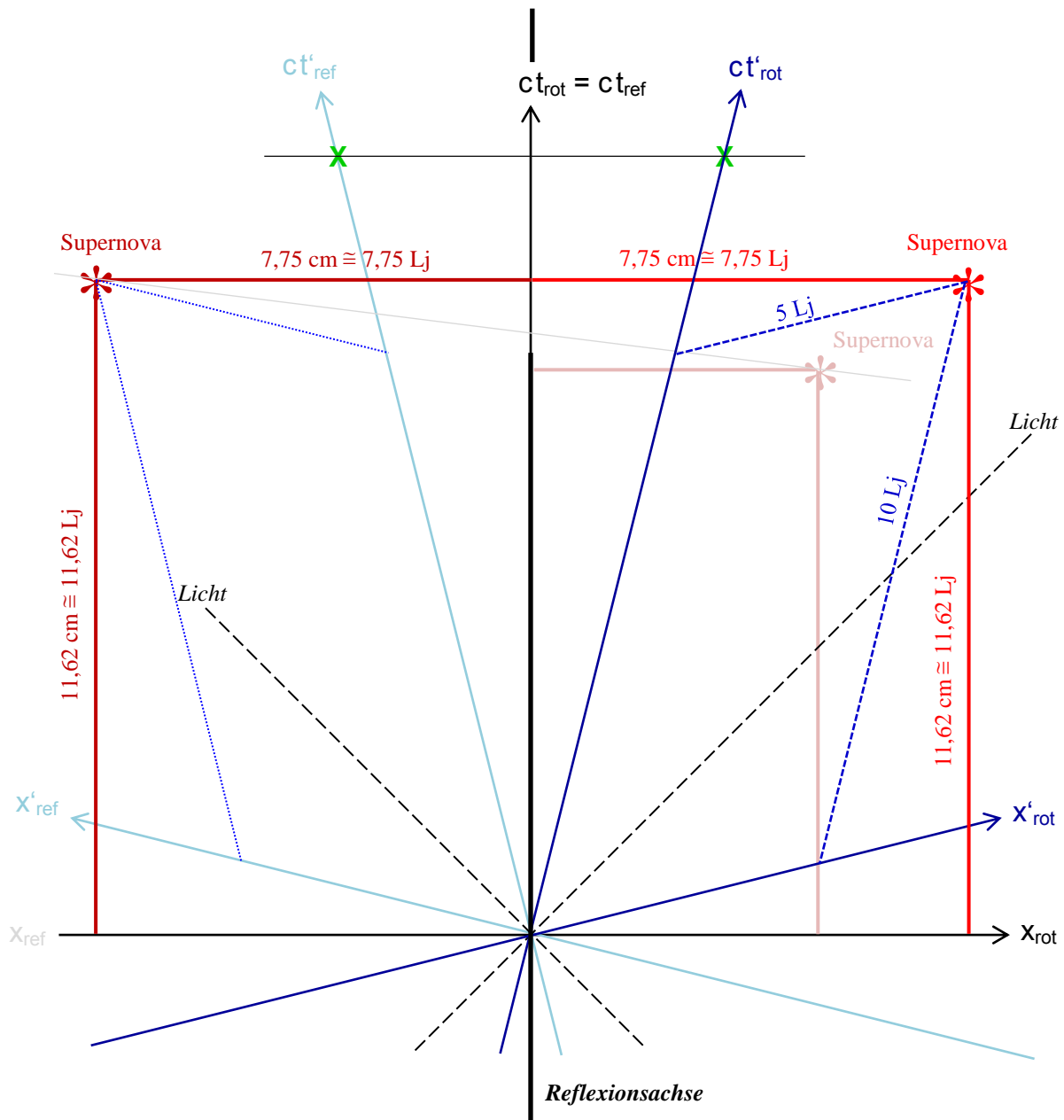


Abb.7: Graphische Darstellung einer Lorentz-Transformation als Rotation zur Ermittlung der Lösungswerte $x = 7,75 Lj$ und $ct = 11,75 Lj$ der Abitur-Teilaufgabe 2.2d.

xion modelliert werden. Abb. 6 zeigt deutlich, dass lediglich eine Richtungsumkehr der x_{ref} -Achse notwendig ist, damit diese dann identisch mit der ursprünglichen x' -Achse wird.

Diese Richtungsumkehr gelingt durch eine Reflexion an der ct_{ref} -Achse, die alle zeitlichen Koordinatenwerte unverändert lässt, die räumlichen jedoch einer Vorzeichenumkehr unterzieht.

Abb. 7 zeigt das Ergebnis dieser zweiten Reflexion. Alle die Reflexion konstituierenden Entfernungen können aufgrund der zeichnerisch senkrechten Ausrichtung räumlicher und zeitlicher Strecken direkt abgelesen und eingetragen werden. Der Umrechnungsfaktor zwischen Zeichnung und physikalisch relevanten raumzeitlichen Distanzen ist somit wie in Unterpunkt u) wieder genau 1.

Die räumliche Entfernung der Supernova zur Erde von $x_{\text{ref}} = 7,75$ Lj (dunkelrote Strecke links in Abb. 7) bleibt durch die zweite Reflexion mit nun $x_{\text{rot}} = 7,75$ Lj (hellrote Strecke rechts in Abb. 7) ebenso unverändert wie die zeitliche Distanz aus Erdsicht von $ct_{\text{ref}} = ct_{\text{rot}} = 12,62$ Lj.

Dis bestätigt die bereits bekannte mathematische Beziehung, dass jede Rotation (und mithin auch jede hyperbolische Rotation) als Hintereinanderausführung zweier Reflexionen (mithin also zweier hyperbolischer Reflexionen) beschrieben werden kann.

Dabei ist die Aufspaltung von Rotationen in zwei Reflexionen nicht eindeutig. Der hier gewählten Variante einer Reflexion an der zeitlichen Winkelhalbierenden, die von einer Reflexion an der ursprünglichen gestrichelten Zeitachse gefolgt wird, könnte beispielsweise eine zweite Variante, bei der eine Reflexionen an der ersten und dritten zeitlichen Winkel-Viertelnden aufeinander folgen, zur Seite gestellt werden. Oder aber es werden aufeinander folgende Reflexionen an den räumlichen Winkelhalbierenden oder Winkel-Viertelnden gewählt.

7. Minkowskis Entscheidung

Bei der Entwicklung einer mathematisch soliden Fundierung der von Einstein 1905 [14] vorgelegten Speziellen Relativitätstheorie musste Hermann Minkowski eine Entscheidung treffen, die er in einer Fußnote [28, S. 28] so umschreibt: „Man könnte auch daran denken, statt des Cayleyschen Matrizenkalküls den Hamiltonschen Quaternionenkalkül heranzuziehen, doch erscheint mir der letztere für unsere Zwecke als zu eng und schwerfällig.“

Wie allseits bekannt, hat sich Minkowski für die Darstellung durch Matrizen entschieden und ist verstorben.

Was wäre passiert, wenn die damalige Entscheidung so nicht getroffen worden wäre? Wie sähe die Mathematisierung der Relativitätstheorie aus, wenn nicht nur einzelne Physiker (Silberstein [29], Lanczos [30]) und Mathematiker (Klein & Sommerfeld [31, S. 939-943]) den Hamiltonschen Weg gegangen wären und die quaternionische Mathematisierung

der Speziellen Relativitätstheorie fortgeführt [32], [33] hätten?

Letztendlich sind die Mathematik der Quaternionen und die auf Grassmann aufbauende Geometrische Algebra in ihrem zentralen mathematischen Ideen Kern wesensgleich. Der einzige relevante Unterschied liegt darin, dass die Geometrische Algebra von Grassmann und Hestenes weit allgemeiner ist als die Quaternionenalgebra von Hamilton.

Hamiltons Quaternionen bilden lediglich eine geradzahlig Unter algebra der Pauli-Algebra, da die quaternionischen Basiseinheiten i, j, k als Produkte zweier Pauli-Basiseinheiten³ dargestellt werden können [21, S. 34], [34, eq. 53], [33, eq. 16]:

$$i = \sigma_y \sigma_z \quad j = -\sigma_z \sigma_x \quad k = \sigma_x \sigma_y \quad \{3\}$$

Hestenes schreibt dazu: „The ironic thing about the vector-quaternion controversy is that there was nothing substantial to dispute“ [19, S. 61]. Die quaternionischen Basiseinheiten $\{3\}$ repräsentieren Einheits-Flächenstücke und damit Einheits-Bivektoren, während die Pauli-Basiseinheiten Einheitsvektoren repräsentieren.

Und die Pauli-Algebra, die die Geometrische Algebra des dreidimensionalen, Euklidischen Raumes darstellt, bildet wiederum eine Unter algebra der Dirac-Algebra, da die Pauli-Basiseinheiten als Produkte zweier Dirac-Basiseinheiten³ dargestellt werden können [20, eq. 43], [22, S. 1193], [33, eq. 17]:

$$\sigma_x = \gamma_x \gamma_t \quad \sigma_y = \gamma_y \gamma_t \quad \sigma_z = \gamma_z \gamma_t \quad \{4\}$$

Da als zweiter Faktor in $\{4\}$ die zeitliche Basiseinheit γ_t anmultipliziert wird, wird hierdurch die vierdimensionale Raumzeit in einen dreidimensionalen, rein räumlichen (und somit zeitabsoluten) Raum reduziert.

Sind die algebraischen Grundbeziehungen der Dirac-Basiseinheiten geometrisch durch ihre Orthogonalität bzw. algebraisch durch ihre anti-kommutative Vertauschung

$$\begin{aligned} \gamma_x \gamma_y &= -\gamma_y \gamma_x & \gamma_y \gamma_z &= -\gamma_z \gamma_y & \gamma_z \gamma_x &= -\gamma_x \gamma_z \\ \gamma_x \gamma_t &= -\gamma_t \gamma_x & \gamma_y \gamma_t &= -\gamma_t \gamma_y & \gamma_z \gamma_t &= -\gamma_t \gamma_z \end{aligned} \quad \{5\}$$

sowie geometrisch durch ihre Einheitslänge bzw. algebraisch durch ihre raum- oder zeitartige Normierung

$$\gamma_t^2 = 1 \quad \gamma_x^2 = \gamma_y^2 = \gamma_z^2 = -1 \quad \{6\}$$

bekannt, so folgen automatisch die entsprechenden Beziehungen für die Pauli-Basiseinheiten $\{4\}$ und die quaternionischen Basiseinheiten $\{3\}$.

Es ist deshalb davon auszugehen, dass der Weg von den – wie Minkowski sagt – „engen und schwerfäll-

³ Die Basiseinheiten der Pauli-Algebra können als (2×2) -Matrizen dargestellt werden, müssen es jedoch nicht. Ebenso können die Basiseinheiten der Dirac-Algebra als (4×4) -Matrizen dargestellt werden, müssen es jedoch nicht. In beiden Fällen kann auch ohne explizite Repräsentation durch Matrizen gearbeitet werden.

ligen“ Quaternionen zu den im Kontrast dazu weiten, also allgemeineren und leichtfälligen, also einfach zu handhabenden Diracschen Basiseinheiten sehr viel früher und noch vor Entwicklung der Quantenmechanik gegangen worden wäre, hätte sich Minkowski für die zweite Alternative einer quaternionischen Mathematisierung der Speziellen Relativität entschieden.

Einen ähnlichen Standpunkt unter der Perspektive einer verpassten Chance („Missed Opportunities“ [35]) der Mathematik- und Physikentwicklung beschreibt Dyson in seiner Josiah Willard Gibbs-Vorlesung 1972: „When Grassmann's work finally became known, mathematicians (...) were spending more energy in polemical arguments for and against quaternions than in trying to understand how Grassmann and Hamilton might be fitted together into a larger scheme of things“ [35, S. 644].

Hätten sie die richtigen Fragen gestellt und darüber nachgedacht, warum „two quite different and incompatible algebraic structures“ [35, S. 644] gleichermaßen perfekt zur mathematischen Beschreibung unserer Welt herangezogen werden können, wäre ein vollständiges Verständnis der Beziehungen zwischen Quaternionen und Vektoren sowie die Theorie der Spinoren weit früher (und zwar „by approximately 40 years“ [35, S. 644]) erlangt worden.

Aus zweierlei Gründen ist die damalige Entscheidung von Minkowski zwar bedauerlich, aber auch nachvollziehbar. Zum einen ist es eine physikalisch geprägte Entscheidung zur Beschreibung eines physikalischen Sachverhalts, die deshalb auch mit einem der Physik eigenen mathematischen Opportunismus getroffen wurde.

Klein und Sommerfeld schreiben dazu: „Die Grassmann'sche Theorie geht bei der Aufzählung der Raumgrößen systematisch, die physikalische Vektorrechnung opportunistisch vor“ [31, S. 938].

Zum anderen lag damals zwar die mathematische Beschreibung von Rotationen durch die Hamiltonschen Vorarbeiten relativ sachklar und gefestigt vor. Eine ähnlich gut erarbeitete mathematische Beschreibung von Reflexionen, wie sie bei Verfolgung des in den vorigen Abschnitten 5 und 6 dargestellten geometrischen Ansatzes notwendig ist, war Minkowski wohl allerdings nicht bekannt.

Diese auf Grassmann aufbauende Mathematik der Reflexionen soll jedoch im folgenden Abschnitt zur algebraisch einfachen Darstellung der Speziellen Relativität genutzt werden.

8. Sandwich-Produkte zur Beschreibung raumzeitlicher Reflexionen und Rotationen

Wie in Abschnitt 2 bereits ausgeführt, basiert die hier gewählte mathematische Fassung der Abitur-Teilaufgabe auf einer didaktischen Umformung der Dirac-Algebra. Dabei werden raumzeitliche Vektoren \mathbf{r} als Linearkombinationen der Dirac-Matrizen,

die im schulischen Unterricht ohne ein Eingehen auf einen möglichen Matrizencharakter als Dirac-Vektoren bezeichnet werden, beschrieben:

$$\mathbf{r} = ct \gamma_t + x \gamma_x + y \gamma_y + z \gamma_z \quad \{7\}$$

Reflexionen an einer Achse, die in Richtung eines Vektors \mathbf{n}

$$\mathbf{n} = n_t \gamma_t + n_x \gamma_x + n_y \gamma_y + n_z \gamma_z \quad \{8\}$$

weist, werden durch Sandwich-Produkte [36, S. 258], [37] beschrieben. Dabei wird der raumzeitliche Vektor \mathbf{r} rechts- und linksseitig in Sandwich-Form mit dem Reflexionsvektor \mathbf{n} multipliziert.

Liegt der Reflexionsvektor bereits als zeitartiger Einheitsvektor \mathbf{n}_{ein} mit

$$\mathbf{n}_{\text{ein}}^2 = 1 \quad \text{bzw.} \quad \mathbf{n}_{\text{ein}} = \mathbf{n}_{\text{ein}}^{-1} \quad \{9\}$$

vor, so wird die Reflexion durch ein perfektes Sandwich-Produkt

$$\mathbf{r}_{\text{ref}} = \mathbf{n}_{\text{ein}} \mathbf{r} \mathbf{n}_{\text{ein}} \quad \{10\}$$

dargestellt. Im allgemeinen Fall eines Reflexionsvektors, der nicht zeitartig ist oder keine Einheitslänge aufweist, muss ein normiertes Sandwich-Produkt

$$\mathbf{r}_{\text{ref}} = \mathbf{n} \mathbf{r} \mathbf{n}^{-1} = \mathbf{n}^{-1} \mathbf{r} \mathbf{n} = \frac{\mathbf{n} \mathbf{r} \mathbf{n}}{\mathbf{n}^2} \quad \{11\}$$

gebildet werden. Da das Vektorquadrat \mathbf{n}^2 ein Skalar ist, muss bei der Normierung mit Hilfe einer Division durch \mathbf{n}^2 auch nicht auf die Rechen-Reihenfolge geachtet werden.

Das ist ein erstaunlich einfacher Sachverhalt! Die Nutzung von oft recht unübersichtlichen und unhandlichen Reflexionsmatrizen kann entfallen. Es werden lediglich Multiplikationen des in der Mitte stehenden zu reflektierenden Vektors \mathbf{r} mit dem rechts- und linksseitig anmultiplizierten Reflexionsvektor benötigt.

Falls gewünscht kann diese mathematische Beschreibung raumzeitlicher Reflexionen mit Hilfe der Beziehungen {3} und {4} auch in die Quaternionendarstellung übertragen werden.

Im Gegensatz zu Minkowskis Einschätzung „eng und schwerfällig“ beschreiben Anwender aus der Praxis die Beziehung zwischen Matrizen und Quaternionen durchgängig genau umgekehrt, beispielsweise als: „We point out with some joy and just a bit of satisfaction that the quaternion approach does seem to be easier and more efficient than the matrix approach“ [38, S. 152].

Und die im folgenden Abschnitt vorzunehmende Übersetzung der in den vorigen Abschnitten diskutierten Abitur-Teilaufgabe in die Mathematik der Raumzeit-Algebra resp. Dirac-Algebra zeigt ebenso deutlich, dass diese geometrisch-algebraische Darstellung der Dirac-Algebra noch einfacher und noch effizienter sein wird.

Zuvor sollte aber noch kurz erwähnt werden, dass zur Darstellung der Lorentz-Transformationen nun

lediglich zwei Lorentz-Reflexionen hintereinander ausgeführt werden müssen.

Es wird somit eine zweite Reflexionsachse benötigt, die durch einen Vektor \mathbf{m} , der in ihre Richtung zeigt,

$$\mathbf{m} = m_t \gamma_t + m_x \gamma_x + m_y \gamma_y + m_z \gamma_z \quad \{12\}$$

repräsentiert wird. Handelt es sich wieder um einen zeitartigen Einheitsvektor \mathbf{m}_{ein} mit

$$\mathbf{m}_{\text{ein}}^2 = 1 \quad \text{bzw.} \quad \mathbf{m}_{\text{ein}} = \mathbf{m}_{\text{ein}}^{-1} \quad \{13\}$$

so wird die Rotation als zweifache Reflexion durch das perfekte doppelte Sandwich-Produkt

$$\mathbf{r}_{\text{ref}} = \mathbf{m}_{\text{ein}} \mathbf{n}_{\text{ein}} \mathbf{r} \mathbf{n}_{\text{ein}} \mathbf{m}_{\text{ein}} \quad \{14\}$$

dargestellt.

Im allgemeinen Fall beliebig langer Reflexionsvektoren oder Reflexionsvektoren, die raumartig sind, muss das doppelte Sandwich-Produkt

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{\text{Lorentz}} = \mathbf{r}_{\text{rot}} &= \mathbf{m} \mathbf{n} \mathbf{r} \mathbf{n}^{-1} \mathbf{m}^{-1} = \mathbf{m}^{-1} \mathbf{n}^{-1} \mathbf{r} \mathbf{n} \mathbf{m} \\ &= \frac{\mathbf{m} \mathbf{n} \mathbf{r} \mathbf{n} \mathbf{m}}{\mathbf{n}^2 \mathbf{m}^2} \end{aligned} \quad \{15\}$$

normiert werden. Da durch die Skalare \mathbf{n}^2 und \mathbf{m}^2 dividiert wird, muss bei dieser Normierung auch nicht auf die Divisions-Reihenfolge geachtet werden.

Das ist das Geheimnis der Quaternionen. Quaternionen \mathcal{Q} beschreiben Rotationen deshalb in einer so überraschend effektiven Art und Weise, weil sie schichtweg das Produkt zweier Vektoren

$$\mathcal{Q} = \mathbf{m} \mathbf{n} = \mathbf{m} \bullet \mathbf{n} + \mathbf{m} \wedge \mathbf{n} \quad \{16\}$$

sind. Das gilt im Euklidischen, dreidimensionalen Fall auf Grundlage der Gleichung {3} genauso wie in beliebig höher-dimensionalen Fällen mit einer entsprechend höheren Anzahl an quaternionischen Basiseinheiten. Und es gilt im Fall räumlicher Rotationen genauso wie im Fall raumzeitlicher Lorentz-Rotationen.

Quaternionen und verallgemeinerte Quaternionen sind also nichts anderes als Linearkombinationen aus einem skalaren Wert $\mathbf{m} \bullet \mathbf{n}$ und einem bivectoriell Anteil $\mathbf{m} \wedge \mathbf{n}$ der rechten Seite von Gl. {16}. Oder mit geometrischen Worten: Die Summe einer dimensionslosen Zahl und zweidimensionaler Flächenstücke ist ein Quaternion.

9. Geometrisch-algebraische Lösungsvarianten der modifizierten Abitur-Teilaufgabe

Auf Grundlage von Gl. {15} kann die oben vorgestellte Abituraufgabe nun auf verschiedenen mathematischen Schwierigkeitsstufen bearbeitet werden.

Im ersten Unterabschnitt werden lediglich eine Normierung mit Hilfe des relativistischen Pythagoras und die Grundlagen vektorierter Multiplikation (siehe die Gleichungen {5}) benötigt.

Im zweiten Unterabschnitt wird auf hyperbolische Winkelbeziehungen zurückgegriffen, was wohl nur für Schülerinnen und Schüler in Frage kommt, die

die entsprechenden Sachverhalte in einem Mathematik-Leistungskurs zuvor erarbeitet haben.

Während die ersten beiden Ansätze der Unterabschnitte 9.1 und 9.2 eine Reflexion an einer Achse in Richtung der zeitlichen Winkelhalbierenden, gefolgt von einer zweiten Reflexion an der ursprünglichen Zeitachse beschreiben, zeigt Unterabschnitt 9.3 zwei aufeinander folgende Reflexionen an den zeitlichen Winkel-Viertelnden.

Selbstredend werden durch alle Ansätze identische Ergebnisse ermittelt.

9.1. Beispielrechnung mit Normierung des Reflexionsvektors

Wie in Abschnitt 2 bereits vorgestellt, findet die Supernova aus Sicht von Dr. Pau an der Position

$$\mathbf{r}_3' = 10 \text{ Lj } \gamma_t + 5 \text{ Lj } \gamma_x \quad \{17\}$$

statt. Dieser Positionsvektor ist in das Inertialsystem von Dr. Wolf zu transformieren. Wie in Abb. 5 gezeigt, verläuft die zeitliche Koordinatenachse von Dr. Wolf aus Sicht von Dr. Pau in Richtung des raumzeitlichen Ortsvektors

$$\mathbf{r}_2' = 4 \text{ Lj } \gamma_t - 1 \text{ Lj } \gamma_x \quad \{18\}$$

Dieser Ortsvektor hat eine Länge von

$$|\mathbf{r}_2'| = \sqrt{(\mathbf{r}_2')^2} = \sqrt{15} \text{ Lj} \quad \{19\}$$

Um die in Abb. 6 gezeigte erste Reflexion an der Winkelhalbierenden zwischen der Weltlinie von Dr. Wolf {13} und der zeitlichen Koordinatenachse von Dr. Pau in Richtung von γ_t zu konstruieren, muss ein ebenso langer Vektor $\sqrt{15} \text{ Lj } \gamma_t$ in Richtung dieser Koordinatenachse zum raumzeitlichen Ortsvektor {18} addiert werden.

Der folgende Punkt

$$\mathbf{n}_1 = (4 + \sqrt{15}) \text{ Lj } \gamma_t - 1 \text{ Lj } \gamma_x \quad \{20\}$$

liegt somit auf der gesuchten Winkelhalbierenden und kann als erster Reflexionsvektor verwendet werden.

Um die Normierung durchzuführen, wird das Längensquadrat dieses Reflexionsvektors von

$$\mathbf{n}_1^2 = 30 + 8\sqrt{15} \quad \{21\}$$

benötigt. Nun kann die in Abb. 6 gezeigte graphische Reflexion an der zeitlichen Winkelhalbierenden algebraisch gefasst werden:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{2\text{ref}} &= \frac{\mathbf{n}_1 \mathbf{r}_3' \mathbf{n}_1}{\mathbf{n}_1^2} \\ &= 3\sqrt{15} \text{ Lj } \gamma_t - 2\sqrt{15} \text{ Lj } \gamma_x \\ &\approx 11,62 \text{ Lj } \gamma_t - 7,75 \text{ Lj } \gamma_x \end{aligned} \quad \{22\}$$

Wie erwartet ergibt sich das bereits graphisch aufgefundene Ergebnis der Lorentz-Reflexion von Abschnitt 5.

Eine weitere Reflexion an der zeitlichen Koordinatenachse, die durch den zeitartigen Einheitsvektor

$$\mathbf{m}_1 = \gamma_t \quad \{23\}$$

repräsentiert werden kann, führt auf das Endergebnis der Lorentz-Rotation

$$\begin{aligned}\mathbf{r}_2 &= \frac{\mathbf{m}_1 \mathbf{r}_{2\text{ref}} \mathbf{m}_1}{\mathbf{m}_1^2} = \mathbf{m}_1 \mathbf{r}_{2\text{ref}} \mathbf{m}_1 \\ &= 3\sqrt{15} \text{ Lj } \gamma_t + 2\sqrt{15} \text{ Lj } \gamma_x \quad \{24\} \\ &\approx 11,62 \text{ Lj } \gamma_t + 7,75 \text{ Lj } \gamma_x\end{aligned}$$

von Abschnitt 6. Damit ist die Lorentz-Transformation der Abitur-Teilaufgabe 2.2d algebraisch auf Grundlage der Raumzeit-Algebra (Dirac-Algebra) vollständig durchgeführt.

9.2. Nutzung hyperbolischer Funktionen

In diesem etwas anspruchsvolleren Lösungsansatz wird der Winkel $\alpha/2$, der zwischen Reflexionsachse und Koordinatenachse liegt, mit Hilfe einer Halbierung des Winkels α zwischen den beiden Weltlinien von Dr. Pau und Dr. Wolf bestimmt.

Da die Koordinaten eines Punktes der Weltlinie von Dr. Pau in der Aufgabenstellung (Abb. 1) gegeben sind, kann dieser Winkel unkompliziert über

$$\tanh \alpha = \frac{1 \text{ Lj}}{4 \text{ Lj}} = 0,25 \quad \{25\}$$

$$\alpha = \arctan 0,25 = 0,2554 \quad \{26\}$$

$$\frac{\alpha}{2} = 0,1277 \quad \{27\}$$

bestimmt werden. Die zeitliche Winkelhalbierende wird somit durch den Reflexionsvektor

$$\begin{aligned}\mathbf{n}_2 &= \cosh(\alpha/2) \gamma_t - \sinh(\alpha/2) \gamma_x \\ &= 1,0081 \gamma_t - 0,1281 \gamma_x \quad \{28\}\end{aligned}$$

repräsentiert. Da es sich mit

$$\begin{aligned}\mathbf{n}_2^2 &= \cosh^2(\alpha/2) - \sinh^2(\alpha/2) \\ &= 1,0081^2 - 0,1281^2 = 1 \quad \{29\}\end{aligned}$$

nun um einen zeitartigen Einheitsvektor handelt, kann eine Normierung entfallen und direkt Gl. {10}

$$\begin{aligned}\mathbf{r}_{2\text{ref}} &= \mathbf{n}_2 \mathbf{r}_3 \mathbf{n}_2 \\ &= 11,6190 \text{ Lj } \gamma_t - 7,7460 \text{ Lj } \gamma_x \quad \{30\} \\ &\approx 11,62 \text{ Lj } \gamma_t - 7,75 \text{ Lj } \gamma_x\end{aligned}$$

genutzt werden, was auf ein zu {22} identisches Ergebnis führt. Die zweite Reflexion ist dementsprechend ebenfalls zu Gl. {23} und {24} identisch und ergibt mit

$$\begin{aligned}\mathbf{r}_2 &= \mathbf{m}_2 \mathbf{r}_{2\text{ref}} \mathbf{m}_2 = \gamma_t \mathbf{r}_{2\text{ref}} \gamma_t \\ &= 11,6190 \text{ Lj } \gamma_t + 7,7460 \text{ Lj } \gamma_x \quad \{31\} \\ &\approx 11,62 \text{ Lj } \gamma_t + 7,75 \text{ Lj } \gamma_x\end{aligned}$$

das erwartete Ergebnis.

9.3. Reflexion an den Winkel-Viertelnden

Aus Gl. {26} folgt unkompliziert

$$\frac{\alpha}{4} = 0,0639 \quad \{32\}$$

$$\frac{3\alpha}{4} = 0,1916 \quad \{33\}$$

so dass die beiden Reflexionsvektoren

$$\begin{aligned}\mathbf{n}_3 &= \cosh(3\alpha/4) \gamma_t - \sinh(3\alpha/4) \gamma_x \\ &= 1,0184 \gamma_t - 0,1927 \gamma_x \quad \{34\}\end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned}\mathbf{m}_3 &= \cosh(\alpha/4) \gamma_t - \sinh(\alpha/4) \gamma_x \\ &= 1,0020 \gamma_t - 0,0639 \gamma_x \quad \{35\}\end{aligned}$$

lauten werden. Wiederum handelt es sich aufgrund

$$\mathbf{n}_3^2 = \mathbf{m}_3^2 = 1 \quad \{36\}$$

um zeitartige Einheitsvektoren, so dass die Reflexionen als einfache Sandwich-Produkte ohne Normierung berechnet werden können:

$$\begin{aligned}\mathbf{r}_{2\text{neu}} &= \mathbf{n}_3 \mathbf{r}_3 \mathbf{n}_3 \quad \{37\} \\ &= 12,7052 \text{ Lj } \gamma_t - 9,2963 \text{ Lj } \gamma_x\end{aligned}$$

Eine kurze Probe durch

$$12,7052^2 - (-9,2963)^2 = 10^2 - 5^2 = 75 \quad \{38\}$$

zeigt, dass dieses Zwischenergebnis korrekt ist. Die zweite raumzeitliche Reflexion lautet dann:

$$\begin{aligned}\mathbf{r}_2 &= \mathbf{m}_3 \mathbf{r}_{2\text{neu}} \mathbf{m}_3 \\ &= 11,6190 \text{ Lj } \gamma_t + 7,7460 \text{ Lj } \gamma_x \quad \{39\} \\ &\approx 11,62 \text{ Lj } \gamma_t + 7,75 \text{ Lj } \gamma_x\end{aligned}$$

Auch hier kann ein kurze Probe mit

$$\begin{aligned}(3\sqrt{15})^2 - (2\sqrt{15})^2 &= 135 - 60 \quad \{40\} \\ &= 10^2 - 5^2 = 75\end{aligned}$$

bestätigen, dass das Ergebnis sinnvoll und korrekt ist.

10. GAALOP

Die in den drei Unterabschnitten von Abschnitt 9 benötigten algebraischen Schritte können bei eingeübter und gefestigter Rechenroutine durch die Lernenden Schritt für Schritt von Hand selbst vorgenommen oder recht einfach nachvollzogen werden.

Im Wesentlichen handelt es sich bei allen Lösungsvarianten um eine Berechnung unterschiedlicher Multiplikationen raumzeitlicher Größen, die unter Beachtung der Vertauschungs- {5} und Normierungsregeln {6} bei entsprechend vorhandenen zeitlichen Ressourcen auch problemlos durch Lernende selbst vorgenommen werden können.

Allerdings können äußere Umstände wie beispielsweise zeitliche Einschränkungen oder lernstrategische Hemmnisse wie beispielsweise eine rechnerische Ungeübtheit aufgrund der bei zahlreichen Schülerinnen und Schülern oder Studierenden vorhandenen Fixierung auf eine Taschenrechner-Nutzung die Berechnung der notwendigen raumzeitlichen Multiplikationen stören, stark behindern oder bei starken Rechendefiziten eventuell sogar gänzlich unmöglich machen.

Deshalb ist es sinnvoll, didaktische Alternativen bzw. den Einsatz von Hilfsmitteln in Betracht zu ziehen. Da derzeit allerdings keine schulischen Ta-

schonrechner auf dem Markt sind, die Rechnungen zur Raumzeit-Algebra (Dirac-Algebra) zulassen, müsste hier ein entsprechender Taschenrechner-Ersatz zur Anwendung kommen.

Als ein solcher Taschenrechner-Ersatz kann das Programm-Tools „Geometric Algebra Algorithms Optimizer“ (GAALOP) genutzt werden. Jedoch ist dabei auch zu beachten, dass diese Nutzung von GAALOP als geometrisch-algebraischer Taschenrechner-Ersatz [39] – [42] in gewisser Weise einen didaktisch motivierten ‚Missbrauch‘ dieses Programm-Tools darstellt.

Ursprünglich war GAALOP [43] – [47] von seinen Entwicklern als ein Werkzeug gedacht, mit dessen Hilfe Rechenschritte der Geometrischen Algebra in Programme integriert werden können, die in Standard-Programmiersprachen verfasst sind und keine Rechnungen zur Geometrischen Algebra zulassen.

Das im Compiler-Feld angezeigte Resultat der Programmoptimierung enthält deshalb immer auch Syntax-Anteile, die eine solche Einbindung ermöglichen und die bei einer Nutzung als Taschenrechner-Ersatz zu ignorieren sind.

Da die Programm-Syntax von GAALOP recht einfach und die Anwendung nahezu selbsterklärend ist und in der Regel nach kurzer Erläuterung von den Studierenden verstanden werden, ergeben sich bei einem Gebrauch als Taschenrechner-Ersatz kaum größere Schwierigkeiten.

Darüber hinaus steht GAALOP kostenfrei zur Verfügung und kann im Internet unter der Adresse www.gaalop.de/download [43] problemlos heruntergeladen und installiert (siehe Abb. 8) werden.



Abb.8: Download des Programm-Tools GAALOP.

Zur Notation muss lediglich gesagt werden, dass die als Basisvektoren gedeuteten Dirac-Matrizen durchnummeriert und als Einheitsvektoren nun mit lateinischen Buchstaben darzustellen sind:

$$\begin{aligned}
 \gamma_t &\longrightarrow e_1 \\
 \gamma_x &\longrightarrow e_2 \\
 \gamma_y &\longrightarrow e_3 \\
 \gamma_z &\longrightarrow e_4
 \end{aligned}
 \quad \{41\}$$

Die drei unterschiedlichen Multiplikationsformen {16} werden ebenso intuitiv einsichtig übertragen als

$$\begin{aligned}
 \text{Geometrische Multiplikation: } m n &\longrightarrow m * n \\
 \text{Innere Multiplikation: } m \bullet n &\longrightarrow m \cdot n \\
 \text{Äußere Multiplikation: } m \wedge n &\longrightarrow m \wedge n
 \end{aligned}
 \quad \{42\}$$

Damit ergeben sich auch die logischen Darstellungen der Basis-Bivektoren

$$\begin{aligned}
 \gamma_x \gamma_t &\longrightarrow e_2 * e_1 \quad \text{und} \quad \gamma_x \gamma_y &\longrightarrow e_2 * e_3 \\
 \gamma_y \gamma_t &\longrightarrow e_3 * e_1 \quad \text{und} \quad \gamma_y \gamma_z &\longrightarrow e_3 * e_4 \\
 \gamma_z \gamma_t &\longrightarrow e_4 * e_1 \quad \text{und} \quad \gamma_z \gamma_x &\longrightarrow e_4 * e_2
 \end{aligned}
 \quad \{43\}$$

Und das Berechnungsziel wird angegeben, indem die gesuchte Größe durch Angabe eines vorgesetzten Fragezeichens gekennzeichnet wird.

Für die in Abschnitt 11 gezeigten Musterlösungen wurden die folgenden Einstellungen gewählt:

- Algebra to use: **st4d – space-time**
- Visual Code Inserter: **Visual Code Inserter**
- Optimization: **Table-Based Approach**
- Code Generator: **TEX LaTeX**

Nach einer einführenden Einübung der Grundlagen von GAALOP (beispielsweise durch einfache Flächenberechnungen oder rein räumliche Rotationen [42]) können dann Lorentz-Transformationen als raumzeitliche Rotationen mit GAALOP rechnerisch gelöst werden.

11. Lorentz-Rotationen mit GAALOP

In diesem Abschnitt werden nun die bereits in 9.1 bis 9.3 vorgestellten Lösungsstrategien in GAALOP-Programme übertragen. Dazu müssen lediglich die vorgegebenen Größen in GAALOP angegeben und die Lorentz-Rotationsformel {15} korrekt umgesetzt werden

11.1. GAALOP-Beispiel mit Normierung des Reflexionsvektors

In Abb. 9 wird das GAALOP-Programm zur ersten Lösungsstrategie gezeigt. Angegeben werden die Position der Supernova aus Sicht von Dr. Pau {17} sowie die beiden Reflexionsvektoren {20} und {23}. Da GAALOP keine Wurzelberechnungen vornimmt, muss der zur Normierung notwendige Wert von $\sqrt{15} = 3,87298335$ gesondert angegeben werden.

Damit entfallen vier der fünf Zeilen des Programms auf die Angabe der gegebenen Größen. Die Angabe der eigentlichen raumzeitlichen Rotation benötigt nur eine einzige Programmzeile.

Die mathematische Eleganz dieses Grassmannschen Ansatzes spiegelt sich hier auch in der Kürze des GAALOP-Programms wider.

Nach Aktivierung des Optimize-Buttons werden die Rechenschritte vom Programm ausgeführt.

Das Ergebnis wird in einem sich öffnenden Compiler-Feld ausgegeben, wobei die zeitliche Koordinate des Positionsvektors der Supernova aus Sicht von

Dr. Wolf hier im Beispiel mit $r_{\text{SuperWOLF}_{\{1\}}$ gekennzeichnet wird, während die räumliche Koordinate der x -Richtung $r_{\text{SuperWOLF}_{\{2\}}$ entsprechend der Zuordnungen $\{41\}$ mit dem Indexwert zwei versehen ist.

Das Ergebnis zeigt die erwarteten Werte, die ab der achten Nachkommastelle Rundungsungenauigkeiten aufweisen.

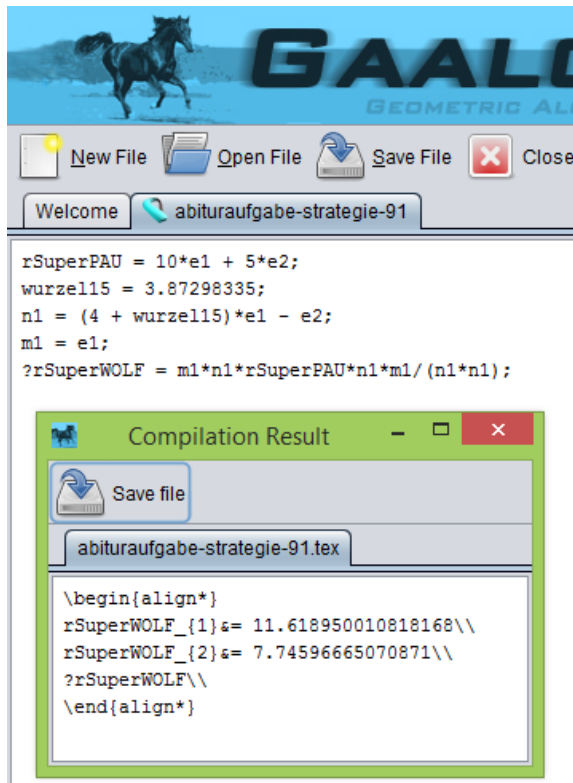


Abb.9: GAALOP-Programm der ersten Lösungsstrategie mit Normierung des Reflexionsvektors.

11.2. GAALOP-Beispiel zur Nutzung hyperbolischer Funktionen

Nachdem mit Hilfe der hyperbolischen Funktionen die entsprechenden Werte der Winkelhalbierenden für $\cosh \alpha/2$ und $\sinh \alpha/2$ ermittelt wurden, können die gegebenen Größen in den ersten drei Zeilen des GAALOP-Programms (siehe Abb. 10) eingegeben werden.

Erneut benötigt die Angabe des eigentlichen Rechenschritts nur eine einzige Programmzeile. Und erneut weist die Kürze dieses GAALOP-Programms deutlich auf die mathematische Eleganz dieses Ansatzes hin.

Auch aus diesem Grund schreibt Hestenes: „... for applications to rotations, quaternions are demonstrably more efficient than the vectorial and matrix methods taught in standard physics courses. The difference hardly matters in the world of academic exercises, but in the aerospace industry, for instance, where rotations are bread and butter, engineers opt for quaternions“ [34, S. 106].

Würden Ingenieure der Luftfahrtindustrie Flugzeuge für einen Gebrauch in der vierdimensionalen Raumzeit konstruieren, würden sie sich folgerichtig für eine Mathematisierung mit Hilfe von verallgemeinerten Quaternionen auf Grundlage der Dirac-Algebra entscheiden.

Die Frage von Rundungsungenauigkeiten – hier nun ab der sechsten Nachkommastelle – spielt dagegen eine technisch untergeordnete Rolle.

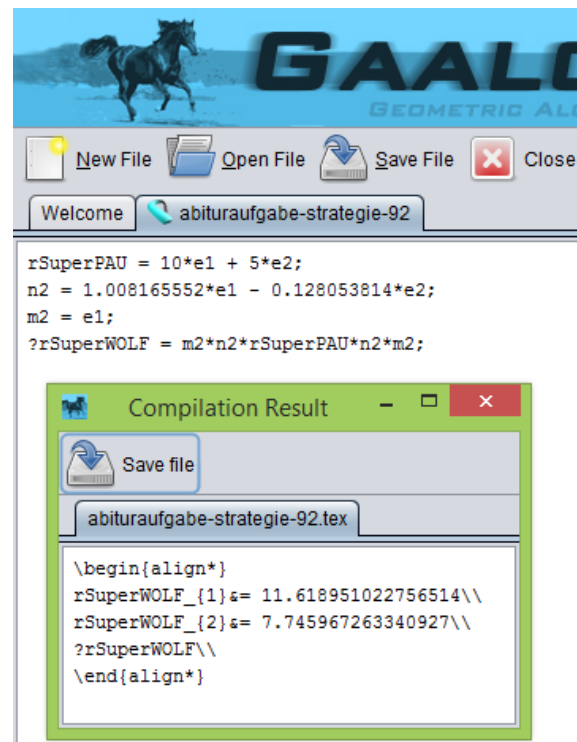


Abb.10: GAALOP-Programm der zweiten Lösungsstrategie mit Nutzung hyperbolischer Funktionen.

11.3. GAALOP-Beispiel zur Reflexion an den Winkel-Viertelenden

Erneut sind lediglich drei Programmzeilen zur Eingabe der raumzeitlichen Position der Supernova aus Sicht von Dr. Pau und der raumzeitlichen Lage der Winkel-Viertelenden notwendig.

Und erneut erfordert die Angabe des eigentlichen Rechenschritts nur eine einzige Programmzeile.

Wie in Unterabschnitt 9.3 gezeigt, kann die räumliche Lage der Winkel-Viertelenden mit Hilfe trigonometrischer Hyperbelfunktionen ermittelt werden.

Alternativ ist es jedoch auch möglich, die Lage der Winkel-Viertelenden durch die Addition eines Einheitsvektors in Richtung der Winkelhalbierenden und eines Einheitsvektors in Richtung der zeitlichen ct -Achse von Dr. Wolf bzw. von Dr. Pau zu bestimmen.

Da diese Summe in unterschiedliche Richtungen weisenden Einheitsvektoren selbst kein Einheitsvektor sein wird, ist hier dann wieder eine Normie-

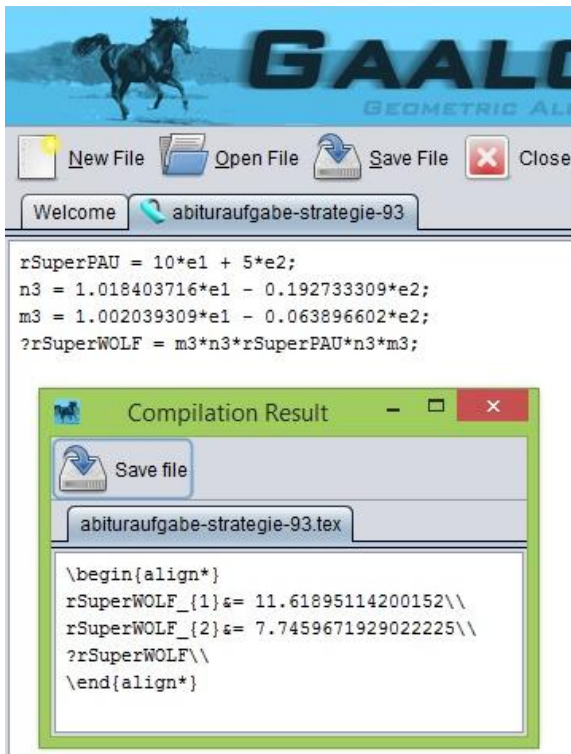


Abb.11: GAALOP-Programm der dritten Lösungsstrategie mit Reflexion an den Winkel-Viertelenden.

ung mit Hilfe des relativistischen und damit raumzeitlichen Satzes von Pythagoras notwendig.

Die konkrete Umsetzung dieser vierten Strategie mit GAALOP, die ohne eine Nutzung hyperbolischer Zusammenhänge zur Lösung führt, ist im beigefügten Poster der GDCP-Jahrestagung 2017 in Regensburg [52, Strategie IV] zu finden.

12. Schlussfolgerung

Mit Hilfe des Programm-Tools GAALOP können Berechnungen zur Speziellen Relativität zeitsparend und effektiv durchgeführt werden. GAALOP erfüllt damit die Funktion eines einfach zu handhabenden und intuitiv zugänglichen Taschenrechner-Ersatzes.

Kenntnisse von Hyperbel-Funktionen sind keine notwendige Voraussetzung. Lernende sollten lediglich ein Grundverständnis für die Multiplikationsregeln der Geometrischen Algebra und Raumzeit-Algebra (Dirac-Algebra) mitbringen.

Dies dürfte bei einer ausführlichen Erörterung des raumzeitlichen Satzes von Pythagoras auch schulisch gut umsetzbar sein.

13. Ausblick: Achsenvertauschungen

Bis heute heute haben wir die Spezielle Relativitätstheorie noch nicht vollständig verstanden.

Letztendlich wird in diesem Beitrag die Lorentz-Transformation als eine mathematische Operation aufgefasst, bei der die Lage der zeitlichen und räumlichen Achsen eines ersten Koordinatensystems (also in Abb. 5 die ct-Achse und die x-Achse des auf der Erde zurückbleibenden Beobachters Dr. Wolf) in die

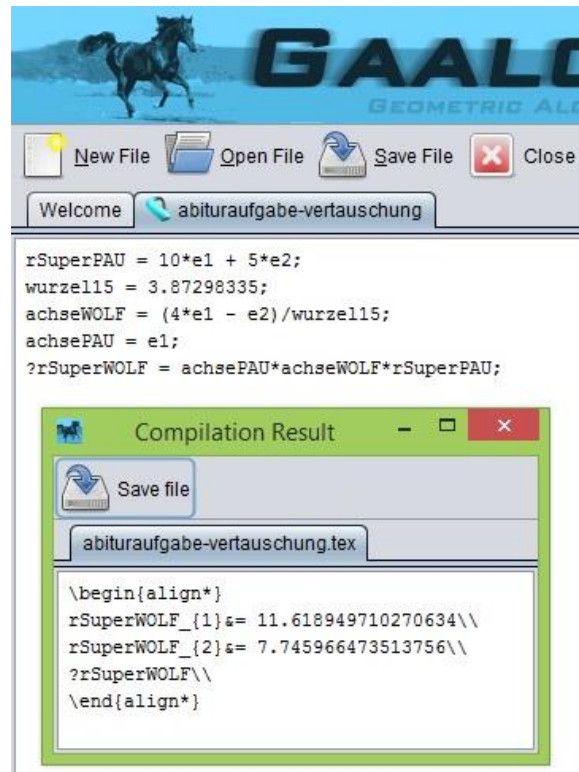


Abb.12: GAALOP-Programm der alternativen Lösungsstrategie zur Achsenvertauschung.

ursprüngliche Lage der zeitlichen und räumlichen Achsen eines zweiten Koordinatensystems (also in Abb. 5 die ct'-Achse und x'-Achse des sich in der Rakete befindlichen Dr. Pau) überführt werden.

Dadurch können die Koordinaten eines Ereignisses (also in Abb. 5 die Koordinaten der Supernova), dessen Lage im zweiten Koordinatensystem bekannt ist, für das erste Koordinatensystem ermittelt werden.

Diese Bestimmung der Koordinaten kann rechnerisch erfolgen oder zeichnerisch, indem Streckenlängen gemessen und über den relativistischen Pythagoras in raumzeitliche Distanzen umgerechnet werden.

Diese Umrechnung ist natürlich dann besonders einfach, wenn raumzeitlich senkrecht stehende Strecken auch auf dem von Natur aus euklidischen Papier senkrecht eingezeichnet werden können. Das ist der konzeptuelle Kern der Abbildungen 6 und 7: Der Umrechnungsfaktor der abgelesenen Streckenlängen von Dr. Wolf beträgt genau 1, so dass ein Zentimeter genau einem Lichtjahr entspricht.

Diese Überführung der Achsen eines Koordinatensystems in ein zweites wird im Rahmen konventioneller Beschreibungen der Lorentz-Transformationen immer als raumzeitliche Rotation verstanden und durchgeführt.

Im zweidimensionalen Fall gibt es jedoch noch eine sehr einfache Alternative, die die Interpretation der zweidimensionalen Lorentz-Transformation unter ei-

nem weiteren Blickwinkel erscheinen lässt: An Stelle einer raumzeitlichen Rotation kann eine raumzeitliche Achsenvertauschung vorgenommen werden [49], [50].

Dabei wird an Stelle eines reinen Sandwich-Produktes {10} und {11}, bei dem identische Größen rechts- und linksseitig anmultipliziert werden, ein gemischtes Sandwich-Produkt gebildet, indem unterschiedliche Größen rechts- und linksseitig an die zu transformierende Größe anmultipliziert werden.

Wird der raumzeitliche Ortsvektor {7}

$$\mathbf{r}_{\text{alt}} = ct \gamma_{t\text{-alt}} + x \gamma_{x\text{-alt}} + y \gamma_{y\text{-alt}} + z \gamma_{z\text{-alt}} \quad \{44\}$$

beispielsweise rechtsseitig mit dem Basisvektor $\gamma_{t\text{-alt}}$ in Richtung der ursprünglichen Zeitachse und linksseitig mit einem neuen Basisvektor $\gamma_{t\text{-neu}}$ in Richtung einer neuen Zeitachse multipliziert, so werden die beiden Zeitachsen vertauscht.

Die ursprüngliche Zeitachse wird durch die neue Zeitachse ersetzt:

$$\mathbf{r}_{\text{fast neu}} = \gamma_{t\text{-neu}} \mathbf{r}_{\text{alt}} \gamma_{t\text{-alt}} \quad \{45\}$$

$$= ct \gamma_{t\text{-neu}} + x \gamma_{t\text{-neu}} \gamma_{x\text{-alt}} \gamma_{t\text{-alt}} + y \gamma_{t\text{-neu}} \gamma_{y\text{-alt}} \gamma_{t\text{-alt}} + z \gamma_{t\text{-neu}} \gamma_{z\text{-alt}} \gamma_{t\text{-alt}}$$

Allerdings treten hierbei zwei Nebenwirkungen auf.

Zum ersten wird durch diese Achsenvertauschung die Orientierung des Koordinatensystems geändert. Aus einem ursprünglich rechtshändigen raumzeitlichen Koordinatensystem wird ein linkshändiges.

Dieser Nebeneffekt kann jedoch leicht korrigiert werden, indem nach der oben beschriebenen Achsenvertauschung eine Reflexion an der alten Zeitachse, die durch den Basisvektor $\gamma_{t\text{-alt}}$ repräsentiert wird, vorgenommen wird.

Der neue raumzeitliche Ortsvektor lautet dann:

$$\mathbf{r}_{\text{neu}} = \gamma_{t\text{-alt}} \gamma_{t\text{-neu}} \mathbf{r}_{\text{alt}} \quad \{46\}$$

$$= ct \gamma_{t\text{-alt}} \gamma_{t\text{-neu}} \gamma_{t\text{-alt}} + x \gamma_{t\text{-alt}} \gamma_{t\text{-neu}} \gamma_{x\text{-alt}} + y \gamma_{t\text{-alt}} \gamma_{t\text{-neu}} \gamma_{y\text{-alt}} + z \gamma_{t\text{-alt}} \gamma_{t\text{-neu}} \gamma_{z\text{-alt}}$$

Die zweite Nebenwirkung ist jedoch gravierender. Es werden die rein vektoriellen Komponenten des alten Ortsvektors in Komponenten überführt, die nicht nur vektorielle und somit streckenartige, sondern auch trivektorielle und somit volumenartige Anteile aufweisen.

Eindimensionale Längen transformieren sich teilweise in dreidimensionale Rauminhalte. Die physikalische Deutung dieser zusätzlichen Volumina ist noch nicht vollständig geklärt. Es ist jedoch sinnvoll, diese als zusätzlich generierte Felder [49] zu interpretieren.

Im zweidimensionalen Fall der hier diskutierten modifizierten Abituraufgabe können jedoch keine zusätzlich generierten trivektoriellen Felder entstehen, da ein zweidimensionaler Raum oder eine zweidimensionale Raumzeit schlicht keinen Platz für dreidimensionale Größen hat.

Aus diesem Grund muss die zweidimensionale Achsenvertauschung zur zweidimensionalen Rotation identisch sein.

Daraus kann auch gefolgert werden, dass nur senkrecht zur Vertauschungsebene stehende Vektorkomponenten in trivektorielle Anteile überführt werden. Auch aus diesem Grund müssen im Zweidimensionalen Achsenvertauschung und Rotation vollständig identisch sein.

Der raumzeitliche Ortsvektor der Supernova aus Sicht von Dr. Pau \mathbf{r}_3 {17} wird somit gemäß {46} mit den beiden zeitlichen Basisvektoren

$$\gamma_{t\text{-alt}} = \gamma_t \quad \{47\}$$

sowie auf Grundlage von {18} und {19}

$$\gamma_{t\text{-neu}} = \frac{\mathbf{r}_2'}{|\mathbf{r}_2'|} = \frac{1}{\sqrt{15}} (4 \text{Lj } \gamma_t - 1 \text{Lj } \gamma_x) \quad \{48\}$$

linksseitig multipliziert. Dabei ergibt sich nach Gl. {46} mit

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_2 &= \frac{1}{\sqrt{15}} \gamma_t (4 \text{Lj } \gamma_t - 1 \text{Lj } \gamma_x) (10 \text{Lj } \gamma_t + 5 \text{Lj } \gamma_x) \\ &= \frac{1}{\sqrt{15}} (40 \text{Lj } \gamma_t + 20 \text{Lj } \gamma_x + 10 \text{Lj } \gamma_x + 5 \text{Lj } \gamma_t) \\ &= 3\sqrt{15} \text{Lj } \gamma_t + 2\sqrt{15} \text{Lj } \gamma_x \\ &\approx 11,62 \text{Lj } \gamma_t + 7,75 \text{Lj } \gamma_x \end{aligned} \quad \{49\}$$

das tatsächlich erwartete Ergebnis.

Dieses Ergebnis können Schülerinnen und Schüler, denen eine Berechnung von

$$1 \cdot 4 \cdot 10 = 40 \quad \text{bzw.} \quad 1 \cdot 4 \cdot 5 = 20 \quad \{50\}$$

und unter Beachtung zusätzlicher Minuszeichen aufgrund der Normierungs- und Vertauschungsregeln

$$(-1) \cdot 10 \cdot (-1) = 10$$

$$\text{bzw.} \quad (-1) \cdot 5 \cdot (-1) = 5 \quad \{51\}$$

ohne einen relativistischen Taschenrechner nicht zugemutet werden möchte, auch mit Hilfe von GAALOP (siehe Abb. 12) erzielen.

Dieses Beispiel zeigt, dass die Nutzung von Achsenvertauschungen an Stelle von Rotationen bei zweidimensionalen Situationen tatsächlich nicht nur praktikabel, sondern auch sinnvoll und sehr effektiv ist.

Und sie funktioniert so einfach [50], [51] und so überzeugend, dass eine solche mathematische Modellierung auch im schulischen Rahmen – auf jeden Fall mit Leistungskursschülern sowie mit Unterstützung durch GAAOP auch mit Grundkursschülern – durchgeführt und mit Schülerinnen und Schülern sachangemessen diskutiert werden kann.

14. Literatur

- [1] Derbyshire, John (2006): *Unknown Quantity. A Real and Imaginary History of Algebra*. Joseph Henry Press, Washington.

- [2] Gericke, Helmuth (1992): *Mathematik in Antike und Orient & Mathematik im Abendland*. Sonderausgabe in einem Band. Fourier-Verlag, Wiesbaden.
- [3] Wußing, Hans (2008): *6000 Jahre Mathematik. Eine kulturgeschichtliche Zeitreise – 1. Von den Anfängen bis Leibniz und Newton*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [4] Grcar, Joseph Frank (2011): *Mathematicians of Gaussian Elimination*. In: *Notices of the American Mathematical Society*, Vol. 58, No. 6, S. 782-792.
- [5] Grcar, Joseph Frank (2011): *How Ordinary Elimination Became Gaussian Elimination*. In: *Historia Mathematica*, Vol. 38, No. 2, S. 163-218.
- [6] Gruss, Peter (2006): *Von der Erkenntnis zum Gewinn – Technologietransfer aus der Grundlagenforschung*. Rede beim Unternehmertreff ZENIT in Mülheim an der Ruhr. Auszugsweise veröffentlicht in: Iris Karabelas, Mechthild Schmid (Red.), (2014): *Amtszeit Peter Gruss 2002 – 2014*. S. 78-82. Booklet der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften, München.
- [7] Ashby, Neil (2002): *Relativity and the Global Positioning System*. In: *Physics Today*, May 2002, S. 41-47.
- [8] Rietz, Helga (2016): *Integrieren wie die Babylonier*. In: *Neue Zürcher Zeitung*, Online-Ausgabe vom 28. Jan. 2016, URL: www.nzz.ch/wissenschaft/astonomie/integriere-n-wie-die-babylonier-1.18685442 (02.07.2017).
- [9] Ossendrijver, Mathieu (2016): *Ancient Babylonian astronomers calculated Jupiter's position from the area under a time-velocity graph*. In: *Science*, Vol. 351, Issue 6272 (29.01.2016), S. 482-484, URL: <http://science.sciencemag.org/content/351/6272/482> (02.07.2017).
- [10] Nestler, Ralf (2016): *Geniale Mathematiker, diese Babylonier!* In: Online-Ausgabe der ZEIT vom 29. Jan. 2016, URL: www.zeit.de/wissen/2016-01/astonomie-mathematik-babylon-geometrie-jupiter (02.07.2017).
- [11] Planck, Max (1915): *Eight Lectures on Theoretical Physics delivered at Columbia University in 1909*. Columbia University Press, New York.
- [12] Biener, Klaus (2005): *Hermann Minkowski – Mathematiklehrer Einsteins*. In: *Computer- und Medienservice der Humboldt-Universität Berlin*, cms-journal 27, August 2005, S. 77-78.
- [13] Pauli, Wolfgang (1994): *Writings on Physics and Philosophy*. Herausgegeben von Charles P. Enz und Karl von Meyenn. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [14] Einstein, Albert (1905): *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*. In: *Annalen der Physik*, Vol. 17, S. 891-921.
- [15] Bondi, Hermann (1971): *Mythen und Annahmen in der Physik*. VR Kleine Vandenhoeck Reihe 323/324/325, Verlag Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen.
- [16] Feynman, Richard P. (2006): *Physik »The Lost Lectures«*. Pearson Studium, München.
- [17] Feynman, Richard P. (1967): *The Character of Physical Law*. First MIT Press Paperback Edition, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- [18] Horn, Martin Erik (2010): *Die Raumzeit-Algebra im Abitur*. In: *PhyDid B, Didaktik der Physik*, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung in Hannover 2010, Beitrag 28.4. URL: www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/192 (31.12.2010).
- [19] Hestenes, David (2002): *New Foundations for Classical Mechanics*. Second edition, Kluwer Academic Publishers, New York, Boston.
- [20] Hestenes, David (2003). *Spacetime Physics with Geometric Algebra*. In: *American Journal of Physics*, Vol. 71, No. 7, 691-714.
- [21] Doran, Chris; Lasenby, Anthony (2003): *Geometric Algebra for Physicists*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [22] Gull, Stephan; Lasenby, Anthony; Doran, Chris (1993): *Imaginary Numbers are not Real – The Geometric Algebra of Spacetime*. In: *Foundations of Physics*, Vol. 23, No. 9, S. 1175-1201.
- [23] Horn, Martin Erik (2009): *Die Spezielle Relativitätstheorie im Kontext der Raumzeit-Algebra*. In: Volkhard Nordmeier, Helmuth Grötzebauch (Hrsg.): *Didaktik der Physik, Beiträge zur Frühjahrstagung in Bochum, Tagungs-CD des Fachverbands Didaktik der Physik der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, Beitrag 30.40. LOB – Lehmanns Media, Berlin.
- [24] Horn, Martin Erik (2009): *Arbeitsbögen zur Geometrischen Algebra und zur Raumzeit-Algebra*. Veröffentlicht als Anhang des Beitrags [23].
- [25] Horn, Martin Erik (2011): *Grassmann, Pauli, Dirac: Special Relativity in the Schoolroom*. In: Hans-Joachim Petsche, Albert C. Lewis, Jörg Liesen, Steve Russ (Hrsg.). *From Past to Future – Grassmann's Work in Context*. Grassmann Bicentennial Conference, S. 435-450, Birkhäuser-Verlag/Springer, Basel, Berlin.
- [26] Liebscher, Dierck-Ekkehard (1991): *Relativitätstheorie mit Zirkel und Lineal*. Zweite, durchgesehene und erweiterte Auflage, Akademie Verlag, Berlin.
- [27] Scriba, Christoph J.; Schreiber, Peter (2010): *5000 Jahre Geometrie. Geschichte • Kulturen • Menschen*. Dritte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

- [28] Minkowski, Hermann (1910): Zwei Abhandlungen über die Grundgleichungen der Elektrodynamik. Verlag von B. G. Teubner, Leipzig, Berlin.
- [29] Silberstein, Ludwig (1932): Quaternionic Form of Relativity. In: Philosophical Magazine Series 6, Vol. 23, No. 137 (LXXVI.), S. 790-809.
- [30] Lanczos, Cornelius (1919/2004): Die Funktionentheoretischen Beziehungen der Maxwell'schen Äthergleichungen. Ein Beitrag zur Relativitäts- und Elektronentheorie. Dissertation, Universität Budapest, Verlagsbuchhandlung Josef Németh, Budapest. Reprint und englische Übersetzung: The Functional Theoretical Relationships of the Homogenous Maxwell Equations. A Contribution to the Theory of Relativity and Electrons. arXiv:physics/0408079v1, Url: <http://arxiv.org/abs/physics/0408079> (17.08.2004).
- [31] Klein, Felix; Sommerfeld, Arnold (1910): Über die Theorie des Kreisels. Heft IV – Die Technischen Anwendungen der Kreiselttheorie. Verlag von B. G. Teubner, Leipzig.
- [32] Girard, Patrick R. (2007): Quaternions, Clifford Algebras and Relativistic Physics. Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin.
- [33] Horn, Martin Erik (2010): Reconsidering and Rethinking Quaternionic Special Relativity. In: Vaclav Skala, Eckhard Hitzer (Hrsg.): GraVisMa 2010 Workshop Proceedings. Second International Workshop on Computer Graphics, Computer Vision and Mathematics, S. 123-129. Union Agency, Plzen.
- [34] Hestenes, David (2003): Oersted Medal Lecture 2002: Reforming the Mathematical Language of Physics. In: American Journal of Physics, Vol. 71, No. 2, S. 104-121.
- [35] Dyson, Freeman J. (1972): Missed Opportunities. Josiah Willard Gibbs Lecture of January 17, 1972. In: Bulletin of the American Mathematical Society, Vol. 78, No. 5. S. 635-652.
- [36] Vince, John (2010): Mathematics for Computer Graphics. Third edition, Springer-Verlag, London, Heidelberg.
- [37] Horn, Martin Erik (2015): Sandwich Products and Reflections. In: PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung in Wuppertal 2015, Beitrag 17.7. Url: www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/642 (17.12.2015).
- [38] Kuipers, Jack B. (1999): Quaternions and Rotation Sequences. A Primer with Applications to Orbits, Aerospace, and Virtual Reality. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- [39] Horn, Martin Erik (2017): Lösung einer Aufgabe zu Linearen Gleichungssystemen aus der Han-Dynastie mit GAALOP als Taschenrechner-Ersatz. In: Ulrich Kortenkamp, Ana Kuzle (Hrsg.): BzMU 2017 – Beiträge zum Mathematikunterricht, Tagungsband der Jahrestagung der GDM 2017 in Potsdam, Bd. 2, S. 461-464. WTM-Verlag, Münster.
- [40] Horn, Martin Erik (2018): Solutions of Two Problems about Systems of Simultaneous Linear Equations from Old Babylonia and from the Han Period with GAALOP as a Pocket Calculator Substitute. Erweiterte und ins Englische übersetzte Fassung des GDM-Beitrags „Lösung einer Aufgabe zu Linearen Gleichungssystemen aus der Han-Dynastie mit GAALOP als Taschenrechner-Ersatz“ [39]. Zur Veröffentlichung vorgesehen als Anhang des Beitrags [41].
- [41] Horn, Martin Erik (2018): Die Geometrische Algebra mit GAALOP im Schnelldurchgang. Zur Veröffentlichung vorgesehen in: PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung in Würzburg 2018, Beitrag 02.03.
- [42] Horn, Martin Erik (2018): GAALOP als speziell-relativistischer Taschenrechner. In: Christian Maurer (Hrsg.): Qualitätvoller Chemie- und Physikunterricht – normative und empirische Dimensionen. Tagungsband der Jahrestagung der GDGP in Regensburg 2017, Band 38, S. 703-706, Universität Regensburg.
- [43] GAALOP-Entwicklerteam – Pitt, Joachim; Hildenbrand, Dietmar; Schwinn, Christian; Charrier, Patrick; Steinmetz, Christian (2017): Homepage des Programm-Tools Geometric Algebra Algorithms Optimizer – GAALOP website. Url: <http://www.gaalop.de> (25.02.2017).
- [44] Hildenbrand, Dietmar; Pitt, Joachim; Koch, Andreas (2010): Gaalop – High Performance Parallel Computing Based on Conformal Geometric Algebra. In: Eduardo Bayro-Corrochano, Geric Scheuermann (Hrsg.): Geometric Algebra Computing in Engineering and Computer Science, S. 477-494. Springer-Verlag, London.
- [45] Schwinn, Christian; Hildenbrand, Dietmar; Stock, Florian; Koch, Andreas (2010): Gaalop 2.0 – A Geometric Algebra Algorithm Compiler. In: Vaclav Skala, Eckhard Hitzer (Hrsg.): GraVisMa 2010 Workshop Proceedings. Second International Workshop on Computer Graphics, Computer Vision and Mathematics, S. 1-8. Union Agency, Plzen.
- [46] Steinmetz, Christian (2011): Optimizing a Geometric Algebra Compiler for Parallel Architectures using a Table-Based Approach. Bachelor-Thesis, eingereicht am Fachbereich Informatik der Technischen Universität Darmstadt.
- [47] Hildenbrand, Dietmar (2013): Foundations of Geometric Algebra Computing. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [48] Toth, Imre (1979): Spekulationen über die Möglichkeit eines nicht euklidischen Raumes vor Einstein. In: H. Nelkowski, H. Poser, A. Hermann, R. Schrader, R. Seiler (Hrsg.): Einstein Symposium Berlin aus Anlaß der 100. Wiederkehr seines Geburtstages, S. 46-83. Springer-Verlag, Heidelberg, New York.

- [49] Horn, Martin Erik (2018): Another Introduction to Geometric Algebra with some Comments on Moore-Penrose Inverses. Zur Veröffentlichung vorgesehen in: Dieter Schuch, Michael Ramek (Hrsg.): Symmetries in Science XVII, Proceedings of the International Symposium in Bregenz 2017. Journal of Physics Conference Series, IOP Science, Bristol.
- [50] Horn, Martin Erik (2018): Die aber auch allereinfachste Darstellung der Lorentz-Transformation mit und ohne GAALOP. Zur Veröffentlichung vorgesehen in: BzMU 2018 – Beiträge zum Mathematikunterricht, Tagungsband der Jahrestagung der GDM 2018 in Paderborn. WTM-Verlag, Münster.
- [51] Baumgarten, Christian (2017): The Simplest Form of the Lorentz Transformations. arXiv:physics.gen-ph/1801.01840v1, Url: <http://arxiv.org/abs/1801.01840> (07.05.2018).

Dem Beitrag beigefügte Dateien

- [52] Horn, Martin Erik (2017): Poster P 57 „GAALOP als speziell-relativistischer Taschenrechner-Ersatz“ vom 19. Sept. 2017, vorgestellt auf der GDCP-Jahrestagung an der Universität Regensburg.
- [53] Horn, Martin Erik (2018): The yet really very simplest representation of the Lorentz transformation with and without GAALOP. Erweiterte und ins Englische übersetzte Fassung des GDM-Beitrags „Die aber auch allereinfachste Darstellung der Lorentz-Transformation mit und ohne GAALOP“ [50].

Modularer Aufbau eines induktiv aufladbaren Modell-Elektroautos

Simon Wilhelm*, Angela Fösel*

*Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Staudtstraße 7, 91058 Erlangen
simon.wilhelm@fau.de, angela.foesel@fau.de

Kurzfassung

BMW plant für das Jahr 2018 eine neue Variante eines seiner Hybrid-Fahrzeuge auf den Markt zu bringen: Der Akkumulator des BMW 530e iPerformance soll sich mithilfe einer speziellen Ladestation induktiv aufladen lassen und damit die E-Mobilität revolutionieren [1]. Dies zeigt, dass sich das Prinzip der induktiven Energieübertragung inzwischen weit über das Laden von elektrischen Zahnbürsten und Smartphones hinaus erstreckt und sich der Anwendungsbereich ständig erweitert. Auch im Physikunterricht aller Schularten spielt die induktive Energieübertragung eine wichtige Rolle. Eine Verknüpfung des Themas Induktion mit dem induktiven Ladesystem für Elektroautos weckt das Interesse der Schülerinnen und Schüler, motiviert und unterstützt das Lernen durch lebensnahe Kontexte.

In diesem Beitrag soll aus physikalischer und aus physikdidaktischer Sicht der Vorgang des induktiven Ladens anhand eines selbst entwickelten Modell-Elektroautos diskutiert werden. Der Fokus liegt hierbei auf dem modularen Aufbau, der sich von der Konzeption eines hochfrequenten Schwingkreises über eine resonante Übertragung bis hin zum Aufladen der Akkumulatoren erstreckt.

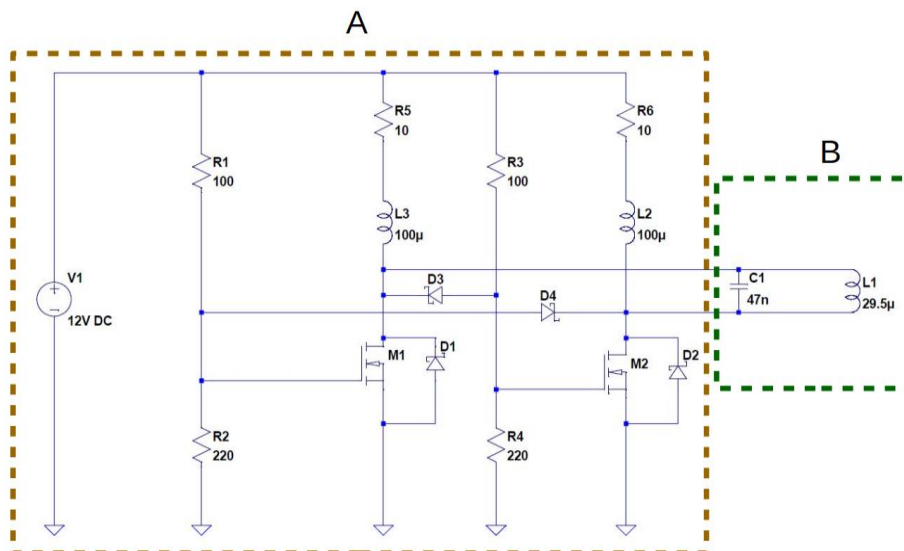


Abb. 1: Schaltplan des Royer-Oszillators.

1. Motivation

Im Rahmen einer Examensarbeit für das Studium des gymnasialen Lehramts wurde ein Modell konzipiert, das den Aufbau eines induktiv ladbaren Elektroautos und dessen Ladestation zeigt. Darüber hinaus sollte im Modellexperiment das induktive Laden auch für Schülerinnen und Schüler erfahrbar gemacht werden. Durch den realitätsnahen Bezug soll deren Interesse geweckt und ihre Motivation gesteigert werden, wobei der realitätsnahe Bezug dadurch gegeben ist, dass bereits Straßenbusse, die an ihren Haltestellen induktiv geladen werden, im Einsatz sind [2]. Darüber hinaus kündigt BMW für das Jahr 2018 den BMW 530e an, der mithilfe eines Ladepads induktiv aufgeladen werden kann, wobei das Ladepad als Sender Energie auf den Empfänger – das Auto – überträgt.

2. Allgemeiner Aufbau

Allgemein lässt sich das Ladesystem sowohl im Modell als auch im Original in zwei Teile aufteilen: Die Primärseite fungiert als Sender (Ladepad) und die Sekundärseite als Empfänger (im Auto). Die Primärseite muss mit Energie versorgt werden und ungedämpft schwingen. Die Sekundärseite besteht aus der Empfängerspule, in der eine Spannung durch das sich zeitlich ändernde Magnetfeld der Primärseite induziert wird, sowie einer Ladevorrichtung für den im Auto verbauten Akkumulator. Ziel des gesamten Systems ist es, Energie vom Sender auf den Empfänger zu übertragen, um den im Auto verbauten Akkumulator zu laden.

3. Aufbau des Modells - Primärseite

Primärseitig wurde die ungedämpfte Schwingung durch einen Royer-Oszillator realisiert, zu dem ein Schaltplan in Abbildung 1 zu sehen ist. Dieser hat zwei Vorteile. Einerseits schwingt er immer mit der Eigenresonanzfrequenz des integrierten LC-Schwingkreises, andererseits ermöglicht er eine permanente Energieversorgung [3]. Der Teil A dient als Versorgung für den LC-Schwingkreis (Teil B). Die Spule des LC-Schwingkreises besitzt dabei eine Induktivität von 29.5 μH und der Kondensator eine Kapazität von 47 nF, was zu einer Eigenresonanzfrequenz von 142 kHz führt. Durch die Transistoren M1 und M2, die durch den restlichen Aufbau immer wechselseitig schalten, wird im LC-Schwingkreis eine sinusförmige Spannung mit der Eigenresonanzfrequenz erzeugt.

Um die Funktionsweise des theoretischen Aufbaus aus Abbildung 1 zu überprüfen wurde eine Simulation des Royer-Oszillators mithilfe der Software „Eagle“ [4] durchgeführt. Das Ergebnis dieser Simulation zeigte eine ungedämpfte Schwingung mit einer Periodendauer von ca. 7 μs , was einer Frequenz von 142 kHz entspricht. Ebenso ergibt eine Vermessung des realen Royer-Oszillators, der in Abbildung 2 zu sehen ist, eine hochfrequente Wechselspannung parallel zur Spule des LC-Schwingkreises mit eben jener Fre-



Abb. 2: Platine des Royer-Oszillators mit Anschlüssen für die Gleichspannungsquelle (schwarz-rot) und für die Senderspule (blau).

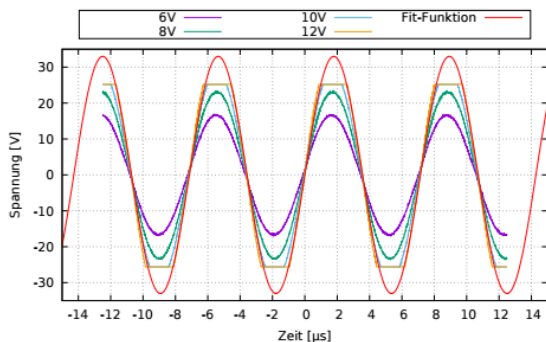


Abb. 3: Messung der von Royer-Oszillator erzeugten Ausgangsspannung parallel zur Senderspule bei verschiedenen Eingangsspannungen. Die aufgrund des eingeschränkten Messbereichs abgeschnittene Kurve wurde durch eine Fit-funktion der Form $f(x)=33*\sin(0.88*x)$ angenähert.

quenz. Bei der Messung wurde dabei für verschiedene Eingangsspannungen (DC) jeweils die Wechselspannung über der Spule mithilfe eines digitalen Oszilloskops aufgezeichnet. Abbildung 3 zeigt das Ergebnis dieser Messung. Bei einer Eingangsspannung von 12 V DC ergibt sich dabei eine Spitzenspannung von 32 V durch die Spule, was auch bei nicht optimaler Spulenposition zum Laden eines Akkumulators ausreicht. Darüber hinaus ist diese Spannung im schulischen Rahmen noch innerhalb der Schutzbestimmungen (vgl. z. B. [5] S.13). Eine weitere Spannungserhöhung könnte zwar zu einer schnelleren Ladung genutzt werden, jedoch wäre diese für den schulischen Gebrauch nicht mehr sicher.

4. Aufbau des Modells – Sekundärseite

Da die Primärseite durch den zuvor beschriebenen Aufbau bereits festgelegt ist, werden jegliche Optimierungen der Übertragung sekundärseitig getätigt.

4.1. Optimierung

Zur Optimierung der Übertragung tragen in diesem Setting hauptsächlich zwei Punkte bei: Die Spulenpositionierung zueinander, sowie die Abstimmung des Empfängerschwingkreises auf den Senderschwingkreis. Zum ersten Punkt gehören die Kippung sowie der Abstand der Spulen zueinander. Zum zweiten Punkt können die Frequenzanpassung sowie die geometrische Wahl der Spulen gezählt werden. In diesem Aufbau wurde eine, in Relation zur Empfängerspule, große Senderspule gewählt, damit auch bei nicht optimalen Parkpositionen ein Ladevorgang möglich ist. Im Folgenden wird als Optimierungsbeispiel die Abstandveränderung bei gleichzeitiger Frequenzvariation diskutiert. Die Frequenzanpassung wurde dabei durch Veränderung der Kapazität erzielt, was durch die Thomsonsche Schwingungsgleichung [6] motiviert wurde. Abbildung 4 zeigt die bei verschiedenen sekundärseitigen Kapazitäten und variablem Abstand der Sender- und Empfängerspule induzierte Spannung in der Empfängerspule. Hierbei sei erwähnt, dass bei einer Kapazität von 110 nF der sekundäre

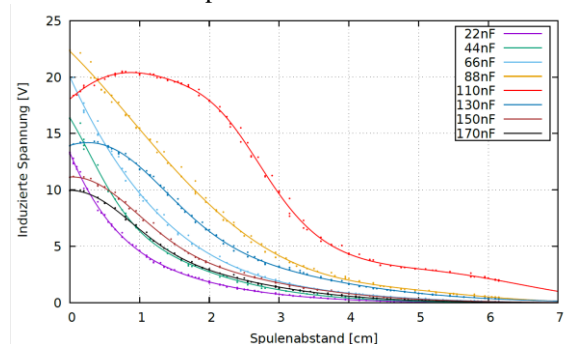


Abb. 4: Messung der Induktionsspannung in Abhängigkeit des Spulenabstandes für verschiedene Sekundär-schwingkreiskapazitäten.

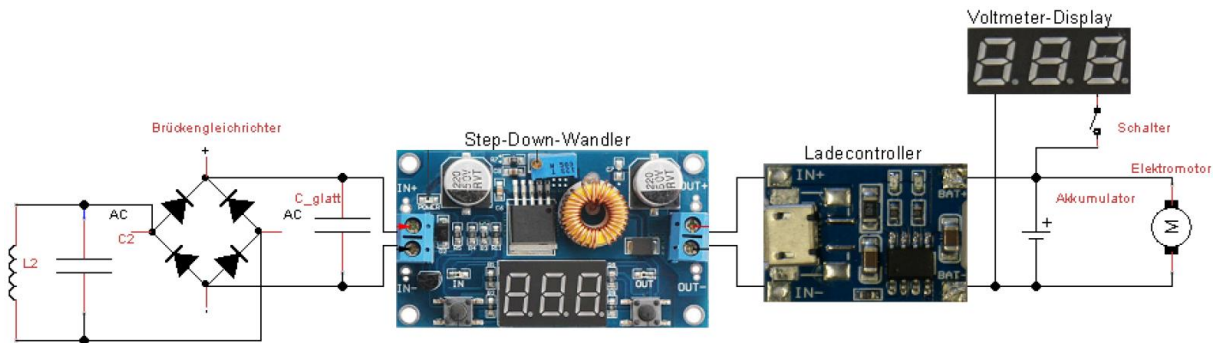


Abb. 5: Technischer Aufbau des Elektromodellautos.

Schwingkreis mit einer Spule der Induktivität $11.4 \mu\text{F}$ am nächsten an der primärseitig vorgegebenen Frequenz von 142 kHz ist. Nicht erwartet wurde dabei, dass bei einem geringen Abstand (unter 1 cm) eine geringere Spannung induziert wurde als bei einem größeren Abstand. Erklärt werden kann dies mithilfe der Lenzschen Regel: Aufgrund der induzierten Spannung baut sich sekundärseitig ein Magnetfeld auf, das dem bestehenden Magnetfeld entgegenwirkt, wodurch dieses abgeschwächt wird. Dadurch sinkt die induzierte Spannung. Dieses Phänomen ist im Nahfeld sehr groß, weshalb bei größerem Abstand das Gegenmagnetfeld vernachlässigbar klein wird.

4.2. Ladevorrichtung

Das Modell des induktiv ladbaren Elektroautos wurde möglichst realitätsnah konzipiert, weshalb derselbe Akkutyp wie in echten Elektroautos verwendet wurde, welcher der Lithium-Ionen-Akkumulator ist. Bei der Ladung von Lithium-Ionen-Akkus ist Gleichspannung von Vorteil, und es ist eine permanente Ladüberwachung notwendig [7]. Dies wurde durch einen Ladecontroller vom Typ TP4056 [8] realisiert. Dieser nutzt das sogenannte CCCV-Ladeverfahren („Constant Current – Constant Voltage“) um den Akkumulator zunächst mit konstantem Strom und dann mit konstanter Spannung zu laden, bevor der Ladevorgang beim Erreichen der Ladeschlussspannung

von 4.2 V abgebrochen wird. Um den Ladecontroller zu betreiben wird eine Gleichspannung von 5 V benötigt, weshalb weitere Bauteile in der Sekundärseite nötig sind, um die induzierte hochfrequente Wechselspannung auf eine Gleichspannung von 5 V zu transformieren.

Abbildung 5 zeigt den dafür verwendeten Aufbau. Die Spule L_2 bildet dabei mit dem Kondensator C_2 den Empfängerschwingkreis. In diesem wird die hochfrequente Wechselspannung induziert, welche durch einen Brückengleichrichter und einen Glättungskondensator C_{glatt} zu einer geglätteten Gleichspannung umgewandelt wird. Diese Spannung wird mithilfe eines Step-Down-Wandlers auf exakt 5 V transformiert, um dann dem Ladecontroller zugeführt zu werden. Der Ladecontroller lädt den parallel geschalteten Akkumulator, der mit dem Elektromotor verbunden ist. Um die derzeitigen Akkuspannung anzuzeigen, wurde ein Spannungsmessmodul parallel zum Akku integriert, welches sich durch einen Schalter aktivieren lässt. Dies ermöglicht den Schülern den Lade- und Entladeprozess zu verfolgen. All diese Bauteile sind durch den transparenten Aufbau in dem Modell zu sehen, welches in Abbildung 6 gezeigt ist. Die Empfängerspule wurde dabei auf der Unterseite mittig zur vorderen Achse des Fahrzeugs positioniert und ist deshalb nicht zu sehen. Fährt das Modellauto auf die Ladeplattform in Abbildung 7 auf, und ist diese mit der Platine des Royer-Oszillators verbunden, der wiederum mit einer Gleichspannung von 12 V betrieben wird, so kann der Ladeprozess auf dem Spannungsmessmodul beobachtet werden. Um dies nicht nur theoretisch zu beleuchten, wurde ein Video

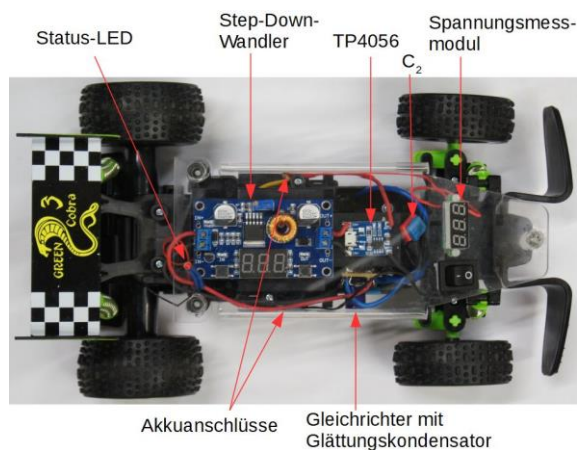


Abb. 6: Aufbau des Modell-Elektroautos. Die Empfängerspule befindet sich auf der Unterseite mittig zur vorderen Achse.

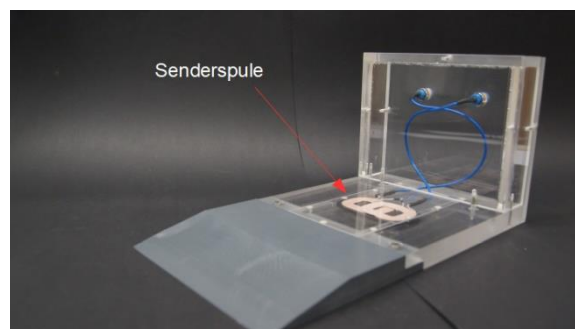


Abb. 7: Ladeplattform mit integrierter Senderspule des Royer-Oszillators.

des Ladevorganges erstellt, welches unter [9] („Ladevorgang eines induktiv ladbaren Elektromodellautos“) zu finden ist. Dabei zu sehen ist, wie das Modellauto auf die Ladeplattform auffährt. Das gelbe Display zeigt die aktuelle Spannung des Akkumulators an, welche vor dem Ladeprozess bei 2.91 V liegt. Durch das Auffahren liegt eine Last am Akku an, weshalb die Spannung kurzzeitig einbricht und dann aufgrund des Ladevorganges ansteigt. Nach knapp 20 s zeigt die Spannungsanzeige einen aktuellen Wert von 3.01 V an. Zu diesem Zeitpunkt wird das Auto von der Plattform gefahren, was erneut einen kurzen Spannungseinbruch zur Folge hat. Sobald das Auto stoppt, springt die Spannungsanzeige auf einen aktuellen Wert von 2.94 V. Dadurch kann innerhalb einer kurzen Zeit von 25 s der Ladeprozess verfolgt werden. Erwähnenswert ist dabei, dass Lithium-Ionen-Akkus, welche stärker entladen sind, zu Beginn des Ladevorganges schneller Spannung aufbauen, als solche die eine höhere „Start“-Spannung aufweisen [7]. Dadurch muss bei einer höheren Spannung längere Zeit in das Laden investiert werden, um einen Ladeeffekt zu beobachten.

5. Das Ladeverhalten

Fährt das Elektromodellauto auf die Ladeplattform auf, welche über den Royer-Oszillator mit einer 12 V-Gleichspannung betrieben wird, so können der Ladestrom und die Akkuspannung gemessen werden. Bei einer Akkuspannung von 2.6 V zu Beginn der Messung wurde der 600 mAh-Akku über eine Dauer von über 3.5 h mit der Ladevorrichtung geladen. Abbildung 8 zeigt die so erhaltenen Messdaten, wobei deutlich zu sehen ist, dass zunächst mit konstantem Strom und danach mit annäherungsweise konstanter Spannung geladen wird. Auch der Ladeabbruch nach dem Erreichen der Ladeschlussspannung von 4.2 V ist nach einer Zeit von 3.4 h klar zu erkennen. Danach beginnt die Spannung auf die Lagerspannung von 3.7 V abzufallen. Das so gebaute Modellauto erreicht eine maximale Geschwindigkeit von rund 9 km/h bei einem vollständig aufgeladenen Akku. Bei niedriger Akkuspannung erreicht das Fahrzeug keine maximale Leistung und somit eine geringere Geschwindigkeit. Ab einer Spannung von unter 2.8 V schaltet eine

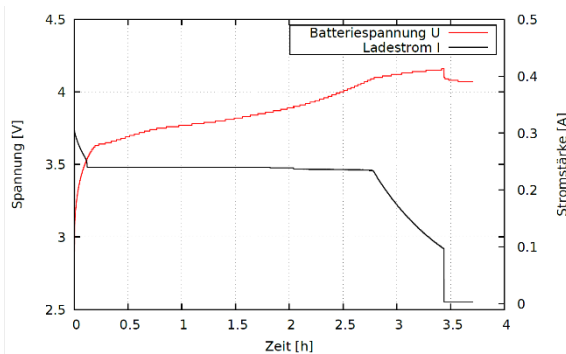


Abb. 8: Lademessung des Modellautos bei einer Startspannung von 2.6 V des Akkumulators.

Schutzelektronik den Motor ab, damit der Akku nicht tiefentladen wird. Für die Schülerinnen und Schüler ist somit ein deutlicherer Unterschied vor und nach dem Laden zu erkennen. Fährt das Auto zuvor nur noch kurze Zeit oder etwas langsamer, kann es nach einer vollständigen Ladung höhere Geschwindigkeiten erreichen und länger genutzt werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wurden der Aufbau eines induktiv ladbaren Elektroautos sowie dessen Ladestation diskutiert. Großer Wert wurde dabei daraufgelegt, dass die einzelnen Komponenten und Aufbauten für sich schlüssig erklärt werden, wodurch das induktive Laden von der Spannungsquelle über den Sender- und Empfängerschwingkreis bis hin zum Akkumulator ersichtlich wurde. Durch diesen transparenten Aufbau wird der Lade- und Entladevorgang des Modellelektroautos beobachtbar, was ein tieferes Verständnis für diese Prozesse bei den Schülerinnen und Schülern erzeugt. Aufgrund dessen, dass immer wieder der Bezug zur Realität versucht wurde herzustellen, ist das hier diskutierte Modellauto als gelungene Reduktion der Wirklichkeit zu betiteln.

Zur Diskussion stehen noch die Optimierung der Parkposition, welche in der Wirklichkeit durch einen Autopiloten umgesetzt werden kann, sowie das „dynamische induktive Laden“, also das Laden während der Fahrt. Dadurch sind noch viele Ansatzpunkte für weiterführende experimentelle Umsetzungen möglich.

7. Literatur

- [1] BMW 530e Artikel. <http://www.bimmertoday.de/2017/04/27/bmw-wireless-charging-530e-ab-2018-mit-induktivem-laden/> (26.04.2018)
- [2] Induktives Zwischenladen in Mannheimer Buslinie. <https://goo.gl/J9swOe> (26.04.2018)
- [3] Jörg Rehmann. Oszillatoren, 2010. <http://www.jorettronik.de/Oszillatoren/Oszillatoren.html> (26.04.2018)
- [4] Downloadbereich für die Software Eagle. <https://www.autodesk.com/products/eagle/overview> (25.04.2018)
- [5] Meyn, Jan-Peter (2013): Grundlegende Experimentiertechnik im Physikunterricht. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- [6] Demtröder, Wolfgang (2013): Experimentalphysik 2, S. 156. Springer-Verlag GmbH.
- [7] Karle, Anton (2016): Elektromobilität. S.79/80 Hanser Fachbuchverlag.
- [8] Downloadbereich des Datenblatts des Ladecontrollers TP4056. <https://tinyurl.com/y8odrech> (22.08.2018)
- [9] Video zum Ladevorgang des Modellelektroautos. <https://youtu.be/cHDlc50y36I> (25.04.2018)

A Model for the Dynamics of Space

- Expedition to the Early Universe -

Hans-Otto Carmesin*

*Gymnasium Athenaeum Stade, Harsefelder Straße 40, 21680 Stade, Studienseminar Stade, Bahnhofstraße 5, 21682 Stade, Fachbereich Physik, Universität Bremen, 28334 Bremen
Hans-Otto.Carmesin@t-online.de

Abstract

The expansion of our universe is fascinating. Additionally there are exciting mysteries about the early universe: How is causality achieved? Why is quantum gravity essential? How can the problems of reheating and big bang singularity be solved? Here I present a teaching unit that I developed and tested in a research club at school. The ‘process related competences’ of ‘modeling’ and ‘problem solving’ are applied: Observations are modeled systematically. Problems are utilized to improve the models progressively. Additionally models developed by the teacher are available for critical tests and cooperative research projects.

1. Introduction

The formation of models by students is an essential topic at school (Kultusministerium, 2017). Accordingly we start with observational data about the expanding and about the early universe and we form corresponding models. Thereby we start with simple models and improve these when necessary. In order to improve a model we establish a cognitive conflict first. This conflict establishes a problem to be solved by the students with help of the teacher. Such problem solving establishes a particularly efficient method for learning (Hattie, 2009). As a result we develop a progressive sequence of models, all related to observations and solving problems that are inherent to the previous model. In that process a model first establishes a hypothesis about a solution of a problem and this hypothesis is critically tested by the students themselves. Such a learning by forming hypotheses and testing these actively is a particularly efficient method for learning (Hattie, 2009). Altogether I present a teaching unit about the early universe. Additionally I report about experiences with teaching this sequence in a research club at school. The students are from classes 9 to 12. Each of the following sections describes the content of a lesson. Thereby the activity of the students is emphasized by italic letters. Performing research in a research club one might arrive at a novel theory. This is presented at the end of this report.

2. Discovery of the Hubble law

The students observed distant galaxies with help of our school observatory (Carmesin, 2012). They determined the redshifts z and they either estimated the distance similarly as Carl Wirtz did it (Wirtz, 1922) or they applied data about the distance d from the literature (see figure 1). As a result we obtain the

Hubble law $d \sim z$ (Hubble, 1929). The proportionality factor z/d is named Hubble constant H_0 .

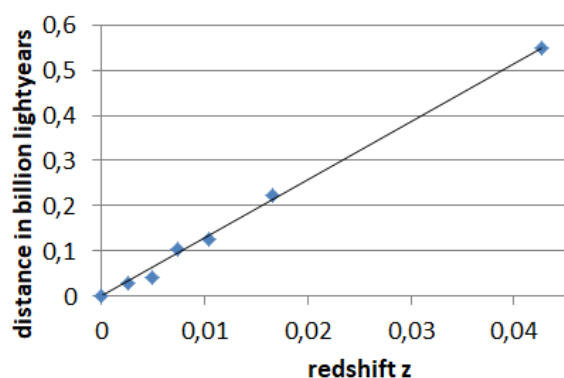


Figure 1: Hubble diagram: redshifts observed by students at the school observatory using a telescope with the aperture 11'' (Helmcke u. a. 2018).

3. First model: discovery of age of our universe

In order to develop a first model for the observed Hubble law, the students model a radial velocity v for distant galaxies. Corresponding lessons are presented in Carmesin (2014). Thereby we apply the Doppler effect to the emitted wavelength $\lambda_e = c \cdot T$ and obtain the observed wavelength λ_{obs} as follows:

$$\lambda_{\text{obs}} = \lambda_e + v \cdot T \quad \{1\}$$

We solve for the velocity and obtain:

$$v = c \cdot z \quad \text{with} \quad z = (\lambda_{\text{obs}} - \lambda_e) / \lambda_e \quad \{2\}$$

So we obtain a radial velocity v for each galaxy and we can determine from our data when the distance d of that galaxy was zero. Here we discover that the distance was zero 14 billion years ago for each distant galaxy. This establishes our first concept of the big bang.



Figure 2: Quasar APM 8279+5255 at redshift $z = 3.9$ observed by students at the school observatory using a telescope with the aperture 11''.

4. Observation of a very distant quasar

In our school observatory our students observed very distant galaxies or quasars and took pictures. For instance they made a picture of the quasar APM 8279+5255 (see figure 2). That quasar has the redshift $z = 3.9$. According to equation {2} the velocity would take the value $v = 3.9c$. This contradicts other observations of our students according to which the velocity of an object in space cannot exceed the velocity of light c (Carmesin, 2006). So the student's own observations give rise to a **cognitive conflict** or a falsification of our first model at large z (Popper 1974). Accordingly our task or problem is to establish an improved model.

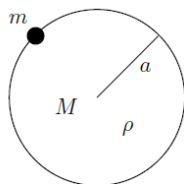


Figure 3: Second model: Prototypical ball of the universe with a radius a , volume V , density ρ mass $M = \rho \cdot V$ and a small probing mass m . In the early universe the mass is present in terms of the equivalent energy $E = M \cdot c^2$ or $E = m \cdot c^2$.

5. Second model: expansion of space

The Hubble law or the increase of the redshift z proportional to the distance d might be explained by an expansion of space. Next we test this hypothesis. For it the students perform a model experiment: they draw a wave onto a balloon and measure how it grows with increasing radius. The result is in rough accordance with the Hubble law.

Progressively the students develop a dynamical model that provides the fully relativistic Friedmann – Lemaitre equation FLE (Friedmann, 1922; Lemaitre, 1927; Unsöld, 1999). From a didactic point of view they apply the hypothetic deductive method (Kircher, 2001). For it we model a mass m on a sphere with radius a and mass M (see figure 3).

6. Rate of expansion

With the model (see figure 3) the students analyze the dynamics in a next lesson. The students establish the energy equation of the probing mass:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 - G \cdot M \cdot m/a \quad \{3\}$$

In the framework of the first model and the Hubble constant H_0 the students realize that the rate v/a is essential since it corresponds to H_0 . More generally this rate may vary with time and is named Hubble parameter H correspondingly:

$$H = v/a \quad \{4\}$$

Accordingly equation {3} is solved for the Hubble parameter:

$$H^2 = 8\pi G \cdot \rho/3 - k \cdot c^2/a^2 \quad \{5\}$$

Thereby we abbreviate the scaled mechanical energy $-2E/(m \cdot c^2)$ by a parameter k . Altogether the students derive the dynamics (equation {5}) with little help. That dynamics presents the well - established Friedmann Lemaitre equation FLE (Unsöld, 1999). Here the students discover that the rate of expansion H is not fixed like in figure 1, but it increases with the density. Moreover that rate H depends on the scaled mechanical energy k .

That scaled energy k is interpreted further as follows: Some students know already that k additionally describes the curvature of space and that it is approximately zero (Carmesin, 2014). While the full analysis is presented in (Carmesin, 2018a) we consider $k = 0$ here, since it corresponds to observations (Planck Collaboration 2016).

7. Discovery of the big bang singularity

In this lesson the students perform a computer simulation with equation {5} which establishes a differential equation. With it the students determine the time development of the radius $a(t)$ with a computer simulation based on the Euler method. When they investigate the radius $a(t)$ for the past then they observe that the radius $a(t)$ tends to zero. Correspondingly the density ρ tends to infinity. A diverging density is not realistic. It is named the big bang singularity (Kiefer, 2008). With it the students experience the next **cognitive conflict** and falsify our second model as well as the Friedmann Lemaitre equation at large density. So we look forward to develop a model for very high densities. For it we develop a model for a white dwarf first.

8. A model for a white dwarf

In this lesson the students model a white dwarf in order to investigate states at high density (Sextl, 1975). For it the students apply their knowledge about quantum physics to a white dwarf. In such a star the electrons move freely at high density. The students realize that the required space is limited by the Heisenberg uncertainty relation, including the Planck constant h as well as the reduced Planck constant $\hbar = h/(2\pi)$ (Ballentine, 1998):

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{1}{2} \cdot \hbar \quad \{6\}$$

The students model the wave function as follows. It is plausible that the extension of electrons at high density might be modeled by Gaussian wave packets ψ . Correspondingly the students learned some basics about Gaussian wave packets in an extra lesson

about mathematical tools. In particular we may replace the inequality in equation {6} by the equality for the case of such wave packets. Moreover we apply the momentum of the relativistic electron $p = m \cdot c \geq \Delta p$. Accordingly we get:

$$\Delta x = \frac{1}{2} \cdot \hbar / (mc) = 0.19 \text{ pm} \quad \{7\}$$

The students calculate the density as follows: We consider one proton per electron. Thereby the proton mass is $m_{Pr} = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. So we obtain:

$$\rho = m_{Pr} / (4\pi/3 \cdot \Delta x^3) = 58 \cdot 10^9 \text{ kg/m}^3 \quad \{8\}$$

The students test their model by comparison with the white dwarf Sirius B with the mass $M = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$, the radius 6000 km and density $\rho = 2.2 \cdot 10^9 \text{ kg/m}^3$. So our very simple model is in rough accordance with observations.

The students investigate the stability of the white dwarf as follows. The gravitational energy causes an inward pressure p_{in} while the kinetic energy of the electrons causes an outward pressure p_{out} . So we compare these two pressures.

The pressure is the derivative of the energy E as a function of volume V :

$$p = E(V)' = E(R)' \cdot R(V)' = E(R)' / V(R)' = E(R)' / (4\pi R^2)$$

The gravitational energy is $E_{pot} \approx -G \cdot M^2 / R$, accordingly we get:

$$p_{in} \approx G \cdot M^2 / (4\pi R^4) \quad \{9\}$$

The kinetic energy of an electron is $E = p \cdot c$ or $E \approx \frac{1}{2} \cdot \hbar \cdot c / \Delta x$. Moreover the extensions R of the star and Δx of the electron are related by $\Delta x = R / N^{1/3}$. Furthermore the number of electrons is $N = M / m_{Pr}$. Accordingly we get

$$p_{out} = \frac{1}{2} \cdot \hbar \cdot c \cdot N^{4/3} / (4\pi R^4) \quad \{10\}$$

The instability occurs when both pressures are equal:

$$G \cdot M^2 = \frac{1}{2} \cdot \hbar \cdot c \cdot M^{4/3} m_{Pr}^{-4/3} \quad \{11\}$$

We solve for this critical mass:

$$M_{cr} = (\frac{1}{2} \cdot \hbar \cdot c / G)^{3/2} m_{Pr}^{-2} = 1.3 \cdot 10^{30} \text{ kg} \quad \{12\}$$

Altogether the students discover the gravitational collapse at that critical mass of the white dwarf (Chandrasekhar, 1931). As a consequence the white dwarf may become a neutron star. At the example of the white dwarf and its gravitational instability the students obtained sufficient experience and curiosity in order to investigate the big bang singularity next.

9. Planck scale: static limitation of density

In this lesson the students realize that two basic physical effects limit the states that can be measured at all: The Heisenberg uncertainty principle (equation {6}) as well as gravity with its Schwarzschild radius:

$$\Delta x \geq R_S = 2G \cdot M / c^2 \quad \{13\}$$

The students combine these two limitations in a distance energy diagram. For it they express the limitations in terms of energies depending on the observable distance $r = \Delta x$:

$$r \geq 2G \cdot E / c^4 \quad \text{and} \quad r \geq \frac{1}{2} \cdot \hbar \cdot c / E \quad \{14\}$$

These conditions are combined graphically in figure 4: the solid line and the solid ruled area present conceivable measurements according to gravity while the dashed line and the dashed ruled area present conceivable measurements according to quantum physics. The area ruled by dashed as well as solid lines presents conceivable physical measurements. The other areas do not present any conceivable physical measurements at all.

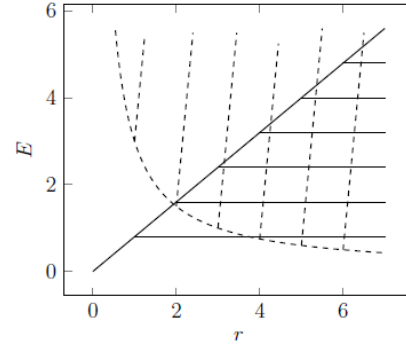


Figure 4: Planck scale

The students discover the smallest measurable length L_P at the intersection point of the solid and dashed line. It is called Planck (1899) length:

$$L_P = (\hbar \cdot G / c^3)^{0.5} = 1.616 \cdot 10^{-35} \text{ m} \quad \{15\}$$

The corresponding density sets an upper limit for the density (Carmesin, 2017, 2018a) and is named Planck density:

$$\rho_P = c^5 / (\hbar \cdot G^2) = 5.155 \cdot 10^{96} \text{ kg/m}^3 \quad \{16\}$$

So the students discover the static limitation of the density from first principles: gravity and quantum physics. Correspondingly that limitation is expressed by the fundamental physical constants G , c and \hbar . This establishes an essential result of quantum gravity that the students discover in the present teaching unit. The students asked the naturally next question: how is that static limitation achieved dynamically? This is investigated in the following lesson.

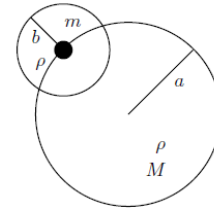


Figure 5: Third model: Probing mass with radius b.

10. Third model: regular probing mass

In this lesson the students realize the singular nature of the point like probing mass in figure (3). Accordingly they generalize that probing mass by a ball (figure 5). Correspondingly we improve the second model by including a radius b of the probing mass m . This is in accordance with the cosmological principle: homogeneous density and isotropy.

According to the Heisenberg uncertainty relation the energy of the probing mass (see equation {3}) is expressed in terms of the momentum:

$$E = \frac{1}{2} \cdot p^2/m - G \cdot M \cdot m/a \quad \{17\}$$

The students ask: how are the radius b and the mass m determined at a density ρ ? *The students realize that the mass depends on the radius $m = \rho \cdot b^3 \cdot 4\pi/3$. So only the determination of b or m is difficult. At this point we must realize that we work with a novel model and that we must develop tools in order to gain results. For it the students are reminded to the typical minimization of energy in nature. For instance a ball typically rolls downwards. They are told that the corresponding states are named ground states and that the procedure of minimization is called variational principle in quantum mechanics. According to the law of energy conservation, the determination of the optimal mass corresponds to a fragmentation of mass or equivalent energy inherent to the density ρ into probing masses m . For it the energy E per mass is minimized in the following. Accordingly we divide the above equation by $m \cdot c^2$:*

$$E/(m \cdot c^2) = \frac{1}{2} p^2/(m^2 \cdot c^2) - G \cdot M/(a \cdot c^2) \quad \{18\}$$

Next the students determine the expectation value $\langle \dots \rangle$. For it they apply their knowledge that the probability density $|\psi|^2$ corresponds to the wave function ψ (Kultusministerium, 2017). For short we denote the expectation value of the scaled energy by $\langle E/(m \cdot c^2) \rangle = E_{D,\text{full}}$. Accordingly we get:

$$E_{D,\text{full}} = \frac{1}{2} \langle p^2/(m^2 \cdot c^2) \rangle - G \cdot \langle M/(a \cdot c^2) \rangle \quad \{19\}$$

The students realize that two quantities should be varied at a given density ρ : the probing mass m as well as the width Δa of the Gaussian.

For it they mark the states with a given density ρ by a dotted line in figure 6. *The students realize graphically how the optimum is achieved: the scaled energy $E_{D,\text{full}}$ in equation {19} is minimal at maximal m . Thereby m is restricted to the dotted line and to the double ruled area in figure 6. Consequently m corresponds to the intersection point of the solid and dotted line in figure 6. As a result m corresponds to the Schwarzschild radius at the given density ρ :*

$$b = 2G \cdot m/c^2 \quad \{20\}$$

The students simplify this equation by introducing further Planck units (Planck, 1899):

$$M_P = L_P^3 \cdot \rho_P \quad \text{and} \quad \rho_P = \rho_P/(4\pi/3) = 1.231 \cdot 10^{96} \text{ kg/m}^3 \quad \{21\}$$

As a consequence we get:

$$M_P = \hbar/(L_P \cdot c) \quad \{22\}$$

We introduce scaled variables and denote these by bold letters:

$$\mathbf{m} = m/M_P; \quad \mathbf{b} = b/L_P; \quad \mathbf{\rho} = \rho/\rho_P \quad \{23\}$$

With these formulas the students transform equation {20} into:

$$\mathbf{b}^2 = 2 \cdot \mathbf{\rho} \quad \text{or} \quad \mathbf{m}^2 = 8 \cdot \mathbf{\rho} \quad \{24\}$$

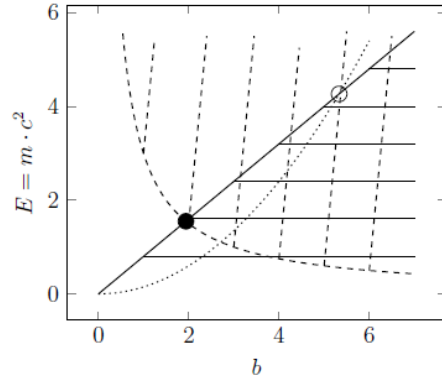


Figure 6: Fragmentation or partitioning into probing masses m : Dotted line: constant density.

Altogether the students discover the optimal probing mass with little help as follows: the minimization of the scaled energy $E_{D,\text{full}}$ causes a fragmentation or partitioning into particular probing masses with particular and regular extension b . Note that these balls cannot fill the complete space for geometric reasons and that this is confirmed by an application of the present model to the emergence of dark matter (Carmesin, 2018a). At this point the students are familiar with the variational principle and they apply it to the width Δa of the Gaussian wave packets ψ in the following lesson.

11. Regular dynamics

The students apply the variational principle to the Gaussian wave packets with some help as follows. They apply the mathematical identity $\langle p^2 \rangle = \langle p \rangle^2 + (\Delta p)^2$ to equation {19} and neglect $\langle p \rangle$ here, since $\langle p \rangle$ forms according to the FLE in a slow dynamics while the wave function ψ forms in a rapid dynamics:

$$E_D = \frac{1}{2} \Delta p^2/(m^2 \cdot c^2) - G/c^2 \cdot \langle M/a \rangle \quad \text{and} \quad E_{D,\text{full}} = E_D + \frac{1}{2} p^2/(m^2 \cdot c^2) \quad \{25\}$$

Thereby we denote $\langle p \rangle$ shortly by p in the following. Here the Heisenberg uncertainty principle in three dimensions is applied for Gaussian wave packets:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot 3 \hbar/\Delta a \quad \{26\}$$

Accordingly we get:

$$E_D = 9\hbar^2/(8 \cdot m^2 \cdot c^2 \cdot \Delta a^2) - G/c^2 \cdot \langle M/a \rangle \quad \{27\}$$

Classically, the radius $a(t)$ describing the space of the sphere in figure (5) can be chosen arbitrarily. However, here that space is primarily filled by radiation. Accordingly we choose the radius $a(t)$ corresponding to a photon starting at the Planck density and expanding according to the expansion of space. For additional background see Carmesin (2018a). Such a photon is characterized by the dashed line in figure 6 and by the term:

$$M = M_P \cdot L_P/a \quad \{28\}$$

The students learned in the additional lesson about mathematical tools how to generate a linear approximation including a statistical approximation and

verified these approximations numerically. *Accordingly the students simplify the gravitational term with some help as follows:*

$$\begin{aligned} \langle M/a \rangle &= M_p \cdot L_p \cdot \langle 1/a^2 \rangle \approx M_p \cdot L_p \cdot 1/\langle a^2 \rangle \\ &= 1/(\langle a \rangle^2 + \Delta a^2) = 1/\langle a \rangle^2 \cdot 1/(1+[\Delta a/\langle a \rangle]^2) \\ &\approx 1/\langle a \rangle^2 \cdot (1 - [\Delta a/\langle a \rangle]^2) \end{aligned} \quad \{29\}$$

In the following we apply the abbreviation $a = \langle a \rangle$. Accordingly we express the scaled energy E_D in terms of the classical term $E_{D,cl}$ and the quantum term $E_{D,Q}$ as follows:

$$\begin{aligned} E_D &= E_{D,cl} + E_{D,Q} \quad \text{with} \\ E_{D,cl} &= -G \cdot M/(c^2 \cdot a) \quad \text{and} \\ E_{D,Q} &= 9\hbar^2/(8m^2 \cdot c^2 \cdot \Delta a^2) + G \cdot M \Delta a^2/(c^2 \cdot a^3) \end{aligned} \quad \{30\}$$

The students scale the terms (see equations {21}-{24}) *as follows:*

$$E_{D,cl} = -\rho \cdot a^2 \quad \{31\}$$

$$E_{D,Q} = 9 \cdot \rho \cdot (\Delta a)^{-2} + \rho \cdot (\Delta a)^2 \quad \{32\}$$

The students minimize the quantum term $E_{D,Q}$ by variation of Δa and obtain:

$$\Delta a = 3^{0.5} \quad \text{and} \quad E_D = -\rho \cdot a^2 + 6\rho \quad \{33\}$$

The students express E_D by the density. For it they apply equation {28}:

$$\rho = M/a^3 \cdot L_p^3/M_p = M_p L_p/a^4 \cdot L_p^3/M_p = a^{-4} \quad \{34\}$$

They apply this relation to equation {33} and obtain:

$$E_D = -\rho^{1/2} + 6\rho \quad \{35\}$$

Next the students generalize the FLE {5} by application of the term E_D . For it we remind equation {25}:

$$E_{D,full} = E_D + \frac{1}{2} p^2/(m^2 \cdot c^2)$$

Thereby we remind that $E_{D,full}$ is proportional to the curvature parameter k . We consider the case $k = 0$. Moreover we insert $p = m \cdot v$ and solve for $H^2 = v^2/a^2$:

$$H^2 = -2E_D \cdot c^2/a^2 \quad \{36\}$$

The students introduce scaled variables. For it we apply the Planck time:

$$t_p = L_p \cdot c = 5.391 \cdot 10^{-44} \text{ s} \quad \{37\}$$

We introduce the scaled Hubble parameter by multiplication with t_p and get:

$$\mathbf{H} = H \cdot t_p \quad \{38\}$$

Accordingly we express the dynamics in equation {36} as follows:

$$\mathbf{H}^2 = -2E_D/a^2 = -2E_D \cdot \rho^{1/2} \quad \{39\}$$

Here we insert the term for E_D (see equation {35}) and factorize ρ :

$$\mathbf{H}^2 = 2 \cdot \rho \cdot (1 - 6 \cdot \rho^{1/2}) \quad \{40\}$$

This equation is an extended FLE, denoted by EFLE. With $H = v/a$ it is a differential equation and establishes the dynamics. Here the students analyze that the dynamics stops when the bracket becomes zero at $\rho_{max} = 1/36$. Accordingly the density cannot become larger than the Planck density. *Altogether the students exclude the big bang singularity.* A similar maximal density has been obtained by Bojowald (2001).

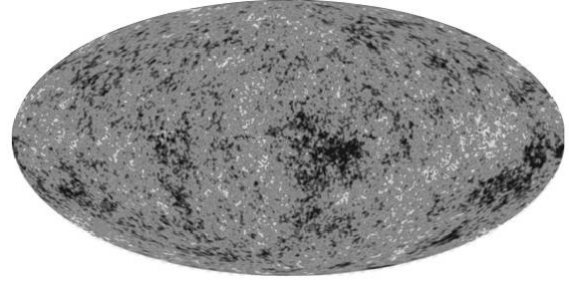


Figure 7: Cosmic microwave background CMB (figure: NASA WMAP Science Team, 9 year WMAP image of background radiation: The temperature fluctuations are very small $\Delta T/T = 0.000024$).

12. CMB: horizon problem

The energy fluctuations of the early universe are very small (see figure 7). So energy fluctuations must have been compensated by mutual exchange of radiation among regions of the CMB. However, with the dynamics of the FLE or of the EFLE that is impossible as shown by Alan Guth (1981). This is called the horizon problem. Moreover Alan Guth suggested that the early universe expanded very rapidly by a factor $Z = e^N$ with $55 \leq N \leq 70$ (Guth, 1981 or Broy, 2016). However there is not sufficient energy in the universe for such an expansion. This is named the reheating problem (Broy, 2016 or Carmesin, 2018a). Here we study whether the model in figure (5) shows how the required enlargement occurs as a result of gravity and quantum physics.

For it we consider a situation at the Planck density. Regions with mass or equivalent energy strongly attract each other, but the distances cannot decrease any further.

This is a severe problem for gravity. Usually gravity always finds a way to compress things. How can gravity compress things at the Planck density? Here we remind that space has a grainy nature at least near the Planck density. And grains are usually connected to three dimensional space. So gravity might reorganize the dimension in order to compress things further. Is this possible? *In order to answer this question the students perform a model experiment with magnetic balls (see figure 8).* Thereby they discover that a decrease of dimension causes an enlargement (see figure 8). *So the students realize that gravity at high density might cause another gravitational instability: the collapse to higher dimension and conversely decreasing density might cause the unfolding of space by decreasing dimension D .* Accordingly the students look forward to calculate the critical density for such a gravitational collapse of dimension.

13. Fourth model: variable dimension

In this lesson the students generalize the third model (see figure 3) to dynamical dimension. For it the Gauss law of gravitation (Gauss, 1813) is presented and the energy of the probing mass (equation {18})

is generalized accordingly to arbitrary dimension $D \geq 3$ (for details see Carmesin 2017, 2018a):

$$E/(m \cdot c^2) = \frac{1}{2} \cdot p^2 / (m^2 \cdot c^2) - G_D \cdot M / (a^{D-2} \cdot c^2 \cdot [D-2]) \quad \{41\}$$

Thereby the gravitational constant G_D is:

$$G_D = G \cdot (D-2) \cdot L_P^{D-3} \quad \{42\}$$

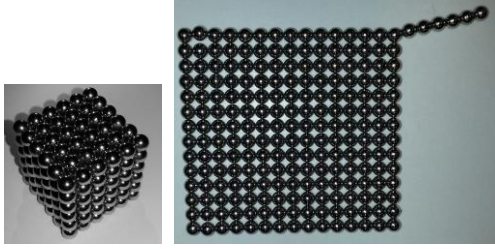


Figure 8: 216 magnetic balls organized in three dimensions (left). When the dimension decreases then the distances increase (right).

Moreover we denote the volume of the ball in D dimensions with radius 1 by V_D and we define the density corresponding to Dimension D as follows:

$$\rho_D = M \cdot V_D \cdot a^{-D} \quad \{43\}$$

At this point the students realize that the model is solved in D dimensions by the same procedure as at $D = 3$. So they solve the model with little help as follows.

The students derive a term for the Schwarzschild radius from equation {41}:

$$\frac{1}{2} m \cdot c^2 = G_D \cdot M \cdot m / (R_{SD}^{D-2} \cdot [D-2]) \quad \text{or} \quad \{44\}$$

$$R_{SD}^{-2} = 2 \cdot \rho_D \quad \{45\}$$

Next the students determine the scaled optimal radius (see figure 6):

$$R_{SD} = b \quad \text{or} \quad b^2 = 2 \cdot \rho_D \quad \{46\}$$

From it the students determine the scaled optimal probing mass:

$$m = 2^{-D/2} \cdot \rho_D^{(2-D)/2} \quad \{47\}$$

Analogously as for $D = 3$ the students express the radius a in terms of the density:

$$a^{D+1} = 1/\rho_D \quad \{48\}$$

With the above results the students determine the scaled energy E_D and obtain:

$$E_D = E_{D,cl} + E_{D,Q} \quad \text{with} \quad E_{D,cl} = -\rho_D^{(D-1)/(D+1)} \quad \text{and} \\ E_{D,Q} = D^2 \cdot 2^{D-3} \cdot \rho_D^{D-2} / \Delta a^2 + \rho_D \cdot \Delta a^2 \cdot (D-1)/2 \quad \{49\}$$

Analogously as at $D = 3$ the students determine the optimal quantum fluctuations Δa by minimizing E_D . So they get:

$$\Delta a = [2^{D-2} \cdot D^2 / (D-1)]^{0.25} \cdot \rho_D^{(D-3)/4} \quad \text{and} \\ E_D = -\rho_D^{(D-1)/(D+1)} + [2^{D-2} \cdot D^2 \cdot (D-1)]^{0.5} \cdot \rho_D^{(D-1)/2} \quad \{50\}$$

14. Dimensional transitions at critical densities

In this lesson the students minimize the scaled energy E_D by variation of D according to the variational principle (see figure 9; Sprenger u. a. 2018). They discover gravitational instabilities at critical densities ρ_{Dc} (see arrows in figure 9). The students characterize the instabilities:

At an instability the dimension changes and thereby the scaled energy is minimized. At high density the stable dimension is high (see figure 10). The maximal density $\rho_{D,max}$ is not reached, since the dimensional transition occurs before at lower density ρ_{Dc} (see figure 10). So the big bang singularity is solved by dimensional transitions. So the big bang singularity is not solved by a stopping of the dynamics (see equation {40}) as dimensional transitions occur first.

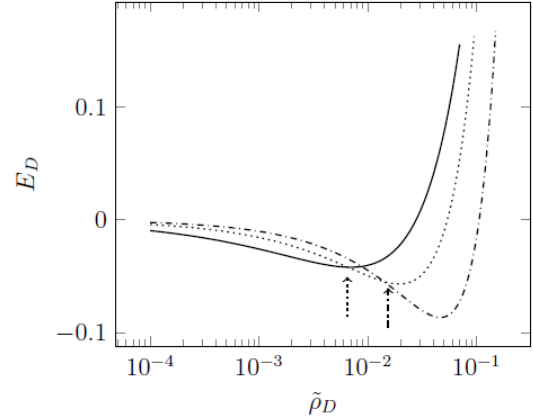


Figure 9: Scaled energy E_D at dimensions 3 (solid), 4 (dotted) and 5 (dashdotted).

In the early universe the expansion according to the FLE or EFLE causes a slight decrease of the density ρ_D and the next critical density is reached eventually, then the dimension decreases and the universe is enlarged extremely rapidly. This might explain the era of cosmic inflation.

The students planned to test this hypothesis by calculating the development of the radius $r(t)$ of the current light horizon at the dimensional transitions and by calculating the enlargement factor $Z = e^N$. If the modeled enlargement factor Z_{model} corresponds to the observed enlargement factor with $55 \leq N \leq 70$ (Broy, 2016), then the model satisfies this. Note that the model satisfies many additional tests (Carmesin, 2017, 2018a,b,c,d; the flatness problem, dark matter problem and dark energy problem are solved).

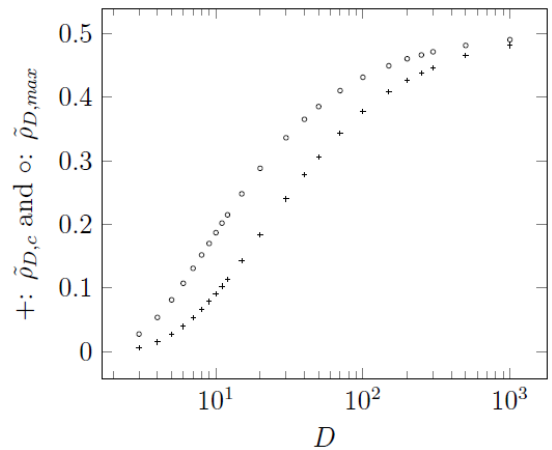


Figure 10: Scaled critical and maximal densities as a function of the dimension (Carmesin, 2018a,b).

15. Expansion of space

In this lesson the students apply the FLE in order to calculate the expansion of space backwards from the current light horizon r_{lh} .

The observable space is limited by the current light horizon r_{lh} or particle horizon and characterized by the current density of the universe ρ_{today} as well as by the current density of the matter $\rho_{today,m}$ (Planck collaboration, 2016. The density of the vacuum is not included in $\rho_{today,m}$. A more general analysis that is also independent of the current light horizon is presented in Carmesin, 2018a,b,c,d):

$$\begin{aligned} r_{lh} &= 4.41 \cdot 10^{26} \text{ m} \quad \text{and} \quad t_{today} = 4.35 \cdot 10^{17} \text{ s} \quad \text{and} \\ \rho_{today} &= 8.634 \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3 \\ \text{and} \quad \rho_{today,m} &= 2.659 \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3 \end{aligned} \quad \{56\}$$

Currently the density of the matter is larger than that of radiation, since the wavelength of radiation decreased according to the expansion of space (for the purpose of quantitative comparisons it is adequate to use the notion density so that it includes matter and radiation according to the equivalence $E = m \cdot c^2$). At a time t_{eq} the densities of matter and radiation were equal. The corresponding radius and density have been observed (Planck collaboration 2016):

$$\begin{aligned} r_{eq} &= 1.308 \cdot 10^{23} \text{ m} \quad \text{and} \quad t_{eq} = 1.55 \cdot 10^{12} \text{ s} \quad \text{and} \\ \rho_{eq,m} &= \rho_{today,m} \cdot (r_{lh}/r_{eq})^3 = 1.02 \cdot 10^{-16} \text{ kg/m}^3 \end{aligned} \quad \{57\}$$

Before t_{eq} the density varied proportional to the inverse fourth power of the radius (see also equation {48}). The end of the era of cosmic inflation is marked by the critical density (see equation {52}). The corresponding radius is named r_{final} or r_f and is established as follows (see equations {21} and {52} and Unsöld, 1999):

$$\begin{aligned} \rho_{3,c} &= \rho_{3,c} \cdot \rho_p = 0.00657 \cdot 1.231 \cdot 10^{96} \text{ kg/m}^3 = 8 \cdot 10^{93} \text{ kg/m}^3 \\ \text{and} \quad r_f &= r_{eq} \cdot (\rho_{eq,m}/\rho_{3,c})^{0.25} = 0.044 \text{ mm} \end{aligned} \quad \{58\}$$

During the era of cosmic inflation the factor $k_{\text{expansion}}$ of expansion is limited as follows:

$$\begin{aligned} k_{\text{expansion}} &= (\rho_{D,\infty}/\rho_{3,c})^{1/(D+1)} \leq (\rho_{D,\infty}/\rho_{3,c})^{1/4} \\ \text{or} \quad k_{\text{expansion}} &\leq (0.5/0.00657)^{1/4} = 2.96 \\ \text{or} \quad N_{\text{expansion}} &= \ln(k_{\text{expansion}}) \leq 1.09 \end{aligned} \quad \{59\}$$

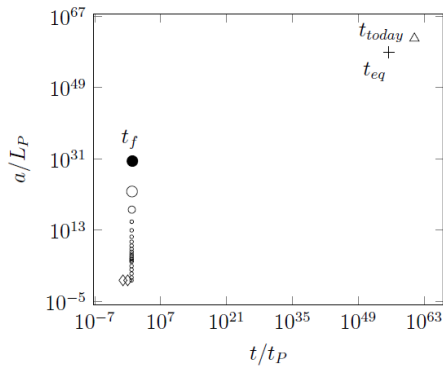


Figure 11: Radius $r(t)$ of the current light horizon as a function of time. Circles: dimensional transitions. Diamonds: duration $6.58 t_P$ before $D = 300$ emerged (Carmesin, 2018a).

16. Enlargement by dimensional unfolding

In this lesson the students calculate the enlargement factor $Z_{\text{unfolding}}$ caused by dimensional unfolding. For it they summarize geometric properties of unfolding:

At each transition the wave functions describing the radius b of the probing mass at the higher dimension $D+1$ and at the lower dimension D should fit in order to obtain a high transition rate (for details see Carmesin, 2018a). As a consequence the following densities should be equal (see equation {46}):

$$\rho_{D+1} = \rho_D \quad \{60\}$$

Three dimensional space becomes stable at densities lower than the critical density (see figure 9):

$$\rho_{3,c} = 0.00657 \quad \{61\}$$

At high dimension the density tends to 0.5 (see figure 10):

$$\lim_{D \rightarrow \infty} \rho_D = 0.5 = \rho_{D,\infty} \quad \{62\}$$

A dimensional transition is not an expansion (this is illustrated in figure 8). Thereby the dimension changes from $D+1$ to D . We model the volume in terms of n geometric bodies, each with an extension L_P . For simplicity we utilize n balls with the radius L_P . Other geometric bodies could be utilized similarly. The dimensional transition does neither modify the radius nor the number n as the dimensional transition merely reorganizes the connections among grains of space – this is perfectly illustrated by figure (8). So the radius of the whole system changes from r_{D+1} to r_D as follows:

$$n = V_{D+1} \cdot r_{D+1}^{D+1} / (V_{D+1} \cdot L_P^{D+1}) = V_D \cdot r_D^D / (V_D \cdot L_P^D) \quad \{63\}$$

We simplify by cancelling equal factors as follows:

$$n = r_{D+1}^{D+1} / L_P^{D+1} = r_D^D / L_P^D \quad \{64\}$$

$$\text{or} \quad n = r_{D+1}^{D+1} = r_D^D \quad \{65\}$$

When we think backwards in time, then during the era of cosmic inflation the space is folded at each dimensional transition from D to $D+1$ until at most two spheres are neighbors in each dimensional direction. This occurs at a corresponding dimension D_{max} . Here the currently visible space has a radius $r_{D_{\text{max}}}$ corresponding to the distance of the centers of two neighboring spheres:

$$r_{D_{\text{max}}} = 2L_P \quad \text{or} \quad r_{D_{\text{max}}} = 2 \quad \text{and} \quad D_{\text{max}} \approx 300 \quad \{66\}$$

The students realize that the enlargement factor $Z_{\text{unfolding}}$ or Z_u enlarges the currently visible space from its primordial extension $r_{D_{\text{max}}} = 2$ to the extension at the end of the era of cosmic inflation r_f :

$$Z_u \cdot r_{D_{\text{max}}} = r_f = 2.72 \cdot 10^{30} \quad \{67\}$$

Obviously the students solve for Z_u by utilizing equations {15} and {58):

$$\begin{aligned} Z_u &= r_f / r_{D_{\text{max}}} = r_f / r_{D_{\text{max}}} = 0.044 \text{ mm} / 3.232 \cdot 10^{-35} \text{ m} \quad \text{or} \\ Z_u &= 1.36 \cdot 10^{30} \quad \text{or} \quad N_u = \ln(Z_u) = 69.4 \end{aligned} \quad \{68\}$$

The students realize that this corresponds to the observations of the CMB (Planck collaboration, 2016 or Bennett, 2013) with $55 \leq N \leq 70$ (Broy, 2016).

17. Solution of horizon problem

In this lesson the students calculate how far the light can travel in the enlarging space. For it they calculate the radius of the current light horizon as a function of time first. Here we name that radius $a(t)$. In particular they simulate the differential equation {39} with the scaled energy in equation {50} by utilizing the Euler method and by calculating the enlargement at unfolding (see equation {65}) as follows:

$$\mathbf{a}_D = \mathbf{a}_{D+1}^{(D+1)/D} \quad \{69\}$$

The students calculate the duration of cosmic inflation of $3.3635 t_p$. Moreover the students asked what duration a dimensional transition has. I informed them that this can be calculated and has been included in such a simulation (Carmesin, 2018a). As a result the era of cosmic inflation lasts for $22.28 t_p$ and the universe enlarges already for $6.58 t_p$ before dimension 300 is reached. Accordingly the students start the simulation at $D = 300$ and $t = 6.58 t_p$ with the dynamics according to the EFLE (see equations {39} and {50}) and obtain the $a(t)$ in figure (11).

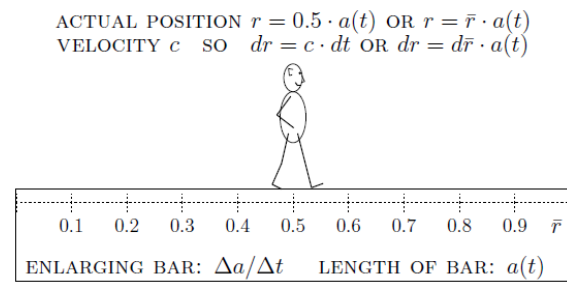


Figure 12: Radius $a(t)$ of the current light horizon as a function of time.

The travelling of light in the enlarging space (see figure 11) is modeled by the position $r(t)$ of a walker on an enlarging rubber bar (see figure 12). The coordinate on the bar is denoted as follows:

$$\underline{r} = r/a \quad \{70\}$$

The students realize that the walker in figure (12) reaches the coordinate:

$$d\underline{r} = c \cdot dt/a(t) \text{ or } \underline{r} = \int_0^{t_{\text{obs}}} c \cdot dt/a(t) \quad \{71\}$$

The proper distance d_H that the walker reaches at a time t_{obs} of observation is the coordinate \underline{r} times the length of the bar a_{obs} :

$$d_H = a_{\text{obs}} \cdot \int_0^{t_{\text{obs}}} c \cdot dt/a(t) \quad \{72\}$$

The students obtain $d_H = 3.291 \cdot a_{\text{obs}}$ by utilizing their simulated radius $a(t)$ (figure 11). Causality is achieved when light can travel from one end of the CMB to the other. That amounts to the distance $d_{H,\text{min}} = 2 \cdot a_{\text{obs}} < d_H$. So the horizon problem is solved when the quantum dynamics of the transition is included.

18. Solution of the reheating problem

In this lesson the students test the alternative of an expansion instead of an unfolding (Guth, 1981 and Broy, 2016). For it they calculate the development of

a primordial photon with maximal wavelength $L_p = \lambda_{\text{prim}}$. During the era of cosmic inflation that wavelength would increase at least by the factor $e^{55} = 7.7 \cdot 10^{23}$. That era ends before the time $t_{\text{GUT}} \approx 10^{-12}$ s of the grand unification at which the four fundamental forces emerged from just one fundamental force (de Boer, 2001; Bethge, 1991). Until $t_{\text{eq}} = 1.55 \cdot 10^{12}$ the wavelength would increase at least by another factor $(t_{\text{eq}}/t_{\text{GUT}})^{1/2} = 1.25 \cdot 10^{12}$. Until today the wavelength would increase by the additional factor $(t_{\text{today}}/t_{\text{eq}})^{2/3} = 4287$. Altogether the wavelength in the CMB would be at least 67 km. However, the CMB has a wavelength of 5 mm. The students realize that the cosmic enlargement cannot completely be achieved by expansion. This is named reheating problem (Broy, 2016). Moreover the students realize that the present model solves the reheating problem since at least the factor e^{55} is achieved by enlargement without expansion here.

19. Experience with teaching

The students were very interested in the topic and attended many additional meetings. It was possible to perform the method of problem solving in these lessons. Thereby we made transparent the goal, planned the solution in the plenum, solved it in groups and presented the results in the plenum. The students explained and critically tested the four models. Altogether the students actively applied the ‘process related competences’ of ‘problem solving’ and ‘modeling’ (Kultusministerium, 2017). Moreover these competences were especially appropriate for this teaching unit. Thereby the students efficiently developed many challenging ‘content related competences’ in astronomy, physics and mathematics. Some students successfully performed projects about these topics and won prizes at the Jugend forscht competition. All students appreciated that they obtained solutions based on the three fundamental constants G , c and h and the corresponding fundamental theories gravity, relativity and quantum physics.

20. Summary

Challenging and up-to-date problems about the early universe are exciting to students. A teaching unit at school has been developed and tested in a research club. The ‘process related competences’ of ‘problem solving’ and ‘modeling’ are especially appropriate here.

Advanced questions about the classical limit, the role of the dimension two or about the relation to other approaches in the field are elaborated in detail in Carmesin (2018d). Several students are interested to work out a well-arranged problem in this context and four such projects are currently in progress.

21. Literatur

- Ballentine, Leslie (1998): Quantum Mechanics. London and Singapore: World Scientific Publishing.
- Bennett, Charles L. and others (2013): Nine-year Wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP) Observations: final maps and results. The Astrophysical Journal Supplement Series. 208, 1-54.
- Bethge, Klaus und Schröder, Ulrich (1991): Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen. 2. Aufl., Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Boer, de, Wim (2001): Grand Unified Theories and Supersymmetry in Particle Physics and Cosmology. arxiv, hep-ph/9402266v5, 1-107.
- Bojowald, Martin (2001): Absence of Singularity in Loop Quantum Gravity. Phys. Rev. Lett. 86, 5227-5230.
- Broy, Benedict Johannes (2016): Inflation and effective Shift Symmetries. Hamburg: Universität Hamburg. Thesis.
- Carmesin, Hans-Otto (2006): Entdeckungen im Physikunterricht durch Beobachtungen des Himmels. Tagungs-CD Fachdidaktik Physik, ISBN 978-386541-190-7. Nordmeier, Volker and Oberländer, Arne (Editors). Berlin: Deutsche Physikalische Gesellschaft.
- Carmesin, Hans-Otto (2012): Schüler beobachten den Urknall mit einem C11 Teleskop. PhyDid B, Internetzeitschrift, ISSN 2191-379X.
- Carmesin, Hans-Otto and Carmesin, Ellen (2014): How Old is the Universe? PhyDid B, ISSN 2191-379X.
- Carmesin, Hans-Otto (2017): Vom Big Bang bis heute mit Gravitation – Model for the Dynamics of Space. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (May 2018a): Entstehung dunkler Materie durch Gravitation - Model for the Dynamics of Space and the Emergence of Dark Matter. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto Carmesin and Carmesin, Matthias (2018b): Quantum Gravity Model for Cosmic Inflation. To be publ.
- Carmesin, Hans-Otto (July 2018c): Entstehung dunkler Energie durch Quantengravitation - Universal Model for the Dynamics of Space, Dark Matter and Dark Energy. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2018d): Entstehung der Raumzeit durch elementare Quantengravitation - Universal Model for the Emergence of Space, Dark Matter, Vacuum Energy and Space-Time. Berlin: Verlag Dr. Köster, to be published.
- Chandrasekhar, Subrahmanyan (1931): The maximum mass of ideal white dwarfs. Astrophysical Journal, 74, 81-82.
- Friedmann, Alexander (1922): Über die Krümmung des Raumes. Z. f. Physik, 10, 377-386.
- Gauss, Carl Friedrich (1813): Theoria attractionis corporum sphaeroidicorum ellipticorum homogeneorum – methoda novo tractata. Societ. Reg. Scient. Tradita. 1-24.
- Guth, Alan (1981): Inflationary Universe: A possible to the horizon and flatness problem. Phys. Rev. D 23, 347-356.
- Hattie, John (2009): Visible Learning. London: Routledge.
- Helmcke, Ben Joshua; Carmesin, Hans-Otto; Sprenger, Lennert und Brüning, Paul (2018): Three methods for the observation of the Big Bang with our school telescope. PhyDid B.
- Hubble, Edwin (1929): A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. Proc. of National Acad. of Sciences, 168-173.
- Kiefer, Claus and Sandhöfer, Barbara (2008): Quantum Cosmology. Beyond the Big Bang. Vaas, Rüdiger (Herausgeber). Berlin: Springer, 1-29.
- Kircher, Ernst and Girwidz, Raimund and Häubler, Peter (2001): Physikdidaktik. Berlin: Springer. 2. Auflage.
- Kultusministerium, Niedersächsisches (2017): Kerncurriculum für das Gymnasium - gymnasiale Oberstufe, die Gesamtschule - gymnasiale Oberstufe, das Fachgymnasium, das Abendgymnasium, das Kolleg, Chemie, Niedersachsen. Hannover: Niedersächsisches Kultusministerium.
- Lemaître, Georges (1927): Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques. Annales de la Société Scientifique de Bruxelles. A47, 49-59.
- Planck, Max (1899): Über irreversible Strahlungsvorgänge. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. Berlin: Verlag der Kgl. Preuß. Akad. der Wiss., 440-480.
- Planck Collaboration (2016): Planck 2015 Results: Cosmological Parameters. Astronomy and Astrophysics. 594, 1-63.
- Popper, Karl (1974): Objektive Erkenntnis. 2. Auflage. Hamburg: Hoffmann und Campe.
- Sexl, Roman und Sexl, Hannelore (1975): Weiße Zwerge – schwarze Löcher. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt.
- Sprenger, Lennert und Carmesin, Hans-Otto (2018): A Computer Simulation of Cosmic Inflation. PhyDid B.
- Unsöld, Albrecht and Baschek, Bodo (1999): Der neue Kosmos. Berlin: Springer. 6. Auflage.
- Wirtz, Carl (1922): Radialbewegung der Gasnebel. Astronomische Nachrichten, 215, 281-286.

Three Methods for the Observation of the Big Bang with our School Telescope

Ben J. Helmcke*, Hans-Otto Carmesin***, Lennert Sprenger*, Paul Brüning*

*Gymnasium Athenaeum Stade, Harsefelder Straße 40, 21680 Stade

**Studienseminar Stade, Bahnhofstraße 5, 21682 Stade,

***Fachbereich Physik, Universität Bremen, 28334 Bremen

Ben.Joshua.Helmcke@icloud.com, Hans-Otto.Carmesin@t-online.de

Abstract

Usually telescope based research on the big bang is performed by the application of huge telescopes like the Hubble-Space-Telescope. However, in our work we propose three methods for the big bang observation, which are applied with an 11 inch telescope in our school observatory. The first method is based on the redshift. We are using the redshift to calculate the velocity of the galaxies in the framework of the Doppler effect and more generally the expansion of space. From the Hubble-diagram, we then can get the age of the universe by doing a regression. The second method we used is based on a comparison of our telescope with the Hubble-Space-Telescope. For the third method we use supernovae. Here we are utilizing the brightness of a supernova. The results show that the observation of the big bang is also possible with a much smaller telescope then e.g. the Hubble-Space-Telescope.

1. Introduction

After the big bang 13.8 billion years ago (Beckmann, 2010), our universe began to expand. Based on the measurements on the redshift of different galaxies done by Slipher (1915), in 1922 Carl Wirtz discovered a relation between the redshift z and the distance d of galaxies (Appenzeller 2009, Wirtz 1922). The theoretical explanation was provided by Alexander Friedmann (1922) and Georges Lemaitre (1927). Later in 1929 Edwin Hubble also found a relation between the distance and the redshift of a galaxy, he formulated Hubble's law (Hubble, 1929). In our work we provide three methods for the observation of the big bang with an 11 inch telescope. In contrast, observations on the big bang are typically based on the usage of large telescopes (see for instance Hubble 1929). The telescope used throughout our research is the Celestron C11 with 2800 mm focal length. We capture our images using the ST-402 camera from SBIG while we take our spectra utilizing the DSS7-spectrograph from SBIG.

2. State of research

There are different methods for determining the age of the universe. In the first method the age is determined by utilizing the radial or escape velocity v of galaxies (see Slipher 1915). If the redshift $z = \Delta\lambda/\lambda$ is interpreted by the Doppler effect, we get $v = c \cdot z$ for the radial velocity v of a galaxy. Additionally the distances d of the galaxies are observed (see Hubble 1929). At redshifts smaller than $z \approx 0.2$ the redshift is proportional to the

distance: $z \sim d$. This relation is called *Hubble law* and the corresponding factor of proportionality is named *Hubble constant* $H_0 = v \cdot d^{-1}$ (Karttunen et al. 2007). With it one may calculate the *Hubble time* $\tau = H_0^{-1}$. That time is a quite good estimate of the *age of the universe*. However, observations at larger redshifts $z > 0.2$ show deviations from the Hubble law. So the Hubble constant H_0 must be replaced by a time dependent *Hubble parameter* $H(t)$.

3. Method 1

In our first method we observe the redshift z and the flux density S (Karttunen et al. 2007) of the radiation emitted by the galaxies. By utilizing the redshift z we determine the escape velocity v of the galaxies while we determine the distance d of the galaxies by utilizing the flux density S .



Figure 1: Image of the galaxy M66 using a telescope with the aperture 11 inch. We utilized the telescope Celestron C11 and captured the image through the spectrograph DSS7 by using the camera ST-402.

4. Method 1 - Redshift

The galaxy M66 is an example for this method. First we take an image to focus the telescope on the galaxy (see figure 1).

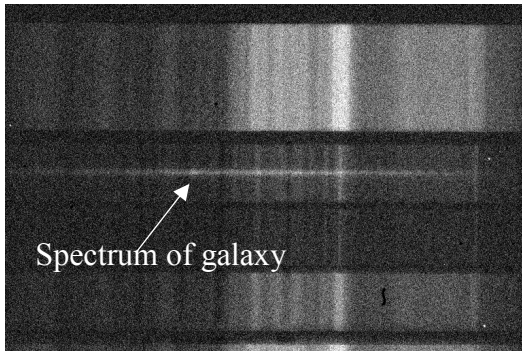


Figure 2: Spectrum of the galaxy M66 measured with the telescope Celestron C11 and with the spectrograph DSS7. Horizontal stripe: spectrum of the galaxy. Surrounding spectrum: light pollution in Stade.

We measure the redshift by taking the spectrum of the galaxy utilizing the spectrograph (see figure 2). Second we capture the spectrum by cutting out the horizontal stripe at which the spectrum of the galaxy is placed within the image from the spectrograph (see figure 2). To get accurate measurements we have to calibrate the spectrograph. Calibration is done in a process consisting of five steps. First we take the spectral image of a neon lamp that contains some mercury in addition. Second we use the software called “spectra” to sum up the image intensities for each column. This gives us a plot of the unscaled calibration spectrum (see figure 3).

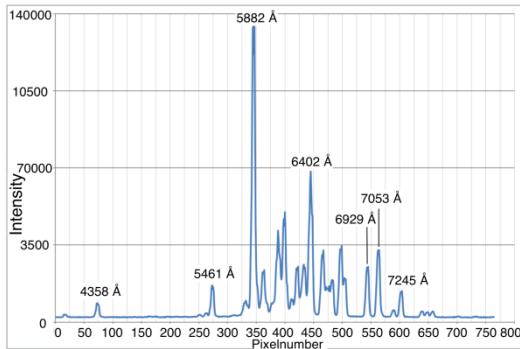


Figure 3: Plot of the unscaled spectrum.

In the third step we find known lines of neon and mercury in the plot of the calibration spectrum. Fourthly we transfer the wavelength and the horizontal position in the unit pixel of the known lines to a calibration graph (see figure 4). Fifthly we do a linear regression on the points in our calibration graph (see figure 4). This gives us the calibration equation $y = 5.4506x + 3971.6$ with x as the pixel coordinate in horizontal direction and y being the corresponding wavelength in Å. After having calibrated the spectrograph, we now can measure the redshift. For doing so, we first have to identify the H α -line in the captured spectrum. Next we use our

calibration equation, from the calibration process, to get the wavelength λ' of the H α -line in our captured spectrum of the galaxy.

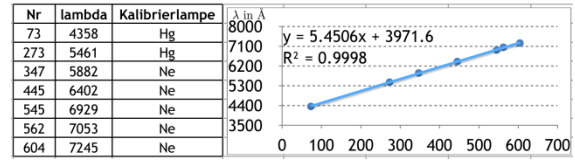


Figure 4: Calibration graph of calibration spectrum.

Because we know the wavelength λ of the H α -line from literature, we can easily calculate the redshift $z = (\lambda' - \lambda)\lambda^{-1} = \Delta\lambda \cdot \lambda^{-1}$ where λ' is the H α -wavelength from our captured spectrum of the galaxy and λ the H α -wavelength from literature.

5. Method 1 - Distance

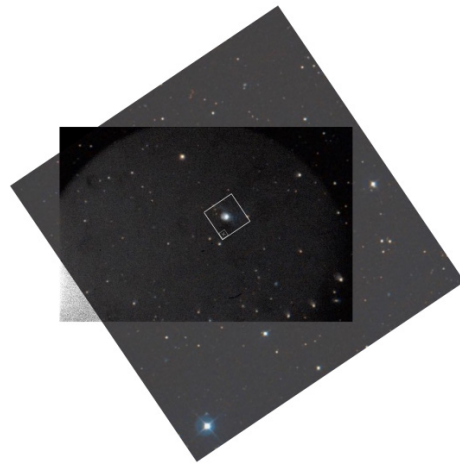


Figure 5: Our photo of the galaxy UGC 8058 (small image) with overlay (large image): Identification of stars that are nearly in the direction of the galaxy UGC8058 using images of public databases (see Wikisky 2007).

Next we measure the distance to each observed galaxy. For calculating that distance, we are utilizing the observed apparent magnitude m of the captured galaxy. With the apparent magnitude m we determine the flux density S (see Karttunen et al. 2007).

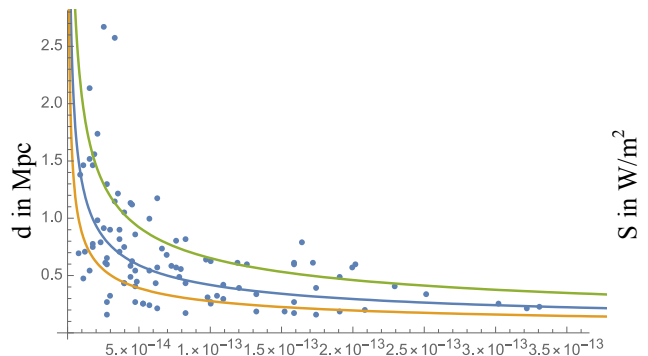


Figure 6: Data of starburst galaxies with a regression function and the corresponding standard deviation (see NASA/IPAC 2018).

We estimate an averaged luminosity P for the galaxy as follows. We observe galaxies with relatively intensive $H\alpha$ – lines only. Next we measure the distance to each observed galaxy. For calculating that distance, we are utilizing the observed apparent magnitude m of the captured galaxy. With the apparent magnitude m we determine the flux density S (see Karttunen et al. 2007). We estimate an averaged luminosity P for the galaxy as follows. We observe galaxies with relatively intensive $H\alpha$ – lines only. Based on the observed flux density S and on the luminosity P of similar galaxies we determine the distance d of the observed galaxy utilizing the following equation:

$$d = (P \cdot (4\pi S)^{-1})^{0.5} \quad \{1\}$$

Before using this equation, we read out the counts for each pixel in the image. After the background was subtracted, we sum up all counts of all pixels in the star or galaxy. By doing so, we get a ratio of the number of counts and the flux density S of the stars for one image. Based on this ratio, we can now calculate the flux density S of the galaxy, by summing up all counts of all pixels of the galaxy and then multiply the sum with the ratio of the flux density and the counts. Here the used luminosity P is the average over approximately 100 starburst galaxies (see figure 6). This was done by collecting a list of distances and flux densities from literature (see NASA/IPAC 2018).

OBJECT	z	v in Ly/y	d in 10^9 Ly
EARTH	0	0	0
M66	0.00234 [14]	0.00234[14]	0.295[2]
NGC 3516	0.008816[133]	0.008816[133]	0.127[5]
NGC 1275	0.01756[12]	0.01756[4]	0.203.9[3]
NGC 2276	0.008062[10]	0.008062[10]	0.120[39]
NGC 4151	0.003262[67]	0.003262[67]	0.0127[23]
UGC 8058	0.04147[8]	0.04147[8]	0.593[7]

Table 1: Data for the Hubble diagram (see NASA/IPAC 2018).

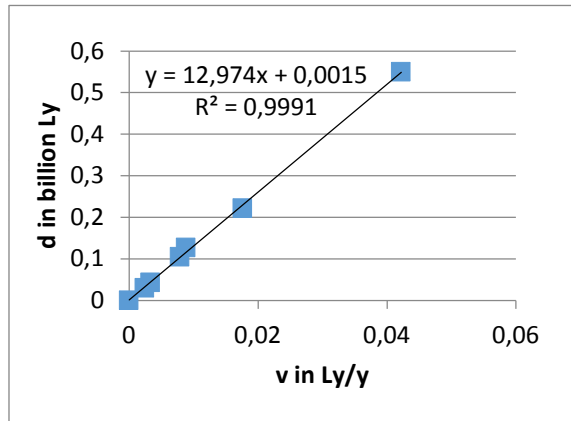


Figure 7: Data for the Hubble diagram (see NASA/IPAC 2018).

Now we want to show the process of measuring the distance for the galaxy UGC8058 as an example. For it we determine the counts C_u , the minimum flux density S_{min} and the maximum flux density S_{max} of UGC8058. First we

select several stars in our image, in our example we select six stars. Second we get the apparent magnitude of those stars from literature. By applying the equation $S_{star} = S_{\odot} \cdot 10^{-0.4(m-m_{\odot})}$ with m_{\odot} as the apparent magnitude of the sun and S_{\odot} as the solar constant, we can calculate the flux density of the stars by substituting m with the apparent magnitude of the star. Next we calculate the sum of counts for the selected stars. This is done by calculating the average count \bar{c}_s of a star in a square of size c_s and the average count \bar{c}_b of the background near the star. The sum of counts for the star can be approximated as $c_s = (\bar{c}_s - \bar{c}_b) \cdot c_s$. Now we get the flux density per count $S_c = S_{star}/c_s$. Before the final step, we calculate the mean \bar{S}_c and the standard deviation σ_c of the flux density per count over all of our selected neighbour stars. Then we calculate the minimal flux density $\bar{S}_{min} = C_u \cdot (\bar{S}_c - \sigma_c)$ and the maximal flux density $\bar{S}_{max} = C_u \cdot (\bar{S}_c + \sigma_c)$. Finally we use the function (see figure 6) $d_{min} = 8.74653 \cdot 10^{-6} / \bar{S}_{min}^{0.5}$ to calculate the minimal distance and $d_{max} = 0.0000206188 / \bar{S}_{min}^{0.5}$ to calculate the maximal distance, both in Mpc. These functions for the distances are derived by utilizing a regression of literature values (see figure 6). Since we are restricted to a telescope with an aperture of 11'', we tend to select galaxies with an especially high luminosity at distances above 150 MLy. So we tend to underestimate the distance of galaxies with distances larger than 150 MLy. Accordingly we utilize the literature value of the distance for the galaxy UGC 8058 (see figure 9).

6. Method 1 – Hubble diagram

The age of the universe can be determined by using the *Hubble diagram* (Beckmann, 2010). At the y-axis of the Hubble diagram we mark the distance d in 10^9 light-years (Ly) and at the x-axis we mark the velocity in $Ly \cdot y^{-1}$. First we present the data found in the literature (see table 1 and figure 7) in order to obtain a basis for comparisons.

7. Method 1 - Results

The table (see table 2) lists the values for the redshift, which we measured, and our measured velocities of the galaxies. Additionally the table includes the distances that we calculated as well as the time at which we made the measurements.

Object	z	v in Ly/y	d in 10^9 Ly	Date
Earth	0	0	0	-
M66	0.0026	0.0026	0.02	4/26/11
NGC 3516	0.0104	0.0104	0.075	7/18/15
NGC 1275	0.01664	0.01664	0.114	1/27/17
NGC 2276	0.007467	0.007467	0.079	1/28/17
NGC 4151	0.0006	0.0006	0.068	1/28/17
NGC 6946	0.000133[10]	0.000133[10]	0.01141	2/6/17
UGC 8058	0.0427	0.0427	0.593[7]	3/24/17

Table 2: Our measurements for the Hubble diagram.

By performing a linear regression, we get an equation $y = 12.61x + 0.0063$. Here the gradient of the regression function gives us the age of the universe in the unit one billion years. Therefore we get 12.61 billion years as the age of the universe

based on our measurements. State of the art measurements estimate the age of the universe at 13.77 billion years (Planck Collaboration 2016). The Hubble diagrams based on our measurements with our 11 inch telescope are shown in figures (8) and (9).

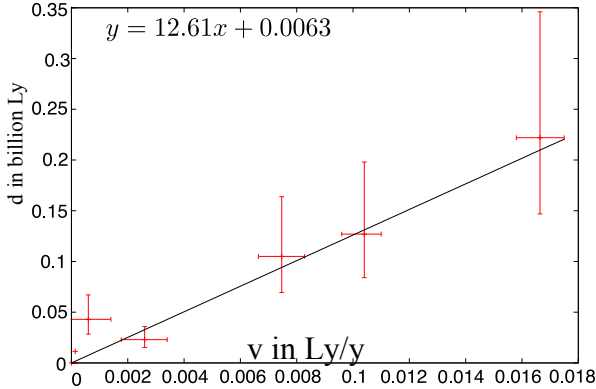


Figure 8: Hubble diagram with error bars for v and d based on our measurements. Because the data point for NGC 6946 is calculated from a literature value for the redshift, no error bars are shown.

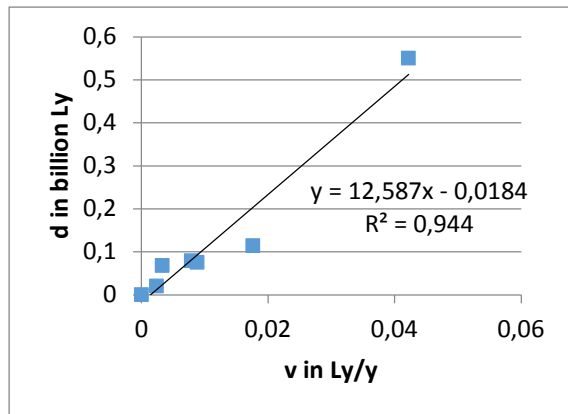


Figure 9: Hubble diagram based on our measurements including the Galaxy UGC 8058, with distance from literature of $0.593 \cdot 10^9$ Ly.

8. Method 2

The second method is based on the comparison of our telescope with the Hubble Space Telescope (HST). The idea is to investigate what the HST should observe when the time were not limited by the big bang. In particular we determine, in which distance the HST should still be able to observe objects. Our telescope in Stade has the aperture diameter $D_{C11} = 11 \text{ inch} \approx 0.28m$ and the HST has the aperture diameter $D_H = 2.4m \approx 8 \cdot D_{C11}$.

The galaxy with the largest distance $e = 12 \cdot 10^9 \text{ Ly}$, that we have already observed with our 11 inch telescope, was APM08279+ 5255 (see figure 10) Thereby the light travelled this distance while the space expanded already to an even larger distance. In this section by distance we mean the distance travelled by the light.

9. Method 2 – constant space

First we test the hypothesis of a universe without a big bang and without an expansion of space. Accordingly we use the hypothesis that the flux density $S=P/A$ decreases with the distance proportional to d^{-2} . From it we derive the distance d_H at which the HST should still observe quasars.

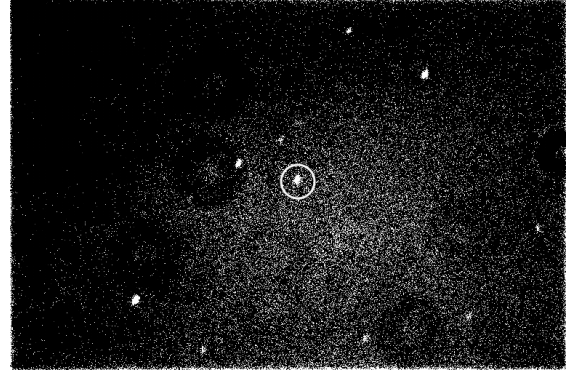


Figure 10: Quasar APM08279+5255 observed with 11'' telescope. Distance: light travelled 12.05 billion Ly.

Since the diameters are related described by $D_H = 8 \cdot D_{C11}$ the aperture areas are related as follows: $A_H = 8^2 \cdot A_{C11}$. So the flux densities required for an observation are related as follows: $S_H = 64^{-1} \cdot S_{C11}$. According to our hypothesis we derived $S \sim d^{-2}$ and we derive further that the HST should be able to observe quasars that are 8 times as far away as those that we can observe using our telescope C11. Based on the distance of the galaxy APM08279+5255 (see figure 10), which is 12.05 billion Ly, the HST should be able to observe quasars at the distance $d_H = d_s \cdot 8 = 12.05 \cdot 10^9 \text{ Ly} \cdot 8 = 96.4 \cdot 10^9 \text{ Ly}$. However, the HST never observed a quasar at a distance larger than $14 \cdot 10^9 \text{ Ly}$. So we reject the above hypothesis.

10. Method 2 – expanding space

In our first hypothesis we considered a constant space. Now we want to include the expansion of space. Accordingly we test the hypothesis of a universe without a big bang and with an expansion of space. Again we derive the distance d_H at which the HST should still observe quasars.

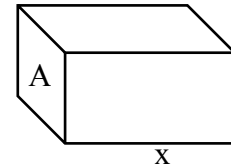


Figure 11: Visualization of the flux propagating through an area A at a distance x .

First we derive the *energy density* u corresponding to the flux density S as follows: The flux density is the energy E per area A and time t : $S = E/(A \cdot t)$ (see figure 11). Next we expand this fraction by the length x that the light travelled during the time t : $S = E \cdot x / (A \cdot x \cdot t)$. Here the product $A \cdot x$ is the volume V

filled by the radiation that crossed the area A perpendicularly: $V = A \cdot x$. Moreover the fraction x/t presents the velocity of light $c = x/t$. We insert these terms and obtain the relation between the flux density and the energy density u as follows:

$$S = u \cdot c \quad \{2\}$$

Second we analyse how an energy density u_0 comes from a source to a telescope at a distance q . In general radiation achieves the distance q by a superposition of the velocity of propagation and by the expansion. Thereby the expansion can be much more effective than the propagation, see for instance figure 10. In order to achieve a lower bound for the density u at the distance q we omit the propagation. Correspondingly the change of the wavelength of a photon is $\lambda' = \lambda/q$. So the energy per photon ε changes as follows: $\varepsilon' = \varepsilon/q$. Additionally the volume of a portion of energy increases by the factor of q^3 , $V' = V \cdot q^3$. So the energy density corresponding to N photons changes as follows:

$$u' = N \cdot \varepsilon' / V' = N \cdot \varepsilon / q^4 \quad \{3\}$$

We realize that the energy density changes by the factor q^{-4} . According to equation {2} the flux density changes by the same factor:

$$S' = S / q^4 \quad \{4\}$$

The HST and our telescope in Stade receive the same power of the light for their cameras when the following condition holds (see equation {4}):

$$S'_{C11} \cdot A_{C11} = S'_{HST} \cdot A_{HST} = S_{C11} / q_{C11}^4 \cdot A_{C11} \quad \{5\}$$

$$\text{Or } S_{C11} / q_{C11}^4 \cdot A_{C11} = S_{HST} / q_{HST}^4 \cdot A_{HST} \quad \{5\}$$

After solving the equation for q_{HST} we get $q_{HST} = \sqrt[4]{8} \cdot q_{C11} \approx 2.8 \cdot q_{C11}$. Now we can calculate the distance at which the HST should be able to observe quasars: $d_{HST} = d_{C11} \cdot \sqrt[4]{8} = 12 \cdot 10^9 \text{Ly} \cdot \sqrt[4]{8} \approx 34 \cdot 10^9 \text{Ly}$. However, the HST never observed a quasar at a distance larger than $14 \cdot 10^9 \text{Ly}$. So we reject the above hypothesis.

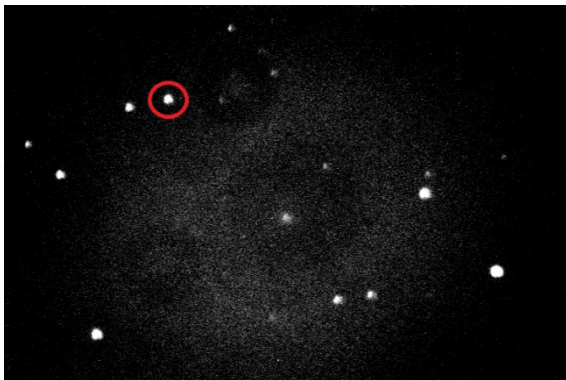


Figure 12: Using our telescope C11 we took an image of the supernova SN 2017eaw (red circle) in the fireworks galaxy NGC 6946 (center).

Summarizing the comparison of the C11 and the HST based on figure (10) indicates that there has been a big bang.

11. Method 3

The third method is similar to the first method. However here we utilize supernovae to determine the distance (see figure 12). To calculate the distance, we measure the observed apparent magnitude m of a supernova. From it we calculate the flux density F of the supernova. Since the luminosity of a supernova is well known (see Karttunen et al. 2007), we also know the power emitted from the supernova. From it we calculate the distance of the supernova. So we obtain the distance of the corresponding galaxy. By utilizing this method we eliminate the missing precise knowledge of power emitted by the galaxy (see figure 6). So our measurement of the distance of the galaxy becomes more accurate than in our first method.

12. Summary

Finding out more about the universe was always a driving factor in human curiosity, knowledge and science. Observations of the big bang are an important step for understanding our universe. In our research we show three methods for observing the big bang, whereby these methods are accessible even to pupils. In addition, our methods only require a telescope with a diameter of 11 inch. However, while the measurement of the wavelength works also for large distances, the determination of the distance with our first method works accurately only up to 150 Mly while we can measure also large distances accurately by utilizing supernovae.

13. Acknowledgement

We thank Dow Stade for financial support for the robotic mount.

14. Literatur

- Appenzeller, Immo (2009): Carl Wirtz und die Hubble Beziehung, Aus Welt der Wissenschaft p.44
- Beckmann, Dieter (2009): Astrophysik C.C. Buchner Verlag
- Friedmann, Alexander (1922): Über die Krümmung des Raumes. Z. f. Physik, 10, 377-386.
- Hubble, Edwin (1929): A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. Proc. of National Acad. of Sciences, 168-173.
- Karttunen, Hannu; et al. (2007): Fundamental Astronomy. 5th edition. Springer Berlin Heidelberg New York.
- Lemaitre, Georges (1927): Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques. Annales de la Société Scientifique de Bruxelles. A47, 49-59.

- Planck Collaboration (2016): Planck 2015 Results: Cosmological Parameters. *Astronomy and Astrophysics*, 594, 1-63.
- NASA/IPAC (2018): NASA/IPAC Extragalactic Database (NED): <http://ned.ipac.caltech.edu/cgi-bin/nph-objectsearch?objname=M+66&extend=no> (state 9/2018)
- Slipher, Vesto (1915): Spectrographic Observations of Nebulae. *Popular Astronomy*, 23, 21-24.
- Wikisky (2007): Image database (state 10/2018).
- Wirtz, Carl (1922): Radialbewegung der Gasnebel. *Astronomische Nachrichten*, 215, 281-286.

A Computer Simulation of Cosmic Inflation

Lennert Sprenger¹, Hans-Otto Carmesin^{1,2,3}

¹Gymnasium Athenaeum Stade, Harsefelder Straße 40, 21680 Stade

²Studienseminar Stade, Bahnhofstraße 5, 21682 Stade

³Fachbereich Physik, Universität Bremen, 28334 Bremen

Abstract

From the Cosmic Microwave Background CMB, the flatness problem and the horizon problem arose. An extraordinarily increase of distances in the early universe, the Cosmic Inflation, was proposed as a possible solution, whereby suggested mechanisms for such an increase have been criticized (Steinhard, 2011). We apply a theory that explains the Cosmic Inflation by an extended Friedmann-Lemaitre model combined with an energy term (Carmesin, 2017). We investigate various questions by performing computer simulations. We observe a sequence of phase transitions that cause an extraordinarily fast increase in distances. Our findings are in excellent quantitative agreement with observations of the CMB. Thereby the theory depends only on first principles and the fundamental constants G , c and h and we apply no fit in particular. We present the development of the project in the framework of a Jugend forscht club.

1. Introduction

From the Cosmic Microwave Background CMB, the flatness problem and the horizon problem arose. To describe the expansion of the universe, a Friedmann-Lemaitre model has been frequently used until now (see Karttunen 2007). The Friedmann-Lemaitre differential equation

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \cdot (\rho_M + \rho_V) \quad \{1\}$$

does not solve the two problems arising from the Cosmic Microwave Background. One additional problem, which is not solved by the Friedmann-Lemaitre equation is the singularity problem (see Kiefer 2008), which considers a singularity as non-physical. In the Friedmann-Lemaitre equation ρ_M is the matter density and ρ_V is the vacuum density. The vacuum density is constant. The solution of the Friedmann-Lemaitre model provides the evolution of the scale factor $a(t)$.

2. Problems

The singularity problem is visible in the solved Friedmann-Lemaitre equation, where the density tends to infinity, when $a(t)$ and t tends to zero (see figure 1).

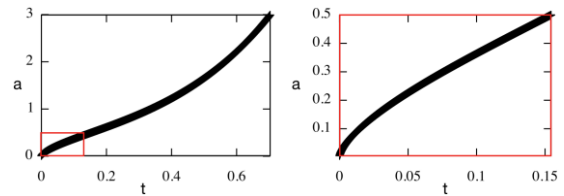


Figure 1: Symbolic evolution of the Friedmann-Lemaitre equation, numerically solved. With $G = 1$, $\rho_V = 1$ and $m = 1$.

The horizon problem and the flatness problem arise from the CMB (see figure 2).

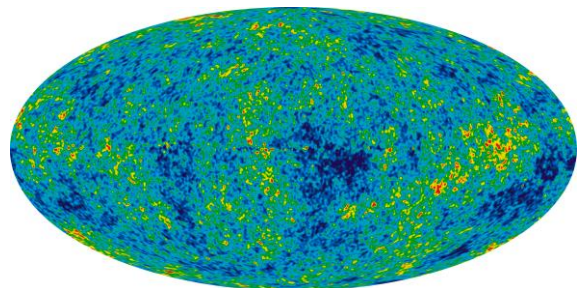


Figure 2: Cosmic Microwave Background (figure: NASA WMAP Science Team, 9 year WMAP image of background radiation).

3. The horizon problem

The horizon problem arises from the temperature fluctuations which amount to $\frac{\Delta T}{T} = 0.000024$. So the

full solid angle 4π covered by the Cosmic Microwave Background has a homogenous temperature distribution. The full solid angle is so large that on the basis of the Friedmann-Lemaitre equation it would be causally disconnected and it would not be possible for radiation to distribute the energy homogeneously in the time since the big bang.

4. The flatness problem

The second problem arising from the CMB is the flatness problem. The space-time curvature is measured and indicates a flat space on a large scale. Modelled with the Friedmann-Lemaitre equation it would have been even more flat in the early universe which is highly unlikely.

5. Possible solution for the problems

To solve the three problems a rapid increase in distances in the early universe, the Cosmic Inflation, was proposed by Allan Guth in 1981 (see Guth 1981). In many approaches to the problems an inflaton field is used, which requires very sensitive fit parameters to fit to observations. In this paper, we propose a new model without any fit parameters, an extended Friedmann-Lemaitre equation, to describe the Cosmic Inflation and solve these problems.

6. The model

The standard Friedmann-Lemaitre equation can be derived from a spherical model with a scale factor a , a probing mass m and the density ρ of the sphere.

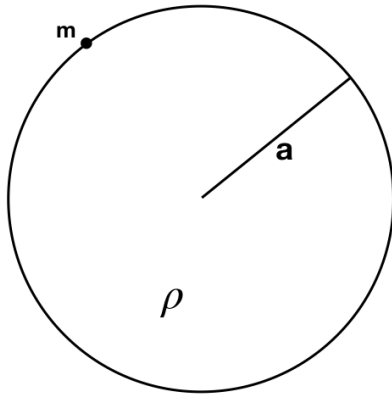


Figure 3: Model from which the Friedmann-Lemaitre equation can be derived.

From this spherical model, we can derive the Friedmann-Lemaitre equation (see Carmesin 2017, Carmesin 2018 a,d):

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \cdot (\rho_M + \rho_V) \quad \{2\}$$

We extend the model by adding a radius for our probing mass in order to describe the density of the probing mass, which was not possible in the old model based on a point-like mass.

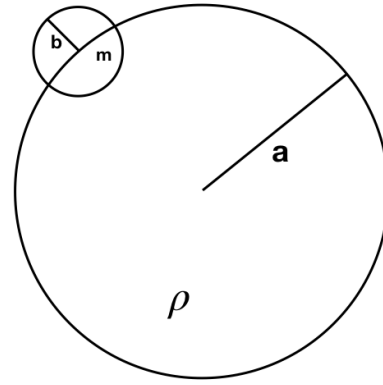


Figure 4: Model from which the extended Friedmann-Lemaitre equation can be derived.

In order to obtain the corresponding dynamics, we derive the quantum physical expectation values $\langle \dot{a} \rangle$ and $\langle a \rangle$ and denote these by \dot{a} and a in the following (for details see Carmesin 2018 a,d). In the resulting extended Friedmann-Lemaitre equation we introduce the scaled density $\tilde{\rho} = \frac{\rho}{\rho_{PD}}$ which is the matter density divided by the maximal density, the Planck density ρ_{PD} . From this new spherical model (see figure 4), we get the following extended Friedmann-Lemaitre equation for three dimensions (see equation {3}). Hereby we introduce the Planck time t_P .

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{2}{t_P^2} \cdot \tilde{\rho} \cdot \left[1 - 6 \cdot \tilde{\rho}^{\frac{1}{2}}\right] \quad \{3\}$$

Moreover we generalize this model to spatial dimensions $D \geq 3$ and obtain the following extended Friedmann-Lemaitre equation (see Carmesin 2018 a,d, see {4})

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{2}{t_P^2} \cdot \tilde{\rho} \cdot \left[1 - \sqrt{2^{D-2} \cdot (D-1) \cdot D^2} \cdot \tilde{\rho}^{\frac{(D-1)^2}{2(D+1)}}\right] \quad \{4\}$$

with the corresponding scaled energy term (see Carmesin, 2018 a,d, see {5}):

$$E_D = -\tilde{\rho}^{\frac{D-1}{D+1}} + \sqrt{2^{D-2} \cdot (D-1) \cdot D^2} \cdot \tilde{\rho}^{\frac{D-1}{2}} \quad \{5\}$$

Thereby the scaled energy term E_D is the quantum physical expectation value $\langle E \rangle$ at the ground state divided by $m \cdot c^2$.

7. Dimensional transitions

The scaled energy E_D is calculated for each scaled density $\tilde{\rho}$ and for any Dimension $D \geq 3$ (see figure 5).

$\tilde{\rho}$	0.009	
D	E_D	
3	-0.0408683298050514	
4	-0.047399707332933	
5	-0.0409764611381778	
6	-0.0341612190261753	
7	-0.0291494031505907	
8	-0.0256245858948968	
9	-0.0230865194541782	
10	-0.0211929929871053	
11	-0.0197333613375166	
12	-0.0185769436727649	

Figure 5: Scaled energy E_D as a function of the spatial dimension D at the scaled density $\tilde{\rho} = 0.009$.

From the table in figure 5 we get the following graph.

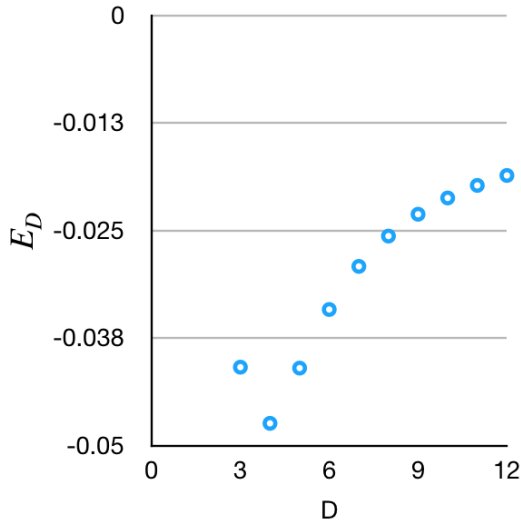


Figure 6: Scaled energy as a function of the spatial dimension D at the scaled density $\tilde{\rho} = 0.009$. Here the ground state energy is at $D = 4$.

In order to apply the D -dimensional version of the extended Friedmann-Lemaitre equation (see equation {4}), we calculate a critical density $\tilde{\rho}_{cD}$ at which there occurs a dimensional transition of the ground state from $D + 1$ to D for each dimension. For it we minimize the scaled energy term (see equation {5}). By applying the variational principle, we obtain the following values for the critical scaled densities (see figure 7).

Dimension D	Scaled critical density $\tilde{\rho}_{cD}$
3	0.006560789873286
4	0.0154690495420951
5	0.0270430431866556
6	0.0398603342266119
7	0.0530506248138605
8	0.0661239958458446

Figure 7: Critical scaled densities for dimensional transitions.

8. Solving the extended Friedmann-Lemaitre equation

The extended Friedmann-Lemaitre equation can be solved with numerical integration. For it we used the Runge-Kutta method of fourth order.

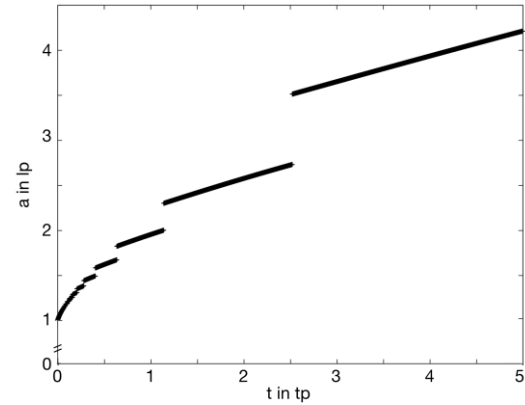


Figure 8: Solved extended Friedmann-Lemaitre equation: Discontinuities arise at dimensional transitions.

The dimensional transitions take place where the graph is not continuous (see figure 8). The graph in figure 8 shows symbolically the dimensional transitions with the corresponding increase in the scale factor. The exact values can be found in *Model for the Dynamics of Space* (see Carmesin 2018 a,d). Our critical density $\tilde{\rho}_{c3}$ can be utilized in order to calculate the observed density of ρ_M of the universe. Our result is in excellent accordance with observations. Thereby no fit must be applied (see Carmesin 2017, see Carmesin 2018 a,d).

9. Summary

We solve the extended Friedmann-Lemaitre equation generalized for spatial dimensions $D \geq 3$ numerically (see section 8). So we obtain the scaling radius a as a function of the time t including dimensional transitions at critical densities $\tilde{\rho}_{cD}$ (see section 7). Based on this solution the singularity problem and the flatness problem can be solved when the durations of the dimensional transitions are calculated with help of Fermi's golden rule (see Carmesin 2018 a,d). Furthermore these durations show in full detail how the singularity problem is solved by the dimensional transitions (see Carmesin 2018 a,d).

10. Literatur

- Bennett, Charles L. and others (2013): Nine-year Wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP) Observations: final maps and results. The Astrophysical Journal Supplement Series. 208. 1-54.
- Carmesin, Hans-Otto (2017): Vom Big Bang bis heute mit Gravitation – Model for the Dynamics of Space. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (May 2018a): Entstehung dunkler Materie durch Gravitation - Model for the Dynamics of Space and the Emergence of Dark Matter. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto Carmesin and Carmesin, Matthias (2018b): Quantum Gravity Model for Cosmic Inflation. To be publ.
- Carmesin, Hans-Otto (July 2018c): Entstehung dunkler Energie durch Quantengravitation - Universal Model for the Dynamics of Space, Dark Matter and Dark Energy. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2018d): A model for the Dynamics of Space. PhyDid B.
- Friedmann, Alexander (1922): Über die Krümmung des Raumes. Z. f. Physik, 10, 377-386.
- Guth, Alan (1981): Inflationary Universe: A possible to the horizon and flatness problem. Phys. Rev. D 23, 347-356.
- Karttunen et al. (2007): Fundamental Astronomy. 5th edition. Springer Berlin Heidelberg New York
- Kiefer, Claus and Sandhöfer, Barbara (2008): Quantum Cosmology. Beyond the Big Bang. Vaas, Rüdiger (Herausgeber). Berlin: Springer, 1-29.
- Lemaitre, Georges (1927): Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques. Annales de la Société Scientifique de Bruxelles. A47, 49-59.

Kompetenzorientierte, universitäre Laborpraktika

- Das Paderborner Physik Praktikum (3P) -

Anna B. Bauer*, Marc D. Sacher*

*Universität Paderborn, Department Physik, Physikalisches Grundpraktikum, Warburger Str. 100, 33098 Paderborn

anna.bauer@uni-paderborn.de, marc.sacher@uni-paderborn.de

Kurzfassung

Mit dem Paderborner Physik Praktikum (3P) ist seit Wintersemester 2011 eine kompetenzorientierte Neukonzeptionierung eines viersemestrigen Laborpraktikums (Anfängerpraktikum) auf Basis des Cognitive Apprenticeship Ansatzes mit dem Ziel eines systematischen Erwerbs der experimentellen Kompetenz entstanden. In diesem Beitrag werden am Beispiel des Praktikumssteils B (zweites Semester) die didaktische Struktur mit Fokus auf die Aufgabenstellungen und dem damit angestrebten Kompetenzerwerb vorgestellt. Dazu wird exemplarisch ein Experiment detailliert betrachtet.

1. Einleitung

Der Erwerb experimenteller Kompetenz stellt ein zentrales Ziel naturwissenschaftlicher Studiengänge an Universitäten dar [1]. Typischerweise erlernen die Studierenden im Rahmen von Laborpraktika systematisch das strukturierte und reflektierte Experimentieren im jeweiligen Fachkontext.

Verschiedene Erhebungen zur Wirksamkeit experimenteller Lehr-Lernsituationen [u.a. 1;2] zeigen allerdings, dass in den typischen organisatorischen Strukturen eine deutliche Diskrepanz zwischen den Zielen von Laborpraktika und dem Lernzuwachs der Lernenden besteht [3].

Das Konzept des 3P [4] begegnet dieser Diskrepanz durch eine kompetenzorientierte Neukonzeptionierung des Anfängerlaborpraktikums auf Basis des Cognitive Apprenticeship Ansatzes [5]. Die Studierenden werden systematisch beim Erwerb der experimentellen Kompetenz durch umfangreiche Betreuungs-, Scaffolding- und Feedbackstrukturen unterstützt, um sie auf ihre erste Qualifikationsarbeit, der Bachelorarbeit, sowie auf ihre weitere Berufstätigkeit vorzubereiten.

2. Ziele von Laborpraktika

Im Physikstudium sollen Studierende mittels Anfängerpraktika an einfacheren physikalischen Zusammenhängen experimentelle Kompetenz erwerben. Dazu erlernen sie Fähigkeiten und Fertigkeiten, die für die Planung, den Aufbau und die Durchführung von Experimenten, sowie für das Auswerten experimentell gewonnener Daten und Interpretieren der Ergebnisse notwendig sind [6].

Darüber hinaus stellt auch das Heranführen an den Erkenntnisprozess ihrer Wissenschaftsdisziplin, der Erwerb eines fundierten, fachmethodischen Wissens sowie die Verknüpfung und Vertiefung dieses mit dem in Vorlesungen und Übungen erworbenen Wissens Ziele von Laborpraktika dar [6].

3. Rahmenbedingungen von 3P

Die Studierenden des Bachelor-Studienganges Physik durchlaufen das Paderborner Physik Praktikum in den ersten vier Semestern. Das Praktikum gliedert sich in ein dreisemestriges Modul mit 15 Leistungspunkten und ein einsemestriges Modul mit 5 LP im vierten Semester. Beide Module werden mit einem Abschlussportfolio und einem dazugehörigen Reflexionssgespräch abgeschlossen. Lehramtsstudierende für Gymnasien und Gesamtschulen nehmen nur an den ersten drei Semestern des Praktikums teil. Das Gesamtkonzept des Paderborner Physik Praktikums ist in den vergangenen Jahren kontinuierlich weiterentwickelt worden. Es sind bisher die ersten zwei Semester, Praktikum A und B, in den Regelbetrieb überführt worden.

4. Didaktisches Konzept

Das 3P stellt die erste Lehrveranstaltung im Studienverlauf dar, in der die Studierenden die Fachmethodik des Experimentierens anhand unterschiedlicher, praktischer Situationen erlernen. Es ist neben dem Erwerb grundlegender experimenteller Fähigkeiten und Fertigkeiten daher die zentrale Idee, dass die Studierenden von Beginn an ihre Handlungen und Denkprozesse im Hinblick auf den Gesamtprozess des Experimentierens reflektieren und beurteilen, um eine tiefergehende Auseinandersetzung und damit die Entwicklung elaborierter Kompetenzen zu gewährleisten.

Der Erwerb der experimentellen Kompetenz wird im 3P auf Basis des didaktischen Prinzips des Cognitive Apprenticeship realisiert. Dieser Ansatz stellt eine situierte Lehr-Lernmethode dar und basiert auf dem Meister-Lehrlingsprinzip: Den Lernenden sollen beim Erwerb neuer Fähigkeiten die kognitiven Prozesse der einzelnen Arbeitsschritte und deren Bedeutung für das Endprodukt sichtbar gemacht werden. Zu

Beginn des Lernprozesses werden durch den „Meister“ die für das Erreichen des Endprodukts notwendigen Arbeitsschritte anhand von Handlungsmustern modelliert (Modeling). Der Lernende versucht die Handlungsschritte selbstständig anzuwenden und erhält dabei Unterstützung (Scaffolding). Im weiteren Verlauf des Lernprozesses tritt der „Meister“ und die Unterstützungen bei komplexer werdenden Aufgabenstellungen weiter in den Hintergrund (Fading), sodass der „Lehrling“ schrittweise selbstständiger arbeitet. Ziel ist eine Generalisierung der erworbenen Kompetenzen.

Konzeptionell ist im 3P dieser Lernprozess gestreckt über vier Semester angelegt (siehe Abb.1) und lässt sich in die didaktischen Dimensionen Betreuung, Scaffolding und Physikalische Inhalte gliedern. Die Rolle des Meisters übernehmen im Laborpraktikum speziell geschulte Betreuende. Ergänzend erhalten die Studierenden Hilfestellungen z.B. in Form von klar gegliederten Aufgabenstellungen. Während die Betreuung und das Materialangebot über die Semester schrittweise „ausgeschlichen“ werden, bleibt kooperatives Arbeiten als Unterstützung weiterbestehen und wird darüber hinaus gefördert.

Jeder Praktikumstag ist in abwechselnde Diskussions- und Experimentierphasen gegliedert. In den Diskussionsphasen arbeiten drei Zweiertteams, also sechs Studierende, zusammen. In den Experimentierphasen arbeiten die Studierenden in Experimentierteams zusammen und können sich bei Fragen oder Unklarheiten mit den anderen Teams austauschen. Die Phasen sind grob dem idealtypischen Prozess des Experimentierens nachempfunden: Planen, Aufbauen, Durchführen und Auswerten. Die Betreuenden strukturieren

jede Phase mit Hilfe kompetenzorientierter Aufgaben, die die Studierenden zu experimentelle oder sprachliche Handlungen aufgeforderen, um so die Ausbildung experimenteller Handlungsmuster zu unterstützen. Die Handlungsmuster verfestigen sich im Laufe der Experimente, da die Studierenden diese auf vielfältige Situationen anwenden und reflektieren.

Darüber hinaus ist für die Unterstützung des Lernprozesses eine umfangreiche Feedback-Struktur implementiert worden. Die Studierenden erhalten von ihren Betreuenden individuelles, differenziertes Feedback zu den an den Praktikumstagen gezeigten Leistungen und den Entwürfen der Praktikumsberichte. Weiterhin wird ab dem ersten Semester die Methode des Peer-Feedbacks [7] angelegt. Die Studierenden entwerfen ihre Berichte, geben diese an ihre Gruppenmitglieder weiter und erhalten ein erstes Feedback. Zu dem abgegebenen Feedback wiederum erhalten die jeweiligen Feedbackgeber eine Rückmeldung durch ihre Betreuenden. Das Feedback durch die Betreuenden sowie das durch die Peers wird durch regelmäßige Selbstreflexionsaufgaben ergänzt. Die Studierenden gleichen dabei ihre Selbstwahrnehmung ihres Leistungsstandes mit dem erhaltenen Feedback durch die Betreuenden und Peers ab. Sie können so ihren eigenen Lernprozess reflektieren und Ansatzpunkte für mögliche Weiterentwicklungen identifizieren. Das Reflexionsgespräch am Ende des Moduls rundet die Feedback-Struktur ab.

Inhaltlich sollen die Studierenden sowohl fachmethodische Fähigkeiten als auch experimentelle Fertigkeiten anhand exemplarischer Situationen erwerben. Im ersten Semester bilden an jedem Praktikumstag einzelne Facetten experimenteller Kompetenz, wie z.B. das Erstellen und Beurteilen von Messplänen, das

	Methodische Komplexität	Kooperatives Lernen	Betreuung	Materialien	Schwerpunkt	Typische Experimente	
Schrittweise Erhöhung der Komplexität & Selbstständigkeit	Praktikum A Mechanik (1. Semester)	Erwerb einzelner experimenteller Fähigkeiten	Einführung Gruppenarbeit und Peer-Feedback	Detaillierte Anleitung und Strukturierung aller Arbeitsphasen	Detaillierte Vorbereitungshinweise & klar gegliederte Aufgabenstellungen mit vollständiger Literatur	Verschiedene Aufbauten zu gleicher Aufgabenstellung	Trägheitsmomente
	Praktikum B Elektrodynamik (2. Semester)	Verknüpfung einzelner experimenteller Fähigkeiten	Selbstständige Organisation der Vorbereitung in Teams & Peer-Feedback zu einem Bericht	Anleitung und Strukturierung längerer Arbeitsphasen	Klar gegliederte Aufgabenstellung für die Vorbereitung mit vorgegebener Einstiegsliteratur	Grundlegende Messmethoden mit steigender Anzahl zu beachtender Komponenten	Brückengleichrichter
	Praktikum C Schwingungen, Optik, Atomphysik (3. Semester)	Verknüpfung aller experimenteller Fähigkeiten	Selbstständige Organisation der Gruppenarbeit am Experimentiertag & des Peer-Feedbacks	Grobstrukturierung der Praktikumstage und Hilfe nach Bedarf	Komplexe Aufgabenstellung mit Bearbeitungshinweisen & selbstständige Literaturrecherche	Fortgeschrittene Messmethoden & komplexere Aufbauten	Gedämpfte Schwingungen
	Praktikum D Freie Inhaltswahl (4. Semester)	Nutzung komplexer experimenteller Fähigkeiten	Selbstständige Organisation eines Projektes	Nach Bedarf & während der Präsentationsphasen	Selbstständige Wahl gemäß Projektthema	Freie Wahl mit angemessener Komplexität	Selbstgewähltes Projektthema

Abb. 1: Didaktisches Konzept des viersemestrigen Paderborner Physik Praktikums inkl. der Darstellung Konzeptionierungsdimensionen: Betreuung (blau), Physikalischen Inhalte (grün) und Scaffolding (rot).

hervorgehobene Lernziel. Die Betreuenden leiten die Studierenden durch kompetenzorientierte, experimentelle Aufgabenstellungen aus dem Inhaltsbereich der Mechanik an, indem sie z.B. die experimentellen Handlungsmuster (Arbeitsschritte) für das Erstellen von Messplänen modellieren. Im Anschluss erproben die Studierenden das gelernte Handlungsmuster und werden im Anschluss zur Reflexion ihrer Vorgehensweise und der Ergebnisse auf Basis des Gesamtprozesses des Experimentierens angeregt. Im Verlauf der Experimente sammeln die Studierenden so vielfältige Handlungsmuster, die sie in neuen Situationen anwenden und so weiterentwickeln können.

Im zweiten Semester wenden die Studierenden die separat erworbenen Kompetenzfacetten miteinander verknüpft auf komplexere Situationen im Inhaltsbereich der Elektrodynamik an. Der Betreuende leitet die Verknüpfung der Fähigkeiten in den einzelnen Phasen der Praktikumstage an, indem die Studierenden mehrere fachmethodische Aspekte bei der Reflexion des jeweiligen experimentellen Vorgehens und der Ergebnisse nutzen.

Im dritten Semester absolvieren die Studierenden in unterschiedlichen, physikalischen Inhaltsgebieten größtenteils selbstständig komplexe Projekte, deren Bearbeitung eine Verknüpfung aller experimentellen Kompetenzfacetten miteinander erfordert. Der Betreuende hat nur noch beratende Funktion. Im vierten Semester bearbeiten die Studierenden eigenständig ein komplexes Projekt vom Finden eines Themas bis

zum Präsentieren ihres Projektes in Form eines hochschulöffentlichen Vortrags.

5. Weiterentwicklung des Konzeptes

Das Konzept wird seit der Einführung regelmäßig weiterentwickelt. Für die Identifikation möglicher Optimierungsansätze werden Fragebögen eingesetzt, die Zufriedenheitswerte der Studierenden in Form geschlossener Fragen zu den einzelnen Aspekten des Konzeptes, wie der Organisation des Praktikums, der Vorbereitung der Praktika, der Diskussions- und Experimentierphasen und der Betreuung mittels einer vierstufigen Likertskala („trifft gar nicht zu“ bis „trifft voll zu“) erheben. Darüber hinaus bieten offene Fragen den Studierenden die Möglichkeit anonym ihre Meinung zu dem Konzept zu äußern. Der Fragebogen wird nach jeder Weiterentwicklung der Konzeptbestandteile angepasst und am Ende jedes Semesters eingesetzt. Für die Weiterentwicklung des Konzeptes werden Aspekte mit geringen Zufriedenheitswerten mit den Studierenden und Betreuenden diskutiert, reflektiert und neue Ideen entwickelt.

6. Konzept des Praktikums B

Im Folgenden wird die didaktischen Struktur des Praktikums B entlang der Dimensionen Physikalische Inhalte, Betreuung und Scaffolding beschrieben.

6.1. Physikalische Inhalte

Im Praktikum B durchlaufen die Studierenden vier Experimente zu Inhalten aus der Elektrodynamik und belegen einen Workshop, in dem sie die Fertigkeit des

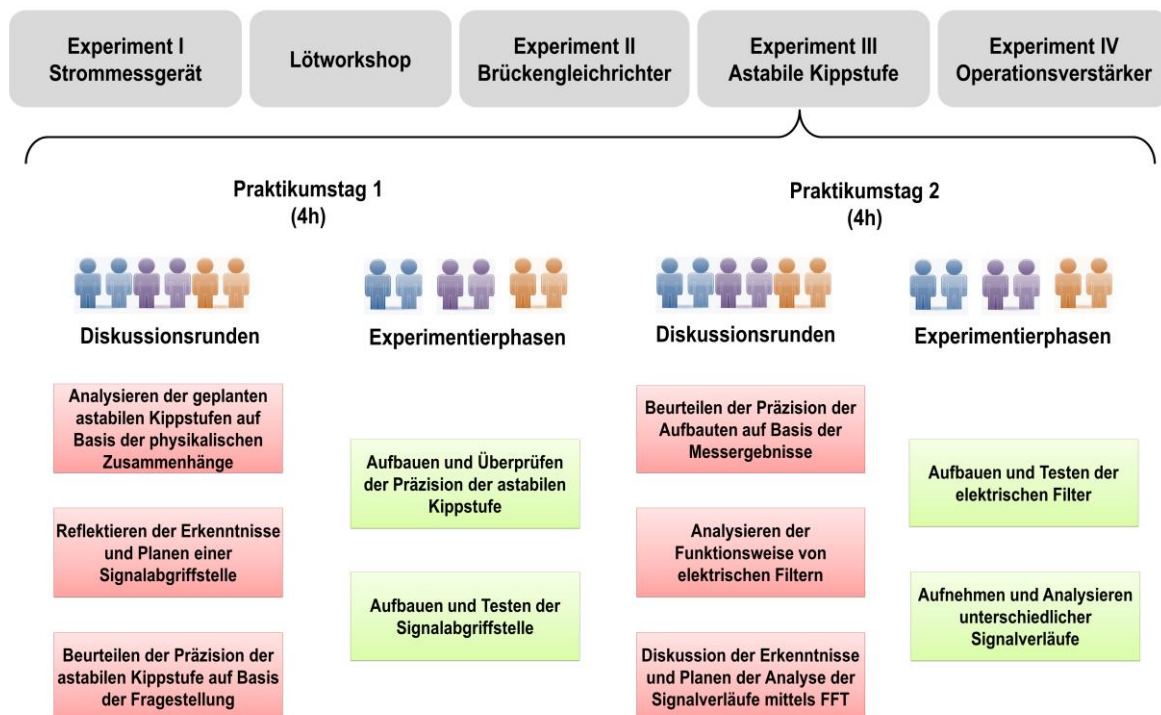


Abb. 2: Inhaltlicher Ablauf des Praktikums B (oben) und didaktische Struktur des Experiments „Astabile Kippstufe“ (unten)

Lötens erlernen (siehe Abb.2). Ziel des Praktikums B ist, dass die Studierenden das Anwenden und Beurteilen elementarer Messmethoden und Messgeräte der Elektrodynamik erlernen und ihre im Praktikum A erworbenen experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten auf einen weiteren physikalischen Inhaltsbereich übertragen und so weiterentwickeln. Im Verlauf des Semesters nutzen die Studierenden an den Praktikumstagen verschiedene Messgeräte und Messmethoden wiederholt in komplexer werdenden Aufbauten und Experimentieraufgaben (siehe Tab.1). Alle Aufbauten des B-Praktikums werden von den Studierenden selbstständig gelötet. Die Studierenden sollen nach dem Praktikum B in der Lage sein, Messgeräte und elektronische Bauteile, wie z.B. Transistoren, selbstständig hinsichtlich ihrer Funktionsweise und Wirkung auf Schaltkreise zu analysieren und deren Eignung zu beurteilen.

Im Praktikum B werden die Studierenden als Vorbereitung auf das Praktikum C an allen Praktikumstagen an das Formulieren von experimentellen Fragestellungen herangeführt. Dazu leiten sie aus der Aufgabenstellung des Experimentes, die ihnen zusammen mit den Vorbereitungsaufgaben gegeben werden, experimentelle Fragestellungen für die einzelnen Praktikumstage ab, die dann am Ende des zweiten Praktikumstages zu einer Fragestellung für das Experiment zusammengeführt und als roter Faden für die anzufertigen Berichte genutzt wird. Dieses Vorgehen ist angelegt worden, weil es den Studierenden schwer fällt hypothesengeleitet zu experimentieren und somit die einzelnen Phasen der Praktikumstage nicht als Teile eines gesamten Experimentierprozesses angesehen werden. Dies zeigt sich darin, dass die einzelnen Arbeitsschritte für das Absolvieren der Aufgabe nicht zielgerichtet durchlaufen werden und die Reflexion der Arbeitsschritte nicht auf Basis des gesamten Experimentierprozesses erfolgt.

6.2. Betreuung

Die Betreuenden leiten die Studierenden durch die Arbeitsschritte der Praktikumstage und erhalten dafür einen detaillierten Ablaufplan, der neben den Zielsetzungen der einzelnen Phasen auch die jeweiligen Aufgabestellungen und weitere Hinweise zum Ablauf enthalten. Sie leiten jede Phase ein, indem sie den Studierenden das Ziel der Phase und die dafür abzuarbeitenden Arbeitsschritte nennen. Es wird ihnen dabei keine Reihenfolge für die Bearbeitung vorgegeben. Die Studierenden dürfen den Weg zum Erreichen des Ziels der Phase selbstständig bestimmen. Die Betreuenden greifen in die Diskussionen oder Experimentierhandlungen ein, sobald falsche oder umständliche Vorgehensweisen gewählt werden. Dazu setzen sie Impulse, die die Studierenden zur Reflexion ihrer Vorgehensweise animieren und entwickeln dann mit ihnen alternative Vorgehensweisen und unterstützen so das Bilden von Handlungsmustern.

6.3. Scaffolding

Die Studierenden bereiten sich auf die Experimente im Praktikum B mit Hilfe von Fachliteratur (z.B. Fachbücher, Paper) und bereitgestellten Videos vor. Bei den Fachinhalten wird dabei zwischen Allgemein- und Expertenwissen unterschieden. Ersteres bereiten alle sechs Studierenden vor, da es sich um die elementaren Fachinhalte für das erfolgreiche Absolvieren der Experimente handelt. Weiterhin werden für jeden Praktikumstag drei Expertenthemen genannt. Die Themen werden von den Studierenden selbstständig auf die Praktikumsteams aufgeteilt und vorbereitet. An den Praktikumstagen gelten die Teams z.B. für die Funktionsweise von Peltier-Elementen als Experten und erklären diese den anderen Teams. Diese Aufteilung der Fachinhalte sorgt dafür, dass der Umfang der Vorbereitung gesenkt und die Selbstständigkeit der Studierenden erhöht werden konnte. Darüber hinaus werden die Expertenthemen so tiefergehend vorbereitet, weil die Studierenden wissen, dass sich die anderen Praktikumsteams auf sie verlassen.

Die Evaluation der letzten Durchgänge hat u.a. aufgezeigt, dass den Studierenden die Vorbereitung auf die Praktikumstage schwerfällt. Sie wünschen sich für die Vorbereitung strukturierende und anleitende Aufgabenstellungen. Dies ist darauf zurück zu führen, dass die zu verwendenden Bauteile und Messgeräte für fast alle Studierenden unbekannt sind und die aufzubauenden Schaltungen aus einer wachsenden Anzahl von Bauteilen bestehen. Die Studierenden sind somit sowohl während der Vorbereitung als auch an den Praktikumstagen kognitiv stark belastet. Nach der Cognitive-Load-Theory [8] kann die kognitive Belastung der Lernenden durch angeleitete Übungsgelegenheiten gesenkt werden, die schrittweise an den Lerninhalt heranführen.

Es sind deswegen Simulationsaufgaben für alle Experimentiertage im Praktikum B entwickelt und getestet worden, die von den Studierenden mittels der Software LTSpice [10] realisiert werden sollen und sie so schrittweise an die Funktionsweise komplexer Schaltungen heranführen.

LTSpice stellt eine Open-Source Software für elektrische Schaltungen dar. Neben idealen können auch reale Bauteile simuliert werden, sodass eine größtmöglichen Realitätsnähe erreicht wird. Zur Einführung in LTSpice sind drei Einführungsvideos entstanden, in denen schrittweise die Nutzung der Software erklärt wird.

Weiterhin sollen die Aufgaben den Studierenden ermöglichen, auf Basis ihres individuellen Wissensstands und Lerntempos die Funktionsweise und das Zusammenwirken mehrerer Bauteile direkt in der Simulation beobachten zu können. Besonders die Funktionsweise zeitlich veränderlicher Bauteile und -schaltungen, wie z.B. Kondensatoren im Wechselstromkreis, können so bereits im Vorfeld des Prakti-

	Experiment 1 Strommessgerät	Experiment 2 Brückengleichrichter	Experiment 3 Astabile Kippstufe	Experiment 4 Operationsverstärker
Inhalt	Gleichstromkreise	Gleichrichtung von Wechselstrom	Generierung von Rechtecksignalen aus Gleichspannung	Verstärkung von Signalen
Die Studierenden können...	... einen experimentellen Aufbau planen, dimensionieren und kalibrieren.			
	... Gleichstromkreise physikalisch beschreiben und experimentell realisieren	... Wechselstromkreise physikalisch beschreiben und experimentell realisieren	... eine astabile Kippstufe physikalisch beschreiben und experimentell realisieren	... unterschiedliche Operationsverstärkerschaltungen physikalisch beschreiben und experimentell realisieren
	... Digitalmultimeter für Strom-, Spannungs- und Widerstandsmessung nutzen und analysieren	... einen sinusförmigen Signalverlauf mit Hilfe eines analogen Oszilloskops darstellen.	... ein Rechteck-Signal mit Hilfe eines digitalen Oszilloskops darstellen und die Messwerte auslesen.	... eine Verstärkerschaltung kalibrieren.
	... Innenwiderstände von Spannungsquellen und Digitalmultimetern bestimmen.	... Einweg- und Brückengleichrichter physikalisch beschreiben und experimentell realisieren	... FFT-Analyse unterschiedlicher Signalformen beschreiben und nutzen.	... Funktionsweise von Hallensensoren physikalisch beschreiben und das Ausgangssignal experimentell verstärken und messen.
	... die elektr. Leistung unterschiedlicher Widerstände bestimmen und auf Basis dessen nutzen.	... Dioden als Halbleiterbauelement beschreiben und nutzen.	... induktive und kapazitive Hoch- und Tiefpässe physikalisch beschreiben und experimentell realisieren	... Funktionsweise von Thermoelementen physikalisch beschreiben und das Ausgangssignal experimentell verstärken und messen.
	... Strom-Spannungskennlinien für die Bestimmung von Widerständen aufnehmen.	... Transformatoren beschreiben und nutzen.	... Transistoren als Halbleiterbauelement beschreiben und nutzen.	... Funktionsweise Dehnungsmessstreifen beschreiben und das Ausgangssignal experimentell verstärken und messen.
	... mehrere Variablen messmethodisch korrekt bestimmen.	... die Wirkung von Elektrolyt-Kondensatoren auf Wechselstromkreise beschreiben und nutzen.	... die Funktionsweise von Funktionsgeneratoren beschreiben und nutzen.	... relevante Charakteristika von Operationsverstärkern nennen und experimentell bestimmen.
		... Funktionsweise von Peltier-Elementen beschreiben und nutzen.		... Potentiometer beschreiben und nutzen.
	... Messwerte unter Beachtung des Gesamtsystems hinsichtlich ihrer Präzision beurteilen.			
	... alle Prozessschritte und Geräte auf Basis der Fragestellung und des Experimentierprozesses reflektieren.			
Geräte	Gleichspannungsquelle	Transformator	Gleichspannungsquelle	Spannungsquelle
	Digitalmultimeter	Analoges Oszilloskop	Digitales Oszilloskop	Diverse Sensoren
Elementare Bauteile	Last- und Präzisionswiderstände	Dioden	Transistoren	Potentiometer
	Magnete	Elektrolyt-Kondensatoren	Elektrolyt-Kondensatoren	Operationsverstärker
	Spulen	Peltier-Elemente	Spulen	Präzisionswiderstände

Tab. 1: Darstellung der im Praktikum B zu erwerbenden Fähigkeiten und Fertigkeiten mit Angabe der verwendeten Bauteile und Messgeräte

kumstages analysiert werden. Die Aufgabenstellungen sind auf Basis von identifizierten Verständnisproblemen und Sachstrukturdiagrammen [9] entwickelt worden.

Die auf Basis der Aufgabenstellung entstandenen Schaltpläne und simulierten Spannungsverläufe bringen die Studierenden am Praktikumstag mit. Sie stellen die Grundlage für die erste Diskussionsrunde, in der die mathematischen Zusammenhänge der am Praktikumstag behandelten Experimente analysiert werden, dar.

Die Evaluation des Einsatzes aller Aufgaben steht momentan noch aus. Erste mündliche Rückmeldungen belegen, dass die Software und die zugehörigen Aufgaben einen guten Einstieg bieten und damit eine tiefgehende Vorbereitung auf das Praktikum ermöglicht. Die Betreuenden melden zurück, dass die Studierenden besser vorbereitet sind als in den zurückliegenden Semestern.

Die Studierenden erhalten darüber hinaus Hilfestellungen für die Dokumentation der experimentellen Erkenntnisse in Form von Leitfäden. Diese enthalten

werden die Inhalte der Poster reflektiert und Verbesserungen für die Darstellung von experimentellen Ergebnissen erarbeitet.

7. Das Experiment „Astabile Kippstufe“

Im Folgenden wird beispielhaft anhand des dritten Experimentes, der Astabilen Kippstufe, die Lehr-Lern-Umgebung dargestellt. Fachinhalte dieses Experimentes sind das Simulieren, Erzeugen, Aufnehmen und Beeinflussen idealer und realer Signalverläufe. Methodische Schwerpunkte sind das Erstellen und Auswerten von Schaltungssimulationen, Oszilloskopieren, Löten und Interpretieren sowie Beurteilen der Fast-Fourier-Transformation (FFT). Am ersten Tag planen, dimensionieren und bauen die Studierenden einen eigenen Funktionsgenerator basierend auf einer Astabilen Kippstufe auf. Am zweiten Tag ergänzen sie ihre Schaltung um induktive und kapazitive Hoch- und Tiefpässe. Die erzeugten Signalverläufe werden mit digitalen Oszilloskopen aufgenommen. Die aufgenommenen Signalverläufe werden mit Hilfe der FFT analysiert, um den Einfluss der elektrischen Filter auf das Spektrum beurteilen zu können.

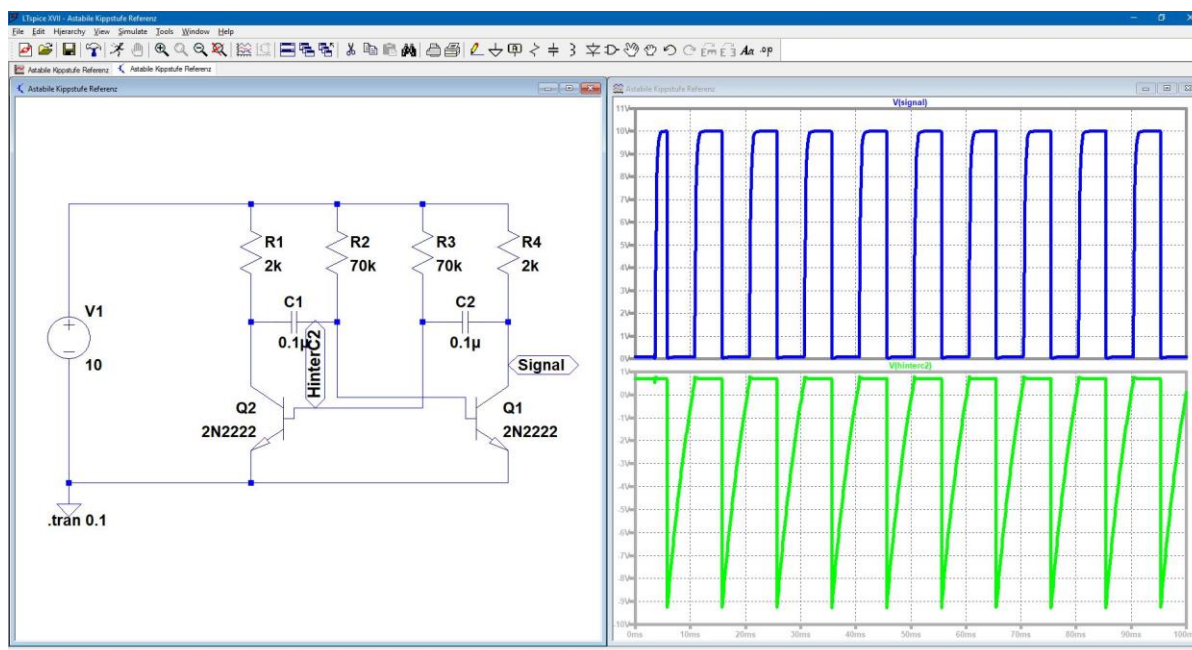


Abb. 3: Darstellung des Schaltplans einer astabilen Kippstufe mit Hilfe des Simulationsprogrammes LTSpice und simuliertem Signalverlauf. Die Studierenden sollen den Zusammenhang zwischen der Ladung der Kondensatoren und deren Auswirkungen auf das Signal analysieren.

Hinweise, wie experimentelle Ergebnisse kurz und prägnant dargestellt werden können. Die Dokumentation erfolgt in Form von Laborbucheinträgen und ab Praktikum B durch Erstellung von Postern in den Experimentierphasen. Die Studierenden erstellen die Poster, damit sie in den anschließenden Diskussionsrunden den anderen Teams kurz und knapp ihre Vorgehensweise und Ergebnisse präsentieren zu können. Die Erstellung der Poster wird zusätzlich von den Betreuenden kontrolliert. In den Diskussionsrunden

7.1. Die Vorbereitung

Den Studierenden werden zur Vorbereitung auf die Praktikumstage die Aufgabenstellung des Experimentes inkl. der abzuarbeitenden Arbeitsschritte genannt. Darüber hinaus sind die vorzubereitenden Fachinhalte, die für die Bearbeitung der Aufgabenstellung notwendig sind, vorgegeben. Ziel der Vorbereitung ist, dass die Studierenden eine Astabile Kippstufe mit einer vorgegebenen Schaltfrequenz dimensionieren, simulieren und analysieren können. Diese

Aufgabe gehört zum Expertenwissen, sodass die Praktikumssteams Astabile Kippstufen mit unterschiedlichen Schaltfrequenzen (100Hz, 200Hz, 300Hz) dimensionieren. Dazu sollen sie sich zunächst alle mit der Funktionsweise von Transistoren und Kondensatoren sowie deren Verwendung in der Schaltung Astabile Kippstufe, anhand von Fachliteratur auseinandersetzen. Ergänzend zu der Literaturarbeit erhalten sie strukturierende und anleitende Simulationsaufgaben, die sie schrittweise an die Lösung der Hauptaufgabe heranführen und in zwei unterschiedliche Aufgabenarten gegliedert sind.

In dem ersten Aufgabenblock sollen die Studierenden zunächst eine Astabile Kippstufe mit vorgegebenen Dimensionierungen konstruieren und simulieren. Im Anschluss werden ihnen konkrete Handlungsanweisungen für die Analyse der Funktionsweise der Schaltung gegeben:

Stelle $R_2 = R_3 = 280\Omega$ und $R_1 = R_4 = 20\Omega$ ein. Ändere dann die Größe der beiden Widerstände auf $R_1 = R_4 = 100\Omega$. Beobachte, wie sich der Strom durch die Transistoren ändert. Du solltest bei $R_1 = R_4 = 20\Omega$ einen kleineren maximalen Strom sehen als bei $R_1 = R_4 = 100\Omega$.

Die Aufgaben enthalten jeweils Zwischenlösungen, damit die Studierenden die Möglichkeit haben ihre Handlungen zu evaluieren.

Im zweiten Block werden die Studierenden angeleitet den Zusammenhang zwischen der Ladung der Kondensatoren und deren Auswirkung auf das Signal zu analysieren (siehe Abb.3), um im Anschluss die Dimensionierung der Astabilen Kippstufe mit vorgegebener Schaltfrequenz realisieren zu können. Die Studierenden drucken ihre konstruierten Schaltungen und simulierten Signalverläufe aus und bringen diese am Praktikumstag mit.

7.2. Die Praktikumstage

In der Abbildung 2 sind die einzelnen Phasen inkl. der thematischen Schwerpunkte der beiden Praktikumstage dargestellt. Im Folgenden werden die Struktur und die Inhalte des ersten Praktikumstages detaillierter dargestellt.

Der erste Praktikumstag beginnt mit einer gemeinsamen Planungsphase, die der Betreuende einleitet, indem er mit den Studierenden die Aufgabe und Arbeitsschritte des Experimentes bespricht. Die Studierenden leiten dann eine experimentelle Fragestellung für den Praktikumstag ab: Welche Bauteile besitzen den größten Einfluss auf die Präzision einer selbstgebauten Astabilen Kippstufe? Im Anschluss leitet der Betreuende die Diskussion zur Analyse der physikalischen Grundlagen zur Astabilen Kippstufe ein, indem er die Studierenden zur Vorstellung ihrer Dimensionierungen und zur Analyse dieser hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit auffordert.

In der nächsten Phase löten die Studierenden ihre in der Vorbereitung individuell geplante Astabile Kippstufe. Für die Inbetriebnahme der Geräte sollen sie

sich zunächst das dafür vorgesehene digitale Oszilloskop ansehen. Die Studierenden haben im vorangegangenen Experiment bereits die Funktionsweise und Bedienung von analogen Oszilloskopen kennengelernt. Der Betreuende beruft nach dem ersten Ansehen der Geräte eine Gruppenbesprechung im Experimentierraum ein und diskutiert mit den Studierenden die Unterschiede sowie Vor- und Nachteile von analogen und digitalen Oszilloskopen, um ihnen so den Transfer ihres im vorangegangenen Wissens zu analogen Oszilloskopen auf digitale Oszilloskope zu erleichtern und deren jeweilige Einsatzmöglichkeiten zu reflektieren. Hier wird auch der Einfluss des Oszilloskops auf das zu messende Signal von den Betreuenden thematisiert. Im Anschluss schließen die Studierenden ihre Astabilen Kippstufen an die digitalen Oszilloskope an und überprüfen die Funktionsfähigkeit ihrer Aufbauten sowie den Einfluss des Messgerätes auf den Signalverlauf, indem sie einen Widerstand als Demo-Verbraucher zu ihrer Schaltung hinzufügen und dessen Auswirkungen auf den Signalverlauf analysieren. Während der Experimentierphase erstellt jedes Praktikumssteam ein Poster zu ihren Erkenntnissen.

Es folgt eine Diskussionsrunde zur Vorstellung der Zwischenergebnisse auf Basis der erstellten Poster. Ziel der Analyse ist das Erkennen von Gemeinsamkeiten und Unterschieden der verschiedenen Aufbauten. Es schließt sich eine Diskussion zu der Frage an, welchen Einfluss die zusätzlichen Bauteile auf die Schaltfrequenz und die Signalform besitzen. Im Anschluss planen die Gruppen auf Basis der Erkenntnisse gemeinsam eine Schaltungsmodifikation, die den Einfluss des Oszilloskops auf die Schaltfrequenz minimieren soll.

Diese Schaltungsmodifikation realisieren die Studierenden in der anschließenden Experimentierphase und führen Kontrollmessungen durch, um die Wirkung der Optimierung zu quantifizieren und fundierte Aussagen zur Signalqualität tätigen zu können.

Zuletzt findet eine finale Diskussionsphase statt, in der die Studierenden die Erkenntnisse vorstellen, diskutieren und auf Basis der Fragestellung des Praktikumstages reflektieren. Im Anschluss zeigt der Betreuende den Studierenden auf, wie sie ihre Aufbauten am zweiten Praktikumstag für das Absolvieren der Aufgabe des Experimentes weiter nutzen.

8. Fazit und Ausblick

Das Praktikum B ist mittlerweile von vier Kohorten im Regelbetrieb durchlaufen worden. Auf Basis identifizierter Lernschwierigkeiten Studierender und Rückmeldungen der Studierenden und Betreuenden sind einzelne Bestandteile des Praktikums B überarbeitet worden. Die Aufgabenstellungen der Praktikumstage und der einzelnen Phasen sind präzisiert und es sind strukturierende Aufgaben für die Vorbereitung der Experimente entwickelt worden. Die Evaluation der neukonzipierten Elemente erfolgt am

Ende des Sommersemesters 2018. Erste Rückmeldungen durch die Betreuenden und Studierenden zeigen, dass die Änderungen positiv aufgenommen werden.

Aktuell wird der neukonzipierte Praktikumsteil C mit einer kleinen Gruppe Studierender pilotiert. Dieser soll ab WS2018/19 in den Regelbetrieb überführt werden.

Zur Messung der Wirkung des Konzeptes des Paderborner Physik Praktikums wird im Rahmen einer Dissertation [12] ein Instrument zur Messung experimenteller Kompetenz entwickelt.

9. Literatur

- [1] Welzel, M.; Haller, K. et al. (1998): Ziele, die Lehrende mit dem Experimentieren in der naturwissenschaftlichen Ausbildung verbinden. Ergebnisse einer europäischen Umfrage. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaft 4 (1): 29–44
- [2] Hucke, L. (2000): Handlungsregulation und Wissenserwerb in traditionellen und computergestützten Experimenten des physikalischen Praktikums. Berlin: Logos-Verl. (Studien zum Physiklernen, 8)
- [3] Haller, K. (1999): Über den Zusammenhang von Handlungen und Zielen. Eine empirische Untersuchung zu Lernprozessen im physikalischen Praktikum. Berlin: Logos-Verl. (Studien zum Physiklernen, 5)
- [4] Sacher, M. D., Probst, H. M., Reinhold, P., Schaper, N. (2015): Entwicklung eines kompetenzorientierten physikalischen Laborpraktikums. In: Hartz, S.; Marx, S. (Hg.): Leitkonzepte der Hochschuldidaktik Theorie – Praxis – Empirie. Reihe Blickpunkt Hochschuldidaktik W. Bertelsmann Verlag: 128-136
- [5] Collins, A., Brown, J. S., & Newman, S. E. (1989): Cognitive-apprenticeship: Teaching the crafts of reading, writing, and mathematics. In: L. B. Resnick (Hg.), Knowing, learning, and instruction. Essays in honor of Robert Glaser. Hillsdale, NJ: LEA.: 32–42
- [6] Empfehlung der Konferenz der Fachbereiche Physik (2010): Zur Konzeption von Bachelor- und Masterstudiengängen in der Physik, 08.11.2010 in Berlin
- [7] Schulz, F. (2012): Peer Feedback in der Hochschullehre hilfreich gestalten. Onlinegestütztes Peer Feedback in der Lehrerbildung mit der Plattform PeerGynt. Dissertation Universität Kaiserslautern.
- [8] Chandler, P.; Sweller, J. (1991): Cognitive Load Theory and the Format of Instruction. In: Cognition and Instruction 8 (4): 293–332.
- [9] Brückmann, M.; Duit, R. (2014): Videobasierte Analyse unterrichtlicher Sachstrukturen. In: Krüger, Dirk; Parchmann, I.; Schecker, H. (Hg.): Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg: 189-201
- [10] Analog Devices, Inc.: LTSpice: The High Performance SPICE Simulator.
Url: <http://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>
(Stand: 8/2018)
- [11] Sippel, S. (2009): Zur Relevanz von Assessment-Feedback in der Hochschullehre. In: Zeitschrift für Hochschulentwicklung 4 (1): 1–22.
- [12] Bauer, A. B., Reinhold, P., Sacher, M. D. (2018): Operationalisierung der experimentellen Kompetenz (Physik)Studierender. In C. Maurer (Hrsg.): Qualitätsvoller Chemie- und Physikunterricht – normative und empirische Dimensionen. GDPCP Jahrestagung in Regensburg 2017: 919-922

Professionalität im Lehr-Lern-Labor anbahnen - Ergebnisse zu verschiedenen Facetten von Reflexion und Selbstwirksamkeitserwartungen

René Dohrmann, Volkhard Nordmeier

Freie Universität Berlin, Fachbereich Physik, Arnimallee 14, 14195 Berlin

rene.dohrmann@fu-berlin.de, volkhard.nordmeier@fu-berlin.de

Kurzfassung

Im vorliegenden Beitrag werden die Ergebnisse einer Mixed-Methods-Studie vorgestellt, die auf die Professionalisierungswirkung eines Lehr-Lern-Labor-Blockseminars abzielen. Der Fokus liegt dabei auf den Forschungsschwerpunkten „Reflexion“ und „Selbstwirksamkeitserwartungen“. Zu beiden Schwerpunkten wurden über verschiedene Skalen Erhebungen im Pre-Post-Design vorgenommen, die mithilfe von qualitativ gewonnen Interviewdaten angereichert wurden. Die Ergebnisse sind vielversprechend. Der komplexitätsreduzierte und geschützte Rahmen führt nicht nur zu einer Abdämpfung des ‚Praxisschocks‘ sondern sogar zu einer leichten Steigerung der Selbstwirksamkeitserwartungen der Teilnehmer*innen. Dieser Befund wird durch die Interviews bestätigt. Darüber hinaus scheint sich bei den Teilnehmer*innen eine positive Einstellung gegenüber dem Reflektieren im Laufe des LLL zu bestätigen bzw. noch weiter auszuprägen. Ein möglicher Grund dafür liegt im Erkennen des Mehrwertes von kollektiven Reflexionsprozessen durch die Seminarteilnehmer*innen.

1. Einleitung: Lehr-Lern-Labore im Trend

Trotz oder gerade wegen ihrer noch relativ jungen Geschichte sind Lehr-Lern-Labore (LLL) ein zurzeit vielfältig diskutiertes, implementiertes und auch beforschtes Veranstaltungsformat zur Verknüpfung von Theorie, Praxis und Reflexion in der Lehrkräftebildung deutscher Hochschulen. Insbesondere im Rahmen der Qualitätsoffensive Lehrerbildung werden LLL in einer Vielzahl von Projekten entwickelt bzw. weiterentwickelt und beforscht (z. B. Harring, Feldhoff, Gabriel-Busse, Peitz, Baston, Großmlynek & Graf, 2018, in Vorbereitung; Klempin & Sambanis, 2017).

Erste LLL wurden aber kurz vor der Jahrtausendwende erprobt: So wurde im Jahre 1999 ein LLL im Rahmen eines Projektes zur Verbesserung der dritten Phase der Lehrkräftebildung am Hessischen Landesinstitut für Pädagogik eingerichtet (Münzinger, 2001), dessen Arbeitsweise denen heutiger LLL in vielen Punkten ähnelt und als prototypisch bezeichnet werden kann. Dort wurden bereits die unterrichtenden Personen durch andere Teilnehmer*innen beobachtet, die Fachthematik durch die Teilnehmer*innen (weitestgehend) selbstständig erarbeitet und fachdidaktisch arrangiert, die einzelnen "Phasen" (kollektiv) reflektiert und sogar die Wirksamkeit der Lernumgebung bei den Schüler*innen empirisch überprüft (ebd). In den Folgejahren wurden an verschiedenen Hochschulstandorten weitere Veranstaltungsformate etabliert, die die Kernidee eines LLL aufgriffen (z. B. Steffensky & Parchmann, 2007; Fandrich & Nordmeier, 2008; Appel, Roth & Weigand, 2008). Die Deutsche Telekom Stiftung (DTS) nahm die positiven Ergebnisse

dieser Erprobungen zum Anlass einen Projektverbund ins Leben zu rufen, der sich ab 2014 neben der Entwicklung und Implementation neuer LLL-Formate intensiv mit der Wirksamkeitsforschung beschäftigte (Priemer & Roth, im Druck).

Die im Folgenden vorgestellten Ergebnisse wurden in einem Forschungsprojekt generiert, welches Teil des o. g. Projektverbundes war und sich der Untersuchung der professionsbezogenen Wirksamkeit des LLL „Schwimmen, Schweben, Sinken“ der Freien Universität Berlin widmete. Eine Kurzbeschreibung der Lehrveranstaltung findet sich bei Dohrmann & Nordmeier (2015).

Im vorliegenden Beitrag wird zunächst in Kürze die bildungswissenschaftliche Ausgangslage umrissen. Anschließend werden die Entwicklung der Forschungshypothesen sowie das methodische Vorgehen beschrieben. Die Ergebnisse im Sinne des Mixed-Methods-Ansatzes sowohl quantitativ als auch qualitativ vorgestellt. Dabei konzentriert sich der vorliegende Beitrag auf die Schwerpunkte Reflexion und die Entwicklung der Selbstwirksamkeitserwartungen der Teilnehmer*innen. Vor dem Hintergrund weiterer Resultate der LLL-Forschung werden die Ergebnisse anschließend diskutiert.

2. Grundlagen zu Reflexion und Selbstwirksamkeitserwartungen im Kontext Lehr-Lern-Labor

Die Ausprägung professioneller Handlungskompetenz ist das Ergebnis sich wechselseitig bedingender aber auch beeinflussender Faktoren: Die Verknüpfung von Theorie und Praxis in Verbindung mit der Nutzung professionellen Wissens ist dabei konstitu-

tiv für den Erwerb professioneller Handlungskompetenz, wenn die Praxis (kollektiv) reflektiert wird (Dohrmann & Nordmeier, 2017). Eine zielgerichtete und theoriegeleitete Reflexion des eigenen Handelns ist dabei Voraussetzung für Lern- und Professionalisierungsprozesse (Weinberger, 2013). Insbesondere in der Lehrkräftebildung muss es folglich darum gehen „einen direkteren Zugang zur unterrichtlichen Praxis und dem impliziten Wissen, das das praktische Handeln steuert, zu finden. Ein solcher Weg wird in der Reflexion der Betroffenen über das eigene Handeln gesehen“ (Schneider, 2004). Reflexion wird somit zu einer der Basiskonstanten in der Lehrkräftebildung und fordert Ausbildungssituationen im Studium, die zwei Bedingungen genügen:

- a) Sie müssen generell eine reflexive Grundhaltung fördern;
- b) sie müssen gleichzeitig die Relationierung zwischen Theorie und Praxis herstellen können. (Niggli, 2002)

In den Standards zur Lehrkräftebildung der KMK heißt es unter anderem, dass die Kompetenzentwicklung durch die Reflexion (unterrichtsähnlicher), selbst erlebter Handlungssituationen, die Reflexion eigener biographischer Lernerfahrungen sowie die kollektive Reflexion von Unterricht gefördert werden kann (KMK, 2004).

Diese Punkte lassen sich im vorliegenden LLL-Kontext wiederfinden, denn erstens werden dabei natürliche Unterrichtssituationen mit außerschulischen Lernorten verknüpft, zweitens erarbeiten die Studierenden gemeinsam ihren Unterricht bzw. Unterrichtsminiaturen und drittens hospitieren und reflektieren sie sich gegenseitig.

Die Ausprägung von Reflexionskompetenz ist ein Prozess, der nicht durch eine einzelne Intervention zu bewerkstelligen ist. Vielmehr muss kontinuierlich über den gesamten Verlauf des Lehramtsstudiums Reflektieren geübt und als für die professionelle Entwicklung wichtig erlebt werden. Die personalen Grundvoraussetzungen für den Erwerb von Reflexionskompetenz können dabei vielfältig sein. So beschreibt Niggli (2002), dass es für die Ausprägung von Reflexionskompetenz wichtig ist, eine reflexive Grundhaltung herzustellen, auf welcher im weiteren Studium aufgebaut werden kann. Das heißt, dass die Studierenden ein gewisses Grundinteresse daran haben müssen, Reflexionsvorgänge zu initiieren bzw. durchzustehen und dieses Interesse gilt es zu fördern. Im Rückgriff auf die Interessentheorie nach Krapp (1998) wird in diesem Ansatz davon ausgegangen, dass sich das Interesse an der Reflexion mit zunehmender (Praxis-) Erfahrung nicht nur stärker ausbildet, sondern auch konsolidiert. Dies geschieht insbesondere, wenn das Ergebnis des Reflexionsvorgangs und auch die dabei gewonnenen Erfahrungen für die Teilnehmer*innen als persönlich bedeutsam gewertet werden (Niggli, 2002).

Wenn also Reflexionskompetenz eine der wichtigsten Metakompetenzen von Lehrkräften und somit eine essentielle Disposition professionellen Handelns darstellt, muss ihre Ausprägung bzw. Förderung bereits im Studium stattfinden. Dazu sollten

einerseits praxisnahe Handlungskontexte geschaffen werden, die den beruflichen Anforderungen angehender Lehrkräfte nahekommen sowie Reibungsmomente bei der Anwendung universitären Wissens bieten und somit Reflexionsbedarf erkennen lassen (Heppekausen, 2013). Darüber hinaus liefern solche Praxissituation überhaupt erst die fachdidaktisch und pädagogisch relevanten Inhalte, über die reflektiert werden kann.

Als zweite Voraussetzung für die Ausprägung von Reflexionskompetenz gilt die Bereitschaft zur Reflexion. Erst wenn die Studierenden erkennen, dass Reflektieren mit einer, für die persönliche Entwicklung wichtigen, Sinnhaftigkeit verbunden ist, dass nicht aus Selbstzweck, sondern intendiert reflektiert wird, werden Reflexionsprozesse überhaupt erst angeregt, durchgeführt und konsolidiert. Aus diesem Grund ist die Einstellung gegenüber dem Reflektieren von besonderer Wichtigkeit, denn die „Umsetzung professioneller Unterrichtsreflexion erfordert, neben dem notwendigen Wissen und Können, insbesondere eine positive Einstellung und die Bereitschaft zur Reflexion des eigenen Handelns“ (Neuber & Göbel, 2016). Erst wenn diese gegeben ist, kann es zur Ausprägung von Reflexionskompetenz kommen.

Universitäre Praxisphasen sind jedoch immer mit Herausforderungen verbunden, die es nicht nur zu antizipieren, sondern auch zu meistern gilt. Auf struktureller Ebene sind dies die Verankerung solcher Lehrveranstaltungen in den Studienordnungen, die Bereitstellung von Materialien, Räumlichkeiten und Personal sowie die Kommunikation zwischen den beteiligten Schulen und Hochschulen. Auf der inhaltlichen bzw. wirkungsbezogenen Ebene besteht das ‚Gefahrenpotential‘ in einer möglichen Deprofessionalisierung der Beteiligten (Weyland, 2014; Hascher, 2011). Dies kann sich unter anderem im ‚Praxischock‘ niederschlagen (Dicke et al., 2016; Merzyn, 2006; Messner, 1999; Tschannen-Moran, Woolfolk Hoy & Hoy, 1998), welcher sich in einem Rückgang der Selbstwirksamkeitserwartungen (SWE) der in der Praxisphase befindlichen Personen zeigen kann (z. B. Rabe et al., 2013). „Hat eine Lehrperson eine niedrige Selbstwirksamkeitserwartung, hält sie sich z.B. nicht für fähig die Klasse kontrollieren, motivieren oder lenken zu können. Sie sieht die Bewältigung einer Anforderung außerhalb ihres Handlungsradius in äußeren Bedingungen begründet. Traut sich die Lehrkraft zu, selbst durch Anstrengung, ihre Kompetenzen oder Raffinesse die Situation bestimmen zu können, verfügt sie über eine hohe Selbstwirksamkeitserwartung“ (Kosinár, 2010). Damit Praxisphasen nicht im Rückgang von SWE münden und sich die Studierenden nicht überfordert fühlen, ist es notwendig die Komplexität solcher Phasen sukzessive zu steigern, um die angehenden Lehrkräfte schonend an realitätsnahe Handlungssituation heranzuführen (Krofta & Nordmeier, 2014; Tschannen-Moran et al., 1998).

LLL bieten das Potenzial diese Bedingungen zu erfüllen, d. h. dass sie sowohl zur Förderung von Reflexionsfähigkeit bei den Studierenden beitragen

(Klempin & Sambanis, 2017, S. 4) als auch dem ‚Praxisschock‘ vorbeugen können (Dohrmann & Nordmeier, 2017, 2016; Krofta & Nordmeier, 2013).

3. Forschungsfragen und methodisches Vorgehen

Das LLL-Blockseminar „Schwimmen, Schweben, Sinken“ wird als Wahlpflichtveranstaltung im Bachelorstudiengang Lehramt Physik angeboten. Zur evidenzbasierten Hypothesenbildung für die Hauptstudie wurden in einer explorativen Vorstudie Gruppendiskussionen durchgeführt, die im Rahmen der Grounded Theory Methodologie ausgewertet wurden und das Ziel verfolgten, das Spektrum möglicher Forschungsschwerpunkte einzuzugrenzen.

Unter Hinzunahme der theoretischen Vorarbeit werden folgende Hypothesen im weiteren Verlauf näher betrachtet:

H₁: In einem ‚geschützten‘ LLL-Setting kommt es nicht zum ‚Praxisschock‘, sondern zu einer positiven Entwicklung der Selbstwirksamkeitserwartungen.

H₂: Die Teilnahme am LLL bewirkt eine Verbesserung der Einstellung gegenüber Reflexion bei den Teilnehmer*innen, eine verbesserte Reflektivität sowie Theorie-Praxis-Reflexion.

Für die Untersuchung der Konstruktentwicklung bietet sich ein quantitatives Vorgehen im Pre-Post-Design an. Um die so erhaltenen Ergebnisse auf Ursachen zurückführen zu können liegt ein qualitatives Vorgehen mit Interviewerhebungen nahe. Damit die Vorteile beider Forschungsparadigma in Verbindung gebracht werden können, wurde sich für ein Mixed-Methods-Design entschieden.

Im Zuge der qualitativen Erhebung wurden Leitfadenterviews direkt im Anschluss an den letzten Seminartag mit den Teilnehmer*innen durchgeführt (N=13) und induktiv (Reflexion) respektive deduktiv-skalierend (SWE) inhaltsanalytisch ausgewertet. Die Fragebogenerhebungen fanden direkt zu Beginn des ersten Seminartages sowie am Ende der letzten Sitzung statt.

Nachfolgend werden die erhobenen Konstrukte und die entsprechenden Skalen, inklusive der dazugehörigen Quellen, näher betrachtet. Alle Items konnten via 6-stufiger Likert-Skala beantwortet werden (1: „trifft nicht zu“; 6: „trifft voll zu“).

Theorie-Praxis-Reflexion (5 Items) spiegelt das Nachdenken über die Bedeutung von theoretischen Inhalten für praktisches Handeln wider. Die Skala entstammt einem Instrument zur Erfassung der Facetten von Service Learning an deutschen Hochschulen (Reinders, Hillesheim & Sebal, 2014) und wurde minimal adaptiert. Sie wurde in dieser Studie eingesetzt, um zu erfahren inwieweit die Proband*innen theoretische Kenntnisse zur Planung und Durchführung annehmen. (Bsp.-Item: „Die meisten Resultate von didaktischen Studien sind für die Praxis mehr oder weniger bedeutungslos.“)

Die Items zur *Reflektivität* (9 Items) wurden ebenfalls dem o.g. Instrument zur Untersuchung von Service Learning an Universitäten entnommen

(ebd.), gehen auf die theoretischen Vorarbeiten von Eyler, Giles & Astin (1999) zurück und erfassen eine mögliche Facette des Konstrukts Reflexion. Im Originalinstrument werden die Items zur Skala „Reflexionsfähigkeit“ zusammengefasst. Bis auf zwei wurden alle Items im ursprünglichen Wortlaut übernommen. (Bsp.-Item: „Ich denke viel über die Inhalte der Veranstaltungen nach.“)

Die insgesamt drei Skalen zur *Einstellung gegenüber Reflexion* (16 Items) wurden einem Instrument entnommen, das im Projekt ScRiPS zur Erhebung von Schülerrückmeldungen zum Unterricht sowie von Unterrichtsreflexion an der Universität Duisburg-Essen entwickelt wurde (Neuber & Göbel, 2016). Es erfasst Einstellungen von (angehenden) Lehrpersonen zu verschiedenen Facetten des Reflektierens von Unterricht (Einstellung gegenüber individueller/kollegialer/Unterrichts-Reflexion). (Bsp.-Item: „Für mich stellt der Austausch mit den Kommiliton*innen eine wichtige Informationsquelle für die Reflexion von Unterricht dar.“)

Im Fragebogen sind drei Skalen zu den SWE (25 Items) von (angehenden) Lehrkräften enthalten, die sich auf drei Bereiche beziehen: Planung, Durchführung und Reflexion von Lernsequenzen mit Schüler*innen. Diese wurden im DTS-Projektverbund Lehr-Lern-Labore neu entwickelt und erfolgreich pilotiert (Weusmann, Sorge, Priemer & Neumann, 2017). (Bsp.-Item: „Ich kann die Alltagsvorstellungen meiner Schüler*innen in die Planung einer Lernsequenz einbeziehen, auch wenn sie sehr vielfältig sind.“)

Die Daten wurden über mehrere Veranstaltungsdurchläufe und somit mehrere Semester hinweg in den Jahren 2017/2018 erhoben. Da sich die Intervention nicht änderte und aufgrund der Seminarstruktur (Block während der vorlesungsfreien Zeit) wurden die Daten summiert und anschließend ausgewertet. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Fragebogenkohorte.

Konstrukt	N	Alter	Sem.
• Einstellung gegenüber Reflexion	52 m=13 w=39	Ø 25 min=20 max=44 SD=5.16	Ø 4.9 min=3 max=7 SD=0.7
• Reflektivität			
• Theorie-Praxis-Reflexion			
• SWE	74 m=26 w=48	Ø 24.8 min=19 max=44 SD=4.85	Ø 5.25 min=3 max=16 SD=1.99

Tab. 1: Beschreibung der befragten Personen

Da sich der Fragebogen erst im Laufe der Erhebungen komplettierte, sind die Proband*innenzahlen für die jeweiligen Skalen uneinheitlich. Es wurden neben Studierenden aus dem Bachelorstudiengang Lehramt Physik ebenso Personen aus dem Bachelorstudiengang Grundschulpädagogik (Sachunterricht), die die LLL-Veranstaltung ebenfalls belegten, befragt.

4. Ergebnisse

Reflexion. Die Erhebung zu den Einstellungen gegenüber Reflexion ergab einen statistisch signifikanten Unterschied bei den Teilnehmer*innen zwischen Beginn und Ende des Praxisseminars, $t(50) = 3.76$; $p < .001$. Der Mittelwert zu Beginn des Seminars war 5.09 (SD = .54). Er hat bis zum Ende des Praxisseminars eine Zunahme auf 5.33 (SD = .49) gezeigt (siehe Abb. 1). Es ergibt sich ein Effekt von $d_{\text{Cohen}} = .49$ [CI:0.10;0.89]. Für die Subskalen lassen sich ähnliche Ergebnisse ermitteln. Alle zeigen signifikante Zuwächse im Seminarverlauf (individuelle**/kollegiale**/Relevanz von Unterrichtsreflexion**) bei mittleren Effektstärken um .4 (Cohen).

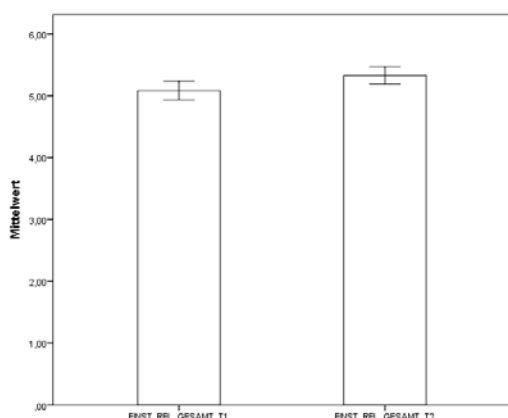


Abb. 1: Vergleich der Mittelwerte der Einstellung gegenüber Reflexion der Gesamtkohorte (N=52) zwischen Pre- (links) und Post-Erhebung (rechts)

Die Ergebnisse der Interviewstudie bestätigen einerseits die insgesamt sehr positive Einstellung gegenüber dem Reflektieren und legen darüber hinaus nahe, dass sich diese positiven Einstellungen im Seminarverlauf entweder verfestigen oder weiter verstärkt haben. Einen besonderen Mehrwert sehen die befragten Personen in der kollektiven Reflexion zusammen mit anderen Teilnehmer*innen des Seminars, denn sie trägt u. a. zum Abgleich von Selbst- und Fremdwahrnehmung, zur besseren Beurteilung der abgeschlossenen Handlung, zur gemeinsamen Generierung von Bewältigungsstrategien sowie zur professionsbezogenen Weiterentwicklung bei. Darüber hinaus hilft kollektives Reflektieren bei der Aufdeckung von ‚blinden Flecken‘ und professionsbezogenem Verbesserungsbedarf sowie bei der schlichten Rekapitulation der Handlung. Die meisten Seminarteilnehmer*innen halten deshalb Reflexionsprozesse für sinnvoll. Ein Teilnehmer beschreibt seine Einstellung gegenüber Reflexion vor dem Seminar und wie sich diese im Verlauf geändert hat: „Hm ja also da war ich davor eigentlich, ich muss mal zugeben über eine längere Zeit davor, fand ich immer das wäre ein bisschen so'n, das ist jetzt ein fränkischer Ausdruck, so ein Geschwafel, also 'ne Art, ja also die reden alle immer was positives, was negatives aber eigentlich würde das jetzt nicht viel aussagen. Reflexion, dass das nicht viel bewirken würde, sondern halt ähm eher ein allgemeines Ge-

rede wäre, was sich aber sehr stark verändert hat, das Bild, was man hat.“

Die Erhebung zur Theorie-Praxis-Reflexion liefert keinen statistisch signifikanten Unterschied für die Teilnehmer*innen zwischen Beginn und Ende des Praxisseminars, $t(49) = 1.83$; $p = .074$. Der Mittelwert der zu Beginn des Seminars lag bei 4.34 (SD = .98) und zeigte eine Zunahme auf 4.51 (SD = 1.08) bis zum Ende der Lehrveranstaltung (siehe Abb. 2).

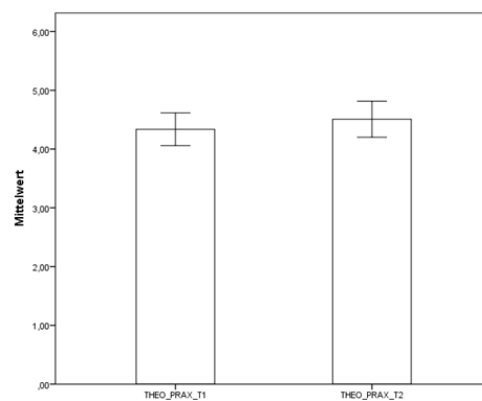


Abb. 2: Vergleich der Mittelwerte der Skala Theorie-Praxis-Reflexion zwischen Pre- (links) und Post-Erhebung (rechts)

In Bezug auf die Reflektiertheit der Teilnehmer*innen ergab die Erhebung einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen Beginn und Ende des Praxisseminars, $t(51) = 2.36$; $p = .022$ (siehe Abb. 3). Der Mittelwert lag zu Beginn des Seminars bei 4.37 (SD = .75) und nahm zu auf 4.55 (SD = .81) bis zum Ende der Lehrveranstaltung, bei einem mittleren Effekt von $d = .46$ [CI:0.07;0.85].

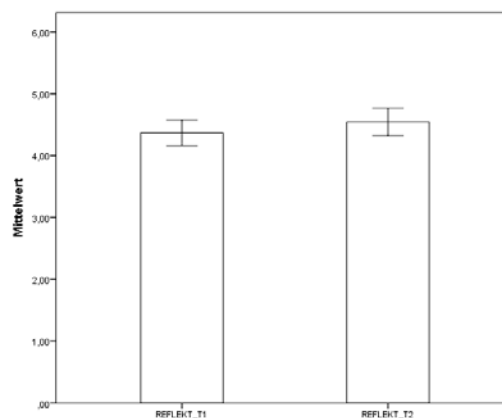


Abb. 3: Vergleich der Mittelwerte der Skala Reflektiertheit zwischen Pre- (links) und Post-Erhebung (rechts)

Die Skalen zur Messung der Einstellungen gegenüber Reflexion, der Theorie-Praxis-Reflexion sowie der Reflektiertheit zeigen kleine Effekte im Pre-Post-Vergleich. Die qualitative Erhebung stützt diese Ergebnisse. Die Studierenden erkennen die Wichtigkeit von Reflexion für die eigene professionsbezogene Entwicklung. Einer der Befragten fasst dies folgendermaßen zusammen: „Das ist der einzige Weg eigentlich um äh um ein guter Lehrer auch zu sein, tatsächlich ja.“

Selbstwirksamkeitserwartungen. Die Erhebung ergab einen statistisch signifikanten Unterschied für die SWE der Teilnehmer*innen zwischen Beginn und Ende des Praxisseminars, $t(69) = 6.14, p < .001$. Der Mittelwert der SWE zu Beginn des Seminars war 4.09 (SD = .59) und zeigte eine Zunahme auf 4.47 (SD = .57) bis zum Ende der Lehrveranstaltung bei einer Effektstärke von $d = .72$.

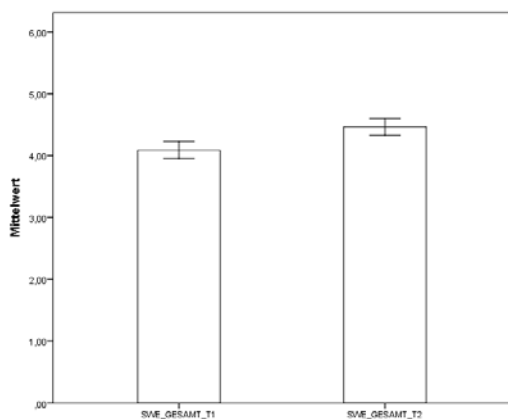


Abb. 4: Vergleich der SWE-Mittelwerte der Gesamtkohorte zwischen Pre- (links) und Post-Erhebung (rechts)

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse für die Subskalen dargestellt. Insbesondere bei den SWE in Bezug auf die Planung von Unterricht können mittlere bis große Effekte erzielt werden, wohingegen sich die Subskalen der SWE zur Durchführung und Reflexion von Unterricht mit kleinen bis mittleren Effekten entwickeln.

Skala/ Subskala	ΔAM	SD	T	df	Sig	d
SWE (gesamt)	.38	.51	6.14	69	< .001	0.72
SWE (Planung)	.57	.72	6.79	73	< .001	0.78
SWE (Durchführung)	.26	.62	3.56	71	< .001	0.42
SWE (Reflexion)	.27	.49	4.66	71	< .001	0.53

Tab. 2: Messwerte der Subskalen zur Erhebung von Selbstwirksamkeitserwartungen

Die in der Interviewstudie erhobenen Daten stützen, die o. g. Ergebnisse. Durch eine deduktivskalierende, qualitative Inhaltsanalyse konnten die Aussagen der befragten Personen kategorisiert werden. Dabei wurden die Antworten entsprechend der Kategorien (Abnahme der SWE, keine Veränderung der SWE, Zunahme der SWE) von zwei unabhängigen Kodierer*innen bewertet. Die Werte der Inter-coder-Übereinstimmung sind dabei akzeptabel (Cohens $\kappa = .65$; Krippendorffs $\alpha = .72$). Abbildung 5 zeigt die Verteilung der bewerteten Aussagen. Daraus geht hervor, dass die Teilnehmer*innen durch das Seminar in ihren Selbstwirksamkeitserwartungen gestärkt wurden.

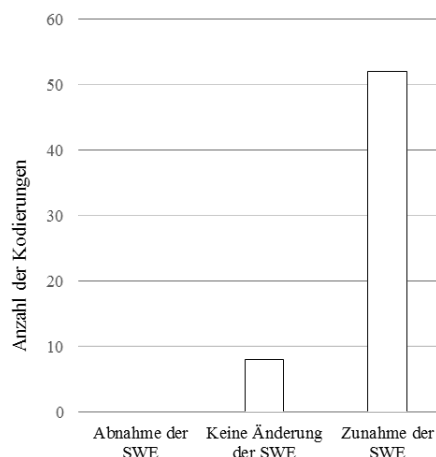


Abb. 5: Verteilung der Kodierungen in Bezug auf die Entwicklung von SWE

Es wurden 52 Passagen der Kategorie „Zunahme der SWE“ zugeordnet und 8 Passagen mit „keine Änderung der SWE“ kodiert. Kein einziger Abschnitt wurde der Kategorie „Abnahme der SWE“ zugeordnet. Zusätzlich sei erwähnt, dass sich die mit „keine Änderung der SWE“ kodierten Passagen auf alle erhobenen Fälle verteilen und bei keiner interviewten Person überwiegen. Somit ist ein eindeutiger Trend in Richtung der Zunahme der SWE insgesamt und auch konkret bei allen Proband*innen feststellbar. Dies schlägt sich auch in den konkreten Aussagen der interviewten Personen nieder, denen u. a. gemein ist, dass sich die Proband*innen durch das Seminar ‚sicherer‘ in Bezug auf das Unterrichten fühlen: [...] *ich muss ganz ehrlich sagen, ich war [vor dem Seminar, Anm. d. V.] sehr unsicher. Also ich würde mich beurteilen, dass ich in der Lage bin zu überlegen, was sollten die Schüler lernen, dass ich weiß, okay, das muss gesagt werden, das muss auch gemacht werden. Aber was die einzelnen Schritte dazu sind, das war mir im Vorfeld nicht so klar, wie man es am besten macht. Und erst durch das Seminar hab ich gelernt, okay man muss wirklich viele einzelne Aspekte beachten. Dass man wirklich sagt, okay erst kommt das und bevor sie das, was man vielleicht sagen will, lernen, müssen sie vielleicht ein anderes Vorwissen noch haben. Weil Auftrieb kann man [...] ja vorher nicht unbedingt verstehen, wenn man nicht vorher weiß, was Kräfte sind, also um mal ein Beispiel zu nennen. Dass ich weiß okay man muss wirklich einzelne kleine Schritte nehmen und am Anfang war ich mir halt etwas unsicher und aber durch das Seminar - ich hab auch ein bisschen Sicherheit durch das Seminar gelernt.*“ Es lässt sich also festhalten, dass es nicht nur nicht zur Abnahme, und somit nicht zum ‚Praxischock‘, sondern sogar zu einer leichten Zunahme der SWE der Teilnehmer*innen im Seminarverlauf kommt, sodass die Überzeugungen von der eigenen Fähigkeit, schwierige Anforderungssituationen erfolgreich bewältigen zu können leicht zunimmt.

5. Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

Die Ergebnisse der hier vorgestellten Teilstudien zeigen, dass im Rahmen eines relativ kurzen, aber dafür intensiven Lehr-Lern-Labor-Blockseminars die untersuchten Konstrukte (bis auf die Theorie-Praxis-Reflexion) signifikante Zuwächse über den Seminarverlauf mit moderaten bis mittleren Effektstärken aufwiesen.

Es kann festgehalten werden, dass das LLL die Einstellungen der Teilnehmer*innen gegenüber Reflexion positiv zu beeinflussen scheint. Dies ist wahrscheinlich auf die kollektive Reflexion zurückzuführen, in der ein Mehrwert gegenüber der Selbstreflexion gesehen wird. Denn dadurch werden nicht nur ‚blinde Flecken‘ in der eigenen Handlung aufgedeckt und Verbesserungsbedarf diagnostiziert, sondern ebenso über eine Diskussion der tatsächlichen Handlung, in Kontrast mit Handlungsalternativen, die durch die Reflexionsteilnehmer*innen eingebracht werden, Strategien zum Umgang mit möglichen Problemen entwickelt und damit nicht nur Lernen angeregt, sondern vor allem ein Ausgangspunkt für die professionsbezogene Weiterentwicklung geschaffen. Besonders erfreulich im Sinne des Professionalisierungsgedankens sind die bereits hohen Werte im Pre-Test. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass die Studierenden den Wert des Reflektierens für die eigene Weiterentwicklung erkennen. Aufgrund der Kürze der Intervention ist der (geringe) Zuwachs erwartungskonform.

Die Wirksamkeit einer solchen Veranstaltung darf aber nicht überschätzt werden. In einer parallel durchgeführten Studie (im selben LLL) zur Reflexionstiefe (als Teildimension von Reflexionskompetenz) konnte beispielsweise keine signifikante Änderung über den Seminarverlauf festgestellt werden (Meißner, in Vorbereitung).

Eine wichtige Annahme über die Praxis im Lehr-Lern-Labor konnte durch die Daten gestützt werden, denn aufgrund der Komplexitätsreduktion bleibt den Studierenden ein ‚Praxisschock‘ erspart (vgl. Krofta & Nordmeier, 2014; Tschannen-Moran et al., 1998). Erhebungen an anderen Projektstandorten konnten ähnliche Ergebnisse erzielen (vgl. Weiß, Priemer, Sorge & Neumann, 2018). In einer Mixed-Methods-Untersuchung konnten auch Krofta und Nordmeier (2014) über den LLL-Seminarverlauf konstant bleibende Selbstwirksamkeitserwartungen bei den Teilnehmer*innen ermitteln, trotz deren Konfrontation mit unterrichtsähnlichen Situationen. Im qualitativen Teil der Arbeit zeigte sich sogar eine leicht positive Tendenz bei den SWE der angehenden Physiklehrkräfte (ebd.).

Dass die Selbstwirksamkeitserwartungen insbesondere in Bezug auf die Planung von Unterricht hohe Effekte aufweisen, ist nicht verwunderlich, da der Großteil der Teilnehmer*innen im Seminar zum ersten Mal überhaupt Unterricht plant.

Zur weiteren Kontrolle möglicher Störvariablen wären einige Anpassungen im Design weiterführender Studien willkommen. So ist die Erhebung der Vorerfahrung im Unterrichten bzw. im Umgang mit

Schüler*innen möglicherweise ein Prädiktor für die Entwicklung der SWE während des Seminarverlaufs. Darüber hinaus wäre ein Kontrollgruppensign wünschenswert, um Einflüsse außerhalb der Intervention aufdecken zu können. Da es sich bei den erhobenen Skalen um Selbsteinschätzungen handelt, wäre ein objektives Vergleichsmaß sinnvoll. (Es wird davon ausgegangen, dass Selbsteinschätzungen eine geeignete Methode zum Erfassen des Kompetenzzuwachses durch universitäre Lehrveranstaltungen sind; vgl. z. B. Braun & Hannover, 2008). Die hier vorgestellten Ergebnisse stärken daher die Annahme, dass Lehr-Lern-Labor-Veranstaltungen das Potenzial besitzen positive Einstellungen von Studierenden gegenüber Reflexionsprozessen zu konsolidieren bzw. noch weiter auszubauen. Dies geschieht aufgrund von kollektiver Reflexion über realitätsnahe, selbst erlebte Praxis, ohne dass es dabei zum ‚Praxisschock‘ bei den Seminarteilnehmer*innen kommt.

6. Literaturverzeichnis

- Appell, Kristina; Roth, Jürgen; Weigand, Hans-Georg (2008): Experimentieren, Mathematisieren, Simulieren – Konzeption eines MATHEMATIK-Labors. In: Gesellschaft für Didaktik der Mathematik (Hg.): Beiträge zum Mathematikunterricht. Hildesheim: Franzbecker, S. 1–4.
- Braun, Edith; Hannover, Bettina (2008): Kompetenzmessung und Evaluation von Studienerfolg. In: Nina Jude, Johannes Hartig und Eckhard Klieme (Hg.): Kompetenzerfassung in pädagogischen Handlungsfeldern. Theorien, Konzepte und Methoden. Bonn (Bildungsforschung; 26), S. 153–160.
- Dicke, Theresa; Holzberger, Doris; Kunina-Habenicht, Olga; Linninger, Christina; Schulze-Stocker, Franziska; Seidel, Tina et al. (2016): „Doppelter Praxisschock“ auf dem Weg ins Lehramt? Verlauf und potenzielle Einflussfaktoren emotionaler Erschöpfung während des Vorbereitungsdienstes und nach dem Berufseintritt. In: *Psychologie in Erziehung und Unterricht* 63 (4), S. 244–257.
- Dohrmann, René; Nordmeier, Volkhard (2017): Lehr-Lern-Labor und Professionalisierung im Lehramtsstudium Physik. In: Christian Maurer (Hg.): Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis. Jahrestagung 2016. Zürich. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Universität Regensburg, S. 560–563.
- Dohrmann, René; Nordmeier, Volkhard (2016): Professionalisierung im Lehr-Lern-Labor Physik. In: Christian Maurer (Hg.): Authentizität und Lernen - das Fach in der Fachdidaktik. Jahrestagung 2015. Berlin. Gesellschaft für Didaktik der

- Chemie und Physik. Universität Regensburg, S. 581–583.
- Dohrmann, René; Nordmeier, Volkhard (2015): Schülerlabore als Lehr-Lern-Labore (LLL): Ein Projekt zur forschungsorientierten Verknüpfung von Theorie und Praxis in der MINT-Lehrerbildung. Förderung von Professionswissen, professioneller Unterrichtswahrnehmung und Reflexionskompetenz im LLL Physik. In: Volkhard Nordmeier und Helmuth Grötzebauch (Hg.): *PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, Frühjahrstagung*. Wuppertal. DPG. Berlin, S. 1–7.
- Eyler, Janet; Giles Jr. Dwight E.; Astin, Alexander W. (1999): *Where's the learning in service-learning?* San Francisco: John Wiley And Sons.
- Fandrich, Jörg; Nordmeier, Volkhard (2008): Ausbildung von Lehramtsstudierenden am Schülerlabor 'PhysLab'. In: DPG (Hg.): *Tagungsband, Frühjahrstagung*. Berlin. DPG. Berlin, S. 1–2.
- Harring, Marius; Feldhoff, Tobias; Gabriel-Busse, Katrin; Peitz, Julia; Baston, Nadine; Großmlynek, Lena; Graf, Tanja (2018, in Vorbereitung): Lehr - Lern-Labore: Der Transfer zwischen MINT- und geistes- sowie sozialwissenschaftlichen Fächern. In: Bresges, A./Harring, M./Kauertz, A./Nordmeier, V./Parchmann, I. (2018, in Vorbereitung) (Hrsg.): *Qualitätsverbesserung des Praxisbezugs in der Lehrerbildung. Beiträge der »Qualitätsoffensive Lehrerbildung« für Forschung und Praxis (Band 2)*. Bielefeld: W. Bertelsmann.
- Hascher, Tina (2011): Vom "Mythos Praktikum". ...und der Gefahr verpasster Lerngelegenheiten. In: *Journal für Lehrerinnen- und Lehrerbildung* (3), S. 8–14.
- Heppekausen, Jutta (2013): Beobachtung, Selbstbeobachtung und Reflexion in der Lernbegleitung. In: Hendrik Coelen und Barbara Müller-Naendrup (Hg.): *Studieren in Lernwerkstätten. Potentiale und Herausforderungen für die Lehrerbildung*. Wiesbaden: Springer VS (Springer-Link : Bücher), S. 109–126.
- Klempin, Christiane; Sambanis, Michaela (2017): Die Förderung didaktischer Reflexionstiefe von Englischlehramtsstudierenden im Lehr-Lern-Labor Englisch. Berlin. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/318014900_Klempin_Christiane_Sambanis_Michaela_2017_Die_Forderung_didaktischer_Reflexionstiefe_von_Englischlehramtsstudierenden_im_Lehr-Lern-Labor_Englisch, zu-letzt geprüft am 23.10.2017.
- Kosinár, Julia (2010): Belastungserleben im Referendariat: Verbesserter Umgang mit Anforderungen durch Entwicklung überfachlicher Kompetenzen? In: *Schulpädagogik heute* 1 (2), S. 1–15.
- Krapp, Andreas (1998): Entwicklung und Förderung von Interesse im Unterricht. In: *Psychologie in Erziehung und Unterricht* 44, S. 185–201.
- Krofta, Helen; Nordmeier, Volkhard (2014): Bewirken Praxisseminare im Lehr-Lern-Labor Änderungen der Lehrerselbstwirksamkeitserwartung bei Studierenden? In: Volkhard Nordmeier und Helmuth Grötzebauch (Hg.): *PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG Frühjahrstagung, Frühjahrstagung*. Frankfurt. DPG. Berlin, S. 1–12.
- Kultusministerkonferenz der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (KMK) (2004): Standards für die Lehrerausbildung: Bildungswissenschaften. Online verfügbar unter http://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Standards-Lehrerbildung.pdf, zuletzt geprüft am 09.12.2014.
- Meißner, Christine (in Vorbereitung): Die Entwicklung der Reflexionstiefe im Lehr-Lern-Labor "Schwimmen, Schweben, Sinken". Masterarbeit. Freie Universität Berlin.
- Merzyn, G. (2006): Fachdidaktik im Lehramtsstudium: Qualität und Quantität. In: *MNU* 59 (1), 2006, S. 4-7.
- Messner, Helmut (1999): Berufseinführung - ein neues Element der Ausbildung von Lehrerinnen und Lehrern. In: *Beiträge zur Lehrerbildung* 17 (1), S. 62–70.
- Münzinger, Wolfgang (2001): Lehr-Lern-Labor. Ein Projekt zur Neuorganisation der Lehrerfortbildung im mathematisch-naturwissenschaftlichen Bereich. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik* 12 (3/4), S. 72–73.
- Neuber, Katharina; Göbel, Kerstin (2016): Schüler-rückmeldungen zum Unterricht und Unterrichts-reflexion. Dokumentation der entwickelten Erhebungsinstrumente im Projekt „Schülerrück-meldungen zum Unterricht und ihr Beitrag zur Unterrichtsreflexion im Praxissemester (ScRiPS)“ - Erste Skalenanalysen -. Hg. v. Universität Duisburg Essen. Online verfügbar unter <http://duepublico.uni-duisburg-essen.de/servlets/DocumentServlet?id=42993>, zuletzt geprüft am 23.10.2017.
- Niggli, Alois (2002): Welche Komponenten reflexiver beruflicher Entwicklung interessieren angehende Lehrerinnen und Lehrer? Faktorenstruktur eines Fragebogens und erste empirische Ergeb-

- nisse. In: *Revue suisse des sciences de l'éducation* 26 (2), S. 343–364.
- Priemer, Burkhard; Roth, Jürgen (Hrsg.) (im Druck): Lehr-Lern-Labore. Innovationsmotor in der MINT-Lehrpersonenbildung. Springer. Heidelberg, Berlin.
- Rabe, Thorid; Krey, Olaf; Meinhardt, Claudia (2013): Physikdidaktische Selbstwirksamkeitserwartungen zukünftiger Physiklehrkräfte I. In: Sascha Bernholt (Hg.): *Inquiry-based Learning - Forschendes Lernen*. Jahrestagung in Hannover 2012. Kiel: IPN (Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, 33), S. 635–637.
- Reinders, Heinz; Hillesheim, Stefanie; Sebald, Julia (2015): *Service Learning an Universitäten*. Skaldokumentation des Längsschnitts 2012 - 2014. Würzburg: Univ., Lehrstuhl Empirische Bildungsforschung (Schriftenreihe Empirische Bildungsforschung, 32).
- Schneider, Edith (2004): Professionalität von Lehrerinnen und Lehrern. In: *ZDM* 36 (1), S. 1–2.
- Steffensky, Mirjam; Parchmann, Ilka (2007): The project CHEMOL: Science education for children - Teacher education for students! In: *Chemistry Education Research and Practice* 8 (2), S. 120–129.
- Tschannen-Moran, Megan; Woolfolk Hoy, Anita; Hoy, Wayne K. (1998): Teacher Efficacy: It's Meaning and Measure. In: *Review of Educational Research* 68 (2), S. 202–248.
- Weinberger, Alfred (2013): Einleitung. In: Alfred Weinberger (Hg.): *Reflexion im pädagogischen Kontext*. Forschungsberichte der Privaten Pädagogischen Hochschule der Diözese Linz. Wien, Berlin, Münster: LIT (Austria: Forschung und Wissenschaft: Erziehungswissenschaft, 19), S. 7–8.
- Weß, Raphael, Priemer, Burkhard, Weusmann, Birgit, Sorge, Stefan & Neumann, Irene (2018). Veränderung von Lehr-bezogenen SWE im MINT-Lehramtsstudium. In: C. Maurer (Hrsg.), *Qualitätsvoller Chemie- und Physikunterricht - normative und empirische Dimensionen*. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Regensburg 2017. S. 540.
- Weusmann, Birgit, Sorge, Stefan, Priemer, Burkhard & Neumann, Irene (2017). Lehr-Lern-Labore in der MINT-Lehrerbildung – Veränderungen im Kompetenzerleben?. In: C. Maurer (Hrsg.), *Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis*. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Zürich 2016. S. 548.
- Weyland, Ulrike (2014): *Schulische Praxisphasen im Studium: Professionalisierende oder deprofessionalisierende Wirkung*. Fachhochschule Bielefeld (bwp@ Beruf- und Wirtschaftspädagogik - online, Profil 3). Online verfügbar unter http://www.bwpat.de/profil3/weyland_profil3.pdf, zuletzt geprüft am 04.09.2017.

Videoclips als Musterlösungsformat

Korrelation zwischen Klausurergebnis und Nutzungsgrad

Dominik Giel

* Hochschule Offenburg, Badstraße 24, 77652 Offenburg
Dominik.Giel@hs-offenburg.de

Kurzfassung

Freiwillige Fachtutorien erreichen aus unterschiedlichen Gründen nicht alle Studierenden. Allein der subjektive Eindruck, dass zu wenige Ressourcen seitens der Hochschule (Übungsräume, studentische Tutoren, lückenlose Stundenplanpassung) oder der Studierenden (Zeit, Motivation) zur Verfügung stünden, führt zu Absenzen bei freiwilligen Präsenztutorien. Um die empfundenen und realen Begrenzungen dieser Veranstaltungen zu verringern, wurden für den Studiengang Maschinenbau die Musterlösungen der Übungsaufgaben Physik und Mathematik in Form von Videoclips erstellt und über die Lernplattform Moodle für alle Studierende des Semesters bereitgestellt. Die Clips beziehen sich jeweils auf eine Teilaufgabe und besitzen die Länge eines typischen Youtube-Tutorials. In etwa 5 Minuten bieten sie dem Zuschauer einen Lösungsweg zu den jeweiligen Übungsaufgaben. Die Studierenden können die Clips alternativ oder ergänzend zur Präsenzveranstaltung nutzen. Bei der Erstellung der Clips wurde auf den Einsatz von Spezialeffekten wie Animationen etc. zugunsten einer effizienten Produktion verzichtet, so dass eine einzelne Lehrperson pro Stunde etwa 10 bis 20 Minuten Videoclips aufzeichnen kann. Die Auswertung der Zugriffszahlen auf die Clip-Dateien ermöglicht eine aufgabengenaue Ermittlung der aktiven Nutzer. Im Betrag wird eine vorläufige Auswertung der Teilnehmerzahl und der Korrelation zwischen Klausurergebnis und Nutzungsgrad präsentiert.

1. Ausgangssituation

Das Studium der Ingenieurwissenschaften an der Hochschule Offenburg umfasst die Vorlesung Physik mit zwei Semesterwochenstunden Vorlesung zuzüglich einem Präsenztutorium im Umfang von zwei Semesterwochenstunden. Das Präsenztutorium, das von zwei bis drei studentischen Tutoren höherer Semester geleitet wird, dient dazu, die Studienanfänger durch das Lösen von Übungsaufgaben zu einer selbständigen Erarbeitung des Vorlesungsstoffes anzuleiten. Es soll gerade Studienanfängern mit geringen Physikvorkenntnissen die Möglichkeit geben, ihre Defizite gegenüber den durchschnittlichen Studierenden zu reduzieren. Trotzdem stellt die Physik für viele Studienanfänger eine Hürde der Studieneingangsphase dar. Die Teilnahme an den Präsenzveranstaltungen ist nach der Studien- und Prüfungsordnung nicht verpflichtend, wird aber im Hinblick auf die erfolgreiche Klausurvorbereitung stark empfohlen. Verfolgt man die Teilnehmerzahlen der Präsenztutorien, ergibt sich eine maximale Teilnehmerzahl zum ersten Termin, gefolgt von einer Stabilisierung der Teilnehmerzahl mit konstanter oder sehr leicht fallender Teilnehmerquote. Eine Vorhersage des Stagnationsniveaus scheint auch von der jeweiligen Stundenplangestaltung abzuhängen. In den Wochen vor der Prüfungsphase steigt das Interesse der Studienanfänger am Angebot der Präsenztutorien wieder. Auch bei der Evaluation des freiwilligen studienvorbereitenden Physik-Brückenkurses ergibt sich ein ähnliches Teilnehmerverhalten. In den Evaluationen des Brückenkurses äußern viele Studienanfänger den Wunsch nach

selbstständigem Üben [1]. Im Rahmen des Projektes „Qualitätspakt Lehre“ untersuchte die Hochschule daher potentielle Maßnahmen, die das Präsenztutorium ergänzen oder verbessern können, indem die Teilnahmequote relativ zu den Präsenzveranstaltungen erhöht wird. In diesem Beitrag wird dazu der Einsatz von Videoclips als Musterlösungsformat untersucht, die die Studierenden selbständig zur Lösung von Übungsaufgaben einsetzen können.

2. Konzept der Musterlösungs-Videoclips

2.1. Ziele

Zur Unterstützung der Lehre werden seit über 10 Jahren mobile Geräte [2], [3] eingesetzt. Anfänglich überwogen technische Fragen der Umsetzung, mittlerweile ist durch die nahezu vollständige Ausstattung der Studierenden mit multimediafähigen Geräten und der umfassenden Verbreitung von Internetangeboten wie z.B. Youtube das Interesse auf die Aufbereitung der Lehrinhalte übergegangen. Den Studienanfängern ist das Lernen durch Videoclips, sogenannten „Tutorials“ außerhalb des schulischen Kontextes vertraut und selbstverständlich. Das Angebot an „Tutorials“ deckt das gesamte Spektrum, angefangen von Reparaturanleitungen technischer Geräte, Kosmetikempfehlungen, Freizeittipps bis hin zum Klavierunterricht ab und erreicht selbst kleinste Interessengruppen. Die damit einhergehende Flexibilisierung des Lernortes prägt das Lernverhalten der aktuellen Studierendengeneration. Lässt sich die Flexibilisierung des Lernortes auch für die Inhalte der Phy-

sik-Vorlesung nutzen? Besteht eine Korrelation zwischen Nutzungsintensität und dem Klausurergebnis? Diese Fragestellungen wurden anhand eines Kurses der Physik-1-Vorlesung für den Bachelor-Studiengang Maschinenbau untersucht.

2.2 Umsetzung

Alle Studierenden im Bachelor-Studiengang Maschinenbau erhalten im Rahmen der Vorlesung „Physik 1“ insgesamt 11 Blätter mit Übungsaufgaben, die sie selbständig lösen sollen. Im Rahmen des Präsenztutoriums werden die Lösungen vorgestellt und auf Wunsch durch studentische Tutoren korrigiert. Von den 55 Klausurteilnehmern nutzen die überwiegende Mehrzahl (49) das Lernmanagementsystem Moodle (LMS), der die Anzahl der Zugriffe auf die zur Verfügung gestellten Dateien –Aufgaben und Musterlösungen– protokolliert, wobei anhand der Zugriffsdaten keine Aussage über die Qualität der Vorbereitung getroffen werden kann.

Die Musterlösungen wurden als kurze Video-Clips aufgezeichnet. Sie bieten für jede Aufgabe eine Schritt-für-Schritt Lösung im Video, wie sie auch der Tutor im Präsenztutorium anschreiben würde. In der Tonspur werden die Lösungsschritte kommentiert. Die Clips dauern maximal 10 Minuten und beziehen sich –falls notwendig– auf einen Teilaufgabe, die innerhalb dieses Zeitrahmens dargestellt werden kann. Bei der Erstellung der Clips wurde auf den Einsatz von Spezialeffekten wie Animationen etc. zugunsten einer effizienten Produktion verzichtet, so dass eine einzelne Lehrperson pro Stunde etwa 10 bis 20 Minuten Videoclips aufzeichnen kann. Insgesamt wurden 3:35 h Musterlösungen in 43 Dateien aufgezeichnet (längster Clip: 640 s, kürzester Clip 44 s), und den Studierenden ergänzend zum Präsenztutorium zur Verfügung gestellt. Auch die Zugriffszeiten auf die der Musterlösungsclips wurden vom LMS protokolliert.

3. Erfahrungen

Von den 55 Teilnehmern an der Physik-1 Klausur des Wintersemesters 2017/18 nutzten 49 die Einschreibung im Moodle-Kurs zur Klausurvorbereitung, 6 Teilnehmer (ausnahmslos Wiederholer) bereiteten sich ohne LMS-Einschreibung auf die Klausur vor. Die eingeschriebenen Teilnehmer luden im Mittel $5,5 \pm 2,8$ der 11 verfügbaren Aufgabenblätter herunter, wobei das Herunterladen nur ein Indiz für die Beschäftigung bietet.

Das LMS protokolliert ebenso die Anzahl der Zugriffe auf die Videoclip-Musterlösungen der Übungsblätter, so dass der Nutzungsgrad für durch eine Ganzzahl zwischen 0 (keine Nutzung) und 11 (vollständige Nutzung) beschrieben wird. Der mittlere Nutzungsgrad unterlag einer starken Streuung mit einer Nutzung von durchschnittlich 3 ± 3 Videoclips. Auch hier lässt sich aus einem Zugriff nicht auf die Intensität der Nutzung schließen- allerdings kann man

davon ausgehen, dass jemand die Clips nicht genutzt hat, wenn kein Zugriff auf die Inhalte vorliegt.

Die Korrelation zwischen dem Nutzungsgrad der Videoclips und dem Klausurergebnis ist in Abb. 1 dargestellt.

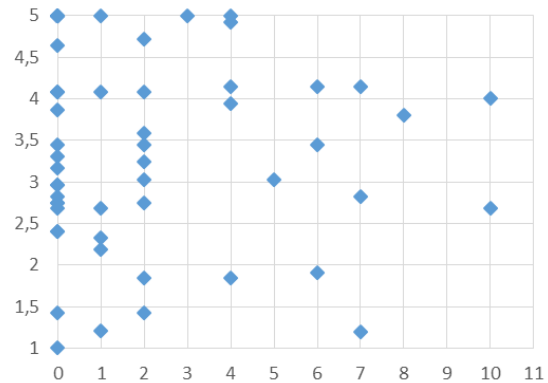


Abb.1: Zusammenhang zwischen Nutzungsgrad (Ganzzahl zwischen 0 und 12, Abszisse) und Klausurergebnis (zwischen 1,0 und 5,0, Ordinate) für den Kurs Physik-1 des Wintersemesters

Ers ergibt sich kein klarer Zusammenhang zwischen der Nutzungsgrad der Video-Clips und dem Abschneiden bei der Klausur. Offensichtlich garantiert das Anschauen der Video-Clips alleine noch keine außergewöhnlichen Erfolge bei der Abschlussklausur. Allerdings kann auch aus einer deutlichen Korrelation zwischen Klausurerfolg und Nutzung der Videos nicht ableiten, dass ein kausaler Zusammenhang besteht, da die Videos von vorneherein nur von bestimmten (z.B. besonders leistungsstarken oder schwachen) Studierenden genutzt werden. Aus der Perspektive der Studierenden ist allerdings bemerkenswert, dass kein Kandidat, der mehr als die Hälfte der Lösungsvideos aufgerufen hat, eine Note unter 4,0 (ausreichend) erreicht hat: Das Nichtanschauen von mehr als sechs Video-Clips scheint die Wahrscheinlichkeit für ein Durchfallen erheblich zu vergrößern. Nach den erhobenen Daten steigt mit dem Nichtanschauen von acht Video-Clips allerdings auch die Wahrscheinlichkeit, mit „sehr gut“ abzuschneiden, da einige Studierende die Klausur auch mit sehr wenigen Video-Clip-Aufrufen ein sehr gutes Klausurergebnis erreicht haben- eine Interpretation der Daten im Sinne einer Kausalität ist in jedem Fall mit Vorsicht zu genießen.

Eine Aussage über die angestrebte Flexibilisierung des Lernortes ist aus den LMS-Daten direkt nicht abzulesen. Allerdings lässt der Zeitpunkt des Zugriffes gewisse Rückschlüsse zu. Hierzu wurde der Zeitpunkt des Zugriffs auf die elektronischen Übungsblätter und Musterlösungen ausgewertet und neben den 49 Klausurteilnehmern auch die Zugriffe von Nutzern anderer Kurse ausgewertet, die die gleichen Übungsblätter bearbeiten. Von den insgesamt 140 eingeschriebenen Teilnehmern aller Physik-Parallelkursen wurden insgesamt 1183 Zugriffe protokolliert.

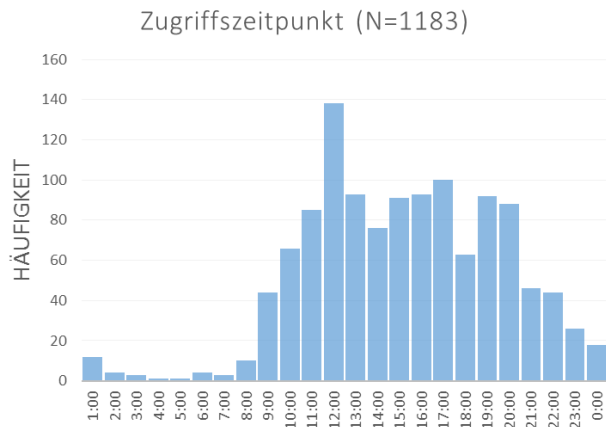


Abb.2: Häufigkeiten des Zugriffszeitpunktes auf die elektronischen Kursdateien (1183 Zugriffe von 140 eingeschriebenen Studierenden, davon 49 Klausurteilnehmer)

Wenig überraschend wird in der Zeit zwischen 0:00 Uhr und 6:00 Uhr kaum auf die Dateien zugegriffen. Das absolute Maximum der Zugriffe fällt auf die Zeit zwischen 12:00 Uhr und 13:00 Uhr- in dieser Zeit lag das wöchentliche Präsenztutorium, was einen Hinweis darauf liefert, dass elektronische Übungsaufgaben und Lösungsclips häufig während des Präsenztutorium heruntergeladen werden. Ansonsten legt die breite Nachmittags-Verteilung der Zugriffszeitpunkte nahe, dass die angebotenen Hilfen durchaus flexibel eingesetzt wurden.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Aus der dargestellten Analyse der Zugriffszahlen und der Korrelation zwischen Nutzungsgrad und Erfolg in der Abschlussklausur lässt sich keine eindeutige Aussage darüber machen, ob und mit welcher Wirkung eine zu vermutende Flexibilisierung von Lernort und Lernzeitpunkt zu einer Änderung des Lernprozesses führt. In den Freitext-Kommentaren der entsprechenden Vorlesungs-Evaluation wird auf das Angebot der Videoclips-Musterlösungen kaum eingegangen, die entsprechenden Kommentare sind deutlich seltener als Kritik an der Qualität der Sitzgelegenheiten oder den Einsatz von Mobiltelefonen zur vorlesungsbegleitenden Zuschauer-Abstimmungen. Die Nutzung der Clips scheint unabhängig vom Leistungsniveau der Studierenden zu erfolgen. Eine wesentlich aussagekräftigere Art der Auswertung ist möglich, wenn der Zugriff auf die Videoclips an bestimmte Bedingungen gekoppelt wird, z.B. das Beantworten von Verständnisfragen, so dass auf den Kenntnisstand der Nutzer geschlossen werden könnte. Der Zugriff auf die Videoclips kann so als leichte Belohnung neben der Notenvergabe eingesetzt werden und bietet einen Ansatzpunkt für eine Aktivierung der Studierenden.

Die Untersuchungen wurden durchgeführt im Rahmen der Förderung des „Qualitätspakts Lehre“ des Bundesministeriums für Forschung und Bildung (FKZ 01PL16016).

5. Literatur

- [1] Decker, E.; Meier, B. (2014). Mathe-App als Aktivierungsunterstützung beim Studienstart. Werkstattbericht. In Herold Dehling, Katherine Roegner, Marco Winzker (Eds), ZFHE Jg.9/Nr.4 (November 2014), Sonderheft Transfer von Studienreformprojekten für die Mathematik in der Ingenieurausbildung, S. 57-71. Graz.
- [2] Mitic, J.; Feißt, M.; Christ, A. (5.-6. Juli 2004): mLab: Handheld Assisted Laboratory. MLEARN 2004, Rome, Italy
- [3] Curticapean, D.; Christ, A.; Feißt, M.: Possibilities and perspectives of mobile learning in optics and photonics.

Die Geometrische Algebra mit GAALOP im Schnelldurchgang

Martin Erik Horn

HWR – Hochschule für Wirtschaft und Recht Berlin / Berlin School of Economics and Law
FB 1 – Wirtschaftswissenschaften, Facheinheit Quantitative Methoden
Badensche Str. 52 (Fach Nr. 63), D – 10825 Berlin
e_hornm@doz.hwr-berlin.de & mail@martinerikhorn.de

Kurzfassung

Die Geometrische Algebra ist eine mathematische Sprache, die von David Hestenes und anderen vorrangig mit physikalischer und physikdidaktischer Zielrichtung gestaltet und weiterentwickelt wurde. Sie basiert auf einer didaktischen Umformung der Clifford-Algebra. Da dieser mathematische Ansatz konzeptuell sehr tragfähig ist und insbesondere einen alternativen Zugang zur Linearen Algebra bietet, kann er auch außerhalb der Physik erfolgreich genutzt werden.

Dazu wurde auf der DPG-Frühjahrstagung 2016 die Kurseinheit „Geometrische Algebra im Schnelldurchgang“ [1], [2] für Fachhochschulstudierende mit nur begrenzten mathematischen Vorkenntnissen vorgestellt.

Aufgrund der nur eingeschränkt vorhandenen Rechenfähigkeiten der Studierenden wurden lediglich Lineare Gleichungssysteme mit zwei Unbekannten und (2×2) -Matrizen thematisiert. Um mit Studierenden dieses Leistungsniveaus auch anspruchsvollere Aufgabenstellungen diskutieren und bearbeiten zu können, ist zur zeitlichen Entlastung die Bereitstellung einer effektiven Rechner-Unterstützung sinnvoll. Allerdings existieren derzeit keine Taschenrechner, die Rechnungen zur Geometrischen Algebra zulassen.

In diesem Beitrag wird deshalb gezeigt, wie das Programm-Tool GAALOP (Geometric Algebra Algorithms Optimizer) als geometrisch-algebraischer Taschenrechner-Ersatz eingesetzt und didaktisch sinnvoll zur Modellierung von Problemstellungen unter Einbezug höher-dimensionaler Linearer Gleichungssysteme genutzt werden kann.

1. Geometrische Algebra

Die Geometrische Algebra ist eine mathematische Sprache, die von David Hestenes [3], [4], [5] und anderen (siehe z. B. [6], [7], [8]) auf grundlegenden Vorarbeiten von Grassmann [9], [10], Peirce [11], Clifford [12], Cartan [13] und Riesz [14] vorrangig mit physikalischer und physikdidaktischer Zielrichtung gestaltet und weiterentwickelt wurde. Sie basiert somit auf einer didaktischen Umformung der Clifford-Algebra [15].

Da dieser mathematische Ansatz konzeptuell äußerst tragfähig ist und insbesondere einen alternativen Zugang zur Linearen Algebra bietet, kann er auch außerhalb der Physik erfolgreich genutzt werden. Beispielsweise können zahlreiche Problemstellungen der Wirtschaftsmathematik, die üblicherweise mit Hilfe der konventionellen Fassung der Linearen Algebra diskutiert und gelöst werden, sehr erfolgreich auch im Kontext der Geometrischen Algebra thematisiert werden.

Durch die Verknüpfung algebraischer und geometrischer Perspektiven werden dabei Lösungswege und Diskussionspfade eröffnet, die bei einer Fixierung auf rein algebraische Ansätze nicht besprochen werden könnten.

Als Beispiel für einen solchen geometrisch-algebraischen Ansatz im Bereich der wirtschaftsmathematischen Grundlagenausbildung wurden an der HWR Berlin in den vergangenen Semestern schrittweise Lehrmaterialien und -konzepte zur Geometrischen Algebra entwickelt und erprobt [16] – [27], die in eher leistungsstärkeren Kursen für englischsprachige Studierende eingesetzt wurden.

Um diesen Ansatz auch mit leistungsschwächeren Studierenden fachhochschulischer Kurse umsetzen zu können wurden parallel dazu an der MSB inhaltlich und didaktisch reduzierte Materialien entwickelt und erprobt [1], [2], [28], die eine sehr kompakte Darstellung bei auch zeitlich eingeschränkten Ressourcen ermöglichen.

Als Ergebnis dieser Erprobungsreihe wurde folgende Hypothese qualitativ bestätigt: *Auf Grundlage der Geometrischen Algebra kann die Lineare Algebra in moderner Darstellung auf Fachhochschulniveau in inhaltlich sehr kompakter und didaktisch reduzierter Form vermittelt und mit Studierenden diskutiert werden* [1].

Um die wesentlichen Kernpunkte einer auf der Geometrischen Algebra aufbauenden Linearen Algebra mit mathematisch leistungsschwachen fachhochschulischen Studierenden erörtern und diskutieren zu

können, erfolgte eine inhaltliche Reduktion auf Lineare Gleichungssysteme mit zwei Unbekannten und damit eine Beschränkung auf (2×2) -Matrizen.

Die Berufswirklichkeit angehender Wirtschaftsmathematiker besteht jedoch gerade darin, Lineare Verflechtungen von deutlich mehr als nur jeweils zwei Komponenten verstehen und bewältigen zu können. Es ist deshalb sinnvoll, nach einer inhaltlich effektiven, aufgrund der Rahmenbedingungen zeitlich jedoch nicht zu umfangreichen Möglichkeit der Erörterung höherdimensionaler Linearer Gleichungssysteme mit mathematisch leistungsschwächeren Studierenden zu suchen.

2. GAALOP

Eine Möglichkeit, auch anspruchsvollere Aufgabenstellungen diskutieren und bearbeiten zu können und gleichzeitig für eine zeitliche Entlastung zu sorgen, kann in der Bereitstellung einer effektiven Rechnerunterstützung bestehen.

Diese Einbindung computerbasierter mathematischer Methoden wird auch explizit in der Modulbeschreibung der Poolveranstaltungen zur Wirtschaftsmathematik der HWR Berlin [29] gefordert. In der Auflistung der zu vermittelnden Kompetenzen wird dazu das folgende Lernergebnis (LEG) vorgegeben:

„**LEG 5:** Sie können mathematische Verfahren mit Hilfe von geeigneter Software anwenden“ [29, Modul-Nr. 200 601].

Deshalb wurde der an der MSB erprobte Schnelldurchgang zur Geometrischen Algebra an der HWR Berlin erweitert und durch Einbindung des Programm-Tools GAALOP (Geometric Algebra Algorithms Optimizer) modifiziert.

Die Nutzung von GAALOP ist auch aus einem zweiten Grund sinnvoll: Derzeit existieren keine schulisch oder hochschulisch nutzbaren Taschenrechner, die Rechnungen zur Geometrischen Algebra zulassen. Mithin bietet der Einsatz von GAALOP eine befriedigende Möglichkeit, Studierenden, deren Kopfrechenfähigkeiten aufgrund einer verfestigten Fixierung auf unumschränkten Taschenrechnergebrauch dramatisch eingeschränkt sind, erfolgreich in die Bearbeitung von Übungsaufgaben einzubinden.

Allerdings ist auch zu beachten, dass diese Nutzung von GAALOP als geometrisch-algebraischer Taschenrechner-Ersatz [30], [31] in gewisser Weise einen didaktisch motivierten ‚Missbrauch‘ dieses Programm-Tools darstellt.

Ursprünglich war GAALOP [32] – [36] von seinen Entwicklern als ein Werkzeug gedacht, mit dessen Hilfe Rechenschritte der Geometrischen Algebra in Programmen, die in den Standard-Programmiersprachen geschrieben sind und keine Rechnungen zur Geometrischen Algebra zulassen, eingebunden werden können. Das im Compiler-Feld angezeigte Resultat der Programmoptimierung enthält deshalb immer auch Syntax-Anteile, die eine solche Einbindung ermöglichen.

Bei der Nutzung als geometrisch-algebraischer Taschenrechner-Ersatz können diese Programmzeilen ignoriert werden. Da die eigentlichen Aufgabenschritte mit Eingabe der gegebenen Werte, der Rechenbefehle und der Angabe der zu berechnenden Größen nahezu selbsterklärend sind und nach kurzer Erläuterung von den Studierenden verstanden werden, ergeben sich bei einem Gebrauch als Taschenrechner-Ersatz kaum größere Schwierigkeiten.

Darüber hinaus steht GAALOP kostenfrei zur Verfügung und kann im Internet unter der Adresse www.gaalop.de/download [36] problemlos heruntergeladen und installiert werden.

3. Motivation des Ansatzes

Die entwickelten Materialien wurden an der HWR Berlin im Sommersemester 2017 in einem deutschsprachigen [41] und im Wintersemester 2017/2018 in einem englischsprachigen Wirtschaftsmathematik-Kurs [42] der Poolveranstaltungen sowie ergänzend im IBMAN-Studiengang (International Business Management [29, Modul-Nr. 400 691]) erprobt.

Zur Motivation des Ansatzes der Geometrischen Algebra wird am ersten Kurstermin im Rahmen der einführenden Fragestellung „Was ist Mathematik?“ auf die Diskrepanz zwischen den beiden erkenntnistheoretischen Standpunkten „Mathematik wird der Natur entnommen“ (Mathematik als Entdeckung) und „Mathematik wird im menschlichen Gehirn konstruiert“ (Mathematik als Erfindung) eingegangen.

Aufgabe 3:

Der britische Physik-Nobelpreisträger P. A. M. Dirac beschreibt seine Sichtweise mit den Worten: „One may describe the situation by saying that the mathematician plays a game in which he himself invents the rules...“ (Zitat aus [37]).

Und Mathilde Marcolli, die Sofja-Kovalevskaya-Preisträgerin von 2001, sagt: „Wenn es außerirdische Lebewesen gäbe, dann würden sie höchstwahrscheinlich auch eine vollkommen andere Mathematik erfinden,“ weil eben „...Mathematik frei erfunden werden kann,...“ (Zitat aus [38]).

Als ein einfaches Beispiel für ein solches freies Erfinden von Mathematik vergleichen wir unterschiedliche Lösungsansätze der folgenden Aufgabe:

Wie groß ist der Flächeninhalt des rechts abgebildeten Parallelogramms?

Berechnen Sie bitte den Flächeninhalt dieses Parallelogramms mit Hilfe von mathematischen Ansätzen, die Ihnen aus der Schule bekannt sind.

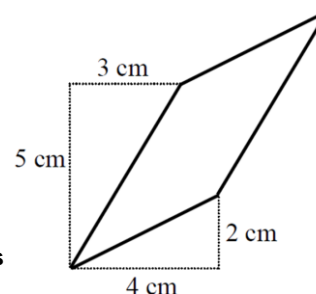


Abb.1: Einführende Aufgabenstellung zur Geometrischen Algebra [41, S. 2], [42, S. 2].

Aufgabe 4:

Ein Mathematiker, der eine andere Mathematik erfunden hat, war der Stettiner Gymnasiallehrer Hermann Grassmann, der mit seiner „Ausdehnungslehre“ die Ausdehnung – also den Flächeninhalt einfacher geometrischer Figuren – mit Hilfe einer vollkommen anderen Mathematik berechnen konnte.

Vergleichen Sie den Lösungsansatz von Grassmann, den Sie in der Vorlesung kennenlernen konnten, mit der an der Schulmathematik orientierten Lösung von Aufgabe 3.

Abb.2: Weiterführende Aufgabenstellung zur Einführung in die Geometrische Algebra [41, S. 3], [42, S. 3].

Während die Aufgabenstellung zu Aufgabe 3 (Abb.1) von den Studierenden unter Bezug auf ihr schulisches Vorwissen vorwiegend mit Hilfe einer geometrischen Zerlegung des Parallelogramms in Rechtecke und Dreiecke sowie alternativ mit Hilfe trigonometrischer Beziehungen auf konventionelle Art und Weise und sehr selten unter Nutzung von Determinanten [39] zu bestimmen versucht wurde, zielt Aufgabenstellung 4 auf die Ausbildung eines metakonzeptuellen Verständnisses: Unterschiedliche mathematische Konzepte können zur Lösung des gleichen Sachproblems herangezogen werden – und diese Konzepte stehen in einem logischen Verhältnis zueinander.

Der der Aufgabenstellung 4 (Abb. 2) zugrunde liegende Lösungsweg ordnet den bivectoriellen Anteil des Produkts der beiden Seitenvektoren des Parallelogramms

$$\begin{aligned} \mathbf{a} \mathbf{b} &= (4 \sigma_x + 2 \sigma_y) (3 \sigma_x + 5 \sigma_y) \\ &= 12 \sigma_x^2 + 20 \sigma_x \sigma_y + 6 \sigma_y \sigma_x + 10 \sigma_y^2 \\ &= 12 + 20 \sigma_x \sigma_y - 6 \sigma_x \sigma_y + 10 \\ &= 22 + 14 \sigma_x \sigma_y \end{aligned} \quad \{1\}$$

als äußerem Produkt

$$\mathbf{a} \wedge \mathbf{b} = 14 \sigma_x \sigma_y \quad \{2\}$$

somit einen Flächeninhalt von 14 cm^2 zu. Bei Erörterung dieses Ansatzes werden die Grundgleichungen der Geometrischen Algebra des dreidimensionalen Euklidischen Raumes (also der Pauli-Algebra)

$$\begin{aligned} \sigma_x \sigma_y &= -\sigma_y \sigma_x & \sigma_y \sigma_z &= -\sigma_z \sigma_y & \sigma_z \sigma_x &= -\sigma_x \sigma_z \\ \sigma_x^2 &= \sigma_y^2 = \sigma_z^2 = 1 \end{aligned} \quad \{3\}$$

thematisiert und durch geometrische Argumentation begründet. Durch Parallelverschiebung kann dann geometrisch gezeigt werden, dass das äußere Produkt tatsächlich dem konventionell berechneten (orientierten) Flächeninhalt entspricht [41, S. 22/23], [42, S. 22/23].

Nach einer durch einen studentischen Vorschlag motivierten Ergänzung [41, S. 5], [42, S. 5] wurde diese Flächengleichheit auch algebraisch in den Übungsblättern [41, S. 26/27], [42, S. 26/27] belegt und mit den Studierenden diskutiert.

4. Zweidimensionale Umsetzung des Ansatzes

Ein Lineares Gleichungssystem aus zwei Gleichungen mit zwei Unbekannten x und y

$$\begin{aligned} a_x x + b_x y &= r_x & \rightarrow & \text{x-Richtung} \\ a_y x + b_y y &= r_y & \rightarrow & \text{y-Richtung} \end{aligned} \quad \{4\}$$

kann geometrisch durch Einbettung in eine zweidimensionale Ebene, die durch die Basisvektoren σ_x und σ_y aufgespannt wird,

$$\begin{aligned} (a_x x + b_x y) \sigma_x &= r_x \sigma_x \\ (a_y x + b_y y) \sigma_y &= r_y \sigma_y \end{aligned} \quad \{5\}$$

mit Hilfe der Koeffizientenvektoren

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= a_x \sigma_x + a_y \sigma_y \\ \mathbf{b} &= b_x \sigma_x + b_y \sigma_y \end{aligned} \quad \{6\}$$

und des konstanten Ergebnisvektors

$$\mathbf{r} = r_x \sigma_x + r_y \sigma_y \quad \{7\}$$

als geometrisch-algebraische Gleichung

$$\mathbf{a} x + \mathbf{b} y = \mathbf{r} \quad \{8\}$$

dargestellt werden. Durch Vorübungen (siehe AB 8, Aufg. 2c,d in [41], [42]) kann mit den Studierenden erarbeitet werden, dass ein Parallelogramm, das durch zwei parallele Seiten $\mathbf{a} \parallel (k \mathbf{a})$ aufzuspannen versucht wird, einen verschwindenden Flächeninhalt aufweist. Dieser verschwindende Flächeninhalt wird algebraisch durch das äußere Produkt

$$\mathbf{a} \wedge (k \mathbf{a}) = 0 \Rightarrow \mathbf{a} \wedge \mathbf{a} = 0 \quad \{9\}$$

beschrieben.

Die äußere Multiplikation des Linearen Gleichungssystems {8} mit den Koeffizientenvektoren \mathbf{b} bzw. \mathbf{a}

$$\begin{aligned} (\mathbf{a} x + \mathbf{b} y) \wedge \mathbf{b} &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b}) x + 0 y = \mathbf{r} \wedge \mathbf{b} \\ \mathbf{a} \wedge (\mathbf{a} x + \mathbf{b} y) &= 0 x + (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b}) y = \mathbf{a} \wedge \mathbf{r} \end{aligned} \quad \{10\}$$

führt somit direkt auf die beiden Lösungsformeln

$$\begin{aligned} x &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{r} \wedge \mathbf{b}) \\ y &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{a} \wedge \mathbf{r}) \end{aligned} \quad \{11\}$$

Diese Lösungsformeln bilden das geometrisch-algebraische Analogon zur Cramerschen Regel und können auch von mathematisch leistungsschwächeren Studierenden nach ausführlichen Übungsphasen ohne größere Probleme eigenständig angewandt werden [1].

Mit Hilfe der in [2] veröffentlichten Materialien wurde dieser Ansatz an der MSB [28] erprobt und auch an der HWR Berlin immer wieder bei Zeitknappheit zur Einführung in die Geometrische Algebra eingesetzt.

Im Sommersemester 2017 erfolgte die erste Erprobung an der HWR Berlin in einem deutschsprachigen Wirtschaftsmathematik-Kurs mit den auf GAALOP basierenden Materialien [41, AB 8]. Diese Materialien wurden im darauffolgenden Wintersemester 2017/2018 ins Englische übertragen [42, AB 8] und um einige Aufgaben zur Berechnung von Gleichgewichtspreisen und Gleichgewichtsmengen [42, AB 3] ergänzt.

5. Einübung der GAALOP-Nutzung

An Anschluss an die Bearbeitung und Einübung der Lösung Linearer Gleichungssysteme mit zwei Unbekannten von Hand wurden die gleichen Übungsaufgaben mit Hilfe von GAALOP bearbeitet [41, AB 9, Aufg. 3], [42, AB 9, Aufg. 3]. Die dabei durch die Studierenden gewonnene Selbstsicherheit im Umgang mit GAALOP stellt eine wichtige Voraussetzung für ein erfolgreiches Anwenden von GAALOP bei der Bearbeitung und Lösung von Linearen Gleichungssystemen mit drei oder mehr Unbekannten dar.



Abb.3: Download des Programm-Tools GAALOP.

Unterstützende Erläuterungen zum erfolgreichen Download von GAALOP über die entsprechende Internetseite (siehe Abb. 3), der Installation und dem Programmstart wurden den Studierenden dabei auch in den zur Verfügung gestellten Arbeitsbögen [41, S. 48–50], [42, S. 48–50] gegeben.

Allerdings handelt es sich bei der zuerst mit den Studierenden eingesetzten Fassung noch um die Version *gaalop-2.0.1*. Weitere überarbeitete und verbesserte Versionen standen erst später zur Verfügung. So sind auch einige der in den Materialien [41], [42] aufgeführten Hinweise zu Rundungsproblemen oder zur Darstellung der mit Null belegten Compilerwerte mittlerweile überholt.

Es ist sinnvoll, hier eine ausreichend lange Übungszeit einzuplanen, damit die Studierenden auch anspruchsvollere Aufgaben wie beispielsweise die Berechnung der Inversen im zweidimensionalen Fall erfolgreich bewerkstelligen können, bevor Lineare Gleichungssysteme mit drei Unbekannten angegangen werden.

In diesem Zusammenhang sollte nicht nur klar herausgearbeitet werden, dass zur Ermittlung der Inversen einer (2 x 2)-Matrix zwei verschiedene Lineare Gleichungssysteme

$$\mathbf{a} \mathbf{x} + \mathbf{b} \mathbf{y} = \mathbf{r}_1 \quad \text{und} \quad \mathbf{a} \mathbf{x} + \mathbf{b} \mathbf{y} = \mathbf{r}_2 \quad \{12\}$$

mit den zwei unterschiedlichen Ergebnisvektoren

$$\mathbf{r}_1 = \sigma_x \quad \text{und} \quad \mathbf{r}_2 = \sigma_y \quad \{13\}$$

zu lösen sind, sondern es sollte auch die Bedeutung der Vorzeichenumkehr und eventuell negativer Werte, die als Elemente der inversen Matrix auftreten können, diskutiert werden. Die korrekte Interpretation der vier Elemente der inversen Matrix

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 \\ y_1 & y_2 \end{pmatrix} \quad \{14\}$$

$$\text{mit } x_1 = (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\sigma_x \wedge \mathbf{b}) \quad x_2 = (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\sigma_y \wedge \mathbf{b})$$

$$y_1 = (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{a} \wedge \sigma_x) \quad y_2 = (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{a} \wedge \sigma_y)$$

ist insbesondere im wirtschaftsmathematischen Be-

Aufgabe 9:

Zur Herstellung einer einzigen Mengeneinheit des Endproduktes E_1 werden 7 ME des Rohstoffes R_1 und 4 ME des Rohstoffes R_2 benötigt.

Zur Herstellung einer einzigen Mengeneinheit des Endproduktes E_2 werden 5 ME des Rohstoffes R_1 und 3 ME des Rohstoffes R_2 benötigt.

Berechnen Sie, welche Mengen der Endprodukte E_1 und E_2 theoretisch hergestellt werden könnten, wenn genau eine ME des ersten Rohstoffes R_1 verbraucht werden soll.

Und berechnen Sie, welche Mengen der Endprodukte E_1 und E_2 theoretisch hergestellt werden könnten, wenn genau eine ME des zweiten Rohstoffes R_2 verbraucht werden soll.

Wie sind diese Ergebnisse zu deuten? Geben Sie eine Interpretation der Ergebnisse an.

Musterlösung mit GAALOP:

```

a = 7*e1 + 4*e2;
b = 5*e1 + 3*e2;
r1 = e1;
r2 = e2;
?Xeins = (r1^b)/(a^b);
?Yeins = (a^r1)/(a^b);
?Xzwei = (r2^b)/(a^b);
?Yzwei = (a^r2)/(a^b);

```

```

\begin{align*}
Xeins_{0}\&= 3\\
?Xeins\\
Yeins_{0}\&= -4\\
?Yeins\\
Xzwei_{0}\&= -5\\
?Xzwei\\
Yzwei_{0}\&= 7\\
?Yzwei\\
\end{align*}

```

$$\begin{matrix} x_1 = 3 & x_2 = -5 \\ y_1 = -4 & y_2 = 7 \end{matrix} \Rightarrow \mathbf{A}^{-1} = \begin{pmatrix} 3 & -5 \\ -4 & 7 \end{pmatrix}$$

Abb.4: Aufgabenstellung und GAALOP-Musterlösung zur Berechnung einer inversen Matrix [41, S. 9 & 63], [42, S. 9 & 63].

reich relevant, wenn rein positive belegte Bedarfsmatrizen bei Erörterung von Materialverflechtungen auf Inverse dieser Matrizen mit negativen Elementen führen (siehe Abb. 4).

Diese negativen Elemente können dann dahingehend gedeutet werden, dass im Produktionsprozess das entsprechende Endprodukt nicht hergestellt, sondern (verlustfrei in seine Ausgangsteile zerlegt) verbraucht wird (siehe Abb. 5).

Aufgabe 9/Ökonomische Interpretation:

Wenn im Produktionsprozess genau eine einzige ME des ersten Rohstoffes R_1 verbraucht werden soll, werden 3 ME des ersten Endproduktes E_1 und (- 4) ME des zweiten Endproduktes E_2 hergestellt. Die Herstellung einer negativen Anzahl an Endprodukten ist allerdings problematisch.

Werden (- 4) ME hergestellt, bedeutet dies, dass zu der bereits produzierten Menge an Endprodukten (- 4) ME dazukommen und die Zahl (- 4) addiert wird. Mathematisch entspricht dies einer Subtraktion von 4. Nach Ende des Produktionsprozesses sind also 4 ME des Endproduktes E_2 weniger vorhanden.

Die 4 ME des Endproduktes E_2 wurden also nicht produziert, sondern verbraucht und (theoretisch verlustfrei) wieder in die ursprünglichen Rohstoffe R_1 und R_2 zerlegt.

Die korrekte ökonomische Interpretation lautet somit: Wenn im Produktionsprozess genau eine einzige ME des ersten Rohstoffes R_1 verbraucht werden soll, werden 3 ME des ersten Endproduktes E_1 hergestellt und zusätzlich 4 ME des zweiten Endproduktes E_2 verbraucht.

Abb.5: Interpretation negativer Elemente einer inversen Bedarfsmatrix [41, S. 44], [42, S. 44].

Die Syntax von GAALOP ist dabei denkbar einfach und kann ohne größere Probleme auch intuitiv recht schnell nachvollzogen werden. Die als Basisvektoren gedeuteten Pauli-Matrizen werden durchnummeriert als Einheitsvektoren nun mit lateinischen Buchstaben dargestellt:

$$\begin{aligned} \sigma_x &\longrightarrow e_1 \\ \sigma_y &\longrightarrow e_2 \\ \sigma_z &\longrightarrow e_3 \end{aligned}$$

Die drei unterschiedlichen Multiplikationsformen

$$\mathbf{a} \mathbf{b} = \mathbf{a} \bullet \mathbf{b} + \mathbf{a} \wedge \mathbf{b} \quad \{15\}$$

werden ebenso intuitiv einsichtig übertragen als

- Geometrische Multiplikation:** $\mathbf{a} \mathbf{b} \longrightarrow \mathbf{a} * \mathbf{b}$
- Innere Multiplikation:** $\mathbf{a} \bullet \mathbf{b} \longrightarrow \mathbf{a} . \mathbf{b}$
- Äußere Multiplikation:** $\mathbf{a} \wedge \mathbf{b} \longrightarrow \mathbf{a} \wedge \mathbf{b}$

Damit ergeben sich auch die logischen Darstellungen der Basis-Bivektoren (Pseudo-Vektoren) und des Basis-Trivektors (Pseudo-Skalars) als:

$$\begin{aligned} \sigma_x \sigma_y &\longrightarrow e_1 * e_2 \\ \sigma_x \sigma_z &\longrightarrow e_1 * e_3 \\ \sigma_y \sigma_z &\longrightarrow e_2 * e_3 \\ \sigma_x \sigma_y \sigma_z &\longrightarrow e_1 * e_2 * e_3 \end{aligned}$$

Nach dieser einführenden Einübung der Grundlagen von GAALOP können in Fortführung dieses Ansatzes nun höherdimensionale Lineare Gleichungssysteme diskutiert und gelöst werden.

6. Lineare Gleichungen mit drei Unbekannten

Lineare Gleichungssysteme aus drei Gleichungen mit den drei Unbekannten x , y und z können in Analogie zu den Gleichungen {4} und {5}

$$\begin{aligned} (a_x x + b_x y + c_x z) \sigma_x &= r_x \sigma_x \\ (a_y x + b_y y + c_y z) \sigma_y &= r_y \sigma_y \\ (a_z x + b_z y + c_z z) \sigma_z &= r_z \sigma_z \end{aligned} \quad \{16\}$$

nun durch Einbettung in einen dreidimensionalen Raum, der durch die Basisvektoren σ_x , σ_y und σ_z aufgespannt wird, mit Hilfe der Koeffizientenvektoren

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= a_x \sigma_x + a_y \sigma_y + a_z \sigma_z \\ \mathbf{b} &= b_x \sigma_x + b_y \sigma_y + b_z \sigma_z \\ \mathbf{c} &= c_x \sigma_x + c_y \sigma_y + c_z \sigma_z \end{aligned} \quad \{17\}$$

und des konstanten Ergebnisvektors

$$\mathbf{r} = r_x \sigma_x + r_y \sigma_y + r_z \sigma_z \quad \{18\}$$

als geometrisch-algebraische Gleichung

$$\mathbf{a} x + \mathbf{b} y + \mathbf{c} z = \mathbf{r} \quad \{19\}$$

ausgedrückt und wieder durch Berechnung äußerer Produkte auf der Grundlage des Ansatzes Grassmanns [9, § 45, S. 72] gelöst werden.

Die drei Lösungsformeln

$$\begin{aligned} x &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b} \wedge \mathbf{c})^{-1} (\mathbf{r} \wedge \mathbf{b} \wedge \mathbf{c}) \\ y &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b} \wedge \mathbf{c})^{-1} (\mathbf{a} \wedge \mathbf{r} \wedge \mathbf{c}) \\ z &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b} \wedge \mathbf{c})^{-1} (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b} \wedge \mathbf{r}) \end{aligned} \quad \{20\}$$

beschreiben geometrisch das Verhältnis des orientierten Volumens des durch den Ergebnisvektor und zwei Koeffizientenvektoren gebildeten Parallelepipeds zum orientierten Volumen des durch alle drei Koeffizientenvektoren gebildeten Parallelepipeds.

Diese Volumina entsprechen den gemäß der Cramerschen Regel zu dividierenden Determinanten.

$$\begin{aligned} \det [\mathbf{a}; \mathbf{b}; \mathbf{c}] &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b} \wedge \mathbf{c}) \sigma_z \sigma_y \sigma_x \\ \det [\mathbf{r}; \mathbf{b}; \mathbf{c}] &= (\mathbf{r} \wedge \mathbf{b} \wedge \mathbf{c}) \sigma_z \sigma_y \sigma_x \\ \det [\mathbf{a}; \mathbf{r}; \mathbf{c}] &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{r} \wedge \mathbf{c}) \sigma_z \sigma_y \sigma_x \\ \det [\mathbf{a}; \mathbf{b}; \mathbf{r}] &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b} \wedge \mathbf{r}) \sigma_z \sigma_y \sigma_x \end{aligned} \quad \{21\}$$

Sofern das Lineare Gleichungssystem konsistent und

Aufgabe 5a (singleleiche Kürzung):

Berechnen Sie mit Hilfe von GAALOP das Volumen des Parallelepipeds, das durch die angegebenen Seitenvektoren aufgespannt wird:

$$\mathbf{a} = 4 \sigma_x + 2 \sigma_y \quad \mathbf{b} = 2 \sigma_x + 4 \sigma_y \quad \mathbf{c} = 3 \sigma_z$$

Dabei soll die Länge $|\sigma_x|$, $|\sigma_y|$ und $|\sigma_z|$ der Basisvektoren σ_x , σ_y und σ_z mit 1 cm angesetzt werden.

Fertigen Sie auch eine Skizze dieses Parallelepipeds an und vergleichen Sie das Ergebnis mit dem Resultat, das Sie bei einer Berechnung der Determinante mit Hilfe der Regel von Sarrus erhalten.

Abb.6: Aufgabenstellung zur Volumenberechnung eines Parallelepipeds [41, S. 11], [42, S. 11].

Aufgabe 5a/Skizze:

Musterlösung mit GAALOP:

```

a = 4*e1 + 2*e2;
b = 2*e1 + 4*e2;
c = 3*e3;
?V = a^b^c;
    
```

```

\begin{align*}
V_{\{7\}} &= 36 \\
?V \\
\end{align*}
    
```

Ausführliche Rechnung:

$$\mathbf{a} \mathbf{b} = (4 \sigma_x + 2 \sigma_y) (2 \sigma_x + 4 \sigma_y) = 16 + 12 \sigma_x \sigma_y$$

$$\Rightarrow \mathbf{a} \wedge \mathbf{b} = 12 \sigma_x \sigma_y$$

$$\mathbf{a} \mathbf{b} \mathbf{c} = (16 + 12 \sigma_x \sigma_y) (3 \sigma_z) = 48 \sigma_z + 36 \sigma_x \sigma_y \sigma_z$$

$$\Rightarrow \mathbf{a} \wedge \mathbf{b} \wedge \mathbf{c} = 36 \sigma_x \sigma_y \sigma_z$$

$$\Rightarrow |\mathbf{V}| = 36$$

\Rightarrow Das Volumen des Parallelepipeds beträgt 36 cm^3 .

Probe mit der Regel von Sarrus:

$$\det \mathbf{A} = 4 \cdot 4 \cdot 3 + 2 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot 2 \cdot 0 - 0 \cdot 4 \cdot 0 - 4 \cdot 0 \cdot 0 - 2 \cdot 2 \cdot 3 = 48 - 12 = 36$$

Abb.7: Vergleich einer Volumenberechnung mit Hilfe von GAALOP auf Grundlage äußerer Produkte und der Regel von Sarrus [41, S. 70], [42, S. 70].

eindeutig lösbar ist, heben sich die entsprechenden Basiseinheiten in Zähler und Nenner gegenseitig immer weg.

Damit diese Volumenberechnung sachrichtig gelingen kann, wurde eine Einübungsphase vorangestellt, in der die Berechnung orientierter Volumina von Parallelepipeden gemäß Gl. {21} eingeübt und die Regel von Sarrus nach

$$\det [\mathbf{a}; \mathbf{b}; \mathbf{c}] = (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b} \wedge \mathbf{c}) \sigma_z \sigma_y \sigma_x \quad \{22\}$$

$$= a_x b_y c_z + b_x c_y a_z + c_x a_y b_z - c_x b_y a_z - a_x c_y b_z - b_x a_y c_z$$

hergeleitet und diskutiert wurde (siehe Abb. 6 & 7).

Ein weiterer Schwerpunkt der entwickelten Materialien stellt die direkte Berechnung von Zwischenbedarfsmatrizen dar. So können bei Aufgaben zur Materialverflechtung die neun Elemente einer unbekanntes Bedarfsmatrix **B**

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{pmatrix} \quad \{23\}$$

des zweiten Produktionsschritts

$$\mathbf{A} \mathbf{B} = \mathbf{D} \quad \{24\}$$

mit Hilfe der Grassmannschen Formeln ($i \in \{1, 2, 3\}$)

$$x_i = (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b} \wedge \mathbf{c})^{-1} (\mathbf{r}_i \wedge \mathbf{b} \wedge \mathbf{c})$$

$$y_i = (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b} \wedge \mathbf{c})^{-1} (\mathbf{a} \wedge \mathbf{r}_i \wedge \mathbf{c}) \quad \{25\}$$

$$z_i = (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b} \wedge \mathbf{c})^{-1} (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b} \wedge \mathbf{r}_i)$$

in Analogie zu Gl. {20} berechnet werden, sofern die Bedarfsmatrix $\mathbf{A} = [\mathbf{a}; \mathbf{b}; \mathbf{c}]$ des ersten Produktionsschritts und die Gesamtbedarfsmatrix $\mathbf{D} = [\mathbf{r}_1; \mathbf{r}_2; \mathbf{r}_3]$ gegeben ist.

In mathematisch vollkommen äquivalenter Art und Weise wird die Inverse einer gegebenen Matrix dann analog zu Gl. {14} berechnet, indem in Gl. {24} die resultierende Matrix **D** durch die Einheitsmatrix $\mathbf{E} = [\mathbf{e}_1; \mathbf{e}_2; \mathbf{e}_3]$ ersetzt wird.

7. Weitere didaktische Hinweise

Obwohl die Modulbeschreibungen der einführenden Wirtschaftsmathematik-Kurse der Pool-Veranstaltungen an der HWR vorsehen, dass „mathematische Verfahren mit Hilfe von geeigneter Software anzuwenden“ sind [29, Modul-Nr. 200 601] bzw. „to implement mathematical methods using mathematical software“ [29, Modul-Nrn. 200 691 & 400 691], stehen für die Kursdurchführung in der Regel keine Computer-Arbeitsräume zur Verfügung.

Es muss also ein didaktischer Weg gefunden werden, der es den Studierenden ermöglicht, die entsprechenden Aufgabenstellungen außerhalb des vorgesehenen Präsenzunterrichts von mindestens 60 LVS eigenständig einzuüben und dann die Ergebnisse vergleichend zu diskutieren. Zu diesem Zweck werden während des seminaristischen Unterrichts, der in den Kursveranstaltungen durch zahlreiche Phasenwechsel zwischen Frontal-, Eigenarbeits- und Gruppenübungsphasen gekennzeichnet ist, OHP-Folien mit einer leeren GAALOP-Benutzeroberfläche an die Studierenden ausgegeben.

Eine Kopiervorlage dieser OHP-Folien ist diesem Beitrag in Abbildung 8 (siehe folgende Seite) beige-fügt.

GAALOP-Benutzeroberfläche / GAALOP user interface:

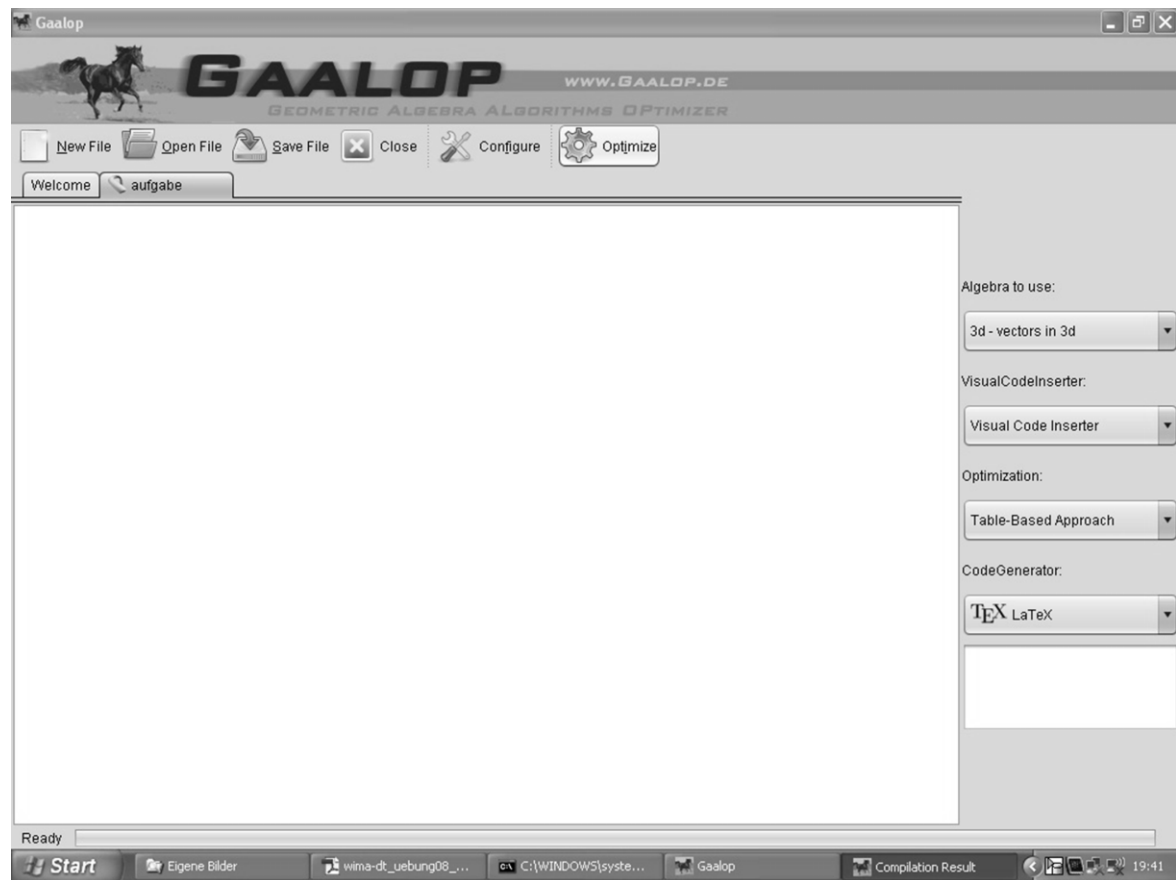


Abb.8: Kopiervorlage der an die Studierenden ausgegebenen OHP-Folie.

8. Beispiel einer studentischen Musterlösung

Auch aus Zeitgründen können im Präsenzünterricht nur einige der in [41], [42] aufgeführten Übungsaufgaben bearbeitet und ausführlicher diskutiert werden. Dabei werden diese am Pultrechner des Vorlesungsraums zusammen mit der Kursgruppe bearbeitet und mit erläuternden Tafelrechnungen unterlegt.

Aufgabe 11:

Ein Betrieb stellt aus den drei Rohstoffen R_1 , R_2 und R_3 die drei Zwischenprodukte Z_1 , Z_2 und Z_3 her. Diese werden sodann zu den drei Endprodukten E_1 , E_2 und E_3 weiterverarbeitet.

Der Rohstoffbedarf des ersten Produktionsschrittes und der Gesamtrohstoffbedarf zur Produktion jeweils einer Einheit der Endprodukte werden durch die folgenden Tabellen beschrieben:

	Z_1	Z_2	Z_3		E_1	E_2	E_3
R_1	8	6	6	R_1	228	186	308
R_2	7	5	7	R_2	214	166	282
R_3	5	4	0	R_3	108	107	160

Bestimmen Sie mit Hilfe von GAALOP die Zwischenbedarfsmatrix B , die im zweiten Produktionsschritt den Bedarf an Zwischenprodukten zur Produktion jeweils einer Einheit der Endprodukte angibt und machen Sie eine Probe.

Abb.9: Aufgabenstellung zur Berechnung einer Zwischenbedarfsmatrix [41, S. 13], [42, S. 13].

Die restlichen Aufgaben sind dann von den Studierenden häuslich zu bearbeiten, wobei die Studierenden, die eine Folie erhalten haben, das von Ihnen erstellte und erprobte GAALOP-Programm für eine ihnen zugewiesene Aufgabe mit Folienschreiber in die GAALOP-Oberfläche eintragen. Die von den Studierenden zuhause angefertigten Musterlösungen werden im Kurstermin der darauffolgenden Woche von ihnen vorgestellt und erläutert.

Diese Phasen führen noch einmal zu einer deutlichen Festigung der Lerninhalte, da bei diesen Diskussionsphasen insbesondere die Studierenden, denen eine sachgerechte Lösung zuhause nicht gelang, noch einmal die Gelegenheit zu vertiefenden Nachfragen erhalten. Diese Diskussionsgelegenheiten werden auch von ansonsten im Präsenzünterricht eher zurückhaltenden Studierenden gut angenommen.

Dabei zeigt sich, dass dieser Zugang von den Studierenden als sehr positiv bewertet wird. In lernschwachen Gruppen ist es allerdings hilfreich, die Verantwortung für eine Folienerstellung mit der Maßgabe, die zugewiesene GAALOP-Aufgabe in Partnerarbeit zu lösen, gleichzeitig zwei Studierenden zugesprochen wird.

Die Musterlösungen zeigen, dass die wesentlichen

Studentische Lösung von Aufgabe 11:

GAALOP-Benutzeroberfläche / GAALOP user interface:

The screenshot shows the GAALOP user interface with a handwritten solution for Aufgabe 11. The solution includes the following steps:

- Definition of matrices A and B :

$$A = \begin{bmatrix} 8 & 6 & 6 \\ 7 & 5 & 7 \\ 5 & 4 & 0 \end{bmatrix} \text{ 1st production step}$$

$$B = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix} \text{ 2nd prod. step}$$
- Calculation of the total demand matrix $D = A \cdot B$:

$$D = \begin{bmatrix} 228 & 186 & 308 \\ 214 & 166 & 282 \\ 108 & 107 & 160 \end{bmatrix}$$
- Solution of the system of linear equations $Ax = D$ using Cramer's rule:

$$x_1 = \frac{\det \begin{bmatrix} 228 & 6 & 6 \\ 214 & 5 & 7 \\ 108 & 4 & 0 \end{bmatrix}}{\det \begin{bmatrix} 8 & 6 & 6 \\ 7 & 5 & 7 \\ 5 & 4 & 0 \end{bmatrix}} = \frac{48}{4} = 12$$
- Final values:

$$x_1 = 12$$

$$x_2 = 10$$

$$x_3 = 10$$

Abb.10: Studentische Lösung der in Abb. 9 gezeigten Aufgabenstellung zur Berechnung einer Zwischenbedarfsmatrix [41, S. 86/87], [42, S. 86/87].

Unterrichtsziele erreicht wurden. Sie bieten gleichzeitig dem Dozenten noch einmal die Gelegenheit, Defizite zu erkennen und im nachfolgenden Unterricht aufzugreifen.

So zeigt sich in Abb. 10 deutlich, dass das Konzept einer Matrix als Zusammenstellung mehrerer Spalten hier noch nicht in ausreichender Tiefe von der oder dem Studierenden kognitiv verarbeitet wurde, da hier versucht wird, die unterschiedlichen Spalten sukzessive unter großem Aufwand einzeln hintereinander abzuarbeiten.

Auch wird in der Musterlösung das Konzept einer Probe (also hier das Einsetzen in die ursprüngliche Gleichung $A \cdot B = D$) durch das Konzept des Nachrechnens ersetzt.

9. Didaktisches Fazit

Als Ergebnis dieser weiteren Erprobung kann die ursprüngliche Hypothese erweitert werden. Es ist jetzt deutlich sichtbar, dass gilt:

Auf Grundlage der Geometrischen Algebra kann die Lineare Algebra in moderner Darstellung auf Fachhochschulniveau in inhaltlich sehr kompakter und didaktisch reduzierter Form vermittelt und mit Studierenden diskutiert werden. Mit Hilfe des Pro-

gramm-Tools GAALOP können mit den Studierenden dabei auch komplexere Aufgabenstellungen erfolgreich erörtert und fundiert diskutiert werden.

Dabei kommen die eingangs angeschnittenen und von David Hestenes zusammengestellten didaktischen Vorteile der Geometrischen Algebra deutlich zum Tragen: „The Power of GA derives from

- the simplicity of the grammar,
- the geometric meaning of multiplication,
- the way geometry links the algebra to the physical world“ [5, S. 107]

Dieser konzeptionelle Gleichklang spiegelt sich auch bei der rechnerischen Umsetzung im Kontext von GAALOP wider. Die konzeptionelle Stärke der Verknüpfung von Geometrischer Algebra mit einer Nutzung von GAALOP zeigt sich sehr deutlich durch die aus der Beschreibung von Hestenes direkt folgenden Punkte:

- Die einfache Struktur der mathematischen Grammatik gestattet eine leicht durchschaubare Programmierung.
- Die geometrische Deutung der Multiplikation ermöglicht nachvollziehbare graphische Veranschaulichungen.
- Geometrie, Physik und Algebra [26] sowie programmtechnische Umsetzung durchdringen sich gegenseitig.

Und so lässt sich auch die Schlussfolgerung von David Hestenes in seiner Oersted-Preisträgerrede („Geometric Algebra is ready to be incorporated into the physics curriculum“ [5, S. 121]) sehr direkt auf GAALOP übertragen.

Das zwingende didaktische Fazit lautet deshalb: Nicht nur die Geometrische Algebra, sondern auch die Nutzung von GAALOP – oder ähnlicher Programme – stehen für eine Einbindung in die Curricula von Physik, Mathematik, den Wirtschaftswissenschaften und anderer Fachgebiete bereit.

10. Literatur

- [1] Horn, Martin Erik (2016): Die Geometrische Algebra im Schnelldurchgang. In: PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung in Hannover 2016, Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/723> (17.12.2016).
- [2] Horn, Martin Erik (2015): Moderne Lineare Algebra – Ein Überblick (Stand: 28. Juni 2015). OHP-Folien des Kurses „Mathematik und Statistik“, Modul M 22 des Studiengangs Medical Controlling and Management, Medical School Berlin – Hochschule für Gesundheit und Medizin, Sommersemester 2015. Veröffentlicht als Anhang des Beitrags [1], Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/723/866> (17.12.2016).
- [3] Hestenes, David (1967): Real Spinor Fields. In: Journal of Mathematical Physics, Vol. 8, No. 4, S. 798-808.
- [4] Hestenes, David (2002): New Foundations for Classical Mechanics. Second edition. Kluwer Academic Publishers, New York, Boston.
- [5] Hestenes, David (2003): Oersted Medal Lecture 2002: Reforming the Mathematical Language of Physics. In: American Journal of Physics, Vol. 71, No. 2, S. 104-121.
- [6] Gull, Stephan; Lasenby, Anthony; Doran, Chris (1993): Imaginary Numbers are not Real – The Geometric Algebra of Spacetime. In: Foundations of Physics, Vol. 23, No. 9, S. 1175-1201.
- [7] Doran, Chris; Lasenby, Anthony (2003): Geometric Algebra for Physicists. Cambridge University Press, Cambridge.
- [8] Snygg, John (1997): Clifford Algebra. A Computational Tool for Physicists. Oxford University Press, New York, Oxford.
- [9] Grassmann, Hermann (1844): Die Wissenschaft der extensiven Grösse oder die Ausdehnungslehre, eine neue mathematische Disciplin. Erster Theil, die lineale Ausdehnungslehre enthaltend. Verlag von Otto Wigand, Leipzig.
- [10] Grassmann, Hermann (1877): Der Ort der Hamilton'schen Quaternionen in der Ausdehnungslehre. In: Mathematische Annalen, Vol. 12, S. 375-386.
- [11] Peirce, Charles Sanders (1877): Note on Grassmann's Calculus of Extension. In: Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences, Vol. 13 (gelesen am 10. Okt. 1877), S. 115-116.
- [12] Clifford, William Kingdon (1878): Applications of Grassmann's Extensive Algebra. In: American Journal of Mathematics, Vol. 1, No. 4, S. 350-358.
- [13] Cartan, Élie (1981): The Theory of Spinors. Unabridged republication of the complete English translation first published in 1966. Dover Publications, New York.
- [14] Riesz, Marcel (1958): Clifford Numbers and Spinors. Chapters I – IV, Lecture Series No. 38, Lectures delivered October 1957 – January 1958. The Institute for Fluid Dynamics and Applied Mathematics, University of Maryland, College Park.
- [15] Parra Serra, Josep Manel (2009): Clifford Algebra and the Didactics of Mathematics. In: Advances in Applied Clifford Algebras, Vol. 19, No. 3/4, S. 819-834.
- [16] Horn, Martin Erik (2015): Lineare Algebra in physikdidaktischer Ausprägung. In: PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung in Wuppertal 2015, Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/626> (17.12.2015).
- [17] Horn, Martin Erik (2014): Modern Linear Algebra. A Geometric Algebra Crash Course. Part I:

- Basics & Introduction. OHP-Folien des Kurses „Mathematics for Business and Economics“ (Stand: 31. Dez. 2014), LV-Nr. 200 691.01, Hochschule für Wirtschaft und Recht Berlin / Berlin School of Economics and Law, Wintersemester 2014/2015. Veröffentlicht als Anhang des Beitrags [16], Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/626/794> (17.12.2015).
- [18] Horn, Martin Erik (2014): Modern Linear Algebra. A Geometric Algebra Crash Course. Part II: Solving Systems of Linear Equations. OHP-Folien des Kurses „Mathematics for Business and Economics“ (Stand: 31. Dez. 2014), LV-Nr. 200 691.01, Hochschule für Wirtschaft und Recht Berlin / Berlin School of Economics and Law, Wintersemester 2014/2015. Veröffentlicht als Anhang des Beitrags [16], Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/626/795> (17.12.2015).
- [19] Horn, Martin Erik (2015): Modern Linear Algebra. A Geometric Algebra Crash Course. Part III: The Direct Product & Solving Higher-Dimensional Systems of Linear Equations. OHP-Folien des Kurses „Mathematics for Business and Economics“ (Stand: 28. Jan. 2015), LV-Nr. 200 691.01, Hochschule für Wirtschaft und Recht Berlin / Berlin School of Economics and Law, Wintersemester 2014/2015. Veröffentlicht als Anhang des Beitrags [16], Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/626/796> (17.12.2015).
- [20] Horn, Martin Erik (2016): Physikdidaktische Interpretation des Gaußschen Algorithmus. In: PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung in Hannover 2016. Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/727> (17.12.2016).
- [21] Horn, Martin Erik (2016): Modern Linear Algebra. A Geometric Algebra Crash Course. Part IV: Transformation of Coordinates & Gaussian Method of Solving a System of Linear Equations. OHP-Folien des Kurses „Mathematics for Business and Economics“ (Stand: 28. Jan. 2016), LV-Nr. 200 691.01, Hochschule für Wirtschaft und Recht Berlin / Berlin School of Economics and Law, Wintersemester 2015/2016. Veröffentlicht als Anhang des Beitrags [20], Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/727/892> (17.12.2016).
- [22] Horn, Martin Erik (2017): Eigenwerte und Eigenvektoren aus geometrisch-algebraischer Perspektive. In: PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung in Dresden 2017. Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/782> (22.12.2017).
- [23] Horn, Martin Erik (2016): Modern Linear Algebra. A Geometric Algebra Crash Course. Part V: Eigenvalues and Eigenvectors. OHP-Folien des Kurses „Mathematics for Business and Economics“ (Stand: 28. Nov. 2016), LV-Nr. 200 691.01, Hochschule für Wirtschaft und Recht Berlin / Berlin School of Economics and Law, Wintersemester 2016/2017. Veröffentlicht als Anhang des Beitrags [22], Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/782/954> (22.12.2017).
- [24] Horn, Martin Erik (2017): Zur Lösung Linearer Gleichungssysteme mit Hilfe gemischter Sandwich-Produkte. In: PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung in Dresden 2017. Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/801> (22.12.2017).
- [25] Horn, Martin Erik (2017): Modern Linear Algebra. A Geometric Algebra Crash Course. Part VI: Solving Systems of Linear Equations with Sandwich Products. OHP-Folien des Kurses „Mathematics for Business and Economics“ (Stand: 21. Jan. 2017), LV-Nr. 200 691.01, Hochschule für Wirtschaft und Recht Berlin / Berlin School of Economics and Law, Wintersemester 2016/2017. Veröffentlicht als Anhang des Beitrags [24], Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/801/956> (22.12.2017).
- [26] Horn, Martin Erik (2018): Matrizeninverse aus physikdidaktischer Sicht. Zur Veröffentlichung vorgesehen in: PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung in Würzburg 2018.
- [27] Horn, Martin Erik (2017): Modern Linear Algebra. A Geometric Algebra Crash Course. Part VII: Generalized Matrix Inverses. OHP-Folien des Kurses „Mathematics for Business and Economics“ (Stand: 19. Dez. 2017), LV-Nr. 200 691.01, Hochschule für Wirtschaft und Recht Berlin / Berlin School of Economics and Law, Wintersemester 2016/2017. Zur Veröffentlichung vorgesehen als Anhang des Beitrags [26].
- [28] Horn, Martin Erik (2016): Moderne Lineare Algebra im wirtschaftsmathematischen Kontext. In Walther Paravicini, Jörn Schnieder (Hrsg.): Hanse-Kolloquium zur Hochschuldidaktik der Mathematik 2015. Beiträge zum gleichnamigen Kolloquium an der Universität zu Lübeck, S. 103-129. WTM-Verlag, Münster.
- [29] HWR Berlin (2017): Elektronisches Vorlesungsverzeichnis der Hochschule für Wirtschaft und Recht Berlin, Wintersemester 2017/2018. Url: <https://campus4u.hwr-berlin.de> (30.10.2017).
- [30] Horn, Martin Erik (2017): Lösung einer Aufgabe zu Linearen Gleichungssystemen aus der Han-Dynastie mit GAALOP als Taschenrechner-Ersatz. In Ulrich Kortenkamp, Ana Kuzle (Hrsg.): BzMU 2017 – Beiträge zum Mathema-

- tikunterricht, Tagungsband der Jahrestagung der GDM 2017 in Potsdam, Bd. 2, S. 461-464. WTM-Verlag, Münster.
- [31] Horn, Martin Erik (2018): GAALOP als speziell-relativistischer Taschenrechner. In Christian Maurer (Hrsg.): Qualitätsvoller Chemie- und Physikunterricht – normative und empirische Dimensionen. Tagungsband der Jahrestagung der GDCP in Regensburg 2017, Band 38, S. 703-706, Universität Regensburg.
- [32] Hildenbrand, Dietmar; Pitt, Joachim; Koch, Andreas (2010): Gaalop – High Performance Parallel Computing Based on Conformal Geometric Algebra. In Eduardo Bayro-Corrochano, Gerik Scheuermann (Hrsg.): Geometric Algebra Computing in Engineering and Computer Science, S. 477-494. Springer-Verlag, London.
- [33] Schwinn, Christian; Hildenbrand, Dietmar; Stock, Florian; Koch, Andreas (2010): Gaalop 2.0 – A Geometric Algebra Algorithm Compiler. In Vaclav Skala, Eckhard Hitzer (Hrsg.): GraVisMa 2010 Workshop Proceedings, 2nd International Workshop on Computer Graphics, Computer Vision and Mathematics, S. 1-8. Union Agency, Plzen.
- [34] Steinmetz, Christian (2011): Optimizing a Geometric Algebra Compiler for Parallel Architectures using a Table-Based Approach. Bachelor-Thesis, eingereicht am Fachbereich Informatik der Technischen Universität Darmstadt.
- [35] Hildenbrand, Dietmar (2013): Foundations of Geometric Algebra Computing. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [36] GAALOP-Entwicklerteam – Pitt, Joachim; Hildenbrand, Dietmar; Schwinn, Christian; Charrier, Patrick; Steinmetz, Christian (2017): Homepage des Programm-Tools Geometric Algebra Algorithms Optimizer – GAALOP Website. Url: <http://www.gaalop.de> (25.02.2017).
- [37] Dirac, Paul Adrien Maurice (1939): The Relation between Mathematics and Physics, James Scott Prize Lecture delivered at Feb. 6, 1939. In: Proceedings of the Royal Society, Vol. 59, Part II, S. 122-129, Edinburgh.
- [38] Rötger, Antonia (2005): Zur Person – Matilde Marcolli, In: MaxPlanckForschung, Das Wissenschaftsmagazin der Max-Planck-Gesellschaft, Ausgabe 1/2005, S. 76-80.
- [39] Horn, Martin Erik (2016): Wie groß ist der Flächeninhalt eines Parallelogramms? In Institut für Mathematik und Informatik der Pädagogischen Hochschule Heidelberg (Hrsg.): BzMU 2016 – Beiträge zum Mathematikunterricht, Tagungsband der Jahrestagung der GDM 2016 in Heidelberg, Bd. 1, S. 461-464. WTM-Verlag, Münster.
- Dem Beitrag beigefügte Dateien**
- [40] Horn, Martin Erik (2018): Poster DD 02.03, ‚Die Geometrische Algebra mit GAALOP im Schnelldurchgang‘ vom 19. März 2018, siehe auch Url: <https://www.dpg-verhandlungen.de/year/2018/conference/wuerzburg/part/dd/session/2/contribution/3> (01.03.2018).
- [41] Horn, Martin Erik (2018): Moderne Lineare Algebra: Geometrische Algebra mit GAALOP. Übungsblätter des Moduls „Wirtschaftsmathematik“ der Bachelor-Poolveranstaltungen an der Hochschule für Wirtschaft und Recht Berlin, LV-Nr. 200601.07, überarbeitete und ergänzte Fassung vom 30. April 2018 (ursprüngliche Fassung vom 02. Okt. 2017). Sommersemester 2017, HWR Berlin.
- [42] Horn, Martin Erik (2018): Modern Linear Algebra: Geometric Algebra with GAALOP. Worksheets of the module „Mathematics for Business and Economics“ of joint first-year bachelor lessons at Berlin School of Economics and Law/Hochschule für Wirtschaft und Recht Berlin, LV-Nr. 200691.01 & 400691.01, Stand: 07. Jan. 2018. Wintersemester 2017/2018, BSEL/HWR Berlin.
- [43] Martin Erik Horn (2018): Solutions of two Problems about Systems of Simultaneous Linear Equations from Old Babylonia and from the Han Period with GAALOP as a Pocket Calculator Substitute. Erweiterte und ins Englische übersetzte Fassung des Beitrags „Lösung einer Aufgabe zu Linearen Gleichungssystemen aus der Han-Dynastie mit GAALOP als Taschenrechner-Ersatz“ [30].

Umfrage zu den Lehr/Lernzielen in physikalischen Praktika

Clemens Nagel*, Rüdiger Scholz⁺, Kim-Alessandro Weber[#]

*Experimentelle Grundausbildung und Hochschuldidaktik; Universität Wien,

⁺Institut für Quantenoptik, Leibniz Universität Hannover

[#]Institut für Didaktik der Mathematik und Physik, Leibniz Universität Hannover

clemens.nagel@univie.ac.at, r.scholz@iqo.uni-hannover.de, weber@iqo.uni-hannover.de

Kurzfassung

Der Aufwand, der den vielen Studierenden für ein erfolgreiches Durchlaufen der physikalischen Praktika abverlangt und von diesen als hoch eingeschätzt wird, rechtfertigt sich aus dem erwarteten Ertrag, der mit diesem Lehrveranstaltungstyp verbunden ist. Ob dieser Lernerfolg realisierbar ist, hängt sicher nicht zuletzt davon ab, ob die Inhalte und Methoden der jeweiligen Adressatengruppe angemessen sind. Sehr wichtig ist aber auch die Frage, ob die an die Lehrveranstaltung gestellten Lehr/Lernziele stimmig sind, zum Ausbildungsstand der Studierenden passen und schließlich, ob die Organisation und inhaltliche Ausgestaltung der Praktika zu den Zielen, die in aller Regel von den Verantwortlichen der Lehrveranstaltung vorgetragen und vertreten werden, passen. Hier wird eine Umfrage und deren Analyse präsentiert, in der Praktikumsleiterinnen und -leiter ihre Ziele und deren Wertigkeit aus einer abgestimmten Liste ausgewählt haben. Dies beschreibt den Ist-Zustand der in Praktika verfolgten Ziele aus deren Sicht und ist damit als ein erster Schritt einer Untersuchung von Ausbildungszielen der Physikpraktika im deutschen Sprachraum zu verstehen. Es zeigt sich jedoch bereits jetzt, dass strukturelle und inhaltliche Besonderheiten unterschiedlicher Praktika signifikant sind. Die Auswertung liefert ein aktuelles Bild der inputorientierten Lernziele physikalischer Hochschulpraktika und kann unter anderem Entscheidungsträgern bei der Erstellung von Curricula als Diskussionsgrundlage dienen. Bezüglich der Anfängerpraktika ist zudem ein Vergleich der Lehrenden- mit der Studierendenperspektive angeschlossen.

1. Ausgangspunkt – Grundidee – Zielekatalog

1.1. Ausgangspunkt

„Der hohe Stellenwert physikalischer Praktika ... verlangt deren gezielte adressatenspezifische Gestaltung. Dies betrifft Inhalte und Methodik einschließlich der eingesetzten Medien.“ [1]

Wer würde dem widersprechen? Damit ist allerdings sofort die Frage nach den Zielen, den Inhalten und dem erzielten Ausbildungserfolg aufgeworfen. Um bei der Frage der Ziele einen Schritt zu tun, der im Sinne einer Bestandsaufnahme bei den physikalischen Praktika in Deutschland und im deutschsprachigen Ausland eine Erfassung und Sichtung der Praktikumsziele erlaubt, wurde von der Arbeitsgruppe Physikalische Praktika in der DPG (AGPP) ein entsprechender Prozess durchgeführt. Folgende Maßnahmen wurden getroffen:

1.) **Entwicklung einer Liste von Zielen**, die von der großen Mehrheit der beteiligten Praktikumsleiterinnen und Praktikumsleiter als zutreffend, wichtig und im Wesentlichen umfassend eingeschätzt wird.

2.) **Entwicklung eines Online-Fragebogens** auf der Grundlage der Liste von Zielen.

3.) Durchführung und Analyse der Befragung.

Dieser Bericht liefert nach einer zusammenfassenden Darstellung des Hintergrundes und der Vorgehensweise in einem methodischen Teil eine Darstellung des Erhebungsinstruments, der Stichprobe, der Datenanalyse und der Ergebnisse.

Zudem sind die Ergebnisse einer Befragung von Studierenden (Fachschaftsvertreter/innen, Studienrichtungsvertreter/innen) angefügt, welche im Zuge der Bundesfachschaftentagung des Studienganges Physik 2016 in Konstanz die im Anfängerpraktikum verfolgten Ziele mit demselben Erhebungsinstrument bewertet haben. Dadurch kann die Lehrenden- mit der Studierendenperspektive direkt verglichen werden.

1.2. Grundmodell der Zielerfassung und -analyse

Den Hintergrund bildet die Adaption einer einschlägigen Darstellung für „advanced lab courses“. [2] Das dort zugrunde gelegte Modell physikalischer Praktika wurde für die vertretenen Praktika (s. u.) übernommen:

a. Physikalische Praktika sind effektive Einrichtungen physikalischer Lehre an Universitäten und Hochschulen.

- b. Der Lernerfolg der Studierenden kann und soll von der Organisation und thematisch-inhaltlichen Verfasstheit der Praktika abhängig sein und ist folglich maximierbar.
- c. Damit lohnen sich die Entwicklung von Zielen, die Ausrichtung der Arbeit im Praktikum an diesen Zielen und die systematische Evaluation des Lernerfolges.

Auf ein methodisches Manko des Vorgehens soll hier verwiesen werden. Sowohl die Entwicklung des Zielekatalogs, als auch die Entwicklung des Fragebogens, die Beantwortung der Fragen und die Auswertung wurde durch die gleiche Gruppe der Praktikumsleiter oder Untergruppen vorgenommen: mögliches Problem: Ein Self-fulfilling“-Phänomen.

1.3. Katalog der Ziele

Schon die Bereitstellung der einvernehmlichen Liste von Zielen hat sich als Prozess erwiesen, der empfindlich von der Einbindung in die Curricula der jeweiligen Hochschulen und Universitäten und den korrespondierenden Vorstellungen der jeweiligen Leiterinnen und Leiter abhängt. Die Grundlage einer ausführlichen Diskussion und Bearbeitung (Workshop AGPP Bad Honnef, 2014) bildete eine durch den Vorstand der AGPP bereitgestellte detaillierte Liste von möglichen Zielen, die aus der Darstellung von Zielen der University of Colorado Boulder entwickelt worden sind. [3]

Sämtliche Zielformulierungen hatten für alle vertretenen Praktika (s. u.) Bedeutung, Wertigkeiten konnten damit in jedem Fall zugeordnet werden, wenngleich die Validität der Ziele (bzw. der Items in den Skalen) im Vorfeld nicht ausführlich und systematisch getestet, sondern nur in Gruppendiskussionen im Rahmen des Workshops der AGPP in Bad Honnef 2014 diskutiert und dabei nur kommunikativ validiert wurde. Natürlich kann dabei nicht ausgeschlossen werden, dass einige Ziele unterschiedlich interpretiert werden. Es sei in diesem Zusammenhang auf die Konstruktvaliditätsprüfung durch die Faktoranalyse verwiesen, siehe Kapitel 3.2.

Die Ausbildungsziele wurden gemäß ihrer übergeordneten Sammelbegriffe bereits im Befragungsinstrument in 6 Skalen eingeteilt:

1. Modellbildung: Physikalische Grundlagen

(1) Grundlegende physikalische Ideen verstehen; (2) Ein Vorhersagemodell entwickeln; (3) Das Vorhersagemodell anwenden; (4) Das Vorhersagemodell überprüfen; (5) Modell anpassen bei Diskrepanz Vorhersage/Messung

2. Modellbildung: Messmethode, Messaufbau

(1) Grundlegende physikalische und technische Ideen verstehen (2) Ein Modell des Messaufbaus

entwickeln; (3) Kalibrieren/das Modell des Messaufbaus anwenden; (4) Modell des Messaufbaus überprüfen; (5) Modell des Messaufbaus anpassen; (6) Qualität der Messdaten abschätzen; (7) Messdaten mit Vorhersagewerten vergleichen; (8) Statistische Methoden anwenden

3. Planung und Durchführung des Experiments

(1) Überprüfbare Forschungsfrage aufstellen; (2) Experimentalaufbau effektiv planen; (3) Sicherheitsaspekte; (4) Messdaten während des Experiments skizzieren; (5) Zustand des Experiments regelmäßig evaluieren; (6) Laborbuch; (7) Messapparatur in funktionale Untereinheiten einteilen

4. Kommunikation

(1) Quellen finden; (2) Quellen beurteilen; (3) Quellen auswerten; (4) Anwendbarkeit und Genauigkeit des Vorhersagemodell überzeugend darstellen (5) Beschreibung des Experiments; (6) Daten glaubwürdig, überzeugend, genau und interessant darstellen; (7) Daten ansprechend präsentieren; (8) Datenanalyse und Schlussfolgerungen; (9) Eigene Projekte vorschlagen; (10) Arbeitsteilung; (11) Vorträge halten; (12) Artikel verfassen; (13) Poster erstellen und präsentieren

5. Messtechnik

(1) Vorhersagen erstellen; (2) Computer-Analyse-Programme nutzen; (3) LabVIEW verwenden; (4) Sensoren und Aktuatoren einsetzen; (5) Wichtige Messgeräte erläutern und anwenden; (6) Fertigkeiten beim Aufbau optischer Experimente

6. Einstellungen ändern

(1) Sorgfaltsdisziplinen (Sorgfalt*, Sauberkeit*, Ordnung, Disziplin, Gewissenhaftigkeit, Hilfsbereitschaft, Ehrlichkeit, Pünktlichkeit, Zuverlässigkeit; Interesse, Selbstlernkompetenz)¹ (4) Freude; (5) Ehrgeiz; (6) Respekt; (7) Mut; (8) Selbstbewusstsein, Entscheidungsfreudigkeit; (9) Rücksicht; (10) Wissenschaftliches Schreiben als Lernmethode

2. Erhebungsinstrument, Stichprobe und Datenanalyse

2.1. Erhebungsinstrument

Das Erhebungsinstrument ist ein online-Fragebogen mit offenen Fragen zur Erfassung der Metadaten zur Stichprobe und mit geschlossenen Fragen zur Beurteilung, wie stark die jeweils genannten Ausbildungsziele mit den aktiv verfolgten Praktikumszielen übereinstimmen (zum Instrument vgl. [4]).

¹ Die Sorgfaltsdisziplinen wurden im Online-Umfrageinstrument ungewollt in 3 unterschiedlichen, statt in einem gesammelten Item abgefragt. Die mit (*) markierten Disziplinen wurden einzeln, der Rest en bloc abgefragt. Dies 3 zusammengehörigen Items durch Mittelung nach der Befragung wieder zusammengeführt, da sie nachweislich Teil ein und desselben Konstrukts sind.

Jede Auskunft gebende Person hat die Möglichkeit, mehrere Praktika aus ihrem Wirkungsbereich zu beschreiben. In der Auswertung wird jedes beschriebene Praktikum als Fall gezählt.

Die Metadaten umfassen das Datum der Antwortabgabe, den Namen der Auskunft gebenden Person, die (vorkategorisierte) Art des beschriebenen Praktikums mit der Möglichkeit, unter „Sonstige“ auch eine individuelle Kategorisierung/Beschreibung vorzunehmen und die Anzahl der Studierenden, die das beschriebene Praktikum durchschnittlich pro Jahr besuchen. Es besteht die Möglichkeit, Antwortfelder frei zu lassen, wobei Fälle ohne Kategorisierung des beschriebenen Praktikums von der Auswertung ausgeschlossen werden.

Die geschlossenen Fragen bieten 4 Antwortmöglichkeiten und reichen von 1 (hohe Übereinstimmung) bis 4 (keine Übereinstimmung). Hier wird mit jedem Frage-Item nach der Übereinstimmung (hohe, über-, unterdurchschnittlich, keine) der oben genannten Grobziele mit jenen Zielen, die im beschriebenen Praktikum verfolgt werden, gefragt. Ein Grobziel entspricht also einem Frage-Item.

2.2. Stichprobe

Die Stichprobe wurde aus dem Kreis aller Praktikumsleiterinnen und -leiter und aller Betreuerinnen und Betreuer von Hochschulpraktika gezogen, die sich bei der AGPP für die PLT-Info-Mailingliste registriert haben. Das sind 399 Personen (Juli 2014).

Im Zeitraum von 29.07.2014 bis 18.3.2015 nahmen 53 Personen an der Befragung teil (womit die Rücklaufquote 13 % beträgt) und haben 64 Praktika beschrieben. 11 Praktika wurden durch mehrere Personen beschrieben. Der Gesamtdatensatz, der für die weitere Analyse verwendet wird, beinhaltet 75 Praktikumsbeschreibungen. Die beschriebenen Praktika stammen von 44 Standorten, von denen 41 in Deutschland, zwei in Österreich, und einer in Slowenien liegen. Dabei handelt es sich um 9 Hochschulen bzw. Fachhochschulen, 34 Universitäten und eine sonstige tertiäre Bildungseinrichtung. Pro Standort wurden überwiegend nur ein bis zwei Praktika beschrieben, im Maximum jedoch fünf. In der Bundesrepublik Deutschland gibt es laut Hochschulrektorenkonferenz 2016 insgesamt 327 Universitäten und pädagogische Hochschulen sowie 84 Fachhochschulen, in denen Physik – in welcher Form auch immer – gelehrt wird [5]. Das bedeutet, dass die gegenständliche Stichprobe einen Umfang von rund 10% der Grundgesamtheit aller relevanten Standorte beider Kategorien (Uni, FH) abdeckt.

Wenn man davon ausgeht, dass lange nicht an allen Standorten auch ein Physikpraktikum angeboten wird, sondern oftmals nur Vorlesungen und/oder Übungen, wenn die Physik nur „Hilfswissenschaft“ ist, so ist die tatsächliche Abdeckung der Grundgesamtheit durch die Stichprobe noch größer. Die Befragung gibt somit einen weitläufigen Überblick über Ziele der im Hochschulbereich angebotenen physikalischen Praktikumslehrveranstaltungen und die Autoren gehen davon aus, dass es sich um eine repräsentative Stichprobe handelt.

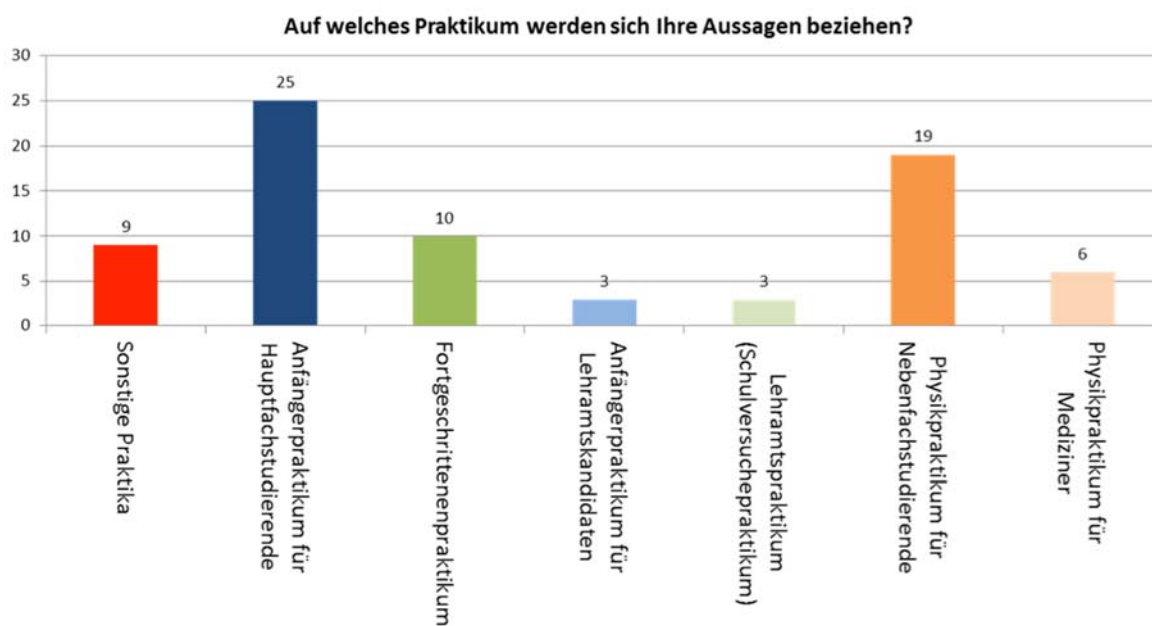


Abb. 1: Anzahl beschriebener Praktika nach Kategorien

2.3. Datenanalyse

Die Antworten wurden nach den beschriebenen Praktika geordnet, um Vergleiche zwischen den unterschiedlichen Praktika möglich zu machen (siehe Abb.1). Da einzelne Teilstichproben so zu klein sind, wurden die unterschiedlichen Praktikumstypen in drei neue Hauptkategorien zusammengefasst:

- a) *Anfängerpraktika (AP)*
Alle Praktika für Physik Hauptfach- und Lehramtskandidaten, die dem Erlernen grundsätzlicher experimenteller Fertigkeiten zu einem frühen Zeitpunkt im Curriculum dienen.
- b) *Fortgeschrittenenpraktika (FP)*
Alle Praktika, die (im Hauptfach- wie auch Lehramtsstudium der Physik) dem Erlernen fortgeschrittener experimenteller Fertigkeiten oder dem Erlernen sehr spezialisierter Inhalte dienen und im Curriculum zu einem späteren Zeitpunkt als Anfängerpraktika vorgesehen sind.
- c) *Nebenfachpraktika (NP)*
Alle Physikpraktika, die für Studierende anderer Studienrichtungen als den oben genannten konzipiert sind.

Dadurch ergibt sich eine neue, statistisch auswertbare Aufteilung der Praktikums-kategorien, wie in Abb. 2 dargestellt.

Die quantitativen Daten wurden codiert, in SPSS erfasst und ausgewertet. Die Gesamtheit der Ausbildungsziele (Items) sowie unterteilten Skalen wurden mit Cronbachs Alpha hinsichtlich ihrer Reliabilität [6] und mit einer Hauptachsen-Faktoranalyse hinsichtlich ihrer Konstruktvalidität [7] getestet. Skalen- (und Item)-Vergleiche wurden mit dem t-Test statistisch geprüft. Das allgemeine Signifikanzniveau α wurde für alle Auswertungen mit $1 - \alpha = 95\%$ angesetzt. Fallausschluss bei Nichtbeantwortung erfolgt für die Reliabilitätsanalyse der Skalen mit Cronbachs Alpha und Dimensionsreduzierung durch Hauptkomponenten-Faktoranalyse fallweise (listenweise) und bei Mittelwert-Vergleichen mit dem t-Test paarweise.



Abb. 2: Neu zusammengefasste Praktikums-kategorien

Zudem wurden die Mittelwerte der Ziele in den drei Praktikums-kategorien einer Rangfolgeanalyse unterzogen, da die 4-teilige Antwortskala die Möglichkeit der Unterteilung in drei Bereiche erlaubt:

- *1,00-1,99: Primärziele*
Hier gibt es eine absolute bis mittlere Übereinstimmung ...
- *2,00-2,99: Sekundärziele*
Hier gibt es eine mittlere Übereinstimmung ...
- *3,00-4,00: Tertiärziele*
Hier gibt es keine bis zu einer mittleren Übereinstimmung ...

der genannten Ziele mit jenen, die im beschriebenen Praktikum verfolgt werden.

Die Autoren treffen die durch Think-Aloud-Pretesting [8] begründete Annahme, dass eine Übereinstimmung der im Testinstrument genannten Ziele mit jenen, die im beschriebenen Praktikum verfolgt werden, gleichzusetzen damit ist, dass die Lernumgebung (Konzeption, Methodik, Lernunterlagen, Lehrende, etc.) in ihrer Gesamtheit auch in gleichem Maße darauf abzielt, diese Ziele zu erreichen.

3. Ergebnisse

Die deskriptive Statistik aller Ziele ergibt in der Musteranalyse der drei Praktikums-kategorien zunächst ein sehr ähnliches Bild der unterschiedlichen Prioritäten, mit welchen die Ziele in den Praktika verfolgt werden (Abb. 3.).

Wichtige Ziele des Anfängerpraktikums (AP) sind - bis auf wenige Ausnahmen- auch wichtige Ziele der Fortgeschrittenenpraktika (FP) und der Nebenfachpraktika (NP). Die Ausnahmen sind im Wesentlichen das [Führen eines Laborbuches], und [Rücksichtnahme], die für das FP weniger wichtig ist als für AP und NP sowie [Quellen finden/beurteilen/auswerten], [Vorträge halten] und [Sicherheitsaspekte] berücksichtigen, die für das FP wichtiger sind als für die beiden anderen Praktikums-kategorien.

Die Nebenfachpraktika heben sich deutlich dadurch ab, dass bis -auf wenige Ausnahmen- die Ziele mit geringerer Priorität verfolgt werden, als bei den beiden anderen Praktikums-kategorien. NP haben auch meist weniger ECTS-Umfang als AP und FP, daher scheint eine andere Prioritätensetzung nachvollziehbar. Bei einigen Zielen fällt auf, dass sie entweder mit gleich hoher Priorität wie im AP verfolgt werden ([Grundlegende physikalische Ideen verstehen], [Statistische Methoden anwenden], [Messdaten mit Vorhersagewerten vergleichen], [Datenanalyse und Schlussfolgerungen], sowie fast alle Ziele in der Skala „Einstellungen ändern“).

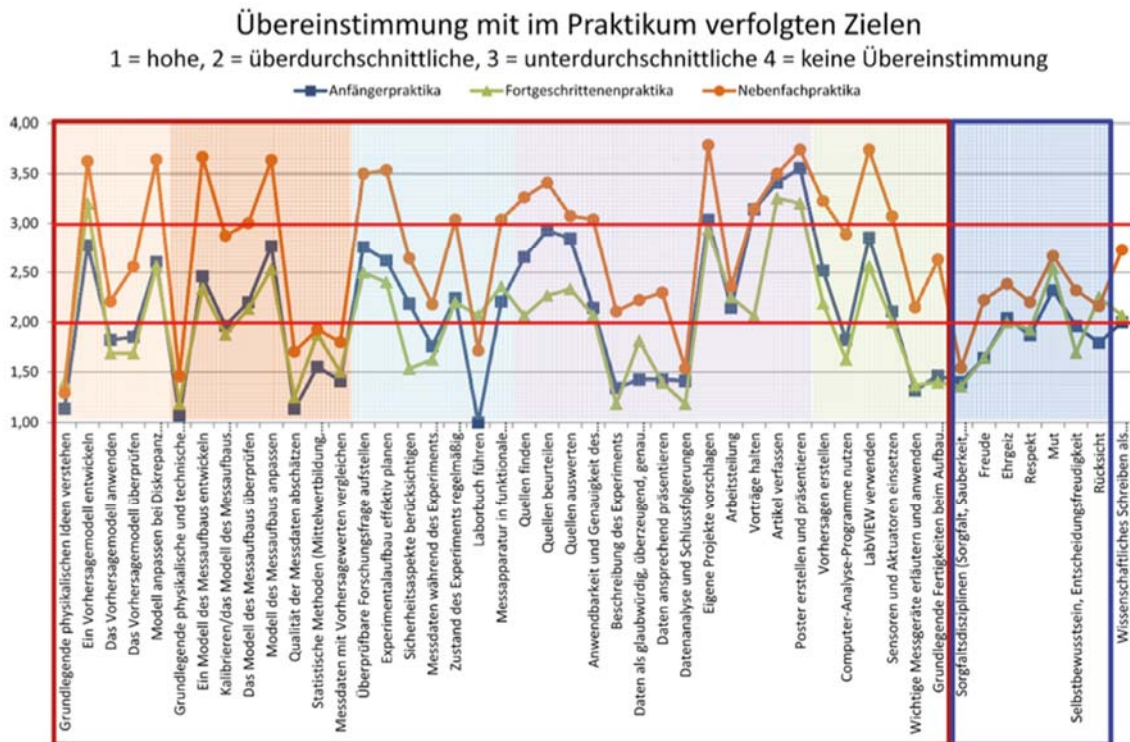


Abb. 3: Musteranalyse in den 3 Praktikums-kategorien

Die Ziele weisen insgesamt eine hohe *Skalenreliabilität* auf und zeigen in der Faktoranalyse zwei deutliche Faktoren, wenn man das letzte Ziel aus Bereich „Einstellungen ändern“, nämlich [wissenschaftliches Schreiben als Lernmethode] zu begreifen, aus der Analyse ausnimmt. Diese Faktoren sind in Abb. 3 durch farbige Rahmen markiert: kognitive und prozessorientierte Ziele (roter Rahmen), die man auch als fachliche Ziele zusammenfassen kann einerseits und affektive bzw. psychomotorische Ziele (blauer Rahmen), die man als metafachliche Ziele zusammenfassen kann, andererseits. Abb. 11 (siehe Anhang) zeigt, welche Ziele in den unterschiedlichen Praktika mit welcher Priorität verfolgt werden, Die Farbcodierung der Zieleskalen gem. Abb. 3 ist beibehalten.

Auffälligkeiten

(a) AP und NP zeichnen sich als jene aus für die [Laborbuch führen] Primärziel ist, im FP dagegen nur Sekundärziel. [Grundlegende physikalische und technische Ideen verstehen] ist bei allen Praktikums-kategorien unter den topgereihten Primärzielen ist. Alle beschriebenen Praktika geben dieses Ziel mit höchster Zustimmung an.

(b) Es fällt auf, dass das AP mit 22 von 47 gelisteten Zielen die größte Anzahl an Primärzielen aufweist. Für das FP sind 21 Primärziele gereiht, für das NP nur 8. Umgekehrt weist das AP 4 Tertiärziele aus, das FP 3 und das NP 20.

3.1. Primär-, Sekundär- und Tertiärziele

Das Set der 8 Primärziele des NP ist auch in den Primärzielen der beiden anderen Praktikums-kategorien enthalten (ausgenommen [Laborbuch führen] beim FP). Es stellt somit die Kernzielgruppe physikalischer Praktika dar, die je nach Zielgruppe (Anfänger oder Fortgeschrittene) um ein entsprechendes Primärzielset unterschiedlicher Wichtigkeit erweitert wird. Man erkennt aber auch deutlich, welche Ziele in den physikalischen Hochschulpraktika (AP, FP oder NP), am wenigsten verfolgt werden. Dazu gehören das [Verfassen von Postern und Publikationen] sowie das [Vorschlagen eigener Projekte.]

Abb. 6 zeigt die Ziele mit Farbcodierung der Primär-, Sekundär- und Tertiärziele (grün, orange und rot) geblockt nach den Skalen. Angeführt ist der Mittelwert für jedes Ziel.“

3.2. Auswertung der Ziele-Skalen

Die Abb. 4 und 7 bis 12 (7 bis 12: siehe Anhang) zeigen die Muster-Analysen der einzelnen Zieleskalen im Detail für die drei Praktikums-kategorien AP, FP und NP. Gelb unterlegt sind Ziele, die in AP und NP signifikant unterschiedlich verfolgt werden, lachsfarben umrahmt sind jene Ziele, die in AP und FP signifikant unterschiedlich verfolgt werden. Die waagerechten roten Striche markieren die oben angegebenen Prioritäts-Bereiche: Ganz unten befindet sich der Bereich der Primärziele, in der Mitte jener der Sekundärziele und oben jener der Tertiärziele.

Skala Modellbildung: Physikalische Grundlagen

Abb. 7 (siehe Anhang) zeigt die Volatilität dieser Zieleskala und jedoch ähnlich für alle 3 Praktikums-kategorien. Trotzdem weist die Skala mit $\alpha = 0,75$ eine angemessen hohe Reliabilität auf. Es findet sich eines der 8 Kernziele physikalischer Praktika in dieser Skala, die innerhalb dieser einen von zwei Faktoren bildet, nämlich das Verstehen grundlegender physikalischer Ideen. Der andere Faktor umfasst Fertigkeiten in Bezug auf das Vorhersagemodell, dessen Ziele unterschiedlich bewertet werden. Dem Entwickeln oder Anpassen eines Vorhersagemodells wird in allen Praktika eine niedrigere Priorität zugeschrieben, als dem Anwenden und Überprüfen eines Vorhersagemodells.

Skala Modellbildung: Messmethode, Messaufbau

Auch in dieser Skala (Abb. 8, siehe Anhang) ist die gleiche Tendenz wie in der ersten Skala zu beobachten. AP und FP haben gleiche Zieleprioritäten, NP weist dasselbe Muster auf nur mit generell niedriger Priorität der Ziele, ausgenommen der Primärziele [Statistische Methoden] und [Messdaten mit Vorhersagewerten vergleichen]. Gemeinsam mit [Qualität der Messdaten abschätzen] und [Grundlegende physikalische und technische Ideen verstehen] finden sich diese vier Ziele im Set der 8 Kernziele aller Praktikums-kategorien wieder. Ziele, die sich dem Modell des Messaufbaues widmen, sind nicht Primärziel. Einzig [Kalibrieren/das Modell des Messaufbaues anwenden], ist im AP und FP Primärziel. Die Reliabilität der Skala ist mit $\alpha = 0,83$ hoch. Innerhalb der Skala lassen sich trotzdem trennscharfe unabhängige Faktoren erkennen.

Skala Planung und Durchführung des Experiments

In dieser Skala (Abb. 9 im Anhang) finden sich zum ersten Mal statistisch signifikante Abweichungen des generellen Musters der Prioritätenverhältnisse zwischen AP, FP und NP: [Sicherheitsaspekte berücksichtigen] ist nur für das FP ein Primärziel und [Laborbuch führen] ist hier ausschließlich ein Sekundärziel. Das Ziel [Messdaten während des Experiments skizzieren] wird de facto gleichwertig in allen drei Praktika – weil nicht unterscheidbar – verfolgt. Die Reliabilität der Skala ist mit $\alpha = 0,77$ angemessen. In der Faktoranalyse zeigen sich nur 2 schwach ausgeprägte Faktoren: Ziele zu Fertigkeiten/Tätigkeiten die in der Vorbereitung des Experiments von Bedeutung sind und Ziele zu Fertigkeiten/Tätigkeiten die für die Durchführung des Experiments entscheidend sind.

Skala Kommunikation

Abbildung 10 (siehe Anhang) zeigt die Skala Kommunikation mit ebenfalls höchst unterschiedlich prioritäre Bewertungen der Ziele. Das generelle

Muster setzt sich fort, wird aber an einigen Stellen deutlich durchbrochen. Ziele, die sich auf Quellen (Literatur) beziehen, weisen teils statistisch signifikante 3-stufige Prioritätsstaffelung auf. Das Finden, Beurteilen und Auswerten von Quellen zählt für das FP zu den wichtigeren Sekundärzielen, für das AP zu den unwichtigeren Sekundärzielen und für das NP zu den Tertiärzielen. Wichtiger sind Ziele zu Fertigkeiten zur Beschreibung und Präsentation des Experiments und der daraus gewonnenen Daten befassen (im AP und FP primär, im NP sekundär). Praktisch identisch prioritär in allen drei Praktikums-kategorien sind [Datenanalyse und Schlussfolgerungen] (Primärziel und eines der 8 Kernziele aller Praktika), [Arbeitsteilung] (Sekundärziel) sowie [Artikel verfassen und Poster erstellen und präsentieren] (Tertiärziel). [Vorträge halten] nimmt im FP einen statistisch signifikant höheren Stellenwert ein. [Eigene Projekte vorschlagen] gehört eher zu den Zielen mit niedrigerer Priorität (im NP sogar statistisch signifikant niedrigerer als bei AP und FP, dort also praktisch gar nicht verfolgt). Die Skala weist eine gute Reliabilität von $\alpha = 0,85$ auf und zeigt in der Faktoranalyse 3 innere Faktoren: Den Umgang mit Literatur im Kommunizieren/Dokumentieren von Ergebnissen, Skills für den klassischen Bericht und Präsentations- und Kommunikationstechniken (für Tagungen etc.) erlernen.

Skala Messtechnik

In dieser Skala verfolgen AP und FP die Ziele in sehr ähnlicher Priorität. Im NP zeigt sich das gleiche Muster, fällt nur in der Priorität niedriger aus (Abb. 11, s. Anhang). Die Reliabilität ist mit $\alpha = 0,83$ gut; keine Unterteilung in Faktoren erkennbar.

Skala Einstellungen ändern

Abb. 12 (siehe Anhang) zeigt die Detailanalyse zur Skala „Einstellungen ändern“, die im Wesentlichen die affektiven Ziele der Praktika beinhaltet, welchen durchaus eine hohe Wertigkeit beigemessen wird. Nur [Freude und wissenschaftliches Schreiben als Lernmethode begreifen] weist einen statistisch signifikanten Prioritätsunterschied zu AP und FP auf, alle anderen Ziele sind, wenngleich sie auch optisch dem generellen Muster dieser Zielebewertung folgen, nicht unterscheidbar zwischen den einzelnen Praktikums-kategorien. Hier finden sich auch weitere Kernziele aller Praktikums-kategorien, nämlich [Sorgfaltsdisziplinen]. Die Reliabilität der Skala ist mit $\alpha = 0,85$ gut. Nimmt man [wissenschaftliches Schreiben] als singuläres Merkmal heraus, ergibt die Faktoranalyse zwei deutlich unterscheidbare Faktoren. Auf der einen Seite stehen die Sorgfaltsdisziplinen (Sorgfalt, Sauberkeit, Ordnung, etc.). Auf der anderen Seite stehen die Ziele, die primär der individuellen Persönlichkeitsentwicklung dienen (Freude, Ehrgeiz, Mut, Selbstbewusstsein, Rücksicht,...).

4. Zusammenfassung und Diskussion

Die Befragungsergebnisse liefern ein aussagekräftiges Bild der Ziele, die in den Physikpraktika deutschsprachiger Hochschulen und Universitäten verfolgt werden. Die 3 Hauptkategorien, Anfänger-, Fortgeschrittenen- und Nebenfachpraktika, sind einzeln charakterisiert und weisen 8 Kernziele aus, die bei allen Studienanfängern im Rahmen der experimentalphysikalischen Ausbildung verfolgt werden:

- Grundlegende physikalische Ideen verstehen (Anm.: Die Physik „hinter“ den Experimenten)
- Grundlegende physikalische und technische Ideen verstehen (Anm.: Die Physik und Technik der Experimente und Messgeräte)
- Sorgfaltdisziplinen wie Sorgfalt, Sauberkeit, Ordnung, Disziplin, Gewissenhaftigkeit, Hilfsbereitschaft, Ehrlichkeit, Pünktlichkeit, Zuverlässigkeit, Interesse und Selbstlernkompetenz
- Datenanalyse und Schlussfolgerungen
- Qualität der Messdaten abschätzen
- Laborbuch führen (im weitesten Sinne: schriftliches Dokumentieren des Experiments)
- Messdaten mit Vorhersagen vergleichen
- Statistische Methoden anwenden (Mittelwertbildung, nichtlineare Anpassung, χ^2 -Test)

Diese Ziele werden auch in den Fortgeschrittenenpraktika verfolgt. In Nebenfachpraktika können, bedingt durch die in der Regel geringere Zahl an zugeteilten ECTS, weniger Ziele und diese in geringerer Ausprägung verfolgt werden. Drei dieser Ziele sind eindeutig den „soft skills“ zuzuordnen, womit die Breite der Bildungsfunktion der Physikpraktika unterstrichen wird. Es zeigt sich auch deutlich, welche Ziele in allen drei Praktikumskategorien nur wenig verfolgt werden können. Es überraschte, dass Ziele, die sich mit Kommunikation, Präsentieren, Schreiben und Publizieren beschäftigen, erst bei den Sekundärzielen im FP sichtbar werden.

Einige dieser Ziele sind als kognitive Ziele gemäß der Bloom'schen Lernzieltaxonomie auszumachen. Auch wenn diese Ziele (wie z.B. Grundlegende physikalische Ideen verstehen) durchaus auch in Vorlesungen verfolgt werden können und einige prozessorientierte Ziele (zu erwerbende Fertigkeiten, wie z.B. Datenanalyse und Schlussfolgerungen) an Stelle von Praktika auch in Übungen vermittelt werden, so sind diese Ziele im engerem Sinne jedoch Alleinstellungsmerkmale der Praktika. Nur diese Art von Lehrveranstaltung bietet den Makrokontext eines realen Lehr-Experiments (Experiment-Kontext in Vorlesungen oder Übungen bestenfalls in Form von Demonstrationsexperimenten).

Die Ziele sind einer Umfrage unter den Leiterinnen und Leitern der Praktika entnommen. Es liegt somit keine „neutrale“ Bestandsaufnahme des Zustandes

der Praktika vor, sondern das Momentbild der Selbsteinschätzungen der für die Praktika Verantwortlichen. Daher kann diese Befragung auch keine Aussage darüber treffen, ob und welche Maßnahmen für deren Erreichung gesetzt werden und auch nicht, ob sie messbar Erfolg haben. Dies hätte zweifellos den Rahmen der Befragung bei weitem gesprengt und sollte Ziel fortführender Untersuchungen sein. Geeignet wäre hier z. B. die Analyse der Versuchsanleitungen, der jährlichen Evaluationen, der unterschiedlichen Lehr/Lern-Methodiken, eine Studierendenbefragung nach Absolvierung der Praktika und nicht zuletzt ein quantitativer Test experimenteller Kompetenzen, um Rückschluss darauf zu erhalten, welche der Ziele auch wirklich und in welchem Maße erfolgreich umgesetzt werden konnten. Dieser Mammutaufgabe wird man bestenfalls im Zuge einer Metastudie nachkommen können. Bis dahin vertrauen die Autoren dieser Studie auf die Einschätzung der befragten Praktikumsleiterinnen und -leiter, sowie der Betreuerinnen- und Betreuer, dass die Maßnahmen in den Praktika auf die Erreichung der angegebenen Ziele gerichtet sind. Die Erfahrungen der Autoren zu den Lerninhalten, den Methoden und dem persönlichen Engagement der Lehrenden in zahlreichen Praktika, über viele Jahre des Austausches im Rahmen der „DPG Schule Physikalische Praktika“ in Bad Honnef und der Praktikumsleiter-tagung an wechselnden Standorten hinweg, stützen die oben formulierte Hypothese.

Allen Personen, die in die Entwicklung von Studiengängen, Curricula etc. im naturwissenschaftlich-technischen Bereich eingebunden sind, zeigt diese Befragung, dass die Zu- oder Aberkennung von ECTS für Physikpraktika mit Sicherheit einen Einfluss auf die oben beschriebenen Lehrziele hat.

5. Vergleich der Lehrenden- mit der Studierendenperspektive zum Anfängerpraktikum

Im Mai 2016 fand in Konstanz die Bundesfachschaftentagung des Studienganges Physik statt, bei dem engagierte Studierende und gewählte Studienrichtungsvertreter/innen aus dem gesamten deutschen Sprachraum zusammenkamen. Im Zuge dieser Tagung wurden die Teilnehmer/innen gebeten, die Online-Befragung hinsichtlich der Ziele im Anfängerpraktikum durchzuführen. Sie wurden gefragt: „Bitte bewerten Sie, wie gut die unten genannten Lernziele mit jenen übereinstimmen, die Sie selbst im physikalischen Anfängerpraktikum verfolgt haben.“ Andere Praktikurstypen bleiben bei dieser Befragung unberücksichtigt.

5.1. Zusammensetzung der Stichprobe

An dieser Umfrage nahmen 66 Personen teil (60 Studiengang Physik, 6 Studiengang Lehramt Physik; Vertreter/innen von 35 verschiedenen Universitätsstandorten, kein Fachhochschulstandort).

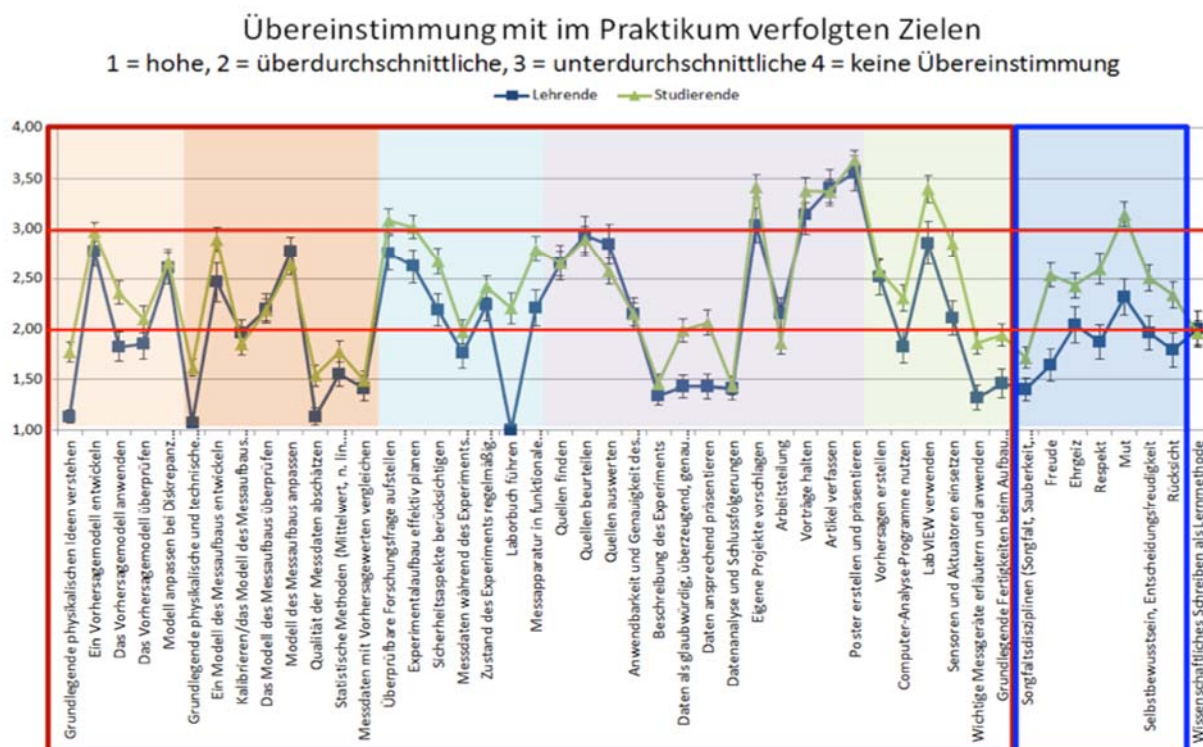


Abb. 4: Musteranalyse der Ziele im Anfängerpraktikum Vergleich: Lehrende - Studierende

32 der Standorte sind in Deutschland, zwei in der Schweiz, einer in Österreich. Da auf dieser Tagung nur jene Standorte vertreten waren, die auch ein Physikstudium anbieten (das auch ein Physikpraktikum beinhaltet), ist die Reichweite ähnlich groß einzuschätzen, wie bei der Lehrendenbefragung.

5.2. Ergebnisse im Vergleich

Abb. 13 zeigt die Musteranalyse, in ähnlicher Weise wie Abb. 3 (Ziffer 3, Ergebnisse), den direkten Vergleich der Bewertung der Ziele durch Lehrende und Studierende. Auffallend ist auf den ersten Blick die Ähnlichkeit der Muster. Erst eine Analyse auf Item-Niveau mit dem t-Test löst dabei die Frage nach signifikanten Unterschieden in der Bewertung der Ziele des Anfängerpraktikums. Abb. 5 zeigt jene Items, die auf einem Level von $1 - \alpha = 95\%$ einen signifikanten Unterschied in der Bewertung durch Lehrende und Studierende aufwiesen.

In Abb. 5 werden die Ziele zusätzlich mit Farbcodierung der Primär-, Sekundär und Tertiärziele (grün, orange und rot) gezeigt. So ist schnell ersichtlich, welche Ziele deutlich unterschiedlich bewertet werden. Jedoch muss man hierfür auch immer die Musteranalyse (Abb. 4) im Auge behalten. Denn wo sich generell ein gleiches oder ähnliches Muster zeigt, das über einen ganzen Skalenbereich verschoben ist, kann sich durchaus ein Bewertungswechsel von z.B. Primär- zu Sekundärziel ergeben, der jedoch nicht isoliert betrachtet werden kann.

Ein Beispiel hierfür sind die Ziele aus den Skalen „Messtechnik“ und „Einstellungen ändern“. In beiden Skalen werten die Studierenden die Ziele als weniger zutreffend mit Ausnahme der Ziele [Vorhersagen erstellen] und [Ehrgeiz]. Ein deutlicher Unterschied wiederum zeigt sich in der Bewertung der Ziele [Daten als glaubwürdig, überzeugend, genau und interessant darstellen] und [Daten ansprechend präsentieren] und auch [Das Vorhersagemodell anwenden]. Diese Ziele sehen die Studierenden als deutlich weniger im Praktikum vermittelt als die Lehrenden, hier verläuft auch das Muster diametral zu den anderen Zielen in der Skala.

Eine Sonderstellung nimmt ganz bestimmt das Ziel [Laborbuch führen] ein, welches mit Abstand den größten Unterschied in der Einschätzung der Lehrenden und Studierenden aufweist. Dieser sollte jedoch nicht überbewertet werden, da die Validität der Antworten auf diese Frage bezweifelt werden muss, weil unter den Lehrenden geklärt war, was alles unter dem Begriff Laborbuch zusammengefasst ist (Labormitschrift, Bericht, Protokoll, Laborbuch, etc. – alles, was mit der schriftlichen Auswertung und Dokumentation der Messdaten zu tun hat), aber unter den Studierenden nicht. Hier kann es durchaus sein, dass diese unter „Laborbuch“ tatsächlich nur jene Notizen verstehen, die während der Anwesenheit im Praktikum gemacht werden.

	Lehrende		Studierende	
	Mittelwert ± StAbwMW		Mittelwert ± StAbwMW	
Grundlegende physikalische Ideen verstehen	● 1,14 ± 0,07	●	● 1,77 ± 0,09	
Das Vorhersagemodell anwenden	● 1,82 ± 0,15	●	● 2,36 ± 0,12	
Grundlegende physikalische und technische Ideen verstehen	● 1,07 ± 0,05	●	● 1,62 ± 0,09	
Qualität der Messdaten abschätzen	● 1,14 ± 0,08	●	● 1,54 ± 0,10	
Sicherheitsaspekte berücksichtigen	● 2,19 ± 0,16	●	● 2,68 ± 0,13	
Laborbuch führen	● 1,00 ± 0,00	●	● 2,20 ± 0,16	
Messapparatur in funktionale Untereinheiten einteilen	● 2,21 ± 0,18	●	● 2,80 ± 0,12	
Daten als glaubwürdig, überzeugend, genau und interessant darstellen	● 1,43 ± 0,11	●	● 1,98 ± 0,11	
Daten ansprechend präsentieren	● 1,43 ± 0,12	●	● 2,06 ± 0,12	

	Lehrende		Studierende	
	Mittelwert ± StAbwMW		Mittelwert ± StAbwMW	
Computer-Analyse-Programme nutzen	● 1,82 ± 0,16	●	● 2,30 ± 0,13	
LabMEW verwenden	● 2,86 ± 0,22	●	● 3,40 ± 0,13	
Sensoren und Aktuatoren einsetzen	● 2,11 ± 0,17	●	● 2,85 ± 0,13	
Wichtige Messgeräte erläutern und anwenden	● 1,32 ± 0,12	●	● 1,86 ± 0,11	
Grundlegende Fertigkeiten beim Aufbau optischer Experimente	● 1,46 ± 0,14	●	● 1,94 ± 0,11	
Freude	● 1,64 ± 0,16	●	● 2,53 ± 0,12	
Respekt	● 1,87 ± 0,17	●	● 2,60 ± 0,15	
Mut	● 2,32 ± 0,18	●	● 3,15 ± 0,13	
Selbstbewusstsein, Entscheidungsfreudigkeit	● 1,96 ± 0,17	●	● 2,51 ± 0,13	
Rücksicht	● 1,79 ± 0,17	●	● 2,33 ± 0,13	

Abb. 5: Ziele, deren Bewertung durch Lehrende und Studierende sich signifikant unterscheiden; "Farbcodierung vgl. Abb. 3 und 6

Abschließend sei noch kritisch zu beleuchten, dass über die Stichprobe der Studierenden nur wenige demografische und andere Metadaten erhoben wurden. Es setzen sich nämlich die Studierendenvertreter/innen in den Fachschaften an unterschiedlichen Universitätsstandorten auch unterschiedlich zusammen. Mancherorts ist es üblich, dass es sich um Studierende in Abschlusssemestern handelt, die sich freiwillig oder bezahlt als wissenschaftliche Hilfskräfte in der Organisation und/oder Lehre engagieren und dadurch evtl. selbst schon in der Rolle der Lehrenden in einem Physikpraktikum waren. Das beeinflusst natürlich die Sichtweise auf manche Ziele. Anderorts sind die Studierenden wiederum gewählte Studienrichtungsvertreter/innen, die als Interessensvertreter/innen fungieren und eine durchaus kritische und reflektierte Haltung gegenüber den Lehrenden haben.

Im Großen und Ganzen ist es jedoch Tatsache, dass die Befragten erst vor wenigen Semestern ein Anfängerpraktikum besucht haben und daher die Antworten nahe an der Studierendenperspektive sein müssen. Auf Basis dieser Überlegung hat die Einschätzung der Ziele in den physikalischen Praktika durch die Lehrenden an Validität und Objektivität gewonnen, da sie durch die Studierendenbefragung eine deutliche Bestätigung erfahren hat.

6. Literatur

[1] Theyssen, H.: Physik und Didaktik in Schule und Hochschule. In: PhyDid Nummer 1/5 (2006), S.35-44.

[2] Zwickl B.; Finkelstein, N.; Lewandowski, H. J.: The process of transforming an advanced lab course: Goals, curriculum, and assessments. In: Am. J. Phys. Nummer 81 (2012), S. 63.

[3] Weitere detaillierte Darstellungen der Autoren von [2] findet man online: Detailed Learning Goals for the Advanced Lab: http://www.colorado.edu/physics/EducationIssues/zwickl/Resources/Detailed_LGs.pdf (Stand: 8/2015)

[4] Atteslander, P. (2006). Methoden der empirischen Sozialforschung. Berlin: Schmidt.

[5] Hochschulrektorenkonferenz, 2016. http://www.hs-kompass2.de/kompass/xml/index_stud.htm

[6] Janssen, J.; Laatz, W.: Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows. Berlin & Heidelberg: Springer, 2007.

[7] Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.: Multivariate Analysemethoden. Berlin & Heidelberg: Springer, 2006.

[8] Prüfer, P; Rexroth, M.: Kognitive Interviews. ZUMA How-to-Reihe, Nr. 15. Mannheim, Zentrum für Umfragen, Methoden und Analysen, 2005.

Anhang

	AP	FP	NP		AP	FP	NP
Grundlegende physikalischen Ideen verstehen	● 1,14	● 1,40	● 1,30	Quellen finden	● 2,66	● 2,06	● 3,26
Ein Vorhersagemodell entwickeln	● 2,78	● 3,20	● 3,63	Quellen beurteilen	● 2,93	● 2,27	● 3,41
Das Vorhersagemodell anwenden	● 1,82	● 1,69	● 2,21	Quellen auswerten	● 2,85	● 2,33	● 3,07
Das Vorhersagemodell überprüfen	● 1,85	● 1,69	● 2,56	Anwendbarkeit und Genauigkeit des Vorhersagemodells überzeugend darstellen	● 2,14	● 2,07	● 3,04
Modell anpassen bei Diskrepanz Vorhersage/Messung	● 2,61	● 2,56	● 3,64	Beschreibung des Experiments	● 1,34	● 1,19	● 2,11
Grundlegende physikalische und technische Ideen verstehen	● 1,07	● 1,19	● 1,46	Daten als glaubwürdig, überzeugend, genau und interessant darstellen	● 1,43	● 1,81	● 2,22
Ein Modell des Messaufbaus entwickeln	● 2,46	● 2,33	● 3,67	Daten ansprechend präsentieren	● 1,43	● 1,40	● 2,30
Kalibrieren/das Modell des Messaufbaus anwenden	● 1,96	● 1,88	● 2,88	Datenanalyse und Schlussfolgerungen	● 1,41	● 1,19	● 1,54
Das Modell des Messaufbaus überprüfen	● 2,20	● 2,13	● 3,00	Eigene Projekte vorschlagen	● 3,04	● 2,93	● 3,79
Modell des Messaufbaus anpassen	● 2,77	● 2,53	● 3,64	Arbeitsteilung	● 2,14	● 2,25	● 2,36
Qualität der Messdaten abschätzen	● 1,14	● 1,25	● 1,70	Vorträge halten	● 3,14	● 2,06	● 3,14
Statistische Methoden (Mittelwert, n. lin. Anpassung, Chi ² -Test, ...) anwenden	● 1,55	● 1,88	● 1,93	Artikel verfassen	● 3,41	● 3,25	● 3,50
Messdaten mit Vorhersagewerten vergleichen	● 1,41	● 1,50	● 1,80	Poster erstellen und präsentieren	● 3,56	● 3,20	● 3,74
Überprüfbare Forschungsfrage aufstellen	● 2,76	● 2,50	● 3,50	Vorhersagen erstellen	● 2,52	● 2,19	● 3,22
Experimentalaufbau effektiv planen	● 2,62	● 2,40	● 3,54	Computer-Analyse-Programme nutzen	● 1,82	● 1,63	● 2,89
Sicherheitsaspekte berücksichtigen	● 2,19	● 1,53	● 2,64	LabVIEW verwenden	● 2,86	● 2,56	● 3,74
Messdaten während des Experiments skizzieren	● 1,76	● 1,63	● 2,18	Sensoren und Aktuatoren einsetzen	● 2,11	● 2,00	● 3,07
Zustand des Experiments regelmäßig evaluieren	● 2,24	● 2,20	● 3,04	Wichtige Messgeräte erläutern und anwenden	● 1,32	● 1,38	● 2,15
Laborbuch führen	● 1,00	● 2,07	● 1,71	Grundlegende Fertigkeiten beim Aufbau optischer Experimente	● 1,46	● 1,40	● 2,63
Messapparatur in funktionale Untereinheiten einteilen	● 2,21	● 2,36	● 3,04	Sorgfaltsdisziplinen	● 1,40	● 1,36	● 1,54
				Freude	● 1,64	● 1,64	● 2,22
				Ehrgeiz	● 2,04	● 2,00	● 2,38
				Respekt	● 1,87	● 1,92	● 2,20
				Mut	● 2,32	● 2,55	● 2,67
				Selbstbewusstsein, Entscheidungsfreudigkeit	● 1,96	● 1,69	● 2,32
				Rücksicht	● 1,79	● 2,25	● 2,16
				Wissenschaftliches Schreiben als Lernmethode	● 2,00	● 2,07	● 2,73

Abb. 6: Ziele mit Farbcodierung der Primär-, Sekundär und Tertiärziele (grün, orange und rot) und Mittelwert. „AP“ ... Anfängerpraktikum, „FP“ ... Fortgeschrittenenpraktikum und „NP“ ... Nebenfachpraktikum

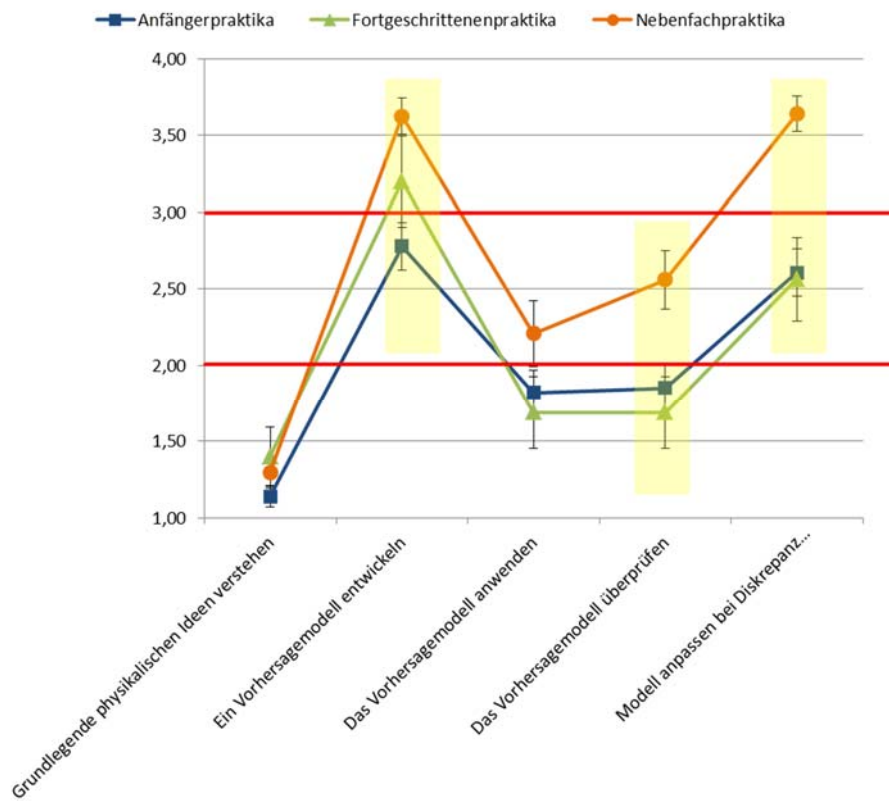


Abb. 7: Skala „Modell – Physikalische Grundlagen“

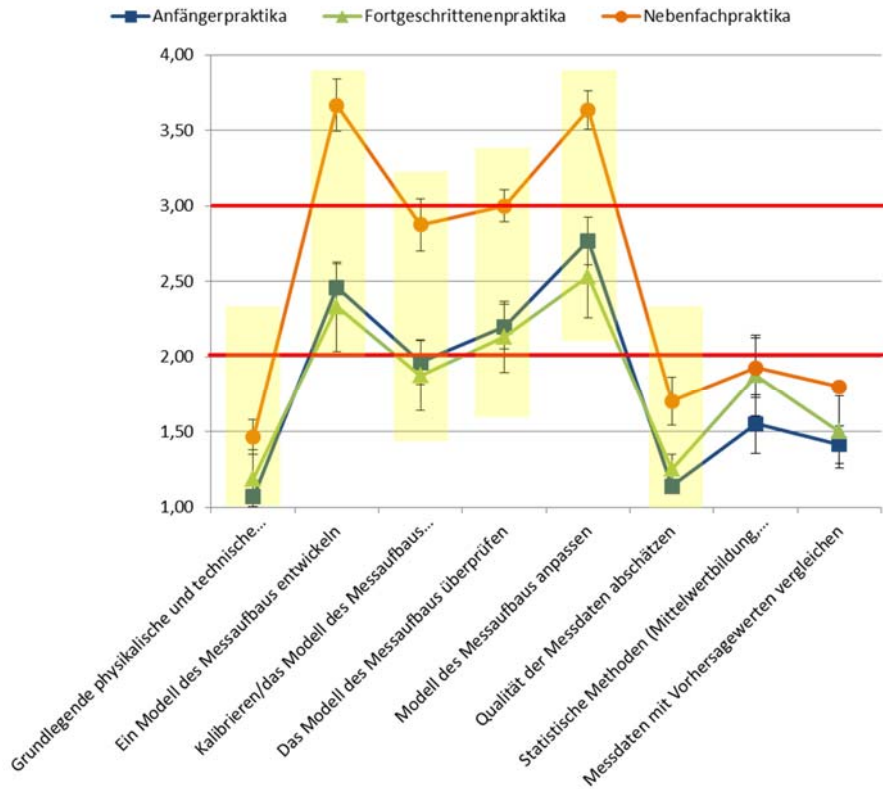


Abb. 8: Skala „Modell – Methode / Aufbau des Experiments“

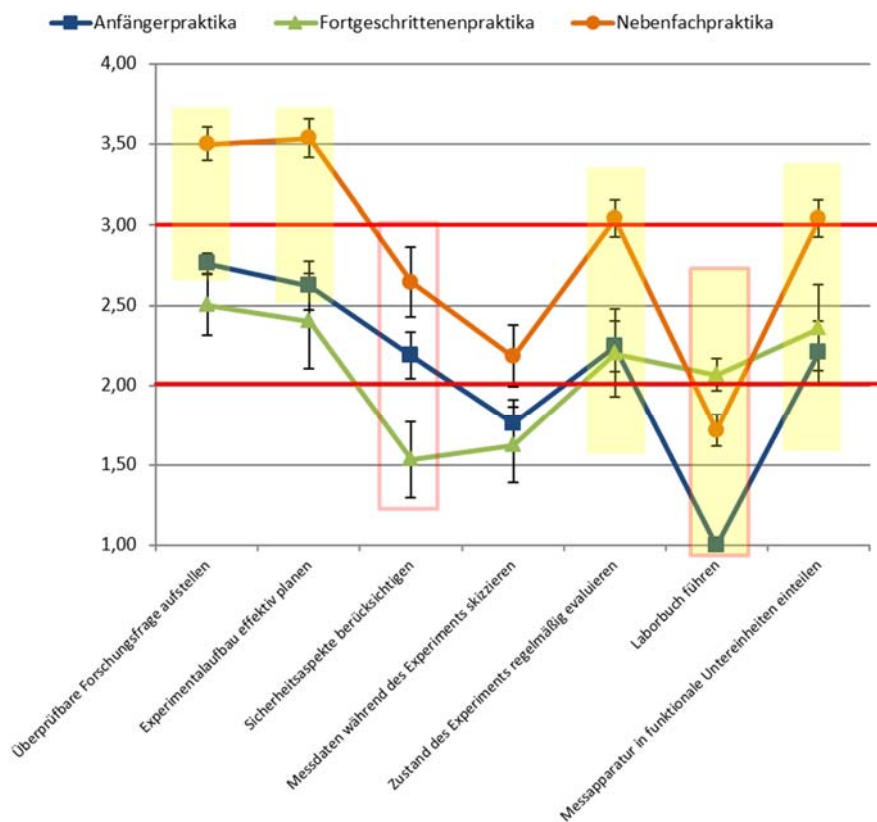


Abb. 9: Skala „Planung und Durchführung des Experiments“

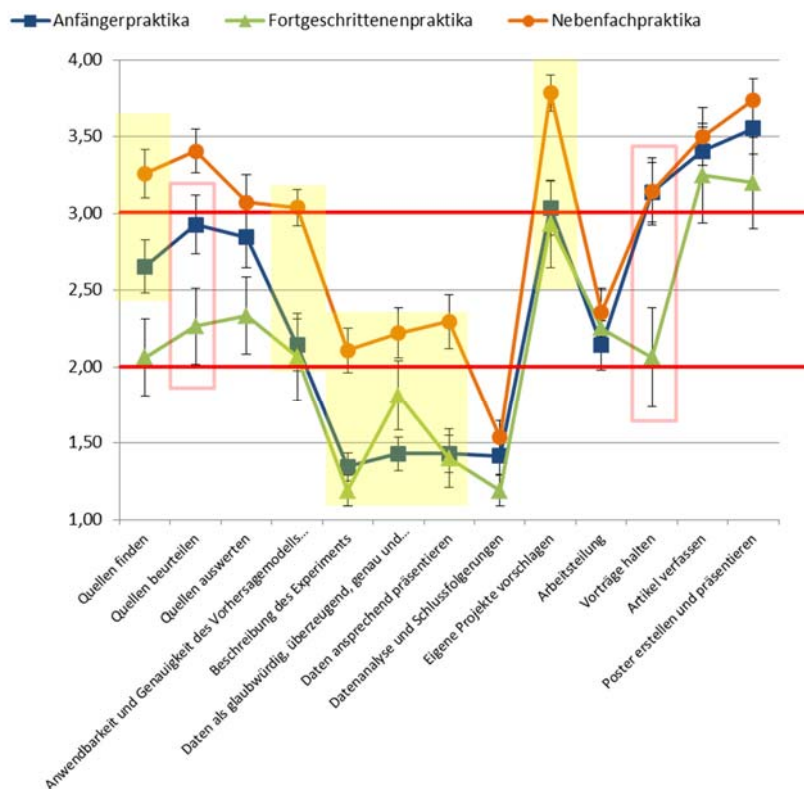


Abb. 10: Skala „Kommunikation“

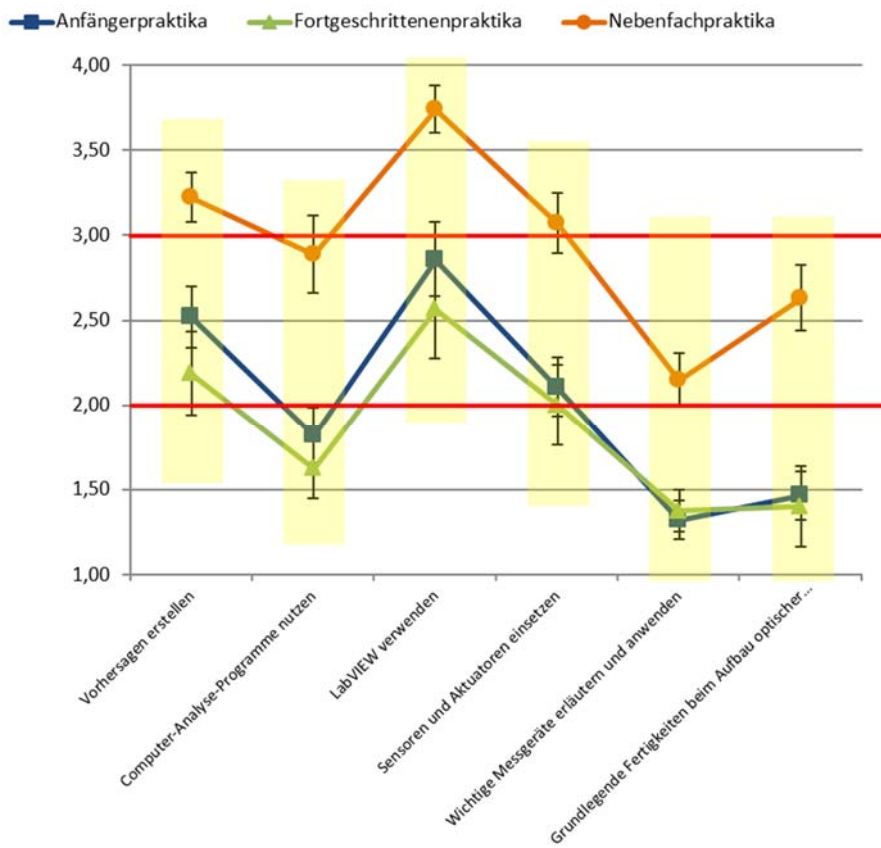


Abb. 11: Skala „Messtechnik“

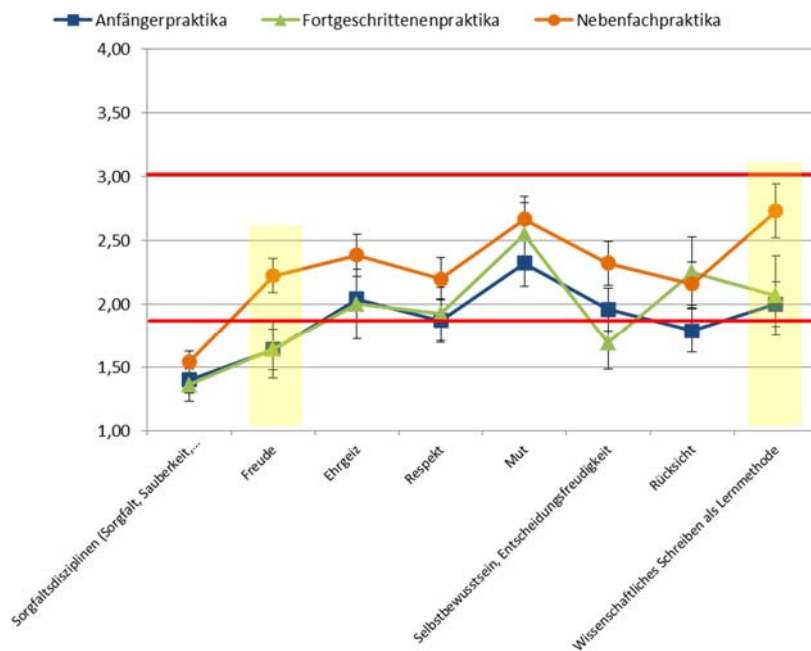


Abb. 12: Skala „Einstellungen ändern“

Kumulatives Lehren der Mechanik in der Lehramtsausbildung

Thomas Rubitzko*, Mathias Laukenmann*, Erich Starauschek*

*Pädagogische Hochschule Ludwigsburg, Reuteallee 46, 71634 Ludwigsburg
rubitzko@ph-ludwigsburg.de, laukenman@ph-ludwigsburg.de, starauschek@ph-ludwigsburg.de

Kurzfassung

Kognitiv aktivierende Lehr- und Übungsformen, die wiederkehrend physikalische Grundkonzepte der Mechanik wie das Kraftkonzept oder die Erhaltungssätze für Energie, Impuls und Drehimpuls in wechselnden Kontexten aufgreifen, sollen kumulatives Lernen der Mechanik bei Lehramtsstudierenden unterstützen und im besten Fall optimieren. Zu den kognitiv aktivierenden Hochschullehrformen zählen wir z.B. die Mazursche Peer Instruction, Diskussionen in Kleingruppen oder Worked Examples. Diese Übungsformen sind in eine Vorlesung integriert, die medial einfach und zugleich theoretisch fundiert unterstützt, soziale Interaktion zwischen den Teilnehmern zulässt und eine Fragekultur fördert.

Kumulatives Lernen soll Physiklehramtsstudierenden insbesondere in Unterrichtssituationen zu verlässlich abrufbaren und flexibel anwendbaren mentalen Repräsentationen dieser Grundkonzepte verhelfen. Neben dem wiederholten Aufgreifen der Grundkonzepte der Mechanik im Rahmen einer mehrsemestrigen Reihe von Veranstaltungen zur Mechanik orientieren wir uns deshalb auch an den bekannten Schülervorstellungen zur Mechanik, die auch bei den Studierenden vorhanden sind, diagnostiziert und mit den Studierenden reflektiert werden.

Wir werden das entwickelte Veranstaltungsformat exemplarisch vorstellen. Wir folgen forschungsmethodisch dem Design-based Research Ansatz. Die mehrfachen Entwicklungs-, Erprobungs- und Evaluationszyklen sollen zum Einen die eigene Lehre verbessern und zweitens zu einem Prototyp für effektive Hochschullehre im Lehramtsstudium Physik führen, der an anderen Hochschulen adaptiert werden kann.

Zudem stellen wir erste Evaluationsergebnisse der Einschätzung der Lernwirksamkeit der ergriffenen Maßnahmen durch die Studierenden vor, die den eingeschlagenen Weg bestätigen. Unser Projekt ist Teil der Qualitätsoffensive Lehrerbildung.

1. Die Entwicklung von Veranstaltungen zum kumulativen Physiklehren und -lernen: Leitlinien und Prozess

1.1. Der Ausgangspunkt und die Grundkonzepte der Mechanik

Angehende Lehrerinnen und Lehrer können Physik nur unterrichten, wenn sie über korrektes Wissen von physikalischen Grundkonzepten wie beispielsweise dem Konzept der Kraft verfügen und diese Konzepte verlässlich in Unterrichtskontexten anwenden können. Physikalische Grundkonzepte werden aber oft erst im Referendariat erworben (Borowski et al., 2011). Dieses Ergebnis der Hochschullehre erscheint angesichts der Verwendung der zeitlichen Ressourcen in der zweiten Phase der Lehramtsausbildung nicht effizient, da dort der Fokus der Lehrerprofessionalisierung auf der Unterrichtspraxis, d.h. bei konkreten Elementarisierungen, der Unterrichtsvorbereitung oder dem Classroom Management liegen sollte.

Viele Problem- und Aufgabenstellungen im Bereich der klassischen Experimentalphysik – nicht nur der Mechanik – lassen sich durch die bewegliche Verwendung weniger physikalischer Grundkonzepte

lösen. Diese Grundkonzepte sind auch Ausgangspunkt für physikalisch adäquate Elementarisierungsprozesse im späteren Unterrichtsalltag. Wir haben am Beispiel der Mechanik ein Lehrformat entwickelt, um dem oben genannten Problem entgegen zu wirken und den Physiklehramtsstudierenden einen flexiblen Umgang zu vermitteln. Zu den Grundkonzepten der Mechanik zählen wir die Konzepte von Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung und deren Zusammenhänge, das Konzept der Kraft und die damit verbundenen Newtonschen Axiome, das Konzept des Drehmoments sowie die mit den Erhaltungsgrößen Energie, Impuls und Drehimpuls verbundenen Konzepte. Sie unterscheiden sich also wesentlich von den ‚Basiskonzepten‘ der KMK-Richtlinie (KMK, 2005).

1.2. Vorarbeiten

Wir wollten die Idee des kumulativen Lehrens und Lernens an der Pädagogischen Hochschule im Lehramtsstudium Physik umsetzen und begannen mit den Veranstaltungen zur klassischen Mechanik: eine Einführungsvorlesung mit integrierten Übungen, Schulexperimente zur Mechanik und das Aufgreifen mechanischer Konzepte in der Einführungsvorle-

sung Elektrodynamik. Die an der PH Ludwigsburg über mehrere Jahre entwickelte Vorlesung zur Mechanik von Raimund Girwidz, zu der ein Foliensatz vorlag, war Grundlage der neu und weiter entwickelten Lehrveranstaltungen. Um das Erlernen der unterrichtsrelevanten physikalischen Grundkonzepte zu fördern, wurden die Veranstaltungen auch schon vor der Qualitätsoffensive zum Teil über einen erfahrungsbasierten Diskurs Jahr für Jahr überarbeitet und weiterentwickelt. Etliche Umstellungen der Prüfungsordnungen führten zwangsläufig zu Veränderungen in der Lehre im Bereich der klassischen Mechanik, die erhebliche Schwankungen in der Zahl der Semesterwochenstunden (SWS) ausgleichen mussten. Die bisherigen aufeinander folgenden Überarbeitungszyklen erbrachten

- punktueller inhaltliche Umstellungen (Experimente, Kontexte und Anwendungen),
- Vorlesungsfolien, die Bilder in einheitlichem Stil enthalten. Die Foliengestaltung orientiert sich konsequent an den Kriterien der Cognitive Load Theorie (Chandler & Sweller, 1991) und der Multimediatheorie von Mayer (2001),
- schrittweise Reduktion der mathematischen Anteile und im Gegenzug die Ausweitung des qualitativen Physikverstehens.

Wie sind diese Vorarbeiten zu bewerten? Die hochschulinternen Evaluationen zeigten eine subjektiv hoch eingeschätzte Lehrqualität durch die Studierenden. Als externe summative Evaluation kann die Untersuchung der CK und PCK von Riese & Reinhold (2010) angesehen werden. Hier haben die Studierenden der Pädagogischen Hochschulen Baden-Württembergs im deutschlandweiten Vergleich überdurchschnittliche Werte im CK erreicht, und damit auch die Studierenden der PH Ludwigsburg.

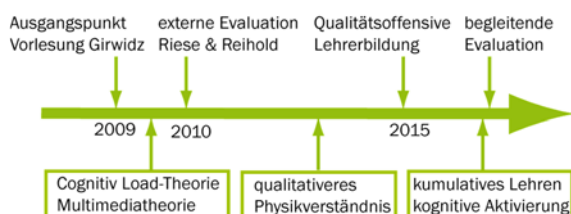


Abb. 1: Zeitschiene zum Design-based-Research Prozess

1.3. Aktuelle Entwicklungsschritte im Prozess des Design-based Research

Wir greifen im Augenblick die im Ausgangspunkt formulierte Diagnose und Kritik auf und versuchen Ideen des Kumulativen Lernens (z.B. Gagné, 1968) umzusetzen. Dafür wurde eine speziell auf das Lehramtsstudium Physik zugeschnittenes Konzept kumulativen Lernens entwickelt (John & Staraschek, 2018). Um die Lernprozesse im Allgemeinen zu stützen, wird bei der Entwicklung der Lehrveranstaltungen insbesondere der Aspekt der kognitiven Aktivierung (z.B. Renkl, 2011) berücksichtigt und diskutiert.

Das beschriebene Projekt ist Teil des Verbundprojekts Lehrerbildung Plus der Professional School of Education (PSE) Stuttgart Ludwigsburg im Rahmen der „Qualitätsoffensive Lehrerbildung“. Diese Finanzierung erlaubt auch eine unabhängige Evaluation.

Ziel ist neben der kriteriengeleiteten Verbesserung der Lehre vor Ort die Entwicklung eines Prototyps einer effektiven Hochschullehre für das Physiklehramtsstudium, der an anderen Standorten an die dortigen Bedingungen adaptiert werden kann.

Der zyklische Wechsel zwischen einem theoriegeleiteten Design von Lernumgebungen mit empirischer Forschung folgt den Ansätzen zum Design-based Research (Design Based Research Collective, 2003 sowie Reinmann, 2005). Wir folgen weiter Wilhelm & Hopf (2014), die in ihren Entwicklungsarbeiten für schulisches Physiklernen als Ausgangspunkt ein praxisrelevantes Problem sehen, das im Sinne des Design-based Research Ansatzes mit einem langfristigen zyklischen Entwicklungs- und Forschungsprozess zumindest teilweise oder ganz gelöst wird. Die Lösung soll sowohl praktisch umsetzbar sein – in unserem Fall eine Hochschulveranstaltungsreihe zur Mechanik – sowie Antworten z.B. in Form begründeter Heuristiken auf Grundlagenfragen liefern. Unsere Frage: Wird der Ansatz kumulativen Lehrens lernwirksam? Z.B.: Zeigen sich Entwicklungen im Fachwissen? Verändern sich Schülervorstellungen der Studierenden? Wird die Selbstwirksamkeit als zukünftige Lehrperson beeinflusst? Mehr hierzu bei (John & Staraschek, 2017).

1.4. Designprinzipien

Euler (2014) schlägt für Entwicklungen, die dem Design-based Ansatz folgen, als Rahmen für die Entwicklungsarbeit Designprinzipien zu formulieren, um damit auch den Anspruch der „Theoriegeleitetheit“ – oder zumindest einer Kriteriengeleitetheit – einzulösen. Um unser praxisrelevantes Problem zu lösen, nämlich das ‚habituierte Erlernen‘ mechanischer Grundkonzepte zu fördern, folgen wir vier Prinzipien, die noch genauer erklärt werden:

- Kumulatives Lehren und Lernen als übergeordnete, domänenspezifisch ausgeprägte Strategie am Modell von John & Staraschek (2018) orientiert.
- Kognitive Aktivierung (Renkl, 2011) als domänenunspezifische Strategie eingesetzt. Darunter Übungsformen wie Worked Examples oder Diskussionen in Kleingruppen.
- Elementarisierung der physikalischen Grundkonzepte in der Hochschulausbildung von Physiklehrern wie dies beispielsweise von Girwidz & Berger (2011) für Unterricht im Allgemeinen vorgeschlagen wird.
- Eine Frage- und Gesprächskultur als Teil der sozialen Interaktion, die in der Hochschullehre

empirisch als effektiv identifiziert wurde (Schneider & Preckel, 2017).

Diese Designprinzipien wurden nicht vollständig präskriptiv festgelegt, sondern während der Entwicklungsarbeit modifiziert und ergänzt. Dies ist im Design-based Research Ansatz möglich.

2. Kumulatives Physiklehren und -lernen im Lehramtsstudium Physik

Das erste Designprinzip basiert auf Ansätzen zum kumulativen Lernen, die in der Literatur unter verschiedenen Aspekten diskutiert wurden (s. John & Starauschek, 2018). John & Starauschek (2017) haben für das Lehramtsstudium Physik ein Modell entwickelt, das insbesondere explizit zwischen kumulativen Lernen – das in einem gewissen Grad immer stattfindet – und kumulativen Lehren unterscheidet, und zu einem physikdidaktisch intendierten, im Sinne der Schulphysik vollständigem, physikalisch richtigem, stabilen – d.h. verlässlich aus dem Langzeitspeicher des Gedächtnisses abrufbar – und flexibel einsetzbaren – d.h. insbesondere bei Problemlösesituationen im Physikunterricht – Wissenssystem führen soll. Für die Entwicklung der Lehre der genannten Hochschulveranstaltung zur Mechanik bedeutet dies

- wiederholend innerhalb und über drei Lehrveranstaltungen hinweg die Grundkonzepte der Mechanik aufzugreifen; den Studierenden wird Gelegenheit gegeben, durch wiederholtes Anknüpfen an ihr Vorwissen ihre Wissensbasis auszubauen. Der Aspekt des kumulativen Lehrens in seinem Wortsinn.
- vielfältige Anwendungs- und Übungskontexte für die Grundkonzepte der Mechanik bereitzustellen und damit insbesondere (verteilt) zu üben; damit sollen die Studierenden letztendlich auch dekontextualisierte Grundkonzepte entwickeln.
- die Berücksichtigung schulischer Kontexte und der Alltagsvorstellungen zur Mechanik; den Studierenden soll so ermöglicht werden, sich mit ihren eigenen Präkonzepten auseinanderzusetzen.
- Rückmeldeverfahren, um den Studierenden zu signalisieren, ob sie die Grundkonzepte der Mechanik ‚verstanden‘ oder ihre Alltagsvorstellungen im Sinne eines Conceptual Change weiterentwickelt haben.

Dies entspricht den ersten vier Kriterien des Modells von John & Starauschek (2017).

2.1. Die Veranstaltungsreihe

Das kumulative Lehren der Grundkonzepte der Mechanik erfolgt über ein Spiralcurriculum, das die Inhalte der „Grundvorlesung zur klassischen Mechanik mit integrierten Übungen“ (2. Semester) in den Veranstaltungen in nachfolgenden Semestern aufgreift; dies sind die „Schulversuche zur Mechanik“ (3. Semester) und die „Vorlesung mit integrierten

Übungen zur Elektrodynamik“ (4. Semester). Wir beschreiben diese Veranstaltungen kurz:

2.1.1. Vorlesung zur klassischen Mechanik mit integrierten Übungen (6 SWS)

Die Grundvorlesung mit integrierten Übungen, d.h. in die Vorlesungen sind Übungsphasen mit unterschiedlichen Lehr-Lern-Arrangements eingebettet, umfasst folgende Themen: Kinematik, Kraft und Bewegung, Energie und Impuls, Drehmoment und Drehimpuls, beschleunigte Bezugssysteme, Fluidmechanik und harmonische Schwingungen.

2.1.2. Schulversuche zur Mechanik (1 SWS)

In dieser Experimentalübung werden die mechanischen Grundkonzepte wiederholt und anhand von fünf schulnahen experimentellen Anwendungskontexten (Flaschenzüge, Hebel am Korkenzieher, Fahrradtrieb, Unfälle, Fahrzeuge mit eigenem Antrieb) vertieft. Diese Veranstaltung werden vor- und nachbereitet (Einzelarbeit). Die Veranstaltungen beginnen mit einer Phase der Diskussion und des Experimentierens in Zweierteams, darauf folgen klärenden Gesprächen in der Gesamtgruppe. Dieser Zweischritt wiederholt sich in einer Veranstaltung in der Regel mehrmals (Rubitzko et al., 2018).

2.1.3. Vorlesung zur klassischen Elektrodynamik mit integrierten Übungen (6 SWS)

In der Vorlesung zur Elektrodynamik werden die Grundkonzepte der Mechanik anhand weniger Themen Coulombgesetz, Energie des elektrischen Feldes, Teilchen in Feldern, Lorentzkraft explizit wiederholt, d.h. z.B. bei einem Elektron, das durch einen Kondensator fliegt, wird das Prinzip von Actio und Reactio diskutiert. Die Gesetzmäßigkeiten der Elektrodynamik bleiben aber im Vordergrund. In etwa zehn Prozent der Vorlesungszeit werden die Grundkonzepte der Mechanik erneut aufgegriffen.

2.2. Das erste Newtonsche Axiom als Beispiel für kumulatives Lehren

Im Folgenden beschränken wir uns auf die Beschreibung des inhaltlichen kumulativen Aufbaus zur Vermittlung der Grundkonzepte der Mechanik. Exemplarisch wurde als Teil des Kraftkonzepts das erste Newtonsche Axiom gewählt. Abbildung 2 zeigt das Spiralcurriculum.

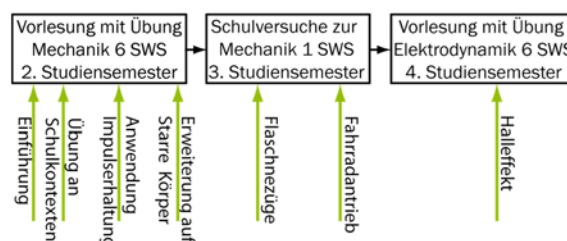


Abb. 2: Veranstaltungen, in welchen Grundkonzepte der Mechanik (hier Newton I) gelehrt oder punktuell aufgegriffen werden.

2.2.1. Vorgabe der expliziten Lehrziele

Zu Beginn des Lehr-Lern-Prozesses erhalten die Studierenden eine Liste, auf der die Lehrziele für den folgenden Abschnitt explizit genannt sind. Dies soll den Studierenden nicht zuletzt die Möglichkeit geben, ihr Vorwissen zu aktivieren. Für das erste Newtonsche Axiom sind dies unter anderem:

- Das erste Newtonsche Axiom sprachlich formulieren können.
- An Beispielen erkennen, dass Newton I Aussagen zur Ruhe (gleichförmigen Bewegung) eines Körpers während eines definierten Zeitintervalls und nicht zur Ruhe in einem bestimmten Zeitpunkt trifft.

2.2.2. Einführung eines Begriffes

Zur Einführung eines Begriffes wird in der Regel ein Axiom oder eine Definition – hier eine an Newton angelehnte Formulierung seines ersten Axioms- in sprachlicher und gegebenenfalls mathematischer Form angeboten. Dies wird anhand eines Beispiels - hier der Brückenanalogie von Galilei - erläutert, wie dies zu verstehen ist, für welche Fälle dies gilt und welche Einschränkungen da sind.

Einführungsfolie zum ersten Newtonschen Axiom

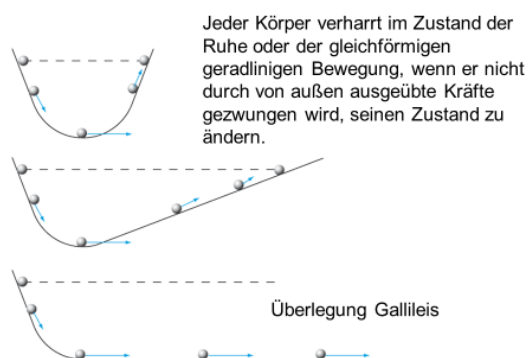


Abb. 3: Einführungsfolie zum Ersten Newtonschen Axiom

2.2.3. Aufbau des Begriffes über schulnahe Kontexte unter Berücksichtigung bekannter Schülervorstellungen

Verschiedene schulnahe Anwendungskontexte sollen zum Aufbau der Konzepte führen. Zum ersten Newtonschen Axiom sind dies das Bremsen und Anfahren mit nicht angeschnallten Fahrern von Autos und Motorrädern, oder das Tragen einer Kiste Mineralwasser mit konstanter Geschwindigkeit.

Des Weiteren werden abstrakte Fragen auf Konzeptebene gestellt - in unserem Beispiel (Abbildung 4) eine Multiple-Choice-Aufgabe-, über die in der Regel auch Schülervorstellungen thematisiert werden (vgl. hierzu Wiesner & Schecker, 2011 sowie Hestenes et al., 1992):

Peer Instruction zum ersten Newtonschen Axiom

Nennen Sie sich gegebenenfalls ein Gegenbeispiel dazu....

- Ist ein Körper gerade in Ruhe, ist die Summe aller ausgeübten Kräfte gleich Null.
- Verändert ein Körper seine Geschwindigkeit nicht, ist die Summe aller ausgeübten Kräfte gleich Null.
- Ist die Summe aller ausgeübten Kräfte gleich Null, so ist der Körper in Ruhe.
- Ist die Summe aller ausgeübten Kräfte nicht gleich Null, so ist der Körper nicht in Ruhe.

Abb. 4: Multiple Choice Aufgabe, mit eingeforderter Begründung zum ersten Newtonschen Axiom

Eine Steigerung der Schwierigkeit für die Studierenden besteht bei Aufgaben darin, aus verschiedenen denkbaren Lösungsansätzen den Geeigneten herauszufinden. So werden nach der Einführung aller drei Axiome sowohl Aufgaben mit Körpern, auf welche die Summe aller ausgeübten Kräfte nicht Null ist und solche bei der Newton I als Ansatz gewählt werden kann, gestellt.

Dies gilt beispielsweise für Aufgaben mit Seilen und Rollen, die auch im Physikunterricht der Sekundarstufe I behandelt werden können. Dabei werden die bekannten Fehlansätze thematisiert- beispielsweise das Misskonzept der losen und festen Rolle: „Eine feste Rolle lenkt die Kraft um, eine lose Rolle halbiert die Kraft“ (Muckenfuß, 1994) – als auch im Sinne des kumulativen Lehrens das erste Newtonsche Axiom als Ansatz genutzt werden: Für jede Rolle, die in Ruhe bleibt, muss die Summe aller Kräfte, die auf die Rolle ausgeübt wird, Null sein.

Peer Instruction zu Seilen und Rollen

Die Gewichte üben Kräfte von 12 N auf das Seil aus und sind in Ruhe. Seile, Rollen und Kraftmesser seien masselos. Welche Angaben bei den Kraftmessern sind ungefähr richtig?

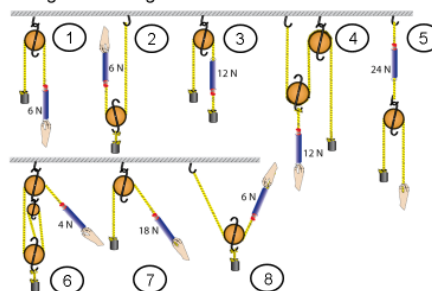


Abb. 5: Multiple Choice Aufgabe zu Seilen und Rollen

Die Studierenden sollen auch mit mathematischen Repräsentation umgehen. Sie bekommen daher wie zu jedem anderen Themenbereich Rechenaufgaben aus dem Standardwerk Physik für Wissenschaftler und Ingenieure von Tipler et al. (2015) gestellt – mit den jeweiligen Lösungen. Für die Studierenden besteht die Möglichkeit, diese Aufgaben im angebo-

tenen Tutorium mit einer studentischen Tutorin zu besprechen.

2.2.4. Umsetzungsvorschläge für die Schule und Schülervorstellungen

Am Ende eines jeden Kapitels der Vorlesung werden gemäß dem Modell des kumulativen Lehrens Bezüge zur und mögliche Vorgehensweisen in der Schule (beispielsweise auf den Begriff des „Trägheitsgesetzes“ zu verzichten und Newton I als Spezialfall von Newton II aufzufassen) und die einschlägigen Schülervorstellungen (Wiesner & Schecker, 2011 sowie Hestenes et al., 1992) anhand einiger Folien diskutiert.

Schülervorstellungen im Zusammenhang mit Newton I

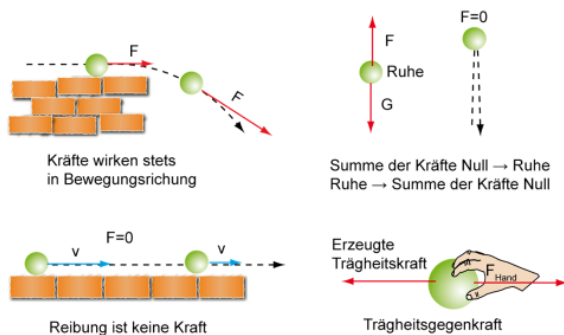


Abb. 6: Schülervorstellungen als Thema der Fachvorlesung

2.2.5. Vertiefung und Erweiterung des Kraftkonzepts in der Vorlesung zur klassischen Mechanik mit integrierten Übungen am Beispiel des ersten Newtonschen Axioms

Im späteren Verlauf der Vorlesung werden die Konzepte nun in weiteren auch ferneren Kontexten angewandt. So wird das erste Newtonsche Axiom im Sinne des ersten Aspekts des kumulativen Lehrens aufgegriffen. Diese erfolgt beispielsweise bei den Themen Fluidmechanik, Schwimmen und Schweben, wobei explizit das Kräftegleichgewicht zwischen Auftrieb und Gewichtskraft, sowohl beim Schwimmen als auch beim Schweben im Wasser herausgearbeitet wird.

Im Kapitel „Starre Körper“ wird das erste Newtonsche Axiom in einer Analogie aufgegriffen: „Jeder Starre Körper verharrt bezüglich der Rotation im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Drehbewegung, wenn er nicht durch Drehmomente gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern.“ Dies bringt neben der Wiederholung im Sinne des kumulativen Lehrens die Einbettung in einen neuen in-nerphysikalischen Kontext mit sich.

Diese Analogie lässt sich fortsetzen. Danach wird der Ansatz für die Drehmomente für starre Körper auf reale Hebel angewendet. Dabei sind die Körper nicht nur bezüglich der Rotation in Ruhe (respektive in gleichförmige Bewegung) zu bringen, sondern

auch bezüglich der Translation, nämlich durch Kräfte, die auf das Lager wirken.

Einzeichnen von Kräften auf ruhende Körper

Zeichnen Sie die Drehachse und die Kräfte so ein, dass die Schubkarre bezüglich Rotation und Translation in Ruhe bleibt.

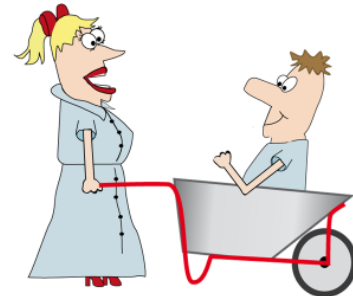
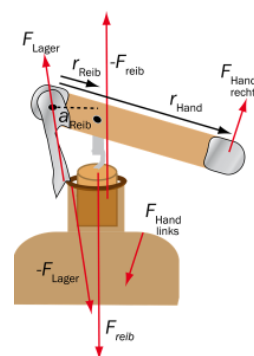


Abb. 7: Anwendung zur Erweiterung des Ersten Newtonschen Axioms auf Starre Körper

2.2.6. Aufgreifen des Kraftkonzepts in der Veranstaltung Schulversuche zur Mechanik

In der Veranstaltung Schulversuche zur Mechanik wird Newton I – neben den anderen Aspekten des Kraftkonzeptes – explizit anhand von experimentellen Fragestellungen zu Flaschenzügen, zur Grenzggeschwindigkeit von Fahrrädern und wieder wie oben zu Drehmomentgleichgewichten und Kräftegleichgewichten bei Hebeln, wie sie bei Korkenziehern, Zugbrücken oder Nussknackern auftreten, und damit in schulnahen Kontexten angewendet.

Ausschnitt aus einer Musterlösung (Kellnerkorkenzieher)



Der Korken bewegt sich unbeschleunigt, die Flasche ist in Ruhe.

Das heißt, auf jeden beteiligten Körper (Flasche und Korkenzieher samt Korken) muss nach Newton I die Summe der Kräfte (vektoriell) gerade Null sein.

Überdies muss die Summe der Drehmomente Null sein, welche die ausgeübten Kräfte erzeugen, damit analog zu Newton I keine Rotationsbeschleunigung auftritt...

Abb. 8: Ausschnitt aus einer Musterlösung zu Newton I in den Schulversuchen zur Mechanik (Rubitzko, et al. 2018).

2.2.7. Aufgreifen des Kraftkonzepts in der Vorlesung zur klassischen Elektrodynamik mit integrierten Übungen

Die mechanischen Grundkonzepte werden nun auch in der Elektrodynamik angewandt. Beispielsweise tritt bei der Herleitung der Hallspannung ein Kräftegleichgewicht auf. Hier lassen sich im Sinne des kumulativen Lehrens die mechanischen Grundkonzepte noch einmal wiederholen, und z.B. der Unterschied zum dritten Newtonschen Axiom explizieren.

3. Kognitive Aktivierung

Neben dem kumulativen Lehren wollen wir gezielt Lehr-Lern-Arrangements und Instruktionen einsetzen, die wir geeignet halten, um die Studierenden kognitiv zu aktivieren. Dies ist eine domänenunspecifische Strategie, um Lehr-Lernprozesse zu fördern. Wir beziehen uns bei unseren Beispielen auf die Vorlesung zur klassischen Mechanik mit integrierten Übungen. Wir verwenden den Begriff der kognitiven Aktivierung im Sinne von Renkl (2011) und sprechen davon, wenn die mentale Aktivität auf die zentralen Konzepte des Lernbereichs fokussiert werden und es deshalb zu einem Lernfortschritt kommt. Die kognitive Aktivierung zielt deshalb auf den Aufbau geeigneter mentaler Repräsentationen der mechanischen Grundkonzepte beziehungsweise auf einen damit verbundenen Conceptual Change.

Wir beschreiben im Folgenden anhand von Beispielen drei von uns ausgewählte Methoden, um eine kognitive Aktivierung bei den Studierenden zu initiieren:

- Peer Instruction
- Diskussion von Aufgaben mit qualitativem Schwerpunkt in Kleingruppen
- Worked Examples

3.1. Peer Instruction

Die Peer Instruction ist ein von Eric Mazur (1997) vorgeschlagenes Verfahren zur Hochschullehre im Bereich der Physik. Mazurs Evaluationsergebnisse erlauben den Schluss, dass beim Konzeptionellen Verständnis der Physik bessere Ergebnisse zu erzielen sind als mit einer traditionellen Vorlesung. Wir setzen das Verfahren in seinen Kernpunkten folgendermaßen um:

- Den Studierenden werden auf Folien schnell zu beantwortende Fragen gezeigt; meist im Multiple-Choice-Format. Mit Hilfe eines kleinen Senders haben die Studierenden über Funk die Möglichkeit, direkt und anonym ihre Antwort auf den Rechner zu übertragen, auf dem die Folienpräsentation läuft.
- Für jede Antwort wird in der Folienpräsentation gezeigt, wie viele Studierenden diese gewählt haben.
- Die Studierenden diskutieren nun aufgrund dieser Information mit ihrem Partner und geben ihre gemeinsame Antwort erneut ein.
- Auch diese Antwortverteilung wird angezeigt und die Ergebnisse erneut im Plenum diskutiert.
- Abschließend wird die richtige Antwort gezeigt. Unstimmigkeiten im Plenum, wenn notwendig, mit Unterstützung des Lehrenden geklärt.

Peer Instruction zum dritten Newtonschen Axiom

Es wird in allen vier Situationen zum Unfall kommen. Währenddessen treten Kräfte auf. Welche der Zeichnungen könnten die Kräfte zu einem beliebigen Zeitpunkt während des Zusammenstoßes zeigen?

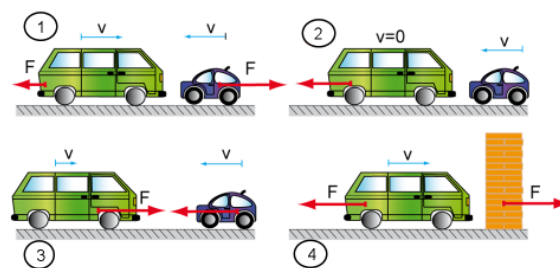


Abb. 9: Folie zur Peer Instruction

In der Vorlesung werden mit den Folien oft Präkonzepte oder Lernschwierigkeiten aufgegriffen. Im obigen Beispiel sind dies Fehlkonzepte zu Actio und Reactio oder zur Vorstellung, dass nur aktive Körper Kräfte ausüben können. Die Aufgaben bieten auch die Möglichkeit, neu erworbenes Wissen anzuwenden. So bekommen die Studierenden eine zeitnahe Rückmeldung, ob sie die zu lernenden Inhalte bereits anwenden können. Die Anonymität erlaubt Äußerungen, ohne sich exponieren zu müssen. Damit ist eine klare Trennung von Leistungsraum und Lernraum (Weinert, 1999) für die Studierenden offensichtlich. Die Peer Instruction ist häufig auch mit Demonstrationsexperimenten verbunden – In diesem Beispiel werden danach über ein Messerfassungssystem die wechselseitigen Kräfte auf zwei zusammenstoßende Fahrzeuge unterschiedlicher Masse und Geschwindigkeit aufgezeichnet und graphisch dargestellt und so die theoretischen Vorhersagen experimentell überprüft.

Einige praxisbezogene Bemerkungen: Das Abstimmingsystem „Edivote 100“, mit welchem wir arbeiten, hat im Gegensatz zu anderen Systemen den Vorteil, dass die Ergebnisse direkt in den Powerpoint-Folien angezeigt werden. Ein Vorgehen, bei dem die Studierenden einfache Kärtchen mit Ziffern hochhalten, ist abgesehen von der fehlenden Anonymität, wesentlich einfacher zu gestalten und in der Praxis unkomplizierter umzusetzen. Dies empfehlen wir nicht zuletzt aus Kostengründen für eine Neukonzeption in anderen Hochschulen. Einen Zugriff über einen Server über die eigenen Smartphones der Studierenden halten wir aus Datenschutzgründen zumindest für bedenklich.

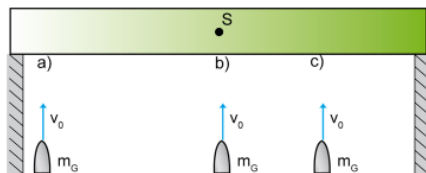
3.2. Diskussionen von Aufgaben in Kleingruppen

Die Kleingruppenarbeit führt im Mittel ebenfalls zu einem erhöhten Wissenserwerb (Springer et al., 1999). Da hier auch Erklärungen und Lösungsvorschläge sprachlich produziert werden, ordnen wir sie den Selbsterklärungen zu, auch wenn die Adressaten der Erklärungsversuche andere Personen sind.

Da das verständliche, fachlich korrekte sprachliche Formulieren physikalischer Zusammenhänge – ein

Aspekt des physikalischen Erklärens – für uns ein wichtiges Lehrziel für Lehramtsstudierende ist, versuchen wir es durch das Anregen von Diskussionen in Kleingruppen zu fördern. Als Gesprächsanlässe dienen Problemstellungen, die eine richtige Lösung ohne den Einsatz von Mathematik in wenigen Argumentationsschritten ermöglichen. Dabei werden die wesentlichen Grundkonzepte genannt, um eine fokussierte Informationsverarbeitung zu gewährleisten.

Gruppendiskussion zu Energie, Impuls & Drehimpuls



In eine auf einem Gestell liegende Latte, wird geschossen, so dass die Kugel stecken bleibt. Beim ersten Versuch trifft sie in Punkt a, beim zweiten in b, und beim dritten in c auf.

Ordnen Sie die Versuche nach der Steighöhe des Massenmittelpunktes.
Fundieren Sie Ihre Ergebnisse mit Überlegungen zu den Erhaltungssätzen von Energie, Impuls und Drehimpuls.

Abb. 10: Folie zur Diskussion einer Aufgabe in Kleingruppen

Abb. 10 zeigt ein typisches Beispiel für eine ‚Erkläraufgabe‘. Der Ansatz der Impulserhaltung führt zur Lösung. Andere Ansätze lösen das Problem nicht; sie führen aber zu Nutzung physikalischer Prinzipien und Problemlösungen. Implizit decken diese Aufgaben in einigen Kriterien des Modells des kumulativen Lehrens und Lernens ab. Wird z.B. die Energieerhaltung diskutiert, so lässt sich unter anderem argumentativ belegen, dass die Kugel in der Mitte eine größere Eindringtiefe erreichen muss als diejenige am Rand. Zu dieser Aufgabe gibt es auch eine filmische Sequenz von Müller (2013) im Internet.

3.3. Worked Examples

Worked Examples gelten in ihrer kognitiv aktivierenden Wirksamkeit als belegt (Sweller et al., 1998 sowie Renkl 2002); und unterstützen im Mittel den intendierten Wissenserwerb. Das von uns gewählte Ablaufschema ist an Ideen von Renkl & Schworm (2002) zum Arbeiten mit vorgegebenen Lösungsbeispielen (Worked Example) orientiert, bei dem mehrere Lösungsbeispiele angeboten werden. In der Vorlesung mit den integrierten Übungen wird die Arbeit mit solchen Lösungsbeispielen regelmäßig eingesetzt, wenn die Studierenden Lösungsstrategien für Problemstellungen nach einem bestimmten Muster erlernen sollen. Z.B. beim Freischneiden oder dem Umgang mit den Erhaltungssätzen von Energie, Impuls und Drehimpuls. Dazu müssen physikalische Begriffe schon bekannt sein, nicht aber deren konkrete Anwendungen in diesen bestimmten Situationen.

Worked Example Freischneiden – 3. Kräfte einzeichnen

Sie zeichnen die Kräfte als Pfeile ein, die von außen auf das jeweilige System ausgeübt werden. Kräfte, die nur innerhalb des Systems ausgeübt werden oder auf Körper außerhalb des von Ihnen gewählten Systems ausgeübt werden, lassen Sie weg.

Zeichnen Sie die Beschleunigungen, die Sie erwarten, ebenfalls als Pfeile ein.

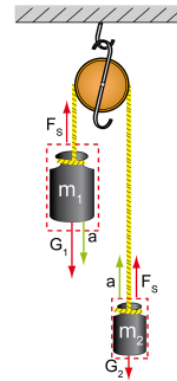


Abb. 11: Dritte von fünf Folien aus einem Worked Example zum Freischneiden

Die Studierenden erhalten eine Aufgabe, die mit einem bestimmten Verfahren zuverlässig zu lösen ist (in unserem Beispiel das Freischneiden bei einer Atwoodschen Fallmaschine, orientiert am Vorgehen von Müller (2009), s. Abb. 11).

- Die Studierenden bekommen zwei ähnliche Aufgaben, welche mit der gleichen Lösungsstrategie lösbar sind. Für beide Aufgaben liegen Musterlösungen vor; die Einzelschritte enthalten Kommentare zum Vorgehen.
- Die Studierenden sollen sich zuerst an beiden Aufgaben die Lösungsstrategie ohne Zuhilfenahme der Musterlösungen erklären. Dann sollen die Studierenden beide Aufgaben – allein oder im Team - nochmals lösen.
- Die Studierenden lösen nun eine zu beiden Beispielaufgaben analoge Aufgabe ohne vorgegebene Lösung gemeinsam analog zur Musterlösung.
- Sich aus der Diskussion ergebende Fragen zum Vorgehen und zum Lösungsprinzip werden nochmals im Plenum diskutiert und die Ergebnisse sowohl von den Beispielaufgaben als auch von den selbst zu lösenden Aufgaben in der Regel experimentell überprüft
- Um das Verfahren einzuüben werden weitere ähnliche Aufgaben gestellt, die außerhalb der Veranstaltungszeit in der nächsten Woche gelöst werden sollen, um das Verfahren zu automatisieren.

4. Elementarisierung von Grundkonzepten der Mechanik für die Hochschulausbildung von Physiklehrern

Im schulischen Bereich – bei den ersten Schritten zum Aufbau eines Wissenssystems Physik – ist die Frage der Elementarisierung eine der zentralen Fragen der Physikdidaktik (Girwitz & Berger, 2011). Grundlegende Aussagen der Physik sind abhängig von der Zielsetzung der Vermittlung auszuwählen, adressatengerecht zu vereinfachen, sodass Wissensbausteine zu Physik aufgebaut werden können, z.B. der Begriff der Geschwindigkeit oder der Tempera-

tur. Dieser Aufbau ist durch die Wahl geeigneter methodische Maßnahmen in Abhängigkeit von der Lerngruppe zu flankieren. Es ist eine offene Frage, inwieweit dies auch in der Hochschullehre zu geschehen hat. Ausgehend von unseren Erfahrungen und der Literatur (siehe zusammenfassend John & Starauschek, 2017), aus denen wir schließen, dass unsere Studierende wenig ausgereiftes physikalisches Wissen aus der Schule mitbringen, haben wir die Entscheidung getroffen, auch in unserer Hochschullehre die Frage der Elementarisierung bei der inhaltlichen Gestaltung zu berücksichtigen. Wir nehmen die Gültigkeit der Gütekriterien für die Schule an: fachgerecht und anschlussfähig soll die Elementarisierung sein, adressatengerecht und zielgerecht (vgl. hierzu Bleichroth 1991 sowie Girwitz & Berger, 2011.). Als Unterschied zum Schulunterricht erachten wir für Lehramtsstudierende nicht nur die Kenntnis der Physik, sondern auch das Wissen über mehrere mögliche Elementarisierungen als ein wichtiges Ziel für Lehramtsstudierende.

Am Beispiel des ersten Newtonschen Axioms wurde schon implizit angedeutet, wie sich eine Sinneinheit Schritt für Schritt aufbauen lässt. Nachfolgend soll für die anderen Grundkonzepte der Mechanik skizziert werden, wie „Stolpersteine“ (vgl. Wilhelm, 2018) auch in der Hochschullehre zu verhindern sind. Wir dokumentieren unsere Ansätze möglichst nachvollziehbar, ohne ein Lehrbuch zu schreiben, da die meisten Schritte schon aus der Literatur bekannt sind.

4.1. Kraft und Bewegung

Vor der Einführung des Kraftbegriffs wird in der Mechanik die Kinematik thematisiert, bei der die Zusammenhänge von Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung als vektorielle Größen dargestellt werden. Hierbei werden vor allem zweidimensionale Bewegungen diskutiert (z.B. Kurvenfahrten, Würfe oder ein Fadenpendel). Graphische Repräsentation wie, Vektordarstellungen von Orten, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen (vgl. hierzu unter anderem Wilhelm & Heuer, 2002) oder das Überführen von zeitabhängigen Verläufen dieser Größen in Diagrammen sollen das Verständnis auch der mathematischen Zusammenhänge unterstützen.

Unsere Einführung des Kraftbegriffs orientiert sich an einer Übersetzung der Originalversionen der Newtonschen Axiome und erfolgt damit dynamisch, wie beispielsweise von Wiesner (1994) gefordert, und nicht statisch.

Zentral ist dabei das zweite Newtonsche Axiom. Unser Umgang mit Newton II orientiert sich an Ansätzen für Schulunterricht von Wiesner et al. (2016), ohne allerdings die Begriffe Zusatzgeschwindigkeit oder Tempo explizit zu verwenden. Wir schätzen diese zusätzlichen Begriffen für die Hochschullehre als nicht gewinnbringend ein. Wir formulieren beispielsweise:

„Die Änderung der Geschwindigkeit (als vektorielle Größe) weist in die Richtung der Vektorsumme aller auf den Körper ausgeübten Kräfte und ist zu deren Betrag proportional.“

Daneben werden auch folgende äquivalente Darstellungen von Newton II zumindest kurz angesprochen:

„Der Kraftstoß ist proportional zur Geschwindigkeitsänderung ($\int F dt = m \Delta v$).“

„Die Kraft, die auf einen Körper ausgeübt wird, ist proportional zur zeitlichen Änderung seines Impulses.“

Die Verwendung solcher äquivalenter Formulierungen soll kognitive Flexibilität fördern, indem in verschiedenen Anwendungskontexten sofort eine geeignete, auch mathematisch orientierte Repräsentation zur Verfügung steht (Spiro et al., 1988). Weil Studierende selbst später als Lehrer elementarisieren müssen, sind wir der Meinung, dass es sinnvoll ist, einige der in der Fachdidaktik diskutierten alternativen Elementarisierungen im Sinne einer professionorientierten Physiklehrerausbildung schon in den Fachvorlesungen anzusprechen.

Wir führen Newton I nach Newton II ein (vgl. hierzu auch Wilhelm, 2018 a). Weil wir Newton I als Spezialfall von Newton II für Körper betrachten wollen: Werden keine Kräfte ausgeübt so ändert sich der Bewegungszustand des Körpers in einem beliebigen Zeitintervall nicht, und vice versa.

Newton I wird oft als Trägheitsprinzip bezeichnet. Der Begriff der Trägheit erscheint uns in Bezug auf Newton I als obsolet und führt eher zur Vorstellung von Kräften, die auf einen Körper wirken und der Bewegung entgegenwirken – ‚die Trägheit als ‚Ding‘ oder ‚Akteur‘ hat einen Einfluss auf die Bewegung‘ – ‚die Trägheit wirkt der Änderung entgegen‘ (vgl. beispielsweise Wiesner & Schecker, 2011). Vielmehr verstehen wir die (träge) Masse als Proportionalitätsfaktor zwischen Beschleunigung und Kraft insbesondere bei Newton II. (hierzu auch Wilhelm, 2018 a).

Zudem wird betont, dass Newton I letztlich nur Aussagen zu „Vorgängen“ macht– Wenn die Summe der ausgeübten Kräfte Null ist bedeutet dies zum einen „in Ruhe bleiben und nicht nur momentan in Ruhe sein“, oder sich (über einen Zeitraum hinweg) mit konstanter Geschwindigkeit bewegen. (Vergleich Lehrziel zu Newton I). Umgekehrt bleibt die Geschwindigkeit eines Körpers über ein Zeitintervall gleich, so ist die Summe der auf den Körper ausgeübten Kräfte Null.

Um das Wechselwirkungsprinzip bei Kräften (Newton III) zu betonen formulieren wir orientiert an Rincke (2005):

Wenn Körper A eine Kraft auf Körper B ausübt, dann übt Körper B eine dem Betrage nach gleich große, entgegengesetzte Kraft auf Körper A aus.

Um Vorhersagen für die Veränderung von Bewegungszuständen bei Körpern zu treffen, auf die Kräfte ausgeübt werden, favorisieren wir die Methode des Freischneidens, wie sie bei Müller (2009) explizit eingeführt wird und in der ingenieurwissenschaftlichen Literatur üblich ist. Dabei ist es wesentlich, das System, respektive den Körper, klar zu identifizieren, und nur die Kräfte einzuzeichnen, die von Körpern oder Feldern außerhalb des Systems auf den Körper ausgeübt werden. Daraus folgen dann die Bewegungsgleichungen.

4.2. Die Erhaltungsgrößen Energie, Impuls und Drehimpuls

Die Erhaltungssätze von Energie, Impuls und Drehimpuls sind wichtige Werkzeuge zur Lösung von physikalischen Problemen. Während der Impuls als eher leicht zugängliche Größe gilt, erweist sich die Energie als schwieriger, weil sie mit verschiedenen, nur eingeschränkt tauglichen Alltagskonzepten behaftet ist. Wiesner & Waltner (2009) schlagen vor, im Schulunterricht Energie (analog hierzu Impuls und Drehimpuls) als Bilanzgröße, die Systeme charakterisiert, zu elementarisieren. Wir greifen diese Idee auf, auch wenn diese Entscheidung nur bedingt empirisch begründet werden kann, und verwenden explizit Feynmans (2015) „unzerstörbare Bauklötzchen“ als Analogon zur Energie. Wie auch Müller (2009) dies ähnlich vorschlägt ist dabei wesentlich stets vor dem Bilanzieren zu klären:

- Welcher Vorgang wird von welchem bis zu welchem Zeitpunkt betrachtet?
- Was wird genau als System betrachtet, d.h. wo sind die Systemgrenzen, und tritt Energie über diese Systemgrenzen?
- Wo steckt die Energie?

Es stellt sich die Frage nach der Einführung von „Energieformen und der Energieumwandlung“. Duit (2007) sieht diese als einen Aspekt neben Energie-transport, Erhaltung und Energieentwertung bei der Elementarisierung der Größe Energie an.

Wir halten die Unterteilung in Energieformen und die daraus resultierenden Energieumwandlungen letztlich für obsolet. Aus Gründen der Anschlussfähigkeit bedienen wir uns dennoch der gängigen Begriffe potentielle Energie und kinetische Energie als „Energieformen“, die einem System zugeschrieben werden, und den Prozessgrößen Arbeit und Wärme, um Transporte über Systemgrenzen hinweg zu charakterisieren. Dabei hoffen wir, dass unsere Studierenden durch die Verwendung der Analogie Feynmans trotzdem erkennen, dass es nur „eine physikalische Größe Energie“ oder nur „eine Energie“ gibt.

Analog wird mit den Größen Impuls und Drehimpuls verfahren: Überlegungen zum Prozess, der stattfindet, zu den betrachteten Systemen, zu externen und internen Kräften respektive Drehmomenten. Allerdings sind bei Impuls und Drehimpuls noch der

vektorielle Charakter zu berücksichtigen und beim Drehimpuls Überlegungen zur Festlegung des Koordinatenursprungs zu treffen.

4.3. Drehmoment beim starren Körper als Analogon zur Kraft

Wesentlich beim Konzept des Drehmoments ist für uns die bekannte Analogiebildung zwischen Rotationsbewegung und Translationsbewegung. Dazu gehören die Analogierelationen zwischen Masse und Trägheitsmoment, Kraft und Drehmoment und den zugehörigen kinematischen Größen Ort und Winkel, Geschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit sowie Beschleunigung und Winkelbeschleunigung. Analog zu Newton I und Newton II lassen sich auch hier Sätze zur Rotationsbewegung formulieren. Und wieder analog werden Verfahren erläutert, wie man durch die Addition und das Verschieben von Kräften am starren Körper zu Kräftepaaren kommt, die zu einer Winkelbeschleunigung des freien Körpers führen und zu Kräften, deren Wirkungslinie durch den Massenmittelpunkt geht und zu Translationsbeschleunigungen führen.

Abschließend für alle Grundkonzepte: Wir erachten für das Verständnis von Physik und für die Fähigkeit, Physik zu vermitteln, auch mathematische Repräsentationen für notwendig. Aber ohne eine vorhergehende Entwicklung von physikalischen Begriffen, einer qualitativen Beschreibung von Zusammenhängen zwischen physikalischen Größen und Vorgängen. Ohne diese qualitative Ebene bleibt eine mathematische Repräsentation ohne nennenswerte Relevanz für das spätere Physiklehren an der Schule. Dies entspricht einer Forderung Wagenscheins (1968) und ist keinesfalls neu, aber angesichts der Ausbildung an Hochschulen im Bereich des Lehramtes Physik ein wohl immer noch sehr aktueller Teil seiner Kritik.

5. Förderung der Frage- und Gesprächskultur

In einer Metastudie zur Effektivität von Hochschullehre nennen Schneider und Preckel (2017) eine Reihe von Maßnahmen, deren positive Wirksamkeit hinsichtlich der Lernförderlichkeit des Wissenserwerbs für verschiedene Studieninhalte mit großen Effektstärken belegt ist - darunter die soziale Interaktion. Ein Bereich davon ist die Förderung der Frage- und Gesprächskultur, die letztlich auch einen Teil zur Kognitiven Aktivierung beiträgt.

Zusätzlich zu den geschilderten kommunikativen Elementen in den Lehr-Lern-Arrangements haben wir versucht, die Kommunikation zwischen Dozent und Studierenden zu gestalten. Der Gesprächsstil, die Möglichkeit, Fragen zu stellen und die Tatsache, nicht über Lernschwierigkeiten der Studierenden hinwegzugehen, werden als wesentliche Elemente zur Effizienzsteigerung in der Hochschullehre genannt (Feldmann 1989). Deshalb wurden die Studierenden regelmäßig am Ende von gelehrten Sinneinheiten aufgefordert, Fragen zu Unklarheiten und

Nichtverstandenen zu stellen. Es wurde aus Sicht des Lehrenden bei den Gesprächen auf eine symmetrische Gesprächsführung geachtet; Fehler im Denken oder in den Vorstellungen wurden aus seiner Wahrnehmung als notwendig akzeptiert. Da oft auch Lehramtsstudierende ihre Probleme beim Verständnis scheinbar einfacher Inhalte vor der ganzen Gruppe nicht äußern, wurde abgemacht, dass der Dozent am Ende der Veranstaltung eine Viertelstunde im Vorlesungsraum bleibt und für fachliche (und organisatorische) Fragen zur Verfügung steht. Dieser Termin wurde von einzelnen Studierenden oder noch häufiger von kleinen Studierendengruppen wahrgenommen.

Um den Studierenden die Möglichkeit des Austauschs mit einer fachlich kompetenten Studierenden zu ermöglichen, wurde ein Tutorium mit zwei SWS eingerichtet. Die Idee: Gesprächsbarrieren zu verringern.

6. Erste basale Evaluation und Zwischenbilanz zur Entwicklung

Um den Bericht abzuschließen, wollen wir über einige einfache Evaluationselemente berichten, um angesichts der Komplexität der Entwicklung eine erste Orientierung über die Einschätzung der Maßnahmen zu erhalten. Dabei werden die basale Evaluation der Vorlesung, die im Sommersemester 2017 gelesen wurde und deren Ergebnisse vorgestellt, diskutiert und Implikationen aufgezeigt. Abschließend erfolgt eine Zwischenbilanz zur Entwicklungsarbeit mit kurzem Ausblick

6.1. Evaluationskriterien der ersten begleitenden Evaluation

Als erste orientierende Evaluation wurde die Wahrnehmung der Veranstaltungselemente durch die Studierenden erhoben und deren Einschätzung, wie die Veranstaltungselemente den eigenen Lernprozess unterstützt haben.

6.2. Stichprobe

Fünfzehn weibliche und sieben männliche Studierende haben im zweiten Durchlauf im Sommersemester 2017 regelmäßig an der sechsstündigen Veranstaltung teilgenommen (im Mittel waren sie 83 % der Zeit anwesend). Die Stichprobe umfasst Studienanfänger (erstes und zweites Semester) und fortgeschrittene Studierende im höheren Semester, die schon einmal eine Einführung in die Mechanik gehört haben. Sie studieren in unterschiedlichen Studienordnungen, insbesondere unterscheiden sich Hauptfach- und Nebenfachstudierende. Die Stichprobe ist daher als heterogen anzusehen.

6.3. Erhebungsmethode

In der Mitte des Semesters (Sommersemester 2017) wurde im offenen Format gefragt: „Welche Elemente (z.B. methodische oder didaktische Maßnahmen) in der Veranstaltung Mechanik (Vorlesung mit integrierten Übungen) unterstützen oder behindern Ihren Lernfortschritt besonders? Nennen Sie höchstens

fünf, und begründen Sie bitte jede Nennung mit einem Satz.“ Die Antworten wurden nach Oberflächenmerkmalen (Wortidentitäten und Synonyme) sortiert und dann nach semantischen Bedeutungen zusammengefasst. Danach wurden die Kategorien gebildet und bezeichnet. Ein Beispiel: Die Nennung „übersichtliche Folien“ mit der Begründung „Die Inhalte sind klar dargestellt und sind dementsprechend sehr zugänglich und verständlich“ wird der Kategorie „(bebilderte) Folienpräsentation“ zugeordnet. Aus den Kategorien wurden in einem zweiten Schritt Items mit fünfstufiger Likertskala mit den Polen stimme [gar nicht/völlig] zu gebildet. Sie folgen dem Schema „X“ hat mir beim Lernen geholfen, z.B. „Die bebilderte Folienpräsentation hat mir beim Lernen geholfen.“ Diese Items wurden den Studierenden am Ende des Semesters in schriftlicher Form vorgelegt.

Außerdem wurde der Standardfragebogen zur Erfassung der Lehrqualität der Pädagogischen Hochschule Ludwigsburg eingesetzt, um eine Einordnung der Studierendeneinschätzung bezüglich anderer Lehrveranstaltungen innerhalb der Hochschule zu ermöglichen. Das Instrument besteht aus 13 Items mit einer fünfstufigen Likertskala mit den Polen Stimme zu und Stimme nicht zu. Das seit Jahren an unserer Hochschule eingesetzte Instrument umfasst fünf Faktoren: Subjektive Lehrqualität, Emotionale Bewertung, Anforderungsniveau, Lernfortschritt und Partizipationsmöglichkeit. Diese werden mit Werten von eins bis fünf versehen, wobei fünf die höchst mögliche Ausprägung der Kategorie ist.

6.4. Ergebnisse

Die offenen Antworten ließen sich in zwölf Kategorien ordnen. Tabelle 1 zeigt die genannten Oberflächenmerkmale der Veranstaltung Mechanik mit integrierten Übungen. Darunter auch die drei Maßnahmen zur kognitiven Aktivierung.

Kategorie (beschrieben in Kapitel)	M	SD
Experimente	4.9	0.3
Peer Instruction (3.1)	4.8	0.5
Gesprächsatmosphäre (5)	4.8	0.4
Folienpräsentation (1.2)	4.7	0.7
Möglichkeit für Rückfragen (5)	4.6	0.8
Alltagsbeispiele (2.2)	4.6	0.6
Schulbezug (2.2)	4.6	0.6
Diskussionsaufgaben (3.2)	4.5	0.8
Häusliche Übungen (2.2)	4.3	0.9
Worked Example (3.3)	3.9	1.0
Genannte Lehrziele (2.2)	3.5	1.2
Rechenaufgaben (2.2)	3.3	1.2
Tutorium (2.2)	3.2	1.5

Tabelle 1: Mittelwerte und Standardabweichungen zugeordnet zu den Kriterien der Entwicklung (Range von 1-5)

Tabelle 2 zeigt die Werte der subjektiven Einschätzungen der Studierenden aus den allgemeinen Evaluationskriterien.

Kategorie	M	SD
Subjektive Lehrqualität	4.8	0.3
Emotionale Bewertung	4.6	0.5
Anforderungsniveau	4.2	0.7
Lernfortschritt	4.8	0.4
Partizipationsmöglichkeit	4.3	0.8

Tabelle 2: Mittelwerte und Standardabweichungen zugeordnet zu den Kategorien des Ludwigsburger Lehrqualitätserfassung (Range von 1-5)

6.5. Diskussion und Implikationen

Die Interventionselemente werden in der offenen Befragung von den Studierenden genannt und anschließend im geschlossenen Antwortformat mit Deckeneffekten als hilfreich für das eigene Lernen eingeschätzt. Wir schließen daraus, dass unsere theoriegeleitete Intervention zumindest aus der subjektiven Sicht der Studierenden gelungen ist. Diese Hypothese ist mit objektiven Daten in der unabhängigen Evaluation (siehe John & Staraschek, 2017) zu untermauern.

Die genannten didaktisch-methodischen Elemente passen zu den Ergebnissen von Schneider & Preckel (2017). Dort zeigen in der Hochschullehre „kooperative Lernformen“ und „Rückmeldungen“ große Effektstärken. Ebenso theoriekonform (siehe Schneider & Preckel, 2017) erweisen sich die beispielsweise an der Multimediatheorie orientierten Folienpräsentationen als hilfreich.

Als unerwartete Kategorie zeigen sich die Experimente. Experimente sollen im Schulunterricht in geeigneter Form unter anderem durch Problemstellung, Hypothesenbildung und anschließende Darstellung, Interpretation und Verallgemeinerung der Ergebnisse eingebettet werden (vgl. hier beispielsweise Tesch & Duit, 2004). Obwohl dies nicht präskriptiv in unseren Leitkriterien festgelegt wurde, wurden retrospektiv betrachtet nahezu alle Experimente in dieser Art durchgeführt. Dies werden wir in der nächsten Veranstaltung vertiefen und weitere Aufgaben damit unterstützen.

Das freiwillige Tutorium wurde sehr unterschiedlich bewertet; es zeigt sich die größte Standardabweichung (s. Tab. 1). Die Ursache ist vermutlich in der Beobachtung zu finden, dass nur ein Drittel der Studierenden dieses Angebot wahrgenommen hat – diese Studierenden haben das Tutorium gut bewertet.

Die genannten Lehrziele haben die Studierenden vermutlich deshalb als eher schwach bewertet (s. Tab. 1), weil sie sich erst im Oktober auf Prüfungen vorbereiten und nicht geprüft wurden. Wir können nicht beurteilen, ob sie bei der kognitiven Aktivierung hilfreich waren. Aus Gesprächen wissen wir,

dass sich die Studierenden wünschten, am Ende jeden Kapitels noch eine Zusammenfassung zu erhalten.

Aus den Ergebnissen zum Fragebogen der Ludwigsburger Lehrevaluation lassen sich folgende Schlüsse ziehen. Insgesamt sind auch bei diesem Fragebogen Deckeneffekte zu verzeichnen. Das Anforderungsniveau wird als verhältnismäßig hoch erlebt. Dies steht im Gegensatz zu sonstigen Veranstaltungen an unserer Hochschule. Dort gehen als von den Studierenden sehr gut bewertet Veranstaltungen meist mit einem eher mittleren Anspruchsniveau einher. Es ist anzunehmen, dass die vorgenommene Elementarisierung für eine Hochschulveranstaltung nicht zu einer Verflachung führte, sondern zur Verständlichkeit eines anspruchsvollen Stoffes.

6.6. Zwischenbilanz zur Entwicklung und Evaluation

Offen bleibt die Frage nach der Charakterisierung des Entwicklungsprozesses. Inwieweit können wir die Theorieleitung als überwiegend operational wissenschaftlichen Prozess betrachten oder wie weit spielen eher unbestimmte als kreativ oder schöpferisch zu bezeichnende Prozesse eine entscheidende Rolle (vgl. hierzu Reinmann, 2014). Hier traten Konflikte auf. So mussten einerseits Lösungen für unbefriedigend erlebte Lehrsituationen oder auch organisatorische Widrigkeiten erfahrungsbasiert, pragmatisch, schnell und situativ gefunden werden, um die Lehre zu gewährleisten. Diese Einflussfaktoren sind nicht wirklich im Sinne einer strengen Empirie zu kontrollieren – was in komplexen Lehr-Lernsituationen so auch nicht notwendig ist. Auf der anderen Seite sollten die Lehrbedingungen möglichst konstant gehalten werden, und die Lehre war so weit wie möglich zu standardisieren und tradierbar zu machen: z.B. ob die Umsetzung der Prinzipien kumulativen Lernens bei der Entwicklung der Lernumgebung immer wieder bewusst kontrolliert wird. Dies wird Teil einer unabhängigen Evaluation.

Unsere Entwicklung im Durchgang Sommersemester 2018 wird auch aus einer von der Entwicklung unabhängigen Perspektive untersucht und damit evaluiert. Die Evaluationskriterien dieser Evaluation sind unter anderen die Entwicklung des physikalischen Fachwissens, insbesondere in Hinsicht auf die mechanischen Grundkonzepte, und die subjektiven Einschätzungen der Fähigkeit, Physik in der Schule zu unterrichten, die antizipierte Lehrerselbstwirksamkeit (vgl. John & Staraschek 2017). Die dabei gewonnenen Ergebnisse können zu einer erneuten Überarbeitung der Lehrveranstaltungsreihe der Mechanik führen. Im Anschluss daran sollen Teile der Veranstaltung – auch als Prototyp – Lehrenden und Studierenden, z.B. als Sammlung von Übungsaufgaben über das beschriebene Beispiel hinaus öffentlich zugänglich gemacht werden.

7. Literatur

- Borowski, A.; Kirschner, S.; Liedtke, S. & Fischer, H.E. (2011). Vergleich des Fachwissens von Studierenden, Referendaren und Lehrenden in der Physik. *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 1 (10), 1-9.
- Chandler, P. & Sweller, J. (1991). Cognitive load theory and the format of instruction. *Cognition and Instruction*, 8, 293-332.
- Design-Based Research Collective (DBRC) (2003). Design-Based Research: An Emerging Paradigm for Educational Inquiry. *Educational Researcher*, 32 (1), 5-8.
- Duit, R. (2007). Energie - Ein zentraler Begriff der Naturwissenschaften und des Naturwissenschaftlichen Unterrichts. *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik*, 18 (102), 4-8.
- Euler, D. (2014). Design Principles als Kristallisationspunkt für Praxisgestaltung und wissenschaftliche Erkenntnisgewinnung. In: D. Euler & P. Sloane (Hrsg.), *Design-Based Research*. Stuttgart: Franz Steiner, 97-112.
- Feldman, K. (1989). The association between student ratings of Specific instructional dimensions and student achievement. *Research in Higher Education*. 30 (6), 583-645.
- Feynman, R. P.; Leighton, R. B. & Sands, M. (2015). *Feynman-Vorlesungen über Physik: Mechanik*. München: De Gruyter Studium.
- Gagné, R. (1968). Contributions of Learning to Human Development. *Psychological Review*, 75, 177-191.
- Girwidz, R. & Berger, R. (2011). Elementarisierung. In: M. Hopf; H. Schecker & H. Wiesner (Hrsg.), *Physikdidaktik kompakt*. Freising: Aulis, 72-77.
- Girwidz, R. (2002-2007). Unveröffentlichte Folien zur Vorlesung „Mechanik“ an der Pädagogischen Hochschule Ludwigsburg.
- Hestenes, D.; Wells, M. & Swackhamer, G. (1992). Force concept inventory. *The Physics Teacher* 30, 141-166.
- John T. & Starauschek E. (2018). Kumulatives Lehren und Lernen im Lehramtsstudium Physik. Entwicklung eines Modells zur professionsorientierten Fachausbildung von Physiklehrkräften. Didaktik der Physik Frühjahrstagung Würzburg 2018. *PhyDid B*.
- John, T. & Starauschek, E. (2017). Kumulatives Physiklehren und -lernen im Lehramtsstudium - Evaluation eines Lehrkonzepts. In C. Maurer (Ed.), *Qualitätvoller Chemie- und Physikunterricht - normative und empirische Dimensionen*, 33, 150-153.
- Kultusministerkonferenz (Hrsg.) (2005). *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss*. München: Luchterhand.
- Mayer, R. (2001). *Multimedia learning*. New York, NY; US: Cambridge University Press.
- Mazur, E. (1997). *Peer Instruction: A User's Manual*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
- Muckenfuß, H. (1994). Die „lose Rolle“: Ein „Misskonzept“ der Fachdidaktik? *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik*, 5 (42), 27-30.
- Muller, D. (2013). Bullet block Experiment. <https://www.youtube.com/watch?v=vWVZ6APXM4w> (abgerufen April 2018).
- Müller, R. (2009). *Klassische Mechanik: Vom Weitsprung zum Marsflug*. Berlin: De Gruyter.
- Reinmann, G. (2005). Innovation ohne Forschung? Ein Plädoyer für den Design-Based Research Ansatz in der Lehr-Lernforschung. *Unterrichtswissenschaft* 1, 52-69.
- Reinmann, G. (2014). Welchen Stellenwert hat die Entwicklung im Kontext von Design Research? Wie wird Entwicklung zu einem wissenschaftlichen Akt? In: D. Euler & P. Sloane (Hrsg.), *Design-Based Research*. Stuttgart: Franz Steiner, 63-78.
- Renkl, A. (2002): Learning from worked-out examples: Instructional explanations supplement self-explanations. *Learning & Instruction* 12, 149-176.
- Renkl, A., & Schworm, S. (2002). Lernen, mit Lösungsbeispielen zu lehren. In: M. Prenzel & J. Doll [Hrsg.], *Bildungsqualität von Schule: Schulische und außerschulische Bedingungen mathematischer, naturwissenschaftlicher und überfachlicher Kompetenzen*. Weinheim: Beltz, 259-270.
- Renkl, A., (2011). Aktives Lernen: Von sinnvollen und weniger sinnvollen theoretischen Perspektiven zu einem schillernden Konstrukt Unterrichtswissenschaft. 39 (3), 197-212.
- Riese, J. & Reinhold, P. (2010). Die Wirksamkeit verschiedener Lehramtsstudiengänge Physik im Vergleich. Vortrag GDPC-Jahrestagung in Potsdam September 2010
- Rincke K. (2005). Vom Kraft Haben zum Kraft-Ausüben. Ein fachsprachenorientierter Zugang zum Kraftbegriff. *Unterricht Physik*, 16, Heft 87, 28-31.
- Rubitzko, T.; Laukenman, M. & Starauschek E. (2018). Kumulatives Lehren und Lernen in der Lehramtsausbildung am Beispiel der Veranstaltung „Schulversuche zur Mechanik“ (im Druck).
- Schneider, M. & Preckel, F. (2017). Variables associated with achievement in higher education: A systematic review of meta-analyses. *Psychological Bulletin*, 143, 565-600.
- Spiro, R. J., Coulson, R. L., Feltovich, P. J. & Anderson, D. K. (1988). Cognitive flexibility theory: advanced knowledge acquisition in ill-structured domains. In: V. Patel (Hrsg.), *Tenth annual conference of the cognitive science society* Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum. 375-383.
- Springer, L.; Stanne, E. S. & Donovan, S. (1999). Effects of Small-Group Learning on Undergraduates in Science, Mathematics, Engineering, and Technology: A Meta-Analysis. *Review of Educational Research* 69 (1), 21-51.
- Sweller, J.; van Merriënboer, J.; Paas, F. (1998): Cognitive architecture and instructional design. In: *Educational Psychology Review* 10, 251-296.

- Tesch, M. & Duit, R. (2004). Experimentieren im Physikunterricht – Ergebnisse einer Videostudie. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*; 10, 51-69.
- Tipler, P; Mosca, G. & Wagner, J. (2015). *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. Berlin Heidelberg: Springer Spektrum
- Wagenschein, M. (1968). *Verstehen Lehren*. Weinheim: Beltz.
- Weinert, F. E. (1999). Bedingungen für mathematisch-naturwissenschaftliche Leistungen in der Schule und die Möglichkeiten ihrer Verbesserung. In Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg (Hrsg.), *Weiterentwicklung des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts*. Stuttgart: MKJS Baden-Württemberg.
- Wiesner, H. & Schecker, H. (2011). Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten. In: M. Hopf, H. Schecker & H. Wiesner (Hrsg.), *Physikdidaktik kompakt*. Freising: Aulis, 34-47.
- Wiesner, H. & Waltner, C. (2009). Energie als Bilanzgröße. *Praxis der Naturwissenschaften Physik in der Schule* 58 (3), 15-21
- Wiesner, H. (1994). Zum Einführungsunterricht in die Mechanik: Statisch oder dynamisch? *Naturwissenschaften im Unterricht-Physik*, 22, 16-23.
- Wiesner, H.; Wilhelm, T.; Waltner, C; Tobias, V.; Rachel, A. & Hopf, M. (2016). Kraft und Geschwindigkeitsänderung. *Neuer fachdidaktischer Zugang zur Mechanik (Sek. 1)* Freising: Aulis.
- Wilhelm, T. & Heuer, D. (2002). Fehlvorstellungen in der Kinematik vermeiden - durch Beginn mit der zweidimensionalen Bewegung. *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*, 51 (7), 29 – 34.
- Wilhelm, T. & Hopf, M. (2014). Design-Forschung. In: D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 31-42.
- Wilhelm, T. (2018 a). Trägheit nur bei schnellen Bewegungen? In: T. Wilhelm (Hrsg), *Stolpersteine überwinden im Physikunterricht*. Seltze: Aulis 36-38.
- Wilhelm, T. (2018). *Stolpersteine überwinden im Physikunterricht*. Seltze: Aulis.

Danksagung

An dieser Stelle sei ein besonderer Dank an Raimund Girwidz für seine erste Entwicklung der Vorlesung zur Mechanik gerichtet.

Die Entwicklung und Evaluation der Lehr-Lernformen zur Unterstützung von kumulativem Lernen von physikalischen Grundkonzepten ist ein Teilprojekt des Verbundvorhabens Lehrerbildung PLUS der PSE Stuttgart-Ludwigsburg. Es wird im Rahmen der gemeinsamen „Qualitätsoffensive Lehrerbildung“ von Bund und Ländern aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert.

Fachwissen und Problemlösen im Physikstudium

- Vorstellung des Forschungsprojektes KEMΦ -

David Woitkowski*

*Didaktik der Physik, Warburger Straße 100, Universität Paderborn

david.woitkowski@upb.de

Kurzfassung

Die Studieneingangsphase im Fach Physik fordert von den Studienanfängern den Aufbau vielfältiger Fertigkeiten und Fähigkeiten. Zwei wichtige stehen im Fokus des vorgestellten Projektes KEMΦ (Kompetenzentwicklung Physik in der Studieneingangsphase): Das physikalische Fachwissen, welches in Vorlesungen gelehrt und in Übungen (und z. T. auch in Praktika) angewandt werden muss, sowie die physikbezogene Problemlösefähigkeit, welche vor allem implizit gelehrt wird, ohne die aber ein erfolgreiches Bearbeiten von Übungszetteln oder Klausuraufgaben kaum möglich ist.

Diese Fähigkeiten sollen bei Physik-Studierenden im ersten Studienjahr längsschnittlich zu drei Testzeitpunkten erhoben werden, so dass es möglich wird eine Abbildung typischer Lernverläufe zu erstellen. Damit kann z. B. geklärt werden, in welchem Umfang Problemlösefähigkeiten aus der Schule ins Studium mitgebracht werden und wie gut Sie bei den dort typischen Problemstellungen einsetzbar sind. Auch ist von Interesse, ob das Vorhandensein von Problemlösefähigkeiten den Fachwissenserwerb in dieser kritischen Phase positiv beeinflusst, oder ob sich eine gegenseitige Abhängigkeit in ihrer Entwicklung zeigt.

Zur Erhebung des Fachwissens werden ein etabliertes Testinstrument und ein komplexitätsbasiertes Niveaumodell verwendet. Für die Erhebung von Problemlösefähigkeiten wurde eigens ein neues Testverfahren entwickelt, welches sich nah an typischen Übungszettel-Aufgaben als einer wichtigen Problemlösesituation des Physikstudiums orientiert.

1. Einleitung und Ausgangslage

Die Evaluation der Wirksamkeit des Studiums an deutschen Hochschulen stellt ein wichtiges Ziel der aktuellen fachdidaktischen Forschung dar [1]. In diesem Zuge zeigen sich im Fach Physik sowohl in den Lehramts- als auch in den Fach-Studiengängen eine Reihe von Problemen: In aktuelle Studien weisen etwa ein Drittel der Studierenden auch nach angemessener Studiendauer einen unzureichenden Wissensstand auf und können die für die Physik typischen komplexen Problemstellungen nicht erfolgreich bearbeiten [2]. Dies führt im Laufe des Studiums zu einer immer größer werdende Leistungsdisparität zwischen unterschiedlich fähigen Studierendengruppen [3]. Diese Schwierigkeiten sind dabei nicht nur bezüglich des fachlichen Studienerfolgs problematisch, sondern können auch als ein wesentlicher Grund für die hohen Studienabbruch- und -schwundquoten in der Studieneingangsphase identifiziert werden [4–6]. Dennoch liegen bisher nur wenige empirische Hinweise zur Aufklärung von Verläufen und Determinanten des Fachwissenserwerbs in der Studieneingangsphase vor.

Zur Aufklärung solcher Erwerbsverläufe werden im Projekt KEMΦ (Kompetenzentwicklung Physik in der Studieneingangsphase) zwei Forschungsansätze zusammengebracht, die in der Vergangenheit eher unabhängig voneinander bearbeitet wurden: Der Ansatz der Kompetenzmessung ermöglicht es, Stu-

dierende der Physik in Niveaus einzuordnen, die die Komplexität als Qualitätsmerkmal des bei ihnen verfügbaren physikalischen Fachwissen repräsentieren [2]. Der Ansatz des wissenszentrierten Problemlösens [7] lenkt den Blick demgegenüber stärker auf die zur Bewältigung typischer fachlicher Problemanforderungen bei den Studierenden zur Verfügung stehenden Lösungsschemata – diejenige Ressource, die beim Strukturieren von Aufgaben und beim Finden und Verfolgen von Lösungsansätzen nötig ist. Die beiden Ansätze hängen insofern zusammen, als dass Problemschemata bei der Auseinandersetzung mit fachlichen Problemstellungen erworben werden, andererseits die höheren Niveaus im Fachwissen aber hypothetisch nur erreicht werden können, wenn entsprechende Schemata vorliegen und genutzt werden können.

2. Projektüberblick und Zielsetzung

Ziel des Projektes ist eine längsschnittliche Nachverfolgung der Kompetenzentwicklung von Studierenden der Physik in Fach- und Lehramtsstudiengängen im ersten Studienjahr. Dabei sind vor allem fachbezogenen Kompetenzfacetten und mögliche Entwicklungsprädiktoren von Interesse, da diese im Zentrum der fachlichen Ausbildung in diesem Zeitraum stehen [8–10].

Kompetenz wird dabei im Rahmen des Projekts aufgefasst als die „bei Individuen verfügbaren oder

von ihnen erlernbaren kognitiven Fähigkeiten und Fertigkeiten, bestimmte Probleme zu lösen, sowie die damit verbundenen, motivationalen, volitionalen und sozialen Bereitschaften und Fähigkeiten, die Problemlösungen in variablen Situationen erfolgreich und verantwortungsvoll nutzen zu können“ [11; S. 27], wobei die kognitiven Fähigkeiten, fachliche Probleme zu lösen, im Vordergrund des Forschungsinteresses stehen und die genannten Bereitschaften als mögliche Entwicklungsdeterminanten betrachtet werden.

Die Erhebung gliedert sich im Projekt in zwei Module: Im Modul FW wird die Komplexität des Fachwissens der Studierenden erfasst; im Modul PL werden die Problemschemata, die die Studierenden in fachlichen Anforderungssituationen nutzen können, sowie weitere Merkmale des Problemlöseprozesses erfasst. In jedem der Module werden einzelne Hypothesen überprüft, die insgesamt einen hypothetischen Entwicklungsverlauf und eine gegenseitige Abhängigkeit von Fachwissenskomplexität und Problemschemata abbilden.

Die längsschnittliche Erhebung im Modul FW geschieht für jede Kohorte zu drei Testzeitpunkten (Abb. 1): TZP 1 liegt in der ersten Semesterwoche des ersten Studiensemesters. Er dient somit als Erhebung des Vorwissens bei Studienbeginn. TZP 2 und 3 liegen jeweils in der letzten Woche des ersten und zweiten Studiensemesters. Da in den eingesetzten Testinstrumenten der Inhaltsbereich Mechanik, ein typischer Gegenstand des ersten Semesters [9], bearbeitet wird, können TZP 2 und 3 gewissermaßen als Post- und Follow-Up-Erhebung aufgefasst werden.

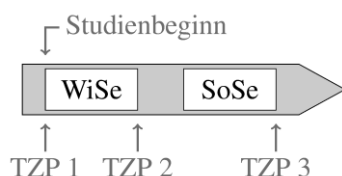


Abb.1: Testzeitpunkte im ersten Studienjahr.

Die Erhebungen des Moduls PL liegen jeweils in den zwei Wochen nach der FW-Erhebung, um einerseits ein Priming für die FW-Erhebung zu verhindern, andererseits aber eine direkte zeitliche Nähe herzustellen. Die FW-Erhebung geschieht parallel an mehreren Universitäten in Deutschland, die PL-Erhebung jedoch aufgrund des höheren Erhebungsaufwandes nur lokal.

Für das gesamte Projekt werden drei übergreifende Fragestellungen geprüft:

- Wird in beiden erhobenen Facetten ein Zuwachs beobachtet? Querschnittsdaten [12, 13] legen das nahe, können aber z. B. Stichprobeneffekte nicht ausschließen.
- Wie hängen die beiden Facetten im Lernprozess voneinander ab? Viele Lerngelegenheiten im Studium (besonders deutlich im Übungsbetrieb

bei der Bearbeitung von Übungsaufgaben) erfordern entweder sowohl Fachwissen und Problemlösefähigkeiten oder bauen beide gemeinsam auf. Denkbar wäre hier also eine gegenseitige Abhängigkeit im Sinne eines Bootstrappings [vgl. z. B. 14].

- Mit welchen weiteren Merkmalen interagieren diese beiden Facetten? Von besonderem Interesse ist hier sicherlich die Mathematik [15]. Aber auch Motivation, Arbeitsverhalten sowie physikbezogene Einstellungen und Beliefs und Studienbedingungen werden hier überprüft.

3. Modul FW: Komplex verknüpftes Fachwissen

Das physikalische Fachwissen steht im Zentrum gängiger Modelle der professionellen Kompetenz angehender Physiker und Physik-Lehrkräfte [16]. Es stellt hier eine der zentralen Ressourcen dar, auf die beim Umgang mit fachlichen Anforderungen zurückgegriffen werden muss.

Im vorliegenden Modell (Abb. 2) und Testinstrument werden dabei ausschließlich Inhalte der Mechanik (Kinematik, Dynamik sowie Impuls und Energie) thematisiert, da es sich hier um in so gut wie allen Studiengängen im deutschsprachigen Raum im ersten Semester gelehrt Inhalte handelt [9].

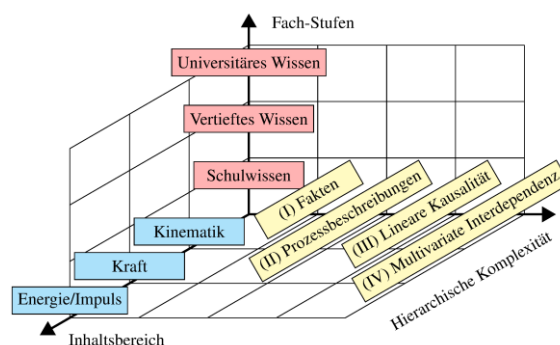


Abb.2: Strukturmodell des getesteten Fachwissens [13].

Für eine differenzierte Diagnose in der Studieneingangsphase werden drei Wissensbereiche unterschieden: Das universitäre Wissen (dessen Erwerb Ziel der fachlichen Hochschulausbildung ist) und das Schulwissen (über das Studierende zu Studienbeginn verfügen bzw. verfügen sollten). Darüber hinaus wird das vertiefte Wissen für relevant gehalten [17], das sich durch eine stärkere konzeptionelle Durchdringung der Physik und die Überwindung gängiger Fehlvorstellungen auszeichnet, welche in der physikdidaktischen Forschung wiederum als hoch relevante Lernhindernisse auf allen Bildungstufen identifiziert wurden [z. B. 18]. In der hier vorgenommenen Konzeptualisierung unterscheiden sich diese Wissensbereiche lediglich im Abstraktions-, Mathematisierungs- und konzeptionellen Durchdringungsgrad, nicht jedoch in der im Folgenden zur Niveaubeschreibung genutzten Komplexität.

3.1. Komplexität als Qualitätsmaß physikalischen Fachwissens

Wissen wird in der Psychologie typischerweise als propositionales Netzwerk aufgefasst [vgl. 19], dessen Qualität und Anwendbarkeit in schwierigen Problemstellungen mit seinem Verknüpfungsgrad steigt [20]. Dieser Verknüpfungsgrad wird in verschiedenen Studien der Naturwissenschaftsdidaktiken mit Hilfe des Aufgabenmerkmals der hierarchischen Komplexität abgebildet [13, 21, 22]. Dabei erweist sich die Komplexität als zentrales Schwierigkeitserzeugendes Merkmal einer Anforderung.

Ein solches Komplexitätsmodell kann genutzt werden, um Kompetenzniveaus zu definieren, indem jeweils Probanden, die Items derselben Komplexität hinreichend erfolgreich lösen können, auf einem gemeinsamen Niveau verortet werden. Ein solches Niveaumodell wurde in einem vorangegangenen Projekt auf der Grundlage des Tests von Woitkowski [13] erstellt [2], wobei sowohl für die gesamte FW-Skala als auch für die drei Teilskalen zum schulischen, vertieften und universitären Wissen ein Niveaumodell vorliegt.

Diese Niveauekonstruktion kann nun als Analysewerkzeug genutzt werden, um die Fachwissensentwicklung der Probanden längsschnittlich zu verfolgen [23–25]. Besonders ist dabei von Interesse, wie sich die Eingangsvoraussetzungen im Schulwissen auf den Zuwachs im universitären Wissen auswirken und unter welchen weiteren Bedingungen die oberen Niveaus erreicht werden (können).

3.2. Fachwissens-Testinstrument und geplante Analysen

Das eingesetzte Testinstrument besteht im Kern aus den Fachwissens-Items von Woitkowski [13]. Diese sind in einem partially Balanced Incomplete Block Design (pBIBD) angeordnet, so dass die Probanden zu jedem der Testzeitpunkte andere Testitems bearbeiten und Erinnerungseffekte weitgehend ausgeschlossen werden können.

Neben den Fachwissens-Items enthält das Testheft 15 Items aus dem Mathematik-Studieneingangstest von 1978 [26] zu den Themenbereichen Vektorrechnung, Geraden- und Ellipsengleichung, Quadratische Gleichungen, Funktionsgraphen und Ableitungen. Außerdem werden hier verschiedene Skalen eingesetzt, die mögliche Entwicklungsprädiktoren abdecken: Physikbezogene Beliefs und Selbstkonzept [3, 27], Studienzufriedenheit, Kontextbedingungen, Lernschwierigkeiten und Studienklima [4, 28], fachspezifische Academic Buoyancy [29], Importance und Effort mit Bezug zu Übungs- und Klausursituationen (adaptiert nach [30]).

Das gesamte Testheft ist für 60 Minuten Bearbeitungszeit ausgelegt und wird nach Möglichkeit direkt in der jeweiligen Lehrveranstaltung (Vorlesung oder Übung) oder in direkter zeitlicher Nähe dazu bearbeitet. Für die Teilnahme an allen drei Testzeitpunkten wird ein Probandengeld gezahlt.

Zur Analyse der Daten wird ein dreidimensionales dichotomes Rasch-Modell (getrennt nach den Facetten schulisches, vertieftes, universitäres Wissen) herangezogen. Besonders bei schwächeren Probanden passte dieses in früheren Studien signifikant besser als ein eindimensionales Modell [13]. Anschließend werden die Probanden zu jedem Testzeitpunkt für jede der Wissensbereiche einem Niveau zugeordnet, so dass nun der Verlauf durch die Niveaus analysiert werden kann.

4. Modul PL: Problemlösen

Im Sinne des beschriebenen Projektes ist ein Problem „jede Aufgabe, die das Analysieren und Schlussfolgern auf ein Ziel (oder eine ‚Lösung‘) hin benötigt. Dieses Analysieren und Schlussfolgern muss auf einem Verständnis der Domäne aus der die Aufgabe stammt, beruhen. Ein Problem kann nicht durch Erinnern oder Reproduzieren gelöst werden [...]. Ob es sich bei einer Aufgabe um ein Problem handelt oder nicht, ist nicht davon abhängig, wie schwierig oder verwirrend es für den vorgesehenen Löser ist.“ [31; S. 44]. Diese Definition ist so gewählt, dass viele typische Übungszettel-Aufgaben in physikalischen Lehrveranstaltungen darunter fallen.

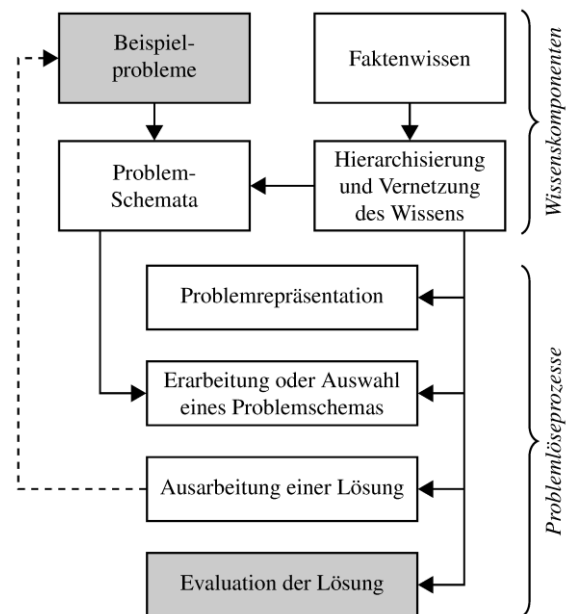


Abb.3: Modell des wissenszentrierten Problemlösens [7].

Um solche Problemstellungen erfolgreich lösen zu können, wird üblicherweise auf verschiedene Wissenskomponenten zurückgegriffen und werden in der Regel verschiedene Lösungsschritte durchlaufen (Abb. 3), wie im Modell des wissenszentrierten Problemlösens beschrieben [7]. Neben komplex verknüpftem Fachwissen, wie es im Modul FW erhoben wird, werden bei einer erfolgreichen Problemlösung auch Problemschemata genutzt. Diese fassen Wissens Elemente im Umkreis von Beispielaufgaben zu komplexen, geordneten Gruppierungen zusammen. Sie liefern somit die Information, wie d. h. mit welchen Werkzeugen und welchen Argu-

mentationsweisen ein gestelltes Problem sinnvoll und effektiv bearbeitet werden kann.

Fehlen diese Ressourcen im Übungsbetrieb der Physik, so treten verschiedene Schwierigkeiten auf: Ein „Ansatz“ wird nicht gefunden, die Bezugnahme auf (z. B. in der Vorlesung) gelerntes Fachwissen gelingt nicht oder die (z. B. auch mathematische) Ausarbeitung einer Lösung scheitert [31, 32].

4.1. Testinstrument zum Problemlösen

Die Problemlösefähigkeit soll im Projekt nahe an der real im Studium vorkommenden Situation der Bearbeitung eines Übungszettels erhoben werden – allerdings mit geringerem Zeitaufwand. Dazu werden im Rahmen des FW-Tests zu TZP 1 freiwillige Probanden gesucht. Diese nehmen zu selbst gewählten Zeitpunkten ein bis zwei Wochen nach dem FW-Test am Problemlösetest teil. Auch hier werden Probandengelder für die Teilnahme an allen drei Problemlösetests gezahlt. Angestrebt wird, den Problemlösetest mit ca. 10 % der Probanden des FW-Tests durchzuführen.

Der Problemlösetest selbst besteht aus zwei Phasen. In der ersten Phase wird den Probanden ein Übungszettel vorgelegt, die diese mit der Methode des lauten Denkens lösen sollen (wie z. B. schon bei Simon und Simon [33]). Die Übungszettel sind dabei inhaltlich an den jeweiligen Stand im Studium angepasst: Zu TZP 1 geht es inhaltlich um den schiefen Wurf, zu TZP 2 um Schwingungen und zu TZP 3 um die Energie- und Impulserhaltung. Jeder Übungszettel folgt demselben Aufbau mit 4 Aufgaben (welcher den Probanden jedoch nicht mitgeteilt wird): Die ersten drei Aufgaben können jeweils unter Anwendung desselben Problemschemas bearbeitet werden. Die erste Aufgabe ist dabei typischerweise aus der Schule oder der vorangegangener Lehrveranstaltung bekannt und erfüllt den Zweck, zu prüfen ob das Schema und grundlegende Begriffe beim Probanden überhaupt vorhanden sind. Die zweite und dritte Aufgabe erfordern dann den Umgang mit höherer Komplexität oder mehreren Lösungsschritten. Eine dieser Aufgaben gibt konkrete Zahlenwerte vor, die andere nicht. Die vierte Aufgabe schließlich bewegt sich im selben Inhaltsbereich, ist aber nicht mit genau demselben sondern einem abgewandelten Problemschema lösbar. Hier soll geprüft werden, inwieweit die Probanden selbst ein Schema erarbeiten oder abwandeln können.

In der zweiten Phase werden die Probanden direkt im Anschluss zur Bearbeitung des Übungszettels interviewt. Zunächst wird dabei nach der allgemeinen Herangehensweise an den Aufgabenzettel gefragt und ob diese mit dem Umgang mit „realen“ Übungszetteln übereinstimmt. Dabei interessiert vor allem, in welcher Reihenfolge die Aufgaben bearbeitet werden, wie schwierig sie in Relation zueinander eingeschätzt werden und wie diese Einschätzung das Vorgehen beeinflusst. Anschließend sollen die Probanden für jede Aufgabe ihren Lösungsweg erklä-

ren. Dabei soll festgestellt werden, wie die Probanden auf den Ansatz zur Lösung kommen, welche Informationen (aus Skript, Literatur, dem Internet oder vorangegangenen Aufgaben) herangezogen werden, wie mit Schwierigkeiten im Lösungsprozess umgegangen wird, für wie korrekt die Probanden ihre Lösung halten und ob ihnen die inhaltlichen und strukturellen Zusammenhänge zwischen den Aufgaben klar sind.

Auf diese Weise wird der Lösungsprozess der Probanden zweimal erhoben, einmal während des Prozesses und einmal nach dem Prozess. Durch diese Doppelung soll die Validität der jeweiligen Interpretation abgesichert werden.

Die beiden Phasen des Problemlösetests werden jeweils aufgezeichnet und anschließend transkribiert. Die jeweiligen Lösungsniederschriften liegen ebenfalls vor. Die Auswertung geschieht mit den Mitteln der strukturierenden Inhaltsanalyse [34]. Dazu werden deduktive Kategorien aus der Literatur abgeleitet [7, 35–38] und ggf. weitere Kategorien aus dem Material gebildet.

Auf dieser Datenbasis wird dann geklärt, welche Problemschemata bei den Studierenden überhaupt zur Lösung der Aufgaben zur Verfügung stehen und unter welchen (durch komplexe Aufgabenstellungen erschwerten) Bedingungen sie genutzt werden können. Außerdem wird deutlich, auf welches Fachwissen die Studierenden jeweils zurückgreifen können – die fachlichen Inhalte der genutzten Aufgaben sind jeweils fest im Curriculum der jeweiligen Lehrveranstaltung verankert, es interessiert hier aber, wie und ob das Wissen jeweils abgerufen wird. Schließlich interessiert eine umfassende Analyse der auftretenden Schwierigkeiten sei es in der Problemrepräsentation, der Auswahl oder Erarbeitung eines Problemschemas oder in der (auch mathematischen) Ausarbeitung der Lösung.

5. Vorstudien und erste Ergebnisse

Das vorgestellte Projekt basiert unter anderem auf Ergebnissen zweier Vorstudien, die im Folgenden kurz dargestellt werden sollen.

5.1. Erste Fachwissens-Längsschnitte

Mit dem hier eingesetzten Fachwissens-Testinstrument wurden bereits frühere Erhebungen durchgeführt, so auch zwei erste Längsschnitt-Erhebungen. Diese folgten jeweils demselben Erhebungsplan wie oben, erfassten aber noch nicht dieselben Begleitskalen (Einstellungen, Beliefs, Studienbedingungen) wie im schließlich eingesetzten Instrument. Intention war zunächst erste Erfahrungen bei der Akquise von Längsschnittkohorten zu sammeln.

Die erste dieser beiden Erhebungen wurde lokal in Paderborn in zwei Erstsemester-Lehrveranstaltungen durchgeführt. Dabei zeigte sich erstens eine Dropout-Quote zwischen den Testzeitpunkten von im Mittel 50 % (stark schwankend zwischen den erfass-

ten Studiengängen und Testzeitpunkten). Zweitens wurden erhebliche Studiengangsunterschiede im Fachwissen und dessen Entwicklung deutlich. Die in einer Lehrveranstaltung getesteten Studierenden im Haupt-/Realschul-Lehramt und im Nebenfach (v. a. Chemie) zeigten im Vergleich mit den Fach- und Gymnasial-Lehramts-Studierenden der anderen Lehrveranstaltung erhebliche Unterschiede in den Testergebnissen. Um hier zu klären, inwieweit dies auf Charakteristika der beiden Lehrveranstaltungen oder Dozenten zurückzuführen ist, wären umfangreiche Analysen vonnöten, die ursprünglich nicht im Fokus der Autoren stand. In der Konsequenz wurde die vorrangig betrachtete Zielgruppe auf Fach-Studierende und Studierende anderer Studiengänge, die jedoch im ersten Studienjahr dieselben Fachvorlesungen belegen, eingeschränkt. Erste Ergebnisse sind auf Tagungen präsentiert worden [39].

Die zweite Längsschnitt-Erhebung fand an zwei Standorten statt und hatte zunächst das Ziel, den Ablauf einer extern durchgeführten Längsschnitterhebung zu pilotieren. Hier wurden Testleitermanuale und weitere Materialien erprobt. Auf Grundlage dieses Datensatzes konnten erste Vergleiche zwischen TZP 1 und 2 vorgenommen werden (N=110). Es zeigt sich, dass die Studierenden in diesem Zeitraum im Mittel in allen drei Skalen (schulisches, vertieftes, universitäres Wissen) sowie in den mathematischen Kenntnissen signifikante Wissenszuwächse aufweisen. Auch gibt es erste Anzeichen dafür, dass die zu TZP 1 im Schulwissen erreichte Komplexität ein wesentlicher (limitierender) Prädiktor für den Erwerb universitären Wissens zwischen TZP 1 und 2 sein könnte. Vergleicht man hier Probanden, die zu TZP 2 angemessen hohe Niveaus im universitären Wissen erreichen mit denen, die diese Niveaus nicht erreichen, zeigen sich Unterschiede in allen Vorwissensskalen sowie bei mehreren motivationalen Faktoren [40].

5.2. Interviewstudie zum Problemlösen in der Studieneingangsphase

Da bereits in früheren Studien und in der ersten Längsschnittstudie (s. o.) klar wurde, dass nur ein Teil der Varianz im Fachwissenserwerb auf deskriptive Daten aus Motivations-, Belief- und Einstellungsskalen zurückführbar ist, wurde eine Interviewstudie durchgeführt, die verschiedene Aspekte der Studieneingangsphase umfasste, und Hypothesen generieren sollte, welche weiteren Entwicklungscharakteristika der mit dem Fachwissenserwerb in Zusammenhang stehen könnten. Dafür wurden im Rahmen der zweiten Fachwissens-Vorstudie 8 freiwillige Studierende akquiriert, die sich in etwa gleichmäßig auf Fach- und Lehramtsstudiengänge sowie auf die Geschlechter verteilten und eine erhebliche Streuung in der Abiturnote aufwiesen. Von allem Probanden liegen auch Fachwissensdaten vor.

Mit diesen Probanden wurden im Verlauf des ersten Semesters im Abstand von 2–3 Wochen insgesamt 5

ca. 45-minütige leitfadengestützte Interviews geführt, das erste in der dritten Semesterwoche, das letzte in der Woche vor der Klausur (Experimentalphysik A). Neben sozialen und emotionalen Aspekten des Studienbeginns, des Selbstkonzeptes als Physiker bzw. Physik-Lehrkraft und dem allgemeinen Arbeitsverhalten wurde in jedem Interview die Bearbeitung des jeweils zuletzt gelösten Übungszettels der Experimentalphysik A thematisiert. Die Interviews wurden im Rahmen einer qualitativen Inhaltsanalyse [34] mit deduktiv aus dem Material gewonnenen Kategorien analysiert.

Im Verlauf der Interviewstudie wurde klar, dass die Bearbeitung der Übungszettel sowohl in Qualität als auch in Quantität eng mit den fachlichen Leistungen korrespondieren – insbesondere stärker als die anderen abgefragten Themen. Hier zeigt sich eine große Streuung in der Herangehensweise an die Aufgaben, die Kooperation mit anderen Studierenden, die Fähigkeiten, einen Ansatz zu finden. Allgemein verbreitet ist aber das Problem, dass auch zum Ende des Semesters kein Proband ausgefeilte Problemlösestrategien für diese Problemstellungen entwickelt hatte und etwa ab der Hälfte des Semesters eine wesentliche Überforderung mit den mathematischen Anforderungen der Übungszettel auftrat [32].

Insgesamt zeigt sich in dieser Vorstudie aber auch, dass das bloße Sprechen über einen Übungszettel der letzten oder vorletzten Woche nur wenige relevante Informationen liefert, da die Studierenden diese sehr unterschiedlich ausführlich bearbeiten und sich unterschiedlich gut an ihr konkretes Vorgehen erinnern konnten, so dass für die Hauptstudie auf das oben dargestellte Laute Denken beim Lösen präparierter Übungszettel umgestellt wurde.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Studieneingangsphase in der Physik ist (wie in vielen anderen MINT-Fächern auch) durch eine Reihe von Herausforderungen für die Studienanfänger geprägt. Neben dem Zurechtfinden im für sie neuen System „Universität“ und den vielfältigen Passungsproblemen und Leistungsanforderungen zählen hierzu auch fachliche Schwierigkeiten, die nicht zuletzt eine wesentliche Rolle bei Studienabbruch und -wechsel als auch bei späteren Leistungsproblemen im Studium spielen.

Im Rahmen des Projektes KEMΦ (Kompetenzentwicklung Physik in der Studieneingangsphase) soll die Dynamik der Fachwissensentwicklung im ersten Studienjahr längsschnittlich nachverfolgt werden. Es sollen Problemstände empirisch fassbar gemacht und Entwicklungsprädiktoren geprüft werden. Dabei werden vor allem zwei relevante fachliche Kompetenzfacetten in den Blick genommen: Das Fachwissen als dasjenige Wissen dessen Erwerb in der Studieneingangsphase im Vordergrund steht und welches aufgegliedert nach schulischem, vertieftem und universitärem Wissen in seiner Komplexität analysiert wird. Daneben die Problemlösefähigkeit und

insbesondere die dabei bei den Studierenden zur Verfügung stehenden Problemschemata, die einen zielgerichteten und strukturierten Umgang mit physikalischen Aufgabenstellungen ermöglichen.

Für diese beiden Merkmale kann hypothetisch eine gegenseitige Abhängigkeit in der Entwicklung angenommen werden, die im Rahmen der parallel stattfindenden Erhebungen geprüft werden kann. Perspektivisch können die so gefundenen Ergebnisse zur Dynamik und zu Prädiktoren der fachlichen Entwicklung zur gezielten Unterstützung von Studierenden eingesetzt werden.

7. Literatur

- [1] Zlatkin-Troitschanskaia, O.; Pant, H. A.; Kuhn, C.; Toepper, M.; Lautenbach, C. (2016): Messung akademisch vermittelter Kompetenzen von Studierenden und Hochschulabsolventen: Ein Überblick zum nationalen und internationalen Forschungsstand. Wiesbaden: Springer
- [2] Woitkowski, D.; Riese, J. (2017): Kriterienorientierte Konstruktion eines Kompetenzniveau-modells im physikalischen Fachwissen. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 23, Nr. 1, S. 1–14
- [3] Riese, J. (2009): Professionelles Wissen und professionelle Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften. Berlin: Logos
- [4] Albrecht, A. (2011): Längsschnittstudie zur Identifikation von Risikofaktoren für einen erfolgreichen Studieneinstieg in das Fach Physik. Berlin, Freie Universität
- [5] Schild, N.; Rehfeld, D.; Nordmeier, V. (2016): Mögliche Prädiktoren für den Studienerfolg im Lehramt und im Fach Physik. In: PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Hannover
- [6] Thiel, F.; Veit, S.; Blüthmann, I.; Lepa, S. (2007): Ergebnisse der Befragung der Studierenden in den Bachelorstudiengängen an der Freien Universität Berlin. Berlin: Fachbereich Erziehungswissenschaft und Psychologie, FU Berlin
- [7] Friege, G. (2001): Wissen und Problemlösen: Eine empirische Untersuchung des wissenszentrierten Problemlösens im Gebiet der Elektrizitätslehre auf der Grundlage des Experten-Novizen-Vergleichs. Berlin: Logos
- [8] Bing, R.; Redish, E. F. (2009): Analyzing problem solving using math in physics: Epistemological framing via warrants. In: Physical Review Special Topics - Physics Education Research 5, Nr. 2
- [9] KFP, Konferenz der Fachbereiche Physik (2005): Empfehlungen der Konferenz der Fachbereiche Physik (KFP) zu Bachelor- und Master-Studiengängen in Physik. Bad Honnef: KFP
- [10] Van Heuvelen, A. (1991): Learning to Think like a Physicist: A Review of Research-Based Instructional Strategies. In: American Journal of Physics 59, Nr. 10, S. 891–897
- [11] Weinert, F. E. (2001): Vergleichende Leistungsmessung in Schulen – eine umstrittene Selbstverständlichkeit. In: Weinert, F. E. (Hrsg.): Leistungsmessungen in Schulen. 2. Aufl. Weinheim: Beltz, S. 17–32
- [12] Riese, J.; Reinhold, P. (2012): Die professionelle Kompetenz angehender Physiklehrkräfte in verschiedenen Ausbildungsformen. In: Zeitschrift für Erziehungswissenschaft 15, Nr. 1, S. 111–143
- [13] Woitkowski, D. (2015): Fachliches Wissen Physik in der Hochschulausbildung: Konzeptualisierung, Messung, Niveaubildung. Berlin: Logos
- [14] Schauble, L. (2003): Scientific Thinking: More on What Develops. In: Human Development 46, 2-3, S. 155–160
- [15] Buschhüter, D.; Spoden, C.; Borowski, A. (2016): Mathematische Kenntnisse und Fähigkeiten von Physikstudierenden zu Studienbeginn. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 22, Nr. 1, S. 61–75
- [16] Woitkowski, D. (2017): Studieneingangsprofile in Fach- und Lehramts-Studiengängen Physik: Eine kontrastierende Analyse auf Basis eines Kompetenzstrukturmodells für Fach-Physiker. In: Physik und Didaktik in Schule und Hochschule 16, Nr. 1, S. 43–56
- [17] Woitkowski, D.; Borowski, A. (2017): Fachwissen im Lehramtsstudium Physik. In: Fischler, H.; Sumfleth, E. (Hrsg.): Professionelle Kompetenz von Lehrkräften der Chemie und Physik. Berlin: Logos (Studien zum Physik- und Chemielernen, 200), S. 57–74
- [18] Duit, R. (2008): Zur Rolle von Schülervorstellungen im Unterricht. In: Geographie Heute 29, Nr. 265, S. 3–6
- [19] Schnotz, W. (1994): Aufbau von Wissensstrukturen: Untersuchungen zur Kohärenzbildung beim Wissenserwerb mit Texten. Weinheim: Beltz
- [20] Peuckert, J.; Fischler, H. (2000): Concept Maps als Diagnose- und Auswertungsinstrument in einer Studie zur Stabilität und Ausprägung von Schülervorstellungen. In: Fischler, H.; Peuckert, J. (Hrsg.): Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie. Berlin: Logos, S. 91–116
- [21] Bernholt, S. (2010): Kompetenzmodellierung in der Chemie – Theoretische und empirische Reflexion am Beispiel des Modells hierarchischer Komplexität. Berlin: Logos
- [22] Kauertz, A. (2008): Schwierigkeitserzeugende Merkmale physikalischer Leistungstestaufgaben. Berlin: Logos
- [23] Commons, M. L.; Trudeau, E. J.; Stein, S. A.; Richards, F. A.; Krause, S. R. (1998): Hierarchical Complexity of Tasks Shows the Exist-

- ence of Developmental Stages. In: *Developmental Review* 18, S. 237–278
- [24] Dawson-Tunik, T. L. (2006): Stage-Like Patterns in the Development of Conceptions of Energy. In: Liu, X.; Boone, W. J. (Hrsg.): *Applications of Rasch Measurement in Science Education*. Maple Grove: JAM Press, S. 111–136
- [25] Dawson-Tunik, T. L.; Commons, M. L.; Wilson, M.; Fischer, Kurt W. (2005): The shape of development. In: *The International Journal of Cognitive Development* 2, Nr. 2, S. 163–196
- [26] Krause, F.; Reiners-Logothetidou, A. (1981): Kenntnisse und Fähigkeiten naturwissenschaftlich orientierter Studienanfänger in Physik und Mathematik: Die Ergebnisse des bundesweiten Studieneingangstests Physik 1978. Bonn: Universität Bonn
- [27] Lamprecht, J. (2011): Ausbildungswege und Komponenten professioneller Handlungskompetenz: Vergleich von Quereinsteigern mit Lehramtsabsolventen für Gymnasien im Fach Physik. Berlin: Logos
- [28] Burger, R.; Groß, M. (2016): Gerechtigkeit und Studienabbruch. Die Rolle der wahrgenommenen Fairness von Benotungsverfahren bei der Entstehung von Abbruchsintentionen. In: *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft* 19, Nr. 3, S. 625–647
- [29] Neumann, I.; Sorge, S.; Jeschke, C.; Heinze, A.; Neumann, K. (2016): Zur Academic Buoyancy von Physikstudierenden. In: Maurer, Christian (Hrsg.): *Authentizität und Lernen - das Fach in der Fachdidaktik*. Regensburg: Universität Regensburg, S. 86–88
- [30] Sundre, D. L. (2007): The Student Opinion Scale (SOS), A measure of examinee motivation: Test Manual. Harrisonburg: Center for Assessment and Research Studies, James Madison University
- [31] Brandenburger, M. (2016): Was beeinflusst den Erfolg beim Problemlösen in der Physik? Eine Untersuchung mit Studierenden. Berlin: Logos
- [32] Woitkowski, D.; Reinhold, P. (2018): Strategien und Probleme im Umgang mit Übungsaufgaben : Pilotergebnisse einer Interviewstudie im ersten Semester Physik. In: Maurer, Christian (Hrsg.): *Qualitätsvoller Chemie- und Physikunterricht- normative und empirische Dimensionen*. Regensburg: Universität Regensburg, S. 726–729
- [33] Simon, D. P.; Simon, H. A. (1978): Individual differences in solving physics problems. In: Siegler, R. (Hrsg.): *Children's thinking: What develops?* Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, S. 325–348
- [34] Kuckartz, U. (2014): *Qualitative Inhaltsanalyse: Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. 2., durchges. Aufl. Weinheim: Beltz Juventa
- [35] Chi, M. T. H.; Feltovich, P. J.; Glaser, R. (1981): Categorization and representation of physics problems by experts and novices. In: *Cognitive Science* 5, S. 121–152
- [36] Chi, M. T. H.; Glaser, R. (1988): *The Nature of Expertise*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum
- [37] Chi, M. T. H.; Slotta, J. D.; Leeuw, N. de (1994): From Things to Processes: A Theory of Conceptual Change for Learning Science Concepts. In: *Learning and Instruction* 4, Nr. 1, S. 27–43
- [38] Redish, E. F. (2006): Problem Solving and the Use of Math in Physics Courses. arXiv preprint arXiv:physics/0608268
- [39] Woitkowski, D.; Reinhold, P. (2017): Fachwissenwerb in der Studieneingangsphase Physik: Ein Längsschnitt. In: Maurer, Christian (Hrsg.): *Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis*. Regensburg: Universität Regensburg, S. 532–535
- [40] Woitkowski, D.; Reinhold, P. (eingereicht): Erwerb komplex-verknüpften Fachwissens im Physikstudium: Erste Ergebnisse einer längsschnittliche Analyse der im ersten Semester erreichten Niveaus. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*.

Förderung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – WO 2181/2-1.

Implementation fachdidaktischer Innovation am Beispiel des Münchener Unterrichtskonzepts zur Quantenmechanik

Judith Breuer*, Christoph Vogelsang*, Peter Reinhold*

*Universität Paderborn, Warburger Straße 100, 33098 Paderborn
judith.breuer@upb.de, vogelsang@plaz.upb.de, peter.reinhold@upb.de

Kurzfassung

Zu den Aufgaben fachdidaktischer Forschung gehört die Verbesserung von Lehr-Lern-Prozessen auf Grundlage von empirischen Forschungsergebnissen. Ein möglicher Weg, solche Innovationen an Schulen zu implementieren, verläuft über die Bereitstellung von Unterrichtsmaterialien. Allerdings liegen bisher nur wenige Erkenntnisse zu ihrer Nutzung vor.

Ziel der vorgestellten Studie ist es daher, mehr über die Wirkmechanismen bei der Implementation von Unterrichtsmaterialien herauszufinden. Dazu werden zehn Lehrkräfte, welche das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik zur Verfügung gestellt bekommen, im Unterricht begleitet. In zwei Interviews zu Beginn und am Ende einer Unterrichtsreihe zur Quantenmechanik werden mögliche Einflussfaktoren der Materialnutzung erfragt. Um zudem die Implementation genauer zu untersuchen, werden drei Unterrichtsstunden videographiert und durch Stimulated Recall-Interviews Hintergründe zu den Entscheidungen der Lehrkräfte abgefragt.

Aus den Ergebnissen der Pilotierungsinterviews lässt sich ableiten, dass Lehrkräfte oftmals nur Teile des bereitgestellten Konzepts umsetzen.

1. Einleitung

In der fachdidaktischen Forschung werden vielfältige Unterrichtsmaterialien entwickelt, welche allerdings nur selten den Weg in die Praxis finden, wenngleich verschiedene Studien Hinweise liefern, dass die Nutzung von empirisch fundierten Unterrichtsmaterialien die Unterrichtsqualität verbessern kann (Tobias, 2010; Charalambous & Hill, 2012; Arias, Smith, Davis, Marino & Palinscar, 2017).

Unterrichtsmaterialien eignen sich insofern gut für die Unterstützung der professionellen Weiterbildung von Lehrkräften, da ihre Nutzung bereits in deren Berufsalltag bei der Vorbereitung von Unterricht verankert ist. Im Gegensatz zu Fortbildungen ist außerdem ein flächendeckender Einsatz möglich.

Allerdings verwenden Lehrkräfte Unterrichtsmaterialien sehr unterschiedlich und somit variiert auch ihre Wirkung auf den Unterricht (Remillard, 2005; Davis, Janssen & van Driel, 2016). Nutzung und Implementation hängen unter anderem von Faktoren wie Überzeugungen, Wissen oder Erfahrungen der Lehrkräfte ab. Die Interaktion dieser Einflussfaktoren ist jedoch bislang kaum systematisch untersucht worden.

Daher richtet sich der Fokus dieser Studie auf das Zusammenspiel verschiedener Faktoren bei der Implementation empirisch fundierter Unterrichtsmaterialien im Physikunterricht. Aus den Erkenntnissen werden anschließend Hypothesen abgeleitet, wie Unterrichtsmaterialien gezielter für die Bedürfnisse von Physiklehrkräften weiterentwickelt werden könnten,

um diese in Zukunft vermehrt an Schulen implementieren zu können.

2. Forschungsstand

Unterrichtsmaterialien können Lehrkräften Anregungen für ihre Unterrichtspraxis liefern und dadurch ihre professionelle Weiterentwicklung fördern. Beispielsweise konnten Arias et al. (2017) in einer Studie mit fünf Grundschullehrkräften im Fach Science einen erhöhten Lernzuwachs bei den Schülerinnen und Schülern feststellen, welche von Lehrkräften mit zusätzlichen Unterstützungsangeboten für die Unterrichtspraxis in den Materialien unterrichtet wurden.

Ebenso konnten Charalambous und Hill (2012) aus Unterrichtsanalysen von neun Mathematiklehrkräften schließen, dass die Verwendung empirisch fundierter Unterrichtsmaterialien die Unterrichtsqualität erhöhen kann.

Es liegen weiterhin Hinweise vor, dass die Nutzung von Unterrichtsmaterialien das professionelle Wissen und die Selbstwirksamkeitserwartungen von Grundschullehrkräften steigern kann (Möller, 2010).

Nichtsdestotrotz etablieren sich erfolgreich erprobte innovative Unterrichtskonzepte selten an Schulen (Wilhelm, Tobias & Waltner, 2012), obwohl Unterrichtsmaterialien in der Unterrichtsvorbereitung eine entscheidende Rolle spielen (Bromme, 1981; Vollstädt, Tilmann, Rauin, Höhmann & Tebrügge, 1999). Bei näherer Betrachtung überrascht dies nicht, da Physiklehrkräfte bei der Unterrichtsplanung vor allem auf den Lehrplan oder Schulbücher und weniger

auf Lehrerzeitschriften oder Begleitmaterialien zurückgreifen (Härtig, Kauertz & Fischer, 2012); letztere jedoch typischerweise fachdidaktische Innovationen vermitteln. Um die Auswahl von Materialien und das Vorgehen bei der Unterrichtsplanung von Lehrkräften besser nachvollziehen zu können, wird im Folgenden ihr Nutzungsverhalten näher betrachtet.

Lehrkräfte scheinen vor allem konkrete inhaltliche Ideen und weniger allgemeine pädagogische Hinweise für den Unterricht aus Unterrichtsmaterialien zu übernehmen (Schneider & Krajcik, 2002).

Ferner stellen Land, Tyminski und Drake (2015) auf Grundlage von Erkenntnissen einer Studie aus dem Fach Mathematik mit 47 Lehramtsstudierenden die folgende Hypothese auf: „PSTs [pre-service teachers], or perhaps any other initial readers of curriculum materials, will not always notice the educative features of a lesson plan and learn something from them“ (ebd., 24). Zudem stellte Gassmann (2013) häufig eine unreflektierte Übernahme von Unterrichtsmaterialien bei Lehramtsstudierenden fest.

Außerdem ist die Implementation von Unterrichtsmaterialien ein sehr individueller Prozess, der von Faktoren wie Wissen, Überzeugungen oder Erfahrungen der Lehrperson und Unterstützung der Schulleitung beeinflusst wird (Remillard, 2005; Roehrig, Kruse & Kern, 2007; Davis, Palinscar, Smith, Arias & Kademian, 2017). Nach Roehrig et al. (2007) hängt der Grad der Implementation direkt mit den Werthaltungen von Lehrkräften zusammen. Sie berichten aus einer Studie mit 27 Chemielehrkräften, dass eher traditionell orientierten Studienteilnehmer das bereitgestellte innovative Konzept kaum umsetzten im Gegensatz zu stärker schülerorientierten Lehrkräften. Dies deckt sich mit Befunden von Beerenwinkel und Gräsel (2005), denen zufolge Lehrkräfte mit geringer Akzeptanz der Unterrichtsmaterialien deutlich weniger im Unterricht implementierten.

Darüber hinaus folgt aus einer Studie zu einem neuen Lehrplan im Fach Mathematik in Schweden ($N = 197$), dass trotz einer positiven Haltung vieler Lehrkräfte zum Material die von den Autoren intendierten Ziele nur selten implementiert wurden (Boesen et al., 2014). Bergqvist und Berqvist (2017) merken dazu an, dass neben lehrerspezifischen Merkmalen auch die Gestaltung der Unterrichtsmaterialien für die Implementierung eine zentrale Rolle spielt. Bei einer Analyse des genannten schwedischen Lehrplans stellten sie fest, dass der Text aus langen komplexen Sätzen besteht und die Ziele wenig präzise formuliert sind. Daraus resultiert ein größerer Interpretationsspielraum seitens der Lehrkräfte.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Implementation von Unterrichtsmaterialien ein komplexer Prozess ist, welcher sowohl von Lehrercharakteristika als auch von materialspezifischen Aspekten und dem Schulkontext abhängt (s. Abb. 1).

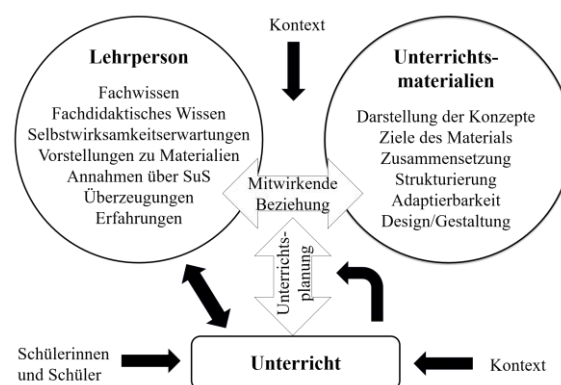


Abb.1: Zusammenspiel von Lehrercharakteristika und Materialeigenschaften bei der Gestaltung von Unterricht (adaptiert nach Remillard, 2005).

Nach Lendrum und Humphrey (2012) ist gerade das Zusammenspiel dieser Faktoren für die Implementation entscheidend. Allerdings besteht zu diesen Wirkmechanismen noch ein großes Forschungsdesiderat (Davis et al., 2016).

Darüber hinaus mangelt es an Untersuchungen zum Fach Physik; die meisten der vorgestellten Studien beziehen sich auf die Fächer Mathematik oder Science. Außerdem liegen zu diesem Forschungsgebiet vor allem Untersuchungen aus den USA vor, deren Ergebnisse möglicherweise aufgrund des anderen Rollenverständnisses von Lehrkräften und unterschiedlichen curricularen Vorgaben nicht direkt auf das deutsche Bildungssystem übertragbar sind (Westbury, Tobias & Waltner, 2000).

Es lässt sich insgesamt folgern, dass der Einsatz von empirisch fundierten Unterrichtsmaterialien zur professionellen Weiterbildung von Lehrkräften durchaus Erfolg versprechend ist, um aber eine vermehrte Implementation zu erreichen, müssen zunächst der Bedarf an Unterrichtsmaterialien und die Hintergründe zur Nutzung von Lehrkräften noch besser verstanden werden.

Ziel dieser Studie ist daher, die Wirkzusammenhänge zwischen den verschiedenen möglichen Einflussfaktoren bei der Materialnutzung für den Physikunterricht näher zu charakterisieren.

3. Forschungsfragen

Um mehr über die Implementation von Unterrichtsmaterialien im Physikunterricht zu erfahren, werden die folgenden Forschungsfragen untersucht: Wie nutzen Lehrkräfte ein empirisch fundiertes Unterrichtskonzept bei der Unterrichtsvorbereitung und wie setzen sie es im Unterricht um?

Es wird dabei genauer betrachtet, welche Faktoren die Planungsentscheidungen von Lehrkräften beeinflussen und auf welche Elemente (wie z. B. Aufgaben oder Versuchsbeschreibungen) bevorzugt zurückgegriffen wird. Weiterhin wird untersucht, ob typische Handlungs- und Nutzungsmuster identifiziert werden können.

4. Forschungsdesign

Zur Untersuchung des Nutzungsverhalten von Unterrichtsmaterialien wurde zunächst ein bereits erfolgreich erprobtes Unterrichtskonzept ausgewählt. Dazu wurden verschiedene empirisch fundierte Unterrichtskonzepte nach Umfang, Unterstützungsmaßnahmen für Lehrkräfte und Lehrplanpassung in Nordrhein-Westfalen verglichen. Die Wahl fiel auf das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik, welches im Folgenden kurz vorgestellt wird.

Das ausgewählte Unterrichtskonzept ist für die Oberstufe entwickelt worden und eignet sich sowohl für den Grundkurs als auch für den Leistungskurs (Müller, 2008). Es wurde unter besonderer Berücksichtigung typischer Schülervorstellungen zum Thema Quantenmechanik entwickelt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Begriffsbildung und dem qualitativen Verständnis von Quantenphysik. Das Konzept enthält verschiedenen Elemente wie Arbeitsblätter, Lehrtext oder Simulationen, welche online verfügbar sind.

Zur Untersuchung des Nutzungsverhaltens dieses Unterrichtskonzepts wurde ein qualitatives Forschungsdesign gewählt, um – dem Stand der Forschung entsprechend – explorativ Erkenntnisse zu generieren (Krüger, Parchmann & Schecker, 2014). Dabei werden zehn Lehrkräfte bei einer Unterrichtsreihe zum Thema Quantenmechanik begleitet. Ihnen wird im Vorfeld das oben beschriebene Münchener Unterrichtskonzept in Form eines Ordners mit beiliegender DVD als Anregung zur Verfügung gestellt. Es werden zu Beginn und zum Ende der Unterrichtsreihe mit den Teilnehmern leitfadengestützte Interviews geführt, um mehr über ihr Vorgehen bei der Unterrichtsplanung, ihre Vorstellungen zum Lehren und Lernen und ihre Nutzung von Unterrichtsmaterialien zu erfahren.

Außerdem werden ausgewählte Unterrichtsstunden videographiert und in anschließenden halbstrukturierten Stimulated Recall-Interviews mit den Probanden reflektiert. Ziel dieser Nachbesprechungen ist es, mehr über die Planungsentscheidungen der Lehrkräfte herauszufinden und unbewusste Denkprozesse aufzudecken. Um einen authentischen Einblick in den Unterricht zu bekommen, werden insgesamt drei Unterrichtsstunden zu den Themen Photoeffekt und Elektronen als Quantenobjekte sowie eine Übungsstunde per Video aufgezeichnet. Darüber hinaus werden Arbeitsblätter und Klassenbucheinträge der Unterrichtsreihe gesammelt.

Durch die methodologische Triangulation sollen die Aussagekraft und die Validität der Ergebnisse erhöht werden (Bortz & Döring, 2006).

5. Materialanalyse

Um mögliche Wirkzusammenhänge zwischen den verschiedenen Einflussfaktoren der Materialnutzung untersuchen zu können, wurde zunächst eine Analyse des Münchener Unterrichtskonzepts zur Quantenme-

chanik vorgenommen, um charakteristische Materialeigenschaften zu identifizieren. Dazu wurden Kriterien wie *Zieltransparenz*, *Unterschiede zum klassischen Lernweg* und *Gestaltung* näher analysiert (Beerenwinkel & Gräsel, 2005; Desimone, 2009; Bergqvist & Bergqvist, 2017).

Aus der Materialanalyse lässt sich folgern, dass das Unterrichtskonzept kohärent und strukturiert aufgebaut ist, wobei die vom Autor verfolgten Ziele nur indirekt vermittelt werden (Müller, 2008). Das Konzept enthält sowohl Elemente für die Unterrichtsvorbereitung als auch für den Einsatz im Unterricht. Dabei richtet sich der Fokus vor allem auf fachliche und weniger auf didaktische oder methodische Anregungen, wobei die Themenauswahl und die Reihenfolge durch fachdidaktische Überlegungen begründet sind.

6. Pilotierung

Ziel der Pilotierung ist es, die Interviewleitfäden zu erproben und erste Vermutungen zur Implementation aufzustellen, um die Leitfäden zu optimieren und gezieltere Nachfragen stellen zu können. Weiterhin wird anhand der erhobenen Daten ein erstes Kategoriensystem für die Auswertung entwickelt. Somit stellt die Pilotierung gemäß eines Grounded Theory-Ansatzes den ersten Zyklus der Phasen Datenerhebung, Kodierung und Analyse dar, welche in der Haupterhebung erneut durchlaufen werden, um das Kategoriensystem weiterzuentwickeln (Bortz & Döring, 2006).

Die Stichprobe der Pilotierung setzt sich aus zwei Quereinsteigern (promoviert in Physik bzw. physikalischer Chemie) und zwei regulär ausgebildeten Physiklehrkräften aus den Bundesländern Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen zusammen. Alle Teilnehmer sind männlich. Außer einem Lehrer haben alle Probanden nur wenig Erfahrung im Unterrichten von Quantenmechanik.

Das Einstiegsinterview wurde mit allen vier Studienteilnehmern pilotiert, welches im Schnitt 68 Minuten dauerte.

Zwei der Lehrkräfte wurden darüber hinaus auch während ihrer Unterrichtsreihe zur Quantenmechanik begleitet, wobei jeweils ein bzw. zwei Stimulated Recall-Interviews und das Abschlussinterview geführt wurden (durchschnittliche Länge 31 Minuten bzw. 58 Minuten).

7. Datenauswertung

Die Interviews der Pilotierung wurden verschriftlicht und zur Entwicklung eines Kategoriensystems mittels qualitativer Inhaltsanalyse verwendet (Kuckartz, 2016).

Es wurden zunächst Hauptkategorien mit zugehörigen Subkategorien in Anlehnung an bisherige Forschungserkenntnissen entwickelt (Vollstädt et al. 1999; Willer, 2003; Beerenwinkel & Gräsel, 2005; Remillard, 2005; Davis et al., 2017). Anschließend

wurden diese in Abgleich mit dem Textmaterial erweitert und hinsichtlich der Passung zur Klärung der Forschungsfragen überarbeitet. Es ergab sich die folgende Aufteilung:

- Vorstellungen zum Lehren und Lernen
- Vorgehen bei der Unterrichtsplanung
- Materialnutzung
- Aussagen zum bereitgestellten Unterrichtskonzept
- Einstellungen zur Quantenmechanik

Die ersten drei Hauptkategorien erfassen das allgemeine Vorgehen im Planungsprozess und die generelle Nutzung von Unterrichtsmaterialien. Die Hauptkategorie *Vorstellungen zum Lehren und Lernen* ist unterteilt in Unterrichtsstil, Einstellungen zum Experimentieren und Berücksichtigung des Vorwissens. Die zweite Hauptkategorie *Vorgehen bei der Unterrichtsplanung* umfasst den Planungsprozess und Kriterien bei der Unterrichtsplanung. Unter der Materialnutzung werden die Kategorien *Kriterien für die Nutzung von Unterrichtsmaterialien* und *Materialien für das Selbststudium* subsumiert.

Darüber hinaus beziehen sich die letzten beiden Hauptkategorien auf kontextspezifische Aspekte und konkret auf die Nutzung des Münchener Unterrichtskonzepts. Aussagen zu dem bereitgestellten Unterrichtskonzept werden durch die Subkategorien *Erster Eindruck*, *Geplanter Einsatz* und *Verwendete Elemente* erfasst. Die letzte Hauptkategorie zu den Einstellungen zur Quantenmechanik gliedert sich in Selbstwirksamkeitserwartungen zum Unterrichten von Quantenmechanik, Schlüsselstellen der Quantenmechanik im Unterricht, Schwierigkeiten beim Unterrichten und fachliche Einstellungen.

8. Erste Ergebnisse: Vorstellung einer Fallstudie

In diesem Kapitel wird anhand des Falls Timo Berg (Name geändert) beispielhaft demonstriert, welche Rückschlüsse aus den erhobenen Daten mithilfe des entwickelten Kategoriensystems gezogen werden können. Zudem soll die Fallbetrachtung einen ersten Eindruck über mögliche Handlungsweisen beim Unterrichten von Quantenmechanik vermitteln. Zu Timo Berg liegen ausgewertet das Einstiegsinterview und zwei Stimulated Recall-Interviews vor.

Timo Berg arbeitet seit vier Jahren als Lehrer für die Fächer Mathematik und Physik an einem Gymnasium in Nordrhein-Westfalen. Er hat Physik studiert und absolvierte nach seiner Promotion das Referendariat als Quereinsteiger. Das Thema Quantenmechanik lehrt er in der Schule zum dritten Mal.

Derzeit unterrichtet er einen Grundkurs mit 23 Schülerinnen und Schülern. Vor dem Thema Quantenmechanik behandelte er Elektronen im Magnetfeld. Die Unterrichtsreihe zur Quantenmechanik bestand insgesamt aus zehn Unterrichtsstunden. Aus den Klassenbucheinträgen sind die Themen der einzelnen Un-

terrichtsstunden ersichtlich. Er begann die Unterrichtsreihe mit der Betrachtung der Energiequantelung von Licht. Dazu behandelte er zunächst den Hallwachs-Effekt und anschließend den äußeren Photoeffekt mittels Gegenfeldmethode. Danach ging er zu Elektronen als Quantenobjekte über, indem er mit einer Elektronenbeugungsröhre Interferenzerscheinungen von Elektronen zeigte. Zum Ende der Unterrichtsreihe führte er die statistische Deutung der Quantenmechanik ein.

In den Interviews berichtet Timo Berg ausführlich über sein Vorgehen und seine Gedanken bei der Unterrichtsplanung. Sein Vorgehen ist durch eine schüleraktivierende Haltung gekennzeichnet, welche sich unter anderem darin ausmachen lässt, dass er in seiner Unterrichtsplanung das Vorwissen der Schülerinnen und Schüler berücksichtigt und sich überlegt, wie er sie ins Unterrichtsgeschehen einbeziehen kann. Diese Aspekte sind unter der ersten Hauptkategorie *Vorstellungen zum Lehren und Lernen* subsumiert.

Aus seinen Aussagen lässt sich zur Nutzung von Materialien ableiten, dass für ihn ein hoher Anteil von Übungsaufgaben ein entscheidender Faktor bei der Auswahl von Unterrichtsmaterialien ist. Er nennt zudem, dass er in seinem Unterricht Inhalte früherer Abitur-Aufgaben berücksichtigt, was durch die Kategorie *Planungskriterien für den Unterricht* erfasst wird. Daraus lässt sich schließen, dass für ihn Aufgaben im Physikunterricht einen hohen Stellenwert einnehmen und ihm die Vorbereitung seiner Schülerinnen und Schüler auf Klausuren, insbesondere die Abiturklausur, sehr wichtig zu sein scheint.

Als weitere wichtige Auswahlkriterien für Unterrichtsmaterialien zählt er angemessene Anforderungen für die Schülerinnen und Schüler, fachliche Korrektheit und einen nicht zu hohen Arbeitsaufwand bei der Umsetzung der Materialien für ihn als Lehrperson auf. Auch die verfügbare Unterrichtszeit beeinflusst seine Wahl von Unterrichtsmaterialien beziehungsweise den Grad der Umsetzung und darüber hinaus auch seine Unterrichtsplanung, woraus sich folgern lässt, dass die Unterrichtszeit anscheinend insgesamt bei seinem Vorgehen ein zentraler Faktor ist (Kategorie: *Planungskriterien für den Unterricht*).

Zu den genannten Kriterien zur Materialauswahl lässt sich zusammenfassend sagen, dass Timo Berg annähernd so viele gestalterische wie inhaltliche Aspekte benennt (10 bzw. 13 Nennungen). Die äußere Form der Materialien scheint neben dem Inhalt durchaus Einfluss auf seine Nutzung von Unterrichtsmaterialien zu haben:

„Dann waren das vier, fünf Aufgaben, wo ich dachte: Okay, die ersten drei nimmst Du. Und ehm wollte aber jetzt nur eine Seite haben. Nicht, nicht zwei Seiten kopieren.“ (Stimulated Recall 2, 6-7)

Darüber hinaus berichtet der Lehrer, dass er Unterrichtsmaterialien neben der Vorbereitung von Unterricht auch zur eigenen professionellen Weiterbildung

nutzt. Dazu liest er fachdidaktische und physikalische Fachzeitschriften und Lehrbüchern oder geht auf Fortbildungen. Interessant ist, dass er sowohl für allgemeine Anregungen als auch zur gezielten Vorbereitung eines neuen Themas diese Materialien nutzt.

Seiner Meinung nach fehlen dem bereitgestellten Unterrichtskonzept Texte für Schülerinnen und Schüler. Weiterhin kritisiert er, dass die enthaltenen Simulationen nur bei Windows funktionieren und viel Vorbereitungszeit im Unterricht benötigen würden. Er schätzt daher den Zeitaufwand als zu hoch ein, sodass er sich gegen den Einsatz der Simulationen im Unterricht entscheidet. Erneut ist erkennbar, dass der Proband die zur Verfügung stehende Unterrichtszeit bei seiner Unterrichtsplanung und bei der Auswahl von Unterrichtsmaterialien als ein zentrales Kriterium darstellt.

Auffällig ist, dass er keine positiven Aspekte zum Unterrichtskonzept anführt. Jedoch ist seinen Äußerungen zu entnehmen, dass er dem Unterrichtskonzept Anregungen wie beispielsweise die Betonung der Präparation von Quantenobjekten im Unterschied zu klassischen Teilchen entnimmt. Dadurch ist seine genaue Haltung zum Unterrichtskonzept unklar.

Darüber hinaus merkt er an, dass er im Grundkurs nicht über die Themen des qualitativen Basiskurses aus dem Konzept hinausgeht. Dies ist konsistent mit den Klassenbucheinträgen, aus denen abzulesen ist, dass der Lehrer weder auf die Unbestimmtheitsrelation oder die mathematische Beschreibung der Wellenfunktion noch auf Potentialtöpfe im Unterricht eingegangen ist, welche Inhalt des Aufbaukurses sind.

Weiterhin berichtet Timo Berg, dass er ein Arbeitsblatt mit Verständnisfragen zum Photoeffekt als Anregung für eine Arbeitsphase nutzte, in welcher sich die Schülerinnen und Schüler Fragen zum Photoeffekt überlegen sollten. Hier zeigt sich seine generell schüleraktivierende Haltung, da er versucht, die Schülerinnen und Schüler im Unterricht einzubeziehen. Er setzt noch ein weiteres Arbeitsblatt aus den bereitgestellten Materialien mit Übungsaufgaben zu Quantenobjekten im Unterricht ein. Des Weiteren gibt er an, den Lehrtext gelesen zu haben, ihn aber nicht direkt im Unterricht angewendet zu haben. Gleichwohl entnahm er dem Lehrtext ein Gedankenexperiment zum Doppelspaltversuch mit einzelnen Photonen, welches er im Unterricht einbrachte.

Überdies lässt sich aus seinen Aussagen zur Kategorie *Selbstwirksamkeitserwartungen beim Unterrichten von Quantenmechanik* ableiten, dass er sich insgesamt beim Unterrichten von Quantenmechanik generell sicher fühlt.

„Also ich fühle mich deswegen relativ sicher, weil ich Physiker bin. [...] Was ich auch vorhin gesagt habe, ich sehe mich wirklich als Fachmann.“ (Interview 1, 42)

Im Detail berichtet er jedoch, dass er beim historischen Gang, Interpretationsfragen der Quantenmechanik und verschränkten Zuständen unsicher sei. Insbesondere bildet die Deutung der Theorie der Quantenmechanik einen zentralen Schwerpunkt im bereitgestellten Unterrichtskonzept, worauf der Lehrer allerdings nicht eingeht. Daraus lässt sich möglicherweise schließen, dass er diesen Schwerpunkt nicht erkannt hat.

Durch die Kategorie *Schlüsselstellen der Quantenmechanik für den Physikunterricht* wird ersichtlich, dass sein Fokus beim Unterrichten von Quantenmechanik auf den Bruch zur klassischen Physik gerichtet ist. Hierbei fällt auf, dass Timo Berg seine Aussagen nicht weiter ausdifferenziert, sondern stattdessen vage Formulierungen wie die folgende wählt:

„[...] ich versuche es ja immer so ein bisschen herauszukitzeln, an einer Stelle zu greifen, wo etwas nicht passt, so kognitive Dissonanz.“ (Stimulated Recall 2, 2)

Dadurch bleiben die genauen Ziele des Lehrers in der Unterrichtsreihe zur Quantenmechanik unklar. Allerdings scheinen diese auf ein qualitatives Verständnis gerichtet zu sein, da er angibt, den Mathematisierungsgrad in der Schule eher gering halten zu wollen und auf das Niveau seiner Schülerinnen und Schüler anzupassen. Auch hier ist erneut seine schüleraktivierende Haltung erkennbar. Diese Einstellung spiegelt sich insofern in seinem Vorgehen wider, als dass er den quantitativen Zugang des Aufbaukurses des Münchener Unterrichtskonzepts nicht weiter betrachtet.

Seiner Meinung nach sind Lernschwierigkeiten für die Schülerinnen und Schüler zum Thema Quantenmechanik die Interpretation der Messergebnisse wie beispielsweise beim Photoeffekt und der hohe Abstraktionsgrad. Weiterhin zählt er viele Herausforderungen für sich als Lehrperson beim Unterrichten von Quantenmechanik auf, wie beispielsweise geeignete Veranschaulichungen zu finden oder trotz geringer mathematischer Fertigkeiten die Interessen der Schülerinnen und Schüler beispielsweise an verschränkten Zuständen zu berücksichtigen. Trotz der allgemein positiven Selbstwirksamkeitserwartungen beim Unterrichten von Quantenmechanik sieht der Lehrer folglich an verschiedenen Stellen Schwierigkeiten und damit verbundene Erfolgsunsicherheiten.

Hinzu kommen missverständliche Aussagen des Lehrers zur Quantenmechanik wie beispielsweise die folgende:

„[...] das ist ja die Quantenmechanik, die eine Wellenbeschreibung ist, aber vorher und nachher habe ich sozusagen im Prinzip Teilchen.“ (Stimulated Recall 2, 18)

Diese Äußerung deutet auf eine dualistische Vorstellung des Probanden hin, was zu seinen geringen Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich von Deutungsfragen der Quantenmechanik passen würde.

Aus seinen Vorstellungen zur Quantenmechanik wird insgesamt deutlich, dass er die Quantenmechanik als mathematische Theorie, welche nicht genau verstanden werden muss, auffasst. Interessanterweise stimmt diese Einstellung nicht mit den eher an einem qualitativen Verständnis orientierten Zielen seines Physikunterrichts überein.

9. Zusammenfassung & Diskussion

Aus der Fallstudie lässt sich folgern, dass das Vorgehen des Lehrers durch eine schüleraktivierende Haltung gekennzeichnet ist. Diese beeinflusst seine Nutzung von Unterrichtsmaterialien wie beispielsweise die Wahl von Arbeitsblättern für Übungsphasen. Darüber hinaus scheint es für ihn eine zentrale Rolle zu spielen, wie viel Zeit er im Unterricht zur Verfügung hat.

Auffällig ist, dass Timo Berg für das Selbststudium nicht auf Materialien aus dem Internet zurückgreift, obwohl er das bereitgestellte Unterrichtskonzept ausschließlich digital verwendet. Dies könnte mit der wahrgenommenen geringeren Vertrauenswürdigkeit der Quellen zusammenhängen (Bergqvist & Bergqvist, 2017).

Eine weitere interessante Erkenntnis ist, dass für diesen Lehrer die äußere Gestaltung von Unterrichtsmaterialien einen fast ebenso hohen Stellenwert wie die inhaltlichen Aspekte einnimmt. Falls sich diese Haltung auch bei weiteren Lehrkräften beobachten lässt, wäre dies ein wichtiger Hinweis für die Materialentwicklung.

Weiterhin kann festgehalten werden, dass Timo Berg verschiedene Elemente des bereitgestellten Unterrichtskonzepts verwendet; insgesamt scheint das Konzept jedoch seinen Unterrichtsgang nicht wesentlich zu beeinflussen. Stattdessen sucht er sich vereinzelte Elemente aus dem Konzept heraus und fügt sie in seine Unterrichtsreihe ein. Ähnliches beobachteten auch schon Vollstädt et al. (1999) bei der Nutzung von Lehrplänen.

Der Proband formuliert seine Ziele für den Unterricht nur unpräzise, es ist jedoch ersichtlich, dass er nicht die intendierten Ziele des Unterrichtskonzepts verfolgt. Dies könnte entweder auf die nur implizite Zielformulierung des Konzepts (Boesen et al., 2014; Bergqvist & Bergqvist, 2017) oder auf nicht vollständig bewusste und nur schwierig zu beeinflussende Absichten von Lehrkräften zurückzuführen sein (Rohrig et al., 2007; Davis et al., 2017).

Aus der Vorstellung der Fallstudie wird deutlich, dass aus dem entwickelten Kategoriensystem viele Rückschlüsse über das Vorgehen und die Einstellungen des Probanden gezogen werden können und dass die Kategorien eine detaillierte Beschreibung des Falls ermöglicht. Um die Aussagekraft der Ergebnisse zu erhöhen, wird in einem nächsten Schritt eine Überprüfung der Interraterreliabilität durch einen zweiten Kodierer vorgenommen.

Die Erkenntnisse dieser Fallstudie können zwar lediglich explorative Hinweise für das Nutzungsverhalten von Unterrichtsmaterialien liefern, dennoch ermöglichen sie einen ersten detaillierten Einblick in die komplexen Wirkzusammenhänge bei der Implementation von Unterrichtsmaterialien (Remillard, 2005). Weiterhin können Parallelen zu Befunden vorausgehender Studien gezogen werden, sodass auf Grundlage der Literatur und der vollständigen Auswertung aller vier Pilotfälle erste Hypothesen zur Implementation von empirisch fundierten Unterrichtsmaterialien aufgestellt werden können. Diese werden anschließend in der Haupterhebung näher untersucht. Insbesondere durch den Vergleich verschiedener Fälle auf Basis des theoretischen Samplings können somit neue Erkenntnisse gewonnen werden (Bortz & Döring, 2006).

10. Literatur

Arias, Anna; Smith, Sean; Davis, Elizabeth; Marino, John-Carlos; Palinscar, Annemarie (2017): Justifying Prediction: Connecting Use of Educative Curriculum Materials to Students' Engagement in Science Argumentation. In: *Journal of Science Teacher Education*, 28, 1, 11-35.

Beerenwinkel, Anne; Gräsel, Cornelia (2005): Texte im Chemieunterricht. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 11, 21-39.

Bergqvist, Ewa; Bergqvist, Tomas (2017): The Role of the Formal Written Curriculum in Standards-based Reform. In: *Journal of Curriculum Studies*, 49, 2, 149-168.

Boesen, Jesper; Helenius, Ola; Bergqvist, Ewa; Bergqvist, Tomas; Lithner, Johan; Palm, Torulf; Palmberg, Björn (2014): Developing Mathematical Competence: From the Intended to the Enacted Curriculum. In: *Journal of Mathematical Behavior*, 33, 72-87.

Bortz, Jürgen; Döring, Nicola (2006): *Forschungsmethoden und Evaluation*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Bromme, Rainer (1981): *Das Denken von Lehrern bei der Unterrichtsvorbereitung*. Weinheim: Beltz.

Charalambous, Charalambos; Hill, Heather (2012): Teacher Knowledge, Curriculum Materials, and Quality of Instruction: Unpacking a Complex Relationship. In: *Journal of Curriculum Studies*, 44, 4, 443-466.

Davis, Elizabeth; Janssen, Fred; van Driel, Jan (2016): Teachers and Science Curriculum Materials: Where We Are and Where We Need to Go. In: *Studies in Science Education*, 52, 2, 127-160.

- Davis, Elizabeth; Palinscar, Annemarie; Smith, Sean; Arias, Anna; Kademian, Sylvie (2017): Uptake, Impact, and Implications for Research and Design. In: *Educational Researcher*, 46, 6, 293-304.
- Desimone, Laura (2009): Improving Impact Studies of Teachers' Professional Development. In: *Educational Researcher*, 38, 3, 181-199.
- Gassmann, Claudia (2013): *Erlebte Aufgabenschwierigkeit bei der Unterrichtsplanung*. Wiesbaden: Springer.
- Härtig, Hendrik; Kauertz, Alexander; Fischer, Hans (2012): Das Schulbuch im Physikunterricht. In: *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 65, 4, 197-200.
- Krüger, Dirk; Parchmann, Ilka; Schecker, Horst (Hrsg.) (2014): *Methoden in der naturwissenschafts-didaktischen Forschung*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Kuckartz, Udo (2016): *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. Weinheim: Beltz.
- Land, Tonia; Tyminski, Andrew; Drake, Corey (2015): Examining Pre-service Elementary Mathematics Teachers' Reading of Educative Curriculum Materials. In: *Teaching and Teacher Education*, 51, 16-26.
- Lendrum, Ann; Humphrey, Neil (2012): The Importance of Studying the Implementation of Interventions in School Settings. In: *Oxford Review of Education*, 38, 5, 635-652.
- Möller, Cornelia (2010): Lehrmittel als Tools für die Hand der Lehrkräfte. Ein Mittel zur Unterrichtsentwicklung? In: *Beiträge zur Lehrerinnen- und Lehrerbildung*, 28, 1, 97-108.
- Müller, Rainer (2008): Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenphysik. In: *Praxis der Naturwissenschaften*, 57, 6, 19-25.
- Remillard, Janine (2005): Examining Key Concepts in Research on Teachers' Use of Mathematics Curricula. In: *Review of Educational Research*, 75, 2, 211-246.
- Roehrig, Gilian; Kruse, Rebecca; Kern, Anne (2007): Teacher and School Characteristics and Their Influence on Curriculum Implementation. In: *Journal of Research in Science Teaching*, 44, 7, 883-907.
- Schneider, Rebacca; Krajcik, Joseph (2002): Supporting Science Teacher Learning: The Role of Educative Curriculum Materials. In: *Journal of Science Teacher Education*, 13, 3, 221-245.
- Tobias, Verena (2010): *Newton'sche Mechanik im Anfangsunterricht*. Berlin: Logos.
- Vollstädt, Witlof; Tillmann, Klaus-Jürgen; Rauin, Udo; Höhmann, Katrin; Tebrügge, Andrea (1999): *Eine empirische Studie zur Akzeptanz und Wirkung von Lehrkräften in der Sekundarstufe I*. Wiesbaden: Verlag für Sozialwissenschaften.
- Westbury, Ian; Hopman, Stefan; Riquarts, Kurt (2000): *Teaching as a Reflective Practice*. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Willer, Jörg (2003): *Didaktik des Physikunterrichts*. Frankfurt a. M.: Verlag Harri Deutsch.
- Wilhelm, Thomas; Tobias, Verena; Waltner, Christine (2012): Design-Based Research am Beispiel der zweidimensional-dynamischen Mechanik. In: *Konzepte fachdidaktischer Strukturierung für den Unterricht, Beiträge zur GDCP-Jahrestagung*. Berlin: LIT-Verlag, 31-47.

Astronomie in der Lehrerausbildung

Sascha Hohmann*, Martin Quast[†]

*Universität Siegen, Didaktik der Physik, Adolf-Reichwein-Straße 2, 57068 Siegen

[†]Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Argelander Institut für Astronomie, Auf dem Hügel 71, 53121 Bonn

hohmann@physik.uni-siegen.de, mquast@astro.uni.bonn.de

Kurzfassung

Astronomische und astrophysikalische Kontexte interessieren Lernende überdurchschnittlich stark. Diese Themen bieten also die Möglichkeit, die Motivation der Schülerinnen und Schüler im Unterricht zu erhöhen. Um astronomische Sachverhalte im Unterricht richtig vermitteln zu können, ist eine entsprechende Ausbildung sowohl auf fachlicher als auch auf fachdidaktischer Ebene unerlässlich, eine systematische Erhebung über die Anteile der Astronomie im Lehramtsstudium fand im deutschsprachigen Raum in den letzten Jahren jedoch bisher nicht statt. Die hier vorgestellte Studie betrachtet diesen Anteil in der Physiklehrausbildung der verschiedenen Schulformen an deutschen Universitäten – gemeint ist hier primär nicht die Ausbildung von Fachlehrern für Astronomie – indem die verschiedenen Modulhandbücher und Studienordnungen systematisch auf Vorlesungen und Seminare mit astronomischen, astrophysikalischen sowie kosmologischen Kontexten in Fach und Didaktik untersucht werden. Analysiert werden formale (u.a. ECTS, SWS, Pflicht- oder Wahlpflichtkurs) sowie inhaltliche Aspekte der Veranstaltungen. Erste Ergebnisse werden mit dem Ziel, langfristig eine Verbesserung der Astronomieausbildung zu erreichen, präsentiert.

1. Einführung

1.1. Warum diese Studie?

Astronomie und Astrophysik tauchen in unterschiedlichem Umfang in den Lehrplänen der meisten Bundesländer auf – schließlich ist die Astronomie eines der großen „Zugpferde“ der Naturwissenschaften (vgl. beispielsweise [1]). Daher steht immer wieder die Forderung im Raum, bundesweit einen eigenständigen Astronomieunterricht zu etablieren, wie es – insbesondere als Folge des stärker naturwissenschaftlich-technisch geprägten Unterrichts der DDR – beispielsweise in Thüringen der Fall ist [2]. Unabhängig davon, ob es einen eigenständigen Astronomieunterricht gibt oder entsprechende Kontexte im Physikunterricht behandelt werden, zeigt sich eine Steigerung der Motivation der Lernenden, insbesondere zeigen sowohl Mädchen als auch Jungen gesteigertes Interesse [1].

Nach Jung [3] gibt es im Wesentlichen zwei Möglichkeiten, Astronomie an Schulen zu stärken beziehungsweise erst einzuführen: Entweder kann Astronomie als verpflichtender Aspekt in die zukünftigen Lehrpläne aufgenommen werden – sei es als eigenständiges Fach oder als Teil des Physiklehrplans – oder die durchaus vorhandenen Spielräume der aktuellen Lehrpläne können genutzt werden, um astronomische und astrophysikalische Inhalte in den Physikunterricht einzubetten. Die erste Möglichkeit bietet den Vorteil einer „sicheren“ Behandlung der astronomischen Themen, da sie im Lehrplan stehen und damit verpflichtend sind. Die zweite Möglich-

keit bietet dagegen mehr Freiheiten, die, sofern sie genutzt werden (können), auch interdisziplinären Unterricht ermöglichen – dafür anbieten würden sich etwa Mathematik und Geographie, aber auch Biologie, Chemie und andere Fächer. Beispiele für die Anwendung astronomischer Themen in physikalischen Kontexten finden sich etwa in [4][5] (Optik in der Sekundarstufe I) und [6] (Elektrostatik in der Sekundarstufe II).

Bevor Astronomie und Astrophysik in den Schulen adäquat vermittelt werden kann, müssen die Lehrenden jedoch eine entsprechende Ausbildung erhalten. Die Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG) empfiehlt für das Lehramtsstudium Physik für das Gymnasium 6 ECTS-Punkte (European Credit Transfer and Accumulation) im Bereich Astronomie/Astrophysik zu vergeben [7]. In dieser Studie soll nun ermittelt werden, inwiefern entsprechende Inhalte an den deutschen Universitäten und pädagogischen Hochschulen in den Lehramtsstudiengängen für Physik der verschiedenen Schulformen sowie im Bereich des Sachunterrichts Bestandteil des Studiums sind.

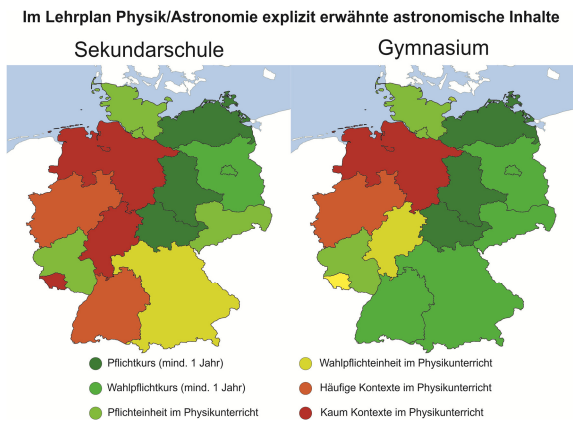


Abbildung 1: Erwähnung astronomischer/ astrophysikalischer Themen in den Lehrplänen der jeweiligen Länder

1.2. Ausgangslage

Aktuell (Stand 03/2018) ist Astronomie in drei Bundesländern – Thüringen, Sachsen-Anhalt und Mecklenburg-Vorpommern – ein für alle Schülerinnen und Schüler verpflichtender Kurs mit einer Dauer von (mindestens) einem Jahr (vgl. Abbildung 1). Weiterhin kann Astronomie oder Astrophysik in Berlin und Brandenburg für alle und in Baden-Württemberg, Bayern und Sachsen an Gymnasien für mindestens ein Jahr als Wahlpflichtkurs gewählt werden. Eine entsprechende reine Astronomielehrerbildung als Aufbaustudium zur Physik findet jedoch nur in Jena (Thüringen) und Halle/Saale (Sachsen-Anhalt) statt.

2. Erhobene Daten

Im Zuge der Studie wurden die Modulhandbücher und Studienordnungen deutscher Universitäten für die verschiedenen Lehrämter in Physik, Sachunterricht und Astronomie nach den folgenden formalen Aspekten untersucht:

- Name, Standort und Typ (Universität oder Pädagogische Hochschule) der Einrichtung
- Angebotene Lehrämter und Art des Abschlusses (BA/MA oder Staatsexamen)
- Modulnamen
- Pflicht oder Wahlpflicht für welche Lehrämter
- Anteil an Astronomie
- Empfohlenes Studiensemester und Dauer des Moduls
- Semesterwochenstunden (SWS) von Vorlesung und Seminar/Übung und die dafür vergebenen ECTS-Punkte
- Abschluss des Moduls (Klausur/mündliche Prüfung/Sonstiges)

- Relevanz für die Abschlussnote

Im Folgenden werden die gewichteten ECTS-Punkte betrachtet. Diese ergeben sich als Produkt der Modul-ECTS-Punkte und dem Anteil der Astronomie des jeweiligen Moduls.

Zusätzlich zu den formalen Aspekten wurden auch die Inhalte der Module betrachtet. Diese wurden in Grundlagenthemen und fortgeschrittene Themen unterteilt (vgl. Tab. 1).

3. Erste Ergebnisse

Insgesamt wurden 27 Prüfungsordnungen im Bereich Sachunterricht (Grundschule), 39 im Bereich Physik für die Sekundarstufe I (ohne Gymnasium, im Folgenden als Sekundarschule bezeichnet) und 50 im Bereich Physik für das Gymnasium untersucht, dazu kommen die beiden bereits erwähnten aufbauenden Studiengänge für das Astronomie-Lehramt.

Grundlagenthemen	Fortgeschr. Themen
Geschichte der Astronomie	Optik und Beobachtungsgereäte
Weltbilder	Astronomie außerhalb des opt. Spektrums
Orientierung am Himmel/Sternbilder	Astronomische Koordinatensysteme
Sonnensystem und Planeten	Himmelsmechanik
Raumfahrt	Kleinkörper
Mond/Mondphasen	Aufbau/Entwicklung der Sonne
Finsternisse	Aufbau/Entwicklung der Sterne (Hertzsprung-Russel-Diagramm)
Jahreszeiten	Exoplaneten
Erde als Planet	Astrobiologie/Außerirdische
Sonne allgemein	Milchstraße als Galaxie
Einfache optische Geräte	Extragalaktische Astronomie
Fachdidaktik Astronomie	Kosmologie

Tabelle 1: Untersuchte inhaltliche Aspekte

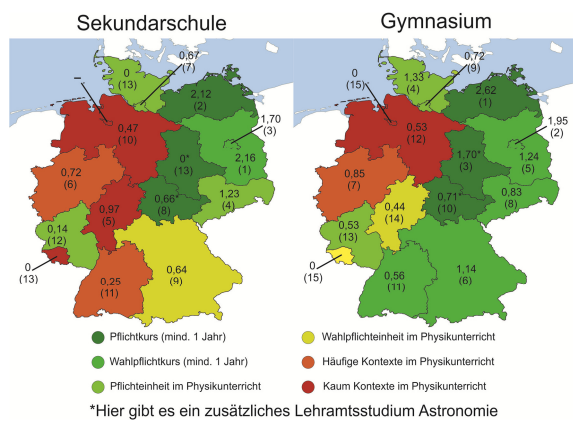


Abbildung 2: Aufsummierte ECTS-Punkte pro 10000 Schülerinnen und Schüler

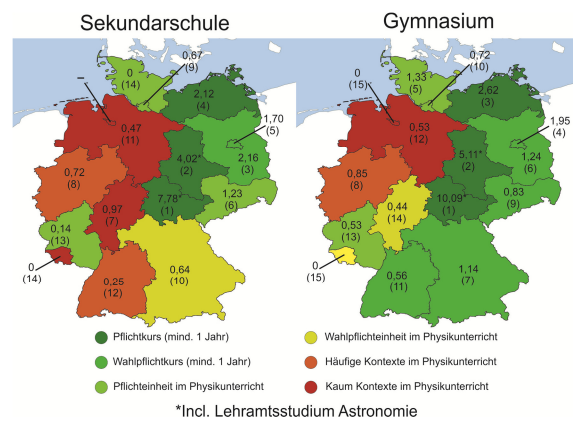


Abbildung 3: Aufsummierte ECTS-Punkte pro 10000 Schülerinnen und Schülern incl. Astronomiestudium

3.1. Standorte der Astronomieausbildung

Auf der Abbildung 5 (im Anhang am Ende des Beitrags) sind die Universitäten angegeben, in deren Studiengängen der verschiedenen Lehrämter Astronomie gelehrt wird – unabhängig davon, ob es sich dabei um Pflicht- oder Wahlpflichtkurse handelt. Über die Größe der Punkte ist dabei die Anzahl der dabei vergebenen gewichteten ECTS-Punkte kodiert. Im Bereich des Sachunterrichtes findet dabei nur in wenigen Universitäten eine Einführung in die Astronomie statt, im Bereich der Sekundarschule sind astronomische Inhalte zwar erheblich weiter verbreitet, rund ein Viertel der Universitäten sieht jedoch keinerlei Astronomiebildung in ihrer Studienordnung vor.

Im Gymnasialbereich findet ebenfalls in einem Viertel der Universitäten keine Astronomiebildung statt. Durch die Kopplung der Gymnasiallehrausbildung an die der Fachphysiker werden hier häufig astrophysikalische Vorlesungen angeboten, die keinen einführenden Charakter haben, sondern Spezialthemen (beispielsweise die Entwicklung Brauner Zwerge und leichter Sterne) behandeln.

3.2. Bundeslandabhängige Verteilung der ECTS-Punkte

Aufgrund der kleinen Stichprobenmenge und der damit geringen Aussagekraft im Bereich der Grundschule, werden die folgenden ECTS-Verteilungen nur für die Sekundarschule und das Gymnasium präsentiert.

In Abbildung 4 werden die durchschnittlich in einem Bundesland vergebenen ECTS-Punkte als Boxplot präsentiert. Wie üblich gibt die dicke schwarze Linie den Median, der rote Kasten die Quartile und die Linien am Ende der gestrichelten Linien den maximalen beziehungsweise den minimalen Wert an. Der einzelne Punkt stellt einen Ausreißer dar. Zusätzlich ist als durchgezogene Linie die bereits angesprochene Empfehlung der DPG von 6 ECTS-Punkten angegeben. Die Stichprobenmenge beträgt im Gymnasialbereich 16 (alle Bundesländer) und im Sekundar-

schulbereich 15 (Bremen bietet keinen dedizierten Studiengang für die Sekundarschule an).

Auffällig ist, dass im Sekundarschulbereich weniger als 25 Prozent der Studienordnungen eine Vergabe von sechs oder mehr ECTS-Punkten vorsehen, der Median liegt bei etwa vier. Im Gymnasialbereich zeigt sich eine deutliche Asymmetrie. Während der Median ebenfalls etwa bei vier liegt, liegt das untere Quartil nur knapp darunter, das obere dagegen bei etwa acht. Mehr als die Hälfte der Gymnasialstudiengänge liegen also unter der Empfehlung.

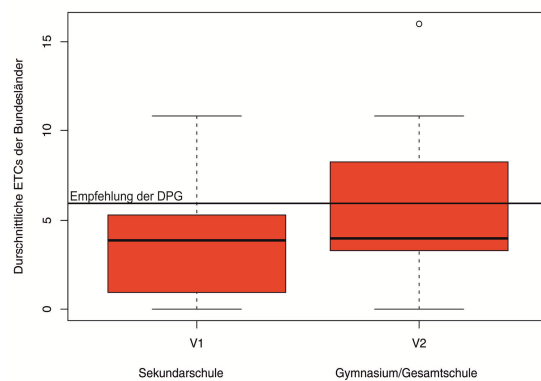


Abbildung 4: Boxplot Diagramm der durchschnittlich in einem Bundesland vergebenen ECTS-Punkte im Bereich Astronomie/Astrophysik

3.3. Betriebener Aufwand im Vergleich zu den Schülerzahlen

Um eine erste Möglichkeit zu bieten, den Aufwand (das heißt, die Gesamtzahl der vergebenen ECTS-Punkte) im Bereich Astronomie/Astrophysik zu vergleichen, wurden diese in Relation mit der Anzahl der Schülerinnen und Schüler der jeweiligen Bundesländer gesetzt. Dabei wurden die Annahmen gemacht, dass die Größenordnung der Absolventinnen und Absolventen der unterschiedlichen Universitäten in einer vergleichbaren Größenordnung sind und dass ein

wesentlicher Teil von ihnen in dem Bundesland bleibt, in dem sie studiert haben.

Der in Abbildung 2 und Abbildung 3 für die einzelnen Bundesländer angegebene Wert W berechnet sich wie folgt:

$$W = 10000 \cdot \frac{\sum(ETCS - Punkte)}{Anzahl\ der\ Schüler} \quad \{1\}$$

W entspricht also den ETCS-Punkten pro 10000 Schülerinnen und Schüler. In Klammern ist zusätzlich der Rang des jeweiligen Bundeslandes angegeben.

3.4. Behandelte Themen

Inhaltlich zeigt sich insgesamt, dass fortgeschrittene Themen dominieren. Rund 60% der behandelten Themen fallen in den fortgeschrittenen Bereich, während sich nur 40% der Themen mit den Grundlagen befassen (siehe Tabelle 1 für die Unterteilung).

Deutlich wird das auch, wenn man sich die am häufigsten und die am seltensten genannten Themen anschaut (Abbildung 6 im Anhang). Während Themen aktuelle Forschungsthemen wie Kosmologie, extragalaktische Astronomie und die Entwicklung von Sternen sehr häufig behandelt werden, werden Grundlagen wie Raumfahrt, astronomische Weltbilder und die Entstehung von Finsternissen selten behandelt. Unter den Top 5 der am häufigsten erwähnten Themen befindet sich lediglich ein Grundlagenthema (optische Geräte auf Rang 5), während in den Flop 5 Themen nur die Astrobiologie als fortgeschrittenes Thema auftaucht.

In den Abbildungen kann man weiterhin die am häufigsten erwähnten Themen aufgeteilt nach Grundlagen und fortgeschrittenen Themen sehen. Hier wird nochmals deutlich, dass im Schnitt erheblich mehr fortgeschrittene Themen behandelt werden.

Weder in den Top noch in den Flop 5 taucht die Astronomiedidaktik auf. Diese wird aber nur an wenigen Unis unterrichtet und macht auch an diesen maximal 5% des Studiums aus.

4. Fazit

Insgesamt hat sich im Zuge der Erhebung gezeigt, dass Astronomie und Astrophysik im Studium für das Lehramt im Sekundarbereich zwar häufig, aber längst nicht an allen Universitäten behandelt wird. Im Schnitt werden weniger ETCS-Punkte vergeben, als die Deutsche Physikalische Gesellschaft empfiehlt (6) – wobei einige Universitäten auch deutlich mehr Punkte vergeben.

Diese beziehen sich jedoch insbesondere im Gymnasialbereich häufig auf Spezialvorlesungen, die sich primär an Fachphysiker richten und sich dabei an den aktuellen Forschungsschwerpunkten orientieren [8], speziell im Bereich der Kosmologie und der extragalaktischen Astronomie. Grundlagenthemen werden dagegen seltener behandelt.

Im Grundschulbereich werden kaum astronomische Themen behandelt, obwohl in einigen Bundesländern derartige Inhalte im Sachunterricht vorgesehen sind.

Speziell eine explizite Astronomiedidaktik – die sich in wesentlichen Punkten von der Didaktik der Physik (andere Methoden, fächerübergreifend, ...) unterscheidet – wird nur in wenigen Universitäten gelehrt. Weiterhin werden Schülerinteressen, insbesondere Astrobiologie (außerirdisches Leben) und Raumfahrt [1], kaum behandelt.

5. Vorschläge zur Verbesserung der astronomischen Lehrerausbildung

5.1. Stärkung der astronomischen Lehrerausbildung für Grund- und Förderschulen

Die Astronomie motiviert und interessiert Schülerinnen und Schüler jedes Alters und jeder Niveaustufe. Gerade für jüngere Lernende bieten sich daher auch qualitative Betrachtungen astronomischer und astrophysikalischer Phänomene an. Weiterhin ist die Astronomie ein tausende Jahre altes Kulturgut, das – unabhängig von seinem Beitrag zur Allgemeinbildung – unerlässlich für ein modernes Weltbild mit der Positionierung des Menschen als Bewohner des Planeten Erde.

Gerade an Grund- und Förderschulen sind die Studiengänge Lehrenden jedoch nicht naturwissenschaftlich geprägt, so dass wenig bis kein Kontakt zur Astronomie besteht. Um das Interesse und die Kenntnisse der angehenden Lehrerinnen und Lehrer zu stärken, wird eine ausgeprägtere Ausbildung im Bereich der Astronomie angeregt.

5.2. Stärkerer Bezug auf eine schulnahe Ausbildung

Angehende Lehrerinnen und Lehrer sollten zunächst Grundlagen der Astronomie und Astrophysik kennen lernen, etwa Fragen der Konzeption von astronomiebezogenem Unterricht, die Methodik der Beobachtung – dazu gehört auch das eigenständige Durchführen von Beobachtungen – und den Umgang mit entsprechender Astronomie-Software. Die Grundlagen sind die Basis für einen fachlich und methodisch adäquaten Unterricht, Spezialvorlesungen aus dem fachlichen Physikstudium können darauf aufbauen.

5.3. Schülerinteressen und erzieherische Ziele berücksichtigen

Auch innerhalb der Astronomie gibt es Themen, die Lernende stärker interessieren als andere, als Beispiel seien die Exoplaneten und die Frage nach außerirdischem Leben genannt (vgl. [1]). Die entsprechenden Themen werden jedoch im Studium kaum bis gar nicht behandelt. Es wird daher angeregt, die Lehre entsprechend daran anzupassen, schließlich werden in der Schule keine Astronomen (oder Physiker) ausgebildet, sondern Menschen, die sich in Gesellschaft, Umwelt und Universum verorten und ihr Handeln durch Erkenntnis und (Selbst-)Reflexion verantworten können sollen.

5.4. Astronomische Lerninhalte in einem fächerübergreifenden Kontext anbieten

Da die Einführung eines eigenständigen Astronomieunterrichts in den nächsten Jahren sehr unwahrscheinlich ist, können astronomische Lehrinhalte lediglich kontextorientiert unterrichtet werden. Um diese sowohl effizient als auch der Astronomie und der Astrophysik entsprechend unterrichten zu können, wird ein möglichst fächerübergreifender Kontext angeregt, da sich beide Themenbereiche interdisziplinär entwickelt haben und auch so betrieben werden. Eine reine Fachausbildung kann angehende Lehrerinnen und Lehrer kaum darauf vorbereiten, die Astronomie als Anwendungsgebiet vielfältiger Methoden und Denkmuster verschiedenster Fachrichtungen zu kennen, zu begreifen und zu vermitteln.

6. Offene Fragen

Es ergeben sich einige offene Fragen, die als Folge dieser Studie beantwortet werden sollen:

- Wird davon ausgegangen, dass angehende Lehrerinnen und Lehrer die Grundlagen der Astronomie kennen, so dass keine/kaum einführende Vorlesungen notwendig sind?
- Wieso werden Schülerinteressen in der Lehre so wenig berücksichtigt?
- Wieso wird an so wenigen Universitäten Astronomiedidaktik behandelt? Ist eine Erhöhung des Anteils möglich und sinnvoll?

Zur Beantwortung der ersten Frage wird ein Fragebogen konzipiert, mit dem Studierende der verschiedenen Lehrämter nach ihrem Vorwissen im Bereich der Astronomie sowie ihrem Interesse darüber befragt werden (siehe auch [9]).

Zur Beantwortung der anderen beiden Fragen sind weitere, ausführlichere Studien notwendig.

7. Literatur

- [1] Sjöberg, Sven und Schreiner, Camilla (2010): The ROSE project: An overview and key findings. URL: <https://roseproject.no/network/countries/norway/eng/nor-Sjoberg-Schreiner-overview-2010.pdf>
- [2] Reimers, Dieter und Dettmar, Jürgen (2009): Zur Rolle der Astronomie in den Schulen in Deutschland
- [3] Jung, Tobias (2017): Die Astronomie im Lehrplan des Gymnasiums in Bayern. Aus: *Astronomie und Raumfahrt im Unterricht* 158
- [4] Küpper, Andreas und Hennemann, Thomas (zur Veröffentlichung eingereicht): Zur Eignung astronomischer Kontexte für einen inklusiven Physikunterricht. Eingereicht bei: *Astronomie und Raumfahrt*
- [5] Küpper, Andreas und Schulz, Andreas (zur Veröffentlichung eingereicht): Mit dem Licht durch unser Sonnensystem und darüber hinaus - Ein-Rahmenkontext für den inklusiven Physikunterricht der Orientierungsstufe. Eingereicht bei: *Astronomie und Raumfahrt*
- [6] Hohmann, Sascha (2017): Ein einfaches Modell zu Gasriesen. Aus: *Astronomie und Raumfahrt* 161
- [7] Großmann, Siegfried und Hertel, Ingolf (2014): Zur fachlichen und fachdidaktischen Ausbildung für das Lehramt Physik. URL: <https://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/broschueren/studien/lehramtstudie-2014.pdf>
- [8] Morfill, Gregor (2003): Status und Perspektiven der Astronomie in Deutschland 2003-2016: Denkschrift. URL: http://www.dfg.de/download/pdf/dfg_im_profil/geschaeftsstelle/publikationen/status_perspektiven_astronomie_2003_2016.pdf
- [9] Quast, Martin, Hohmann, Sascha und Schulz, Andreas (zur Veröffentlichung eingereicht): Erhebung astronomischer Lerninhalte in den Lehramtsstudiengängen deutscher Universitäten. Eingereicht bei: *Astronomie und Raumfahrt*

Anhang

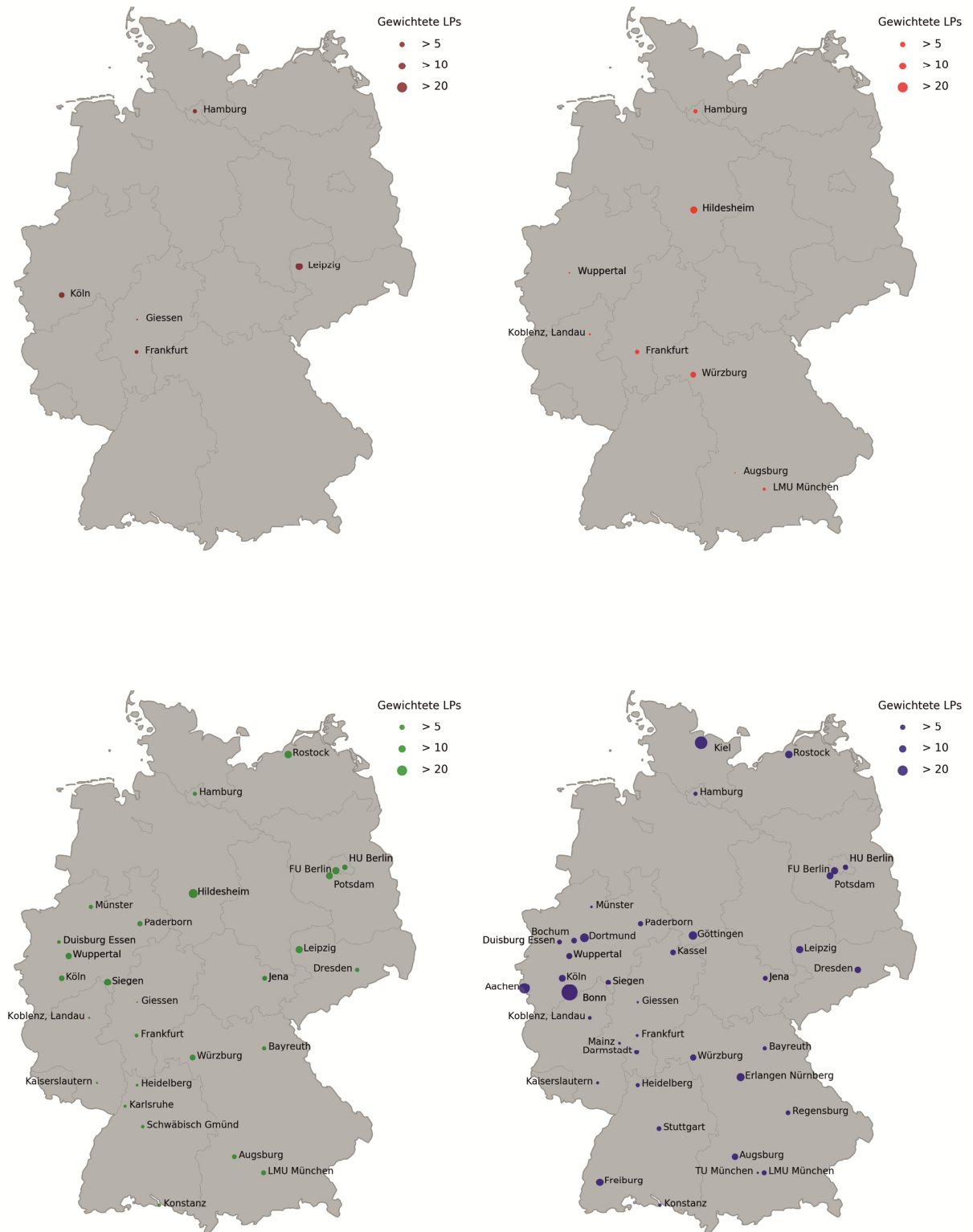


Abbildung 5: Standorte mit einer Astronomieausbildung im Bereich Grundschule (oben links), Förderschule (oben rechts), Sekundarschule (unten links) und Gymnasium (unten rechts)

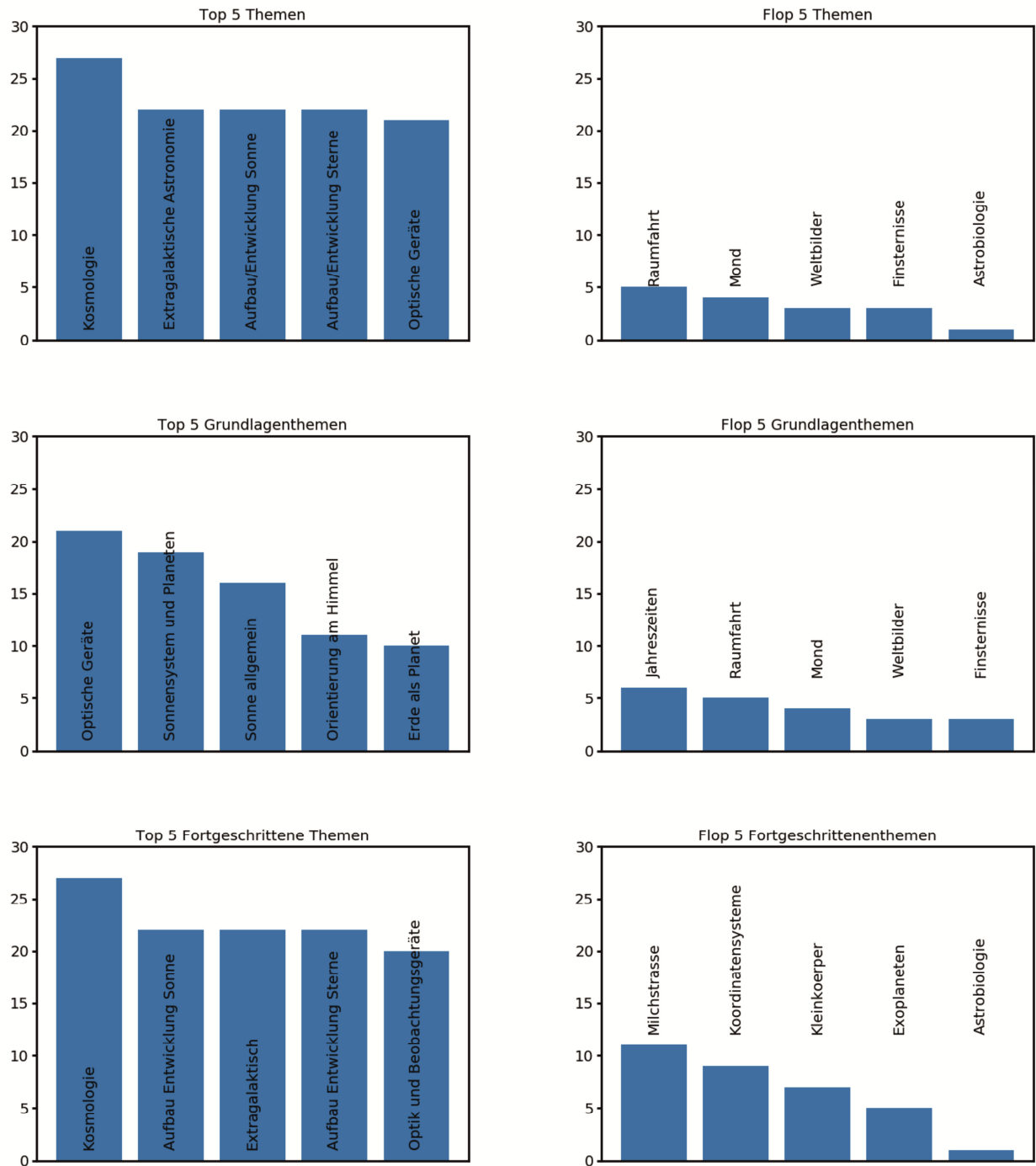


Abbildung 6: Die am häufigsten (Tops) und am seltensten (Flops) in Studienordnungen und Modulhandbüchern deutscher Universitäten genannten astronomischen Themen

Kumulatives Lehren und Lernen im Lehramtsstudium Physik

- Entwicklung eines Modells zur professionsorientierten
Fachausbildung von Physiklehrkräften -

Tilmann John, Erich Starauschek

Professional School of Education Stuttgart-Ludwigsburg, Reuteallee 46, 71634 Ludwigsburg
tilmann.john@ph-ludwigsburg.de, starauschek@ph-ludwigsburg.de

Kurzfassung

Die physikalische Fachkompetenz angehender Physiklehrkräfte passt häufig nicht zu den Anforderungen des Physikunterrichts der Schule (Merzyn, 2017). Dies stimmt mit dem Befund überein, dass schulrelevantes Fachwissen erst im Referendariat erworben wird (Borowski et al., 2011). Zudem weisen Physik-Lehramtsstudierende auch nach dem Studium Alltagsvorstellungen auf (Abell, 2007). Um diese Problemlage zu bearbeiten, wird an der PH Ludwigsburg ein Ansatz für Fachveranstaltungen entwickelt, der mit Hilfe kumulativen Lehrens und Lernens physikalischer Grundkonzepte den Aufbau eines schulbezogenen und damit professionsorientierten physikalischen Fachwissens ermöglichen soll. Auf Basis lernpsychologischer Positionen zum kumulativen Lernen wurde ein spezielles Modell ‚Kumulatives Lehren und Lernen im Lehramtsstudium Physik‘ entwickelt, an dem die Fachveranstaltungen ausgerichtet werden. Im vorliegenden Artikel wird dieses Modell vorgestellt. Dazu werden zunächst die Lernmodelle von Gagné (1968), Ausubel (1968), Wittrock (1974) und Lee (2012) analysiert und zentrale Aspekte herausgearbeitet. In diesen Modellen lässt sich ein gemeinsamer Nenner für die Beschreibung von Lernprozessen finden, welcher das *kumulative* Lernen charakterisiert. Die fachlichen Anforderungen an eine Physiklehrkraft definieren weitere Aspekte für kumulatives Lernen: Insbesondere haben wir das Erlernen flexibel anwendbarer physikalischer Grundkonzepte in den Mittelpunkt des fachlichen Lernens für die Schule gestellt. Dies führt schließlich zu dem Modell einer kumulativen Hochschullehre für das Lehramtsstudium Physik.

1. Stand der Forschung

1.1. Professionswissen von Physiklehrkräften

„Welche Fähigkeiten benötigt eine Lehrkraft für guten Unterricht?“ Um diese Frage der empirischen Forschung zugänglich zu machen, ist es üblich, unterschiedliche Kompetenzen zu definieren. Zwei Bereiche werden grob unterschieden: (1) die kognitiven Fähigkeiten und das Professionswissen sowie (2) die volitionalen Fähigkeiten und Bereitschaften (Baumert & Kunter, 2006). Das Professionswissen weist aufbauend auf Shulman (1987) die drei Dimensionen Fachwissen, fachdidaktisches Wissen und pädagogisch-psychologisches Wissen auf. Shulmans Rahmen nennt mehr als diese drei Dimensionen; die drei genannten gelten als relevant. Wir wollen uns hier auf die Entwicklung der Fachwissensstruktur von zukünftigen Physiklehrkräften fokussieren.

Die Wichtigkeit der Rolle des Fachwissens ergibt sich auch aus einer Plausibilitätsbetrachtung: Sollen fachliche Inhalte eines Unterrichtsfachs gelehrt werden, sind bestimmte fachliche Kenntnisse notwendig. Partiiell offen ist die Frage, ‚welches‘ Fachwissen eine Lehrkraft genau benötigt, d.h. welche Lehrerwissensstruktur für einen *gelingenden* Unterricht notwendig

ist. Um sich dieser Frage zu nähern, wird das physikalische Fachwissen häufig mit drei Dimensionen modelliert: Dem Inhaltsbereich (z.B. Mechanik, Optik), der Wissenskomplexität (z.B. in den Ausprägungen Faktenwissen, tieferes Verständnis) sowie den drei Niveaustufen Schulwissen, vertieftes Schulwissen, universitäres Wissen (vgl. Riese, 2009). Beim Lehramtsstudium Physik sollten mögliche schulische Inhaltsbereiche abgedeckt sein und ein vertieftes Verständnis erreicht werden. Die Frage ist dann: Wie weit müssen die Vertiefungen gehen?

Die Bedeutung des Fachwissens für die Unterrichtsqualität und den Lernzuwachs der Schüler fällt in empirischen Untersuchungen unterschiedlich aus (Abell, 2007). Die Metastudie von Hattie (2009) zeigt nur geringe Effekte zwischen dem Fachwissen der Lehrkraft und dem Lernzuwachs der Schüler, wobei dieser Befund ist mit Vorsicht zu bewerten ist. Aus Plausibilitätsgründen kann vorsichtig gefolgert werden, dass nicht jedes physikalische Wissen für eine Lehrkraft wichtig ist: Relevant ist zumindest ein Fachwissen, das mit den Bedürfnissen des Schulunterrichts abgestimmt ist (vgl. Merzyn, 2017, S. 77). Diese vorhandene oder fehlende Abstimmung führt dazu, dass dem Fachwissen auch die Rolle eines Moderators für

die beiden anderen Dimensionen des Professionswissens zugeschrieben wird. So könnte z.B. eine Lehrkraft, die ein hohes Fachwissen besitzt, deshalb über ein flexibleres Erklärrepertoire verfügen. Zudem gilt Fachwissen als wesentliche Grundlage für den Erwerb fachdidaktischen Wissens (Krauss et al. 2008; Riese & Reinhold, 2012). Insgesamt ist die Rolle des physikalischen Lehrerwissens noch nicht ausreichend empirisch ‚verstanden‘; insbesondere ist nicht klar, über welche konkreten Wissensstrukturen Lehrerinnen und Lehrer in welcher Entwicklungsphase überhaupt verfügen müssen, um eine bestimmte Qualität in ihrem Physikunterricht zu erreichen. Wir greifen diese Frage im nächsten Abschnitt noch einmal auf.

Dem fachdidaktischen Wissen wird auf theoretischer Ebene eine besondere Rolle für die Unterrichtsqualität zugeschrieben, denn es gilt als derjenige Wissensaspekt, der für Fach-Lehrkräfte spezifisch ist. Das fachdidaktische Wissen wird dabei, wie oben beschrieben, vom Fachwissen moderiert. Untersuchungen aus der Praxis finden jedoch sowohl positive (z.B. Kunter et al., 2013) als auch keine Zusammenhänge (z.B. Vogelsang 2014) zwischen einem hohen fachdidaktischen Wissen und der Unterrichtsqualität. Daher besteht weiterhin Forschungsbedarf in Bezug auf differenziertere Modellierungen und Messungen des fachdidaktischen Wissens (Riese et al., 2017). Die dritte Dimension, das pädagogisch-psychologische Wissen, gilt zudem als besonders relevant für nicht fachbezogene Handlungen, z.B. die Klassenführung (vgl. Kunter et al., 2014).

1.2. Anforderungen an ein professionsbezogenes Fachstudium im Lehramt Physik

Welche Aspekte sollte eine professionsorientierte Fachausbildung nach dem Stand der Forschung beinhalten? Im ersten Abschnitt wurde die Notwendigkeit einer Abstimmung des physikalischen Fachwissens mit den Anforderungen der Schule betont. Weil Lehramtsstudierende jedoch häufig mit Fachphysikern ausgebildet werden, findet diese Abstimmung bislang häufig nicht statt (vgl. Merzyn, 2017). Borowski et al. (2011) zeigen dies für eine kleine Stichprobe: Angehende Lehrkräfte erwerben ‚schulrelevantes Fachwissen‘ überwiegend erst im Referendariat. Aus diesen Gründen wird z.B. auch seitens der DPG eine eigene Ausbildung für angehende Physiklehrkräfte gefordert (Großmann et al., 2014).

Als eine erste Annäherung kann ein ‚abgestimmtes‘ oder ‚professionsorientiertes‘ Fachwissen als dasjenige Wissen betrachtet werden, welches sich für Handlungen von Lehrkräften im Unterricht als empirisch relevant erwiesen hat und somit eine Mindestvoraussetzung darstellt. Dieses schulrelevante Fachwissen wird von Riese et al. (2015) über das ‚vertiefte Schulwissen‘ definiert. Grob gesprochen geht das vertiefte Schulwissen inhaltlich über das Schulcurriculum hinaus, es besteht aber noch ein klarer Bezug dazu. So basiert z.B. das einfache Hebelgesetz auf einem vektoriellen Drehmomentgleichgewicht. Diese

physikalische Modellierung hat jedoch Grenzen, da große Massen in der Regel ausgedehnt sind. Riese et al. (2015) modellieren vertieftes Schulwissen präziser durch „folgende Fähigkeiten: (1) verschiedene Wege zur Lösung einer Aufgabe identifizieren und anwenden, (2) Lösung einer Aufgabe aus theoretischer Sicht planen, (3) Randbedingungen einer Schulaufgabe erkennen, (4) Aufgaben zielgruppengerecht vereinfachen, (5) Zusammenhänge, Gemeinsamkeiten und Unterschiede physikalischer Phänomene erkennen“ (ebd. S. 60). Darin ist die Moderatorfunktion des Fachwissens in der Beziehung zu unterrichtsspezifischen Aufgaben erkennbar. Daher kann das vertiefte Schulwissen in Abgrenzung zum Fachwissen von Fachphysikern als ein für Lehrkräfte professionsbezogenes Fachwissen charakterisiert werden.

Das vertiefte Schulwissen enthält implizit die Voraussetzung, dass Lehrkräfte ihre Alltagsvorstellungen, die in der Schulphysik relevant sind, überwunden haben sollten. Abell (2007) analysiert in einem Übersichtsartikel zum Fachwissen von Physiklehrkräften: „*The overall finding [...] in physics is that teachers' misunderstandings mirror what we know about students.*“ (vgl. ebd. S. 1117). Wir nehmen an, dass diese Aussage auch für deutsche angehende PhysiklehrerInnen gültig ist. Die Alltagsvorstellungen zu überwinden wird deshalb als ein eigener Teilaspekt eines professionsbezogenen Fachwissens aufgefasst. Dies erfordert eine explizite Auseinandersetzung mit eigenen Fehl- oder Alltagsvorstellungen im Studium. Neben dem ‚unabgestimmten‘ Fachwissen ist häufig eine weitere Konsequenz mit der gemeinsamen Ausbildung mit Fachphysikern verbunden: Lehramtsstudierende nehmen im Studium eine Distanz zum späteren Berufsfeld wahr, weil kein Bezug darauf genommen wird. Dies führt nach Heublein et al. (2010) zu einer geringen Studienmotivation und zu Studienabbrüchen. Damit sehen wir die Relevanzzuschreibung der Fachausbildung für die zukünftige Arbeit in der Schule durch die Lehramtsstudierenden als einen weiteren Aspekt eines professionsbezogenen Physikstudiums an.

Damit umfasst eine professionsbezogene Fachausbildung (mindestens) drei Anforderungen: (1) Die Fokussierung auf das ‚vertiefte Schulwissen‘, (2) die Auseinandersetzung mit Alltagskonzepten zur Physik und (3) das Erkennen von Relevanz der Fachausbildung für den Physiklehrerberuf.

2. Kumulatives Lernen

Wie kann ein professionsorientiertes Fachwissen aufgebaut werden, das den genannten Anforderungen genügt? Es erscheint überraschend, dass angehende Lehrkräfte nach erfolgreichem Bestehen der universitären Physikprüfungen kein schulrelevantes Fachwissen entwickelt haben sollen. Eine erste Erklärung lautet, dass der professionsorientierte Fachwissenserwerb eben nicht-kumulativ ist, also z.B. keine notwendige Verbindung zwischen universitärem und

schulischem physikalischen Wissen erfolgt: Das universitäre Fachwissen wird nicht mit dem schulischen Wissen verbunden und kann damit auch nicht im Sinne eines kumulativen Lernens verknüpft werden. Es scheint für die zukünftige Arbeit an einer Schule in der gelehrten Form zum Teil unbrauchbar zu sein.

Um ein Modell ‚kumulativen Lernens‘ für die Lehramtsausbildung in Physik zu erarbeiten, werden zunächst relevante Theorien aus der pädagogischen Psychologie analysiert, die den Aufbau von kumuliertem – oder komplexem – Wissen beschreiben. Sie haben einen gemeinsamen Nenner, der als ‚kumulativer Kern des Lernens‘ bezeichnet werden kann; er geht über das einfache Verbinden von Lehrinhalten hinaus. Um diesen Kern zu bestimmen, werden analysiert: a) Gagnés (1968) Modell des kumulativen Lernens, b) Ausubels (1968) Subsumtionstheorie, c) Wittrocks (1974) generatives Lehren und Lernen und d) Lees (2012) Modell des kumulativen Lernens. In einem zweiten Schritt (s. Abschnitt 3) wird auf Basis der psychologischen Modelle ein eigenes Modell kumulativen Lernens und explizitem kumulativen Lehrens für die Lehramtsausbildung Physik vorgestellt. Die Explizierung kumulativen Lehrens zur Unterscheidung von kumulativem Lernen stellt aus unserer Sicht einen hilfreichen begrifflichen Entwicklungsschritt dar.

a) Gagnés (1968) Modell des kumulativen Lernens: Eine zu erlernende komplexe Fähigkeit kann prinzipiell in aufeinander aufbauende weniger komplexe Fähigkeiten zerlegt werden. Diese Fähigkeiten lassen sich nach Gagné in der Regel hierarchisch anordnen: Um eine Fähigkeit B zu erwerben, ist es notwendig, zuvor eine andere Fähigkeit A erworben zu haben. Ein Beispiel aus der Physik: Die Kinematik und ihre Begriffe sollten vor dem dynamischen Zugang zum Kraftbegriff ‚verstanden‘ worden sein – also insbesondere die Beschleunigung als Geschwindigkeitsänderung – bevor es möglich ist, einen ‚tieferen‘ Zugang zum Kraftbegriff zu bekommen. Diese ‚Fähigkeitsteile‘ bezeichnet Gagné als Entitäten. Der schrittweise Erwerb der Entitäten wird schließlich als kumulative Lernsequenz bezeichnet (ebd. S. 58), die der Lernende dann auch durchläuft. Der kumulative Effekt des Lernens liegt darin, dass der Lernende durch diesen Prozess, den Gagné Lerntransfer nennt, sein Wissen generalisieren kann. Das heißt, es werden Beziehungen zwischen den Entitäten hergestellt, indem verallgemeinerbare Zusammenhänge gefunden werden. Gagné konstatiert, dass der Mechanismus des Lerntransfers wenig verstanden ist („[...] *a little understood, but nevertheless dependable, mechanism of learning transfer*“, ebd. S. 58). Wichtig ist, dass die Generalisierung von Wissen als Ergebnis des Lerntransfers durch den Lernenden selbst erfolgt und daher abhängig von seinen kognitiven Fähigkeiten ist. Die Gesamtheit aus hierarchischem Lernen und Lerntransfer charakterisiert Gagné als kumulatives Lernen, weil Wissens-elemente aufeinander aufbauen und in Beziehung gesetzt werden. Werden dagegen keine

Verbindungen zwischen erworbenen Wissens-elementen und neuen Lerninhalten beim Lernen hergestellt, so spricht man häufig in Abgrenzung zum kumulativen Lernen von einem additiven Wissenserwerb (vgl. z.B. Harms & Bänder, 1999).

Aus seinen Analysen zum kumulativen Lernen leitet Gagné eine Instruktionsmaßnahme ab. Sie besteht darin, den zu erwerbenden Inhalt in hierarchisch aufeinander aufbauende Fähigkeiten zu zerlegen. Der Lernende durchläuft diese Lernhierarchie. Dies sei effektiver als das wiederholte Üben der Zieltätigkeit selbst. Gagné betrachtet diese Lernhierarchie sehr kleinschrittig. Damit soll es dem Lernenden ermöglicht werden, als Ergebnis des Lerntransfers die Zwischenschritte in einen Zusammenhang zu bringen. Ein Beispiel in Andeutung: Um zu lernen, dass Licht eine Welle ist, ist es zunächst notwendig, erstens die Eigenschaften einer mechanischen Welle studiert zu haben und zweitens elektrische und magnetische Felder zu kennen. Diese Struktur kann weiter zerlegt werden. Erst dann ist es möglich zu verstehen, was damit gemeint ist, wenn man davon spricht, dass Licht eine Welle ist. Damit geht auch die Konstruktion einer ‚Bedeutung‘ des Konzepts ‚Licht als Welle‘ einher. Dieses ‚bedeutungserzeugende‘ Lernen wird in der folgend vorgestellten Subsumtionstheorie von Ausubel (1968) beschrieben. Während in Gagnés Modell die Bedeutungskonstruktion eine implizite Folge der durchlaufenen Lernhierarchie ist, beschreibt Ausubels Subsumtionstheorie die Erzeugung von Bedeutung selbst als *meaningful learning*.

b) Ausubels (1968) Subsumtionstheorie ist auf der Annahme begründet, dass Konzepte, die aus Lernerfahrungen konstruiert werden, durch kognitive Strukturen repräsentiert sind, welche hierarchisch geordnet sind: Je allgemeiner ein Konzept ist, desto weiter oben steht es in der Wissenshierarchie. Spezielle Konzepte sind hierarchisch tiefer angeordnet, weil sie weniger inklusiv sind (Ausubel, 1968, S. 92). Dies zeigt sich, wenn neues Wissen erworben wird: Neue Erfahrungen oder Informationen werden in einem Subsumtionsprozess bestehenden kognitiven Strukturen bzw. Konzepten untergeordnet. Das bestehende Konzept wird erweitert, indem die neu erworbene Erfahrung zu einem integralen Bestandteil des erweiterten Konzepts wird. Der Lernprozess findet somit immer durch Anknüpfen an das Vorwissen statt. Das Anknüpfen kann sich jedoch von unterschiedlicher Qualität sein: Es kann durch oberflächliche Assoziationen erfolgen oder bedeutungshaltig sein. Ausubel unterscheidet deshalb folgende Qualitäten von Lernen: *meaningful learning* und *rote learning*. Ausubel beschreibt das *meaningful learning*:

„*Substantive and nonarbitrary incorporation of a potentially meaningful learning task into relevant portions of cognitive structure so that new meaning emerges, implies that newly-learned meaning becomes an integral part of particular ideational system.*“ (ebd. S. 108).

Dagegen findet *rote learning* (Auswendiglernen) durch oberflächliche Assoziationen statt, die zufälligen Charakter haben. Dies führt zu isolierten Wissensseinheiten, die unabhängig von anderen intellektuellen Systemen existieren (vgl. ebd. S. 109). Ausubel (1968) betont daher die Bedeutung einer gut organisierten und stabilen Wissensbasis, da diese bessere Anknüpfungspunkte im Subsumtionsprozess bietet, als eine unklare und chaotisch organisierte Wissensbasis (vgl. ebd. S. 128). Somit hat die Qualität des Vorwissens einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität des weiteren Lernens - Lernen hat so über längere Zeiträume einen ebenfalls kumulativen Charakter.

Übertragen auf das Physiklehren müsste also sichergestellt werden, dass für das Erlernen neuer Inhalte das dafür notwendige (fachlich-korrekte oder phänomenologisch korrekt strukturierte) Vorwissen auch wirklich verfügbar ist, damit ein bedeutungserzeugendes Lernen überhaupt stattfinden kann. Am Beispiel des dynamischen Kraftbegriffs: Hat der Lernende den Beschleunigungsbegriff als Geschwindigkeitsänderung konzeptualisiert oder – in den Worten von Walter Jung – „den Begriff ausschließlich als Antwort gelernt“ (Jung et al., 1981, S. 193) – und misst ihm damit keine physikalische Bedeutung bei? In Anlehnung an die Rolle der Übungen im Sinne Ausubels (1968, S. 277 f.) kann es zur Konzeptualisierung des dynamischen Kraftbegriffs hilfreich sein, die Konzeptualisierung des Beschleunigungsbegriffs als Teil der Lernhierarchie wiederholend aufzugreifen, da nicht zwingend davon auszugehen ist, dass ein solches physikalisches Konzept nach einer Lerneinheit bereits ‚verstanden‘, also konzeptualisiert ist. Am Beispiel für die Einführung von Kräften bei Stoßprozessen: Wird ein Ball während der Reflexion an einer Wand beschleunigt? Woran kann man dies erkennen? Er ändert seine Geschwindigkeit. Anschließend kann der Kraftbegriff damit verbunden werden: Welche Rückschlüsse können damit auf die Kraft und ihre Richtung gezogen werden, die in diesem Moment auf den Ball ausgeübt wird?

In diesem Zusammenhang führt Ausubel (1968) das Konzept der *advanced organizers* ein. Sie haben die Funktion, den Lernenden dabei zu unterstützen, diejenigen kognitiven Strukturen zu aktivieren, mit denen die neue Information verknüpft werden soll. Dadurch soll dem Lernenden eine bedeutungsvolle Anknüpfung erleichtert werden.

c) Wittrocks (1974) generatives Lehren und Lernen geht wie Ausubels (1968) Theorie von der Grundannahme aus, dass Lernende Bedeutungen erzeugen, indem neue ‚Informationen‘ mit bestehendem Wissen verknüpft werden. Dies erfolgt im Wesentlichen in zwei Schritten. Zunächst werden bestimmte Informationen selektiv wahrgenommen und andere ignoriert. Diese selektive Wahrnehmung wird bereits durch Inhalte des Langzeitgedächtnisses beeinflusst. In einem zweiten Schritt werden die neuen ‚Informationen‘ mit dem Langzeitgedächtnis verbun-

den und dabei Bedeutungen konstruiert, die dem Lerner plausibel erscheinen. Das in diesem Prozess gewonnene Verständnis wird im Langzeitgedächtnis assimiliert. Wittrock (1974) bezeichnet diesen Vorgang als generativ: „[...] *people tend to generate perceptions and meanings that are consistent with their prior learning*“ (ebd. S. 41). Dieses ‚Vorverständnis‘ beinhaltet beim Physiklernen jedoch auch physikalisch falsche Vorstellungen: Lernende bringen bereits Alltagsvorstellungen mit, die mit physikalischen Konzepten nicht übereinstimmen. Nach Wittrocks Modell des generativen Lernens werden die neuen Inhalte also auch im einfachsten Fall mit den vorhandenen (falschen) Alltagsvorstellungen verknüpft bzw. an sie assimiliert. Somit entstehen durch Alltagsvorstellungen Probleme beim Physiklernen, denn auch falsche Vorstellungen können ‚kumulativ‘ erweitert werden. Als Erweiterung zu den vorherigen Modellen reicht es also nicht allein, Vorwissen zu aktivieren, sondern ‚falsches‘ Vorwissen, ergo Alltagskonzepte, müssen in irgendeiner Form als solche erkannt werden, dass sie beim physikalischen Beschreiben nicht angewandt werden. Dies ist ein bekanntes Problem des Physiklernens und der Physikdidaktik.

Wittrock (1989, 1991) entwickelt aus diesem Modell Implikationen für eine generative Lehre, welche generatives Lernen unterstützen soll. Seel (2003) fasst zusammen: (1) Gezieltes Eingehen auf das Vorwissen und die Alltagsvorstellungen der Lernenden, (2) Zentrierung der Aufmerksamkeit auf die bedeutsamen Elemente der Lerninhalte, (3) Anleitung, Beziehungen zwischen den zu lernenden Inhalten und bestehendem Wissen erzeugen (vgl. ebd. S. 157).

d) Lees (2012) Modell des kumulativen Lernens basiert auf zwei fundamentalen Mechanismen: der *kumulativen* und der *strukturierenden Natur* des Lernens. Die *kumulative Natur* des Lernens bedeutet hier, dass der Lernende aktiv seine Umgebung in Bezug auf seine vorhandenen kognitiven Strukturen verarbeitet und interpretiert. Diese Annahme entspricht derjenigen von Wittrock (1974), wonach die Wahrnehmung und Verarbeitung von Informationen durch Inhalte des Langzeitgedächtnisses beeinflusst wird. Aufgrund der *strukturierenden Natur* des Lernens entwickelt der Lernende dabei zunehmend sein Verständnis – seine vorhandenen kognitiven Strukturen – weiter durch Prozesse der Assimilation und Akkommodation (vgl. ebd. S. 34). Hier liegt eine Analogie zum Lernttransfer und der Generalisierung nach Gagné (1968) vor: Der Mensch ist dazu fähig, konkretes und spezifisches Wissen in abstrakten Mustern zusammenzufassen.

Diese beiden natürlichen Mechanismen des Lernens beschreiben Lees (2012) Modell des kumulativen Lernens. Analog zu Ausubels Subsumtionstheorie entwickelt der Lernende dabei sein Wissenssystem, indem aus relevanten Wissensseinheiten neue kognitive Strukturen gebildet werden; zum Beispiel Konzepte, Schemata oder mentale Modelle. Bei diesem

Schematisierungsprozess wird aus dem zunächst konkreten und spezifischen Wissen nach und nach ein abstraktes und verallgemeinertes Wissen konstruiert. Lee modelliert das Wissen deshalb in zwei Dimensionen. Die Pole der beiden Dimensionen werden als Abstraktheit/Konkretheit sowie Verallgemeinerbarkeit/Spezifität bezeichnet (*abstractness/concreteness* und *generality/specificity*). Dieses Wissen ist in den kognitiven Strukturen hierarchisch von konkret-spezifischem zu abstrakt-verallgemeinerbarem Wissen geordnet. Abstraktes Wissen enthält nur wenige Detailinformationen. Das Gegenteil ist konkretes Wissen. Zum Beispiel kann die konkrete Beobachtung „Das Fadenpendel führt eine gleichförmige Schwingung durch, bei welcher die Rückstellkraft proportional zur Auslenkung ist“ abstrahiert werden zu „Das Fadenpendel ist ein Harmonischer Oszillator“. Gleichzeitig müssen zu lernende abstrakte Formulierungen (z.B. die allgemeine und abstrakte Formulierung des Harmonischen Oszillators) konkretisiert werden, indem sie in Beispielen angewandt werden (z.B. Federpendel, Fadenpendel, Molekülschwingungen). Verallgemeinerbares Wissen hingegen erweitert die Wissensstruktur, da mehrere oder viele Wissens Elemente sich in der übergeordneten Struktur wiederfinden. Das Gegenteil ist spezifisches Wissen, das stark kontextgebunden ist. Die Aussage: „Kräfte beschreiben Wechselwirkungen zwischen Körpern“ ist allgemeiner als die Aussage: „Die Gravitationskraft ist eine Wechselwirkung zwischen zwei Massen.“ In beiden Aussagen wird das abstrakte Kraftkonzept angewandt, die erste Aussage ist jedoch weiter. Nach Lee (2012) wird verallgemeinerbares Wissen im Lernprozess durch Inferenz – z.B. aufgrund analoger Strukturen – aus verschiedenen spezifischen Wissens Elementen aufgebaut. Gleichzeitig müssen erlernte allgemeine Regeln auf neue Beispiele übertragen werden oder es muss in Beispielen die Regel erkannt werden.

Die natürlichen Mechanismen des Kumulierens und Strukturierens von Wissen im Lernprozess können analog zum *meaningful learning* von Ausubel von außen unterstützt werden. Der Fokus liegt hier auf einem angeleiteten Wechselspiel zwischen Abstraktion und Konkretisierung, sowie Verallgemeinerung und Spezifizierung. Lees Modell steht in Übereinstimmung mit lernpsychologischem Standardwissen (z.B. Stern & Schumacher, 2004): „man kann Menschen (im Original: sie) lediglich beim Erwerb und der Anwendung von Wissen unterstützen. [...] Intelligent wird Wissen durch seine Anwendung in unterschiedlichen Kontexten.“ (ebd. S. 125 f.). Die Autoren betonen, dass ein „unspezifischer Lerntransfer“ (ebd. S. 124) nicht möglich ist, sondern Wissen einer Domäne in spezifischen Situationen angewandt werden muss. Lee (2012) fasst diese Schlussfolgerungen für Instruktionsmaßnahmen zusammen: (1) Der Lernende sollte dabei unterstützt werden, erworbene Informationen und Wissen zu strukturieren und in einen Sinn-

zusammenhang zu bringen; (2) Bewertungen (*assessment*) sollten sich auf übergeordnete Fähigkeiten (Verständnis) beziehen und nicht nur auf die Reproduktion von Wissen; (3) Die kognitiven Lernstrategien von Mayer (1984) (Re-)Organisation, Wiederholung und Elaboration erweisen sich als eng zusammenhängend mit der Strukturierung von Wissen und sollten gefördert werden.

Den vier Modellen lässt sich als Gemeinsamkeit entnehmen, dass sich kognitive Strukturen anhand des Vorwissens ausbilden – Lernen ist kumulativ im Sinne von ‚mehr Wissen speichern‘ und im Sinne von ‚auf Wissensstrukturen aufbauen‘. Kumulatives Lernen eines intendierten Lernziels (hier: der Aufbau des professionsbezogenen Fachwissens) kann dabei unterstützt werden. Dies wird im Folgenden als ‚kumulative Lehre‘ bezeichnet und kann aus den Voraussetzungen für kumulatives Lernen abgeleitet werden. So ergibt sich aus der Sachlogik eine Lernhierarchie. Das bedeutet, dass die Vorwissensbasis durch Förderung einer bedeutungsvollen Anknüpfung kumulativ erweitert und strukturiert werden kann. Dabei ist eine Fokussierung auf die fachlich korrekten Elemente notwendig, um das Anknüpfen an problematische Alltagsvorstellungen zu vermeiden. Das Modell des ‚kumulativen Lehrens und Lernens‘ wird im folgenden Abschnitt vorgestellt (s. auch Tabelle 1).

3. Das Modell ‚kumulatives Lehren und Lernen im Lehramtsstudium Physik‘

Aus den kognitionspsychologischen bzw. pädagogisch-psychologischen Modellen des Lehrens und Lernens soll ein Modell für das ‚kumulative Lehren und Lernen im Lehramtsstudium Physik‘ entwickelt werden: bisherige Aspekte und Ansätze des kumulativen Lernens werden mit den Zielen der fachlichen Ausbildung von Physiklehrkräften in Verbindung gebracht (s. 1.2). Damit unterscheiden wir insbesondere zwischen kumulativem Lehren und kumulativem Lernen; das kumulative Lehren soll dabei das kumulative Lernen von Physik unterstützen.

Das Ziel ist es, den Aufbau einer physikalischen Wissensbasis zu unterstützen, mit welcher angehende Physiklehrkräfte insbesondere ‚flexibel umgehen‘ können. Das heißt zum Beispiel, dass sie sich schulische Inhalte des Physikunterrichts selbstständig ‚schnell und unkompliziert‘ aneignen können – ‚Gewusstes‘ aktualisieren – oder für schulrelevante physikalische Probleme aus dem Stand und auch im Unterricht verschiedene Lösungswege zur Verfügung haben oder selbst ad hoc Lösungen finden können.

Studien und Berichte zeigen (s. 1.2), dass schulrelevantes Fachwissen von angehenden Physiklehrkräften nicht oder zum Teil nur additiv erworben wird, weil dieses im Referendariat trotz erfolgreichem Physikstudium nicht verfügbar ist. Ein Grund liegt darin, dass der Fokus in der Ausbildung nicht auf schulrelevanten physikalischen Konzepten liegt. Ein erster Schritt zur kumulativen Lehre legt daher nahe, in der

Hochschullehre eine Verbindung zu schulrelevanten Inhalten herzustellen.

Das für den Lehrerberuf anschlussfähige, flexible Fachwissen soll zweitens durch ‚kumulatives Lernen‘ in kognitionspsychologischer Perspektive aufgebaut werden. Drittens: ‚Kumulatives Lernen‘ wird dabei – grob gesprochen – unterstützt (s. 2), wenn eine ‚vertiefte Auseinandersetzung‘ insbesondere mit den Grundkonzepten der Physik aktiviert wird. Grundkonzepte sind dabei Konzepte, die für die Schule und die Physik hohe Relevanz haben, wie zum Beispiel das Kraftkonzept, Impulskonzept oder Energiekonzept, da diese auch im Physikunterricht immer wieder angewendet werden. Wir fokussieren im Folgenden auf die Grundkonzepte der Mechanik, um einen überschaubaren Rahmen zu erhalten. Die ‚vertiefte Auseinandersetzung‘ mit den – oder das kumulative Lernen von – Grundkonzepten wird nach der Analyse der kognitionspsychologischen Erkenntnisse (s. 2) in der Lehre durch die Umsetzung von Maßnahmen aus vier zentralen Dimensionen unterstützt, die im Folgenden detaillierter diskutiert werden: a) Wiederholtes Aufgreifen von physikalischen Grundkonzepten; b) deren kontextbasiertes Üben; c) die Berücksichtigung der Alltagskonzepte der Studierenden, die mit den Grundkonzepten verbunden sind; d) eine schulbezogene Fachphysikausbildung. Eine fünfte Dimension folgt nicht aus den kognitionspsychologischen Arbeiten (s. 1.2) und ist aus Sicht der Lehre mit d) identisch: Eine hohe Relevanzzuweisung der Fachvorlesung für den Lehrerberuf und einer wahrgenommenen und tatsächlichen fachlichen Kompetenzerfahrung („ich sehe, dass ich das erworbene physikalische Wissen in meinem zukünftigen Beruf einsetzen kann“) – sollte sich v. in einer positiven Entwicklung der Einschätzung der eigenen Fähigkeiten, Physik zu unterrichten, zeigen, also in den professionsbezogenen Kompetenzerfahrungen. Unser vorgeschlagenes Modell kumulativen Lehrens weist daher fünf Dimensionen auf, für die sich jeweils eine Lehr- und eine Lernaussprägung zeigen; daher Modell des kumulativen Lehrens und Lernens.

a) Wiederholtes Aufgreifen von physikalischen Grundkonzepten am Beispiel der Mechanik

Diese Modelldimension folgt dem generativen Lehren und Lernen von Wittrock (1991), nach dem Lernen unterstützt werden kann, wenn auf zentrale Inhalte fokussiert wird; in unserem Fall die physikalischen Grundkonzepte der Mechanik. Die Fokussierung auf zentrale Inhalte impliziert aus unserer Sicht auch das wiederholte Aufgreifen der Grundkonzepte in der Lehre; dies können zum einen einfach Wiederholungen sein, die an geeigneten Stellen der Lehre erfolgen, oder auch durch intelligentes Üben (s. c) Kontextbasiertes Üben). Das wiederholte Aufgreifen lässt sich in Ansätzen auch aus Lee (2012) folgern: Es müssen eine Reihe von konkreten Lerngelegenheiten, z.B. zum Kraftkonzept, zur Verfügung stehen.

Wir grenzen uns hier von Gagné (1968) ab, der das explizite Aufstellen von Lernhierarchien fordert. Eine Externalisierung der Lernhierarchien in einem Feinheitsgrad, den Gagné vorschlägt, bringt eine starke Fremdsteuerung des Lernens mit sich, die im Rahmen eines Hochschulstudiums nicht mehr angemessen ist. Übernommen wird aus Gagnés Lernmodell das Konzept des Lerntransfers: Lernende stellen durch wiederholtes Aufgreifen der physikalischen Grundkonzepte Beziehungen zwischen den Aspekten des Grundkonzeptes her und können so ein vernetztes Wissen aufbauen. Damit folgt auch nach Gagné implizit die Wiederholung der Grundkonzepte. Ein Beispiel, wie dies durch wiederholtes Aufgreifen in der kumulativen Lehre umgesetzt werden kann: Das Kraftkonzept wird in der Mechanik gelehrt und gelernt, außerdem ist es üblich das Kraftkonzept auch in der Elektrodynamik zu verwenden (elektrische Kräfte, Lorentzkraft). In unserer Auffassung von kumulativer Lehre nehmen wir nicht an, dass Lernende die zugrundeliegenden Konzepte in Form der Newtonschen Axiome bereits vollständig ‚verstanden‘ haben. Zum Beispiel berichtet Wiesner (1994) davon, dass auch Physikstudenten nicht klar ist, dass in $m \ddot{x} = F$ die resultierende Kraft gemeint ist. Typisch ist auch eine Verwechslung von Actio/Reactio-Kräften mit den Kräftepaaren an einem Körper im Kräftegleichgewicht. Anstatt in der Elektrodynamik also lediglich die Beziehung $m \ddot{x} = F$ zum Aufstellen von Bewegungsgleichungen von geladenen Teilchen in elektromagnetischen Feldern zu verwenden, sollte z.B. explizit der Bezug zu allen Newtonschen Axiomen hergestellt werden: Gilt das dritte Newtonsche Axiom (*actio/reactio*)? Oder für das Grundkonzept Impuls: Wird ein Elektron im elektrischen Feld eines Kondensators beschleunigt, so wächst sein Impuls. Gilt hier also noch die Impulserhaltung? Auch innerhalb der Mechanik sollen nach unserer Analyse die Grundkonzepte wiederholt aufgegriffen werden. Zum Beispiel können die Newtonschen Axiome mit dem Impuls formuliert werden und zeigen dann die Impulserhaltung.

b) Alltagsvorstellungen der Studierenden berücksichtigen

Das Vorwissen nimmt eine besondere Bedeutung für den Lernprozess ein. Neben dem physikalischen Wissen enthält das Vorwissen der Studierenden auch Alltagsvorstellungen, die häufig eben nicht mit den physikalischen Konzepten übereinstimmen – oder, ohne diese weiter zu vertiefen, Hybride aus physikalischen Ideen und Alltagsvorstellungen. Die Alltagsvorstellungen werden dabei in Anlehnung an das Modell von Wittrock (1989) als Teil des Vorverständnisses betrachtet. Auch angehende PhysiklehrerInnen haben Alltagsvorstellungen (s. 1.2). Daher soll gezielt auf das Vorwissen und die Alltagsvorstellungen zu den Grundkonzepten der Mechanik der Studierenden eingegangen werden. In der physikdidaktischen Terminologie also ein Konzeptwechsel. Mit dem angestrebten Konzeptwechsel haben die Studierenden die

Möglichkeit, in die Rolle ihrer zukünftigen Schülerinnen und Schüler zu schlüpfen und damit deren Schwierigkeiten nach- bzw. vorzuerleben. Hier zeigt sich – wenn diese Dimension umgesetzt wird – eine natürliche Verbindung zum fachdidaktischen Wissen.

c) Kontextbasiertes Üben

Die dritte Dimension – das ‚variantenreiche Üben‘, das ‚intelligente Üben‘ – unseres Modells ist zum einen mit Lee (2012) begründbar; zum anderen wie oben gesagt auch mit dem pädagogisch-psychologischen Standardwissen (z.B. Stern & Schumacher, 2004). In Bezug auf Lees (2012) Wissensmodell wird Wissen im Lernprozess Schritt für Schritt abstrahiert und verallgemeinert. Dabei sind – wir wiederholen – die Lernstrategien Wiederholung, Reorganisation und Elaboration z.B. mit Aufgaben zu induzieren. Das ‚assessment‘ bezieht sich auf das ‚Verständnis‘, nicht auf die Reproduktion von Fakten. Was bedeutet dies hingegen bei Lehr-Lern-Prozessen, die von abstrakten Inhalten ausgehen? Beispielsweise sind die Newtonschen Axiome abstrakt formuliert. Um die Axiome konkret-spezifisch zu verstehen, müssen diese an vielen Beispielen in verschiedenen Kontexten angewendet und damit auch geübt werden. Andernfalls bleibt das Wissen zu abstrakten Gesetzen träge; es ist also nicht flexibel anwendbar (Renkl, 1996). Was heißt dies konkret? Beispielsweise kann und muss in der Hochschullehre das zweite Newtonsche Axiom (stark abgekürzt in der Form: $F_{res} = m \cdot a$) aus verschiedenen Perspektiven studiert werden: Einmal kann von der Beobachtung der Beschleunigung eines Körpers auf die resultierende Kraft geschlossen werden, die auf den Körper folglich ausgeübt werden muss. Zum anderen kann aus allen Kräften, die auf einen Körper ausgeübt werden, die resultierende Kraft bestimmt und somit die Beschleunigung vorhergesagt werden. Beide Perspektiven finden sich im Gesetz von Newton. Der kumulative Aspekt des Lernens besteht also darin, dass Lernende mit der Zeit die Gemeinsamkeiten der Spezialfälle erkennen und zu einem Konzept verallgemeinern. Dies kann durch kumulatives Lehren unterstützt werden, indem entsprechende Übungsaufgaben angeboten werden, um die Grundkonzepte in speziellen und unterschiedlichsten Kontexten anzuwenden. Zudem enthält die Forderung nach einem professionsorientierten Fachwissen, dass die Beispiele und Übungsaufgaben schulnah sind, also abstraktes Hochschulwissen in typischen Schulkontexten angewandt wird. Diese Forderung wird durch die folgende vierte Dimension berücksichtigt.

d) Schulbezogene Fachausbildung

Für angehende Physiklehrkräfte ist es eine zusätzliche Herausforderung, das im Hochschulstudium erworbene physikalische Wissen in der Schule auf die Schulphysik zu beziehen (s. 1.2). Eine mögliche Erklärung: Der Aufbau des physikalischen Fachwissens in den Vorlesungen ist nicht zwingend an den Grund-

konzepten der Physik orientiert. Ein Beispiel: Die Fähigkeit, den Lagrangeformalismus zur Aufstellung von Bewegungsgleichungen anzuwenden, bedeutet nicht zwingend, die zugrundeliegenden Grundkonzepte von Kraft, Energie und Impuls flexibel anwenden zu können. Der Lagrangeformalismus erlaubt – und dies ist sogar das Ziel – ein sehr formales Vorgehen. Zur Lösung physikalischer Probleme mag dies angemessen sein, für die Entwicklung der Fähigkeit, Anfängern physikalisches Grundwissen zu vermitteln, mag dies hingegen eine eher untergeordnete Rolle spielen. Die hierarchische Wissensstruktur der Fachvorlesungen fokussiert stattdessen eher auf mathematische und algorithmische Aspekte (Koordinatensysteme, Lösen von Differentialgleichungen etc.). Damit lässt es sich zumindest auf Plausibilitätsebenen verstehen, wenn Merzyn (2017) die Probleme von Referendaren und jungen Lehrern im Unterricht auch auf „unpassende Fachkompetenz“ zurückführt (vgl. ebd. S. 77). Angehende Lehrkräfte sollten lernen, die erworbenen Inhalte des Physikstudiums auch an die fachlichen Anforderungen der Schulhalte anzupassen. Dazu werden in einer lehrerprofessionalisierten kumulativen Lehre explizit Aufgaben mit Schulhalten benutzt, anhand derer die Elementarisierung geübt werden kann. Damit stoßen wir wieder auf einige wesentliche Aspekte der Definition des ‚vertieften Schulwissens‘ nach Riese et al. (2015) (s. 1.2), die einen möglichen Rahmen für das professionsorientierte Fachwissen vorgeben. Ein Beispiel: Das Konzept des Drehmoments wird universitär als abstrakter Pseudovektor ($\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$) eingeführt; in der Schule als Spezialfall des Hebels. Das ‚vertiefte Schulwissen‘ zum Drehmoment sollte es der Lehrkraft erlauben, die Bedingungen zu erkennen, unter denen der Hebel in der Schule unterrichtet wird. Beispielsweise, um ggf. Fälle auszuschließen, in denen die Kraft nicht senkrecht auf \vec{r} steht. Oder beim zweiseitigen Hebel (z.B. einer Wippe) in der Schule: Weshalb gleichen sich die Drehmomente aus, obwohl die Kräfte auf beiden Seiten des Hebels nach unten zeigen?

e) Professionsbezogene Kompetenzerfahrung

Dieser Aspekt ist der Entwicklung eines Modells für eine Lehramtsausbildung im Speziellen geschuldet und kann nicht unmittelbar aus den Lernmodellen zum kumulativen Lernen abgeleitet werden. Hier wird insbesondere eine Verbindung zu den Persönlichkeitsvariablen hergestellt, die im Kompetenzmodell nach Baumert & Kunter (2006) dem Belief-System einer Lehrkraft zuzuordnen sind.

Wie gesagt, zeigt die universitäre Lehramtsausbildung die Problematik, dass Studierende häufig eine Distanz zum späteren Berufsfeld empfinden. Insbesondere sehen Studierende des Lehramts in den Studieninhalten keine Relevanz für ihren Werdegang als zukünftige Lehrkraft, was wiederum negative Einflüsse auf die Studienmotivation haben kann (Heublein et al., 2010). Eine professionsorientierte Fachausbildung trägt diesem Aspekt Rechnung.

Dimensionen	Theoretische Begründung aus den Lerntheorien zu kumulativem Lernen (a-d)	Ziele der Fachausbildung (Kumulatives Lernen)	Umsetzung in die kumulative Lehre
a) Wiederholtes Aufgreifen von physikalischen Grundkonzepten	- Lerntransfer: das Vorwissen kann nach und nach verallgemeinert und erweitert werden, wenn gezielt und wiederholt darauf aufgebaut wird.	- Aufbau einer tragfähigen Wissensbasis zu physikalischen Grundkonzepten.	- Gezieltes Wiederaufgreifen der Grundkonzepte und Fokussierung auf die zentralen Konzepte und deren Aspekte.
b) Kontextbasiertes Üben	- Konkretisieren von abstrakt repräsentiertem Wissen in unterschiedlichsten Kontexten. - Abstrahieren von konkret-spezifischem Wissen.	- Aufbau von flexibel anwendbarem – also nicht-trägem – Wissen.	- Lernumgebungen mit kontextbasierten Aufgaben und unterschiedlichen Kontexten anbieten.
c) Alltagsvorstellungen berücksichtigen	- Auseinandersetzung mit eigenen Alltagskonzepten notwendig, da sie Teil des Vorwissens sind.	- Überwindung eigener Alltagsvorstellungen.	- Angebote von Übungen, die eine Konfrontation mit typischen Alltagsvorstellungen beinhalten.
d) Schulbezogene Fachausbildung	- Beziehungen zwischen Hochschulwissen und Schulhalten herstellen als ein Element des kumulativen Lernprozesses für Physiklehrkräfte.	- Aufbau eines Fachwissens, das die Anforderungen der Schule umfasst.	- Angebote von Übungen, die explizit das Anwenden des Hochschulwissens auf typische Schulhalte beinhalten.
e) Professionsbezogene Kompetenzerfahrung	- Professionsbezogene Kompetenzerfahrungen beeinflussen das Lernverhalten.	- Stärkung der Lehrer-Selbstwirksamkeitserwartungen. - Überwindung der wahrgenommenen Distanz vom Studium zum Berufsfeld.	- Angebote zur Ausübung erworbener fachlicher Kompetenz in schulrelevanten Aufgaben.

Tabelle 1: Modell des kumulativen Lehrens und Lernens in der Lehramtsausbildung Physik

Dies geschieht über die Herstellung des Schulbezuges. Die (zukünftige) Lehrer-Selbstwirksamkeitserwartung, d.h. die Selbsteinschätzung eigener Fähigkeiten, ein Engagement zu erreichen, um Lernen bei SchülerInnen zu ermöglichen, auch bei denjenigen SchülerInnen, die schwierig oder unmotiviert sind (vgl. Tschannen-Moran & Hoy, 2001, S. 783), sollte durch diese Maßnahme beeinflusst werden. Wir verfolgen hiermit ein nicht-kognitives Lehrziel. Der Ansatz der kumulativen Lehre kann also erweitert werden. Es sollte in den Professionsorientierten Vorlesungen nicht nur der Bezug zur Schule hergestellt werden, sondern explizit auf die Bedeutungen des Hochschulstoffs für die Schule hingewiesen werden. Die damit einhergehende mögliche Wahrnehmung der Schulrelevanz und insofern auch die Relevanz für den eigenen Lehrerberuf, kann nach Tschannen-Moran et al. (1998) eine Möglichkeit sein, die Lehrer-Selbstwirksamkeitserwartungen zu beeinflussen.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Unser Ziel ist es, ein Modell für eine professionsbezogene Fachausbildung zu entwickeln, d.h. (1) Aufbau eines ‚vertieften Schulwissens‘, (2) Alltagsvorstellungen zur Physik überwinden und (3) Relevanzzuweisung der Fachveranstaltungen durch die Studierenden für ihren späteren Lehrerberuf ermöglichen.

Unser Ansatz basiert auf den Ideen des kumulativen Lernens und den daraus abgeleiteten Maßnahmen – die kumulative Lehre – zur Unterstützung kumulativen Lernens (s. 2). Das Modell ‚kumulatives Lehren und Lernen im Lehramtsstudium Physik‘ wurde mit Hilfe kognitions- und lernpsychologischer Ansätze zum ‚kumulativen Lernen‘ formuliert. Dieses Modell

bietet einen Rahmen, anhand dessen Lehrveranstaltungen in der Hochschullehre der Lehramtsausbildung Physik theoriegeleitet entwickelt werden können. Rubitzko, Laukenmann & Starauschek (im Band) haben anhand des Modells ein Lehrkonzept für die Fachveranstaltungen Mechanik, Experimentalübungen zur Mechanik und Elektrodynamik entwickelt.

Um die Wirksamkeit der kumulativen Lehre zu untersuchen, wird das Lehrkonzept in einem weiteren Schritt begleitend evaluiert. Dazu wird untersucht, ob das entwickelte Lehrkonzept zur kumulativen Lehre von Grundkonzepten zur Mechanik die gesteckten Ziele erreicht. Es wird dabei ein *Design-Based Research* – Forschungsansatz verfolgt. Dieser Forschungsansatz hat nach Reinmann (2005) zwei Ziele: Das Generieren eines praktischen und eines theoretischen Outputs. Mit dem praktischen Output wird auf Basis der gewonnenen Daten das Lehrkonzept als Re-Design für die Praxis weiterentwickelt. Mit dem theoretischen Output wird die in der Praxis erprobte Theorie zum kumulativen Lehren und Lernen reflektiert. Dies beinhaltet die Frage, ob die mit dem Modell verbundenen Maßnahmen praktikabel sind und sich in einer konkreten Umsetzung in der Praxis eindeutig identifizieren lassen, oder ob das Modell beispielsweise in weitere Dimensionen ausdifferenziert werden muss.

5. Literatur

- Abell, S. K. (2007). *Research on science teacher knowledge*. Handbook of research on science education, 1105–1149.
- Ausubel, D. P. (1968). *Educational psychology: A cognitive view*: Holt, Rinehart and Winston.

- Baumert, J. & Kunter, M. (2006). *Stichwort: Professionelle Kompetenz von Lehrkräften*. Zeitschrift für Erziehungswissenschaft, 9(4), 469–520.
- Borowski, A., Kirschner, S., Liedtke, S. & Fischer, H. E. (2011). *Vergleich des Fachwissens von Studierenden, Referendaren und Lehrenden in der Physik*. PhyDid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule, 1(10), 1–9.
- Gagné, R. M. (1968). *Contributions of learning to human development*. American Psychological Association. Reprint of: Psychological review, 75(3), 177–191.
- Großmann, S. & Hertel, I. (2014). *Zur fachlichen und fachdidaktischen Ausbildung für das Lehramt Physik*: Bad Honnef: DPG.
- Harms, U. & Bündler, W. (1999). *Zuwachs von Kompetenz erfahrbar machen: Kumulatives Lernen*. Erläuterungen zum Modul, 5.
- Hattie, J. (2009). *Visible learning: A synthesis of 800 meta-analyses on achievement*. New York: Routledge
- Heublein, U. Hutzsch, C., Schreiber, J., Sommer, D. & Besuch, G. (Eds.) 2010. *Ursachen des Studienabbruchs in Bachelor- und in herkömmlichen Studiengängen*. : Vol. 2: HIS: Hochschul-Informationssystem GmbH. URL: http://www.dzhw.eu/pdf/pub_fh/fh-201002.pdf
- Jung, W., Wiesner, H. & Engelhardt, P. (1981). *Vorstellungen von Schülern über Begriffe der Newtonschen Mechanik*. Verlag Barbara Franzbecker, Bad Salzdetfurth.
- Krauss, S., Neubrand, M., Blum, W., Baumert, J., Brunner, M., Kunter, M. & Jordan, A. (2008). *Die Untersuchung des professionellen Wissens deutscher Mathematik-Lehrerinnen und -Lehrer im Rahmen der COACTIV-Studie*. Journal für Mathematik-Didaktik, 29(3-4), 233–258.
- Kunter, M., Klusmann, U., Baumert, J., Richter, D., Voss, T. & Hachfeld, A. (2013). *Professional competence of teachers: effects on instructional quality and student development*. Journal of Educational psychology, 105(3), 805.
- Kunter, M., Seiz, J. & Baumert, J. (2014). *Die Bedeutung des pädagogisch-psychologischen Wissens von angehenden Lehrkräften für die Unterrichtsqualität*. Zeitschrift für Pädagogik. (60.2), 184–201.
- Lee, J. (2012). *Cumulative Learning and Schematization in Problem Solving*. Dissertation. Universität, Freiburg.
- Mayer, R. E. (1984). *Aids to prose comprehension*. Educational Psychologist, 19, 30-42.
- Merzyn, G. (2017). *Auf den Lehrer kommt es an*. PhyDid A-Physik und Didaktik in Schule und Hochschule, 1(16), 67–80.
- Reinmann, G. (2005). *Innovation ohne Forschung? Ein Plädoyer für den Design-Based Research-Ansatz in der Lehr-Lernforschung*. Unterrichtswissenschaft, 33(1), 52–69.
- Renkl, A. (1996). *Träges Wissen: Wenn Erlerntes nicht genutzt wird*. Psychologische Rundschau, 47, 78–92.
- Riese, J. (2009). *Professionelles Wissen und professionelle Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften*. Logos Verlag Berlin GmbH.
- Riese, J. & Reinhold, P. (2012). *Die professionelle Kompetenz angehender Physiklehrkräfte in verschiedenen Ausbildungsformen*. Zeitschrift für Erziehungswissenschaft, 15(1), 111–143.
- Riese, J. Kulgemeyer, C., Zander, S., Borowski, A., Fischer, H. E., Gramzow, Y., Reinhold, P., Schecker, H., & Tomczyszyn, E. (2015). *Modellierung und Messung des Professionswissens in der Lehramtsausbildung Physik*. Kompetenzen von Studierenden, 61, 55-79.
- Riese, J., Gramzow, Y. & Reinhold, P. (2017). *Die Messung fachdidaktischen Wissens bei Anfängern und Fortgeschrittenen im Lehramtsstudiengang Physik*. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 23(1), 99–112.
- Rubitzko, Laukenmann & Starauschek (im Band)
- Seel, N. M. (2003). *Psychologie des Lernens: Lehrbuch für Pädagogen und Psychologen*. UTB.
- Shulman, L. (1987). *Knowledge and teaching: Foundations of the new reform*. Harvard educational review, 57(1), 1–23.
- Stern, E. & Schumacher, R. (2004). *Intelligentes Wissen*. Universitas, 121–134.
- Tschannen-Moran, M., Hoy, A. W., & Hoy, W. K. (1998). *Teacher efficacy: Its meaning and measure*. Review of educational research, 68, 202–248.
- Tschannen-Moran, M. & Hoy, A. W. (2001). *Teacher efficacy: Capturing an elusive construct*. Teaching and teacher education, 17(7), 783-805.
- Vogelsang, C. (2014). *Validierung eines Instruments zur Erfassung der professionellen Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräfte*. Logos Verlag Berlin GmbH.
- Wiesner, H. (1994). *Verbesserung des Lernerfolgs im Unterricht über Mechanik. Schülervorstellungen, Lernschwierigkeiten und fachdidaktische Folgerungen*. Physik in der Schule, 32(4), 122–127.
- Wittrock, M. C. (1974). *Learning as a generative process*. Educational psychologist, 11(2), 87–95.
- Wittrock, M. C. (1989). *Generative processes of comprehension*. Educational psychologist, 24(4), 345–376.
- Wittrock, M. C. (1991). *Generative teaching of comprehension*. The Elementary School Journal, 92(2), 169–184.

Danksagung

Das Verbundprojekt "Lehrerbildung PLUS" wird im Rahmen der gemeinsamen "Qualitätsoffensive Lehrerbildung" von Bund und Ländern aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert.

Messwerterfassung mit dem Arduino in der Lehramtsausbildung

Christopher Kurth*, Rita Wodzinski*

*Universität Kassel, Didaktik der Physik, Heinrich-Plett-Straße 40, 34109 Kassel
kurth@physik.uni-kassel.de, wodzinski@physik.uni-kassel.de

Kurzfassung

Die digitale Erfassung von Messwerten im Physikunterricht wird in der Regel mit Messwerterfassungssystemen der Lehrmittelfirmen durchgeführt. In den letzten Jahren wurden zunehmend auch kostengünstige Messexperimente für den Physikunterricht unter Verwendung eines Arduinos entwickelt. Erfahrungen zeigen, dass eine Reihe von Studierenden generelle Vorbehalte gegenüber dem Einsatz von Messwerterfassungssystemen in Schülerexperimenten hat. Inwieweit diese Vorbehalte mit dem Einsatz von Arduinos verändert werden können, wird im Rahmen einer kleinen Evaluationsstudie geprüft.

Dazu wurde die Auseinandersetzung mit Einsatzmöglichkeiten des Arduinos im Physikunterricht in das didaktische Experimentierpraktikum für Physik-Lehramtsstudierende an der Universität Kassel integriert. Die Studierenden führen darin Experimente zur Mechanik angeleitet durch und analysieren diese unter didaktischen Gesichtspunkten. Zur Auswertung der Wirkungen dieses Studienelements bearbeiten die Studierenden vor und nach der Bearbeitung einen Fragebogen.

1. Ausgangslage

Der Einsatz von digitalen Messwerterfassungssystemen im Physikunterricht bietet bei sinnvoller Einbettung einige Vorteile gegenüber der manuellen Messwerterfassung. Vorgänge, die für die menschliche Wahrnehmung zu schnell ablaufen oder deren Erfassung mit den menschlichen Sinnen generell nicht oder nur sehr ungenau möglich sind, können im Unterricht untersucht werden. Zudem können mehrere Messungen einer Messreihe in kurzer Zeit ausgewertet und grafisch aufbereitet werden.

1.1. Einsatz von digitalen Messwerterfassungssystemen im Unterricht

Trotz der genannten Vorteile bestehen auf Seiten der Lehrkräfte Vorbehalte gegenüber dem Einsatz von digitalen Messwerterfassungssystemen. Etwa ein Drittel der Gymnasiallehrkräfte geben an, ein geringes oder sehr geringes Interesse am Einsatz von PC-Messwerterfassungssystemen zu haben (Wilhelm & Trefzger, 2010). Dementsprechend geben etwa zwei Drittel der Lehrkräfte an, Messwerterfassungssysteme höchstens vereinzelt im Unterricht einzusetzen (Wilhelm & Trefzger, 2010). Dass dieses Ergebnis nicht an dem relativ lang zurückliegenden Untersuchungszeitpunkt liegt, wird durch eine Lehrkräftebefragung fünf Jahre später belegt (Wenzel & Wilhelm, 2015). Als Ursachen für den zurückhaltenden Einsatz kommen unter anderem eine schlechte Hard- und Softwareausstattung an den Schulen, mangelnde Ideen für einen sinnvollen Computereinsatz und eine subjektiv wahrgenommene geringe Kompetenz in Betracht (Pietzner, 2008).

1.2. Einstellungen von Studierenden zum Einsatz von Messwerterfassungssystemen

Im Rahmen des didaktischen Experimentierpraktikums an der Universität Kassel arbeiten Lehramtsstudierende mehrfach mit Messwerterfassungssystemen wie zum Beispiel CASSY (Leybold) oder Cobra (Phywe). Dabei äußern Studierende häufig grundlegende Vorbehalte gegenüber dem Einsatz von Messwerterfassungssystemen. Unter anderem seien die Systeme zu kompliziert, böten keinen Vorteil gegenüber einer Messung mit der Hand, seien zu zeitintensiv oder für Schülerinnen und Schüler wenig anschaulich. Außerdem seien diese an Schulen häufig nicht vorhanden und in der Anschaffung zu teuer.

1.3. „Low-Cost“-Erfassungssysteme

Um dem Kritikpunkt, Messwerterfassungssysteme seien zu teuer und deswegen häufig nicht an Schulen vorhanden, zu begegnen, wurden in den letzten Jahren einige Vorschläge für „Low-Cost“-Erfassungssysteme gemacht.

Ein Ansatz ist die Verwendung von Smartphones, in denen zahlreiche Sensoren wie zum Beispiel ein Beschleunigungs-, Gyroskop- oder Lichtsensor verbaut sind. Mit geeigneten Apps lassen sich die Messwerte dieser Sensoren auslesen und ggf. auch auswerten (z. B. Götze et al., 2017). Durch die weite Verbreitung von Smartphones liegt ein Vorteil dieses Ansatzes in der kostenlosen Verfügbarkeit der Geräte. Begrenzt wird der Einsatz durch die im Smartphone verbauten Sensoren, so dass zum Beispiel direkte Messungen von Geschwindigkeiten oder elektrischen Spannungen nicht möglich sind.

Die Verwendung eines Einplatinencomputers, wie zum Beispiel dem Raspberry Pi, stellt einen weiteren Ansatz zur Entwicklung von „Low-Cost“-

Erfassungssystemen dar. Wird der Raspberry Pi, der inklusive zwingend benötigter SD-Karte und Netzteil für etwa 50 € zu erwerben ist, um externe Sensoren ergänzt, ist er auf Grund der zahlreichen zur Verfügung stehenden Sensoren sehr vielfältig als Messwerterfassungssystem einsetzbar. Der Nachteil dieses Ansatzes liegt in der im Vergleich zum Smartphone relativ komplexen Einrichtung, die Fösel (2017) ausführlich darstellt.

Um die Auswahl aller externen Sensoren zu erhalten und gleichzeitig die Komplexität bei der Einrichtung zu verringern wird im didaktischen Experimentierpraktikum das Arduino Board als Grundlage eines Messwerterfassungssystems eingesetzt. Ein Board¹ kostet etwa 10 €, so dass auch vollständige Klassensätze angeschafft werden können. Die Inbetriebnahme der Sensoren ist dank umfassender Online-Tutorials und direkt funktionsfähiger Beispieldateien weniger komplex als beim Raspberry Pi. Die von den Sensoren erfassten Daten werden dabei über den seriellen Monitor an den mit dem Arduino verbundenen Rechner ausgegeben, so dass die Auswertung und Aufbereitung der Daten ohne Umwege mit einem Tabellenkalkulationsprogramm vorgenommen werden kann.

2. Forschungsfragen und -methodik

Im Rahmen einer kleinen Evaluationsstudie werden die beim Anleiten der Studierenden beobachteten Einstellungen gegenüber dem Einsatz von Messwerterfassungssystemen und die Änderungen durch die Durchführung der Arduinoexperimente mit Hilfe eines Fragebogens erfasst. Konkret werden dabei folgende Fragestellungen untersucht:

FF1) Welche Einstellungen haben Studierende zum Einsatz von Messwerterfassungssystemen im Physikunterricht?

FF2) Wie verändern sich die Einstellungen durch den Einsatz von Arduinoexperimenten im didaktischen Experimentierpraktikum?

Um mögliche Veränderungen durch die Durchführung des Arduinoexperiments abbilden zu können, nehmen die Studierenden vor dem erstmaligen Kontakt mit der Versuchsanleitung und nach Abgabe der Ausarbeitung zum Versuch Stellung zu plakativ formulierten Aussagen wie zum Beispiel:

- „Im Physikunterricht lernen die Schülerinnen und Schüler mehr, wenn sie Messungen ‚per Hand‘ (also ohne den Einsatz eines Computers) vornehmen.“
- „Für Demonstrationsexperimente bietet sich der Einsatz von Computer-Messwerterfassungssystemen an.“

- „Für Schülerexperimente bietet sich der Einsatz von Computer-Messwerterfassungssystemen an.“

Durch das offene Antwortformat können die Einstellungen der Studierenden differenzierter als durch geschlossene Formate erfasst werden. Die Auswertung wird mittels qualitativer Inhaltsanalyse vorgenommen.

Zusätzlich werden im ersten Fragebogen Vorkenntnisse zum Arduino, zum Programmieren und zu Messwerterfassungssystemen erhoben, während die Studierenden im zweiten Fragebogen zentrale Erkenntnisse beschreiben, die sie bei der Bearbeitung des Versuchs gemacht haben. Auf Grundlage dieser Daten werden die Versuchsanleitungen hinsichtlich ihrer Passungen zu den Vorkenntnissen und dem intendierten Erkenntnisgewinn angepasst.

3. Messwerterfassung mit dem Arduino im didaktischen Experimentierpraktikum

Die Bearbeitung der Arduinoexperimente ist in die didaktischen Experimentierpraktika eingebettet, welche die Studierenden in der Regel in den ersten vier Semestern absolvieren. Jedem der vier Praktika liegt einer der thematischen Schwerpunkte Mechanik, E-Lehre, Wärme & Energie oder Optik zu Grunde. Zu jedem Themengebiet führen die Studierenden drei Versuche durch, von denen eines das Arduinoexperiment ist.

Um den unterschiedlichen Vorkenntnissen gerecht zu werden, können die Studierenden zwischen zwei verschiedenen Versionen des Arduinoexperiments wählen. In der ersten Version, die sich an Studierende mit Vorwissen zum Programmieren richtet, besteht der Auftrag darin, auf Grundlage einer Vorlage einen eigenen Sketch zur Programmierung des Arduino zu erstellen. In der zweiten Version liegt der Fokus hingegen auf der Verwendung eines fertigen Sketches zur Erfassung der Messwerte. Dabei ist der Auftrag so gestellt, dass er auch ohne Programmierkenntnisse bearbeitbar ist. Das Vorgehen wird beispielhaft an einem Experiment zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit aufgezeigt:

Version 1 (für Studierende mit Vorkenntnissen)

In dieser Version bereiten die Studierenden als Vorbereitung auf das Experiment einen Sketch vor, mit dem ein Ultraschallsensor (HC-SR04) so angesteuert wird, dass er einen kurzen Impuls aussendet und die Reflexion empfängt. Aus der Zeitdifferenz und dem Abstand zur Reflexionsfläche soll der Arduino außerdem die Schallgeschwindigkeit bestimmen und über den seriellen Monitor ausgeben. Der Aufbau ist in Abbildung 1 dargestellt.

¹ Der Preis bezieht sich auf ein zur Arduino Programmierumgebung vollständig kompatibles Uno Board.

Nachdem die Studierenden den Sketch auf seine Funktion hin überprüft haben, erweitern sie ihn so, dass mehrere Werte für die Schallgeschwindigkeit bestimmt werden und der Mittelwert inklusive Abweichungen ausgegeben wird.

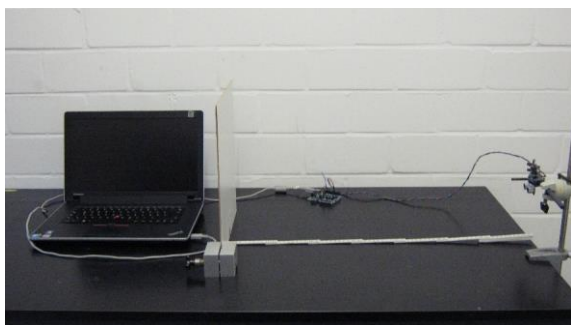


Abb.1: Aufbau zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit einem Ultraschallsensor

Während diese beiden Teile des Experiments darauf abzielen, Kenntnisse zur Ansteuerung von Sensoren mit dem Arduino aufzubauen bzw. zu festigen, werden die Studierenden in der didaktischen Auseinandersetzung dazu angeregt, den Einsatz des Arduinos im Physikunterricht, insbesondere das benötigte Vorwissen auf Seiten der Schülerinnen und Schüler zu reflektieren und weitere Einsatzsituationen des Arduinos im Physikunterricht zu beschreiben. Durch diese Auseinandersetzung sollen die Studierenden für mögliche Schwierigkeiten der Schülerinnen und Schüler sensibilisiert werden und gleichzeitig ihre Vorkenntnisse nutzen, um Ideen für weitere Experimente zu generieren.

Version 2 (für Studierende ohne Vorkenntnisse)

Durch die Bearbeitung dieser Version sollen Studierende ohne Vorkenntnisse erste Erfahrungen mit der Verwendung des Arduino zur Messwerterfassung machen können. Im Gegensatz zur ersten Version wird hier kein eigener Sketch erstellt, sondern ein fertiger Sketch durch die Studierenden auf das Arduino-Board geladen, mit dem die Schwingung eines Federpendels und die Bewegung eines Messwagens auf einer schiefen Ebene analysiert werden können (siehe Abbildungen 2 und 3). Durch dieses Vorgehen soll zum einen die Einstiegshürde verringert, zum anderen genügend Zeit für die Messung verschiedener Vorgänge zur Verfügung gestellt werden.

Aus fachlicher Sicht untersuchen die Studierenden die Auswirkungen der Luftreibung auf die Schwingung eines Federpendels (Abbildung 2) und die Energieumwandlungen bei der Bewegung eines Messwagens auf der schiefen Ebene (Abbildung 3).

Die didaktischen Fragestellungen zielen darauf ab, die Studierenden zur Auseinandersetzung mit Schwierigkeiten und dem Potenzial des Arduinos im Physikunterricht anzuregen. Insbesondere wird die Frage beantwortet, inwiefern das Experiment dazu geeignet ist, typischen Schülerschwierigkeiten der Kinematik (siehe z. B. Behrendt, 2004) zu begegnen.

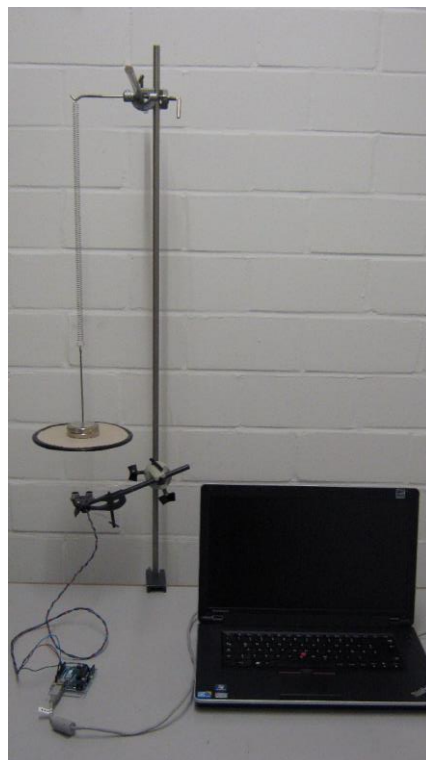


Abb.2: Aufbau zur Analyse eines Federpendels mit einem Ultraschallsensor



Abb.3: Aufbau zur Analyse der Bewegung eines Messwagens auf einer schiefen Ebene mit einem Ultraschallsensor

4. Ergebnisse des ersten Durchgangs

Im ersten Durchgang haben 8 Studierende eines der Arduinoexperimente durchgeführt. Von diesen wählten sechs die Version 1 (mit Vorkenntnissen) und zwei die Version 2 (ohne Vorkenntnisse). Auf Grund der bisher sehr kleinen Stichprobe wurden aktuell noch keine Kategorien gebildet. Insbesondere wurden die Änderungen in den Aussagen durch die Bearbeitung des Experiments bisher nicht ausgewertet. Erste Tendenzen lassen sich jedoch ableiten, wenn lediglich die Zustimmungen bzw. Ablehnungen der Aussagen ohne eine inhaltliche Auswertung der Begründungen ausgewertet werden.

Insgesamt bestätigt sich die eingangs beschriebene Wahrnehmung, dass unter den Studierenden Vorbehalte gegenüber dem Einsatz von Messwerterfassungssystemen im Physikunterricht bestehen.

Deutlich wird dies zum Beispiel daran, dass zwei Studierende der Aussage „Schülerinnen und Schüler lernen mehr, wenn sie Messungen ‚per Hand‘

vornehmen“ uneingeschränkt zustimmen. Vier Studierende lehnen diese Aussage teilweise ab.

Die Studierenden differenzieren jedoch zwischen dem Einsatz in Demonstrations- und Schülerexperimenten. Während alle Studierenden der Aussage „Für Demonstrationsexperimente bietet sich der Einsatz von Messwerterfassungssystemen an“ zustimmen, stimmen sechs Studierende der analogen Aussage bezogen auf Schülerexperimente nur eingeschränkt zu. Als Einschränkungen werden die Komplexität des Erfassungssystems, das Zeitmanagement im Unterricht, nicht funktionierende Technik und unzureichende Kenntnisse der Lernenden genannt.

Auf Grundlage dieser Aussagen erscheint es widersprüchlich, dass sechs Studierende angeben, es sei wichtig, dass Schülerinnen und Schüler den Umgang mit Computermesswerterfassungssystemen erlernen, da der Aufbau dieser Kenntnisse nur schwer ohne die selbsttätige Auseinandersetzung möglich ist. Dieser Konflikt wird auch durch die Begründungen der Studierenden nicht aufgelöst.

Bezogen auf die Frage, inwiefern der Arduino für den Einsatz als Messwerterfassungssystem geeignet ist, unterscheiden die Studierenden zwischen Einsätzen mit und ohne die eigenständige Erstellung von Sketchen. Werden die Sketche vorgegeben oder verfügen die Schülerinnen und Schüler über ausreichende Programmierkenntnisse, können sich fünf Studierende den Einsatz im eigenen Physikunterricht vorstellen. Das Erstellen von eigenen Sketchen verorten fünf Studierende eher im Informatik- als im Physikunterricht.

5. Ausblick

Bisher wurden die Arduinoexperimente von acht Studierenden des ersten Semesters zum Themengebiet Mechanik durchgeführt. In den folgenden drei Semestern (Sommersemester 18 bis einschließlich Sommersemester 19) werden weitere Experimente für die Themengebiete E-Lehre, Wärme & Energie und Optik entwickelt, von den Studierenden durchgeführt und mit dem zuvor beschriebenen Fragebogen evaluiert. Am Ende werden die Fragebögen von etwa 40 unterschiedlichen Studierenden qualitativ im Hinblick auf die genannten Forschungsfragen ausgewertet.

6. Literatur

Behrendt, H. (2004): Kinematik – Langweilige Pflichtübung oder Chance für interessanten Physikunterricht?. In: *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik*, (2004) 83, S. 4–9.

Fösel, A. (2017): Low Cost - High Fun. Messwerterfassung mit dem Raspberry Pi. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.

Götze, B., Heinke, H., Riese, J., Stampfer, C. & Kuhlén, S. (2017): Smartphone-Experimente zu harmonischen Pendelschwingungen mit der App phyphox. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.

Pietzner, V. (2009): Computernutzung bei Naturwissenschaftslehrkräften. In: Höttecke, D. (Hrsg.): *Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung, Jahrestagung der GDCP in Schwäbisch Gmünd 2008*, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 29, Lit-Verlag, Münster, S. 185 – 187.

Wenzel, M. & Wilhelm, T. (2015): Erhebung zum Einsatz Neuer Medien bei Physik-Gymnasiallehrern. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.

Wilhelm, T. & Trefzger, T. (2010): Erhebung zum Computereinsatz bei Physik-Gymnasiallehrern. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.

Qualifizierung von Quereinsteiger*innen

– Professionelle Kompetenzen der Q-Master-Studierenden –

Julia-Josefine Milster, Volkhard Nordmeier Freie

Universität Berlin, Arnimallee 14, 14195 Berlin

julia.j.milster@fu-berlin.de, volkhard.nordmeier@fu-berlin.de

Kurzfassung

An der Qualitätsoffensive Lehrerbildung (QLB) ist die Freie Universität Berlin mit dem Projekt „K2teach - Know how to teach“ beteiligt. Das Teilprojekt „Q-Master: Qualifizierung von Quereinsteiger*innen im Master of Education“ fokussiert auf das Thema von Quer- und Seiteneinstiege für ausgewählte Mangelfächer wie z. B. Physik. Im Wintersemester 2016/17 startete dieser Modellstudiengang erstmalig. Im Wintersemester 2017/18 wurde der Q-Master ein zweites Mal angeboten. Das Projekt verfolgt das Ziel, die Quereinsteiger*innen innerhalb eines viersemestrigen Master of Education für den anschließenden Vorbereitungsdienst zu qualifizieren. Dabei soll ein adäquates Ausbildungsniveau im Vergleich zu den regulären Lehramtsstudierenden erreicht werden. Ob dies gelingt, wird in der Begleitforschung und Evaluation des Studienganges untersucht. Hierbei liegt das Augenmerk auf der Entwicklung professioneller Kompetenzen von Lehrkräften. In einer Eingangsbefragung zu Beginn des Studiums wurden bei beiden Studienkohorten folgende Konstrukte erhoben: *pädagogische Vorerfahrungen*, *Berufswahlmotive*, *Lehrer-Selbstwirksamkeitserwartung*, *Studienerfolg* und soziodemografische Daten. Studienbegleitend werden die Q-Master Studierenden mit dem Fach Physik zu *Fachwissen*, *fachdidaktisches Wissen* und *Überzeugungen zum Lehren und Lernen* befragt.

1. Ausgangslage

Das Thema Quereinstieg ins Lehramt ist aktueller denn je. Seit einigen Jahren gibt es einen hohen Einstellungsbedarf an Lehrer*innen in allen Bundesländern und allen Schulformen, der nicht durch ausgebildete Lehrkräfte gedeckt werden kann (vgl. Lamprecht, 2011, S. 3; KMK, 2011, S. 19). Um diesen Mangel auszugleichen, gibt es in nahezu allen Bundesländern die Möglichkeit sogenannter Quer- und Seiteneinstiege (vgl. Korneck, Lamprecht, Wodzinski & Schecker, 2010, S. 9ff.).

Tabelle 1 zeigt, wie sich die Neueinstellungen von Lehrer*innen im Bundesland Berlin (alle Schulformen) seit 2013 entwickelt haben. (Nicht enthalten sind die Referendar*innen im Vorbereitungsdienst.) Die Anzahl der neu eingestellten Lehrer*innen steigt im angegebenen Zeitraum kontinuierlich an. Ebenso verhält es sich mit dem Anteil der Quereinsteiger*innen. Waren im Jahr 2013 noch 10% der Neueinstellungen Quereinsteiger*innen, hat sich dieser Anteil im Jahr 2017 bereits auf 42% erhöht (GEW, 2017, S. 9).

Für das Unterrichtsfach Physik ist die hohe Anzahl von Quereinsteiger*innen im Lehrberuf ein lang bekanntes Phänomen. Seit Mitte der 1970er Jahre ist es in Deutschland gängige Praxis, Physiker*innen direkt in den Schuldienst einzustellen.

Eine bundesweite Studie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) hat gezeigt, dass durch

Quer- und Seiteneinstiege in den Jahren von 2002 bis 2008 etwa 3000 Physiklehrkräfte ohne Lehramtsstudium eingestellt wurden. Diese Lehrkräfte machten einen Anteil von 45% aller in Deutschland eingestellten Physikreferendar*innen in dieser Zeitspanne aus (vgl. Korneck, Lamprecht, Wodzinski & Schecker, 2010, S. 6). Von einer Veränderung der Situation seit 2008 ist nicht auszugehen. Die Kultusministerkonferenz (KMK) prognostiziert einen weiterhin hohen Bedarf an Physiklehrkräften. Diesem steht eine geringe Anzahl an Lehramtsstudierenden mit dem Fach Physik gegenüber, sodass die Besetzung der offenen Stellen mit ausgebildeten Lehrkräften weiter schwierig bleiben wird (vgl. ebd., S. 15; Heise, Sinzinger, Struck & Wodzinski, 2014, S. 23; KMK, 2015a, S. 25).

	Neueinstellungen insgesamt	davon Quereinsteiger*innen
2013	1560	156 (10%)
2014	2800	476 (17%)
2015	2345	469 (20%)
2016	2979	864 (29%)
2017	3004	1254 (42%)

Tabelle 1: Neueinstellungen von Lehrer*innen im Land Berlin (GEW, 2017, S. 9)

2. Forschungsstand

Trotz des hohen und langjährigen Anteils von Quereinsteiger*innen beschränkt sich die Forschung

bislang auf einige wenige Studien aus Deutschland und der Schweiz (vgl. Diehl, 2004; Engelage, 2013; Melzer, Pospiech & Gehrman, 2014; Postl, Matthäus & Schneider, 2005; Trachler, Nido & Medici, 2014; Weinmann-Lutz, 2006). Als aktuelle Studien zum Quereinstieg sind u. a. die Dissertationen von Jan Lamprecht (2011) und Lars Oettinghaus (2016) von der Goethe-Universität in Frankfurt am Main zu nennen.

Lamprecht befragte 200 zukünftige Physiklehrer*innen – davon 78 Quereinsteiger*innen – in vier Bundesländern am Anfang des Referendariats. Die Erhebung bezog sich auf *Berufswahlmotive, Überzeugungen, selbstregulative Fähigkeiten* und *Persönlichkeitsmerkmale* (vgl. Lamprecht, 2011, S. 191). Oettinghaus (2016) befragte 368 Physiklehrer*innen im Referendariat. Davon waren 146 Quereinsteiger*innen. Als Anschlussprojekt von Jan Lamprecht beinhaltet die Stichprobe von Lars Oettinghaus auch die Personen aus der Vorgängerstudie. Zu den von Lamprecht erhobenen Konstrukten kamen in der Studie von Oettinghaus (2016) noch *Fachwissen* und *Fachdidaktisches Wissen* im Fach Physik hinzu.

Die Quer- und Seiteneinstiegsprogramme vieler Bundesländer entstanden aus der Not des Lehrkräftemangels. Diese Programme werden oft durch die Annahme legitimiert, dass Quereinsteiger*innen über ein hohes Maß an Berufs- und Lebenserfahrung verfügen und somit den Mangel im pädagogischen und didaktischen Bereich kompensieren können (vgl. Melzer, Pospiech & Gehrman, 2014, S. 10). Zudem wird davon ausgegangen, dass sie „idealistischer wie auch realistischer bei ihrer Berufsentscheidung sind“ (Weinmann-Lutz, 2006, S. 13).

Die Ergebnisse der Studie von Lamprecht (2011) stehen dem entgegen. Es zeigte sich, dass 45% der Quereinsteiger*innen im Fach Physik bei der Berufswahl hauptsächlich strukturell motiviert (z. B. gute Bezahlung, sichere Berufsaussichten, Vereinbarkeit Familie und Beruf) waren und 40% „rezeptartiges Lernen“ bevorzugen (vgl. Lamprecht, 2011, S. 194f.). Oettinghaus (2016) stellte mit seiner Studie ergänzend fest, dass ein lehrramtsorientiertes Studium kognitiv orientierte Überzeugungsaspekte fördert; Lehramtsstudierende also nicht in solch einem hohen Maß rezeptartiges Lernen befürworten (vgl. Oettinghaus, 2016, S. 184).

Eine dritte und aktuelle Studie stammt von der Technischen Universität Dresden aus dem Jahr 2014. Die TU Dresden hatte zuvor ein einmaliges Qualifizierungsprogramm („QUER“) für Quereinsteiger*innen im Lehramt durchgeführt. Nach einem umfangreichen Auswahlverfahren absolvierten 39 Teilnehmer*innen diese 19-monatige Maßnahme. Der Fokus lag dabei auf dem Grundschullehramt bzw. mathematisch-naturwissenschaftlichen Fächern an weiterführenden Schulen. Die Teilnehmer*innen mussten keine Fachwissenschaften mehr studieren, diese waren als Voraussetzung in ausreichendem Maße

mitzubringen. Das QUER-Programm sah eine Qualifizierung im bildungswissenschaftlichen und (fach-)didaktischen Bereich mit anknüpfenden Praxiserfahrungen vor (vgl. Melzer, Pospiech & Gehrman, 2014, S. 57ff.). Die Schwerpunktsetzung in dieser Qualifizierungsmaßnahme erklärt auch die Auswahl der Konstrukte der durchgeführten Begleitforschung auf fächerübergreifende, berufsbezogene Facetten. In dieser Studie wurden *Lernvoraussetzungen, Berufswahlmotive, berufsbezogene Überzeugungen, allg. kognitive Fähigkeiten, allg. Leistungsmotivation, Selbstwirksamkeitserwartung, Lehrer-Selbstwirksamkeitserwartung, Persönlichkeitsmerkmale* und *pädagogisches Unterrichtswissen* erhoben (vgl. ebd., S. 131ff.). Im Bereich der Berufswahlmotive, welche auch Lamprecht (2011) und Oettinghaus (2016) untersuchten, konnte für die Teilnehmer*innen eine hohe intrinsische Motivation für die Berufswahl festgestellt werden. Im Vergleich zu den regulären Lehramtsstudierenden der TU Dresden hatten die Quereinsteiger*innen günstigere kognitive und motivationale Lernvoraussetzungen. Zusätzlich hatten die QUER-Teilnehmer*innen am Studienende einen Wissensvorsprung im Vergleich zu den regulären Lehramtsstudierenden im *Pädagogischen Unterrichtswissen* (vgl. ebd., S. 154). Die Befunde der TU Dresden weisen darauf hin, dass Qualifizierungsmaßnahmen für Quereinsteiger*innen „ein vielversprechender Weg zur Rekrutierung und Ausbildung von Lehrkräften in Mangelfächern und Mangellehrämtern [sind]“ (ebd., S. 158).

Aktuelle Zahlen vom November 2016 aus dem Land Berlin zeigen, dass von den ca. 1000 Quereinsteiger*innen (ohne Refendar*innen), welche an öffentlichen Schulen als Lehrer*innen arbeiten, rund 15% in nur einem Schulfach ausgebildet sind und sogar 20% keines der Schulfächer als Abschluss haben (Abgeordnetenhaus Berlin, 2017). „Diese fehlenden Studienanteile sind im Laufe des Referendariats nicht nachzuholen. Sie müssen vielmehr durch spezifisch auf die Situation von Quereinsteigern zugeschnittenen Qualifikationsangeboten kompensiert werden“ (Korneck et. al., 2010, S. 33).

Nach wie vor sind die Forschungsergebnisse zum Quereinstieg rar (s. o.). Es wurde bisher kaum untersucht, inwiefern Personen ohne ein reguläres Lehramtsstudium für den Lehrberuf ‚geeignet‘ sind. Die bisherigen Forschungsergebnisse zeigen Tendenzen auf, dass Quereinsteiger*innen im Referendariat in einigen Bereichen schlechtere Voraussetzungen mitbringen, diese aber durch geeignete Qualifizierungsmaßnahmen ausgeglichen werden könnten.

Eine weitere Problematik besteht darin, dass die bisherigen Quereinstiegsprogramme der Länder nicht die von der KMK festgelegten Standards zur Lehrer*innenausbildung berücksichtigen. Diese sehen Studienbestandteile zur Professionalisierung in den Bereichen Erziehungswissenschaft, Fachwissen-

schaft und Fachdidaktik in zwei Fächern und Schulpraktika vor (vgl. Korneck et al., 2010, S. 33; KMK, 2014; KMK, 2015b).

3. Projektvorstellung: „Q-Master“

Um dem Problem des Lehrer*innenmangels in Physik (sowie weiteren Mangelfächern) und fehlender Expertise von Quereinsteigenden zu begegnen, hat die Freien Universität Berlin das Projekt „Q-Master: Qualifizierung von Quereinsteiger*innen im Master of Education“ initiiert. Es ist Teil des Gesamtprojektes „K2teach – Know how to teach“¹ der Qualitätsoffensive Lehrerbildung. Der Q-Master ist ein Qualifizierungsangebot für Quereinsteiger*innen vor dem Antritt des Referendariats. Das Projekt verfolgt das Ziel, die Quereinsteiger*innen innerhalb eines viersemestrigen Master of Education KMK-konform für den anschließenden Vorbereitungsdienst zu qualifizieren. Dabei soll ein ähnliches Ausbildungsniveau wie bei regulären Lehramtsstudierenden erreicht werden².

Im Rahmen der Begleitforschung wird untersucht, ob das Ziel erreicht wird, die Quereinsteiger*innen innerhalb des Q-Masters für den anschließenden Vorbereitungsdienst zu qualifizieren.

4. Forschungsdesign

4.1 Theoretischer Hintergrund

In den Bildungswissenschaften und Fachdidaktiken hat sich in den letzten Jahren das Modell der Professionellen Kompetenzen von Baumert und Kunter (2006) etabliert, da es die verschiedenen Bereiche der Professionsforschung vereint (vgl. ebd., 2006, S. 470ff.).

Dabei werden vier Kompetenzbereiche *Überzeugungen*, *Professionswissen*, *motivationale Orientierung* und *selbstregulative Fähigkeiten* in einem nichthierarchischen, sich überlappenden Verhältnis strukturiert (vgl. ebd., S. 482). „Erst ein erfolgreiches Zusammenspiel von Professionswissen und professionellen Überzeugungen macht in dieser Konzeption also kompetente Lehrkräfte aus“ (Blömeke 2011, S. 395).

Abbildung 1 zeigt eine Adaption des Modells von Baumert und Kunter nach Riese (2009). *Fachdidaktisches Wissen* und *Fachwissen* sind dabei eindeutig (und *Überzeugungen* zu einem großen Anteil) fachspezifisch und wurden daher hervorgehoben.

Basierend auf dieser theoretischen Rahmung wurden in den letzten Jahren im MINT-Bereich einige Studien durchgeführt. Oettinghaus hat in seiner 2016 erschienen Dissertation einen Großteil der bis dahin veröffentlichten Studien zu professionellen Kompetenzen und Unterrichtsqualität im MINT-Bereich dargestellt. Hierbei zeigte sich, dass *Überzeugungen* und

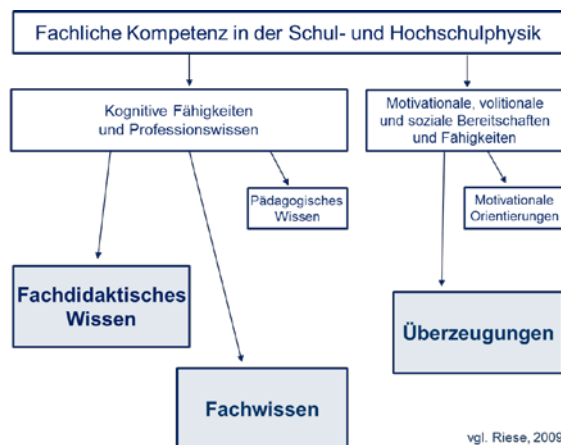


Abb. 1: Modell der Professioneller Kompetenzen nach Riese (2009)

Fachdidaktisches Wissen einen positiven Einfluss auf die Schüler*innenleistung, konstruktive Unterstützung und kognitive Aktivierung der Schüler*innen durch die Lehrkraft haben (vgl. Oettinghaus, 2016, S. 21ff.). Er selbst konnte in seiner Studie feststellen, dass *Fachwissen* und *Fachdidaktisches Wissen* miteinander korrelieren (ebd. S. 174).

Daher werden bei den Q-Master-Studierenden mit dem Fach Physik das *Fachwissen*, das *Fachdidaktische Wissen* und die *Überzeugungen* genauer untersucht.

4.2 Forschungsfrage und Vorgehen

Im Rahmen der Begleitforschung zum Q-Master werden drei zentrale Forschungsfragen bearbeitet:

1. Welche Kompetenzentwicklungen und -stände im Bereich des Fachdidaktik Physik können bei regulären Lehramtsstudierenden und Q-Master-Studierenden beobachtet werden?
2. Welche Kompetenzstände im Bereich der Fachwissenschaft Physik können bei regulären Lehramtsstudierenden und Q-Master-Studierenden beobachtet werden?
3. Wie verändern sich die Überzeugungen zum Lehren und Lernen im Fach Physik bei den regulären Lehramtsstudierenden und den Q-Master-Studierenden?

Der Modellstudiengang Q-Master wurde zunächst für zwei Durchgänge bewilligt (Beginn Wintersemester 2016/17 und 2017/18). Die Stichprobe verteilt sich daher auf zwei Kohorten. Die erste Kohorte umfasst die Studierenden, die im Wintersemester 2016/17 mit den Master of Education mit Erst- oder Zweifach Physik begonnen haben. Hier waren 44 Personen – davon 6 Personen im Q-Master – eingeschrieben. Die

¹ Das Projekt **K2teach** (<http://www.fu-berlin.de/k2teach>) wird im Rahmen der gemeinsamen „Qualitätsoffensive Lehrerbildung“ von Bund und Ländern aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert.

² Weitere Informationen zum Aufbau und Ablauf des Q-Master: www.fu-berlin.de/qmaster

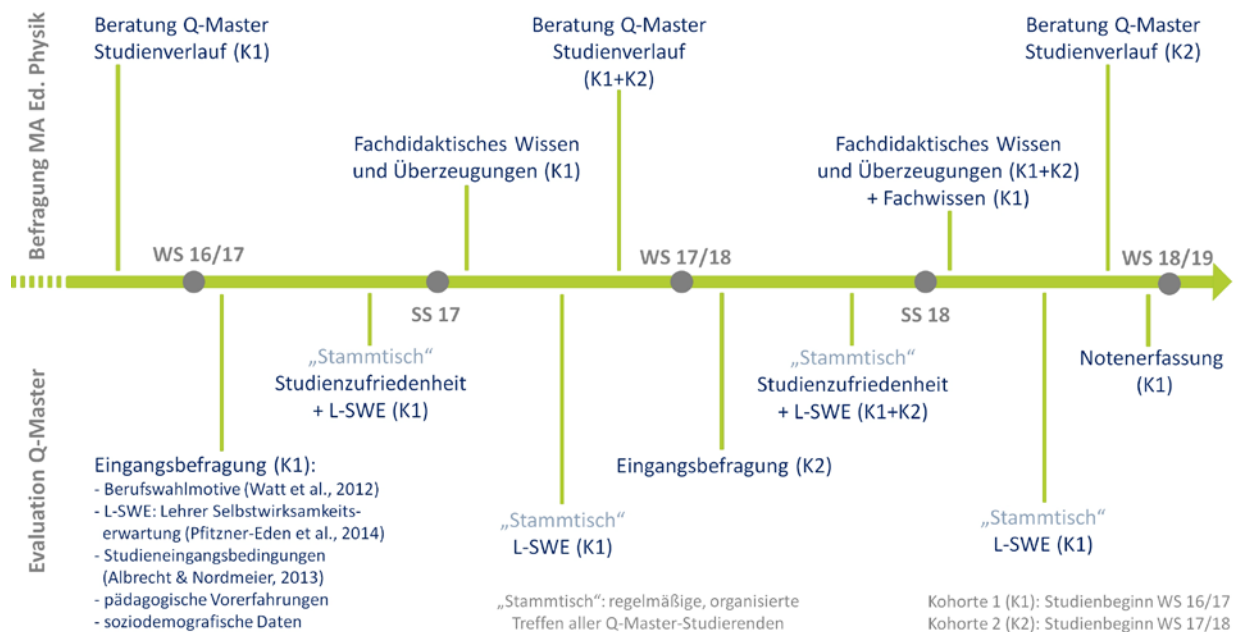


Abb. 2: Erhebungszeitpunkte der Befragungen der Q-Master-Studierenden im Fach Physik

zweite Kohorte umfasst die Studierenden, die im Wintersemester 2017/18 begonnen hatten. In diesem Semester waren es 26 Studierende mit dem Fach Physik und davon 7 Personen im Q-Master.

Bei den Erhebungen werden im Sinne der Triangulation quantitative und qualitative Methoden eingesetzt. *Fachdidaktisches Wissen* nach Riese (2009) und *Überzeugungen* nach Lamprecht (2010) werden zu Beginn des zweiten Semesters und am Ende des Studiums mit Hilfe eines Fragebogens erhoben. Durch die zwei Erhebungszeitpunkte soll erfasst werden, ob sich in diesen beiden Facetten im Laufe des Studiums eine Veränderung feststellen lässt. Durch die geringe Anzahl der Studierenden im Fach Physik sind aussagekräftige Ergebnisse erst nach der Befragung der zweiten Kohorte zu erwarten. Daher werden noch zusätzlich Einzelinterviews zu *Überzeugungen* zum Lernen und Lehren im Fach Physik geführt. Diese werden ebenfalls am Anfang des zweiten Semesters und am Ende des Studiums stattfinden und sollen die quantitativ erhobenen Daten ergänzen. Am Ende des Studiums wird mit Hilfe eines Fragebogens das *Fachwissen* nach Korneck et al. (2017) in Physik getestet. Da im Lehramtsmaster an der Freien Universität Berlin der Fokus stärker auf dem pädagogisch/didaktischem Bereich liegt, wurde auf eine zusätzliche Erhebung zum *Fachwissen* am Anfang des Masters verzichtet. Durch die wenigen fachwissenschaftlichen Anteile wird im Verlauf des Masterstudiums kein großer Anstieg erwartet. Somit soll nur der Endstand aller Studierenden erfasst werden. Außerdem wird eine Modulnotenerfassung der Studierenden am Ende des Studiums als weiteres Vergleichsmaß angestrebt. In Abbildung 2 zeigt eine grafische Darstellung der Erhebungszeitpunkte.

Zusätzlich findet eine Evaluation des Q-Masters mit den Q-Master-Studierenden aller Fächer (N=61) statt.

In einer Eingangsbefragung zu Beginn des Wintersemesters 2016/17 und 2017/18 wurden folgende Konstrukte erhoben: *pädagogische Vorerfahrungen*, *Berufswahlmotive* nach Watt et al. (2012), *Lehrer-Selbstwirksamkeitserwartung* (L-SWE) nach Pfitzner-Eden, Thiel & Horsley (2014), *Studieneingangsbedingungen* nach Albrecht & Nordmeier (2013) und soziodemografische Daten. Aus diesen Befragungen gibt es schon erste Ergebnisse, die im Folgenden vorgestellt werden.

5. Erste Ergebnisse

Die ersten Ergebnisse beziehen sich auf die Eingangsbefragungen der Q-Masterstudierenden (N=61), die im Wintersemester 2016/17 und 2017/18 das Studium begonnen hatten. Bisher liegen nur die Angaben zu den soziodemografischen Daten und den pädagogischen Vorerfahrungen vor, die im Folgenden vorgestellt werden sollen:

Von den 61 befragten Personen waren 61% weiblich. Allerdings ist hier ein starker Unterschied im Vergleich der Fächer zu verzeichnen. In MINT-Bereich sind 70% männlich und in den Sprachen 79% weiblich. Das Durchschnittsalter der Q-Master-Studierenden beträgt 35 Jahre.

75% der Befragten geben an, neben dem Studium zu arbeiten. Die durchschnittliche Arbeitszeit beträgt dabei 15 Stunden pro Woche. Diese Tatsache ist vor allem wichtig für die Frage, ob und wie das Studium für die Studierenden zu schaffen ist. Die meisten Q-Master-Studierenden haben keinen Anspruch auf staatliche finanzielle Unterstützungen wie dem BAföG. Sie müssen daher arbeiten gehen, um ihr Studium zu finanzieren. Das stellt eine zusätzliche Belastung dar, die sich eventuell negativ auf den angestrebten Studienabschluss auswirken kann. Zudem haben ca. 40% der Befragten ein oder mehrere Kinder

im Haushalt, welches ebenfalls eine Herausforderung zum Absolvieren eines Studiums darstellt.

Etwa 82% der Q-Master-Studierenden verfügen über pädagogische Vorerfahrungen. Als häufigste Tätigkeiten³ wurden hierbei Nachhilfe einzelner Personen (49%), Hochschullehre (28%) und die Organisation und Betreuung von Freizeitaktivitäten (25%) genannt. Dabei haben 72% mehrjährige (also mindestens zwei Jahre) pädagogische Vorerfahrungen.

In einer offenen Frage wurden die Studierenden außerdem gefragt, was sie sich vom Q-Master erhoffen. Der Wunsch nach Praxis fiel hier sehr gering aus, dafür wurde häufig der Erwerb von fachdidaktischem, fachlichem oder pädagogischen Wissen genannt. Der hohe Anteil der Studierenden mit Erfahrungen in pädagogischen Tätigkeitsfeldern spiegelt sich hier anscheinend wider, in dem nicht Praxis, sondern entsprechendes theoretisches Wissen gewünscht wird.

6. Ausblick

Im Sommersemester 2017 und 2018 wurden Erhebungen zu *Überzeugungen* zum Lehren und Lernen und zum Fach Physik mit Hilfe eines Fragebogens und Interviews mit Q-Master-Studierenden und regulären Lehramtsstudierenden durchgeführt. Außerdem wurde am Ende des Sommersemesters 2018 eine Befragung zum *Fachwissen* in Physik durchgeführt.

Die Schwerpunkte der bisherigen Forschung zum Thema Quereinstieg lassen sich in das Modell der Professionellen Kompetenzen einordnen oder basieren darauf. Daher sollen langfristig die Ergebnisse der Q-Master-Studierenden mit den im Abschnitt 3 vorgestellten Studien, insbesondere die Ergebnisse von Lamprecht (2011), Oettinghaus (2016) und der TU Dresden (Melzer, Pospiech & Gehrmann, 2014), verglichen werden, um die bisherigen Erkenntnisse zum Thema Quereinstieg zu erweitern und zu vertiefen.

7. Literatur

Abgeordnetenhaus Berlin (2017): Schriftliche Anfrage des Abgeordneten Joschka Langenbrinck (SPD) vom 19. Dezember 2016 (Eingang beim Abgeordnetenhaus am 16. Januar 2017 und Antwort „Lehrkräfte -Quereinsteigende in den Berliner Schulen“.

URL: <http://pardok.parlament-berlin.de/starweb/adis/citat/VT/18/SchrAnfr/S18-10261.pdf> (Stand: 05/2018)

Albrecht, A., Nordmeier, V. (2013): Interventionsstudie im Lehramtsstudium der Physik – dem Erfolg auf der Spur. Physik und Didaktik in Schule und Hochschule 1/12, S. 62-72.

Baumert, J.; Kunter, M. (2006): Stichwort: Professionelle Kompetenz von Lehrkräften. In: Zeitschrift für Erziehungswissenschaft, Heft 4/2006, S. 469-520.

Blömeke, S. (2011): Zum Verhältnis von Fachwissen und unterrichtsbezogenen Überzeugungen

bei Lehrkräften im internationalen Vergleich. In: Stationen Empirischer Bildungsforschung. Hrsg.: Zlatkin-Troitschanskaia, O., Verlag für Sozialwissenschaften/Springer Fachmedien, Wiesbaden.

Diehl, T. (2004): Quereinsteiger als Lehrende an beruflichen Schulen. In: Beek, H. (Hrsg.), Personalentwicklung im Berufseinstieg. Frankfurt/Main, S. 183–198

Engelage, S. (2013): Die Bedeutung von Lebens- und Berufserfahrung für den Lehrberuf – Quereinsteigende und Regelstudierende im Vergleich. In: Lehrerbildung auf dem Prüfstand, Heft 6 (1), S. 50-69.

GEW Berlin (2017): Stellungnahme der GEW Berlin über Quereinsteigerinnen und Quereinsteiger in pädagogischen Berufe in Schule und Kita – Erfahrungen und Schlussfolgerungen für die weitere Gestaltung der Rahmenbedingungen. URL: <https://www.parlament-berlin.de/ados/18/BildJugFam/vorgang/bjf18-0098-v-st-GEW%20Berlin.pdf> (Stand 5/2018)

Heise, H.; Sinzinger, M.; Struck, Y.; Wodzinski, R. (2014): DPG-Studie zur Unterrichtsversorgung im Fach Physik und zum Wahlverhalten der Schülerinnen und Schüler im Hinblick auf das Fach Physik. Deutsche Physikalische Gesellschaft.

Korneck, F.; Lamprecht, J.; Wodzinski, R.; Schecker, H. (2010): Quereinsteiger in das Lehramt Physik - Lage und Perspektiven der Physiklehrrausbildung in Deutschland. Deutsche Physikalische Gesellschaft.

Korneck, F.; Krüger, M.; Szogs, M. (2017): Professionswissen, Lehrerüberzeugungen und Unterrichtsqualität angehegender Physiklehrkräfte unterschiedlicher Schulformen. In: Fischler, H. und Sumfleth, E. (Hrsg.), Professionelle Kompetenz von Lehrkräften der Chemie und Physik. Logos Verlag (Studien zum Physik- und Chemielernen Band 200), Berlin.

Lamprecht, J. (2011): Ausbildungswege und Komponenten professioneller Handlungskompetenz. Vergleich von Quereinsteigern mit Lehramtsabsolventen für Gymnasium im Fach Physik. Logos Verlag (Studien zum Physik- und Chemielernen Band 125), Berlin.

Melzer, W.; Pospiech, G.; Gehrmann, A. (2014): Abschlussbericht Quer – Qualifikationsprogramm für Akademiker zum Einstieg in den Lehrberuf.

URL: https://tu-dresden.de/zlsb/ressourcen/dateien/weiterbildung/Expertise_QUER.pdf?lang=de (Stand: 5/2018)

Oettinghaus, L. (2016): Lehrerüberzeugungen und physikbezogenes Professionswissen. Vergleich von Absolventinnen und Absolventen verschiedener Ausbildungswege im Physikreferendariat.

³ Es waren Mehrfachnennungen möglich.

- Logos Verlag (Studien zum Physik- und Chemielernen Band 207), Berlin.
- Pfitzner-Eden, F.; Thiel, F.; Horsley, J. (2014): An adapted measure of teacher self-efficacy for pre-service teachers: Exploring its validity across two countries. In: Zeitschrift für Pädagogische Psychologie, Heft 28 (3), Hans Huber Verlag, S. 83-92.
- Postl, D.; Matthäus, S.; Schneider, M. (2005): Direkteinsteiger als Lehrer an beruflichen Schulen – Notmaßnahme oder Qualifizierungschance? In: Lernen & Lehren, H. 79, 20. Jg., S. 108–117
- Riese, J. (2009): Professionelles Wissen und professionelle Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften. Logos Verlag (Studien zum Physik- und Chemielernen Band 97), Berlin.
- Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (2011): Lehrereinstellungsbedarf und Lehrereinstellungsangebot in der Bundesrepublik Deutschland Modellrechnung 2010-2020. URL: http://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/Statistik/Dokumentationen/Dok_194_LEB_LEA.pdf (Stand: 5/2018)
- Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (2014): Standards für die Lehrerbildung – Bildungswissenschaften. URL: http://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Standards-Lehrerbildung.pdf (Stand: 5/2018)
- Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (2015a): Lehrereinstellungsbedarf und -angebot in der Bundesrepublik Deutschland 2014-2025 - Zusammenfassende Modellrechnung. URL: https://www.kmk.org/fileadmin/pdf/Statistik/Dokumentationen/Dok_208_LEB_LEA_2015.pdf (Stand: 05/2018)
- Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (2015b): Ländergemeinsame inhaltliche Anforderungen für die Fachwissenschaften und Fachdidaktiken in der Lehrerbildung. URL: http://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2008/2008_10_16-Fachprofile-Lehrerbildung.pdf (Stand: 5/2018)
- Trachsler, E.; Nido, M.; Medici, E. M. (2014): Evaluation der Ausbildung der Quereinsteigerinnen und Quereinsteiger an der Pädagogischen Hochschule Zürich - Band 1: Schlussbericht. URL: https://bi.zh.ch/internet/bildungsdirektion/de/themen/zahlen-fakten/veroeffentlichungen/jcr_content/contentPar/publication_14/publicationitems/titel_wird_aus_dam_e_0/download.spooler.download.1410849592769.pdf/Evaluation+Quest-Ausbildung_Schlussbericht.pdf (Stand 05/2018)
- Watt, H. M. G.; Richardson, P. W.; Klusmann, U.; Kunter, M.; Beyer, B.; Trautwein, U. und Baumert, J. (2012): Motivations for choosing teaching as a career: An international comparison using the FIT-Choice scale. In: Teaching and Teacher Education, H. 28, S. 791-805.
- Weinmann-Lutz, B. (2006): Berufswechsel und Studium bei Erwachsenen am Beispiel angehender Lehrerinnen und Lehrer. Waxmann Verlag, Münster.

Schülerlabore in Deutschland: Ein ideologiekritischer Blick

Ein ideologiekritischer Blick auf die Schülerlaborlandschaft in Deutschland und Einordnung der Kölner Schülerlabors

Andreas Schulz*⁺, Stefan Brackertz*, Markus van de Sand*

*Universität zu Köln, Institut für Physik und ihre Didaktik, ⁺Universität Bonn, Argelander-Institut
Andreas.Schulz@uni-koeln.de, brackertz@ph1.uni-koeln.de, markus.vandesand@uni-koeln.de

Kurzfassung

Gemäß Haupt et al. [6] ist das primäre Ziel von Schülerlaboren „bei Schüler/innen das Interesse an und das Verständnis für Natur- und Ingenieurwissenschaften“ zu wecken bzw. zu fördern und „im Hinblick darauf motivationale und möglichst auch kognitive Effekte [zu] erzielen.“ Trotz dieser Gemeinsamkeit gibt es Unterschiede, welche „Effekte“ intendiert sind, allein schon weil manche Schülerlabore von Umweltschutzinitiativen, andere von Chemie-Konzernen und wieder andere von Hochschulen betrieben werden.

Nach einem ideologiekritischen Blick auf die deutsche Schülerlabor-Landschaft wird das Kölner Schülerlabor „Unser Raumschiff Erde“ eingeordnet:

Es ist in die Lehrer*innenausbildung eingebettet, ein Ort fachdidaktischer Forschung und bietet ganzen Klassen die Möglichkeit, sich mit außercurricularen Themen zu beschäftigen, die aber an den Schulunterricht anschlussfähig sind. Ziel ist es, einen Beitrag zu kritischer Mündigkeit und Neugierde zu leisten sowie Grundlagen dafür zu legen, dass dies auch jenseits des Schülerlabors in der Breite gelingt.

Zunehmend werden dabei Fragen inklusiver Naturwissenschaftsdidaktik in den Blick genommen, auch im Hinblick auf die Inklusivitätsschule (IUS) Köln.

According to Haupt et al. [6] the primary aim of Schoollabs is to arouse or rather promote „interest of students for and understanding of natural and engineering sciences“ and to „achieve motivational and cognitive effects referring to this.“ But there are important differences which „effects“ are intended, if only for the reason that some Schoollabs are driven by environmental initiatives, some by chemical companies and others by universities.

Following an ideologically critical view on the German landscape of Schoollabs the Cologne Schoollab „Our Spacecraft Earth“ in its didactical rationality is classified within this landscape:

It is embedded in the teachers education, place for subject-related didactical research and offers the opportunity for entire classes to deal with subjects beyond the curricula but which can easily be connected to the curricula. It aims at contributing to critical judgment and curiosity and is intended to establish a basis to propagate this also beyond the Schoollab.

Issues of inclusive science-didactics get an increasing focus, especially in view of the Inclusive University School (IUS) of Cologne.

1. Zur Schülerlaborlandschaft in Deutschland

„Seit den 1990er Jahren [haben sich] Schülerlabore als eine neue Form außerschulischer Lernorte im deutschen Bildungssystem etabliert“ [1], wobei „es in anderen Ländern nichts Vergleichbares gibt.“ [2] Bereits 2006 lag die Zahl der Schülerlabore im MINT-Bereich in Deutschland bei über 200 [3], inzwischen verzeichnet die vom „LernortLabor – Bundesverband der Schülerlabore e.V.“ [4] betriebene Datenbank „Schülerlabor-Atlas“ [5] mehr als 400 „aktive“¹ Labore. Gemäß Haupt et al. [6] ist das primäre Ziel all dieser Schülerlabore, „bei Schüler/in-

nen das Interesse an und das Verständnis für Natur- und Ingenieurwissenschaften“ zu wecken bzw. zu fördern und „im Hinblick darauf motivationale und möglichst auch kognitive Effekte [zu] erzielen.“ In der Tat würde dies wohl niemand abstreiten, dennoch gibt es offensichtliche Unterschiede, welche „motiavtionale[n] und kognitive[n] Effekte“ konkret intendiert sind und wie diese verfolgt werden.

So wird beispielsweise von einigen Kolleg*innen Nachhaltigkeit mit Bezug auf die „Agenda 21“ der UNCED [7] „als besondere Bildungsaufgabe betrachtet“ [8], denn sie „ermöglicht es dem Individuum, aktiv an der Analyse und Bewertung von nicht

¹ Mindestens 20 Betriebstage im Jahr gemäß [6]

nachhaltigen Entwicklungsprozessen teilzuhaben, sich an Kriterien der Nachhaltigkeit im eigenen Leben zu orientieren und nachhaltige Entwicklungsprozesse gemeinsam mit anderen lokal wie global in Gang zu setzen.“² Gleichzeitig werden zahlreiche Schülerlabore von Unternehmen, Stiftungen usw. unterstützt oder sogar betrieben, denen vorgeworfen wird, mit ihrem Engagement im Bildungsbereich eben diese Ziele zu untergraben. So mussten sich Currenta und die BAYER Science & Education Foundation, die wie die BayLabs zum Bayer-Konzern gehören, im Rahmen der öffentlichen Debatte um die Verteilung sog. „Wimmelbücher“ in Kindergärten u.a. dem Vorwurf der Deutschen Umwelthilfe stellen, sie würden mit Unterrichtsmaterialien, Schulwettbewerben und Lehrerfortbildungen „immer wieder [versuchen], Einfluss auf Schüler zu nehmen, um so die nächste Generation reif für Genfood zu machen“³, was zumindest ein Verstoß gegen die Grundsätze des Beutelsbacher Konsens⁴ wäre. Eine umfangreiche Aufarbeitung solcher Vorwürfe und Verstrickungen liefert der 15. Privatisierungsreport im Auftrag von GEW und Max-Träger-Stiftung in Bezug auf Unterrichtsmaterialien [13]. In Bezug auf Schülerlabore ist den Autoren keine vergleichbare Untersuchung bekannt, allerdings ist auffällig, dass die im Privatisierungsreport benannten Akteure zu einem Großteil auch in der Schülerlabor-Szene aktiv sind.

Angesichts dessen stellt es eine Schwierigkeit dar, dass die in der naturwissenschaftlichen fachdidaktischen Forschung derzeit dominante Lehr-Lernforschung und Kompetenzorientierung⁵ die Auswahl der Lernziele und -inhalte systematisch ausklammert und sich in der Regel lediglich allgemeine Aussagen finden wie „Schülerlabore streben Nachwuchsförderung für MINT-Berufe und MINT-Studiengänge an und übernehmen insofern eine gesellschaftlich/volkswirtschaftliche Aufgabe.“ [6] Zudem eröffne „die Arbeit im Schülerlabor (...) Lehramtsstudierenden eine gute Möglichkeit, ihre Kompetenzen in einem geschützten Raum zu schulen“ [16] und diene so einer höheren Praxisnähe des Studiums und einer Vorbeugung des sog. Praxischocks.⁶

Das Memorandum „Bildung als Technologiepolitik“ [3] der „Sylter Runde“⁷ von 2006 erläutert genauer,

² [9] zitiert nach [8]

³ Stellungnahme mit Pressespiegel der CBG: [10]

⁴ Bernhard Sutor beschreibt die Grundsätze des Beutelsbacher Konsens⁴ in seiner lesenswerten Einordnung als „Überwältigungsverbot (keine Indoktrination); Beachtung kontroverser Positionen in Wissenschaft und Politik im Unterricht; Befähigung der Schüler, in politischen Situationen ihre eigenen Interessen zu analysieren“ [11]. Der Beutelsbacher Konsens im Wortlaut: [12]

⁵ Für eine Einführung und einen Überblick siehe [14]. Für eine Streitschrift, die die Kompetenzorientierung bildungspolitisch einordnet, siehe [15].

⁶ Zu Praxisnähe und Praxischock vergleiche z.B. [17] bzw. [18]

⁷ Die Sylter Runde versteht sich als „Think-Tank-Initiative (...) von Prof. Dr. Dr. h.c. Norbert Szyperski“ mit der „Mission“, „in

wie sie diese „gesellschaftlich/volkswirtschaftliche Aufgabe“ definiert: „eine paradigmatische Korrektur von einem stark humanistisch erfüllten Verständnis der Wissenschaften hin zur naturwissenschaftlich-technisch geprägten Wissensgesellschaft“ für die „Schaffung eines günstigen Innovationsklimas und Anpassung der Strukturen des Bildungssystems an die Herausforderungen (...) dauerhaft wettbewerbsfähiger Technologiestandorte“. Dazu bedürfe es „klarer Bekenntnisse zur Begabten- und Talentförderung (...) analog zur Entfaltung in musischen und sportlichen Disziplinen“. „Die tragende Einsicht, dass Spitze Breite braucht, setzt voraus, außerschulische Angebote auch für eine breite Basis des engagierten und talentierten Nachwuchses in vielfältiger Weise zugänglich zu machen.“ Als Maßnahme wurde 2006 vorgeschlagen, „Plattformen [zu gestalten], die der Bündelung und damit der verbesserten Wahrnehmung der Initiativen dienen.“ Dies wurde mit Gründung von „LernortLabor – Bundesverband der Schülerlabore e.V.“, dessen Geschäftsführer Olaf Haupt Mitunterzeichner des Memorandums der Sylter Runde ist, 2010 realisiert. Da die Mehrheit der Schülerlabore Angebote für die „breite Basis des engagierten und talentierten Nachwuchses“ machen⁸, veranstaltete die IHK 2013 in Kooperation mit LernortLabor und der „Standortinitiative ‚Deutschland – Land der Ideen‘“ auf Anregung der Stiftung Jugend forscht e.V. eine Tagung zum Thema „Schülerforschungszentren“ als Talentfördererschmieden. Die Ergebnisse sind als Leitfaden zur Gründung von in public-private-partnership betriebenen Schülerforschungszentren [2] publiziert.

2. Verortung des Kölner Schülerlabors

Das Konzept des 2010 gegründeten Schülerlabors „Unser Raumschiff Erde“ an der Universität zu Köln verfolgt eine andere Ausrichtung⁹: Weder wird ein Paradigmenwechsel weg „von einem stark humanistisch erfüllten Verständnis der Wissenschaften“ angestrebt, noch die „Schaffung eines günstigen Innovationsklimas und Anpassung der Strukturen des Bildungssystems an die Herausforderungen (...) dauerhaft wettbewerbsfähiger Technologiestandorte“. Vielmehr geht es darum, mit Hilfe der Naturwissenschaften einen Beitrag zu kritischer Mündigkeit, Neugierde und Allgemeinbildung zu leisten und in Lehre und Forschung Grundlagen dafür zu legen, dass dies auch jenseits des Schülerlabors systema-

speziell für jeweils einen Themenblock zusammengestellten Gesprächskreisen (...) mit ‚zuständigen‘ und attraktiven Experten thematische Zusammenhänge [zu analysieren] und Lösungsansätze [zu erörtern].“ [19], [20]

⁸ 2013 hatten sich laut der Stiftung Jugend forscht e. V. nur „rund 20“ Schülerlabore der „Begabten- und Talentförderung“ verschrieben, vergleiche [2], Seite 9

⁹ Vermutlich gibt es aber eine ganze Reihe von Laboren, die eine andere Ausrichtung verfolgen, dies legen zumindest in Schülerlaboren entstandene Abschlussarbeiten zu einzelnen Versuchsreihen, die sich im Internet finden lassen nahe. Es gibt aber nach Kenntnis der Autoren bislang so gut wie keine Publikationen über andere Schülerlabor-Konzepte.

tisch in der Breite gelingt. Dementsprechend werden im Kölner Schülerlabor Inhalt und Methode nicht getrennt betrachtet, sondern Lernziele und -inhalte unter allen Beteiligten systematisch zur Diskussion gestellt und vor diesem Hintergrund die je passenden Methoden gewählt bzw. entwickelt. Es befasst sich in der Tradierung Wagenscheins (vergleiche etwa [21]) und der kritisch-konstruktiven Didaktik Klafkis (Hauptwerk dazu: [22]) mit epochaltypischen Schlüsselproblemen wie „Klima und Klimawandel“ oder „Wasserreinigung“. Dennoch werden die Erkenntnisse der Lehr-Lern-Forschung nicht ignoriert und es finden sich zahlreiche Ideen, die auch in anderen Konzepten vorkommen.

3. Konzept des Kölner Schülerlabors

Unter Berücksichtigung dieser Perspektiven wurde das Schülerlabor der Universität zu Köln entwickelt, speziell der Teil für die Sekundarstufe I, mit dem sich diese Artikel im Folgenden befasst. (Das gesamte Projekt spricht SchülerInnen der Sekundarstufe I und II je altersspezifisch an.) Die verschiedenen Teilprojekte sind im Supplementary Material ausführlich beschrieben, soweit sie nicht schon anderswo publiziert sind.

Eckpunkte des Konzeptes des Teils für die Sekundarstufe I sind:

- Fächerübergreifende Arbeit an epochaltypischen Schlüsselproblemen
- Einheit von Lehre und Forschung, indem Schüler*innen, Lehrer*innen, Studierende und Dozent*innen gemeinsam am gleichen Thema lernen. Dafür ist u.a. die Mitarbeit der Studierenden systematisch in den Studiengang integriert und es findet intensiv fachdidaktische Forschung im Schülerlabor statt.
- Arbeit mit ganzen Klassen / Kursen aller Schulformen der Sekundarstufe I, insbesondere auch mit Klassen von inklusiv arbeitenden Schulen
- Systematische Anbindung der Besuche im Schülerlabor an den Unterricht, um nachhaltiges Lernen zu fördern.

3.1. Ein Thema, alle lernen

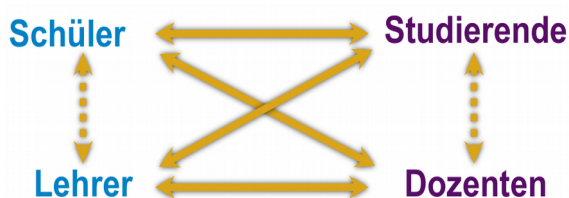


Abb.1: Einheit von Lehre und Forschung durch gemeinsame Arbeit am gleichen Gegenstand

Das Schülerlabor versteht sich nicht als reines Angebot der Universität an Schüler*innen, sondern als Lernort, an dem Schüler*innen, Studierende, Lehrer*innen und Dozent*innen sich gemeinsam, aber aus verschiedenen Perspektiven und unter verschiedenen

Fragestellungen ein gesellschaftlich relevantes Thema erarbeiten.

Im Schülerlabor wird auf allen Ebenen eine Einheit von Lehre und Forschung angestrebt. Dabei gibt es für die verschiedenen Beteiligtegruppen je spezifische Entwicklungsziele:

3.1.1. Hauptziele für Schüler*Innen

- Schüler*innen begreifen Zusammenhänge in einem gesellschaftlich relevanten Kontext fächerübergreifend.
- Schüler*innen lernen mit hoher Relevanz für die eigene Verortung, Emanzipation und gesellschaftliche Teilhabe jenseits von, aber mit Bezug zu schulischen Curricula.¹⁰
- Schüler*innen lernen das Erzeugen von und Denken in Modellen sowie eigenständiges, handlungsorientiertes Arbeiten.
- Schüler*innen erlernen verantwortungsbewusstes Handeln auf der Grundlage rationaler Bewertung naturwissenschaftlicher Prozesse und Zusammenhänge. Verantwortungsbewusstes Handeln wird dabei nicht nur als Handeln des Individuums (bewusster Konsum etc.) sondern auch als gesellschaftlich wirksames Eingreifen verstanden und erfordert deshalb in besonderem Maße Kooperation und argumentative Kommunikation.
- Schüler*innen lernen Wissenschaft als spannenden (und unfertigen) Prozess kennen, an dem sie selbst teilnehmen, indem sie kumulativ in Kontexten und unter Integration aller naturwissenschaftlicher Fächer arbeiten.

Die Schüler*innen werden in heterogenen Lerngruppen unter Anwendung kooperativer Lernformen vor allem durch handlungsorientierte Aufgabenstellungen positiv motiviert. Im Schülerlabor spielen daher neben den kognitiven vor allem auch affektive Lernziele eine herausragende Rolle. In einem Wechselspiel von Experiment und Theorie soll kumulatives und verstehendes Lernen in Kontexten erreicht werden. Die Schüler*innen sollen dadurch positive Impulse für eine weitere Beschäftigung mit Naturwissenschaften erhalten. Dies ist gerade in den Jahrgangsstufen der Sekundarstufe I besonders notwendig, da hier wichtige Entscheidungen für ihr weiteres Lernen von den Schüler*innen getroffen werden.

Die Schwerpunktsetzung auf das Experimentieren scheint besonders wichtig, bleibt doch im normalen Schulunterricht oft kaum Gelegenheit zum Experimentieren seitens aller Schüler*innen. Eine besondere Herausforderung besteht darin, den Zusammenhang zwischen Experiment und Theorieentwicklung tatsächlich herzustellen. Deshalb dienen die Experimente nicht lediglich als Aufhänger für die Auseinandersetzung mit einem Thema oder zur Bestimmung irgendwelcher Werte, sondern werden vor al-

¹⁰ Vergleiche die Tabelle zur Übersetzung zwischen „Auf globalen Rechten basierende[n] Lerninhalte[n] für alle“ und „Traditionelle[n] Lerninhalte[n]“ auf Seite 199 in [23].

lem zur Beantwortung von Fragen herangezogen, die in der Theorieentwicklung in Kleingruppen aufkommen.

Eine weiteres Problem des naturwissenschaftlichen Unterrichtes gerade in den unteren Klassen der Sekundarstufe I ist erfahrungsgemäß, dass die Erarbeitung der qualitativen Zusammenhänge zu kurz kommt. Die qualitative Ebene wird umgekehrt in der Schülerlaborarbeit der Sekundarstufe I besonders betont.

Näheres zu diesen Überlegungen findet sich in [24].

3.1.2. Hauptziele für die Lehrkräfte an den Schulen

- Dialog mit Mitgliedern der Universität.
- Weiterbildung in wichtigen und fächerübergreifend zu behandelnden Themenfeld.

3.1.3. Hauptziele für die Hochschulmitglieder

- Praxisbezug der Lehramtsstudierenden in der Lehramtsausbildung.
- Interdisziplinäre Vernetzung und Zusammenarbeit der Studierenden.
- Fachdidaktische Forschung unter Vernetzung von Dozent*innen, Studierenden und Lehrkräften an den Schulen.

3.2. Nachhaltiges Lernen

Ein wesentlicher Aspekt des Laborbetriebs ist die Gewährleistung von Nachhaltigkeit bei den Lernprozessen. Einen guten Überblick zu nachhaltigem Lernen in Schülerlaboren geben Priemer & Lewalter [25]. Unter anderem Euler [26] zeigt in diesem Kontext, dass der Besuch eines Schülerlabors häufig nur Ausflugscharakter hat und ohne besondere Maßnahmen keine langfristige Veränderung der Einstellung zu den Naturwissenschaften zu erwarten ist. Ferner sollen Inhalte und naturwissenschaftliche Zusammenhänge vermehrt Anschluss an den Unterricht finden. Wesentliches Ziel des Schülerlabors ist daher eine dreistufige Arbeitsweise:

- Zunächst erfolgt nach den Möglichkeiten der Schulen eine Vorbereitung auf den Laborbesuch mit Hilfe an der Universität entwickelter Medien, die im Rahmen von Abschlussarbeiten von Studierenden entwickelt wurden und werden.
- Sodann erfolgt der Laborbesuch, bei dem die Betreuung ausschließlich in der Hand von Studierenden liegt. Dabei werden neben Experimenten auch kurze Video-Clips und schriftliches Material in Form von Arbeits- und Info-Blättern verwendet, mit denen die Schüler*innen je nach Thema möglichst selbstständig (unter Zugrundelegung der „Vollständigen Lernhandlung“) arbeiten können.¹¹

¹¹ Das Konzept der „Vollständigen Lernhandlung“ wurde in der Berufsschuldidaktik auf Grundlage der Erkenntnisse der kritischen Arbeitspsychologie in den 1970er Jahren entwickelt. Eine Darstellung findet sich z.B. in [27], Kapitel „Vollständige vs. unvollständige Tätigkeitsformen“. Eine gute (auch historische) Ein-

- Zuletzt erfolgt die Nachbereitung in den Schulen durch die Studierenden zusammen mit den Lehrkräften. Dabei werden die in der Vorbereitung und im Labor benutzten Medien aufgegriffen und nach Möglichkeit ein Zusammenhang zur vorhergehenden bzw. folgenden Unterrichtsreihe hergestellt.

Um die Herstellung des Zusammenhanges des Schülerlaborbesuches mit dem normalen Schulunterricht zu ermöglichen, werden in der Regel Themen behandelt, die zwar nicht im Lehrplan vorkommen, aber Anschluss an die Themen des Lehrplans ermöglichen. Aufgabe der Studierenden ist es u.a., in Kooperation mit den Lehrer*innen diese Bezüge herauszuarbeiten. Dies und die didaktische Reduktion der im Schülerlabor behandelten Themen sind in der Regel auch für die Lehrer*innen neu.

3.3. Einbettung in die Lehramtsausbildung

Die Mitarbeit im Schülerlabor ist für Lehramtsstudierende mit Fach Physik (alle Schulformen) mittlerweile fest ins Studium integriert. Für die Studierenden wird dadurch die praktische Ausbildung in ihrem Studium erweitert, gleichzeitig ist eine hervorragende Betreuungsrelation gewährleistet; bei vielen Themen findet die Betreuung der Schüler*innen in Kleingruppen von etwa 4 Schüler*innen und je einer Studentin oder einem Studenten an Laborstationen statt. Dabei treten insbesondere Disziplinprobleme, wie sie in großen Klassen häufiger anzutreffen (und für „Anfänger*innen“ schwierig zu bewältigen) sind, kaum oder gar nicht auf. Bei der Arbeit mit den Schüler*innen haben die Studierenden Gelegenheit, eigene didaktische Methoden zu entwickeln, Reduktionen zu erproben und diese zu reflektieren, wobei das direkte Feedback der Schüler*innen hilfreich ist.

In einem begleitenden Seminar werden die betreuenden Studierenden einerseits fachlich und fachdidaktisch vorbereitet; andererseits werden mit allen Beteiligten die Erfahrungen diskutiert und die Arbeit im Schülerlabor weiterentwickelt. Darüber hinaus werden fächerübergreifend Unterrichtsreihen, didaktische Materialien und Experimente aus anderen fachdidaktischen Veranstaltungen, Abschlussarbeiten, Promotionen und sonstigen Projekten integriert. Durch die entwickelten Materialien und Versuchsreihen wird auch eine Fortbildung für Lehrkräfte erreicht. Dabei hat sich im Rahmen der assoziierten Lehrveranstaltungen in der letzten Zeit vor allem in der Physik eine zunehmende Verschränkung von Fachwissenschaft und Fachdidaktik entwickelt und bewährt. Die institutionelle Struktur an der Universität zu Köln bietet dafür besonders gute Voraussetzungen, weil im Rahmen der Eingliederung der Päd-

ordnung und Abgrenzung gegenüber dem „Entdeckenden Lernen“ findet sich in den ersten beiden Abschnitten von [28].

Die „Vollständige Lernhandlung“ ermöglicht in besonderer Weise die Behandlung „Epochaltypischer Schlüsselprobleme“ (vergleiche [22]) durch selbständiges (experimentelles) Handeln in Einheit mit der Konstruktion triftiger und zugleich „viabler“ Theorien naturwissenschaftlicher Zusammenhänge (vergleiche [29])

agogischen Hochschulen in die Universitäten in NRW 1980 die Institutsstruktur erhalten blieb und es je ein eigenständiges Institut für Physik und ihre Didaktik, Biologie und ihre Didaktik usw. innerhalb einer selbständigen Fachgruppe „Didaktik der Mathematik und der Naturwissenschaften“ gibt, die in der Tradierung der ehemaligen Pädagogischen Hochschule sowohl fachwissenschaftliche als auch fachdidaktische Lehre betreiben und an denen zahlreiche Dozent*innen nicht nur fachdidaktisch, sondern auch fachwissenschaftlich forschen.

3.4. Fachdidaktische Forschung

Das Schülerlabor als didaktischer Experimentier- und Unterrichtsraum vor Ort bietet die Möglichkeit, im Rahmen fachdidaktischer Forschung Unterrichtsgeschehen, Umgang der Studierenden mit Methodik und Inhalten und das Verhalten der Schüler*innen zu beobachten und wissenschaftlich zu untersuchen. Dabei werden in der Regel übergeordnete Fragestellungen verfolgt wie z.B.: Warum wird Naturwissenschaft (und besonders die Physik) meist abgelehnt oder selten geliebt? Wieso gelingt die Verbindung von Experiment und Theorie im naturwissenschaftlichen Unterricht oft nur schlecht? Kann man „Oberstufenthemen“ wirklich erst in der Oberstufe erarbeiten oder gelingt dies bei geeigneter didaktischer Reduktion auch schon früher? Wie kann Heterogenität beim Lernen von Naturwissenschaften produktiv gemacht werden? Welche naturwissenschaftlichen Lerninhalte können zum Gelingen des gesellschaftlichen Projektes Inklusion beitragen? Wie kann – auch angesichts der Ergebnisse von z.B. Kirschner et al. [30] – ein möglichst hoher Grad an Eigenkonstruktion (vergleiche [29]) beim naturwissenschaftlichen Lernen erreicht werden?

Im Rahmen der Arbeit im Schülerlabor sind zu vielen dieser Themen bereits Thesen entwickelt und auf Konferenzen präsentiert worden. Mehrere Publikationen sind erschienen¹² bzw. in Vorbereitung, zu anderen Themen existieren Hypothesen, die weiterer Erforschung bedürfen. Dabei sind bereits zahlreiche Bachelor-, Master- und Staatsarbeiten im Bereich der Physikdidaktik und eine Dissertation entstanden. Darüber hinaus erstellen die Studierenden am Ende ihrer Betreuungsarbeit ein Portfolio, in dem sie ihre Tätigkeit und deren Wirkung auf die Schüler*innen kritisch reflektieren. Auch dies ist eine wertvolle Quelle zur Weiterentwicklung des Labors. Ständige Ziele bei der Weiterentwicklung der Lernmaterialien und des Laborbetriebs insgesamt sind Partizipation und Verantwortung **aller** am Lernprozess Beteiligter, kontextorientierte Lernziele, Abkehr vom „Lernen im Gleichschritt“, neue Rolle(n) der Lehrenden.

In den Forschungsprojekten wird eine enge Verknüpfung von Theorie und Praxis angestrebt sowie ein Brückenschlag zwischen Fachwissenschaften, Erziehungswissenschaften und schulischer Praxis. Deshalb ist das Schülerlabor über das Lehramtsstu-

dium eng mit dem Zentrum für Lehrer*innenbildung und seiner Graduiertenschule verknüpft. Außerdem haben sich diverse Schulkoperationen ergeben, die künftig auch über das Schülerlabor hinaus weitergehende gemeinsame Projekte ermöglichen und eine gute Brücke zu den Forschungsprojekten der Lehramtskandidat*innen in den Praxisphasen des Studiums (v.a. Praxissemester im Masterstudium) schlagen.

3.4.1. Evaluation des Schülerlaborbetriebs

Die Arbeit des Schülerlabors wurde mit Hilfe von Fragebögen für Schüler*innen und die betreuenden Studierenden evaluiert (dies wird getrennt publiziert). Dabei wurden die Erwartungen in das Konzept bestätigt. Dies betrifft insbesondere die im Übersichtsartikel von Guderian und Priemer zusammen getragenen Ergebnisse [31] und die Ergebnisse von Pawek [1] zur Haltung und Interesse der Schüler*innen zu Naturwissenschaften. Auch die große Bedeutung der Vor- und Nachbereitung für die Langfristigkeit dieser Effekte konnte beobachtet werden. Darüber hinaus wurde die Erwartung erfüllt, dass die Mitarbeit der Studierenden im Schülerlabor einen erheblichen Anstoß zur Reflexion ihrer eigenen pädagogischen Praxis darstellt: Soweit vergleichbar entsprechen die Evaluationsergebnisse den Ergebnissen der offenen Befragung der Studierenden durch Völker und Trefzger [32], die nicht-systematischen Beobachtungen der Dozent*innen entsprechen weitgehend den Ergebnissen von Steffensky und Parchmann [33] mit dem Unterschied, dass sich die beobachteten Effekte nicht erst nach 6-7 betreuten Gruppen einstellen.

3.4.2. Hypothesen aus dem Schülerlaboralltag

Im Rahmen des Schülerlaboralltags sind über die erwarteten und in Übereinstimmung mit den Erfahrungen aus anderen Schülerlaboren hinaus evaluierten Effekten eine Reihe weiterer Beobachtungen gemacht worden.

Derzeit besteht ein wichtiger Teil der Forschung im Schülerlabor darin, die Gründe dieser Effekte und mögliche Konsequenzen daraus genauer zu erforschen.

- Auch Studierende, die die Mitarbeit im Schülerlabor zu Beginn nur als Schikane, möglichst zeiteffizient abzuarbeitende Pflicht ansahen, haben Spaß an ihrer Mitarbeit gefunden und sich weit über die Pflicht eingebracht.
- Immer wieder wird von Lehrer*innen aller Schulformen betont, dass sie erstaunt sind, dass ihre Schüler*innen bei Themen mitziehen, die weit über dem aus dem Schulunterricht gewohnten Niveau lägen. Umgekehrt sind die Studierenden oft erschreckt darüber, „für wie dumme“ die Lehrer*innen ihre Schüler*innen hielten.
- Zu Beginn wurde versucht, mit verschiedenen, zielgruppenspezifischen Materialien eine Differenzierung sowohl zwischen verschiedenen

¹² siehe <http://www.physikdidaktik.uni-koeln.de/11939.html>

Gruppen als auch innerhalb der Gruppen zu bewerkstelligen. Dieser Versuch ist gescheitert, u.a. daran, dass wir die Schüler*innengruppen nicht kennen, wenn sie zu uns kommen. Stattdessen hat es sich bewährt, sowohl für einen 5. Jahrgang der Hauptschule als auch für einen Differenzierungskurs im 9. Jahrgang eines Gymnasiums die gleichen Materialien zu verwenden, aber qualitativ und quantitativ binnendifferenziert anzuwenden. Entscheidend scheint dabei zu sein, dass die Materialien nicht für ein lineares Durcharbeiten konzipiert sind, sondern – egal in welcher Reihenfolge und unter Auslassung welcher Teile man sie durchläuft – eine sinnvolle und konsistente „Geschichte“ entsteht.

Auch bei darauf zugeschnittenen Lernmaterialien geschieht dies nicht von allein, sondern stellt vielmehr regelmäßig eine Herausforderung für neue Studierende dar. Es hat sich dabei bewährt, die Studierenden dazu zu ermutigen, im Raum stehende Widersprüche nicht zu übergehen, sondern vielmehr aufzugreifen und fruchtbar zu machen als Ausgangspunkt für die Annäherung an die Inhalte. Dieses „Lernen aus Widersprüchen“ wurde inzwischen systematisiert, siehe [24].

- Die Arbeit mit sehr heterogenen Lerngruppen, die im Schulalltag eine große Herausforderung darstellt, funktioniert quasi von alleine. Dies hat die Autoren mit dazu veranlasst, Fragen der Inklusion als neuem Forschungsschwerpunkt im Schülerlabor nachzugehen (siehe nächster Abschnitt).

4. Inklusion

Wie oben bereits erwähnt eignet sich das Konzept des Schülerlabors anscheinend sehr gut für sehr heterogene Lerngruppen, obwohl es zu Beginn nicht bewusst mit diesem Ziel entwickelt wurde. Die sonst bei Gruppen mit hohem Anteil an Schüler*innen mit Lernbehinderungen, emotional-sozialem Förderbedarf, mangelnden Deutschkenntnissen, Traumatisierungen auf Grund von Kriegserlebnissen usw. häufig beklagten Schwierigkeiten treten im Schülerlabor offensichtlich nicht auf.

Es hat sich mittels teilnehmender Beobachtung gezeigt, dass Schüler*innen mit Förderbedarf in gleicher Weise ohne jede Auffälligkeit wie ihre Mitschüler*innen an der Arbeit im Labor aktiv teilnehmen und auch von letzteren nicht diskriminiert oder vom gemeinsamen Tun ausgeschlossen werden. Dies gilt auch, wenn die einzelnen Kleingruppen sehr heterogen sind. Auch sonst sehr zurückhaltende Schüler*innen beteiligen sich aktiv, Schüler*innen mit Förderbedarf fallen im Gegensatz zum Regelschul-Unterricht meist gar nicht als solche auf.

Die Befassung mit Inklusion steht in den Didaktiken der Naturwissenschaften, insbesondere in der Physik noch ganz am Anfang. Deshalb stand am Anfang der Auseinandersetzung mit Inklusion im Naturwissen-

schaftsunterricht einerseits die Reflexion der Geschichte der eigenen Disziplin, um zu klären, warum das so ist, siehe [38]. Andererseits galt es, aus der Praxis von Reformschulen, die teilweise bereits seit Jahrzehnten inklusiv arbeiten, zu lernen, wozu eine Kooperation mit mehreren Schulen im Kölner Raum gegründet wurde, die teilweise schon sehr lange inklusiv arbeiten.

Gemeinsam mit den kooperierenden Lehrer*innen wurden folgende Aufgabenbestimmung für die fachdidaktische Forschung erarbeitet, der seitdem sowohl im Schülerlabor als auch in den kooperierenden Schulen nachgegangen wird:

- Systematische Dokumentation und Analyse der bereits entwickelten Unterrichtspraxis, insbesondere die Analyse der in dieser Praxis auftretenden systematischen Schwierigkeiten.
- Weiterentwicklung von Curricula, u.a. weg von utilitaristischen Zielsetzungen und stärkere Hinwendung zu vernetztem, fächerübergreifendem Werte-orientiertem Lernen zum Erreichen von Scientific Literacy und nachhaltiger gesellschaftlicher Entwicklung. Hierzu können die von der UNO formulierten 17 Global Goals [39] Leitfa-den sein.
- Daraus abgeleitet die Entwicklung geeigneter didaktischer Reduktionen, auch zu neuen Themenfeldern jenseits des Standard-Curriculums, sowie die (Fort-)Entwicklung von spezifischen Lern- und Arbeitsmethoden, vergleiche etwa [24].
- Entwicklung konkreter Unterrichtsmaterialien für inklusiven Unterricht unter Anwendung des Prinzips des handlungsorientierten Forschenden Lernens, sowie deren Erprobung und Evaluation. Dies umfasst auch die Adaption bereits für das Schülerlabor entwickelter Materialien für den Schulalltag.

5. Ausblick: Inklusive Universitätsschule Köln

Die inklusive Universitätsschule Köln (IUS), gegründet 2014 durch die Stadt und die Universität als Gesamtschule mit den Klassen 1-13 (Start mit der 1. Klasse im August 2015, Start der 5. Klasse im August 2018), wird mit entsprechender personeller Ausstattung Lehr- und Lernprozesse in stark heterogenen Lerngruppen entwickeln, praktizieren und forschend evaluieren [36]. Die Forschungs- und Entwicklungsergebnisse sollen auch für inklusiv arbeitende Regelschulen anwendbar sein.

Das Schülerlabor dient hier der (Weiter-)Entwicklung des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts an der IUS [37] im Hinblick auf die Konzept-, Curriculums- und Methodenentwicklung. Dies gilt derzeit vor allem in Bezug auf die Planung, etwa im Hinblick auf die Gestaltung und Ausstattung der Räume. Künftig wird die IUS aber vor allem vor der Herausforderung stehen, einerseits neue Konzepte erproben und einer sehr großen Zahl von Studierenden den gleichzeitig ein Praktikum ermöglichen zu wol-

len; andererseits dürfen die Schüler*innen nicht als „Versuchskaninchen“ missbraucht werden. Das Schülerlabor soll eine entscheidende Rolle bei der Bewältigung dieser Aufgabe spielen:

- Neue Ideen können im kleinen Rahmen vorerprobt werden.
- Das Schülerlabor eignet sich hervorragend zur Vorbereitung der Lehramtsstudierenden auf die Mitarbeit an der IUS. Dabei soll auch eine aktive Erfahrungsweitergabe zwischen verschiedenen Studierendengenerationen und zwischen Studierenden, die an der IUS mitarbeiten und solchen, die ihr Praxissemester an anderen Schulen machen, stattfinden.

Mit Letzterem werden bereits jetzt in einem anderen Kontext gute Erfahrungen gesammelt: Im Begleitseminar zum Schülerlabor arbeiten sich die Lehramtsstudierenden verschiedener Kohorten unter Begleitung durch die Dozent*innen untereinander ein. Zudem findet die Vor- und Nachbereitung der Studierenden, die im Rahmen einer Kooperation des Instituts für Physik und ihre Didaktik 3-5 Wochen an der Waddell Language Academy in North Carolina mitarbeiten, im Rahmen des Schülerlabors statt. Beides führt dazu, dass die Studierenden nicht nur ihre Erfahrungen für sich reflektieren, sondern sie direkt weitergeben, was auch zu einer aktiven Weiterentwicklung der Arbeit von Generation zu Generation beiträgt.

6. Fazit und Ausblick

Das hier beschriebene Konzept des Mittelstufenteils des Schülerlabors hat sich bewährt, wurde seit der Gründung des Labors 2010 nochmals deutlich geschärft und dient nun als Vorbild für die Weiterentwicklung und das Zusammenwachsen sämtlicher Schüler*innen-Programme der Fakultät:

- Ziel ist, ein qualitatives Verständnis gesellschaftlich relevanter, in der Schule aber dennoch oft unterrepräsentierter Themen zu entwickeln, das es im besten Fall ermöglicht, sich argumentativ in die jeweiligen Debatten einzubringen. Dies ist nicht nur ein wichtiger Beitrag zur Entwicklung von Mündigkeit für alle Schüler*innen. Zusätzlich trägt dies gerade in der Mittelstufe dazu bei, dass Schüler*innen sich für statt gegen die weitere Beschäftigung mit Naturwissenschaften z.B. im Rahmen von Kurswahlen entscheiden.
- Didaktische Reduktionen, die bewusst Anknüpfung an den Unterrichtsstoff ermöglichen sowie eine Vor- und insbesondere Nachbereitung in der Schule, die diese Brücken in Rücksprache mit den Lehrer*innen bewusst baut, tragen erheblich zur Nachhaltigkeit des Lernens bei.
- Das gemeinsame Lernen aller Beteiligten, der Schüler*innen, Lehrer*innen, Studierenden und Dozent*innen am gleichen Gegenstand ist sehr fruchtbar und trägt insbesondere dazu bei, dass vergleichsweise neue wissenschaftliche Erkennt-

nisse und Themen, die gemeinhin als zu schwierig gelten, Schüler*innen in der Breite zugänglich gemacht werden.

- Die nicht-lineare, insbesondere nicht streng aufeinander aufbauende, sondern netzartige und teilweise hermeneutische Arbeitsweise mit enger Verbindung von Experiment und konstruktiver Theorieentwicklung ist ein Schlüssel, um Heterogenität beim naturwissenschaftlichen Lernen fruchtbar zu machen. (Siehe dazu auch wiederum [24])

Für die nächsten Jahre ist vor diesem Hintergrund geplant,

- der Frage, was warum gelernt werden soll, vor dem Hintergrund der Inklusion neu nachzugehen (vergleiche [38]),
- didaktische Reduktionen (neuer Themen) daraufhin (weiter-) zu entwickeln, dass sie nicht-lineares, vornehmlich qualitatives Lernen ermöglichen,
- zusätzlich zu Theorie, Experiment und Gedankenexperiment, verstärkt Beobachtung, Simulation und vor allem Produktion in die Schülerlaborarbeit mit einzubeziehen¹³ und
- Widersprüche sowohl bezüglich des konkreten naturwissenschaftlichen Verständnisses, als auch im Hinblick auf individuelle und gesellschaftlich-politische Interessen systematischer zum Ausgangspunkt des Lernens in heterogenen Gruppen zu machen.

Letzteres scheint den Autoren ein entscheidender Schritt hin zu mehr Interesse an der Welt und den Mitmenschen, zu echter Problemorientierung sowie zu Inklusion, die statt Leistungsunterschieden vor allem in den Blick nimmt, wie verschiedene Menschen möglichst viel miteinander anfangen können (vergleiche [38]).

Wenn dabei nicht nur Widersprüche zwischen den Schüler*innen, sondern zwischen allen Beteiligten mit einbezogen werden, kann dies ein relevanter Schritt dafür sein, dass nicht nur die Rahmenbedingungen des Lernens gemeinsam bestimmt werden, sondern das Lernen selbst zu einem demokratischen Prozess wird.

7. Literatur

- [1] Pawek, C. (2009): Schülerlabore als interessefördernde außerschulische Lernumgebungen für Schülerinnen und Schüler aus der Mittel- und Oberstufe, Kiel: Universitätsbibliothek Kiel
- [2] Baszio, S. et al. (2013): Aufbau von regionalen Schülerforschungszentren – Berichte und Praxisempfehlungen, Darmstadt: 1. Auflage, Klett MINT

¹³ Dies ist bislang vor allem im Wasser- und Astroprojekt begonnen (siehe Supplementary Material). Insbesondere die Produktion scheint den Autoren in Bezug auf die vollständige Lernhandlung (siehe oben) von entscheidender Bedeutung zu sein.

- [3] Sylter Runde (2006): Bildung als Technologiepolitik – Welche Chancen bieten Technologiecluster für Bildungsinnovationen? URL: http://www.sylter-runde.de/mediapool/6/63715/data/0604_SR15_Bildung_als_Technologiepolitik_Download.pdf (Stand: 2.1.2017)
- [4] Homepage von LernortLabor – Bundesverband der Schülerlabore e.V.: URL: <http://www.lernortlabor.de> (Stand: 27.5.2018)
- [5] Schülerlabor-Atlas von LernortLabor – Bundesverband der Schülerlabore e.V.: URL: <http://www.schuelerlabor-atlas.de> (Stand 27.5.2018)
- [6] Haupt, O. et al. (2013): Schülerlabor – Begriffsschärfung und Kategorisierung. In: Mathematischer und Naturwissenschaftlicher Unterricht, 66, 6, S. 324–330
- [7] Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung (1992): AGENDA 21: Deutsche Version abrufbar unter: http://www.un.org/Depts/german/conf/agenda21/agenda_21.pdf (Stand: 2.1.2017)
- [8] Huwer, J. (2015): Forschendes Experimentieren im Kontext einer naturwissenschaftlich-technischen Umweltbildung, Saarbrücken: Saarländische Universitäts- und Landesbibliothek
- [9] De Haan, G. (2008): Gestaltungskompetenz als Kompetenzkonzept für Bildung für nachhaltige Entwicklung. In: Bormann, I. & De Haan, G. (Hrsg.): Kompetenzen der Bildung für nachhaltige Entwicklung. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften
- [10] Coordination gegen BAYER-Gefahren (2015): Unternehmenswerbung in Leverkusen – Kritik an Chempark-Wimmelbuch: Werbung in Kitas und Schulen: URL: <http://www.cbgnetwork.org/6481.html> (Stand: 2.1.2017)
- [11] Sutor, B. (2002): Politische Bildung im Streit um die „intellektuelle Gründung“ der Bundesrepublik Deutschland. In: Aus Politik und Zeitgeschichte, 45, S. 17-27
- [12] Homepage der Bundeszentrale für politische Bildung: URL: <http://www.bpb.de/die-bpb/51310/beutelsbacher-konsens> (Stand: 8.1.2017)
- [13] Holland-Letz, M. (2013): Privatisierungsreport 15: Propaganda und Produktwerbung. Wie Unternehmen mit kostenlosen Unterrichtsmaterialien Einfluss auf Schulen ausüben. GEW Hauptvorstand: Frankfurt am Main
- [14] Baumert, J.; Kunter, M. (2006): Stichwort: Professionelle Kompetenz von Lehrkräften. In: Zeitschrift für Erziehungswissenschaft. 9, 4, S. 469-520
- [15] Krautz, J. (2010): Die Kompetenz des homo oeconomicus. In: Vierteljahresschrift für wissenschaftliche Pädagogik, 2010, 3, S. 332-345
- [16] Schmidt, I. et al. (2011): Außerschulische Lernstandorte. In: Mathematischer und Naturwissenschaftlicher Unterricht, 64, 6, S. 362–368
- [17] Katharina, M. (2006): Lehrerbildung – die (Un)Vollendete? Deutschland und Schweden im Vergleich, Stuttgart: Karl Krämer Verlag
- [18] Hoppe-Graff, S. et al. (2008): Universitäre Lehrerausbildung auf dem Prüfstand: Wie beurteilen Referendare das Theorie-Praxis-Problem? In: Empirische Pädagogik, 22, 3, S. 353-381
- [19] Homepage der Sylter Runde, Seite „Pressestimmen“: URL: <http://www.sylter-runde.de/pressestimmen.html> (Stand: 2.1.2017)
- [20] Homepage der Sylter Runde, Seite „Mission“: URL: <http://www.sylter-runde.de/mission.html> (Stand: 2.1.2017)
- [21] Wagenschein, M. (1965): Die pädagogische Dimension der Physik, 2. Auflage, Westermann Verlag: Braunschweig
- [22] Klafki, W. (2007): Neue Studien zur Bildungstheorie und Didaktik: Zeitgemäße Allgemeinbildung und kritisch-konstruktive Didaktik, 6. Auflage, Beltz: Weinheim, Basel
- [23] Booth, T. (2012): Der aktuelle Index for Inclusion in dritter Auflage. In: Reich, K. (Hrsg.): Inklusion und Bildungsgerechtigkeit. Weinheim u.a.: Beltz
- [24] Brackertz, S. et al. (2018): Experimente & Widersprüche im (inklusive) Naturwissenschaftsunterricht: Chancen und Grenzen entwickelt am Beispiel Physik. In: Dziak-Mahler, M. et al. (Hrsg.) (2018): Fachdidaktik Inklusiv II: Fachunterricht inklusiv gestalten – Theoretische Annäherungen und praktische Umsetzungen. Waxmann
- [25] Priemer, B.; Lewalter, D. (2009): Schülerlaborbesuche – eine Bereicherung für den naturwissenschaftlichen Unterricht? In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, 58, 4, S. 10-14
- [26] Euler, M. (2009): Schülerlabore in Deutschland, Zum Mehrwert authentischer Lernorte in Forschung und Entwicklung. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, 58, 4, S. 5-9
- [27] Hacker, W. (1998): Allgemeine Arbeitspsychologie: psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten. Bern: Huber
- [28] Arnold, R.; Müller, H.-J. (1993): Handlungsorientierung und ganzheitliches Lernen in der Berufsbildung – 10 Annäherungsversuche. In: Erziehungswissenschaft und Beruf, Vierteljahresschrift für Unterrichtspraxis und Lehrerbildung, 41, 4, S. 323-333
- [29] Reich, K. (2012): Konstruktivistische Didaktik, 5. Auflage, Weinheim: Beltz

- [30] Kirschner, A. et al. (2006): Why Minimal Guidance During Instruction Does Not Work: An Analysis of the Failure of Constructivist, Discovery, Problem-Based, Experiential, and Inquiry-Based Teaching. In: *Educational Psychologist*, 41, 2, S. 75–86
- [31] Guderian, P.; Priemer, B. (2008): Interessenförderung durch Schülerlaborbesuche – eine Zusammenfassung der Forschung in Deutschland. In: *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, *PhyDid A*, 2, 7, S. 27-36
- [32] Völker, M.; Trefzger, T. (2011): Ergebnisse einer explorativen empirischen Untersuchung zum Lehr-Lern-Labor im Lehramtsstudium. In: *PhyDid B*, 2011
- [33] Steffensky, M.; Parchmann, I. (2007): The project CHEMOL: Science education for children – Teacher education for students! *Chemistry Education Research and Practice*, 8, 2, S. 120-129
- [34] Höttecke, D., Mrochen, M. (2010): Bewerten Lernen im Treibhaus, Physikalisches Wissen beim Bewerten und Entscheiden nutzen. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*, 59, 2, S. 26-35
- [35] Küpper, A.; Schulz, A. (2017): Schülerinnen und Schüler auf der Suche nach der Erde 2.0 im Schülerlabor der Universität zu Köln. In: *Astronomie und Raumfahrt im Unterricht*, 54, 1, S. 40-44
- [36] Reich, K. et al. (Hrsg.) (2015): *Eine inklusive Schule für alle*. Weinheim: Beltz
- [37] Schulz, A. et al.: *Naturwissenschaften, Mathematik, Technik und Ökologie in der IUS*. In: Reich, K. et al. (Hrsg.) (2015): *Eine inklusive Schule für alle*. Weinheim: Beltz
- [38] Schulz, A.; Brackertz, S. (2018): *Inklusive Physikdidaktik – ein Start in Köln*. In: Lydia Schulte Heuling (Hrsg.) (2018): *Embracing the Other*. Flensburg: Flensburg University Press
- [39] United Nations (2015): *Sustainable Development Goals, Resolution 70/1, 2015: Deutsche Version* abrufbar unter: <http://www.un.org/depts/german/gv-69/band3/ar69315.pdf>
(Stand: 28.5.2018)

Diagnostische Fähigkeiten fördern im Lehr-Lern-Labor Physik

Barbara Steffentorweihen, Heike Theyßen

Universität Duisburg-Essen, Didaktik der Physik, Universitätsstr. 2, 45117 Essen

barbara.steffentorweihen@uni-due.de, heike.theyssen@uni-due.de

Kurzfassung

Die Diagnostik von und der Umgang mit fachinhaltlichen Lernschwierigkeiten gehören zu den Aufgaben von Lehrkräften. Um diese bereits im Studium theoriebasiert und mit Praxisbezug zu fördern, werden sie an der Universität Duisburg-Essen in einer fachdidaktischen Lehrveranstaltung behandelt, die ein Seminar mit Praxisphasen kombiniert. Die Auseinandersetzung der Studierenden mit der Thematik erfolgt zunächst theoretisch und anhand vorgegebener Praxisbeispiele (Textvignetten), im Verlauf der Veranstaltung zunehmend bezogen auf eigene praktische Erfahrungen. Die praktischen Erfahrungen sammeln die Studierenden in einem Lehr-Lern-Labor, in dem sie vorgegebene, adaptierte bzw. selbst entwickelte Unterrichtseinheiten mit kleinen Schülergruppen erproben. Die Entwicklung der Fähigkeiten der Studierenden wird über die gesamte Veranstaltung hinweg qualitativ untersucht. Als Datenquellen werden die im Verlauf der Veranstaltung von den Studierenden bearbeiteten Textvignetten, Videoaufnahmen und schriftliche Reflexionen sowie Fragebogendaten genutzt und aufeinander bezogen analysiert.

1. Ziel und Rahmen

Ziel des Vorhabens ist die Förderung der Professionsentwicklung Lehramtsstudierender mit dem Schwerpunkt auf den Fähigkeiten zur Diagnostik von und zum Umgang mit fachinhaltlichen Lernschwierigkeiten in der Physik. Dies erfordert neben theoretischen Lerngelegenheiten auch die Möglichkeit zur Erprobung der eigenen Fähigkeiten an Praxisbeispielen (Gudmundsdottir, Reinhartsen, Nordtømme, 1995).

Lehr-Lern-Labore (Dohrmann & Nordmeier, 2015) bieten einen geschützten Rahmen, in dem Studierende in komplexitätsreduzierten Settings Unterrichtssequenzen mit Schülerinnen und Schülern erproben und Praxiserfahrung sammeln können. Ein solches Lehr-Lern-Labor wurde im Rahmen des Projektes Praxislabor Physik¹ an der Universität Duisburg-Essen eingerichtet.

Im Folgenden werden zunächst die Relevanz der oben genannten Zielsetzung und der theoretische Rahmen für die Förderung der diagnostischen Fähigkeiten der Studierenden erläutert. Anschließend werden Konzept und Ablauf der Lehrveranstaltung vorgestellt, mit der die Zielsetzung erreicht werden soll, sowie die Anlage der Untersuchung, mit der die Erreichung der Zielsetzung überprüft werden soll.

2. Diagnostik

Sowohl die Diagnostik von als auch der Umgang mit Lernschwierigkeiten sind Teile des PCK und damit des Professionswissens von Lehrkräften (Park & Oliver, 2007; Shulman, 1987). Die KMK-Standards für die Lehrerbildung führen die Diagnostik der Lernvoraussetzungen und Lernprozesse von Schülerinnen und Schülern sowie deren gezielte Förderung als Kompetenz von Lehrkräften auf (KMK, 2004). Als Wege zur Entwicklung u. a. dieser Kompetenz benennen sie *"die persönliche Erprobung und anschließende Reflexion [...] in simuliertem Unterricht oder in natürlichen Unterrichtssituationen"* (KMK, 2004, S.6). Auch in den fachspezifischen Vorgaben für die Lehrerbildung werden entsprechende Fähigkeiten adressiert, indem die Kenntnis typischer Lernschwierigkeiten und von Möglichkeiten zur Gestaltung von Lernarrangements zur Berücksichtigung heterogener Lernvoraussetzungen als Standards benannt werden (KMK, 2017).

Wir verstehen unter diagnostischen Fähigkeiten im Sinne Weinerts (2000) ein *"Bündel von Fähigkeiten, um den Kenntnisstand, die Lernfortschritte und die Leistungsprobleme der einzelnen Schüler sowie die Schwierigkeiten verschiedener Lernaufgaben im Unterricht fortlaufend beurteilen zu können, sodass das didaktische Handeln auf diagnostischen Einsichten aufgebaut werden kann"* (Weinert, 2000, S.14). Hier wird insbesondere der formative Aspekt von Diagnostik betont, ähnlich wie bei Bromme (1997), der *"die Lehrerwahrnehmung der individuellen Fehlvorstellungen, Lernstrategien und Verständnis-*

¹ Das Praxislabor Physik ist ein Teilprojekt des Projektes ProViel (<https://www.uni-due.de/proviel/>) und wird im Rahmen der „Qualitätsoffensive Lehrerbildung“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.

schwierigkeiten" (Bromme, 1997, S.201) als Bestandteil der Diagnostik nennt.

Des Weiteren wird in der Literatur unter Diagnostischer Kompetenz häufig Urteilsgenauigkeit verstanden (z. B. Schrader & Helmke, 1987). So fassen Schrader und Helmke (2001) die Diagnostische Kompetenz als Befähigung auf, „*Schülermerkmale und Aufgabenschwierigkeiten zutreffend einzuschätzen*“ (Schrader & Helmke, 2001, S. 48).

2.1. Schritte einer Diagnostik

Für den Ablauf einer Diagnostik wird die Schrittfolge nach Beretz, Lengnink und von Aufschnaiter (2017) zugrunde gelegt. Die Schritte sind mit anderen Prozessbeschreibungen kompatibel und vergleichbar. Sie weisen aber zum Beispiel verglichen mit dem ESRU-Zyklus (Ruiz-Primo & Furtak, 2007) eine größere Detailliertheit auf oder haben einen anderen Schwerpunkt. So liegt dieser zum Beispiel bei Höble (2014) in Anlehnung an Helmke (2009) auf dem Erheben der Schülerdaten.

Die Diagnostik beginnt damit, *geeignete Daten zu sichten* oder *selbst zu erheben*. Die Datenerhebung kann zum Beispiel darin bestehen, dass man im Lehr-Lern-Labor Schülerinnen und Schüler beim Umgang mit Lernmaterial beobachtet, z. B. bei der Bearbeitung der Aufgabe, eine Lampe mithilfe von Kabeln und einer Batterie zum Leuchten zu bringen. Ebenso kann eine Textvignette zur Bearbeitung einer solchen Aufgabe die Datenbasis für eine Diagnostik darstellen.

Anhand der Daten werden *förderrelevante Beobachtungen beschrieben*. Die Beschreibung soll möglichst objektiv erfolgen und - jenseits der Zuschreibung von Förderrelevanz - noch keine Deutung enthalten. Bei der Bearbeitung der oben genannten Aufgabe könnte man beobachtet haben, dass ein Schüler zunächst ein Kabel mit Lampe und Stromquelle verbindet, dann kurz stutzt und ein zweites Kabel anschließt und die Lampe leuchtet.

Ausgehend von den Beschreibungen werden die *Beobachtungen differenziert gedeutet*. Es ist möglich, dass es mehr als nur eine Deutung gibt. Im Beispiel kann der Schüler verstanden haben, dass der Stromkreis geschlossen sein muss, damit der Strom durch alle Bauteile fließen kann. Der Schüler kann aber auch denken, dass durch ein Kabel nicht genug Strom fließt und deswegen ein zweites Kabel verwendet werden muss (Verbrauchsvorstellung, vgl. Wiesner, Schecker & Hopf, 2011, S43). Hier hilft fachdidaktisches Wissen über Schülervorstellungen, die Beobachtung zu deuten. Differenziert bedeutet auch, dass nicht nur negative oder fehlende Aspekte genannt werden, sondern auch positive. In dem Beispiel hat der Schüler offenbar erkannt, dass ein Kabel nicht ausreicht. Auch der händische Umgang mit dem Material verursacht der beschriebenen Beobachtung nach keine Probleme.

Den einzelnen Deutungen können unterschiedliche *Ursachen* zugrunde liegen. Eine typische Ursache der Stromverbrauchsvorstellung ist die alltags-

sprachliche Verwendung von Begriffen wie Verbraucher, Stromverbrauch oder Stromsparen.

Entsprechend der vermuteten Ursache werden *Konsequenzen für eine Fördermaßnahme abgeleitet*. Welcher Schritt im Verständnisprozess sollte als nächstes vom Schüler gemacht werden? Wie kann dieser Schritt gefördert werden? In dem Beispiel wird man zweifellos nicht an der Alltagssprache ansetzen und diese verändern können. Ein sinnvoller nächster Schritt wäre, die Diskrepanz zwischen Alltags- und Fachsprache zu thematisieren und die Alltagsbegriffe fachlich korrekt umzudeuten.

Das *Anlegen einer Fördermaßnahme* gehört nicht mehr zum Diagnoseprozess, sollte jedoch umgesetzt werden, sodass die Diagnostik anschließend eine Wirkung zeigen und den Ausgangspunkt für weitere Diagnostik darstellen kann.

Die Schritte müssen nicht zyklisch durchlaufen werden. Liegen zum Beispiel zu wenige Informationen vor, um die Beobachtungen deuten oder Ursachen ergründen zu können, so kann es sinnvoll sein, weitere Daten zu erheben oder in den vorliegenden Daten weitere förderrelevante Beobachtungen zu suchen. Diese Schleifen sind an jeder Stelle der Diagnostik möglich.

Die Abfolge der einzelnen Schritte braucht Zeit und gegebenenfalls ein erneutes Sichten der Daten. Im Studium kann man dies an „konservierten“ Beispielen (z. B. Vignetten) gut üben. Auch in der Unterrichtspraxis kann man ausgewählte Schülerprodukte, z. B. Hefteinträge oder Aufgabebearbeitungen in Ruhe analysieren.

Im Unterrichtsgeschehen hat man oftmals jedoch nicht die Zeit, die Schritte der Diagnostik im Einzelnen und ggf. wiederholt zu durchlaufen. Die Diagnostik läuft informell „on the fly“ ab. D. h. sie ist ungeplant und zu jeder Zeit möglich. Ausgelöst wird die Diagnostik zum Beispiel durch eine Schülerantwort oder –handlung und verlangt eine schnelle, spontane und flexible Reaktion (Ruiz-Primo & Furtak, 2004).

Ein Modell, das diesen Prozess beschreibt, ist der oben genannte „ESRU-Zyklus“ (Ruiz-Primo & Furtak, 2007) mit den folgenden Schritten:

- Teacher *elicits* response
- Student responds
- Teacher *recognizes* student response
- Teacher *uses* student response

Vergleicht man die ESRU-Schritte mit den zuvor genannten Schritten, so findet man das Datensichten bzw. –erheben in den ersten beiden Schritten des ESRU-Zyklus. Beschreiben, Deuten und Ursachen finden sich im dritten Schritt, dem *Recognize*, wieder, und die Konsequenzen sowie das Anlegen der Fördermaßnahme im *Use*. Der oben beschriebene Ablauf einer Diagnostik kann daher als ausführliche Version eines ESRU-Zyklus aufgefasst werden.

2.2. Entwicklung diagnostischer Fähigkeiten

Vergleichsweise gut untersucht sind die diagnostischen Fähigkeiten von Lehrkräften (oder Lehramts-

studierenden) im Sinne von Urteilsgenauigkeit (vgl. Schrader, 2009; Spinath, 2005; Südkamp, Möller & Pohlmann, 2008). Seltener wird der Prozess der Diagnostik genauer betrachtet. Zentrale Ergebnisse von Studien, die die prozessbezogenen Fähigkeiten analysiert haben, werden im Folgenden vorgestellt.

Beret et al. (2017) stellen bei der Analyse diagnostischer Prozesse bei Lehramtsstudierenden der Physik fest, dass die Studierenden überwiegend deuten, jedoch nur vereinzelt nach Ursachen forschen und wenig Konsequenzen ableiten. Sie folgern daraus, dass ein gezielter Kompetenzaufbau nötig ist, um auch die Ursachenforschung und die Ableitung der Konsequenzen zu fördern.

Um einen entsprechenden Kompetenzaufbau zu fördern, ist es vermutlich nötig, dass viele sich wiederholende Lerngelegenheiten durchlaufen werden (Cappell, 2013).

Des Weiteren erhöhen strukturierte Reflexionen die diagnostische Kompetenz (Hetmanek & van Gog, 2017) und Lerntagebücher sind ein hilfreiches Instrument für Lehrkräfte, um die diagnostischen Prozesse zu überwachen und die diagnostische Kompetenz zu fördern (Klug, 2017).

3. Veranstaltungskonzept

Zur Förderung der diagnostischen Fähigkeiten wurden in der Veranstaltung drei aufeinander abgestimmte Elemente eingebunden: ein Theorieblock zu den fachdidaktischen Grundlagen zur Diagnostik, zu Lernschwierigkeiten und zur Reflexion; Übungsphasen, in denen die Diagnostik anhand von Vignetten praktiziert und in der Gruppe diskutiert wird; sowie das Microteaching, um die Diagnostik sowohl „on the fly“ im Lehr-Lern-Labor als auch retrospektiv durchführen zu können.

3.1. Textvignetten

Die Diagnostik und ihre einzelnen Schritte sollen an Vignetten geübt und verinnerlicht werden, sodass es den Studierenden bei den Erprobungen erleichtert wird, on the fly zu diagnostizieren. Die Vignetten wurden anhand folgender Kriterien ausgewählt: Zum einen sollten sie eine hohe Authentizität vorweisen, was dadurch gegeben ist, dass sie aus früheren praktischen Erprobungen entstanden sind. Zum anderen war eine geringe Komplexität wichtig, sodass für alle Studierenden eine Diagnostik möglich ist, selbst für diejenigen ohne viel Vorwissen bezüglich Lernschwierigkeiten.

Die Vignetten beginnen jeweils mit einer Situationsbeschreibung, in der deutlich wird, wie viele Schülerinnen und Schüler in der Gruppe waren, an welcher Stelle der Unterrichtssequenz sie sich befinden und was eventuell zuvor getan oder gesagt wurde. Es folgt eine Transkription des Dialogs und der Handlung, die durch Formatierungen voneinander zu unterscheiden sind. Für den besseren Überblick werden die Personen farblich gekennzeichnet, und eine Zeilennummerierung erleichtert es den Studie-

renden, sich auf einzelne Aussagen und Abschnitte zu beziehen.

3.2. Microteaching

Mit Microteaching werden in der Literatur verschiedene Konzepte verbunden (Klinzing, 2002; Krüger, Szogs & Korneck, 2017; Sadker & Cooper, 1972). In der hier umgesetzten Variante unterrichten die Studierenden kleine Gruppen von maximal vier Schülerinnen und Schülern über einen Zeitraum von 2-3 Stunden. Der Zyklus des Microteachings (Abb. 1) beinhaltet drei Phasen. In der ersten Phase findet die Vorbereitung von Unterrichtssequenzen im Seminar statt, indem sich die Studierenden mit einem vorgegebenen Lernangebot für die Schülerinnen und Schüler vertraut machen (Experimentiermaterial, Arbeitsaufträge, Aufgaben) und es selbst durcharbeiten. Die Lernangebote beziehen sich auf Bereiche, für die Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten gut erforscht und Gegenstände des Theorieblocks sind. Auf eine Eigenentwicklung der Lernangebote durch die Studierenden wurde verzichtet, um den Fokus der Veranstaltung eindeutiger auf die Diagnostik zu legen. Jedoch haben die Studierenden Einfluss auf die Formulierungen der diagnostischen Aufgaben, die zur Verständniskontrolle gestellt werden.

Anschließend erfolgt die Erprobung mit kleinen Schülergruppen im Lehr-Lern-Labor. Die Studierenden begleiten die Schülerinnen und Schüler bei der Bearbeitung des Lernangebotes an einem Gruppentisch. Dabei können sie Lernfortschritte und -schwierigkeiten „on the fly“ diagnostizieren und darauf reagieren. So können sie z. B. die Geschwindigkeit der Bearbeitung, Fragen, Erklärungen und die Verwendung von Zusatzaufgaben flexibel an die Lerngruppe anpassen.

Die dritte Phase ist die Reflexion, in der die Studierenden retrospektiv diagnostizieren. Zum einen reflektieren sie individuell schriftlich mit Hilfe eines vorgegebenen und anhand der Diagnoseschritte vorstrukturierten Reflexionsbogens und zum anderen im Seminar anhand von ausgewählten Ausschnitten aus den eigenen Erprobungen. Auf Grundlage der Reflexion wird die nächste Erprobung vorbereitet, sodass sich der Zyklus schließt. Pro Thema werden drei bis vier Zyklen durchlaufen, damit die Studierenden die Ergebnisse der Diagnostik und nachträgliche Überlegungen zur Förderung soweit passend zeitnah auf die nächste Lerngruppe anwenden können.

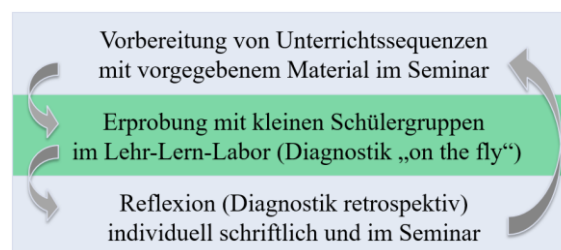


Abb. 1: Microteachingzyklus

3.3. Ablauf der Veranstaltung

Zu Beginn der Veranstaltung werden in einem Theorieblock die oben angegebenen Grundlagen behandelt. Parallel werden Vignetten eingesetzt, anhand derer die Diagnostik geübt und besprochen werden kann. Dadurch erhalten die Studierenden mehrmals die Möglichkeit, die einzelnen Schritte der Diagnostik zu verinnerlichen. Dieser Teil umfasst circa fünf Wochen.

Ebenso lang ist die zweite Phase der Veranstaltung, die das Microteaching beinhaltet. Die Studierenden durchlaufen die Schritte Vorbereitung – Erprobung – Reflexion insgesamt dreimal bis viermal zum Thema Stromkreise.

Die zweite Phase wird anschließend zum Thema Optik wiederholt.

Eine graphische Darstellung des Veranstaltungskonzeptes zeigt Abb. 2.

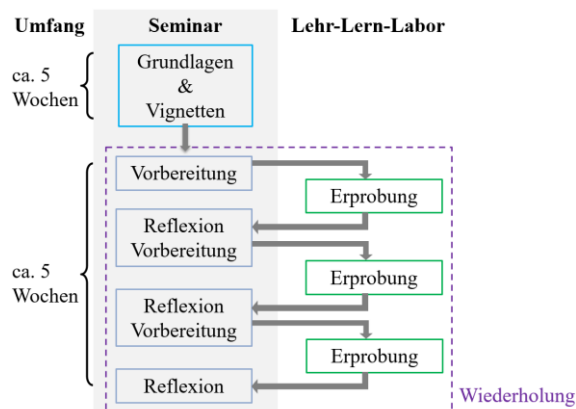


Abb. 2: Veranstaltungskonzept

4. Untersuchung der Wirksamkeit

Die Umsetzung des Veranstaltungskonzeptes erfolgte erstmals im WS17/18. Die Untersuchung der Wirksamkeit und das Veranstaltungskonzept greifen stark ineinander.

4.1. Untersuchungsziel

Für die Untersuchung der Wirksamkeit des Veranstaltungskonzeptes werden zwei Ziele in den Fokus genommen:

1. Ziel: Qualitative Analyse der Entwicklung der diagnostischen Fähigkeiten der Studierenden bezüglich fachinhaltlicher Lernschwierigkeiten der Schülerinnen und Schüler.

Die Entwicklung wird dabei auf Grundlage der Diagnostikschritte anhand der folgenden Analysekriterien beurteilt:

- Vollständigkeit der Diagnoseschritte
- Trennung der Diagnoseschritte
- Ausführlichkeit der einzelnen Schritte
- Anzahl alternativer Diagnosen (insbesondere Deutungen, Ursachen und Konsequenzen)
- Anzahl diagnostizierter Gegenstände

2. Ziel: Qualitative Analyse des Umgangs der Studierenden mit fachinhaltlichen Lernschwierigkeiten der Schülerinnen und Schüler.

Bei dem zweiten Ziel werden die einzelnen Schritte größtenteils nicht mehr erkennbar sein, da die Studierenden on the fly diagnostizieren. Stattdessen sind die Kriterien bei diesem Ziel, welche Erklär- und Handlungsalternativen die Studierenden anbieten und ob diese der Situation entsprechend flexibler und adaptiver angewendet werden.

Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt auf dem ersten Ziel.

4.2. Design

Das Design der Studie ist stark an das Veranstaltungskonzept gekoppelt. Die Textvignetten, an denen die Studierenden in der Veranstaltung die Diagnostik üben (3.1), werden teilweise gleichzeitig zur Diagnostik der diagnostischen Fähigkeiten der Studierenden als "Testvignetten" genutzt.

Nach einer einführenden Begriffsklärung zur Diagnostik (Was versteht man unter Diagnostik, Arten der Diagnostik, Diagnoseschritte) werden zum einen die Vorerfahrungen der Studierenden mit Diagnostik und zum anderen ihre Selbstwirksamkeitserwartung bezogen auf physikdidaktische Handlungsfelder (Meinhardt, C., Rabe, T. & Krey, O., 2016) mit Fragebögen erhoben. Zusätzlich wird eine erste Testvignette (4.3.) zum Thema Stromkreise von den Studierenden bearbeitet. Eine zweite Testvignette wird nach dem Theorieblock und vor der ersten Erprobung mit einer Schulklasse bearbeitet.

In den kommenden fünf Wochen werden die Erprobungen gefilmt und die Studierenden bearbeiten vorstrukturierte Reflexionsbögen, in denen sie eine festgelegte Unterrichtssituation und eine von ihnen frei gewählte Situation, die ihnen unter diagnostischen Aspekten besonders aufgefallen ist, reflektieren (vgl. 3.2).

Nach der letzten Erprobung bearbeiten sie erneut die erste Testvignette.

4.3. Bearbeitung von Testvignetten

Die Testvignetten dienen zum einen wie alle anderen eingesetzten Textvignetten den Studierenden zum Üben der Diagnostik. Zum anderen dienen sie der Erfassung der diagnostischen Fähigkeiten der Studierenden. Sie unterscheiden sie sich von den anderen Textvignetten dadurch, dass sie auf speziellem Smartpen—Papier gedruckt sind und ihre Bearbeitung in drei Phasen unterteilt ist. Während aller drei Phasen wird mithilfe eines Smartpens gleichzeitig aufgezeichnet, was die Studierenden auf dem Spezialpapier schreiben und was sie dazu sagen.

In der ersten Phase werden die Vignetten schriftlich, begleitet durch lautes Denken (Davey, 1984) in Einzelarbeit bearbeitet. Die Aufgabenstellung lautet: "Führen Sie eine Diagnostik an der vorliegenden Vignette durch. Bitte denken Sie daran, dass Sie

während der Bearbeitung laut denken und entsprechende Notizen auf dem Papier machen. Dafür können Sie den Rand nutzen und die Rückseiten."

Anschließend bilden die Studierenden Paare und tauschen sich über ihre bisherigen Ergebnisse aus, diskutieren diese und ergänzen gegebenenfalls. Der Arbeitsauftrag lautet "Tauschen Sie sich nun mit Ihrem Partner über Ihre bisherigen Ergebnisse aus. Sie können Ihre Aufzeichnungen ergänzen, anpassen und überarbeiten. Auch jetzt können Sie den Rand und die weiteren Seiten für Notizen nutzen."

Im dritten Schritt erhalten die Paare eine Erinnerungskarte, auf der die Diagnoseschritte dargestellt sind, um die Vollständigkeit ihrer Diagnosen zu prüfen. Der Arbeitsauftrag lautet "Überprüfen Sie nun mit Ihrem Partner, ob Sie, soweit es hier möglich ist, alle Schritte des Diagnoseprozesses berücksichtigt haben. Ergänzen Sie gegebenenfalls."

Für jede Phase haben die Studierenden 15 Minuten Zeit. Soweit möglich arbeiten über das Semester hinweg immer dieselben Studierenden in den Paaren zusammen.

4.4. Triangulation der Datenquellen

Die erhobenen Daten werden im Hinblick auf die Analysekriterien der beiden Untersuchungsziele ausgewertet und verknüpft. Dafür werden deduktiv aus den Analysekriterien und induktiv aus den Daten Kategorien abgeleitet und Kodiermanuale entwickelt.

Die Bearbeitungen der Testvignetten können Aufschluss über alle Analysekriterien des ersten Ziels geben (s. Abb. 3).

Die Videoaufzeichnungen der Erprobungen wiederum dienen insbesondere dem zweiten Untersuchungsziel, können aber auch Hinweise bezüglich der Anzahl "on the fly" diagnostizierter Gegenstände liefern und dienen zum Abgleich mit den in den Reflexionsbögen beschriebenen Beobachtungen und Handlungen.

Die Reflexionsbögen geben zu ähnlichen Kriterien Aufschluss wie die Testvignetten. Da sie aber auf Grundlage der Diagnoseschritte vorstrukturiert sind, lassen sich aus den Reflexionsbögen keine Informationen bezüglich der Vollständigkeit und Trennung der Diagnoseschritte gewinnen. Stattdessen können die Reflexionsbögen die Analyse der Videoaufzeichnungen im Hinblick auf die Erklär- und Handlungsalternativen ergänzen (siehe oben).

Analysekriterien	Testvignetten	Videoaufzeichnungen	Reflexionsbögen
Vollständigkeit der Diagnoseschritte	X		
Trennung der Diagnoseschritte	X		
Ausführlichkeit der Diagnoseschritte	X		X
Anzahl alternativer Diagnosen	X		X
Anzahl diagnostizierter Gegenstände	X	(X)	X
Erklär- und Handlungsalternativen		X	(X)

Abb. 3: Nutzung der Datenquellen

5. Ausblick

Der erste Durchlauf der Studie wurde im März 2018 abgeschlossen. Es nahmen neun Studierende teil, die im fünften oder höheren Semester des Bachelorstudiums für das Lehramt an Gymnasien und Gesamtschulen, Berufskollegs oder Haupt-, Real- und Gesamtschulen waren. Aktuell werden die Daten transkribiert und Kodiermanuale entwickelt. Ein zweiter Durchlauf ist im kommenden Wintersemester geplant.

6. Literatur

- Beretz, A., Lengnink, K. & von Aufschnaiter, C. (2017). Diagnostische Kompetenz gezielt fördern – Videoeinsatz im Lehramtsstudium Mathematik und Physik. In Selter, C., Hußmann, S., Höble, C., Knipping, C., Lengnink, K. & Michaelis, J. (Hrsg.), *Diagnose und Förderung heterogener Lerngruppen* (S. 149-168). Münster: Waxmann.
- Bromme, R. (1997). Kompetenzen, Funktionen und unterrichtliches Handeln des Lehrers. In Weinert, F. E. (Hrsg.), *Encyklopädie der Psychologie. Pädagogische Psychologie. Band 3: Psychologie des Unterrichts und der Schule* (S. 177-212). Göttingen: Hogrefe.
- Cappell, J. (2013). Fachspezifische Diagnosekompetenz angehender Physiklehrkräfte in der ersten Ausbildungsphase. *Studien zum Physik- und Chemielernen, Band 146*. Berlin: Logos.
- Davey, B. (1984). Think aloud – modeling the cognitive processes of reading comprehension. *Journal of Reading*, 27, 44-47.
- Dohrmann, R. & Nordmeier, V. (2015). Schülerlabore als Lehr-Lern-Labore (LLL): Ein Projekt zur forschungsorientierten Verknüpfung von Theorie und Praxis in der MINT-Lehrerbildung. Didaktik der Physik, Frühjahrstagung – Wuppertal 2015.

- Gudmundsdottir, S., Reinhartsen, A. & Nordtømme, N. P. (1995). „Etwas Kluges, Entscheidendes und Unsichtbares.“ In *Zeitschrift für Pädagogik*, 41 (33), Beiheft, S. 163-174.
- Helmke, A. (2009). *Unterrichtsqualität und Lehrerprofessionalität: Diagnose, Evaluation und Verbesserung des Unterrichts*. Seelze: Klett-Kallmeyer.
- Hetmanek, A. & van Gog, T. (2017). Förderung von diagnostischer Kompetenz: Potenziale von Ansätzen aus der medizinischen Ausbildung. In Südkamp, A. & Praetorius, A.-K. (Hrsg.), *Diagnostische Kompetenz von Lehrkräften* (S. 209-216). Münster: Waxmann.
- Höble, C. (2014). Lernprozesse im Lehr-Lern-Labor Wattenmeer diagnostizieren und fördern. In Fischer, A. et al (Hrsg.), *Diagnostik für lernwirksamen Unterricht* (S.144-156). Baltmannsweiler: Schneider Hohengehren.
- Klinzing, H. G. (2002). Wie effektiv ist Microteaching? Ein Überblick über fünfunddreißig Jahre Forschung. *Zeitschrift für Pädagogik*, 48, 194-214.
- Klug, J. (2017). Tagebücher zum Diagnostizieren und zur Förderung von Diagnostik und Lernerfolg. In Südkamp, A. & Praetorius, A.-K. (Hrsg.), *Diagnostische Kompetenz von Lehrkräften* (S. 223-231). Münster: Waxmann.
- KMK (2004). *Standards für die Lehrerbildung: Bildungswissenschaften*. Abgerufen von https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Standards-Lehrerbildung.pdf [28.05.2018]
- KMK (2017). *Ländergemeinsame inhaltliche Anforderungen für die Fachwissenschaften und Fachdidaktiken in der Lehrerbildung*. Abgerufen von https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2008/2008_10_16-Fachprofile-Lehrerbildung.pdf [29.05.2018]
- Krüger, M., Szogs, M. & Korneck, F. (2017). Welche Kompetenz beeinflusst welche Aspekte der Unterrichtsqualität? In C. Maurer (Hrsg.), *Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis*. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Zürich 2016. (S.376-179). Universität Regensburg.
- Meinhardt, C., Rabe, T. & Krey, O. (2016). Selbstwirksamkeitserwartungen in physikdidaktischen Handlungsfeldern. Skaldokumentation. Version 1.0.
- Park, S. & Oliver, J. S. (2007). Revisiting the Conceptualisation of Pedagogical Content Knowledge (PCK): PCK as a Conceptual Tool do Understand Teachers as Professionals. *Research in Science Education*, 38(3), 261-284.
- Ruiz-Primo, M. A. & Furtak, E. M. (2004). *Informal formative assessment of students' understanding of scientific inquiry*. CSE Report 639. Los Angeles: National Center for Research on Evaluation, Standards, and Student Testing.
- Ruiz-Primo, M. A. & Furtak, E. M. (2007). Informal formative assessment and scientific inquiry: Exploring teachers' practices and student learning. *Educational Assessment*, 11(3-4), 237-263.
- Sadker, M. & Cooper, J. M. (1972). What do we know about microteaching? *Educational Leadership*, 29(6), 547-551
- Schrader, F. W. (2009). Anmerkungen zum Themenschwerpunkt Diagnostische Kompetenz von Lehrkräften. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 23 (3-4). 237-245.
- Schrader, F. W. & Helmke, A. (1987). Diagnostische Kompetenz von Lehrern: Komponenten und Wirkungen. *Empirische Pädagogik*, 1, 27-52.
- Schrader, F.W. & Helmke, A. (2001). Alltägliche Leistungsbeurteilung durch Lehrer. In Weinert, F. E. (Hrsg.), *Leistungsmessungen in Schulen* (S. 45-58). Weinheim: Beltz.
- Spinat, B. (2005). Akkuratheit der Einschätzung von Schülermerkmalen durch Lehrer und das Konstrukt der diagnostischen Kompetenz. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 19, 85-95.
- Südkamp, A., Möller, J. & Pohlmann, B. (2008). Der simulierte Klassenraum. Eine experimentelle Untersuchung zur diagnostischen Kompetenz. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 22, 261-276.
- Shulman, L. S. (1987). Knowledge and teaching: Foundations of the new reform. *Harvard Educational Review*, 57(1), 1-22.
- Weinert, F. E. (2000). Lehren und Lernen für die Zukunft – Ansprüche an das Lernen in der Schule. *Pädagogische Nachrichten Rheinland-Pfalz*, 2, 1-16.
- Wiesner, H., Schecker, H. & Hopf, M. (2011). *Physikdidaktik kompakt*. Köln: Aulis.

Ein Testinstrument zur Analyse von Schülervorstellungen über Energie

Julia Behle*, Thomas Wilhelm*

*Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str.1, 60438 Frankfurt
behle@em.uni-frankfurt.de, wilhelm@physik.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

Schülervorstellungen zur Energie haben sich sowohl im Bereich der Assoziationen als auch in den darunter liegenden Rahmenkonzepten innerhalb der letzten 30 Jahre gewandelt. Dies zeigen Vergleiche zwischen Untersuchungen der Sichtstruktur in den Assoziationen (vgl. z.B. Duit [1] und Crossley & Starauscheck [2]) sowie der Tiefenstruktur, d.h. den Rahmenkonzepten (vgl. Watts [3] und Behle & Wilhelm [4]). So hat sich beispielsweise die vorher vorherrschende Primärassoziation von Energie als einer Art Treibstoff zu einer Assoziation mit elektrischem Strom gewandelt. Ebenso zeigten in Interviews befragte Schülerinnen und Schüler eine kontextabhängige Koexistenz mehrerer Rahmenkonzepte [4], so dass dies bei deren qualitativer und quantitativer Untersuchung grundsätzlich berücksichtigt werden muss. Im Rahmen einer geplanten Untersuchung zur möglichen Veränderung von Schülerrahmenkonzepten durch eine außerschulische Lerngelegenheit [5] wurde nun ein Testinstrument zur Analyse von Rahmenkonzepten zur Energie entwickelt, das diese Rahmenbedingungen berücksichtigt. Die Items der Fragebögen wurden mit Hilfe von Aussagen vorher durchgeführter Schülerinterviews erstellt und werden dann mit Hilfe einer qualitativen Schülerbefragung inhaltlich validiert. Dazu wurden die Schülerinnen und Schüler während der Bearbeitung des Fragebogens mit der Methode des Lauten Denkens befragt und ihre Antworten und Erläuterungen mit Hilfe eines zuvor entwickelten Kodiermanuals ausgewertet.

1. Motivation

Beim ersten Umgang mit einem Lerngegenstand sind Schülervorstellungen eine relevante, eigene Bewertungsgrundlage für Schülerinnen und Schülern, mit der sie sich ihr weiteres Wissen konstruieren. Dies gilt auch für das für den gesamten naturwissenschaftlichen Unterricht zentrale Basiskonzept „Energie“ und in der Schule insbesondere im Anfangsunterricht. Auch bei einer außerschulischen Lerngelegenheit kann es häufig zum Erstkontakt mit bestimmten Lerngegenständen kommen, zumal dort seltener in formellem Rahmen gelernt wird. Dies ist zum Beispiel bei vielen Schülerinnen und Schülern der Fall, die an dem Workshop „Neue Technologien“, der im Rahmen des berufsorientierenden Projekts „MINT – die Stars von Morgen“ in Science Centern in ganz Hessen durchgeführt wird, verschiedene Aspekte der Energietechnik regenerativer Energiequellen kennenlernen [5]. Aufgrund des alten hessischen Lehrplans für Haupt- und Realschulen kommen viele der Teilnehmerinnen und Teilnehmer im Rahmen des Workshops zum ersten Mal mit dem Themenkomplex „elektrische Energie“ außerhalb ihrer Alltagserfahrungen in Kontakt. Ziel des Workshops ist es daher unter anderem, ein physikalisch anschlussfähiges Energiekonzept anzuregen. In diesem Rahmen erscheint es sinnvoll, die aktuellen, vorhandenen Rahmenkonzepte von Schülerinnen und Schülern vor Besuch des Workshops durch einen Prätest zu erheben und diese mit einem

Posttest nach dem Workshopbesuch zu vergleichen, um die Frage zu klären, ob sich Schülervorstellungen durch eine außerschulische Lerngelegenheit positiv, also in Richtung physikalisch anschlussfähigerer Rahmenkonzepte, beeinflussen lassen.

Da Replikationsstudien aus den Jahren 2001 [6] und 2009 [2] zum Assoziationstest von Duit [1] ergaben, dass sich die Assoziationen von Schülerinnen und Schülern von den klassischen Treibstoffen weg hin zu einer stärkeren Assoziation mit elektrischem Strom gewandelt hatten, lag die Vermutung nahe, dass sich ebenso Veränderungen in der Tiefenstruktur der Schülervorstellungen, den Rahmenkonzepten, zeigen könnten. Eine weitere Replikationsstudie aus dem Jahr 2017 [4] zeigte eine Verstärkung dieses Trends und ebenso das häufigere Auftreten von Begriffen aus den Themenbereichen „Erneuerbare Energie“ und „Energiespeicherung“.

Ebenso deutet sich aufgrund anderer Untersuchungen von Rahmenkonzepten [7+8+9] und der Beschreibung des Phänomens des fragmentierten Wissens („Knowledge in pieces“) [10], das auch mit den Phänomenen Kompartimentalisierung [11] oder Erklärungsvielfalt [12] verwandt ist, an, dass Schülerinnen und Schüler kontextabhängig unterschiedliche Rahmenkonzepte verwenden könnten.

Diesen neueren Erkenntnissen soll bei der Entwicklung des Testinstruments zur Ermittlung von Schülervorstellungen über Energie Rechnung getragen

werden. Da sich in einer neueren Interviewstudie gezeigt hat, dass sich die Rahmenkonzepte von Schülerinnen und Schülern durchaus gewandelt haben könnten [4], liegt es nahe, die Items, die auch für Schülerinnen und Schüler ohne unterrichtliches Vorwissen geeignet sein sollen, auf Basis von Schüleraussagen zu entwickeln und durch Schülerinterviews zu validieren.

2. Voruntersuchungen

Zur Ermittlung des aktuellen Stands der Schülervorstellungen zur Energie wurden zunächst zwei Vorstudien durchgeführt. Zum einen fand eine Replikationsstudie des Assoziationstest zum Begriff Energie zu Duit [1] und zu Crossley & Starauscheck [2] statt, zum anderen wurde eine qualitative Interviewstudie zur Ermittlung der aktuellen Rahmenkonzepte zum Energiebegriff durchgeführt [4] und diese mit den originalen Rahmenkonzepten von Watts [3] verglichen. Diese Interviewstudie diente ebenso dem Zweck, Schüleraussagen zu verschiedenen Kontexten im Themenbereich Energie zu generieren, um diese bei der Entwicklung von Items für das Testinstrument nutzen zu können (vgl. Abb. 1 für den Verlauf der Studie).

2.1 Assoziationen

Die spontan geäußerten Assoziationen von Schülerinnen und Schülern gewähren einen guten Einblick in die Kontexte, in denen ein bestimmtes physikalisches Konzept in den Alltagsvorstellungen verankert ist. Gleichsam lassen sich erste Rückschlüsse auf die Natur der darunterliegenden Rahmenkonzepte zu, weswegen Assoziationsstudien oft einen ersten Schritt in der Schülervorstellungsforschung darstellen. Der Assoziationstest der Vorstudie basierte hier auf analogen, leicht reduzierten Fragen zur Assoziationsstudie von Duit [1]. Dabei wurden die Teilnehmenden nach spontan assoziierten Begriffen gefragt und ebenso um Beispiele und Beschreibungen gebeten. Die Stichprobe ($n = 82$) lag dabei leicht unter den beiden anderen Assoziationsstudien. Es wurden dabei Schülerinnen und Schüler der Jahrgangsstufen 8 und 9 aus hessischen Haupt- und Realschulen befragt, die bei dem außerschulischen Projekt „MINT – die Stars von Morgen“ teilgenommen haben.

Es zeigte sich dabei, dass sich der Trend weg von der Assoziation mit Treibstoffen fortsetzt, da diese lediglich von einem einzigen Teilnehmenden genannt wurde, was ein signifikant niedrigeres Niveau als bei Duit ist. Stattdessen liegt die Nennung des Begriffs „elektrischer Strom“ mit 71 % signifikant über der Nennungshäufigkeit bei Duit und setzt so

den Trend fort, der schon 2009 von Crossley und Starauscheck gefunden wurde. Neu ist hingegen das verstärkte Auftreten von Assoziationen mit den Kontexten „Regenerative Energiequellen“ (insgesamt 19 %) und „Energiespeicherung“ (7 %). Vergleicht man die medial-politischen Rahmenbedingungen von 1985 (Stichwort Ölkrise) mit denen von 2015/16 (Stichwort Energiewende), so bietet sich der Schluss an, dass sich der Einfluss dieser Rahmenbedingungen auch in den vorhandenen Schülerassoziationen widerspiegelt. Eine Auswahl der jeweils acht häufigsten Nennungen mit relativer Häufigkeit findet sich in Tab. 1.

2.2 Rahmenkonzepte

Die Analyse der Tiefenstruktur der Schülervorstellungen wurde in erster Linie durch qualitative Interviewstudien durchgeführt, die im Ergebnis verschiedene Rahmenkonzepte der Schülerinnen und Schüler zur Energie (engl. „Energy Frameworks“) vorstellten. Diese „Frameworks“ fassen häufig verwendete Argumentations-, Erklärungs- und Gedankenmuster von Schülerinnen und Schülern zu übergeordneten Rahmenkonzepten zusammen, die durch verbindende Aspekte definiert werden. Je nach Alter und Untersuchungsrahmen können die Definitionen der Frameworks sehr alltagsnah oder auch stärker curricular orientiert ausfallen [13]. Ebenso können, je nach Untersuchungsrahmen, gesellschaftlich orientierte Aspekte wie Umweltwissen oder gesellschaftliche Implikationen [9] eine Rolle spielen. Da der Untersuchungsrahmen der Studie ein außerschulischer, informeller Lernort mit vielen Teilnehmenden ohne unterrichtliche Vorkenntnisse ist, wurden als Basis für die Studie die sieben Energy Frameworks von Watts [3] herangezogen, die sich auf rein physikalisch-fachliche Aspekte, losgelöst von etwaigen Curricula und Lernfortschritten, fokussieren.

Aus den zentralen Aspekten der Energy Frameworks von Watts wurde deduktiv im Rahmen einer zweiten Vorstudie durchgeführten leitfadengestützten Interviewstudie über 15 Interviews [4] ein Kodiermanual mit sieben Kategorien entwickelt. Dieses wurde dann induktiv um zwei weitere Kategorien mit korrespondierenden Rahmenkonzepten erweitert, so dass letztlich neun Rahmenkonzepte definiert werden konnten:

- *Anthropozentrische Energie*: Energie ist eine Art Lebensenergie, die Lebewesen besitzen. Hierunter fällt auch das gefühlte „Energie haben“.
- *Funktionale Energie*: Energie tritt nicht auf natürlichem Weg auf, sie ist von Menschen für



Abb. 1: Design der Studie

Menschen gemacht und für ein modernes Leben unabdingbar.

- *Produzierte Energie*: Energie ist ein Nebenprodukt von Vorgängen, sie wird zusätzlich zum eigentlichen Prozess emittiert, es kann zu einer Zusatzenergie kommen.
- *Energie als Aktivität*: Energie ist nur in Vorgängen vorhanden, diese Aktivitäten werden Energie gleichgesetzt.
- *Energie als Zutat*: Energie ist ein inerter Inhaltsstoff von Dingen, sie lässt sich nur durch Trigger (z.B. essen) aus den Dingen auslösen und nutzbar machen.
- *Gelagerte Energie*: Energie ist in Dingen vorhanden bzw. gespeichert. Sie kann in verschiedenen Formen auftreten und lässt sich verbrauchen, um etwas zu bewirken.
- *Transferierte Energie*: Energie kann unterschiedliche Erscheinungsformen haben, die jedoch gleichwertig und ineinander umwandelbar sind. Sie lässt sich von System zu System transferieren.
- *Energie als Katalysator/Antrieb (neu)*: Mit Energie lassen sich Vorgänge antreiben oder initiieren. Sie ist dabei trägerlos, kann aber eine Form besitzen (z.B. Feuer).
- *Partiell transferierte Energie (neu)*: Energie kann in verschiedenen Formen auftreten. Diese müssen nicht gleichwertig sein und lassen sich lokal ineinander umwandeln, die Umwandlungsketten können aber unterbrochen werden.

Zu erwähnen sei in diesem Zusammenhang, dass zwei der Rahmenkonzepte aus der Arbeit von Watts, nämlich Energie als Aktivität und Energie als Zutat, nur noch schwerlich abbildbar waren und sich lediglich durch zwei, beziehungsweise drei Aussagen in den 15 Interviews repräsentiert fanden. Ebenso zeigte sich in dieser Studie die aus der Literatur zu erwartende Erklärungsvielfalt oder Fragmentierung der verwendeten Rahmenkonzepte je nach Kontext. So verwendeten 13 von 15 Teilnehmenden kontext-

abhängig Erklärungsmuster, die mindestens zwei verschiedenen Rahmenkonzepten zuzuweisen waren.

3. Methodisches Vorgehen

3.1 Zielsetzung und Forschungsfragen

Ziel der Studie ist es, die aktuell vorhandenen Schülerrahmenkonzepte auch quantitativ analysieren zu können und ebenso mögliche Aussagen über den Einfluss eines außerschulischen Workshops zum Thema Energie auf die vorhandenen Rahmenkonzepte treffen zu können. Es gilt daher, folgende Forschungsfragen zu beantworten:

- *F1: Welche Schülervorstellungen oder Rahmenkonzepte haben Schülerinnen und Schüler heute?*
- *F2: Wie verändern sich diese Vorstellungen und Konzepte durch den Besuch eines außerschulischen Workshops zur Energie?*

Dabei gilt es ein Testinstrument zu entwickeln, das nicht nur das Vorhandensein von verschiedenen Rahmenkonzepten quantitativ ermitteln können soll, sondern gleichzeitig explizit die Möglichkeit zur Koexistenz verschiedener Rahmenkonzepte berücksichtigt und für Schülerinnen und Schüler ohne unterrichtliche Vorerfahrung geeignet sein soll.

3.2 Rahmenbedingungen

Aufgrund der Zielsetzung der Studie ergibt sich ein Untersuchungsrahmen im Prä-Post-Design, weswegen zwei Testhefte A und B entwickelt wurden, die in beliebiger Reihenfolge verwendet werden können sollen. Dies bietet sich an, um Effekte der Testwiederholung zu vermeiden, da aufgrund des zeitlichen Rahmens des Projekts die Testzeitpunkte recht nah beieinander liegen. Da es zu erwarten ist, dass die verwendeten Rahmenkonzepte seitens der Schülerinnen und Schüler stark kontextabhängig sein werden, war zudem zu berücksichtigen, dass beide Testhefte inhaltlich und kontextuell äquivalent sein sollten, ohne dabei völlig identisch zu sein. Gleichsam wurde der Tatsache Rechnung getragen werden, dass die Testpersonen aller Voraussicht nach keine bis

Klassenstufe 6, Gymnasium (Duit, 1985) (n = 147)		Klassenstufe 9, Gymnasium (Crossley, 2008) (n = 126)		Klassenstufe 9, Hauptschule (Crossley, 2008) (n = 111)		Vergleichsgruppe Workshop RS/HS 8/9 2015/16 (n = 82)	
Elektrischer Strom	44%	Elektrischer Strom	52%	Elektrischer Strom	68%	Elektrischer Strom	71%
Öl	18%	Mechanische Energie	32%	Kraft	36%	Licht	13%
Energie sparen	14%	Wärmeenergie	29%	Sonne	26%	Bewegung	13%
Licht	14%	Wärme	23%	Wärme	26%	Solar(energie), Sonnenenergie	10%
Kraft	12%	Kraft	21%	Wasser	24%	Kraft	9%
Sonne	12%	Elektrische Energie	21%	Sport	16%	Erneuerbare Energie	9%
Benzin	10%	Chemische Energie	20%	Licht	8%	Sonne	9%
Wasser	10%	Licht	14%	Atomenergie	6%	Akku/Batterie	7%

Tab. 1: Übersicht über die acht häufigsten Assoziationen bei Duit [1] und Crossley [3] im Vergleich zur Workshopgruppe

eher wenig Vorerfahrung aus dem Unterricht mitbringen werden, weswegen die Kontexte an Alltagssituationen (z.B. Aufladen eines Handyakkus oder Fahren eines Fahrrads mit eingeschaltetem Dynamo) orientiert wurden.

3.3 Struktur der Testhefte

Beide Testhefte bestehen aus einer allgemeinen, quasi kontextfreien Einleitung und einem kontextualisierten Hauptteil. Dabei besteht die Einleitung aus allgemeinen Aussagen und Definitionen zum Begriff Energie, die Schülerinnen und Schüler zustimmend, ablehnend oder neutral bewerten können. Der Hauptteil besteht aus elf Items, die aus einem Gesamtitempool von 19 Items stammen. Diese Items bestehen aus je einer Beschreibung eines konkreten Kontextes, sowie verschiedenen Aussagen, die jeweils mit „richtig“ oder „falsch“ bewertet werden sollen. Die Zuordnung der Zustimmung oder Ablehnung einer Testperson zu entsprechenden Rahmenkonzepten erfolgt schließlich hauptsächlich über Kombinationen von Aussagen und seltener über Einzelaussagen.

3.4 Entwicklung von Items

Die Grundlage für die Entwicklung der Items in den Testheften stellten in erster Linie die Aussagen der Schülerinnen und Schüler aus der zuvor durchgeführten Interviewstudie dar. Diese wurden bei Bedarf durch zentrale Aussagen der neun Rahmenkonzepte ergänzt. Dies stellte sich vor allem bei den beiden in der Interviewstudie kaum noch abbildbaren Rahmenkonzepten „Energie als Aktivität“ und Energie als Zutat“ als notwendig heraus.

Beispielhaft für die Entwicklung von Aussagen aus der Einleitung seien hier ein Ausschnitt aus einem Schülerinterview (M, 12 J., 6. Kl. Gym.) und die daraus entwickelten Items dargestellt:

S: „Energie kann auf jeden Fall nicht vernichtet werden und neu erschaffen werden und, ähm, es wandelt nur seine Form.“

Daraus entstanden zwei Items:

- Energie kann man **nicht** vernichten oder ver-

brauchen.

- Energie lässt sich umwandeln, sie kann ihre Form verändern.

Abb. 2 zeigt exemplarisch das Item „Ventilator“ mit dem Kontext eines solarbetriebenen Ventilators. In diesem Beispiel führt eine Kombination der Aussagen 3 und 7 direkt zum Rahmenkonzept der transferierten Energie, da hier ein kompletter Energietransfer mit Energieumwandlung angedeutet wird. Eine zusätzliche Zustimmung zu den Aussagen 1 und 5 oder beiden schränkt die Zuordnung des Rahmenkonzepts „transferierte Energie“ nicht ein, da die Aussagen diesem Konzept nicht widersprechen. Wird im Vergleich dazu beispielsweise Aussage 3 mit den Aussagen 5 und 6 kombiniert, resultiert dies wiederum in einer Zuweisung des Rahmenkonzepts „partiell transferierte Energie“, da hier zwar ein Energietransfer stattfindet, dieser aber bei der „Ankunft“ der Energie am Ventilator endet. Auch eine zusätzliche Zustimmung zu Aussage 1 führt hier zu keiner veränderten Zuweisung.

3.5 Inhaltsvalidierung

Da die Items aus den Aussagen einer Auswahl von Schülerinnen und Schülern aus der Interviewstudie entwickelt wurden, werden diese zunächst mit Hilfe einer weiteren Interviewstudie inhaltsvalidiert. Die Inhaltsvalidierung wurde für Testheft „A“ mit fünf Personen zwischen 11 und 14 Jahren in Einzelinterviews mit der Methode des „Lauten Denkens“ durchgeführt. Hierfür sollen die Testpersonen jeweils ein Testheft bearbeiten und währenddessen ihre Gedankenprozesse verbal mitteilen. Die Transkripte dieser Interviews werden deduktiv mit Hilfe des vorhandenen Kodiermanuals einer qualitativen Inhaltsanalyse unterzogen. Ziel der Analyse ist es, den Aussagen in den Interviews zu den bearbeiteten Items wiederum Rahmenkonzepten zuweisen zu können. Ein Item ist dann inhaltsvalid, wenn Interview und Test zum selben Ergebnis kommen. Stimmen die Ergebnisse aus Interview und Test nicht überein, so kam es bei diesem Item zu Ungenauigkeiten oder Diskrepanzen. Als Ungenauigkeit wer-

Du willst einen kleinen elektrischen Ventilator mit einer Solarzelle betreiben. Kreuze an, welche Aussagen du für richtig und welche du für falsch hältst!	Richtig	Falsch
1) Die Solarzelle fängt Energie von der Sonne auf und leitet diese an den Ventilator weiter.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2) Die Solarzelle macht aus der Sonnenenergie Strom. Die Energie wird dabei verbraucht und ist dann weg.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3) Die Energie der Sonne wird durch die Solarzelle umgewandelt in elektrische Energie, die dann zum Ventilator fließt.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
4) Die Bewegung wird allein durch Strom erzeugt. Das hat nichts mit Energie zu tun.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
5) Die Bewegung des Ventilators wird durch elektrische Energie angetrieben.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6) Der Ventilator selbst dreht sich nur und hat keine Energie.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
7) Der Ventilator hat Bewegungsenergie. Diese entsteht durch Umwandlung von elektrischer Energie.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Abb. 2: Beispielitem „Ventilator“

den dabei geäußerte Probleme beim Verstehen des Textes sowie Zuordnungen eines zusätzlichen Rahmenkonzepts verstanden, das von der Testperson im Interview nicht verwendet wurde, während eine Diskrepanz eine falsche Zuordnung von Rahmenkonzepten oder ein von der Testperson falsch eingeordneter Kontext bedeutet.

Kommt es im Prozess der Inhaltsvalidierung zu Ungenauigkeiten, so wird das Item zunächst überarbeitet, bei Diskrepanzen ist, abhängig von der Schwere und Häufigkeit der Diskrepanz zusätzlich zu prüfen, ob das Item verworfen und durch ein anderes ersetzt werden muss.

4. Ergebnisse der Inhaltsvalidierung

Bisher wurden zehn Items des Testhefts "A", sowie die Einleitung analysiert. Dabei wurden fünf Schülerinnen und Schüler der Jahrgangsstufen 6 bis 9 (Alter 11-14 Jahre) in Einzelinterviews von 25 bis 45 Minuten Dauer interviewt, während sie das Testheft bearbeiteten. Dabei kam es bei sechs Items zu leichten Ungenauigkeiten, bei drei Items zu Diskrepanzen und bei zwei Items zu exakter Übereinstimmung.

Als Ursache der Ungenauigkeiten stellte sich in erster Linie Überlesen von Schlüsselwörtern oder Probleme mit der doppelten Verneinung heraus. So hatten zwei der Testpersonen regelmäßig Schwierigkeiten damit, eine Verneinung in einer Aussage zu erkennen, wodurch durch Zustimmung im Test versehentlich ein weiteres Rahmenkonzept zugewiesen werden konnte. Ebenso waren in der ursprünglichen Version der Items statt "Richtig" und "Falsch" auch die Auswahlmöglichkeiten "Ja" und "Nein" gegeben, wodurch das Problem der doppelten Verneinung verstärkt wurde.

Beispiel aus dem Interview mit einer Schülerin, 12 J:

- Kontext: *Lena fährt nachts auf dem Fahrrad und hat einen Dynamo eingeschaltet, um damit die Lampen ihres Fahrrads zu betreiben.*
- Aussage Nr. 3 des Items: *Der Dynamo läuft beim Fahrradfahren einfach mit. Auf Lena hat das keinen Einfluss.*
- S: *"Doch, das hat einen Einfluss auf Lena, denn [...] der Dynamo, man muss halt etwas mehr in die Pedale treten, damit das Dynamo diese Energie davon aufnimmt. Also ja." (Schülerin kreuzt Antwortmöglichkeit "Ja" an)*

Auch für Diskrepanzen ergaben sich das Überlesen oder das ungenaue Lesen von Begriffen als mögliche Ursachen. So kam es vereinzelt auch durch optische Ähnlichkeit zu anderen, alltagsnahen Begriffen zu Verständnisproblemen.

Beispiel aus dem Interview mit einem Schüler, 12 J:

- Aussage des Items: *Es werden weder Strom noch Energie verbraucht. Die Energie wird zu Hause in den Geräten lediglich in eine andere Form übertragen.*

- S: *„Die Energie wird zu Hause in den Gärten lediglich in eine andere Form übertragen. Ich glaub, das ist ganz großer Blödsinn. Ich glaube nicht, dass das irgendwas mit dem Garten zu tun hat.“*

Ebenso trat an einer Stelle des Testhefts ein Reihungseffekt auf, da die kontextuelle Ähnlichkeit der beiden Items größer war als ursprünglich angenommen. So kam es in einem Interview beispielsweise bei dem Item „Ventilator“ (siehe Abb. 2) bei den Aussagen 5 und 6 zum Gedankensprung zum zuvor bearbeiteten Item (Kontext Windenergieanlage):

- S (zu Aussage 5: Die Bewegung des Ventilators wird durch elektrische Energie angetrieben): *Nein, der Ventilator wird durch Turbinen mit Wind angetrieben.*
- S (zu Aussage 6: Der Ventilator selbst dreht sich nur und hat keine Energie): *Weil, er ist ja an keinen Strom angeschlossen, deswegen hat er keine Energie.*

Ebenso kam es zu Missverständnissen und in Folge dessen zu Diskrepanzen, wenn die Rahmenbedingungen von Aussagen in Items nicht absolut scharf umrissen waren. Beispielsweise führt im zuvor erwähnten Kontext von Lenas nächtlicher Fahrt auf dem Fahrrad die Aussage „Ohne Dynamo müsste Lena insgesamt weniger Energie aufwenden“ zu zwei verschiedenen Interpretationsmöglichkeiten, so lange nicht zusätzlich erwähnt wird, dass Lena mit oder ohne Dynamo bei gleichem Tempo weiterfährt.

5. Fazit und Ausblick

Trotz der festgestellten Ungenauigkeiten und Diskrepanzen lässt sich festhalten, dass die bisher analysierten Items grundsätzlich dazu in der Lage sind, die Rahmenkonzepte von Schülerinnen und Schülern zu erfassen. Die Interviewbefragung mit der Methode des „Lauten Denkens“ und der nachfolgenden qualitativen Inhaltsanalyse der Interviews hat sich dabei als funktionales Mittel herausgestellt, der Ursache von inhaltlichen Validitätsproblemen relativ einfach auf den Grund zu gehen, um noch vor einer Pilotierung zielgerichtet Anpassungen an dem Testinstrument vorzunehmen. Die entsprechenden Items und das Gesamtdesign des Testhefts konnten so direkt verbessert werden. In einem nächsten Schritt wird nun Testheft „B“ analog validiert und angepasst, ebenso sollen die beiden Hefte im Nachgang verglichen und somit auf Äquivalenz überprüft werden. Mit diesem Testinstrument soll dann letztlich in einer Prä-Post-Studie geklärt werden, ob eine außerschulische Lerngelegenheit dazu in der Lage ist, (positive) Veränderungen in den Rahmenkonzepten der Teilnehmenden auszulösen.

6. Literatur

- [1] Duit, R. (1986): Der Energiebegriff im Physikunterricht. Habilitationsschrift. Universität Kiel.
- [2] Watts, D. (1983): A study of alternative frameworks in school science. Dissertation, University of Surrey.
- [3] Crossley, A.; Hirn, N.; Starauschek, E. (2009): Schülervorstellungen zur Energie – Eine Replikationsstudie. In: Nordmeier, V., Grötzebauch, H. (Hrsg.), Didaktik der Physik - Bochum 2009, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin
- [4] Behle, J; Wilhelm, T. (2017): Aktuelle Schülerrahmenkonzepte zur Energie. In: PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung.
<http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/780/922>
- [5] Behle, J; Wilhelm, T. (2016): Energie für die Insel – Ein Experimentierworkshop mit „Neuen Technologien“. In: PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung.
<http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/678/815>
- [6] Burger, J. (2001). Schülervorstellungen zu „Energie im biologischen Kontext“ – Ermittlungen, Analysen und Schlussfolgerungen. Dissertation Universität Bielefeld.
- [7] Fischbein, E; Stavy, R.; Ma-Naim, H. (1989): The psychological study of naive impetus conceptions. In: Science Education, 66, 4, S. 623-633.
- [8] Clough, E.E.; Driver, R. (1986): A study of consistency in the use of student's conceptual frameworks across different task contexts. In: Science Education 70, 4, S.473-796.
- [9] Boyes, E.; Stanisstreet, M. (1990): Pupil's ideas concerning energy sources. International Journal of Science Education Vol.12, Iss. 5
- [10] diSessa A. (1988): Knowledge in pieces. In: Forman, G.; Pufall, P., Constructivism in the Computer Age, Hillsdale, NJ: Erlbaum, S. 49–70
- [11] Mandl, H.; Gruber, H.; Renkl, A. (1993a). Lernen im Physikunterricht - Brückenschlag zwischen wissenschaftlicher Theorie und menschlichen Erfahrungen. In: Kuhn, W. (Hrsg.): Didaktik der Physik, Vorträge Physikertagung 1993 Esslingen (Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik), S. 21 - 36
- [12] Hartmann, S. (2004). Erklärungsvielfalt, Studien zum Physiklernen, Band 37, Logos-Verlag, Berlin
- [13] Liu, X.; McKeough, A. (2005): Developmental growth in students' concept of energy: Analysis of selected items from the TIMSS database. In: J. Res. Sci. Teach., 42: S. 493-517

Naturwissenschaftliches Denken im Lehramtsstudium

– computeradaptive Leistungsmessung

Volker Brüggemann, Volkhard Nordmeier

Freie Universität Berlin, Didaktik der Physik, Arnimallee 14, 14195 Berlin
volker.brueggemann@fu-berlin.de, volkhard.nordmeier@fu-berlin.de

Kurzfassung

Die Durchführung von Leistungstests zur Kompetenzmessung hat häufig das Problem eines sehr hohen Zeitaufwands. Als Folge werden Kompetenzen zwar in Forschungsprojekten umfangreich erhoben und untersucht, jedoch kaum zur Evaluation und inhaltlichen Sicherung der Lehrqualität an Hochschulen herangezogen. Computeradaptive Messverfahren ermöglichen eine weitaus effizientere (das bedeutet bei gleicher Messgenauigkeit zeitlich kürzere) Messung und somit einen praktikablen Einsatz von Leistungstests in Evaluationsszenarien.

Im ersten Teil dieses Beitrags werden das Projekt ValiDiS sowie das dort eingesetzte Instrument zur Kompetenzmessung im Bereich *naturwissenschaftlichen Denkens* vorgestellt. Im Anschluss daran werden adaptive Testverfahren vorgestellt. Im dritten und vierten Teil werden die bereits erfolgte Umsetzung eines computeradaptiven Multistage-Tests sowie die geplante Testerprobung skizziert.

1. Einleitung

Im Projekt ValiDiS (Kompetenzmodellierung und -erfassung: Validierungsstudie zum wissenschaftlichen Denken im naturwissenschaftlichen Studium) wird die Kompetenzentwicklung im Bereich *naturwissenschaftlichen Denkens* im Lehramtsstudium untersucht. Es schließt damit an das Projekt KoWADiS (Hartmann et al., 2015a) an. Im Zuge beider Projekte wird naturwissenschaftliches Denken als eine Kompetenz aufgefasst, die sich im Bereich der Erkenntnisgewinnung verorten lässt. Zu beobachten ist diese Kompetenz demnach in wissenschaftlichen Untersuchungs- und Modellierungsprozessen (Straube, 2016). *Naturwissenschaftliches Denken* wird im verwendeten Kompetenzmodell in sieben Handlungsfacetten eingeteilt (Tab. 1), die aus der Kombination von bestehenden Modellen zu Erkenntnisgewinnungsprozessen (Mayer, 2007) und Modellierungsprozessen (Upmeier zu Belzen & Krüger, 2010) gewonnen wurden.

Forschungsfragen formulieren	Hypothesen generieren	Untersuchungen planen	Daten auswerten und interpretieren
Zweck von Modellen bestimmen	Testen von Modellen	Ändern von Modellen	

Tabelle 1: Handlungsfacetten naturwissenschaftlichen Denkens

Für die Messung dieser Kompetenz wurde eigens ein Testinstrument entwickelt (Straube, 2016). Dabei

handelt es sich um einen papierbasierten Leistungstest mit Multiple-Choice-Aufgabenformat. Der Aufgabenpool umfasst 63 Items, von denen in verschiedenen Fragebogenversionen stets 21 bearbeitet werden. Das Instrument befindet sich derzeit in der Validierungsphase.

1.1 Aktuelle Validierungsstudien und Ergebnisse

Um die Validität der Testwertinterpretation zu sichern, werden im Projekt ValiDiS eine Reihe verschiedener Evidenzquellen genutzt. Dazu gehören unter anderem Längsschnittstudien, Interventionen, Known-Groups-Vergleiche sowie Untersuchungen zur Prognose in Bezug auf reale Problemsituationen. Im Folgenden werden lediglich die für diesen Beitrag relevanten Studien erwähnt.

Im Längsschnitt wird das Instrument über den Verlauf des Bachelor- und Masterstudiums eingesetzt. Dort wird eine EAP-Reliabilität von .544 (Hartmann, zu Belzen, Krüger & Pant, 2015b) erreicht¹. Es handelt sich derzeit nur um vorläufige Ergebnisse; die Beobachtung im Längsschnitt ist noch nicht in allen Kohorten abgeschlossen. Endgültige Testdaten sowie die inhaltliche Auswertung der Längsschnittstudie stehen daher noch aus. Im Vergleich unterschiedlicher Kohorten im Querschnitt zeigt sich

¹ Dieser Wert ist, wenn man sich nach einschlägigen Faustregeln für die Güte von Testinstrumenten richtet, eher als niedrig einzuordnen. Betrachtet man jedoch andere Leistungstests im Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung, so entspricht er den erreichten Genauigkeiten ähnlicher Instrumente (vgl. z.B. Terzer, 2012 Wellnitz, 2012; Woitkowski, 2015).

aber bereits ein erwartungskonformes Bild der Leistungsverteilungen, so zum Beispiel ein Ansteigen der Leistung im fortschreitenden Studium (Straube, 2016; Hartmann et al., 2015b).

Auch in den noch andauernden Interventionsstudien ließen sich bisher theoretische Erwartungen bestätigen. Die vorläufigen Ergebnisse lassen zudem auf eine ausreichende Sensitivität des Instruments hoffen, um Kompetenzverläufe im Rahmen von einzelnen Lehrveranstaltungen aufzulösen. Hiermit wird der zukünftige Einsatz des Tests in der Lehrevaluation ermöglicht.

Im Rahmen einer kompetenzorientierten Ausbildung an Hochschulen ist es wünschenswert, die eingesetzten Lehrveranstaltungen im Hinblick auf die erreichte Kompetenzförderung zu untersuchen (Wissenschaftsrat, 2008) – nicht nur in Bezug zur strukturellen Güte oder zur Eignung des jeweiligen Lehrpersonals. Leider besteht im Bereich der Kompetenzmessung nach wie vor ein Mangel an einsetzbaren und erprobten Instrumenten (Zlatkin-Troitschanskaia et al., 2015). Das im Projekt ValiDiS nun vorliegende Instrument bietet die Gelegenheit, genau dies in den Naturwissenschaften fachübergreifend zu tun.

1.2 Herausforderungen

Für die Implementierung des Testinstruments in Evaluationsszenarien besteht derzeit eine praktische Hürde, die es zu bewältigen gilt: Der Zeitaufwand einer Messung liegt je nach Proband*innengruppe bei mind. 35 Minuten. Soll eine Veranstaltung in Bezug auf die erreichte Kompetenzförderung evaluiert werden, so müsste der Test in einem Prä-Post-Design mindestens zweimal durchgeführt werden. Werden noch die bei solchen Erhebungen nötigen Zeiträume für die Informierung und Fragen zum ersten Zeitpunkt eingerechnet, so bewegt sich der Zeitaufwand im Bereich von 90 Minuten. Eine freiwillige Teilnahme der Studierenden (zu Kosten ihrer Freizeit) erscheint in diesem Rahmen unwahrscheinlich. Es ist also wünschenswert, den Zeitaufwand pro Messung zu verkürzen, um den Einsatz seitens der Hochschullehrenden ökonomischer und die Teilnahme wahrscheinlicher zu gestalten.

Hierzu kann der Test aber nicht einfach verkürzt und als Kurzversion mit weniger Aufgaben verwendet werden. Wie zuvor erwähnt, fällt die bisher erreichte Messgenauigkeit dem Inhaltsbereich entsprechend aus, sollte aber in keinem Fall weiter gemindert werden. Um eine weiterhin akzeptable Genauigkeit der Messung zu gewährleisten, muss also die Testeffizienz gesteigert werden.

2. Adaptive und klassische Testverfahren

Eine Möglichkeit, um Messinstrumente effizient zu gestalten, ist die Nutzung verschiedener Testverfahren. Eine dieser Optionen sind adaptive, insbesondere computeradaptive Testverfahren (CAT). Inwie-

weit diese eine Steigerung der Testeffizienz ermöglichen, soll im Folgenden skizziert werden.

2.1 Lineare Testverfahren

In klassischen Testverfahren, zum Beispiel bei papierbasierten Fragebögen, wird allen Befragten eine feste Anzahl von Aufgaben in einer festen Reihenfolge präsentiert. Die Menge, Reihenfolge und auch die Auswahl der Aufgaben werden vor der Befragung festgelegt und sind in den meisten Fällen auch für alle Befragten gleich. Werden die so gewonnenen Daten mittels der Item-Response-Theory ausgewertet, so tritt folgender Effekt auf: Im Aufgabenpool zeigt sich eine Spanne von unterschiedlichen Aufgabenschwierigkeiten. Je nach Art und Konstruktion der Fragen kann diese sehr breit sein – ob gewünscht oder nicht. Ebenso verhält es sich mit der Verteilung der Testleistungen (und damit der latenten Fähigkeiten) aller Teilnehmer*innen. Einzelne Aufgaben geben aber nur ein hohes Maß an Information über die einzelnen Personen, wenn Aufgabenschwierigkeit und die Ausprägung der latenten Fähigkeit einander entsprechen. Um eine Befragung möglichst effizient zu gestalten, müssten dementsprechend allen Teilnehmer*innen die geeigneten Aufgaben zugewiesen werden. Im Umkehrschluss folgt daraus, dass in vielen klassischen Testformaten ausnahmslos alle Proband*innen eine ganze Reihe von Aufgaben lösen, die für sie wenig geeignet sind und nur wenig Information liefern.

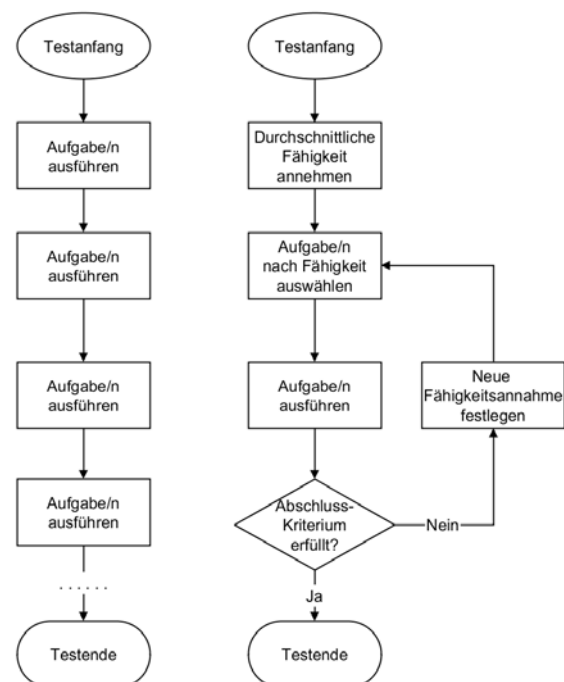


Abbildung 1: Beispielalgorithmen klassischer/linearer (links) und adaptiver (rechts) Testverfahren

2.2 Adaptive Testverfahren

Das Problem der Passung zwischen Proband*in und Aufgabe soll und kann durch computeradaptive Tests (CAT) umgangen werden (SARI et al., 2016). Hier wird, nachdem von einem/r Proband*in eine Aufgabe bearbeitet wurde, die latente Fähigkeit dieser Person geschätzt. Meist geschieht dies mittels ein- bis dreiparametrischer Modelle der Item-Response-Theorie und auf Grundlage von zuvor normierten Aufgabenpools. Die so gewonnene Schätzung der Personenfähigkeit wird genutzt, um als nächstes die bestmöglich passende Aufgabe aus dem Pool zu ziehen (Frey, 2012).

Durch mehrfache Anwendung des Algorithmus kann die Fähigkeitsschätzung im Laufe der Befragung immer genauer durchgeführt und die Auswahl der Aufgaben verfeinert werden (Abbildung 1). Sobald ein vorher definiertes Abschlusskriterium erfüllt wird, ist der Test beendet. Dies kann beispielsweise das Erreichen einer maximalen Testlänge oder einer erwünschten Schätzgenauigkeit sein. Das Instrument reagiert somit auf die einzelnen Personen und passt sich an – es ist adaptiv und maximiert die gewonnene Information pro bearbeiteter Aufgabe. Vergleichsstudien zwischen klassischen und adaptiven Versionen einzelner Instrumente zeigen, dass die adaptive Form auf diese Weise zu deutlichen Erhöhungen der Testeffizienz führt (Weiss, 1982).

2.3 Multistage-Tests

Wie häufig adaptive Tests Fähigkeitsschätzungen durchführen, ist von Instrument zu Instrument unterschiedlich. ‚Echte‘ adaptive Tests, so wie sie ursprünglich entwickelt wurden, führen nach jeder

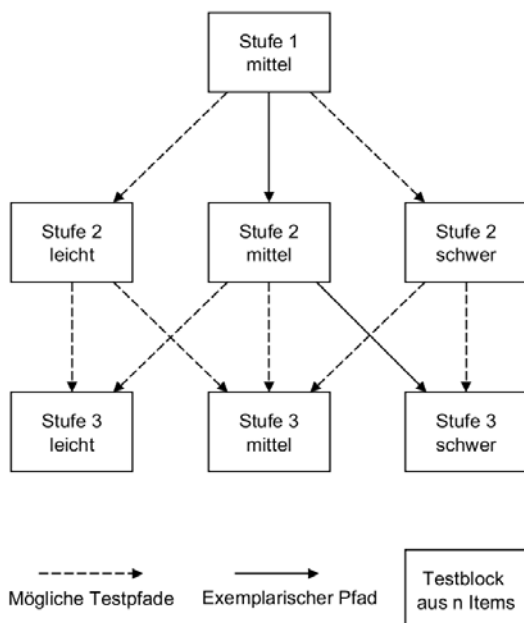


Abbildung 2: Multistage-Tests im 1-3-3 Design mit 3 Stufen und 3 Schwierigkeitsbereichen

einzelnen Aufgabe eine Berechnung durch. Daneben gibt es aber auch Multistage-Tests oder kurz MSTs (Hendrickson, 2007).

Solche Tests bestehen aus einer Reihe von Aufgabenblöcken. Jeder Block besteht aus mehreren Aufgaben in einem bestimmten Schwierigkeitsbereich. Für jeden Bereich gibt es mindestens einen Aufgabenblock, sodass die Blöcke als verschieden schwere Versionen des gesamten Tests agieren und zusammen alle möglichen Fähigkeitsbereiche abdecken. Die Fähigkeitsschätzung wird in solchen Tests nach dem Absolvieren eines einzelnen Blocks durchgeführt, um danach zum nächsten Block weiterzuleiten.

Das Abschlusskriterium wird auch hier nicht zwingend immer gleich gewählt, richtet sich meist aber nach einer vorgesehenen Anzahl von absolvierten Aufgabenblöcken.

Die Gesamtstruktur, also die Menge an Blöcken und die möglichen Pfade zwischen diesen, ist nicht per se festgelegt. Simulations- und Vergleichsstudien verweisen aber auf das sogenannte 1-3-3-Design (Abbildung 2) als eine bewährte Möglichkeit (Zheng & Chang, 2014).

2.4 Vergleich der Testverfahren

Die Entscheidung zwischen linearen Verfahren, CATs und MSTs ergibt sich je nach Anforderung. Im Grunde vereinen MSTs die Vorteile beider anderer Verfahren (SARI et al., 2016): Sie ermöglichen wie lineare Tests die gleichzeitige Messung mehrerer Inhaltsbereiche, erlauben das Zurückspringen zu und Überarbeiten von vorherigen Antworten. Was Gesamtlänge und Messgenauigkeit betrifft, so sind sie eher im Bereich der CATs zu verordnen. Somit sind sie deutlich effizienter als lineare Verfahren.

Der wohl größte Nachteil computeradaptiver Verfahren gilt jedoch auch für MSTs: Es ist notwendig, eine umfassende Itemdatenbank zu generieren, die normiert und IRT-konform ist. Zudem muss je nach Komplexität des Tests und Algorithmus die entsprechend notwendige Infrastruktur aufgebaut werden. Die hierfür notwendigen Server stellen verglichen zu linearen Verfahren einen nicht unerheblichen Aufwand dar. Neben den noch eher geringen Materialkosten ist besonders die Einrichtung und Wartung durch Fachpersonal kostspielig. Auch hier liegen MSTs im Bereich zwischen den anderen Formaten: Es sind weniger Berechnungen nötig als bei CATs, womit auch die entsprechende Rechenleistung geringer ausfällt.

3. Umsetzung eines computeradaptiven Tests

Da für das Vorhaben im Projekt ValiDiS die Effizienzsteigerung als dringend notwendig angesehen wird, überwiegen hier die Vorteile einer adaptiven Version die entsprechenden Nachteile.

Es wurde daher beschlossen, eine solche Anpassung des Instruments umzusetzen.

Die grundlegende Entwicklung wurde im Februar 2018 abgeschlossen und erprobt. Die dafür notwendigen Arbeitsschritte und Designentscheidungen sollen im Folgenden dargelegt werden. Besonders anzumerken ist, dass die Problematik der notwendigen Infrastruktur und technischen Wartung umgangen werden konnte. Es war daher möglich, das neue Testformat in Form einer ‚Website‘ zu realisieren (mehr dazu unter Punkt 3.6).

3.1 Wahl des Testformats

Die Entscheidung des Testformats wurde nach zwei praktischen Gesichtspunkten zu Gunsten eines MSTs getroffen. Zum einen ermöglicht dieser die Bearbeitung mehrerer inhaltlicher Facetten/ Fachbereiche aus dem vorliegenden Itempool. Da das Konstrukt *Naturwissenschaftliches Denken* eindimensional modelliert wird (Straube, 2016), wäre dies nicht zwingend nötig gewesen. Es wurde trotzdem entschieden, dass eine Fähigkeitsschätzung aufgrund mehrerer inhaltlicher Facetten valider erscheint.

Zum anderen war zum Zeitpunkt der Testumsetzung keine ausreichende technische Infrastruktur vorhanden. Zum Zeitpunkt der Entscheidung wurde hier noch von einem nicht unerheblichen Aufwand in Ressourcen und Arbeitszeit ausgegangen. Um diesen zumindest einzugrenzen, erschien ein MST sinnvoller.

3.2 Wahl des Abschlusskriteriums

Es wurden in Bezug auf den Zweck der Neugestaltung zwei mögliche Abschlusskriterien diskutiert: Der Abbruch nach einer definierten Testlänge sorgt dafür, dass bei der Messung von ganzen Gruppen die Zeit möglichst ökonomisch genutzt wird – die Proband*innen benötigen bei gleicher Aufgabenzahl erfahrungsgemäß etwa gleich viel Zeit. Bricht der Test dagegen erst nach einer gewissen Genauigkeit der Schätzung ab, so kann dies vor allem bei Personen mit extremen Ausprägungen erheblich länger dauern. In den Randbereichen der Fähigkeitsverteilung wird weniger Information pro Aufgabe gewonnen. Im vorliegenden Fall würde die resultierende Verlängerung der Befragung noch verstärkt, da ganze Aufgabenblöcke nachgereicht würden. Dafür könnte so eine sehr hohe Genauigkeit für die Schätzung jeder einzelnen Person gesichert werden. Im Endeffekt wurde, wie meist bei MSTs, die Testlänge als Kriterium ausgesucht. Der Grund liegt in dem Fokus auf Gruppenmessung und -vergleich im Gegensatz zur Einzeldiagnostik.

3.3 Erstellung und Normierung des Aufgabenpools

In den Projekten Ko-WADiS und ValiDiS wurden von Anfang an sämtliche Daten mittels IRT ausgewertet. Dementsprechend lag bereits ein vollständig IRT-konformer Aufgabenpool vor. Durch die in Längsschnittbefragungen aggregierten Daten ist zudem bereits eine sichere Normierung der Aufgaben möglich. Die bestehenden Daten werden von den getesteten Modellen (ein- bis dreiparametrisch) am besten durch ein 2PL-Modell beschrieben. Das Konstrukt wird dabei eindimensional betrachtet (s. o.). Da keine signifikanten Hintergrundvariablen identifiziert werden konnten, wird kein Hintergrundmodell verwendet.

3.4 Festlegung der Teststruktur

Die Testlänge richtet sich nach der angestrebten Messgenauigkeit. Adaptive Verfahren erreichen schon bei halber Testlänge oft die gleiche Messgenauigkeit wie die entsprechenden linearen Testversionen (Frey & Ehmke, 2008). Da MSTs bei der Effizienz im Vergleich zu CATs leichte Einbußen verzeichnen, wurde als Ausgangspunkt eine konservativere Entscheidung getroffen und die Länge um etwa ein Viertel reduziert: Von bisher 21 auf 15 Aufgaben. (Je nach Ergebnissen der Pilotierung wird die Testlänge später angepasst.)

Die Pfadstruktur des Tests wurde genau wie die Testlänge anhand einer Recherche festgelegt. Vergleichende Studien kommen zu dem Ergebnis, dass drei Schwierigkeitsbereiche mit drei Teststufen (1-3-3 Format) für eine erfolgreiche Adaption ausreichend sind (Hendrickson, 2007). Daher wurde diese Struktur ausgewählt.

3.5 Konstruktion der Aufgabenblöcke

Die Blockgröße wurde den vorigen beiden Punkten entsprechend auf fünf Aufgaben festgelegt. Die Aufgaben wurden den sieben benötigten Blöcken wie folgt zugewiesen:

Die Schätzung der Aufgabenschwierigkeiten wurde anhand der bisher gesammelten Daten vorgenommen. Für die in den kommenden Befragungen angepeilte Zielgruppe (Physikstudierende) wurde danach aus den bisherigen Daten eine Vorhersage für die Fähigkeitsverteilung durchgeführt. Die Fähigkeitsausprägungen wurden in Terzile eingeteilt. Anhand dieser Grenzen wurde die Zuordnung der Aufgaben in einen leichten, mittleren und schweren Bereich entschieden (Abbildung 3).

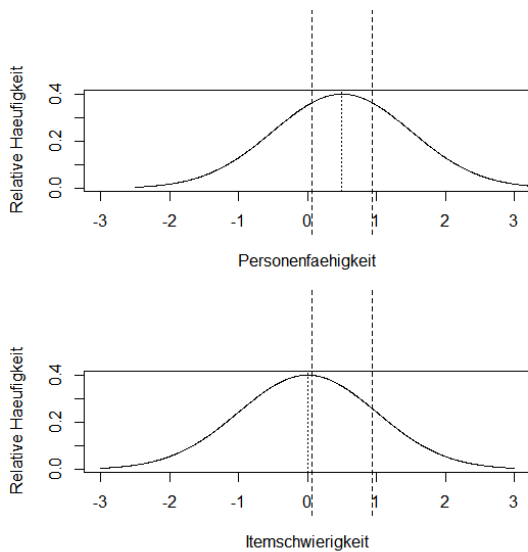


Abbildung 3: Festlegung der Schwierigkeitsbereiche

Im nächsten Schritt wurden die einzelnen Blöcke aus den zur Verfügung stehenden Aufgaben so konstruiert, dass a) die Aufgabenschwierigkeiten innerhalb jeden Blockes möglichst gleichverteilt sind, b) in jedem Block alle Inhaltsbereiche (Physik, Chemie, Biologie) mindestens einmal vertreten sind und c) verschiedene Handlungsfacetten (Tabelle 1) angesprochen werden.

3.6 Implementierung des Testalgorithmus

Ein besonderes Merkmal dieser Testumsetzung ist, dass die technischen Anforderungen stark vermindert werden konnten. Normalerweise würden zwischen den Stufen des Tests in Echtzeit Berechnungen durchgeführt, um die Fähigkeit zu schätzen. Hierzu ist es notwendig, dem mathematischen Modell entsprechend Serverleistung zur Verfügung zu stellen. In diesem Fall jedoch ist die Anzahl der möglichen Testpfade überschaubar: Nach der Durchführung des zweiten Blocks, also zur zweiten und letzten Weiterleitung innerhalb des Tests, wurden zehn Fragen beantwortet. Es ergeben sich damit 1024 mögliche Kombinationen aus richtigen oder falschen Antworten. Die resultierenden Fähigkeitschätzungen wurden nun für alle Kombinationen im Voraus berechnet und gespeichert. Während der tatsächlichen Messung müssen sie daher nur noch ausgelesen und nicht neu errechnet werden. Somit war es möglich, das adaptive Instrument als Webumgebung zu erstellen. Dies erfolgte mit Unterstützung der Applikation tetfolio (<https://tetfolio.fu-berlin.de/>).

3.7 Technische Erprobung

Im Februar 2018 wurde eine erste technische Erprobung des neuen Testformats durchgeführt. Ziel war

die Sicherstellung eines technisch fehlerfreien Ablaufs der Befragung. Es nahmen 32 Physik-Studierende im Mono- und Lehramtsstudium des Fachbereichs Physik am Standort FU Berlin teil. Eine statistische Auswertung der Daten war nicht Ziel dieser Erhebung (da die Schätzung eines IRT-Modells mit 32 Datensätzen nicht sinnvoll ist). Die durchschnittliche Bearbeitungszeit lag bei 25 Minuten.

4. Ausblick

Nach der ersten technischen Umsetzung ist nun zu prüfen, ob das gesetzte Ziel im Projekt erreicht werden kann. Dafür soll das adaptive Testinstrument pilotiert werden. Geplant ist eine einmalige Erhebung von Lehramtsstudierenden der naturwissenschaftlichen Fächer. Die benötigte Stichprobe wird auf $n=350$ geschätzt. Bei einer etwa erwarteten Gleichverteilung auf die drei Schwierigkeitsebenen sollen damit mindestens 100 Bearbeitungen für jedes Item garantiert werden. Diese Grenze wird angesetzt, um eine sichere Schätzung aller Item- und Personenparameter durchzuführen. Die daraus gewonnenen Informationen zur Reliabilität des eigenständig eingesetzten Tests werden als Kriterium verwendet.

Noch ist unklar, ob es sich bei der beschriebenen Version des Tests um die effizienteste Möglichkeit handelt. Wie unter 3.4 und 3.5 dargelegt, wurden Teststruktur und Aufgabenblöcke nach dem vorliegenden Stand internationaler Literatur zusammengestellt. Es bleiben dennoch mehrere offene Punkte:

- Obwohl es in der Literatur am häufigsten zu finden ist, müssen die Blöcke eines MSTs nicht alle gleich lang gewählt werden. Der erste Block kann auch zu Kosten der späteren verlängert werden. Somit ist die erste Einordnung der Personen genauer, kann aber weniger gut nachgesteuert werden. Hier muss je nach konkretem Fall entschieden werden, wie zu verfahren ist.
- Die Testlänge wurde sehr vorsichtig gewählt. Sofern möglich, sollte sie noch weiter eingeschränkt werden.
- Je nach Fähigkeitsverteilung der Zielgruppe kann es sein, dass Aufgaben an den Grenzen der festgelegten Schwierigkeitsbereiche anders eingeordnet werden müssten. Es ist zu prüfen, ob dadurch bei extremen Gruppen signifikante Einbußen der Messgenauigkeit auftreten.

Um die Fragen zu beantworten, sind Vergleiche der alternativen Testzusammenstellungen notwendig. Durch die Vielzahl der möglichen Kombinationen würde dies bei Vergleichsstudien einen erheblichen Aufwand darstellen. Aus diesem Grund sollen stattdessen **Simulationen** eingesetzt werden. Der im Projekt vorliegende Datensatz wird als ausreichend angesehen, um für die verschiedenen denkbaren Strukturen Stichproben zu simulieren und einen

Vergleich anzustellen. Dieses Vorgehen wird als weitaus ökonomischer und in Bezug auf die Belastung der sonst nötigen Proband*innen als ethischer angesehen.

Erste Ergebnisse werden im Herbst 2018 erwartet.

Das Projekt ValiDiS wird im Rahmen des Programms „Kompetenzen im Hochschulsektor“ (Ko-KoHs) durch das BMBF gefördert.

5. Literaturverzeichnis

- Frey, Andreas (2012): Adaptives Testen. In: Helfried Moosbrugger und Augustin Kelava (Hg.): Testtheorie und Fragebogenkonstruktion. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 275–293.
- Frey, Andreas; Ehmke, Timo (2008): Hypothetischer Einsatz adaptiven Testens bei der Überprüfung von Bildungsstandards. In: Manfred Prenzel, Ingrid Gogolin und Heinz-Hermann Krüger (Hg.): Kompetenzdiagnostik. Zeitschrift für Erziehungswissenschaft. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften (Zeitschrift für Erziehungswissenschaft Sonderheft, 8), S. 169–186.
- Hartmann, Stefan; Upmeier zu Belzen, Annette; Krüger, Dirk (2015a): Ko-WADiS Schlussbericht.
- Hartmann, Stefan; Upmeier zu Belzen, Annette; Krüger, Dirk; Pant, Hans Anand (2015b): Scientific Reasoning in Higher Education. In: Zeitschrift für Psychologie 223 (1), S. 47–53. DOI: 10.1027/2151-2604/a000199.
- Hendrickson, Amy (2007): An NCME Instructional Module on Multistage Testing. In: Educational Measurement: Issues and Practice 26 (2).
- Mayer, Jürgen (2007): Erkenntnisgewinnung als wissenschaftliches Problemlösen. In: Dirk Krüger und Helmut Vogt (Hg.): Theorien in der biologie-didaktischen Forschung. Ein Handbuch für Lehramtsstudenten und Doktoranden. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch).
- SARI, Halil Ibrahim; Yahsi-Sari, Hasibe; Corinne Huggins-Manley, Anne (2016): Computer Adaptive Multistage Testing. Practical Issues, Challenges and Principles. In: Eğitimde ve Psikolojide Ölçme ve Değerlendirme Dergisi, S. 388. DOI: 10.21031/epod.280183.
- Straube, Philipp (2016): Modellierung und Erfassung von Kompetenzen naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung bei (Lehramts-)Studierenden im Fach Physik. Berlin: Logos (Studien zum Physik- und Chemielernen, 209).
- Terzer, Eva (2012): Modellkompetenz im Kontext Biologieunterricht - Empirische Beschreibung von Modellkompetenz mithilfe von Multiple-Choice Items. Dissertation. Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät I.
- Upmeier zu Belzen, Annette; Krüger, Dirk (2010): Modellkompetenz im Biologieunterricht. Model competence in biology teaching. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 16, S. 41–58.
- Weiss, David J. (1982): Improving Measurement Quality and Efficiency with Adaptive Testing. In: Applied Psychological Measurement 6 (4), S. 473–492. DOI: 10.1177/014662168200600408.
- Wellnitz, Nicole (2012): Kompetenzstruktur und -niveaus von Methoden naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung. Zugl.: Kassel, Univ., Diss., 2012. Berlin: Logos-Verl. (Biologie lernen und lehren, 2).
- Wissenschaftsrat (2008): Empfehlungen zur Qualitätsverbesserung von Lehre und Studium. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.wissenschaftsrat.de/download/archiv/8639-08.pdf>, zuletzt geprüft am 04.05.2018.
- Woitkowski, David (2015): Fachliches Wissen Physik in der Hochschulausbildung. Konzeptualisierung, Messung, Niveaubildung. Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2015. Berlin: Logos-Verl. (Studien zum Physik- und Chemielernen, 185).
- Zheng, Yi; Chang, hua-hua (2014): Multistage testing, on-the-fly multistage testing, and beyond. In: Ying Cheng und hua-hua Chang (Hg.): Advancing methodologies to support both summative and formative assessments (Chinese American Educational Research and Development Association book series).
- Zlatkin-Troitschanskaia, Olga; Shavelson, Richard J.; Kuhn, Christiane (2015): The international state of research on measurement of competency in higher education. In: Studies in Higher Education 40 (3), S. 393–411. DOI: 10.1080/03075079.2015.1004241.

Design-Based Research: Elektrizitätslehre mit Potenzial und Kontexten EPo-EKo

Liza Dopatka*, Verena Spatz*, Jan-Philipp Burde^x, Thomas Wilhelm^x, Lana Ivanjek^o, Martin Hopf^o, Thomas Schubatzky⁺, Claudia Haagen-Schützenhöfer⁺

*Institut für Physik, Physikdidaktik, Technische Universität Darmstadt, Hochschulstraße 12, 64289 Darmstadt,

^xInstitut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt,

^oÖsterreichisches Kompetenzzentrum für Didaktik der Physik, Universität Wien, Porzellangasse 4, 1090 Wien

⁺Institut für Physik, Physikdidaktik, Karl-Franzens-Universität Graz, Universitätsplatz 5, 8010 Graz

Liza.Dopatka@physik.tu-darmstadt.de, Verena.Spatz@physik.tu-darmstadt.de, burde@physik.uni-frankfurt.de, wilhelm@physik.uni-frankfurt.de, lana.ivanjek@univie.ac.at, martin.hopf@univie.ac.at, thomas.schubatzky@uni-graz.at, claudia.haagen@uni-graz.at

Kurzfassung

Die Elektrizitätslehre ist ein wichtiges Thema im Physikunterricht. Dennoch gelingt es trotz zahlreicher Erkenntnisse aus fachdidaktischer Forschung über Schülervorstellungen sowie intensiver unterrichtlicher Bemühungen häufig nicht, ein grundlegendes Verständnis der Lernenden zu den physikalischen Konzepten Spannung, Stromstärke und Widerstand aufzubauen. Der Spannungsbe- griff stellt dabei eine besondere Herausforderung dar. Als Ursachen für das geringe Konzeptver- ständnis können zum einen die Abstraktheit des Themas genannt werden, das ein hohes Maß an Modellbildung erfordert und zum anderen, dass traditioneller Unterricht häufig an den Bedürfnissen der Lernenden vorbeigeht. Die Ziele der Design-Based Research Studie sind daher, das Konzept- verständnis durch eine Weiterentwicklung des bereits empirisch erprobten und lernwirksamen Frankfurter E-Lehre-Konzepts sowie das Interesse an Physik durch kontextorientierten Unterricht positiv zu beeinflussen. Hierbei finden auch genderspezifische Aspekte Berücksichtigung. Es ergibt sich ein 2×2-Design, in dem dieselben Lehrkräfte über die Dauer von drei Jahren in verschiedenen Treatments unterrichten.

1. Einleitung

Elektrizität gehört so selbstverständlich in das tägliche Leben unserer Gesellschaft, dass ein Alltag ohne elektrischen Strom kaum mehr vorstellbar ist. Für die Nutzung vieler Geräte unserer Lebenswelt ist Elektrizität grundlegende Voraussetzung. Im Physikunterricht ist die Elektrizitätslehre daher ein wichtiges Thema. Die persönliche Bedeutung des Themas ergibt sich aus dem täglichen Kontakt mit elektrischen Geräten und dem minimal notwendigen Wissen zum Umgang mit diesen. Hierzu gehören beispielsweise Entscheidungen, ob Batterien tatsächlich leer sind oder für ein anderes Gerät noch nutzbar sind, welche Spannung die zu kaufenden Batterien haben sollten, unter welchen Umständen der Umgang mit dem Föhn gefährlich wird oder welches Ladegerät zum Aufladen des Handys genutzt werden kann.

Viele Prozesse im menschlichen Körper basieren ebenfalls auf elektrischen Signalen, was sich die Medizin zunutze macht, um Menschenleben zu retten. Für die Gesellschaft ist jedoch auch bedeutend, wie die Energiebereitstellung über erneuerbare Energien ermöglicht wird. Ein Bildungsziel im Sinne von *scientific literacy* ist die Befähigung zur aktiven Teilnahme an gesellschaftlichen Diskussionen auf wissenschaftlicher Grundlage (Bybee & McCrae, 2011;

Prenzel, Schütte & Walter, 2007). Das Thema *Elektrizitätslehre* hat somit nach Klafki (1962) nicht nur eine Gegenwarts-, sondern auch eine Zukunftsbedeutung für jeden Einzelnen als auch die Gesellschaft.

Zum Grundverständnis elektrischer Prozesse gehören die physikalischen Konzepte Spannung, Stromstärke und Widerstand sowie ihr wechselseitiger Zusammenhang. Viele Aspekte dieser Inhalte bereiten Schülerinnen und Schülern in der Physik erhebliche Lernprobleme, obwohl Schülervorstellung bereits seit den siebziger Jahren gut untersucht sind (Koller, Waltner & Wiesner, 2008). Studien in der Elektrizitätslehre zeigen, dass trotz intensiver unterrichtlicher Bemühungen Lernende oft kein grundlegendes Verständnis von einfachen Stromkreisen besitzen und weiterhin beispielsweise die Stromverbrauchsvorstellung in Argumentationen heranziehen (Müller, Wilhelm & Burde, 2015). Besonders schwierig ist der Begriff der elektrischen Spannung. Diese wird oft als Eigenschaft des Stroms angesehen und nicht als eigenständige physikalische Größe, die Ursache des Stromflusses ist (Burde & Wilhelm, 2016).

Trotz des Wissens aus vielen Studien zum Lernen von Schülerinnen und Schülern sowie Konzepten zur Einführung der Elektrizitätslehre, sind diese Erkenntnisse bisher wenig im Unterricht implementiert, weswegen Schülervorstellungen bestehen bleiben.

Hinzu kommt, dass Physikunterricht häufig an den Bedürfnissen der Lernenden vorbeigeht. Lernen ist aber nicht nur ein rationaler Vorgang, sondern wird von affektiven Faktoren wie Bedürfnissen, Interessen und Einstellungen der Lernenden beeinflusst (Rabe, 2012). Das in der IPN-Interessensstudie gezeigte vergleichsweise geringe Interesse der Schülerinnen und Schüler an Physik erschwert somit das Lernen (Hoffmann, Häußler & Lehrke, 1998).

2. Motivation

Die Motivation des vorliegenden Design-Based Research (DBR) Projekts „Elektrizitätslehre mit Potenzial und Kontexten (EPO-EKo)“ ist durch zwei Desiderata bestimmt: Zum einen, ein besseres konzeptionelles Verständnis der Schülerinnen und Schüler in der Elektrizitätslehre zu erreichen, und zum anderen, ihr Interesse an Physik positiv zu beeinflussen.

Viele Studien der physikdidaktischen Forschung kommen zu dem Ergebnis, dass die Einführung der Spannung über eine Potenzialdifferenz zusammen mit einer visuellen Modelldarstellung zu vergleichsweise großen Lernerfolgen bei Lernenden führt (z.B. Schumacher & Wiesner, 1996; Burde, Wilhelm & Wiesner, 2015). In konventionellem Physikunterricht ist dieser Ansatz noch selten integriert. Beispiele solcher Zugänge sind das Stäbchenmodell von Gleixner (1998) oder der geschlossene Wasserkreislauf mit Doppelwassersäule, welchen Schwedes, Dudeck & Seibel (1995) verwenden. Einen eben solchen visuellen Potenzialansatz stellt das Elektronengasmodell von Burde und Wilhelm (2016) dar. Bei diesem Modell wird das elektrische Potenzial mit dem Luftdruck verglichen. Eine empirische Studie zur Lernförderlichkeit des Elektronengasmodells mit 790 Schülerinnen und Schülern konnte ein signifikant besseres Verständnis von Spannung, Stromstärke und Widerstand bei den Lernenden nachweisen im Vergleich zur Kontrollgruppe (Burde & Wilhelm, 2017), weswegen dieses Modell Ausgangspunkt des Projektes ist.

„Die mäßigen Ergebnisse deutscher Schülerinnen und Schüler in den internationalen Vergleichsstudien TIMSS und PISA haben einen beispiellosen ‚Boom‘ an Initiativen zur Verbesserung der Situation [...] ausgelöst“ (Duit, 2006, S. 83). Die Forderung nach kontextorientiertem Unterricht wurde danach weiter verstärkt, um „träges Wissen“ (Müller, n.d.) zu vermeiden und Interesse an naturwissenschaftlichem Unterricht zu wecken. Die Einbettung neuer Inhalte in Anwendungskontexte zählt nach Hilbert Meyer (2004) zu den Kennzeichen „guten“ Physikunterrichts. Kontexte sind mittlerweile fest in den Kerncurricula verankert und Bestandteil konkreter Kompetenzen: „Orientiert an fachlichen Inhalten können in gesellschaftlichen und alltagsrelevanten Kontexten die notwendigen Kompetenzen erworben werden“ (Hessisches Kultusministerium, 2011, S. 14), wie zum Beispiel das „Beurteilen von Alltagskontexten mit naturwissenschaftlichen Kenntnissen“ (Hessisches Kultusmi-

nisterium, 2011, S. 20). Die Einbindung von Kontexten ist daher Bestandteil zeitgemäßen Physikunterrichts.

Eine Literaturrecherche macht deutlich, dass (evaluiertes) kontextorientiertes Unterrichtsmaterial, vor allem im Themengebiet der Elektrizitätslehre für die Sekundarstufe I, kaum zu finden ist. Häufig beschränkt sich die Kontextorientierung auf die Benennung alltagsrelevanter, technischer oder gesellschaftlicher Anwendungen. Beispiele kontextorientierter Ideen oder Materialien sind der Rahmenkontext „Elektrische Anlagen und Energieübertragung“ von Muckenfuß (2006, S. 325), verschiedene PiKo-Projekte oder die Anregungen in „Physik im Kontext“ von Hinkeldey (2016). Kuhn (2010) kritisiert, dass die Implementation und detaillierte empirische Untersuchung der Effektivität kontextorientierter Lernumgebungen im Rahmen differenzierter Interventionsstudien fehle. An diese Forderungen knüpft EPO-EKo an. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse bezüglich des Einflusses von Kontexten auf kognitive Schülerfaktoren kein eindeutiges Bild. „In sum, the work on context-based physics to date has not provided the answer to the question: Is context-based physics instruction better than what we are doing now? This is an important question that requires an answer before recommendations should be made to teachers to adopt context-based physics instruction. At this point, there is insufficient research evidence to support the recommendation that teachers should use context-based instruction or problems in physics classrooms.“ (Taasobshirazi & Carr, 2008, S. 164)

3. Theoretischer Hintergrund

3.1. Das Elektronengasmodell

Das Verständnis einfacher Stromkreise von Schülerinnen und Schüler basiert weitgehend auf den physikalischen Größen Stromstärke und Widerstand (Rhöneck, 1986). Ein adäquates Konzeptverständnis zur Spannung fehlt, ohne welches die Analyse einfacher Stromkreise nur erschwert möglich ist.

Der vielversprechende Ansatz, die Spannung über eine Potenzialdifferenz einzuführen, wurde von Burde und Wilhelm mit dem Elektronengasmodell aufgegriffen und weitergeführt. „Die Grundidee des Elektronengasmodells ist dabei, dass sich in Metallen Elektronen in Teilchenform befinden und sich dort frei bewegen können.“ (Burde & Wilhelm, 2015) Im Leiter kommt es aufgrund der gegenseitigen Coulomb-Abstoßung zu einem elektrischen Druck, der von der Elektronendichte abhängt. Das Modell nutzt die Analogie zur intuitiv vorhandenen Luftdruckvorstellung der Lernenden in dem Sinne, dass „komprimierte Luft unter Druck steht, gegen Wände drückt und das Bestreben hat, sich auszudehnen“ (Burde & Wilhelm, 2015). Alltagserfahrungen der Lernenden über Luftdruck bei Fahrradreifen oder Luftmatratzen und Luftpumpen werden aufgegriffen. Luftströmungen sind immer eine Folge von Luft-

druckunterschieden, genauso wie ein Stromfluss immer Folge einer Potenzialdifferenz ist. Im Elektronengasmodell „wird einer bildhaft-anschauungsorientierten Vorstellung des Potentials als elektrischem Druck und der Spannung als elektrischem Druckunterschied eine besondere Bedeutung zugeschrieben“ (Burde & Wilhelm, 2015) (siehe Abb. 1). Das Unterrichtskonzept legt großen Wert auf die Entwicklung eines fundierten qualitativen Verständnisses der Grundgrößen Spannung, Stromstärke und Widerstand.

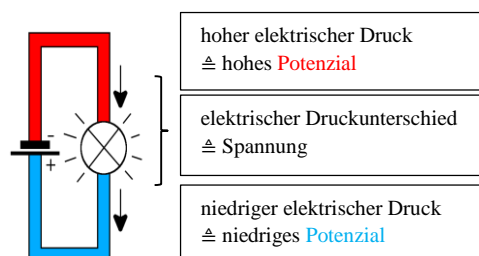


Abb. 1: Das Elektronengasmodell nach Burde & Wilhelm (2015)

Das Unterrichtskonzept wurde in einer ersten Studie im Pre-Post-Design mit Kontroll- und Treatmentgruppe im Raum Frankfurt getestet. Lehrerinnen und Lehrern wurde das Material in einem Nachmittags-Workshop vorgestellt und ausgehändigt. Die Auswertung der Studie mit $N = 790$ Schülerinnen und Schülern der Jahrgangsstufen 7 und 8 am Gymnasium zeigt ein signifikant besseres Ergebnis der Treatmentgruppe (siehe Abb. 2). Insbesondere besitzen die Schülerinnen und Schüler ein besseres Konzeptverständnis von der Spannung.

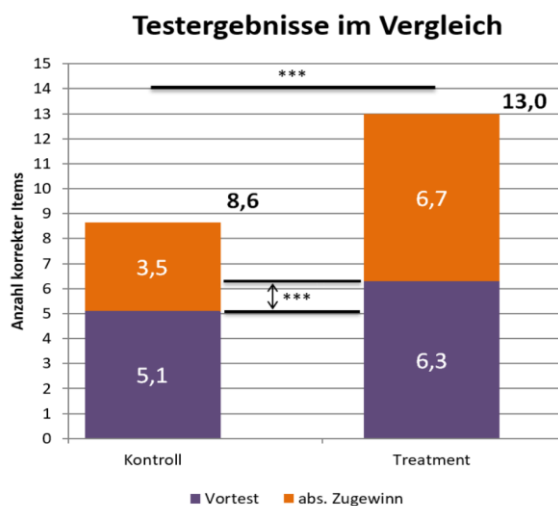


Abb. 2: Testergebnisse von Kontroll- und Treatmentgruppe im Vergleich nach Burde & Wilhelm (2017)

Bei genauerer Analyse der Treatmentgruppe wird jedoch deutlich, dass Mädchen, trotz ähnlichem Vorwissens, im Vergleich zu den Jungen, einen geringen Lernzuwachs haben (Burde, 2018).

3.2. Interesse

Der vorliegenden Studie liegt das Interessenkonstrukt der Person-Gegenstands-Theorie von Krapp (2010) zugrunde. Interesse bezeichnet dabei eine herausgehobene, subjektiv bedeutsam erlebte Beziehung zwischen einer Person und einem Gegenstand ihrer erfahrbaren Umwelt (Krapp, 2003; Schiefele, Krapp, Wild & Winteler, 1993). Objekte des Interesses können z.B. konkrete Dinge, Themengebiete oder abstrakte Ideen sein (Krapp, 2002; Schiefele, 1992). Die Veranlagung einer Person bestimmt ihr individuelles Interesse. Individuelles Interesse als Disposition wird in der Interessenforschung von aktualisiertem und situationalem Interesse unterschieden, das durch die Interessantheit einer konkreten (Lern-)Situation angesprochen werden kann. War in der Situation bereits ein Interesse für den Gegenstand vorhanden, spricht man von aktualisiertem Interesse, wird das Interesse in der Situation ganz neu ausgelöst, von situationalem Interesse (Krapp, 2010).

Krapp (2010) ordnet der Beziehung zwischen Person und Gegenstand eine emotionale und wertbezogene Valenz zu. Die gefühlsbezogene Komponente beinhaltet den emotionalen Zustand bei der Auseinandersetzung mit dem Lerngegenstand wie beispielsweise Freude. Die wertbezogene Komponente bezeichnet die subjektive Wertschätzung des Interessengegenstandes.

Da sich Interesse positiv auf das Lernen auswirken kann (Eagly & Chaiken, 1993; Krapp, 2002; Todt, 1978) und ein Zusammenhang zwischen Interesse und schulischer Leistung besteht (Schiefele, Krapp & Schreyer, 1993), ist diese affektive Komponente neben dem Verständnis der Schülerinnen und Schüler die zweite abhängige Variable.

Bezogen auf den Schulunterricht ist nach (Hoffmann et al., 1998) eine Unterscheidung zwischen Fach- und Sachinteresse sinnvoll. Bezogen auf Physik ist unter Fachinteresse das Interesse am Schulfach bzw. dem Unterricht gemeint. Das Sachinteresse bezieht sich hingegen auf das Interesse der Lernenden an konkreten physikalischen Themen.

Eine Kombination des Interessenkonstrukts von Krapp und der Unterscheidung von Hoffmann et al., (1998) liegt dem Projekt zugrunde. Hiernach kann sowohl dem Fach- als auch dem Sachinteresse eine emotionale und wertbezogene Valenz zugeordnet werden. Verbinden die Lernenden positive Emotionen mit dem Schulfach Physik und messen ihm eine hohe persönliche Relevanz zu, so ist die emotionale und wertbezogene Komponente des Fachinteresses hoch. In Hinblick auf einzelne konkrete physikalische Inhalte ist die gleiche Perspektive auf die emotionale und die wertbezogene Komponente des Sachinteresses möglich.

Die IPN-Interessenstudie Physik zeigt, dass das Sachinteresse der Schülerinnen und Schüler kontinuierlich im Verlauf der Sekundarstufe I abnimmt, ohne dabei unter ein mittleres Niveau zu sinken. Das

Fachinteresse stabilisiert sich über den Verlauf der Sekundarstufe I, ist jedoch bei den Jungen deutlich höher als bei den Mädchen. Auch das Sachinteresse der Mädchen liegt unterhalb dem der Jungen, jedoch ist der Unterschied geringer (Hoffmann et al., 1998). Dieser Interessensverlauf stimmt mit neueren Forschungsergebnissen überein (Daniels, 2008).

Zu der Frage, welche Inhalte im naturwissenschaftlichen Unterricht Einfluss auf das Interesse der Schülerinnen und Schüler haben, gibt die IPN-Interessenstudie von Hoffmann, Häußler und Lehrke (1998) wichtige Erkenntnisse. Als Interessensbereiche, die von 80 % der Schülerinnen und Schüler als bedeutsam angesehen werden, sind die Themenbereiche *Mensch und Natur* sowie *Gesellschaft* zu nennen. Empirisch begründet und gut abgesichert sind somit Unterrichtsinhalte aus den Bereichen *Physik und Medizin*, *Physik und der menschliche Körper*, *Physik und Sport* sowie *Physik und Gesellschaft*. Diese Themen sind an die Interessentypen angelehnt. Der Interessentyp A, zu dem 20 % der Schülerinnen und Schüler zählen (davon 80 % Jungen und 20 % Mädchen), zeigt an allein drei Themenbereichen Interesse, vor allem aber an Physik als Wissenschaft, an Technik und an technischen Berufen. Typ B (55 %, davon 50 % Jungen und 50 % Mädchen) zeigt Interesse an einer Physik, die Erscheinungen in der Natur erklärt und die dem Menschen dient. Typ C interessiert sich für die Bedeutung der Physik für die Gesellschaft (25 %, davon 29 % Jungen und 71 % Mädchen).

Die Studie zeigte auch, dass die Themen, die für Mädchen interessant sind, auch von Jungen interessant empfunden werden, umgekehrt jedoch nicht. Mit zunehmendem Alter (12-16) nimmt die Anzahl der Schülerinnen und Schüler in Interessensbereich C zu und in A ab (Hoffmann et al., 1998). Die ROSE-Studie von Schreiner & Sjøberg (2004) bestätigt den Trend hinsichtlich humanbiologischer und medizinischer Themen (Elster, 2007).

3.3. Kontexte

Der Begriff des Kontextes ist in der Literatur nicht einheitlich definiert und kann viele Bedeutungen auf unterschiedlichen Ebenen haben. Finkelstein (2005) unterscheidet drei Kontextebenen. Auf der innersten Ebene werden Kontexte als Aufgaben verstanden. Der Kontext bildet die „storyline“ eines Problems. Eingeschlossen wird diese Ebene von der Ebene des Kontextes als Lernumgebung (beteiligte Personen, Arbeitsformen, Ziele, räumliche und materielle Voraussetzungen) sowie von der äußersten Ebene, dem Kontext als außerschulische Rahmenbedingung (gesellschaftliche und materielle Bedingungen schulischen Lernens).

Die Beschäftigung mit Kontexten im naturwissenschaftlichen Unterricht basiert hauptsächlich auf der innersten Ebene, um die es im Folgenden gehen wird. Der Aufgabenkontext ist somit Teil einer Lernaufgabe, die sich auf einen fachlichen Inhalt bezieht.

Fachinhalt und Kontext bedingen sich wechselseitig und beeinflussen wiederum den Lernprozess.

Kontextualisierte Aufgaben bestehen nach Mestre (2002) aus einer Oberflächen- und Modellebene. Während die Oberflächenebene eine konkrete Problemgeschichte aus realen Objekten/Ereignissen bildet, enthält die Modellebene Fakten bzw. Zusammenhänge (Kauertz, 2008).

Ziel der Aufgabenkontexte ist es, ein stabiles Interesse der Schülerinnen und Schüler an naturwissenschaftlichem Unterricht auszubilden sowie diese zur aktiven Teilnahme an Diskussionen der Gesellschaft zu befähigen (Scientific Literacy) (van Vorst et al., 2015). Um diese Ziele zu erreichen, sollen Kontexte in der Literatur viele Merkmale erfüllen. Besonders häufig werden Adaptivität, Authentizität, Komplexität, Alltagsbezug, außergewöhnliche Phänomene, aktuelle Ereignisse und Relevanz genannt (van Vorst, 2012). Das *Rahmenmodell zur Charakterisierung und Systematisierung von Kontexten* von van Vorst et al. (2015) fasst diese Merkmale und ihre Auswirkungen auf die Lernenden zusammen.

Die zwei Hauptmerkmale eines Kontextes sind dabei seine Authentizität und Bekanntheit, welche sich aus der Alltäglichkeit oder Besonderheit ergibt. Eine persönliche oder gesellschaftliche Relevanz ist als Folge der Auseinandersetzung mit dem Kontext anzusehen. Für die Leistung der Schülerinnen und Schüler im Problemlöseprozess sehen Löffler und Kauertz (2016) die drei Kontextmerkmale *Kontextualisiertheit* auf der Oberflächenebene (Anzahl irrelevanter Elemente), *Transparenz* als Verbindung zwischen Oberflächen- und Modellebene sowie *Komplexität* auf der Modellebene (Schwierigkeitserzeugender Aspekt) an.

Je nach Umfang und Anspruch an die Unterrichtsgestaltung wird bei Ansätzen, die dem situierten Lernen zugeordnet werden können, zwischen Mikro- und Makrokontexten unterschieden (Kuhn, Müller, Müller & Vogt, 2010). Aufgabenkontexte im Sinne eines Makrokontextes sind dabei auf eine Bearbeitung in mehreren Monaten angelegt und erfordern methodisch eine projektspezifische Organisation, während Mikrokontexte in einzelnen Stunden eingesetzt werden und keine besonderen Bedingungen in der Organisation bedürfen. Sie sind für den Einsatz im alltäglichen Unterricht angelegt.

Unterricht, der Kontexte einbezieht, wird ganz allgemein als kontextorientiert bezeichnet. Die Analyse fachdidaktischer Literatur durch Nawrath (2010) zeigt, dass Kontextorientierung jedoch nicht gleich Kontextorientierung ist. „Kontexte können einerseits als methodische Anreicherung fachsystematischen Physikunterrichts dienen oder Elemente fachdidaktischer Strukturierung kontextorientierten Physikunterrichts sein.“ (Nawrath, 2010, S. 19)

Während bei der Kontexteinbindung die fachlichen Inhalte im Vordergrund stehen und Beispiele aus dem Alltag zur Unterstützung des Gelernten eingesetzt

werden, steht bei der Kontextstrukturierung das Lernen mit und über den Kontext im Vordergrund. Fachliche Inhalte werden „mitgelernt“. Hierdurch ändert sich die Reihenfolge des Unterrichts, da eine konkrete anwendungsbezogene Fragestellung den Beginn der Stunde bildet. Kuhn (2010) formuliert, dass die Einbettung von Alltagsbezügen in fachsystematisch orientiertes Lernen nicht ausreicht. „Stattdessen wird ein Lernen anhand authentischer Kontexte propagiert, das von authentischen Problemstellungen ausgeht und die Problemlösung in den Mittelpunkt des Unterrichts rückt“ (Kuhn, 2010, S. 17).

Im EPo-EKo-Projekt werden Kontexte zusammenfassend wie folgt eingesetzt:

- Kontexte als Aufgabenkontexte nach Finkelstein (2004)
- Mikrokontexte nach Kuhn et al. (2010)
- Kontextstrukturierter Unterricht nach Nawrath (2010)
- Kontexte vorwiegend aus den Interessenbereichen *Mensch und Natur* sowie *Physik und Gesellschaft* (IPN-Studie, 1998; ROSE-Studie, 2004)

Die Evaluationen kontextbasierter Unterrichtsansätze zeigen keinen eindeutigen Ergebnisstand, vor allem hinsichtlich des Einflusses von Kontexten auf kognitive Schülerfaktoren. In den meisten Studien ergeben sich keine Nachteile gegenüber traditionellem Unterricht, positive Effekte traten jedoch nur vereinzelt auf und konnten bisher nicht konsistent nachgewiesen werden (Bennett, 2003). Bei der Wirkung auf affektive Faktoren ist die Forschungslage konsistenter, hier lässt sich auf einen positiven Einfluss von Kontexten schließen (Bennett, Hogarth & Lubben, 2003). Taasobshirazi und Carr (2008) stellen zudem die Aussagekraft vieler bisheriger Untersuchungen in Frage, da sie häufig aufgrund methodischer Defizite in der Durchführung und Auswertung keine Generalisierung der Ergebnisse zulassen (keine Vergleiche zu traditionellem Unterricht, fehlender Einbezug von Vortests etc.). Sie fordern systematischere Forschungsarbeit, welche mit dem Design-Based-Research-Projekt angestrebt wird.

Neuere Studien untersuchen gezielt den Einfluss einzelner Kontextmerkmale auf kognitive und affektive Schülerfaktoren. Löffler und Kauertz (2016) kommen zu dem Ergebnis, dass das Merkmal der Transparenz einen kleinen Effekt auf die Leistung beim Problemlösen hat ($\beta=.13$, $p=.019$, $\eta^2=.03$). Überraschender Weise zeigt sich kein signifikanter Effekt der Merkmale Komplexität und Kontextualisiertheit. Letzteres kann jedoch den Interessenabfall während der Bearbeitung einer Aufgabe verhindern (Pozas, 2015).

Van Vorst (2012) konnte für Kontexte im Fach Chemie zeigen, dass Schülerinnen und Schüler Kontexten mit dem Merkmal *Besonderheit* eine höhere emotionale Valenz beim Lernen zusprechen als alltäglichen Kontexten und das Merkmal der *Aktualität* keinen signifikanten Einfluss hierauf hat. Dies widerspricht

der in der Literatur häufig geäußerten Vermutung, dass das Interesse durch alltägliche Kontexte steige (z.B. Bennett et al., 2005). Die persönliche Relevanz von Kontexten mit den Merkmalen Alltagsbezug/Aktualität wird jedoch höher eingeschätzt (van Vorst, 2012). Habig, van Vorst und Sumfleth (2016) konnten zeigen, dass alle Schülerinnen und Schüler mit Kontexten dazu lernen, wobei Mädchen deutlich mehr dazu lernen als Jungen.

4. Ziele und Forschungsfragen

Das Design-Based-Research-Projekt (DBR) *EPo-EKo* „Elektrizitätslehre mit Potenzial und Kontexten“ der TU Darmstadt, der Goethe-Universität Frankfurt und der Universitäten Wien und Graz verfolgt drei Ziele.

In Hinblick auf das Elektronengasmodell von Burde und Wilhelm (2017), das im Vergleich zu traditionellem Unterricht zu einem besseren Konzeptverständnis der Schülerinnen und Schüler in der Elektrizitätslehre führte, wird die Sachstruktur des Unterrichtskonzepts auf Grundlage der Rückmeldungen aus erster Studie überarbeitet und verfeinert. Ziel ist es, dieses evaluierte Unterrichtsmaterial in die Schulpraxis zu implementieren, indem es Lehrerinnen und Lehrern zur Verfügung gestellt wird. Die Gestaltung neuer Lernumgebungen auf Grundlage eines Problems in der Praxis sowie einer dahinterstehenden Theorie des Lernens zusammen mit der zyklischen Einbindung der Ergebnisse aus früheren Studien ist dabei ganz im Sinne des DBR (Wilhelm & Hopf, 2014).

Ein weiteres Ziel ist es, den Einfluss kontextstrukturierter Unterrichts, der sich an den von Schülerinnen und Schülern interessanten Themen orientiert (z.B. IPN-Studie, ROSE-Studie), auf ihr Interesse, ihr Selbstkonzept und ihr Konzeptverständnis zu untersuchen.

Neben der Betrachtung des Lernprozesses der Schülerinnen und Schüler wird auch das Pedagogical Content Knowledge (PCK) der teilnehmenden Lehrkräfte erforscht.

Die Forschungsfragen des Projekts sind demnach:

- Können die signifikant besseren Ergebnisse des Unterrichtskonzepts auf Basis des Elektronengasmodells mit einer größeren Stichprobe von Lehrkräften und Lernenden reproduziert werden?
- Welchen Einfluss haben verschiedene Unterrichtskonzepte auf das Verständnis, das Interesse und das Selbstkonzept der Lernenden – vor allem der Mädchen?
- Welchen Einfluss hat das PCK der teilnehmenden Lehrkräfte auf das Konzeptverständnis der Lernenden und wie entwickelt/verändert es sich im Verlauf der Studie bei Nutzung des neuen Unterrichtsmaterials?

5. Forschungsdesign

Die Datenerhebung des Design-Based-Research-Projekts ist insgesamt auf drei Jahre angelegt, basierend

auf einem Pre-Post-Follow-up-Design in jedem Zyklus. Die jeweils unterrichtenden Gymnasiallehrkräfte sind in den drei aufeinanderfolgenden Jahren dieselben und unterrichten Schülerinnen und Schüler der 7. Jahrgangsstufe im Gebiet der Elektrizitätslehre. Es ergibt sich ein 2x2 Design.

		Kontextorientierung	
		ohne	mit
Elektronengasmodell	ohne	Kontrollgruppe	Treatment T ₁
	mit	Treatment T ₂	Treatment T ₃

Abb. 3: 2x2 Design der EPo-EKo-Studie

Im ersten Projektjahr 2018 unterrichten die teilnehmenden Lehrkräfte in ihrer gewohnten Art und Weise, was die Kontrollgruppe ist. Pre-, Post- und Follow-up-Tests werden in dieser Kontrollgruppe als Vergleichsgrundlage für die Ergebnisse zu den entsprechenden Treatments in den folgenden Jahren durchgeführt. Als Kovariate werden die kognitiven Fähigkeiten mit zwei Subskalen zum sprachgebundenen und zum figural-bildhaften Denken des „Berliner Intelligenzstrukturtest für Jugendliche: Begabungs- und Hochbegabungsdiagnostik“ von Jäger, Holling, Preckel, Schulze, Vock, Süß und Beauducel (2006) gemessen sowie das konzeptuelle Vorwissen im Bereich der Elektrizitätslehre mit einem hierfür selbst entwickelten Test. Das (Vor-)Interesse sowie das physikalische (Vor-)Selbstkonzept werden anhand eines Fragebogens erhoben. Die dabei verwendeten Items stammen aus der IPN-Interessenstudie von Hoffmann et al. (1998) sowie aus PISA 2006 von Frey et al. (2009). Zusätzlich wurden eigene Items konstruiert.

abhängige Variablen	Kontrollvariablen
Interesse	Vorinteresse
Physikalisches Selbstkonzept	Physikalisches Vorsebstkonzept
Verständnis E-Lehre	Vorverständnis E-Lehre
	Sprachliche und räumliche Intelligenz

Unabhängige Variablen
Unterrichtskonzepte
<ul style="list-style-type: none"> • Traditioneller Unterricht • Unterricht mit Elektronengasmodell • Unterricht mit Kontextorientierung • Unterricht mit Elektronengasmodell in Kontexten

Tab.1: Die Variablen des Projekts EPo-EKo

Die Lehrerinnen und Lehrer führen zudem ein tabellarisches Unterrichtstagebuch. Dieses liefert einen Überblick über die Unterrichtsinhalte, ihre zeitliche Abfolge und ihren zeitlichen Umfang sowie über verwendete Modelle und Kontexte im Unterricht. Auf diese Weise können traditioneller Unterricht sowie der Unterricht mit den Treatments in ihren Rahmenbedingungen miteinander verglichen werden. Die Unterrichtstagebücher werden auch bei der Analyse

des PCK der Lehrkräfte genutzt. Ein Test sowie Interviews zum PCK der Lehrenden sind nach der Unterrichtseinheit geplant. Nach dem ersten Studienjahr erfolgt ein kurzer Workshop, in dem die Unterrichtsmaterialien mit Elektronengasmodell bzw. Kontexten für das zweite Studienjahr den Lehrkräften vorgestellt und ausgehändigt werden.

Im zweiten Studienjahr werden die Lehrkräfte in zwei verschiedene Interventionsgruppen T₁ und T₂ aufgeteilt. Die eine Hälfte der Lehrkräfte (T₁) unterrichtet kontextorientiert und behält die ursprüngliche Sachstruktur des traditionellen Elektrizitätslehreunterrichts bei. Die andere Hälfte der Lehrkräfte (T₂) setzt das überarbeitete Unterrichtskonzept auf Basis des Elektronengasmodells ein. Auf Ebene der Lernenden finden dieselben Pre-, Post- und Follow-up-Tests wie in Studienjahr 1 statt bzw. auf Lehrkräfteebene Tests sowie Interviews zum PCK. Zum Abschluss des zweiten Studienjahrs erfolgt wieder ein kurzer Workshop, in dem die Lehrkräfte auf Studienjahr drei vorbereitet werden.

Im Zyklus des dritten Studienjahres werden die Lehrkräfte wieder zu einer Gruppe vereint, die im Unterricht alle Treatment T₃ umsetzen. Das Unterrichtsmaterial integriert nun das Elektronengasmodell in kontextorientierten Unterricht. Die Erhebung der Ergebnisse erfolgt wie in Jahr eins und zwei.

Das Design der Studie ist in Abbildung 4 als Übersicht dargestellt mit den wechselnden Treatments in Tabelle 2.

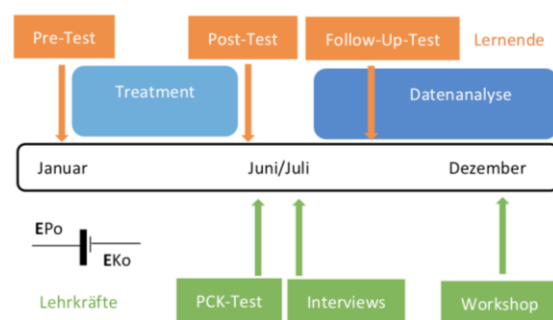


Abb. 4: Design EPo-EKo

Zyklus	Treatment
Kontrollgruppe	Konventioneller Unterricht
1. Studienjahr	Kontexte (T ₁) oder Elektronengas (T ₂)
2. Studienjahr	Elektronengas und Kontexte (T ₃)

Tab. 2: Treatments im Projekt EPo-EKo

Die erhaltenen Daten auf Ebene der Schülerinnen und Schüler sowie der Lehrkräfte werden qualitativ und quantitativ ausgewertet sowie trianguliert. Die Ergebnisse sind wiederum die Basis zur finalen Überarbeitung des Unterrichtsmaterials.

6. Aktueller Stand des Projekts und Ausblick

In Vorbereitung auf die Studie wurde der kognitive Fähigkeitstest ausgewählt und die entsprechende

Vervielfältigungsgenehmigung eingeholt. Der Fragebogen zum Interesse und Selbstkonzept, der beispielsweise Skalen aus PISA enthält, wurde in der beabsichtigten Version der Skalen-Zusammenstellung pilotiert.

Ein wichtiger Bestandteil des Projekts ist der Elektrizitätslehretest zur Erfassung des Lernerfolgs und des Konzeptverständnisses der Lernenden. Bereits existierende Testinstrumente (Rhöneck, 1986; Urban-Woldron & Hopf, 2012) wurden adaptiert und für das Projekt weiterentwickelt, vor allem um Items zur Spannung (siehe Beitrag von Morris et al. (2018) „Weiterentwicklung eines Testinstruments zum einfachen Stromkreis“).

Zurzeit findet das Projekt mit der Kontrollgruppe aus $N = 71$ Klassen mit 1795 Schülerinnen und Schülern statt. Die Stichprobe setzt sich aus 850 Lernenden aus Deutschland (Hessen/Bayern) und 945 Schülerinnen und Schülern aus Österreich (Wien/Niederösterreich/Steiermark) zusammen.

Parallel zur Durchführung des ersten Zyklus wird der PCK-Test entwickelt, um ihn im ersten Jahr im Anschluss an den Unterricht der Kontrollgruppe einzusetzen. Für das zweite und dritte Studienjahr werden in einem iterativen Prozess die Unterrichtsmaterialien des Elektronengasmodells verfeinert und kontextorientiertes Unterrichtsmaterial erstellt. Hierzu werden zunächst „interessante“ Kontexte identifiziert, anschließend das (Prototyp)Material getestet und analysiert, das auf Grundlage der Vorerprobung anschließend verändert und aufbereitet wird. Abschließend werden die Materialien für das Treatment in Studienjahr drei vorbereitet: Elektronengasmodell in Kontexten.

7. Literatur

- Bennett, J. (2003). *Teaching and learning science: A guide to recent research and its applications*. London: Continuum.
- Bennett, J., Gräsel, C., Parchmann, I. & Waddington, D. (2005). Context-based and conventional approaches to teaching chemistry: comparing teachers' views. *International Journal of Science Education*, 27 (13), 1521–1547.
- Bennett, J., Hogarth, S. & Lubben, F. (2003). A systematic review of the effects of context-based and Science-Technology-Society (STS) approaches in the teaching of secondary science: University of York.
- Burde, J.-P. (2018). *Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells* (Dissertation Johann Wolfgang-Goethe-Universität).
- Burde, J.-P.; Wilhelm, T. (2016). Das Elektronengasmodell im Anfangsunterricht. *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 65 (8), 18–24.
- Burde, J.-P. & Wilhelm, T. (2016). Erste Evaluation eines Unterrichtskonzepts auf Basis des Elektronengasmodells. In C. Maurer (Hrsg.), *Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis* (Bd. 37, Bd. 37, S. 115–118).
- Burde, J.-P. & Wilhelm, T. (2017). Ergebnisse einer empirischen Studie zum Elektronengasmodell. In *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung* (S. 167–172).
- Burde, J.-P., Wilhelm, T. & Wiesner, H. (2015). Das Elektronengasmodell und Möglichkeiten seiner Visualisierung. In S. Bernholt (Hrsg.), *Heterogenität und Diversität - Vielfalt der Voraussetzungen im naturwissenschaftlichen Unterricht* (Bd. 35, S. 438–440).
- Bybee, R. & McCrae, B. (2011). Scientific Literacy and Student Attitudes: Perspectives from PISA 2006 science. *International Journal of Science Education*, 33 (1), 7–26.
- Daniels, Z. (2008). *Entwicklung schulischer Interessen im Jugendalter*. Münster: Waxmann.
- Eagly, A. H. & Chaiken, S. (1993). *The Psychology of Attitudes*. Fort Worth: Harcourt Brace Jovanovich.
- Elster, D. (2007). In welchen Kontexten sind naturwissenschaftliche Inhalte für Jugendliche interessant? Ergebnisse der ROSE-Erhebung in Österreich und Deutschland. *Didaktik* (3), 2–8.
- Finkelstein, N. (2005). Learning physics in context: A study of student learning about electricity and magnetism. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 27 (10), 1187–1209.
- Gleixner, C. (1998). *Einleuchtende Elektrizitätslehre mit Potential*. Dissertation LMU München.
- Habig, S., van Vorst, H. & Sumfleth, E. (2016). Optimierung des Kontexteinsatzes im Chemieunterricht. In C. Maurer (Hrsg.), *Authentizität und Lernen - das Fach in der Fachdidaktik* (S. 470–472).
- Hessisches Kultusministerium. (2011). *Bildungsstandards und Inhaltsfelder. Das neue Kerncurriculum für Hessen. Sekundarstufe I - Gymnasium. Physik*. Zugriff am 16.03.2018. Verfügbar unter https://kultusministerium.hessen.de/sites/default/files/media/kerncurriculum_physik_gymnasium.pdf
- Hinkeldey, D. (2016). *Physik im Kontext. Magnetismus, Elektrizität und Elektromagnetismus: komplette Unterrichtseinheiten mit zahlreichen Versuchen* (Sekundarstufe I, 1. Auflage). Augsburg: Auer.
- Hoffmann, L., Häußler, P. & Lehrke, M. (1998). *Die IPN-Interessenstudie Physik*. Kiel: IPN.
- Hopf, M. (2012). Kontextorientierte Aufgabe (25). *Bratwurstverkäufer. Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, 61 (4), 38–39.
- Kauertz, A. (2008). *Schwierigkeitserzeugende Merkmale physikalischer Leistungsaufgaben*. Berlin: Logos.
- Klafki, W. (1962). *Didaktische Analyse. Auswahl - Grundlegende Aufsätze. Die deutsche Schule*, 32 (5).

- Koller, D., Waltner, C. & Wiesner, H. (2008). Zur Einführung von Stromstärke und Spannung. *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, 57 (6), 6–18.
- Krapp, A. (2002). Structural and dynamic aspects of interest development: theoretical considerations from an ontogenetic perspective. *Learning and Instruction*, 12, 383–409.
- Krapp, A. (2010). Interesse. In D. Rost (Hrsg.), *Handwörterbuch Pädagogische Psychologie* (S. 311–323). Weinheim: Beltz.
- Kuhn, J., Müller, A., Müller, W. & Vogt, P. (2010). Kontextorientierung im Physikunterricht - Konzeptionen, Theorien und Forschung zu Motivation und Lernen. *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, 59 (5), 13–25.
- Kuhn, J. (2010). Authentische Aufgaben im theoretischen Rahmen von Instruktions- und Lehr-Lern-Forschung. Optimierung von Ankermedien für eine neue Aufgabenkultur im Physikunterricht. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Löffler, P. & Kauertz, A. (2016). Modellanwendung in Problemlöseaufgaben: Wie wirkt Kontext? In C. Maurer (Hrsg.), *Authentizität und Lernen - das Fach in der Fachdidaktik* (S. 41–43).
- Mestre, J. P. (2002). Probing adults' conceptual understanding and transfer of learning via problem posing. *Journal of Applied Developmental Psychology* (23), 9–50.
- Meyer, H. (2004). *Was ist guter Unterricht?* Berlin: Cornelsen/Volk und Wissen.
- Morris, L., Ivanjek, L., Burde, J.-P., Dopatka, L., Haagen-Schützenhöfer, C., Schubatzky, T., Spatz, V., Wilhelm, T., Hopf, M. (2018). Weiterentwicklung eines Testinstruments zum einfachen Stromkreis – In: *PhyDid-B - Didaktik der Physik – Frühjahrstagung 2018*, www.phydid.de
- Muckenfuß, H. (2006). Lernen im sinnstiftenden Kontext. Entwurf einer zeitgemäßen Didaktik des Physikunterrichts (1. Aufl., 2. Dr). Zugl.: Weingarten, Pädag. Hochsch., Diss. Berlin: Cornelsen.
- Müller, R. (n.d.). *Physik in interessanten Kontexten*, IPN.
- Müller, S., Wilhelm, T. & Burde, J.-P. (2015). Vergleich von Schülervorstellungen zur Elektrizitätslehre in Hessen und Weißrussland. In *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. Wuppertal.
- Nawrath, D. (2010). Kontextorientierung. Rekonstruktion einer fachdidaktischen Konzeption für den Physikunterricht. Oldenburg.
- Pozas, M. (2015). *Motivationale und metakognitive Effekte von Kontexten*. Berlin.
- Prenzel, M., Schütte, K. & Walter, O. (2007). Interesse an den Naturwissenschaften. In M. Prenzel, C. Artelt, J. Baumert, W. Blum, M. Hammann, E. Klieme et al. (Hrsg.), *PISA 2006. Die Ergebnisse der dritten internationalen Vergleichsstudie* (S. 107–124). Münster, New York, München, Berlin: Waxmann.
- Rabe, T. (2012). piko-Brief2: Affektive Aspekte und Lernen von Physik. In Duit, R., Mikelskis-Seifert, S. (Hrsg.), *Physik im Kontext. Konzepte, Ideen, Materialien für effizienten Physikunterricht* (S. 19). Seelze: Friedrich.
- Rhöneck, C. (1986). Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis und zu den Begriffen Strom, Spannung und Widerstand. *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik*, 34 (13), 10–14.
- Schiefele, U., Krapp, A. & Schreyer, I. (1993). Metaanalyse des Zusammenhangs von Interesse und schulischer Leistung. *Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie*, 25, 120–148.
- Schreiner, C. & Sjøberg, S. (2004). Sowing the seeds of ROSE. Background, rationale, questionnaire development and data collection for ROSE (The Relevance of Science Education): a comparative study of students' views of science and science education (*Acta didactica*, 4/2004). Oslo: University of Oslo, Faculty of Education, Department of Teacher Education and School Development; Unipub.
- Schumacher, M. & Wiesner, H. (1996). Erprobung des Potentialansatzes in der Elektrizitätslehre in Form einer Akzeptanzbefragung. *Vorträge Physiker tagung, DPG Tagung* (S. 573–578).
- Schwedes, H., Dudeck, W. G. & Seibel, C. (1995). *Elektrizitätslehre mit Wassermodellen*. *Praxis der Naturwissenschaften - Physik*, 44 (2), 28–36.
- Taasobshirazi, G. & Carr, M. (2008). A review and critique of context-based physics instruction and assessment. *Educational Research Review* (3), 155–167.
- Todt, E. (1978). *Das Interesse. Empirische Untersuchungen zu einem Motivationskonzept*. Bern: Hans Huber.
- Van Vorst, H. (2012). *Kontextmerkmale und ihr Einfluss auf das Schülerinteresse im Fach Chemie*. Berlin: Logos.
- Van Vorst, H., Dorsch, A., Fechner, S., Kauertz, A., Krabbe, H. & Sumfleth, E. (2015). Charakterisierung und Strukturierung von Kontexten im naturwissenschaftlichen Unterricht – Vorschlag einer theoretischen Modellierung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 21 (1), 29–39.
- Wilhelm, T. & Hopf, M. (2014). *Design-Forschung*. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 31–41). Berlin: Springer Spektrum.

Fehlvorstellungen bei Studienanfängern: Was bleibt vom Physikunterricht der Sekundarstufe I?

Bärbel Fromme

Universität Bielefeld, Fakultät für Physik, Universitätsstr. 25, 33615 Bielefeld
bfromme@physik.uni-bielefeld.de

Kurzfassung

Wir haben 181 Studienanfänger¹ der Fächer Physik und Sachunterricht zu einfachen physikalischen Sachverhalten befragt. Die Untersuchung zeigt, dass viele Vorstellungen, die für Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe I bekannt sind, über die Schulzeit hinaus persistieren. Es lässt sich zu meist eine deutliche Abhängigkeit von der schulischen Vorbildung bzw. dem Interesse an physikalisch-naturwissenschaftlichen Themen ablesen. Es zeigt sich deutlich, dass an der Hochschule nachjustiert werden muss. Insbesondere muss verhindert werden, dass nicht-aufgearbeitete Fehlvorstellungen der angehenden Lehrerinnen und Lehrer noch den späteren Unterricht beeinflussen und so weiter tradiert werden.

1. Intention

Präkonzepte und Fehlvorstellungen zu unterschiedlichen physikalischen Themen sind bei Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe I und der Primarstufe im Laufe der letzten Jahrzehnte vielfältig untersucht worden (Zusammenfassungen finden sich z. B. in [1] - [3]). Auch im internationalen Kontext wurden Studien durchgeführt (siehe z. B. [4] und [5]). Es ist bekannt, dass viele dieser Vorstellungen, die oft durch Alltagsvorstellungen und allgemeinen Sprachgebrauch hervorgerufen werden, durch Unterricht nicht oder nur kurzfristig geändert werden (siehe z. B. [6], [7]), so dass die alten, im Alltag bewährten und nicht hinterfragten Denkmuster langfristig bestehen können. Wir haben nun untersucht, in wie weit Präkonzepte/Fehlvorstellungen, die für Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe I typisch sind, auch noch bei Studienanfängern der Fächer Physik und Sachunterricht vorliegen.

Angeregt wurde die Untersuchung durch eine Beobachtung in unseren Didaktik-Lehrveranstaltungen: Hier werden sowohl mit Studierenden des Faches Physik (Lehramt Gymnasium/Gesamtschule und Lehramt Haupt-, Real-, Sekundar- und Gesamtschule) als auch mit Studierenden des Faches Sachunterricht typische Schülervorstellungen sowie der unterrichtliche Umgang damit besprochen. Dabei zeigt sich regelmäßig, dass diese Studierenden, die i. a. bereits am Ende ihres Bachelorstudiums stehen, selbst noch immer viele der für Schülerinnen und Schüler dokumentierten Fehlvorstellungen haben.

Auch während des Studiums werden diese Vorstellungen also nicht durch physikalisch korrekte ersetzt.

Wir haben nun alle Studienanfänger (nicht nur des Lehramts) befragt, um aus den Ergebnissen Hinweise zu gewinnen, welchen aus der Schule noch vorhandenen Fehlvorstellungen im Studium gezielt entgegengewirkt werden muss.

2. Befragte Gruppen

An der Befragung teilgenommen haben insgesamt 181 Studierende der Universität Bielefeld, davon 85 in der Vorlesung „Einführung in die Physik I“ und 96 in der Ringvorlesung „Natur- und Gesellschaftswissenschaften im Sachunterricht“. Bei beiden Veranstaltungen handelt es sich um die Einführungsveranstaltungen für Studienanfänger. Die Befragung fand in den ersten Wochen des Wintersemesters 2017/18 zu Beginn einer Vorlesung statt.

Zwischen den beiden befragten Gruppen gibt es gravierende Unterschiede – sowohl, was die schulische Vorbildung als auch das Interesse an Physik betrifft: Die Veranstaltung „Einführung in die Physik I“ wendet sich an die fachwissenschaftlichen Bachelorstudierenden des Faches Physik und die Studierenden des Lehramts mit Fach Physik (Lehramt Gymnasium/Gesamtschule und Lehramt Haupt-, Real-, Sekundar- und Gesamtschule). Dazu kommen einige Studierende aus anderen fachwissenschaftlichen Studiengängen (häufig MINT-Fächer), die Physik als Nebenfach gewählt haben. Die Vorlesung wird also von Studierenden besucht, die Physik freiwillig als Studienfach gewählt haben und bei denen deshalb ein

¹ Auf die Formulierung „StudienanfängerInnen“ o. ä wurde aus Gründen der besseren Lesbarkeit im gesamten Text verzichtet. Gemeint sind mit „Studienanfängern“ jeweils solche aller Geschlechter. Nach Geschlecht wurde in unserer Untersuchung nicht differenziert.

hohes Interesse an physikalischen und naturwissenschaftlichen Themen vorausgesetzt werden kann. Das zeigt sich auch in der schulischen Vorbildung: In dieser Gruppe haben knapp 83% derjenigen, die Angaben zu ihrer Vorbildung machen (81; 4 von 85 machen keine Angaben) das Fach Physik in der Schule als Grund- oder Leistungskurs in der Sekundarstufe II gewählt (Leistungskurs 41, Grundkurs 26). 14 hatten Physikunterricht nur in der Sekundarstufe I.

Im Sachunterricht sieht es ganz anders aus. Ein nicht unerheblicher Teil der Studierenden dieses Faches hat wenig Interesse an Physik. Viele nehmen nur gezwungenermaßen an den Pflichtveranstaltungen mit physikalischen/physikdidaktischen Inhalten teil. Eine Spezialisierung in Richtung Physik wird nur von Einzelnen gewählt. Die Mehrzahl studiert Sachunterricht zudem nicht als (vertieftes) Schwerpunktfach. Das liegt an der großen Anzahl von Studierenden der Sonderpädagogik, die an der Universität Bielefeld Bildungswissenschaften als Schwerpunktfach wählen müssen. Die geringe „Physikaffinität“ zeigt sich auch in der schulischen Vorbildung: Nur 17 der Sachunterrichtsstudierenden wählten Physik in der Sekundarstufe II (alle als Grundkurs); einen Leistungskurs absolvierte niemand. 69 wählten das Fach Physik nach der Sekundarstufe I ab. 10 sind nicht zuzuordnen. Hier haben also nur knapp 20% der Studierenden, die Angaben zur schulischen Ausbildung machen, am Physikunterricht der Sekundarstufe II teilgenommen.

Die Befragung erlaubt es, nach der schulischen Vorbildung der Gesamtheit der Teilnehmer (Summe aus Physik- und Sachunterrichtsstudierenden) zu differenzieren. Die Ergebnisse dieser Differenzierung müssen allerdings mit Vorsicht gedeutet werden, da nicht nur die schulische Vorbildung sondern auch das Interesse an Physik beim Testergebnis eine Rolle spielen kann: Aus Äußerungen vieler unserer Physikstudierenden wissen wir, dass nur darum ein Grundkurs absolviert wurde, weil an der besuchten Schule kein Leistungskurs zustande kam. Der Grundkurs wurde also durchaus im Hinblick auf ein nachfolgendes Physikstudium besucht. Die Grundkursabsolventen im Bereich Sachunterricht haben diesen Kurs jedoch offensichtlich nicht mit dem Ziel Physikstudium besucht. Interesse an physikalischen Themen kann bei den Sachunterrichts-Grundkursabsolventen also u. U. nicht in dem Maße als gegeben angenommen werden, wie bei den Physikstudierenden mit Grundkursvorbildung. Innerhalb der beiden Studierendengruppen (Physik oder Sachunterricht) ist eine Differenzierung nach Grundkursabsolventen und solchen, die nur am Physikunterricht der Sekundarstufe I teilgenommen haben, auf Grund der nur kleinen Zahlen (s. o.) jedoch nicht sinnvoll.

3. Befragung und Ergebnisse

Der Fragebogen für die Studierenden beinhaltete 10 Fragen, 4 davon zur Elektrizität, 3 zur Optik und jeweils eine zu Schwimmen und Sinken, Temperatur

und Wärme und zur physikalisch-naturwissenschaftlichen Allgemeinbildung (Entstehung der Jahreszeiten). Außerdem sollten Angaben zur schulischen Vorbildung gemacht werden. Bei 6 der 10 Fragen sollte die Antwort begründet werden.

3.1 Elektrizität

Hier ging es bei der Befragung um die Stromverbrauchsvorstellung, die Vorstellung „elektrischer Strom = Energie“ sowie Fragen zu einfachen Stromkreisen. Bei der Reihenschaltung wurde gezielt nach Helligkeitsunterschieden von fünf gleichen Lampen gefragt, um Korrelationen zur Stromverbrauchsvorstellung aufzudecken. Die Fragen waren nicht direkt hintereinander angeordnet, sondern durch Fragen zu anderen Themen unterbrochen, um so eventuell auch auf die Festigung/Vernetzung des physikalischen Wissens schließen zu können.

3.1.1 Anschluss eines Lämpchens an eine Batterie

Insbesondere im Hinblick auf die Sachunterrichtsstudierenden wurden zum Thema Elektrizität zunächst Fragen nach dem Anschluss eines Lämpchens an eine Batterie gestellt, die ursprünglich für Grundschulkin- der entwickelt wurden [3]. Es wurden vier Abbildungen mit einem durch zwei Kabel an eine Batterie angeschlossenem Lämpchen vorgelegt ([3], S. 14) und nachgefragt, in welchem der dargestellten Fälle das Lämpchen leuchtet und in welchem nicht. Die Antworten sollten begründet werden. Dargestellt war 1. ein Kurzschluss, bei dem die beiden Pole der Batterie mit nur einem Kontakt des Lämpchens verbunden sind, 2. korrekter Stromkreis von Batterie und Lämpchen, 3. Stromkreis mit Unterbrechung eines Kabels und 4. korrekter Anschluss des Lämpchens mit Kreuzung der Kabel.

Die Fragen zum einfachen Stromkreis sind jedoch auch mit Blick auf unsere Physik-Studienanfänger interessant, denn eine Untersuchung bei Teilnehmern von Physik-Einführungskursen der University of Washington mit ähnlicher Fragestellung (hier sollte mit vorgegebenen Komponenten Batterie, Lämpchen, Draht ein funktionierender Stromkreis gezeichnet werden) zeigte, dass nur etwa 70% der Befragten eine physikalisch korrekte Vorstellung vom Stromkreis hatten [8].

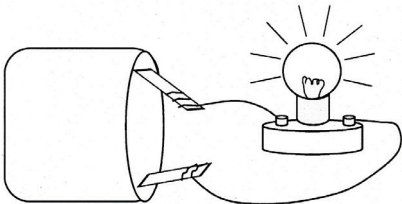
Erfreulicherweise wird unsere Aufgabenstellung von über 90% aller befragten Studierenden richtig beantwortet (91% beim Sachunterricht, 92% beim Fach Physik). Die meisten der falschen Antworten betreffen den Anschluss des Lämpchens mit der Kreuzung der Kabel. Die wenigen, die ihre falsche Entscheidung begründen, begründen hier im weitesten Sinne über einen falschen Anschluss/falsche Polung: „Im vierten Fall sind die Drähte ineinander verdreht und falsch herum an die Kontakte angebracht, weshalb der Stromkreislauf gestört wird“ – eine Argumentation die sich auch bei Grundschulkindern findet [3]. Oder: „Im vierten Fall leuchtet die Birne nicht, da die

Pole nicht aufeinander passen“. Beide Argumentationen fanden sich bei den Anfängern im Studiengang Sachunterricht. Bei den Anfängern im Fach Physik findet man an dieser Stelle zum Beispiel die Formulierung: „Nur 2 leuchtet, da nur hier der Stromkreis geschlossen ist und Plus minus richtig gesteckt sind.“ Oder: „Leuchtet bei 2.), da der Stromkreis nicht unterbrochen ist und die richtigen Pole verbunden sind.“ Hier wird zwar nicht über die „Verdrehung der Kabel“ oder das „Aufeinanderpassen der Pole“ argumentiert, allerdings wird die Polung als wichtig angesehen und dabei gleichzeitig vorausgesetzt, dass die Polung ohne die Verdrehung der Kabel die richtige sei. Zwei der Physikstudierenden erkennen den Kurzschluss im Fall 1 nicht und meinen, dass das Lämpchen leuchtet, da ein geschlossener Stromkreis vorliegt. Bei den Sachunterrichtsstudierenden ist sich eine(r) an dieser Stelle unsicher. Drei Studierende (zwei Sachunterricht, ein Physik) negieren das Leuchten der Birne im korrekten Fall 2, eine(r) (Fach Physik) bejaht das Leuchten beim Stromkreis mit Unterbrechung (3.) – die Begründungen sind jeweils nicht verständlich bzw. fehlen.

3.1.2 Stromverbrauchsvorstellung

Die Fragestellung zum Stromverbrauch ist in Abb. 1 dargestellt.

Sie sehen hier ein Lämpchen, das an eine Batterie angeschlossen ist. Das Lämpchen leuchtet. Kreuzen Sie an:



	stimmt	falsch	weiß nicht
1. Die Lampe verbraucht den elektrischen Strom vollständig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Die Lampe verbraucht den elektrischen Strom ein bisschen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Der elektrische Strom kommt völlig unverbraucht von der Lampe zur Batterie zurück.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abb. 1: Fragestellung zur Stromverbrauchsvorstellung (nach [4])

Hier zeigen ca. 77% der Studienanfänger des Sachunterrichts und ca. 67% des Faches Physik eindeutige Stromverbrauchsvorstellungen (rot in Abb. 2). Kompletzt richtig beantworteten die Frage nur 8% der Sachunterrichtsanfänger und 19% der Physikanfänger. Das sind deutlich weniger als in der Literatur 1986 für eine nachunterrichtliche Untersuchung von Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe I gefunden wurde: Hier antworteten immerhin 26% richtig [4].

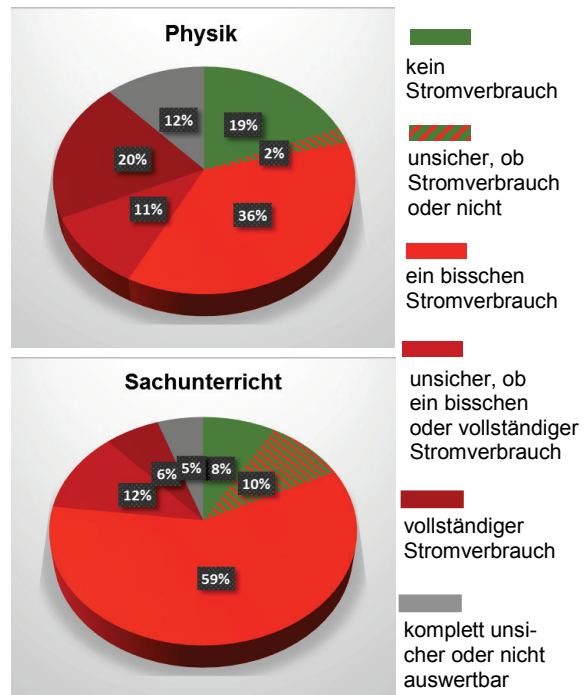


Abb. 2: Ergebnisse Stromverbrauchsvorstellung

Bei drei der Studierenden (davon zwei Studienanfänger des Faches Physik mit Grundkursvorbildung) lässt sich explizit vermuten, dass sie die auch für Schülerinnen und Schüler dokumentierte Vorstellung haben, der Strom sei in der Batterie gespeichert (siehe z. B. [2], [4], [7]). Sie kreuzen sowohl teilweisen als auch vollständigen Verbrauch als richtig an und schreiben dazu, dass es von der Dauer des Betriebs abhängt, was zutrifft (z. B.: „kommt auf die Zeit an, sie verbraucht nicht alles sofort“). Die Vorstellung scheint hier also zu sein: Beim Betrieb der Glühlampe wird der Strom nach und nach verbraucht, bis die Batterie leer ist.

3.1.3 Identität von Strom und Energie?

Die Frage, ob Strom gleich Energie sei, bejahen 49% der Physikanfänger und 80% der Sachunterrichtsanfänger (Abb. 3a, b). Bei vielen besteht Unsicherheit. Es ist eine deutliche Tendenz feststellbar: Je besser die schulische Vorbildung, desto höher ist der Anteil richtiger Antworten (Abb. 3c). 1986 befragte Schülerinnen und Schüler bejahten die Frage zu 78%, 17% antworteten damals mit nein [4].

Die überwiegende Mehrheit der hier falsch antwortenden Studierenden zeigt, dass keine Verbindung zum Energieerhaltungssatz hergestellt wird: 30 der 38 mit „Strom ist Energie“ antwortenden Physikanfänger (davon 17 mit Leistungskursvorbildung, 8 Grundkurs) bejahen in der Aufgabenstellung der Abb. 1 den Stromverbrauch, damit also de facto den „Energieverbrauch“. Die fehlende Denkverbindung ist sicher teilweise forciert durch die räumliche – und damit in der Beantwortung auch zeitliche – Trennung der beiden Aufgaben, zeigt aber auch, dass das Wissen hier nicht

gefestigt ist. Bei den Sachunterrichtsstudienanfängern bejaht ein ähnlich hoher Prozentsatz der mit Strom = Energie Antwortenden den Strom- und damit also Energieverbrauch in der Aufgabe der Abb. 1 (53 von 69, davon 8 mit Grundkursvorbildung).

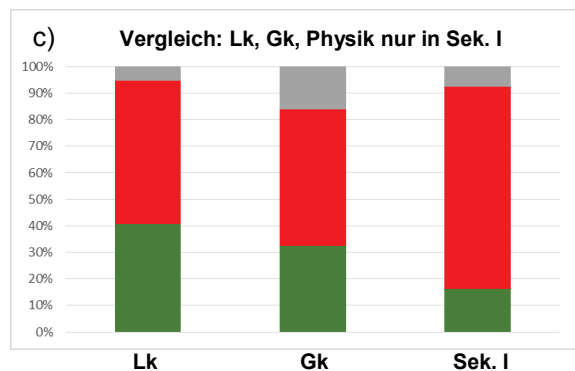
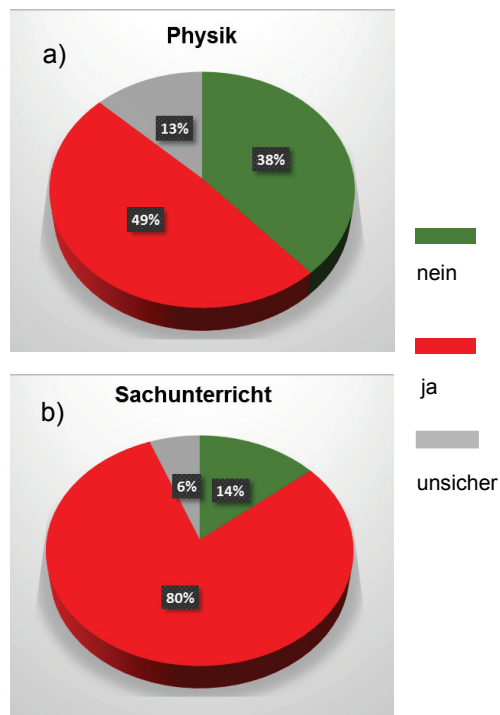


Abb. 3: Identität von Strom und Energie

3.1.4 Reihenschaltung

Ebenfalls in Richtung Stromverbrauchsvorstellung zielte eine Aufgabe zur Helligkeit bei der Reihenschaltung von fünf gleichen Lämpchen. Gefragt wurde hier, ob die erste und letzte Lampe in der Reihe gleich oder unterschiedlich hell leuchten (Aufgabenstellung analog zu [4], jedoch sollte hier noch begründet werden). Man würde erwarten, dass Studierende mit Stromverbrauchsvorstellung eine unterschiedliche Helligkeit annehmen. Im Widerspruch zum hohen Anteil mit expliziten Verbrauchsvorstellungen (Abb. 2) kreuzen jedoch 72% der Studienanfänger Physik (69% der Leistungskursabsolventen) und 82% der Studienanfänger Sachunterricht hier richtig „gleiche Helligkeit“ an (Abb. 4). Ein ähnliches Ergebnis

ist für Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe I dokumentiert (79% richtig angekreuzt [4]).

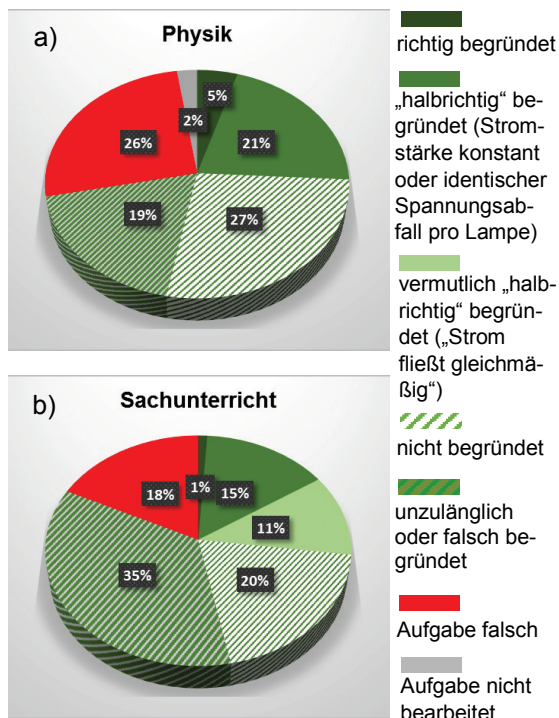


Abb. 4: Ergebnis Reihenschaltung. Richtige Ankreuzungen (grün) aufgeschlüsselt nach Begründungen.

Bei den Studierenden, die falsch ankreuzen und eine unterschiedliche Helligkeit der Lampen in der Reihenschaltung annehmen (rot in Abb. 4), ist der Anteil derjenigen, für die in 3.1.2 Stromverbrauchsvorstellungen festgestellt wurden, etwas höher als bei den richtig ankreuzenden. Diese Studierenden geben „Stromverbrauch“ auch sehr häufig explizit als Begründung für die Annahme der unterschiedlichen Helligkeit an. Bei den richtig Ankreuzenden ist das Bemerkens eines Konflikts zwischen dem Wissen von der gleichen Helligkeit der Lampen und der in 3.1.2 gezeigten Überzeugung vom Stromverbrauch in den Begründungen zumeist nicht erkennbar: Nur drei dieser Studierenden versuchen die konkurrierenden Vorstellungen ansatzweise in Einklang zu bringen. Sie geben als Begründung für gleiche Helligkeit der Lampen in der Reihenschaltung an: „Weil es bei der Reihenschaltung wie bei den anderen Stromkreisläufen nur einen geringen Stromverlust gibt.“, „Der Strom fließt gleichmäßig (in gleicher Stärke) durch den Kreislauf. Er wird nicht ganz von Lampe 1 - 4 verbraucht.“ und „Stromstärke (+Verbrauch) sind gleich groß, egal an welcher Stelle man messen würde.“

Sieht man von den Verbrauchsvorstellungen ab, scheint der hohe Prozentsatz richtiger Ankreuzungen auf gute Kenntnisse der Gesetzmäßigkeiten der Reihenschaltung hinzudeuten. Die Begründungen zeichnen jedoch ein ganz anderes Bild. Hier zeigt es sich, dass deutlich weniger als 30% den Sachverhalt einigermaßen richtig verstanden haben und dieses durch

eine richtige Begründung belegen können (Abb. 4). Bei den Anfängern im Fach Physik begründen 26% komplett richtig (über identische elektrische Energie oder Leistung bzw. konstante Stromstärke und identischen Spannungsabfall an jeder Lampe) oder halbwegs richtig (konstante Stromstärke *oder* gleicher Spannungsabfall pro Lampe). Bei den Leistungskursabsolventen begründen sogar nur etwa 20% einigermaßen richtig. Bei den Studienanfängern im Sachunterricht begründen 16% halbwegs richtig. Weitere 11% (hellstes grün in Abb. 4b) sind vermutlich noch dazu zu zählen. Diese Studierenden sprechen davon, dass der Strom „gleichmäßig fließt“ – was man wohlwollend als „mit konstanter Stromstärke“ werten kann.

Ein hoher Anteil von Studierenden gibt keine Begründung an. Sehr viele begründen unzulänglich oder wenig aussagekräftig. Beispielsweise: „Reihenschaltung“, „Alle Lämpchen leuchten gleich hell“, „Der Gesamtwiderstand zählt“, „Da alle Lampen gleich angeschlossen sind“ oder „Bei einer Lichterkette leuchten alle Birnen gleich hell“. Hier wird offensichtlich aus der Erfahrung oder unterrichtlichem Vorwissen begründet, ohne dass ersichtlich ist, ob der Sachverhalt verstanden wurde. Bei einigen der Sachunterrichtsanfänger fanden sich auch Formulierungen in der Art: „Der Strom wird von Lampe zu Lampe weitergeleitet“. Diese Argumentation fand sich bei den Physikanfängern so nicht.

Einige Studierende zeigen durch ihre Begründungen, dass neben Stromverbrauchsvorstellung und „Strom ist in der Batterie gespeichert“ weitere Vorstellungen, die für Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe I dokumentiert sind ([2], [4], [7]), bis zum Studienanfang erhalten bleiben. Das ist zum Beispiel die Vorstellung von der Konstanz der Spannung im Stromkreis. In unserer Befragung fanden sich Begründungen wie: „Wird die Spannung durch Batterie hergestellt, müsste die Spannung innerhalb des Stromkreises gleich sein.“ oder „In der Reihenschaltung ist die Spannung konstant, nur die Stromstärke ist variabel.“ Auch die Schülervorstellung, dass jede Lampe entscheidet, „wie viel Strom sie nimmt“, fand sich bei den Begründungen der Studierenden: „Die Lampen „ziehen“ so viel Strom wie sie benötigen“. Ebenso die Vorstellung, dass Spannung eine Eigenschaft des Stroms ist: „Durch die Reihenschaltung der Lampen verringert sich die Spannung des fließenden Stroms für jede einzelne Lampe.“ Auch die Schülervorstellung: Strom fließt aus einem Pol der Batterie heraus und durchläuft nacheinander die Komponenten eines Stromkreises, wobei ein Unterschied im Strom beim Ein- und Austritt in ein Bauelement besteht („sequentielle Argumentation“) fand sich bei einigen Studierenden. Beispiele: „Strom fließt vom Pluspol zum Minuspol. Da Lampen Stromverbraucher sind kommt auf der anderen Seite nicht so viel Strom an, wie eingegangen ist“, „Bei einer Reihenschaltung verläuft der Strom von einem Pol zum anderen und durchläuft dabei alle Lampen, wo er nach und nach verbraucht

wird“ oder: „Der Strom fließt von + nach -, daher erreicht er erst 1 und später 5. Da alle Lampen Widerstände haben, ist der Strom schwächer bei 5 als bei 1.“

Bei einer ganzen Reihe der richtig ankreuzenden Studierenden - sowohl in Physik als auch im Sachunterricht - zeigen die Begründungen, dass auch unabhängig von der Stromverbrauchsvorstellung nicht von einer konstanten Stromstärke bei der Reihenschaltung ausgegangen wird, sondern der Strom auf die Lampen aufgeteilt wird. Hier finden sich Formulierungen der Art: „Der elektrische Strom wird gleichmäßig auf alle Lampen verteilt“.

Bei 6 der 96 Sachunterrichtsanfänger findet sich eine Argumentation über die Position der Lampen im Stromkreis bzw. Abstand zur Batterie, die bei den Studienanfängern in Physik nicht vorkommt. Formulierungsbeispiele: „Da beide Lampen ganz außen angeschlossen sind, leuchten sie gleich stark“, „Beide Lampen haben denselben Abstand zur Batterie“ oder „Weil beide direkt an der Stromquelle sitzen und nicht indirekt wie 2, 3, 4.“. Hinter diesen Formulierungen könnte die auch für Schülerinnen und Schüler dokumentierte Vorstellung von der „Zweikabelzuführung“, also die Zuführung von Strom durch beide Kabel von der Batterie stecken [3] – hier in Verbindung mit der Stromverbrauchsvorstellung.

3.1.5 Fazit zur Elektrizität

Die großen Unsicherheiten und Fehlvorstellungen, die sich in den hier gestellten Fragen zeigen, sind vermutlich teilweise auf den allgemeinen Sprachgebrauch zurückzuführen. Im Alltag werden beständig die Begriffe „Stromverbrauch“ oder „Energieverbrauch“ (zumeist synonym) benutzt. Im Alltag und auch im Unterricht ist im Zusammenhang mit Stromkreisen sehr häufig von „Verbrauchern“ die Rede: Das Wort sollte zumindest im Physikunterricht vermieden werden.

3.2 Optik

Es ist bekannt, dass Schülerinnen und Schüler Lernschwierigkeiten in Zusammenhang mit dem Spiegelbild haben, z. B. die Lage des Spiegelbildes betreffend. Vielen der Schülerinnen und Schüler ist nicht klar, dass von beleuchteten, nicht selbstleuchtenden Gegenständen Licht ins Auge gelangt, wenn wir sie sehen. Insbesondere ist nicht klar, dass von solchen sekundären Lichtquellen Licht auch über einen Spiegel ins Auge gelangt [9], [10]. In der Vergangenheit haben wir immer wieder beobachtet, dass dieses auch vielen Studierenden - insbesondere den wenig physik-affinen - nicht klar ist, was vermutlich zu den ebenfalls von uns beobachteten Schwierigkeiten beim Verständnis der geometrischen Konstruktion des Spiegelbildes führt. Im Grunde kann auch die optische Abbildung eines nicht-selbstleuchtenden Gegenstandes - sei es mit Lochkamera, Linsen oder Hohlspiegel - und damit die Funktion von optischen Geräten vom Fotoapparat über Fernrohr und Mikroskop

bis hin zum Auge nicht verstanden werden, wenn die Äquivalenz von primären und sekundären Lichtquellen nicht klar ist (vgl. auch [10]). Auch bei der Konstruktion der optischen Abbildung haben wir immer wieder Schwierigkeiten bei Studierenden beobachtet, obwohl die Äquivalenz von sekundären und primären Lichtquellen sowie der Sehvorgang zu Beginn des Kurses erklärt wurde.

Im Rahmen unserer Untersuchung wurde analog zu einer Befragung von Schülerinnen und Schülern zunächst nachgefragt, ob Licht einer primären Lichtquelle (brennende Kerze, Aufgabe aus [9] bzw. [1] S. 81) über einen Spiegel ins Auge gelangt, wenn das Spiegelbild sichtbar ist. In einer weiteren Aufgabenstellung wurde (auf Anregung in [9]) die Kerze durch eine sekundäre Lichtquelle (Kaninchen, Abb. 5) ersetzt. Außerdem wurde nach dem Lichtweg beim Sehvorgang in einer dritten Aufgabe separat gefragt.

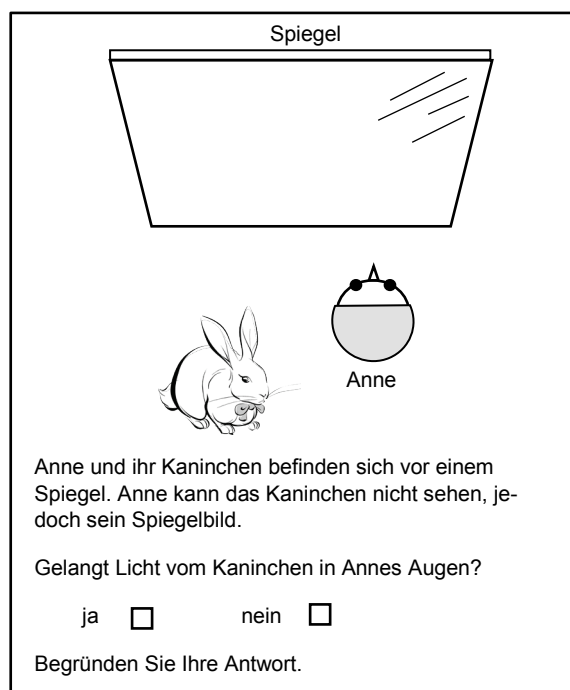


Abb. 5: Fragenbeispiel zur Optik. Bei der Fragestellung zur primären Lichtquelle befindet sich an der Stelle des Kaninchens eine brennende Kerze.

Wie auch für Schülerinnen und Schüler dokumentiert [9], wird die Frage für primäre Lichtquellen von den Studierenden in der Mehrzahl richtig beantwortet, wobei sich eine geringe Abhängigkeit von der schulischen Vorbildung bzw. vom Physikinteresse zeigt (Abb. 6a). Anders sieht die Sache für nicht-selbstleuchtende Gegenstände aus. Hier wird von Schülerinnen und Schülern - vor und auch nach Optikunterricht - in der Mehrzahl bestritten, dass Licht vom Gegenstand über den Spiegel ins Auge gelangt, wenn das Spiegelbild sichtbar ist [9]. Diese Aussage trifft auch für die Sachunterrichtsanfänger und die Gesamtheit der Studierenden, die Physikunterricht nur in der Sek. I hatten, zu (Abb. 6b): nur 35% (37%) antworten

hier richtig. Bei den Physikanfängern hat der Anteil von richtig Antwortenden bei der sekundären Lichtquelle zwar auch deutlich abgenommen (von 93% bei der primären Lichtquelle auf 71%), bleibt aber deutlich über 50%. Insgesamt lässt sich bei den Antworten zur sekundären Lichtquelle eine deutliche Korrelation zur schulischen Vorbildung feststellen (Abb. 6b). Begründet wird die falsche Antwort bei der sekundären Lichtquelle in mehr als 50% der Fälle (11 von 19 der Studienanfänger in Physik und 35 von 54 beim Sachunterricht) explizit mit „Kaninchen leuchten nicht“ oder sinngemäß ähnlich. Das zeigt deutlich, dass hier keine Kenntnisse über sekundäre Lichtquellen vorhanden sind.

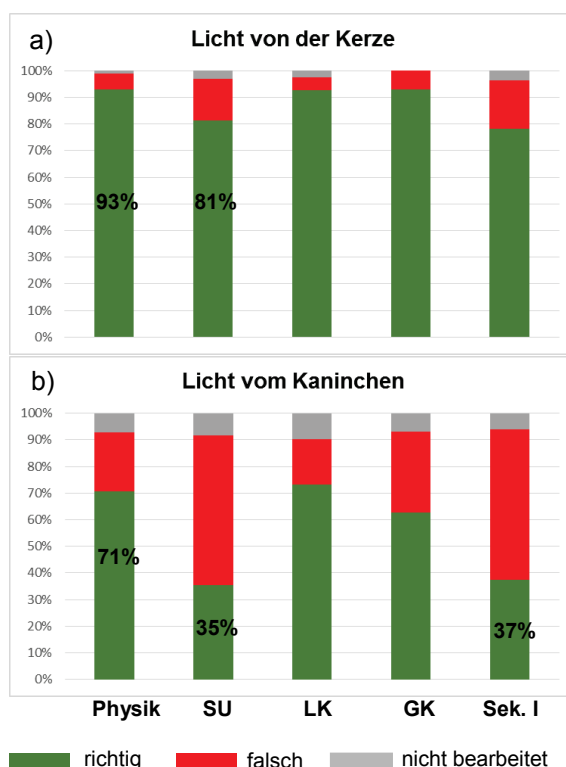


Abb. 6: Gelangt Licht von Kerze oder Kaninchen über den Spiegel ins Auge?

Die Mehrzahl derjenigen, die schon bei der primären Lichtquelle falsch antworten (rot in Abb. 6a), antwortet auch bei der Frage nach dem Licht vom Kaninchen falsch (4 von 7 bei den Physikanfängern, 14 von 18 beim Sachunterricht). Hier scheint Grundlegendes zu Reflexion und Spiegelbild nicht verstanden zu sein.

Nach dem Sehvorgang wurde in einer weiteren Aufgabe noch einmal explizit gefragt. Verwendet wurde hierzu eine Standarddarstellung ([11], ähnlich auch in [12], [13]). Eine relevante Auswahl der Abbildungen zeigt Abb. 7. Die Mehrzahl der Studierenden (89% der Physikanfänger, 72% der Sachunterrichtsanfänger, antworten hier richtig (Abb. 8). Viele begründen auch richtig mit der Reflexion oder Streuung des Lichtes am Buch (Abb. 7b). Auch hier ist ein deutlicher Zusammenhang mit der schulischen Vorbildung/Interesse an Physik zu erkennen.

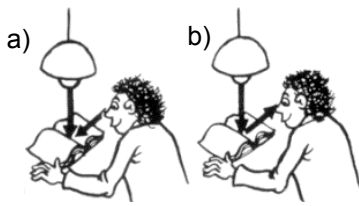


Abb. 7: Wo ist der Sehvorgang richtig dargestellt? (Abbildung aus [14])

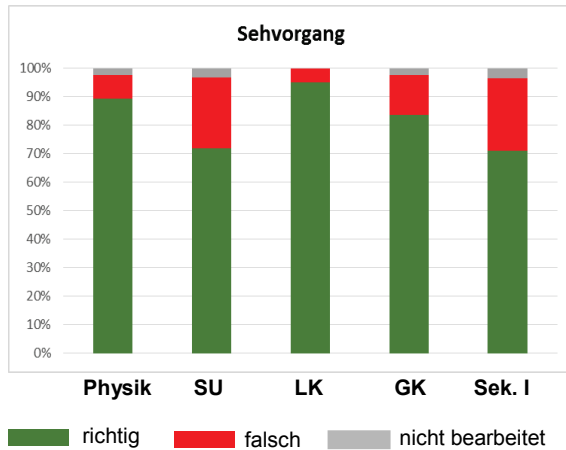


Abb. 8: Lichtweg beim Sehvorgang

Insgesamt antworteten 31 Studierende beim Sehvorgang falsch; 5 antworten nicht. Knapp 78% dieser Studierenden (28 von 36) haben auch konsequenterweise die Frage nach dem Licht bei der Spiegelung des Kaninchens (Abb. 5) falsch oder nicht beantwortet, 13 explizit mit „Kaninchen leuchten nicht“. Andererseits kreuzt der größte Teil derer, die bei der Spiegelung des Kaninchens falsch oder nicht antwortet (Abb. 6b), beim Sehvorgang richtig an (Physik: 18 von 25, Sachunterricht: 41 von 62). Die Begründungen sind aber nicht immer korrekt.

Von den 31 beim Sehvorgang falsch Antwortenden, meinen 27, dass die Darstellung der Abb. 7a richtig sei. Ähnlich wie für Schülerinnen und Schüler berichtet, assoziieren die Studierenden mit dieser Darstellung aber nicht die antike Vorstellung eines vom Auge ausgehenden „Sehstrahls“ (vgl. z. B. [15]), sondern eine aktive Beteiligung des Auges – oft in Zusammenhang mit der typischen Vorstellung „Licht liegt als Helligkeit auf dem Buch“ ([14], S. 2-3). Dieses zeigen die Begründungen: „Die Lampe erleuchtet Buch. Dadurch können wir das Buch erkennen.“, „Licht erhellt die Seiten, Blick ist auf die Seite gerichtet, Zusammenspiel.“ oder „da das Licht auf das Buch strahlt, kann er besser sehen.“, „der Mann blickt aufs Papier welches von oben beleuchtet wird“, „Dadurch, dass Licht auf das Buch fällt, können wir die Inhalte erkennen“. „Licht von oben, Augen auf das Buch gerichtet.“ und Ähnliches. Vier Studierende schließen in ihrer Begründung explizit aus, dass Licht vom Buch ins Auge reflektiert werden könne – drei davon

haben bei der Frage nach der Spiegelung des Kaninchens (Abb. 5) konsequenterweise mit „Kaninchen leuchten nicht“ geantwortet.

3.3 Weitere Fragen

3.3.1 Wärme und Temperatur

Insbesondere für jüngere Schülerinnen und Schüler ist die Vorstellung „Ein Wollpullover hält mich warm, also gibt er Wärme ab“ dokumentiert. Die Erwartungen sind hier, dass ein Thermometer in einem auf dem Tisch liegenden Pullover eine höhere Temperatur als außerhalb anzeigt. Auch durch den gegenläufigen Ausgang des entsprechenden Experiments wird die tief verankerte Vorstellung von der warmen Wolle kaum ausgeräumt ([14] S. 3). Wir haben nun den Studienanfängern folgende Fragestellung vorgelegt:

Auf einer Metallplatte liegt ein Thermometer, das dort die Temperatur misst. Daneben liegt ein Wollpullover, in dem ebenfalls ein Thermometer steckt.

Das Thermometer im Pullover misst eine höhere Temperatur

ja nein bin ich mir unsicher

Am Metall wird die höhere Temperatur gemessen

ja nein bin ich mir unsicher

Begründen Sie Ihre Aussage.

Die Aufgabe wird von ca. 50% der Studienanfänger in Physik richtig beantwortet (Abb. 9a). 81% der richtig Antwortenden begründen auch richtig. 37% antworten falsch. Davon meint die Mehrzahl, dass im Pullover die höhere Temperatur gemessen wird. Bei den Studienanfängern im Sachunterricht antworten nur 19% richtig, richtige Begründungen liefern 67% davon. 57% beantworten die Aufgabe falsch (Abb. 9b). Auch bei dieser Fragestellung ist wieder eine deutliche Tendenz in Abhängigkeit von der schulischen Vorbildung sichtbar (Abb. 9c).

Bei den Studierenden, die meinen, dass im Pullover die höhere Temperatur gemessen wird, lassen sich bei den Begründungen teilweise bestimmte Begründungsschemata identifizieren:

1. „Wolle speichert Wärme, Wolle isoliert, Wärme staut sich im Pullover.“

So begründen rund 40% aller Studierenden, die meinen, dass im Pullover die höhere Temperatur gemessen wird (12 von 27 Studierenden des Faches Physik, 17 von 43 beim Sachunterricht). Die Begründungen enthalten durchaus Richtiges, wie z. B.: „Der Pullover wirkt isolierend, während das Metall die Wärme weggleitet“. Allerdings wird nicht erkannt, dass die betrachteten Gegenstände hier im thermischen Gleichgewicht sind, sondern über das Gefühl der „Wärmequelle Mensch“ im Pullover bzw. beim Anfassen der Metallplatte argumentiert. Ähnliches wird auch bei Schülerinnen und Schülern beobachtet ([14], S. 18).

2. „Wolle wärmt“, „Wolle ist Wärmequelle“, „Wolle ist warm – Metall ist kalt“

In dieser Art begründen 12 von 43 Studierenden im Sachunterricht, 1 von 27 im Fach Physik. Auch hier wird häufig über das Wärme- oder Kältegefühl argumentiert. Man liest hier beispielsweise: „Menschen werden durch einen Wollpullover gewärmt, eine Metallplatte wirkt dagegen kühl. Daher ist im Pullover eine höhere Temperatur“, „Wolle wärmt, Metall ist kalt“ oder „Metall ist grundsätzlich kalt“.

Manche Studierende bezeichnen die Wolle auch explizit als Wärmequelle und begründen beispielweise: „Der Pullover strahlt Wärme aus“. „Wolle wärmt das Thermometer. Bei Metall ist keine Wärmequelle“, oder: „Der Wollpullover fungiert als Aufheizer und isoliert sich von der Umwelt, daher baut er eine höhere Temperatur auf“.

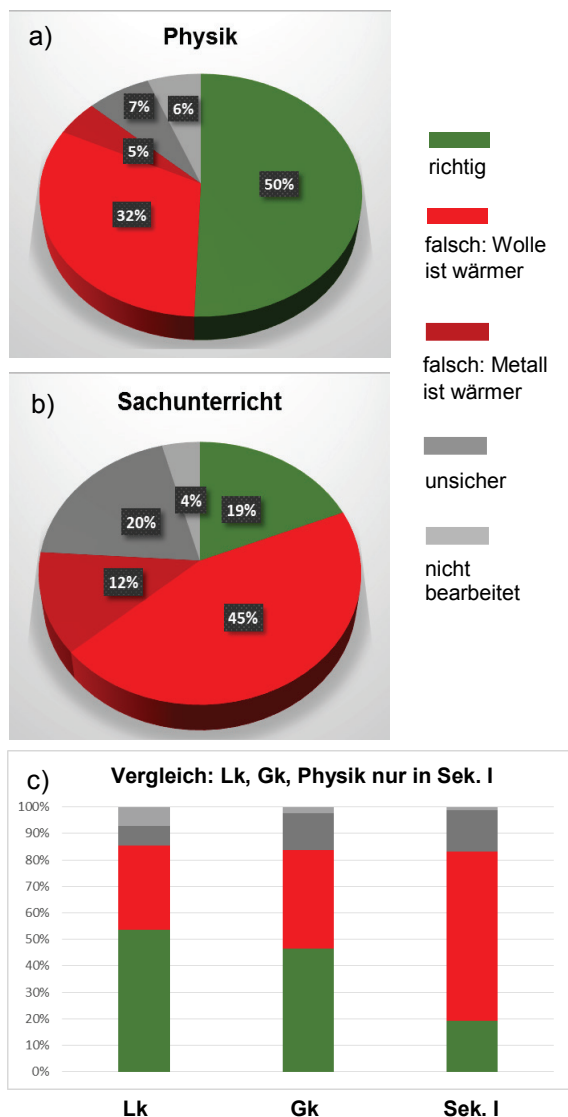


Abb. 9: „Wolle ist warm – Metall ist kalt“

Die restlichen Studierenden, die eine höhere Temperatur im Pullover vermuten, begründen nicht oder mit kaum nachzuvollziehenden Argumenten, wie z. B.: „Metall ist ein schlechter Wärmeleiter“, „Im Pullover herrscht eine eigene Temperatur ohne äußere Einflüsse“, „Kommt darauf an, ob Sonne vorhanden ist.“,

„Da Metall Wärme leitet, entzieht das Metall dem Thermometer Wärme“ oder „Wolle leitet elektrischen Strom“. Neben den Argumentationen über die Wärmeleitfähigkeit finden sich auch Begründungen über andere Materialeigenschaften wie Dichte oder Rauigkeit, beispielweise: „Die Metallplatte ist glatt, so dass Wärme schnell an die Umgebung abgegeben wird. Der Pullover ist rau, so dass die Wärme länger im Material bleibt.“

Insgesamt 16 Studierende nehmen an, dass die Metallplatte eine höhere Temperatur hat. Bei der Begründung argumentieren hier 6 über die gute Wärmeleitfähigkeit von Metallen. 2 meinen, dass Metall Wärme besser speichern kann und 2 weitere begründen mit den isolierenden Eigenschaften des Pullovers: „Der Pullover ist ein Wärmeisolator“ und „Der Pullover isoliert das Thermometer.“ Die restlichen begründen nicht oder halten die Metallplatte generell für wärmer: „Die Metallplatte ist wärmer und nur ein Teil der Wärme geht in Pullover über“ bzw. „Je nach Zeit ist die Metallplatte wärmer, später kann die Temperatur identisch werden.“

Insgesamt zeigen die Antworten, dass bei Vielen der Studierenden Unklarheiten über den Unterschied zwischen Wärme und Temperatur sowie über den Einfluss der Wärmeleitfähigkeit herrschen. Die für Schülerinnen und Schüler dokumentierte, aus dem persönlichen Empfinden resultierende Vorstellung „Wolle ist warm/Wolle wärmt“ persistiert bei Vielen über die Schulzeit hinaus.

3.3.2 Schwimmen und Sinken

Für Grundschul Kinder sind verschiedene Vorstellungen vom Schwimmen und Sinken bekannt, die sich auf die Beschaffenheit eines Körpers wie Größe, Masse oder Luftinhalt beziehen (Zusammenfassung z. B. in [16]). Wir haben den Studierenden, insbesondere mit Hinblick auf die Sachunterrichtsstudierenden, die später an der Grundschule diese Sachverhalte frei von eigenen Fehlvorstellungen unterrichten können müssen, eine entsprechende Fragestellung vorgelegt:

- 1) Alles was schwer ist geht im Wasser unter, alles was leicht ist schwimmt
ja nein bin ich mir unsicher
- 2) Alles was groß ist geht im Wasser unter, alles was klein ist schwimmt
ja nein bin ich mir unsicher
- 3) Alles was hohl ist schwimmt
ja nein bin ich mir unsicher
- 4) Alles wo Luft drin ist schwimmt.
ja nein bin ich mir unsicher

Komplett richtig wird die Aufgabe von 15 der insgesamt 96 Sachunterrichtsanfänger beantwortet (knapp 16%). 13 weitere beantworten alles bis auf 4) richtig. Bei den Physikanfängern beantworten 39 (knapp 46%) alle Aufgabenteile richtig, 10 weitere alles bis auf Teil 4).

Schaut man sich die vier Fragen der Aufgabe einzeln an (Abb. 10), so zeigt es sich, dass sich die Studierenden bei der auf die Größe abzielenden Frage 2) sehr sicher sind: Nur ein Sachunterrichtsanfänger meint, dass große Gegenstände grundsätzlich sinken. Jedoch schon bei der Frage nach der Masse (1) zeigen sich mehr Fehler und Unsicherheiten. Die Fragen, ob hohle oder luftgefüllte Körper grundsätzlich schwimmen (3 und 4) wird dann von wesentlich mehr Studierenden bejaht; auch die Unsicherheiten nehmen deutlich zu. Bei den Sachunterrichtsstudierenden meinen mehr als 56%, dass luftgefüllte Körper grundsätzlich schwimmen. Nur von einem der Studierenden wird thematisiert, dass in hohlen Körpern doch auch Luft drin sei.

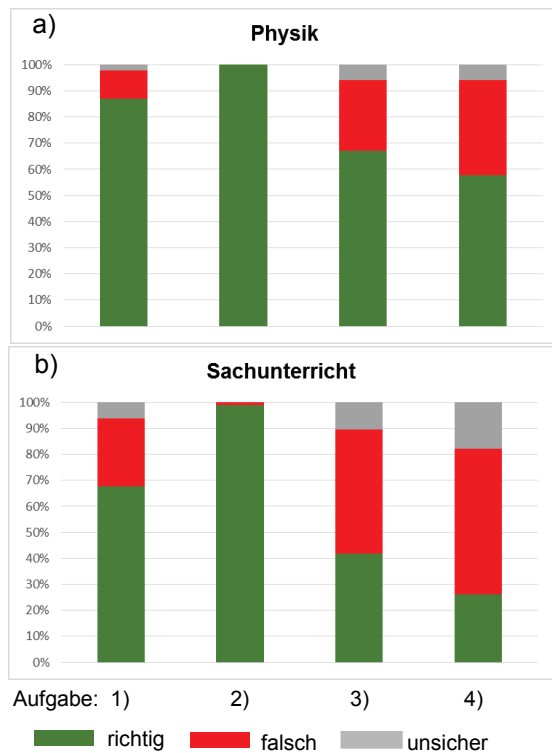


Abb. 10: Schwimmen und Sinken

3.3.3 Entstehung der Jahreszeiten

Unkenntnis oder falsche Vorstellungen über die Entstehung der Jahreszeiten sind nicht nur bei Schülerinnen und Schülern, sondern auch in der Bevölkerung weit verbreitet. Häufig wird die Elliptizität der Erdbahn als Ursache angesehen (siehe z. B. [17], [18]), ohne dass darüber nachgedacht wird, dass Nord- und Südhalbkugel gleichzeitig unterschiedliche Jahreszeiten haben. Auch in der Pisa-Studie 2003 gab es eine Aufgabe zur Ursache der Jahreszeiten bzw. Tageslänge – in Verbindung mit der Abgrenzung zur Entstehung von Tag und Nacht (siehe z. B. [19], [20]). Wir haben den Studierenden folgende Fragestellung vorgelegt:

Die Jahreszeiten entstehen, weil:

Die Erde im Laufe eines Jahres mal näher und mal weiter von der Sonne entfernt ist (elliptische Umlaufbahn der Erde)

ja nein bin ich mir unsicher

Die Erde „schief steht“ (Neigung der Erdachse)

ja nein bin ich mir unsicher

Der Mond mal näher und mal weiter von der Erde entfernt ist

ja nein bin ich mir unsicher

Die Ergebnisse sind Abbildung 11 zu entnehmen.

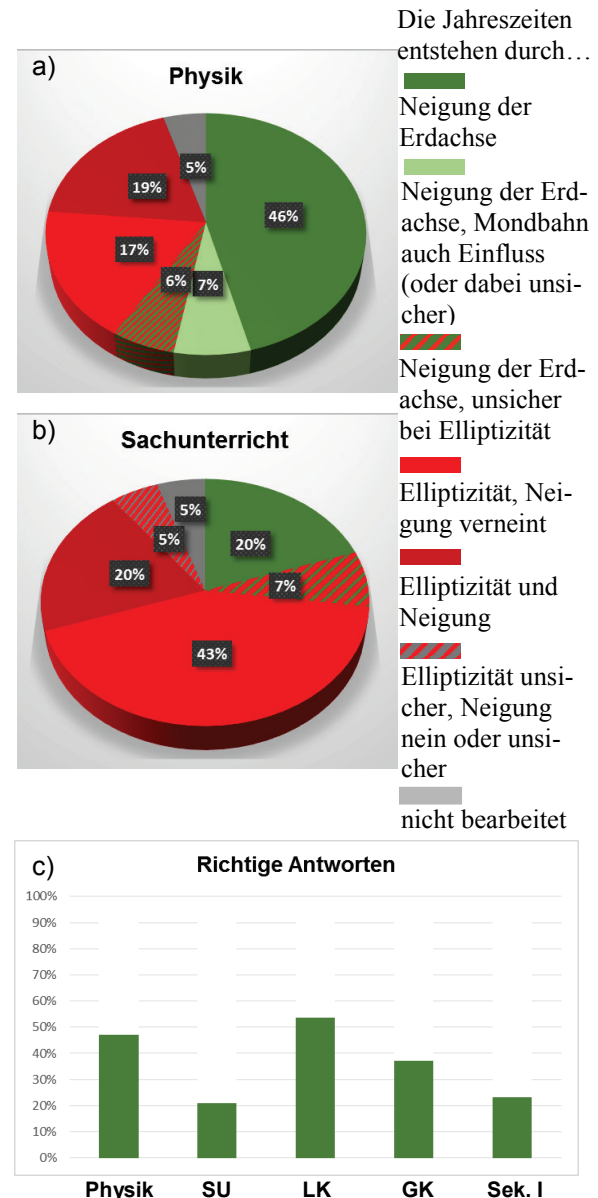


Abb. 11: Entstehung der Jahreszeiten

Bei den Physikanfängern beantworten immerhin 46% die Aufgabe vollständig richtig. Weitere 7% wissen offenbar auch, dass die Achsneigung die Ursache ist, meinen aber, dass auch der Mond einen Einfluss hat oder sind sich dabei unsicher. Bei den Sachunterrichtsanfängern antworten nur etwa 20% richtig. Ein kleiner Prozentsatz beider Gruppen (6% bzw. 7%, rot-grün-schraffiert in Abb. 11) antwortet ebenfalls richtig mit „Neigung der Erdachse“, ist aber unsicher, ob die Elliptizität nicht auch eine Rolle spielt.

43% der Sachunterrichtsstudierenden und 17% der Physikstudierenden sind davon überzeugt, dass die Elliptizität der Bahn ursächlich für die Jahreszeiten ist und verneinen den Einfluss der Achsneigung ausdrücklich (hellrot in Abb. 11). 19% bzw. 20% meinen, dass beides eine Rolle spielt (dunkelrot in Abb. 11). Ein kleinerer Teil der Sachunterrichtsstudierenden (5%) ist sich unsicher beim Einfluss der Elliptizität, verneint aber den Einfluss der Achsneigung oder ist sich hier auch unsicher.

Auch bei dieser Aufgabe ist wieder deutlich eine Korrelation mit der physikalischen Vorbildung oder dem physikalisch-naturwissenschaftlichen Interesse festzustellen (Abb. 11c): Während knapp 54% der Leistungskursabsolventen, die die Aufgabe bearbeitet haben, die Ursache der Jahreszeiten komplett richtig angeben können, sind es bei den Studierenden mit Sek. I Vorbildung nur 23%, die über dieses Wissen verfügen. Offensichtlich ist astronomisches Wissen selbst um die Vorgänge und Zusammenhänge, die das Leben auf der Erde so direkt und für jeden sichtbar beeinflussen wie die Jahreszeiten, auch unter Abiturienten nicht sehr ausgeprägt. Selbst bei der Entstehung von Tag und Nacht scheint es Unklarheiten zu geben, denn zwei der Sachunterrichtsstudierenden verneinen den Einfluss der Erdachsenneigung auf die Entstehung der Jahreszeiten und kommentieren explizit, dass diese für Tag und Nacht verantwortlich sei.

Auch die Vorstellungen in Zusammenhang mit dem Mondumlauf sind wenig gefestigt. Dieses betrifft zum Beispiel die Entstehung der Mondphasen und in diesem Zusammenhang natürlich auch Mond- und Sonnenfinsternisse und wurde für Schülerinnen und Schüler dokumentiert (beispielweise in [19]). Auch wir haben diesbezüglich viel Unkenntnis bei Studierenden in Lehrveranstaltungen festgestellt, aber nicht systematisch untersucht. In der Aufgabe zur Entstehung der Jahreszeiten hier, zeigt sich diese Unsicherheit bzgl. des Mondes jedoch auch. Ein relativ hoher Anteil der Studierenden, die die Aufgabe bearbeitet haben, nimmt einen Einfluss der Mondentfernung auf die Jahreszeiten an, oder ist sich hinsichtlich des Einflusses unsicher (nicht dargestellt in Abb. 11): Insgesamt 10 von 81 der Physikstudierenden nehmen den Einfluss der Mondentfernung als gegeben an, 7 sind unsicher. Bei den Sachunterrichtsstudierenden bejahen insgesamt 3 den Einfluss der Mondentfernung, 18 sind unsicher. Offensichtlich wird nicht überlegt, dass sich die Jahreszeiten bei Annahme eines Mondeinflusses ca. jeden Monat ändern müssten.

Hier würde man sich wünschen, dass die elementaren, für das Leben auf der Erde so wichtigen astronomischen Vorgänge im Unterricht ausführlicher und nachhaltiger behandelt würden.

4. Literatur:

[1] Müller, Rainer; Wodzinski, Rita; Hopf, Martin (Hrsg.) (2004), Schülervorstellungen in der Physik, Aulis Verlag Deubner, Köln

- [2] Schecker, Horst (2010): Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten im Physikunterricht, www.idn.uni-bremen.de/pubs/MNU_2010_Berlin_Folien_Schecker_2S.pdf (Stand: 4/2018)
- [3] Matzig, Juliane; Reddeck, Petra (2005): Schülervorstellungen zu physikalischen und technischen Themen im Sachunterricht, https://www.uni-kassel.de/fb10/fileadmin/datas/fb10/physik/didaktik/pdf_dateien/Schuelervorstellungen/Schuelervorstellungen.pdf (Stand: 4/2018)
- [4] v. Rhöneck, Christoph (1986): Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis. In: Naturwissenschaften im Unterricht – Physik/Chemie 34, 13, S. 10 -14 (auch in [1] S. 167f)
- [5] Müller, Svetlana; Burde, Jan-Philipp; Wilhelm, Thomas (2015): Vergleich von Schülervorstellungen zur Elektrizitätslehre in Hessen und Weißrussland. In: PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung 2015, <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/629> (Stand: 4/2018)
- [6] Duit, Reinders (1993): Alltagsvorstellungen berücksichtigen! In: Praxis der Naturwissenschaften Physik, 6, 42, S. 7-11 (auch in [1] S. 3f)
- [7] Urban-Woldron, Hildegard; Hopf, Martin (2012): Entwicklung eines Testinstruments zum Verständnis in der Elektrizitätslehre. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 18, S. 203 – 229
- [8] Stetzer, MacKenzie R.; van Kampen, Paul; Shaffer, Peter S.; McDermott, Lillian C. (2013): New insights into student understanding of complete circuits and the conservation of current. In: Am. J. Phys. 81, 2, S. 134 – 143
- [9] Wiesner, Hartmut (1992): Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten mit dem Spiegelbild. In: Naturwissenschaften im Unterricht – Physik 3,14, S. 16 -18 (auch in [1] S. 80f)
- [10] Wiesner, Hartmut (1994): Ein neuer Optikkurs für die Sekundarstufe I, der sich an Lernschwierigkeiten und Schülervorstellungen orientiert. In: Naturwissenschaften im Unterricht – Physik 5, 22, S. 7 – 15
- [11] http://schuleneduhi.at/riedgym/physik/8/optik/licht_grundbe/start_grundbe.htm (Stand: 4/2018)
- [12] https://wiki.zum.de/wiki/Optik_im_Kontext/Sch%C3%BClervorstellungen_vom_Sehen (Stand: 4/2018)
- [13] <https://www.leifiphysik.de/file/sehvorgangaufgabesvg> (Stand: 4/2018)
- [14] Duit, Reinders (2003): Alltagsvorstellungen und Physiklernen. In: Kircher, Ernst; Schneider, Werner B. (Hrsg.): Physikdidaktik in der Praxis, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, S. 2 (mit freundlicher Genehmigung des Verlags)

- [15] Physik für Gymnasien (1994), Sekundarstufe I, Länderausgabe D Gesamtband, Cornelsen Verlag, Berlin, S. 56
- [16] Jonen, Angela; Möller, Kornelia (2005): Der Unterricht zum Thema „Schwimmen und Sinken“. In: Klasse(n)kisten für den Sachunterricht – Schwimmen und Sinken, Spectra Verlag, Essen, S. 36-37
- [17] Köster, Hilde; Backhaus, Udo (2016): Gefährliche Sonnenfinsternis – von Fehlvorstellungen über Himmel und Erde und deren Ursachen. In: Grundschulunterricht Sachunterricht 1, S. 24 – 29, <https://www.oldenbourg-klick.de/zeitschriften/grundschulunterricht-sachunterricht/2016-01/gefaehrliche-sonnenfinsternis> (Stand: 4/2018)
- [18] Raber, Anne (2015): Schülervorstellungen zur Entstehung der Jahreszeiten, AV Akademiker- verlag, Saarbrücken
- [19] Beispielaufgaben Naturwissenschaften PISA- Hauptstudie 2003, S. 7-8, https://archiv.ipn.uni-kiel.de/PISA/Aufgaben_Naturwissenschaft.pdf (Stand: 4/2018)
- [20] Hammann, Marcus (2006): PISA und Scientific Literacy. In: Steffens, Ulrich; Messner, Rudolf (Hrsg.): PISA macht Schule – Konzeptionen und Praxisbeispiele zur neuen Aufgabenstruktur, Institut für Qualitätsentwicklung, Wiesbaden, S. 162, https://kultusministerium.hessen.de/sites/default/files/media/pisa_macht_schule.pdf (Stand: 4/2018)

Zur Überzeugungskraft von Experimenten zum Teilchenmodell

Max Hofmann, Roger Erb

Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität-Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main
hofmann@physik.uni-frankfurt.de, roger.erb@physik.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

Der Einstieg in das Teilchenmodell nimmt für Schüler und Schülerinnen als einer der ersten Berührungspunkte mit moderner Physik eine besondere Rolle ein: Einerseits markiert dieser Übergang den grundlegenden kategorialen Wechsel zwischen Mikro- und Makrowelt, welcher mit neuen Beschreibungsweisen, Begriffen und Erklärungsmustern einhergeht, die sich von alltagsbezogenen Denkweisen deutlich mehr als die der klassischen Mechanik unterscheiden. Andererseits dringen die Schüler und Schülerinnen hier unweigerlich erstmals zur Grenze der Erkennbarkeit der Welt vor. Jede Erkenntnis muss der Natur gewissermaßen zuerst „abgerungen“ werden.

Dies bedeutet für die verwendeten Experimente eine große Herausforderung: Sie sind einerseits in der Regel vergleichsweise abstrakt und erfordern meist hohen (mental und technischen) Aufwand. Andererseits ist es oft nicht möglich, deren Fragestellungen aus der direkten Erfahrungswelt der Schüler und Schülerinnen abzuleiten, sie müssen erstmalig im Unterricht problematisiert werden, um eine Beschäftigung mit den Themengebieten zu motivieren.

In der vorgestellten Studie wurde daher untersucht, wie groß die Überzeugungskraft von Experimenten zum Teilchenmodell von Studierenden eines Einführungsseminars eingeschätzt wird. Auch mögliche Faktoren wie das jeweilige Teilchenkonzept der Versuchsperson und dessen Einfluss wurden hierbei erfasst.

Der empirischen Untersuchung ging die Explizierung eines den Inhalten der Sekundarstufe I zu Grunde liegenden, impliziten Teilchenmodells, voraus. Dessen einzelne Kernaussagen wurden hierbei als notwendig zum Verständnis einfacher Schulexperimente zum Aufbau von Materie erachtet. In einem nächsten Schritt wurden mittels einer gründlichen Recherche einschlägiger Literatur einzelne Experimente zum Teilchenmodell herausgesucht, welche zusammen ein möglichst breites Spektrum der genannten Aussagen abdecken sollten. Besonderer Schwerpunkt war dabei der diskontinuierliche Aufbau von Materie.

1. Ein Teilchenmodell der Sekundarstufe I

Zum Verständnis der in der Studie zu ermittelnden Einschätzungen der Überzeugungskraft von Experimenten zum Teilchenmodell war es essentiell zu klären, um welche Art von „Teilchenmodell“ es sich hierbei handeln würde. Aus diesem Grund wurde im Vorfeld der Untersuchung ein System von Aussagen erstellt, welche zum Verständnis der einfachen Experimente notwendig sind.

1.1. Bedeutung des Begriffs „Teilchen“ im Unterrichtskontext

An die Ergebnisse einschlägiger Studien zum Teilchenmodell anknüpfend, soll ein möglichst schlanker Teilchenbegriff verwendet werden, der maßgeblich auf dem Faktum der Diskontinuität der Materie beruht. Angesichts der vielen Wandlungen, die der Teilchenbegriff historisch, aber auch im Laufe des Schulcurriculums (welches ein Stück weit die historische Entwicklung der Physik nachzeichnet) erfährt, ist es deshalb das Ziel, so wenig Annahmen wie möglich zu machen, die für ein naives, alltagsnahes Teilchenbild sprechen. Der Weg zur modernen, hauptsächlich epistemischen Verwendungweise des

Begriffs¹ würde sonst möglicherweise erschwert, wie auch die Befunde zur Persistenz anschaulicher Atommodelle bei Schülern und Schülerinnen² bis zum Abschluss der Schullaufbahn nahelegen (LICHTFELDT, 1991). Der in folgendem Modell vorkommende Begriff „Teilchen“ verweist im Wesentlichen auf das gleiche Objekt, was man auch als „Atom“ bezeichnen würde. Letzterer Begriff wird aber bewusst vermieden, da mit ihm auch ein gewisses, möglicherweise problematisches Präkonzept verbunden ist und er weitere Implikationen, wie „Kern“, „Hülle“ usw. mit sich führt. Da diese aber in der Einführungsphase keinen wesentlichen erklärenden Beitrag liefern und zudem nicht ohne weitere elektrostatische Grundkenntnisse verstanden werden können, wäre eine Thematisierung nicht sinnvoll. Es soll mit „Teilchen“ geübt werden, nur das anzunehmen, was zur Erklärung der Phänomene notwendig ist.

1.2. Anforderungen an den Teilchenbegriff im Unterrichtskontext

¹ siehe zum modernen Teilchenbegriff insbesondere FALKENBURG (1993, 2006)

² im Folgenden auch als „Lernende“ bezeichnet

SABOROWSKI (2006) zufolge ist der Physikunterricht der Sekundarstufe I zu Teilchen hauptsächlich durch Aussagen geprägt, die der kinetischen Gastheorie/Theorie des idealen Gases entstammen. Ausgehend von sowohl Schulbüchern als auch von einschlägigen Beobachtungen zählt er folgende Eigenschaften des üblicherweise verwendeten Teilchenmodells auf:

1. „Die Teilchen besitzen eine **Kugelgestalt**. (...)
2. Die Teilchen sind **ständig in Bewegung**. (...)
3. Die Teilchen haben eine **homogene Massenverteilung**. (...)
4. Die Teilchen einer Teilchensorte haben eine **einheitliche Masse**. (...)
5. Die Teilchen einer Teilchensorte haben eine **einheitliche Größe**. (...)
6. Zwischen den Teilchen wirken **Kräfte**. (...)⁴ (SABOROWSKI 2006, S. 211)

Die Hälfte dieser Aussagen (Kugelgestalt, homogene Massenverteilung, Größe) ist weder für die Theorie des idealen Gases notwendig noch gemäß dem fachwissenschaftlichen Konsens in Hinblick auf aktuelle Theorien der Quantenmechanik korrekt. Sie sind eher Ausdruck des Wunsches einer anschaulichen Darstellung und verwenden, ja bestärken sogar, makroskopische Erklärungsstrukturen bei Mikroprozessen. Problematischer Weise legten ja aber Studien zur Schülervorstellungen der Teilchen nahe, dass diese naiven und anschaulichen Bilder, wenn sie erst einmal eingeführt wurden, starke Persistenz über die ganze Schullaufbahn hinweg zeigen. Wir plädieren deshalb mit BUCK (1982) festzuhalten, dass solche Eigenschaften wie „klar definierte Form“ nicht nur in einem adäquaten Teilchenmodell der Schule unerwähnt (was schon ein Fortschritt zum aktuellen Zustand gemäß den obigen Aussagen wäre), sondern bewusst als „nicht Teil des Teilchenmodells, da nicht notwendig zu Erklärung der Phänomene“ bezeichnet werden.

Im späteren Verlauf des Curriculums kann dann, im Zuge erster Darstellungen quantenmechanischer Modelle in der Oberstufe, die Aussage nochmals aufgenommen und zu „Den Teilchen kommen die Eigenschaften konkrete Form, konkrete Größe etc. nicht zu.“ präzisiert werden. Im Unterschied zum Unterricht der Sekundarstufe I kann nun diese Aussage aber auch mit Experimenten gestützt werden, welche zuvor noch nicht verständlich waren.

Idealerweise verspricht ein erstes Teilchenmodell folglich zum einen nichts, was im späteren Schulverlauf nicht eingehalten werden kann und erklärt zum anderen doch mit seinen wenigen Annahmen alle relevanten Versuche: Den Aussagen der Theorie des idealen Gases sollte deshalb nicht unnötigerweise Anschauliches, sofern ohne Mehrwert bei der Erklärung, hinzugefügt werden.

Es fällt jedoch leider auf, dass die Erklärungen eines Großteils der gängigen Versuche weit über den Gel-

tungsbereich dieser Theorie hinausgehen: Versuche mit Flüssigkeiten, Schmelzvorgänge oder auch Versuche zum Gesetz der multiplen Proportionen erfordern ein Modell, welches auch chemische Interaktionen sowie Aggregatzustände erklären kann. Es muss deshalb über den Bezugsraum der kinetischen Gastheorie hinausgehen, indem es weitere notwendige, den Theorien zum Aufbau von Feststoffen etc. entlehnte Aussagen aufgreift. Deshalb ist es schlussendlich nicht mit einem bestimmten fachwissenschaftlichen physikalischen Modell zu verwechseln, sondern stellt den Versuch dar, die nötigen Grundaussagen verschiedener physikalischer Modelle so zusammenzutragen, dass sie ein für den Schuleinsatz möglichst erklärungsstarkes, konsistentes und sparsames Konstrukt bilden, von dem aus dann wie einem Fundament im Laufe des Lernprozesses physikalischer Inhalte im Laufe der Schule und Universität moderne Theorien aufgebaut werden können.

Das folgende Modell kann als *ein möglicher* Vorschlag eines Teilchenmodells der Sekundarstufe I verstanden werden. Die meisten in ihm aufgeführten Aussagen werden zwar in der Regel im Unterricht zu Teilchen nicht expliziert. *Dennoch ist davon auszugehen, dass sie in dieser oder ähnlicher Form implizit mitgedacht werden, um die präsentierten Versuche überhaupt verstehen zu können.*

Allgemeine Eigenschaften:

1. Jede Materie ist aus kleinsten, nicht sichtbaren Teilchen zusammengesetzt.
2. Den Teilchen kommen die Eigenschaften: „Masse“, „Geschwindigkeit“, „Ort“ sowie das „Vermögen³, andere Teilchen anziehen und abstoßen zu können“, zu⁴. Diese Eigen-

³ Der Begriff der Ladung wird explizit vermieden, da hierfür eine Thematisierung der Substruktur (Kern, Hülle) nötig wäre. Es reicht zunächst aus, zu wissen, dass die Teilchen bestimmte Abstoßungs- und Anziehungscharakteristika haben. Die Ursache (Orbitale) kann im späteren Schulverlauf verstanden werden.

⁴ Der mittlere Teilchenabstand ist zwar ebenso oftmals von Interesse, wurde aber bewusst nicht als elementare Eigenschaft aufgezählt, weil er vielmehr Resultat der genannten Eigenschaften sowie der atomaren/molekularen Substrukturen ist. Letztere sind jedoch nicht Teil dieses basalen Modells. Es wird bewusst auf den Begriff des Teilchenvolumens als „Erklärung“ für den Teilchenabstand verzichtet. Hier müsste man vielmehr vom Volumen der Einheitszelle sprechen, was jedoch im hier betrachteten Kontext zu weit führen würde. Die Gefahr der Fehlvorstellung, Atome/Moleküle würden ihre Größe je nach Randbedingungen signifikant ändern und dadurch zu den unterschiedlichen Volumina der Aggregatzustände führen, wäre insbesondere dann sehr groß.

schaften charakterisieren die Teilchen *vollständig*⁵.

- a. Es ist nicht erforderlich, eine Form der Teilchen anzugeben. Bei der anschaulichen Darstellung fällt die Wahl häufig auf Kugeln, jedoch ist diese Festlegung nicht zwingend.⁶
 - b. Es ist nicht erforderlich, eine Substruktur der Teilchen anzugeben. Es kann bei der Erklärung der Experimente davon ausgegangen werden, es läge keine vor.
 - c. Es ist nicht erforderlich zu anzunehmen, dass oder wie sich die Teilchen intern ändern.
3. Teilchen verschwinden oder entstehen nicht neu.⁷ In einem abgeschlossenen System ändert sich die Gesamtzahl der Teilchen folglich nicht.
 4. Zwischen den Teilchen ist nichts bzw. nur leerer Raum.⁸ Dieser ist um ein Vielfaches größer als die Teilchen selbst und nimmt den Großteil des Volumens ein.

Eigenschaften in Anlehnung an die Theorie des idealen Gases:

5. In einem abgeschlossenen System ist die einzige mögliche Form der Wechselwirkung das Zusammenstoßen der Teilchen des Gases untereinander oder mit der Wand des Gefäßes.
6. Diese Stöße verlaufen vollkommen elastisch.⁹
7. Die Teilchen eines Gases sind in ständiger, reibungsfreier Bewegung. Diese ist folglich gleichförmig und ändert sich nur bei Zusammenstößen.
8. In einem abgeschlossenen System ist die Gesamtenergie der Teilchen erhalten.
9. In einem abgeschlossenen System verteilen sich die Teilchen eines Gases ohne äußere Einflüsse gleichmäßig im Raum.¹⁰

⁵ Diese Feststellung ist entscheidend: Die Teilchen sind folglich auch nur im Rahmen dieser Eigenschaften individuierbar.

⁶ bzw. sogar nicht anzugeben, Teilchen verfügen nicht über die Eigenschaft „Form“ im klassischen Sinne, siehe BUCK (1982).

⁷ Effekte wie „Paarbildung“ sind im betrachteten Kontext nicht relevant. Der Kern der Aussage meint auch vielmehr das „ersatzlose“ Verschwinden oder Entstehen aus dem Nichts.

⁸ Für einen möglichen „Träger- oder „Füllstoff“ würde ebenfalls (1) gelten. Somit wären die beobachteten Teilchen gar nicht Teilchen im eigentlichen Sinne, was ein Widerspruch wäre.

⁹ Ein inelastischer Stoß würde implizit gegen Annahmen (2b, 2c) verstoßen.

¹⁰ Die Geschwindigkeiten und beteiligten mikroskopischen Abstoßungs- und Anziehungskräfte sind im Verhältnis zur Gewichtskraft so groß, dass Gravita-

10. Die Teilchen können in einem offenen System Energie aufnehmen, z.B. bei Zufuhr von Wärme: Diese führt zur Erhöhung der mittleren Geschwindigkeit der Teilchen und damit ihrer kinetischen Energie.
11. Die Temperatur eines Gases ist direkt proportional zur mittleren kinetischen Energie der Teilchen.
12. Der Druck des Gases auf die Wände es Gefäßes entsteht durch elastische Stöße der Gasteilchen mit den Teilchen der Gefäßwand.
13. In einem Gas hängt der mittlere Abstand zwischen den Teilchen, und damit das mittlere eingenommene Volumen pro Teilchen, (näherungsweise) lediglich von den Parametern Druck und Temperatur ab. Nicht jedoch von der Art des Gases.

Eigenschaften, die zur Darstellung chemischer Reaktionen, Mischungen, Lösungsvorgängen sowie Aggregatzuständen, notwendig sind:

14. Jedes „chemische Element“ besteht aus der vielfachen Anordnung eines *ihm spezifischen* Teilchens, bzw. ist aus einer Vielzahl dieser aufgebaut. Diese unterscheiden sich untereinander womöglich in „Geschwindigkeit“ und „Ort“, nicht aber in „Masse“¹¹ und „Anziehungs-/Abstoßungsvermögen“. Letztere tragen zur makroskopischen Verschiedenartigkeit der jeweiligen Elemente bei und sind daher element-spezifisch.
15. Ob sich zwei Teilchen anziehen oder abstoßen, hängt von ihrem Abstand zueinander ab: Die Teilchen ziehen sich zunächst an, presst man sie immer näher zusammen, so stoßen sie sich schließlich ungleich stärker ab.
16. Das abstandsspezifische Anziehungs-/Abstoßungsvermögen ermöglicht, dass sich je nach der mittleren kinetischen Energie der Teilchen verschiedene Kategorien von Strukturen bilden können. Man nennt diese Kategorien „Aggregatzustände“. Sie unterscheiden sich auch makroskopisch erheblich:
 - a. *Gas*: Lose Struktur einzelner Teilchen, zufällige und gleichförmige Bewegung. Position variabel. Großer Abstand untereinander. Auf Grund des großen Abstandes und der hohen mittleren Geschwindigkeit überwiegt die starke, aber kurzreichweitige Abstoßung.
 - b. *Flüssigkeit*: Geordnete Struktur von Gruppen einzelner Teilchen, zufällige und

tion keinen bei Kurzzeitbeobachtungen entscheidenden/auffälligen Beitrag liefert.

¹¹ ...von kleineren Unterschieden zwischen den Isotopen abgesehen. Auch hier wäre eine genauere Formulierung ohne Kenntnis von Nukleonen nicht zielführend.

- gleichförmige Bewegung. Position variabel. Kleiner Abstand untereinander. Durch die Abstoßung untereinander nehmen die Teilchen ein festes Volumen ein. Die Flüssigkeit ist dadurch (weitgehend) inkompressibel.
- c. *Festkörper*: Feste Gitterstruktur der Teilchen. Position wenig (bis auf Gitterschwingungen) variabel. Kleiner Abstand untereinander. Die Teilchen sind durch Anziehung und Abstoßung ortsfest, der Festkörper dadurch in seiner Form stabil.
17. Bei der Änderung eines Aggregatzustandes wird folglich nur die Struktur der Teilchen des Stoffes untereinander geändert.
18. Bringt man mehrere Stoffe (mit möglicherweise durchaus verschiedenen makroskopischen Eigenschaften) zusammen, so können dabei alle Eigenschaften erhalten bleiben, manche verloren gehen und sich sogar grundlegend neue Eigenschaften bilden, so dass das Endprodukt keine Ähnlichkeit mehr mit den Ausgangsstoffen haben muss. In keinem Fall ändern sich aber die Teilchen selbst, ihre Anzahl bleibt gleich. Was sich vielmehr ändern kann, ist die Struktur (ganz oder nur graduell), mit der sie geordnet sind: Ändert sich diese, so können sich auch die makroskopischen Eigenschaften ändern. Solche Endprodukte enthalten mehr als eine Teilchenart und sind daher keine Elemente, sondern entweder „Gemische“ oder „chemische Verbindungen“.
19. Chemische Verbindungen - bei ihnen ändert sich die gesamte Ordnung der Teilchen - sind *nur in ganz bestimmten Verhältnissen* möglich. Diese hängen von den jeweiligen stoffspezifischen mikroskopischen Eigenschaften der beteiligten Teilchen ab.
20. Je nach dem, ob bei diesen Wechseln der Teilchenordnungen, von einem Stoff (Wechseln der Aggregatzustände) oder zwischen mehreren Stoffen (Verbinden, Trennen, usw.), gegen oder mit den Kräften zwischen den Teilchen Arbeit verrichtet wird, erfordern (endotherm) oder liefern (exotherm) diese Neuordnungen Energie.
21. Jegliche Veränderungen (Wechsel des Aggregatzustands, Verbindung, Trennung, Vermischen mehrerer Reinstoffe, Lösen usw.) sind (prinzipiell) wieder rückgängig zu machen.¹²

¹² Hiermit ist gemeint: Da die Teilchen sich selbst nicht ändern, ist es im Prinzip auch möglich, die Konfiguration (wie auch immer) in den ursprünglichen Zustand zu versetzen. Dies bedeutet natürlich nicht, dass sich dies unter Normbedingungen einstellt. Es wird nicht einmal vorausgesetzt, dass es technisch einfach realisierbar ist. Der Begriff der thermodynamischen Reversibilität wird bewusst vermieden, um Missverständnisse zu vermeiden.

22. Die *Struktur der Teilchen untereinander* ist für die *makroskopischen Eigenschaften* des Stoffes primär. Die jeweiligen *mikroskopischen Eigenschaften* der einzelnen Teilchen haben dabei Einfluss darauf, welche Strukturen sich bilden können.

Ein Großteil der Aussagen wird notwendig, wenn über die einfachen Beobachtungen thermodynamischer Parameter von Gasen hinausgegangen wird. Es ist eine besondere Schwierigkeit der schulischen Einführung in das Teilchenmodell, dass mit einem ersten Schritt bereits ein derart komplexes Aussagensystem gebildet werden muss, um überhaupt die wesentlichen Phänomene konsistent erklären zu können. Es scheint demnach keinen „abgespeckten Einstieg“ zu geben, der nur wenige der Aussagen nutzt und stetig weiter ausgebaut werden kann. Es handelt sich eher um ein „alles oder nichts Prinzip“: Entweder man versteht alle Aussagen gemeinsam, oder man hat nicht verstanden, was „Teilchen als Aufbaustein der Materie“ bedeutet.

Wie bemerkt: Es mag unsinnig sein, diese Aussagen in der gymnasialen Mittelstufe einzeln „abzuarbeiten“. Ich möchte aber problematisieren, dass man *eigentlich* von den Schülern und Schülerinnen implizit erwartet, dass sie ein ähnliches Konstrukt im Laufe der Einführung zum Teilchenmodell ausbilden – und nicht etwa die wenigen zentralen Aspekte schlicht auswendig lernen. Es zeichnet sich also ab, wie schwierig dieser Denkprozess für den Einzelnen tatsächlich ist und, dass er, obwohl die Mehrheit der Schüler und Schülerinnen bereits (dank weitgehender Verbreitung in Medien etc.) mit einem zumindest naiven Verständnis von Teilchen/Atomen in die Schule kommen¹³, mit ausreichend Relevanz und Zeit im Physikunterricht unterstützt werden muss.

Aus diesem Grund braucht es auch zur Begriffsbildung eine Vielzahl von Experimenten, um möglichst alle Aussagen abdecken zu können. Wie im kommenden Kapitel 2 zu sehen sein wird, decken die Versuche jeweils einige der 22 Aussagen ab, teils aus unterschiedlichen Perspektiven.

2. Gewählte Schulversuche zum Teilchenmodell

Es wurde im Vorfeld der Befragung eine größtenteils auf einschlägiger Literatur basierende ausführliche Sammlung möglicher Versuche zum Teilchenmodell erstellt. Die hierin enthaltenen 39 Versuche wurden neben der Beschreibung der jeweils benötigten Materialien und den zu sehenden Phäno-

¹³ Die vorherige Bekanntschaft mit teilchenartigen Materiekonzepten vermag sogar eine zusätzliche Schwierigkeit zu sein, da erst problematisiert werden muss, warum diese möglicherweise zu einfach sind. Die Gefahr in Hinblick auf den Eindruck, *man habe ja nichts gelernt, was man nicht schon vorher wusste*, ist groß.

mena zunächst unter folgenden Gesichtspunkten bewertet:

- *Voraussetzungen*

Es wird untersucht, wie viele Annahmen und Vorkenntnisse nötig sind, um das Experiment zu verstehen.

- *Konsistenz und Plausibilität*

Hierbei wird überprüft, wie schlüssig und konsistent der Versuch zeigen kann, was er soll. Es wäre zu erwarten, dass Kriterien für die Überzeugungskraft des Versuchs wesentlich sind.

- *Probleme/Schwierigkeiten*

Diese Kategorie kann, auch bei sonst guten Resultaten, ein Ausschlusskriterium sein, wenn z.B. die Wahrscheinlichkeit, dass die Argumentation falsch verstanden wird, oder Fehlvorstellungen angelegt/verstärkt werden könnten, sehr hoch ist.

Die 39 Versuche ließen sich in folgende 6 Themenkomplexe einteilen, wobei aus jedem diejenigen ausgewählt wurden, welche nach den obigen Kriterien am geeignetsten schienen. Insgesamt 10 wurden für die Befragung ausgewählt:

Erster Themenkomplex: *Teilchen „sehen“, Darstellungsmethoden der modernen Physik*

- *Feldemissionsmikroskop:*

In einem evakuierten Glaskolben werden von einer monokristallinen Nadelspitze (Kathode) durch eine angelegte Spannungsdifferenz Elektronen der Spitze zur leitend beschichteten, fluoreszierenden Innenseite (Anode) des Glaskolbens beschleunigt. Durch das radialsymmetrische Feld und das große Verhältnis beider Krümmungsradien (Spitze zu Kolbenwand) wird eine Auflösung der Elektronenverteilung Nadelspitze auf dem Leuchtschirm im atomaren Bereich möglich. Generell sind Versuche, die die direkte Wahrnehmung (im Sinne von „Sehen“) von Teilchen auf atomarer Größenordnung suggerieren relativ problematisch, da die „Andersartigkeit“ (REHM 2009) der Mikrowelt schnell verkannt werden kann. Im Gegensatz zu anderen Verfahren zum „Sichtbarmachen“ von Teilchen ist aber hier der Entstehungsprozess des Bildes verhältnismäßig einfach (analog!). Für Aufnahmen z.B. eines RTM gilt dies ausdrücklich nicht, weshalb z.B. gegen dieses entschieden wurde. Andere Verfahren wie Röntgenbeugung, aber auch Rutherford-Streuung oder Nebelkammeraufnahmen wurden nicht ausgewählt, weil diese zu voraussetzungsreich sind und nicht zum einfachen Kontext der Einführung passen. Szintillationen einzelner Teilchen auf einem Silberjodit-Schirm, wie sie einst WAGENSCHNEIDER und BUCK (1984) vorgeschlagen hatten, wären auch denkbar, bergen aber unter anderem das Risiko, Teilchen in der Größe der Lichtflecken anzunehmen.

Zweiter Themenkomplex: *Versuche in Anlehnung zu Aussagen der Theorie des idealen Gases*

- ***Rauchteilchen: Brownsche Molekularbewegung***

(nach LANGENSIEPEN 1998)

In einen kleinen Würfel mit Glasseiten (Rauchkammer) wird Raumluf mit Rauchpartikeln eingebracht, etwa Zigarettenpapier-Rauch. Diese Partikel können dann, beobachtbar durch das Streulicht eines Lasers, unter dem Mikroskop beobachtet werden: Ihre Bewegung lässt auf mikroskopische, nicht sichtbare Stoßpartner schließen.

Auch andere Varianten, wie Brownsche Molekularbewegung anhand von Fett-Tröpfchen im Wasser sind möglich. Praktische Gründe waren hier entscheidungsgebend. Die weitere Flüssigkeits-Variante der Betrachtung der Teilchenbewegung in Abhängigkeit der Temperatur (in Anlehnung an Einsteins Deutung der Brownschen Molekularbewegung), etwa bei LANGENSIEPEN (1986) wurde verworfen, weil die korrekte Deutung durch den erheblichen Einfluss der mit steigender Temperatur sinkenden Viskosität der Flüssigkeit sehr kompliziert wird.

- ***Diffusion von Wasser und Farbstoff***

(nach FISCHLER & ROTHENHAGEN 1997)

Etwas Farbstoff in Pulverform wird, unter größtmöglicher Vermeidung von Konvektion, in einen Becherglas mit Wasser gegeben. Es bildet sich nach Auflösung des Pulvers am Becherglas eine zunächst diskrete Grenzschicht Wasser - farbiges Wasser. Diese Grenzschicht weicht nach einigen Stunden langsam auf. Das Wasser ist nach einigen Wochen gleichmäßig farbig. Hiermit soll die Brownsche-Molekularbewegung veranschaulicht werden, da sie als ursächlich für die Vermischung angenommen wird.

Die einfache Variante des Verteilens eines Duftes im Raum wurde nicht ausgewählt, weil in diesem Zusammenhang Konvektionsströme den relevanten Beitrag liefern. Alle anderen Versuche zur Diffusion wie Kaliumpermanganat und Wasser wären jedoch ebenso geeignet. Die Vermischung von Bromdampf und Luft wäre etwas komplizierter, brächte aber keinen nennenswerten Mehrwert.

- ***Kirsche zerplatzt im Wasser,***

(ebd.)

Kirschen platzen nach einigen Stunden in reinem Wasser von Innen auf. Hieraus wird geschlossen, dass es sich bei der Kirschhaut um eine semi-permeable-Membran handelt. Letztere erfordert aber ein diskontinuierliches Teilchenkonzept.

- ***Ei schwimmt im Salzwasser***

(nach HARRISON & TREAGUST 2006)

Ein Ei schwimmt in Salz Lösung, welches zuvor in reinem Wasser unterging. Die Dichtezunahme der Lösung, welche heraus geschlossen werden kann, legt nahe, dass es freien Raum zwischen unsichtbaren Wasserteilchen geben muss, welcher von den im

Salz enthaltenen Teilchen in irgendeiner Form eingenommen werden kann.

Beide Versuche, Kirsche und Ei, nehmen eine Sonderrolle in diesem Themenkomplex ein, da sie hauptsächlich dafür verwendet werden sollen zu zeigen, dass zwischen den Teilchen leerer Raum ist (Aussage 4). Sie wurden deshalb ausgewählt, weil gerade diese Aussage wesentlich für ein diskontinuierliches Teilchenbild wäre und mit weit verbreiteten Hybrid-Konzepten kaum vereinbar ist. Nichtsdestotrotz sind beide Versuche problematisch und verhältnismäßig wenig überzeugend. Das gilt in besonderem Maße für den Versuch „Ei schwimmt im Salzwasser“. HARRISON & TREAGUST (2006) schlagen diesen als einen von mehreren Versuchen zum Teilchenmodell vor, weshalb er in diese Auswahl aufgenommen wurde. Es ist aber nach näherer Analyse zu befürchten, dass er ähnliche Probleme bei der Argumentation aufweist wie etwa Mischungsversuche von Ethanol und Wasser¹⁴.

Dritter Themenkomplex: Chemische Verbindungen, chemische Reaktionen

- **Konstante Proportionen: Gasvolumina**

(nach FISCHLER & ROTHENHAGEN 1997)

Bei der Verbindung von Gasen, etwa z.B. Sauerstoff und Wasserstoff zu Wasser, tritt stets ein festes Volumeverhältnis (hier 2:1) der Ausgangsstoffe auf. Es spiegelt die molekulare Zusammensetzung des Wassers wider.

Dieser Versuch gehört, nicht nur auf Grund seiner historischen Relevanz, zu den Empfehlenswerten, da er kaum das Potential hat, Fehlvorstellungen zu erzeugen und in der Interpretation recht eindeutig ist.

Andere Versuche zum Feld der konstanten/multiplen Proportionen wie Massenverhältnisse der reagierenden Substanzen sind ebenso möglich, jedoch etwas zeitaufwändiger auf Grund der langen Erhitzungsdauer bis zur Reaktionstemperatur.

Vierter Themenkomplex: Teilchenstrukturen

¹⁴ Es kann zu Fehlvorstellungen bei Mischungs-/Lösungsphänomenen kommen: In der Tat verbinden sich ja die Na- und Cl-Ionen ja mit den Wassermolekülen. Deshalb ist das NaCl auch nicht anschließend aus der Lösung herauszufiltern.

Die naheliegende Analogie der Mischung von z.B. Erbsen und Senfkörnern ist daher nicht zutreffend: Wasser- und Salzteilchen können nicht die jeweiligen Kügelchen sein, da beim Mischungsvorgang ja ihre eigene Struktur geändert wird: Die Erbsen und Senfkörner zerteilen sich sozusagen und fügen sich in platzsparender Weise wieder zu gemischten Teilchen zusammen.

Es sollte deshalb nicht vermittelt werden, dass die „Teilchen“ hier Salz oder Wasserteilchen sind, sondern vielmehr, dass Wasser und Salz aus Gruppen ebendieser Teilchen aufgebaut ist.

- **Wechsel des Aggregatzustandes mit Energie- bzw. Temperaturbilanz**

(nach LANGENSIEPEN 1986)

Beim Wechsel eines Aggregatzustandes, etwa dem Schmelzen von Fixersalz, ist ein Abflachen der Temperaturkurve des schmelzenden Präparates im Vergleich zu der des Wasserbades zu erkennen. Dies wird mit der Energieaufnahme während des Schmelzvorganges, welcher als Arbeit gegen die Bindungskräfte der Teilchen verstanden wird, gedeutet: Während das Präparat schmilzt, wird die zugeführte Energie für ebendiese Arbeit und nicht für die Erhöhung der Temperatur genutzt.

und

- **Ölfleckversuch**

(nach WILKE 1997)

Einzelne Tropfen Ölsäure-Benzin-Gemisch werden auf eine Wasseroberfläche gegeben. Zwar kann, nach Verdampfen der Ölsäure, auch unter Annahme der Monomolekularität der Ölschicht mittels des Radius des Ölflecks an der Wasseroberfläche das „Volumen“ eines Ölmoleküls genähert werden - entscheidender ist hierbei jedoch bereits der Befund, dass der Ölfleck nicht beliebig dünn werden kann, was für einen diskontinuierlichen Materieaufbau spricht.

Beide Versuche sind etwas aufwändiger in der Auswertung als die Restlichen, haben aber, auch wegen des abstrakten Argumentationsverlaufs, nur eine geringe Wahrscheinlichkeit kontinuierliche oder makroskopische Teilchenkonzepte zu festigen.

Fünfter Themenkomplex: Kristallbildung und -Lösung

- **Bilden und Lösen von Kristallen mit Wasser und Salz**

Salz wird in kristalliner Form (zuvor gewonnen durch langsame Verdunstung von Salz-Lösung) in Wasser gelöst. Anschließend wird gewartet, bis das Wasser verdunstet und sich erneut Salz Kristalle bilden. Es ist zu erkennen, dass die Kristalle dieselbe Würfelform aufweisen wie zu Anfang, obwohl sie diese beim Lösungsvorgang vollständig verloren hatten.

In Rückbezug auf die Arbeit PFUNDTs (1981) wurden gezielt Versuche, die den konstruierenden Charakter der Teilchen (Teilchen als erste Aufbausteine) bekräftigen, ausgewählt. Die Wahl von Salz und Wasser ist hierbei beliebig und hatte primär praktische Gründe.

Versuche, die Teilchen als Überrest eines immer feiner werdenden Zermahlungsvorganges (Mörser oder auch Zerstäuber) darstellen, wurden in Anbetracht der bekannten Probleme explizit ausgelassen.

Sechster Themenkomplex: Mikroskopische und makroskopische Eigenschaften

- **Elektrolyse und Knallgasreaktion**

Bei der Elektrolyse von Wasser entstehen zwei Gase (Wasserstoff und Sauerstoff), welche in ihren makroskopischen Eigenschaften keine Ähnlichkeit zur Wasser mehr haben. Dennoch ist aus diesen wieder, ohne zusätzliche Stoffe, im Zuge der Knallgasreaktion Wasser zu erhalten. Wie beim vorhergehenden Kristallbildungsexperiment soll hier gezeigt werden, dass Teilchen nicht Träger makroskopischer Eigenschaften sind, sondern letztere vielmehr durch die Struktur der Teilchen konstituiert werden. Die Struktur letztlich hängt von den mikroskopischen Eigenschaften wie „Abstoßungs/Anziehungs-Vermögen“ ab (vgl. 18. im eingangs dargestellten Teilchenmodell).

Ebenso unter anderem von PFUNDT (1981) und BUCK (1991) ausgehend, dient dieses Experiment dazu zu zeigen, dass makroskopische Eigenschaften wie Farbe, Festigkeit usw. Mikroobjekten *nicht* zukommen. Es wird also ganz gezielt die Vorstellung, Teilchen seien kleinste Ebenbilder der makroskopischen Stoffe, adressiert und zu problematisieren versucht.

Hierbei gibt es auch zahlreiche andere Varianten, z.B. Kupferoxid zu Kupfer und Sauerstoff, sind ebenso denkbar.

Im Folgenden werden die ausgewählten 10 Versuche oftmals der Einfachheit halber nicht mit ihrem vollständigen Titel, sondern mit Abkürzungen wie „Elektrolyse“ statt „Elektrolyse und Knallgasreaktion“, bezeichnet. Im Verlauf des vorliegenden Beitrags werden nun keine weiteren Versuche zum Teilchenmodell mehr betrachtet, alle Abkürzungen beziehen sich also immer auf die genannten 10 Versuche.

3. Zielsetzung und Design der Befragung

3.1. Zielsetzung

In Hinblick auf die eingangs geschilderten, vielfältigen Herausforderungen, die eine schulische Einführung zum Teilchenbild mit sich führt, war es, wie anfangs beschrieben, Zielsetzung der Befragung, eine erste Vorstellung davon zu bekommen, wie und ob sich die zahlreichen Herausforderungen auf das Einschätzungsverhalten zur Überzeugungskraft der Versuche zum Teilchenmodell auswirken. Dies dürfte möglicherweise auch von der befragten Zielgruppe abhängen, weshalb sich weitere Studien mit Schülern und Schülerinnen verschiedener Jahrgangsstufen sowie Experten (im Sinne von ausgebildeten Lehrern, Doktoranden und Professoren) anbieten würden.

In dieser ersten Erhebung wurden Studierende gewählt, welche als Teilnehmer und Teilnehmerinnen eines Einführungsseminars zum großen Teil aus Studienanfängern bestanden. Diese Gruppe bot sich an, da einerseits einige kürzlich noch zur Schule gingen und zum anderen schon über ausreichend Hintergrundwissen und Kompetenzen verfügten, um möglicherweise auch kritisch die Wirkung des Expe-

rimentes auf andere Schüler (der Sekundarstufe I) zu reflektieren.

Ein weiterer Vorteil dieser Stichprobe war sicherlich, dass die Anleitungen und Fragebögen sehr direkt und transparent verfasst sein konnten - es bestand nicht etwa die Notwendigkeit, die Einschätzung der Überzeugungskraft in Interviewform indirekt zu erheben. Auch war die Hoffnung, dass die Gruppe weniger sozial antworten würde, als es von Schülern der Sek. I unter Umständen zu erwarten gewesen wäre.

Um die Skalenwerte der eingeschätzten Überzeugungskraft (sie wurden, wie der Großteil der anderen Daten, im single-choice-Format erhoben) in Bezug zu setzen, wurde neben den Versuchen zum Teilchenmodell auch eines der klassischen Mechanik (freier Fall in Vakuumröhre) vorgeführt und „geratet“. Die Idee war dabei, dass dieses intuitiv verständliche und direkt sichtbare Phänomen sehr überzeugend eingeschätzt wird (also den oberen Wert der Überzeugungskraft-Skala definiert). Die anderen Bewertungen könnten dann ausgehend hiervon in Relation gesetzt werden.

Die *zentralen* Fragen, welche Grund zur Erhebung gaben, sind etwa die folgenden:

1. Wie überzeugend werden die ausgewählten Versuche zum Teilchenmodell generell (im Vergleich zum sehr anschaulichen und konkreten Versuch zum freien Fall) eingeschätzt?
2. Unterscheidet sich die mittlere Überzeugungskraft der Teilchen-Versuche untereinander?
3. Unterscheidet sich diese Einschätzung bzgl. der angenommenen Zielgruppe, gibt es folglich Differenzen der Einschätzungen der prinzipiellen Überzeugungskraft und der auf Schüler und Schülerinnen?
4. Unterscheidet sich die Einschätzung der Überzeugungskraft in Abhängigkeit von experimentunabhängigen Faktoren, wie dem jeweiligen Teilchenbild des Bewertenden?
5. Wie reflektiert werden die Experimente bewertet? Werden z.B. didaktische Probleme und Inkonsistenzen erkannt?

3.2. Design der Befragung

- Jedem Studierenden wurden insgesamt fünf Schulexperimente präsentiert, davon vier zum Teilchenmodell und eines zur klassischen Mechanik.
- Drei der Experimente wurden in Kleingruppen mit Hilfestellung absolviert, zwei weitere im Plenum.
- Zu jedem Versuch wurde im Vorfeld eine Anleitung (ca. 2-4 Seiten) ausgehändigt.
- Zu Beginn der Sitzung wurden mittels offenen und geschlossenen Items die zu Grunde liegenden Teilchenbilder erhoben: Als „einfache“ Teilchenbilder gelten dabei naive, anschauliche

Teilchenvorstellungen (Kugeln o.Ä.), „komplex“ dagegen solche, die korrekt Grundaussagen der Quantenmechanik nutzten (Orbitale als Wahrscheinlichkeitsdichten, Status des Messprozesses etc.). „Durchschnittlich“ wurden Teilchenvorstellungen genannt, die zwar fachliche Mängel aufwiesen, jedoch in ihrer Modellhaftigkeit erkannt wurden. (siehe Abb.1)

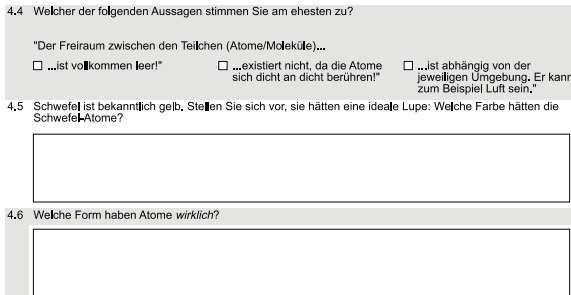


Abb.1: Beispielitems zur Erhebung des Teilchenbilds

- Nach jedem Versuch wurden zudem direkt die jeweiligen spezifischen Einschätzungen zur Überzeugungskraft abgefragt.
- Die Erhebung der Überzeugungskraft erfolgte mittels geschlossener Fragen. (5-stufige Likert-Skala, siehe Abb.2)

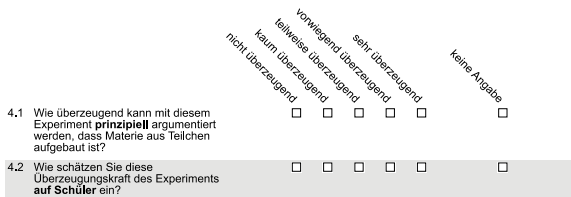


Abb.2: Item zur Erhebung der Überzeugungskraft

4. Ausgewählte Ergebnisse der Befragung

4.1. Zusammensetzung der Stichprobe nach Teilchenbild (Abb.3)

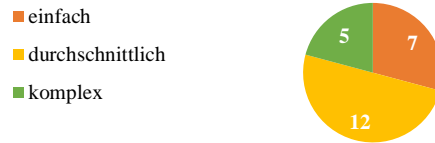


Abb.3: Verteilung der Teilchenbilder der Probanden

Das Antwortverhalten der Probanden legt nahe, dass in der Stichprobe überwiegend naiv-mechanistische, makroskopisch geprägte Teilchenbilder (etwa anschauliches Bohr-Modell als Darstellung der Realität) vorliegen.

4.2. Die eingeschätzte Überzeugungskraft der Experimente im Überblick (Abb.4)

- Die Differenz zwischen den Themenbereichen Mechanik und Teilchenmodell ist kleiner als erwartet, insbesondere kleiner als die Differenzen der Experimente zum Teilchenmodell untereinander.
- Die Differenz zwischen der Einschätzung der prinzipiellen Überzeugungskraft und derjenigen auf Lernende variiert kaum (Mittelwert der Differenz der jeweiligen Mittelwerte: $m_w=0,56$).
- Insbesondere ist diese Differenz durchweg positiv – die Probanden gingen folglich davon aus, dass kein Experiment überzeugender auf Lernende wirkte, als es aus fachlicher Sicht *eigentlich* gewesen wäre.
- Didaktisch eher empfehlenswerte Experimente (z.B. Wasser und Salz) sind im Allgemeinen nicht besser, werden sogar teils als weniger überzeugend angesehen als solche, welche naive Betrachtungsweisen fördern können (Rauchteilchen).

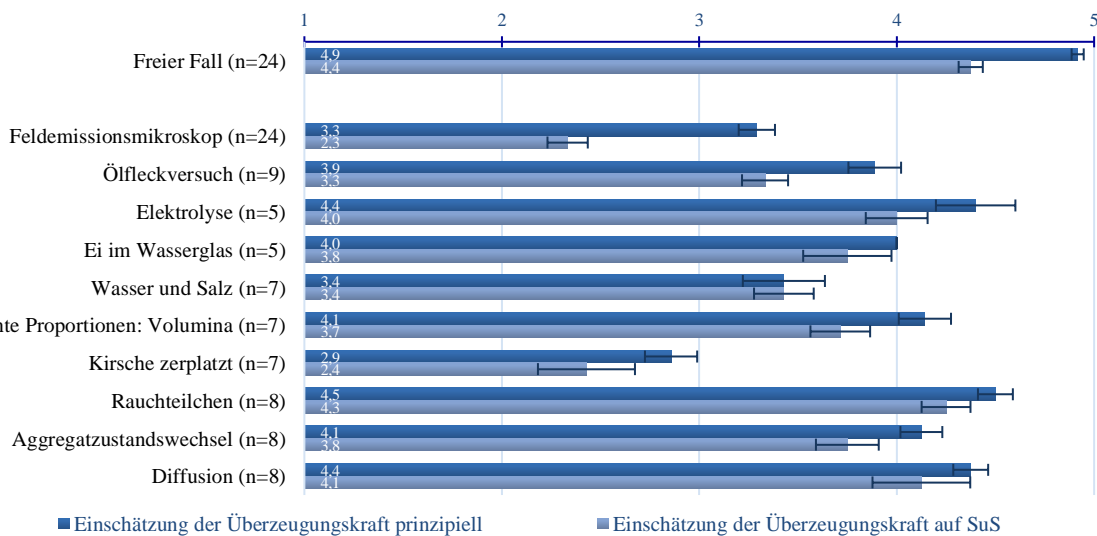


Abb.4: Durchschnittliche Einschätzungen der Überzeugungskraft

4.3. Die eingeschätzte Überzeugungskraft in Abhängigkeit des Teilchenbildes (Abb.5)

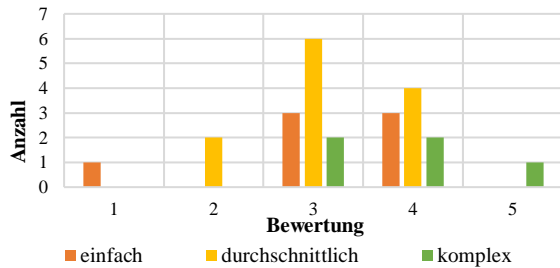


Abb.5: Feldemission - prinzipielle Überzeugungskraft

- Je nach Grad der Komplexität des zu Grunde liegenden persönlichen Teilchenmodells wird Überzeugungskraft tendenziell höher eingeschätzt. ($F=.609$, $p=.554$, $\eta_{part.}^2=.055$, $n=24$)
- Überzeugungskraft auf Lernende fällt, gegenüber der prinzipiellen Überzeugungskraft, auch innerhalb der Teilchenbild-Gruppen ab.

4.4. Eingeschätzte Überzeugungskraft bezüglich der Teilaussagen des Experiments (Abb.6)

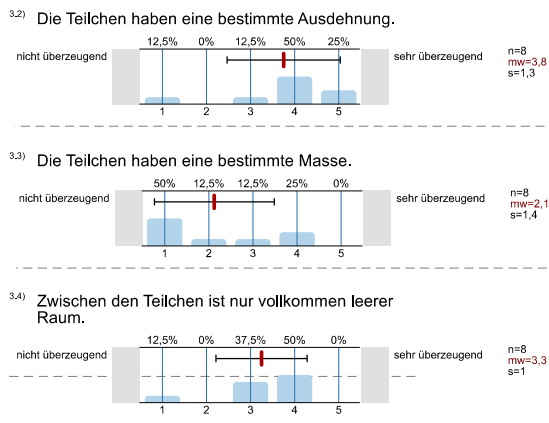


Abb.6: Rauchteilchen - Einschätzung der Überzeugungskraft von Teilaussagen

- Kontrollfrage 3.2 (*Ausdehnung* nicht für die konsistente Erklärung des Phänomens relevant, bzw. sogar im Rahmen der Theorie des idealen Gases *explizit ausgeschlossen*) wurde höher bewertet als 3.3 (*Masse*, hier *notwendig für Impulsübertrag*).
- Allgemein zeigte sich eine verhältnismäßig geringe Zustimmung bei den zur Erklärung des Versuchs essentiellen Grundannahmen (z.B. 3.4).

4.5. Verständnisfragen zu den betrachteten Phänomenen (Abb.7)

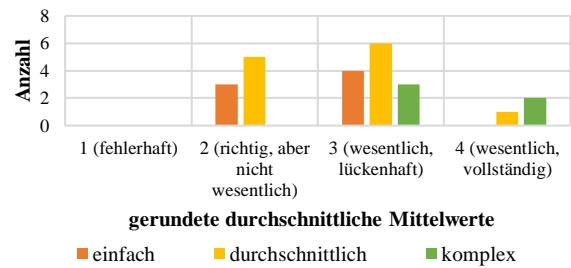


Abb.7: Mittleres Beantwortungsniveau der Verständnisfragen

- Die Argumentationsstruktur der Erklärungen zu den betrachteten Phänomenen wird in vielen Fällen nicht adäquat wiedergegeben ($mw=2,7$).

4.6. Unterschied von Experimenten zu Mikro- und Makrophänomenen (Abb.8)

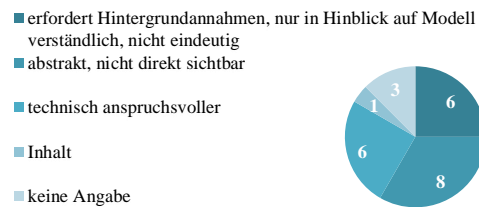


Abb.8: Vermuteter Unterschied zwischen Experimenten zu Mikro- und Makrophänomenen

- Mindestens ein Drittel der Probanden sieht keinen prinzipiellen Unterschied zwischen Experimenten der Mechanik und denen zum Teilchenmodell.

5. Fazit

Die Studie kann als erstes Vortasten in die Thematik verstanden werden und vermag, auf Grund ihrer explorativen Konzeption, zunächst nur Hinweise für weitere Untersuchungen zu geben. Diese sind im Folgenden kurz zusammengefasst:

Insgesamt spricht das Antwortverhalten, einer Einführungsveranstaltung gemäß, dafür, dass die Stichprobe eher als „noch-Schüler“ denn „schon-Lehrer“ angesehen werden kann und damit eventuell Rückschlüsse auf mögliche Resultate in der Schule erlaubt. Die Gruppe verfügt, im Einklang mit einschlägigen Forschungsergebnissen, zu großem Anteil über ein noch stark von makroskopischen Vorstellungen geprägtes Teilchenmodell. Dementsprechend wird auch der grundlegende Wechsel zwischen Makro- und Mikrowelt eher unterschätzt, bzw. nicht wahrgenommen. Letzteres mag erklären, weshalb die Differenzen zwischen den Themenbereichen Mechanik und Teilchenmodell kleiner als erwartet ausfielen.

Bemerkenswert ist die Tatsache, dass obwohl die Argumentationsstruktur der Erklärungen in vielen Fällen nicht adäquat wiedergegeben werden konnte, sich dies nicht in der Einschätzung ihrer Überzeugungskraft niederschlug. Auch wurden bei den für

die Argumentation als wesentlich erachteten Grundaussagen eher jene bevorzugt, welche den schon bestehenden Vorstellungen entsprachen, statt solchen, welche de facto Teil der konsistenten Deutung wären.¹⁵

Es scheint, als wären die Experimente trotz der angebotenen ausführlichen und konsistenten Erklärungen auf den Handouts, nicht in der Lage, das persönliche Teilchenkonzept zu problematisieren: Als überzeugend wird eingeschätzt, was schon zuvor vermutet wird. Ohne dieses Umdenken leisten die Experimente jedoch nur eine Bestärkung des vorliegenden Konzepts, oder werden als nicht überzeugend abgelehnt.

Die eingangs dargestellten Überlegungen zum Teilchenbegriff der Sekundarstufe I zeigten, mit welcher großen Schwierigkeiten für die Lernenden dieser Einstieg in die Mikrophysik verbunden ist. Sollen aber bei dieser Unterrichtseinheit nicht bloß vorliegende naive Alltagsvorstellungen zur Mikrophysik bestärkt werden, so müssen die verwendeten Versuche, sofern ihre Funktion im Unterricht über einen unterhaltenden, auflockernden Charakter hinaus gehen soll, das Potential besitzen, einen Begriffswechsel in diesem Bereich zu induzieren. Die Anforderungen an ein Experiment zum Teilchenmodell sind also einerseits hoch, andererseits ist seine Anschaulichkeit/Direktheit dagegen qua dargestellter Mikrophysik gering.

Die Studienergebnisse werfen daher die weiter zu verfolgende Frage auf, welche Faktoren, neben denen einer fachlich schlüssigen Deutung, im Allgemeinen zur Überzeugungskraft eines Experimentes beitragen. Hierbei können Experimente zur Mikrophysik als geradezu paradigmatische Beispiele für prinzipielle Überzeugungswechsel-Prozesse bei schwieriger/indirekter Informationslage angesehen werden.

6. Literatur

- Buck, Peter (1982): *Ist ‚Volumen‘ eine Eigenschaft von Molekülen, Atomen und Elementarteilchen?* in: *Chimica Didactica* 8, S. 43-58
- Buck, Peter (1991): *Die Farbe des Goldes.* in: *Chimica Didactica* 17, S. 58-65
- Falkenburg, Brigitte (1993): *Was ist ein Teilchen? Bedeutungen eines fundamentalen physikalischen Konzepts.* in: *Physikalische Blätter* 49, S. 403-408
- Falkenburg, Brigitte (2006): *Metamorphosen des Teilchenkonzepts.* in: Fischler & Reiners: *Die Teilchenstruktur der Materien im Physik- und Chemieunterricht.* Berlin: Logos, S. 29-49
- Fischler, Helmut & Rothenhagen, Andreas (1997): *Experimente zum Teilchenmodell.* in: *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik*, 8 (45), S. 27-34
- Harisson, Allan & Treagust, David (2006): *Particles and matter: Problems in learning about the submicroscopic world.* in: Fischler & Reiners: *Die Teilchenstruktur der Materien im Physik- und Chemieunterricht.* Berlin: Logos, S. 53-75
- Langensiepen, Fritz [Hrsg.]; Götz, Rainer; Dahnke, Helmut (1986): *Handbuch des Physikunterrichts. Sekundarbereich 1. Band 3.* Köln: Aulis
- Langensiepen, Fritz [Hrsg.]; Götz, Rainer; Dahnke, Helmut (1998): *Handbuch des Physikunterrichts. Sekundarbereich 1. Band 8.* Köln: Aulis
- Lichtfeldt, Michael (1991): *Schülervorstellungen in der Quantenphysik und ihre möglichen Veränderungen durch den Unterricht.* Essen: Westarp
- Pfundt, Helga (1981): *Das Atom – letztes Teilungsstück oder erster Aufbaustein?* in: *chimica didactica* 7, 1981, S. 75-94
- Pfundt, Helga (1982): *Untersuchung zu den Vorstellungen, die Schüler vom Aufbau von Atomen entwickeln.* in: *Der Physikunterricht* 16, S. 51-65
- Rehm, Markus (2009): *Der Sprung zu den Atomen.* in: *Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie.* 20/114, S. 5-8
- Saborowski, Jörg (2006): *Unanschauliche Teilchen – anschaulich!?* in: Fischler & Reiners: *Die Teilchenstruktur der Materien im Physik- und Chemieunterricht.* Berlin: Logos S. 199-219
- Wagenschein, Martin & Buck, Peter (1984): *Demokrit auf dem Zeugenstand.* in: *Chimica Didactica* 10, S. 3 ff.
- Wilke, Hans-Joachim (1997): *Physikalische Schulerperimente, Band 1: Mechanik/Thermodynamik.* Berlin: Volk und Wissen

¹⁵ Eine nachfolgende Untersuchung an 14 Studenten höherer Semester, überwiegend des Lehramts L2, zeigte hierbei ähnliche Befunde.

Repräsentation als kognitiv entlastende Strategie beim Problemlösen?

Dennis Jaeger*, Rainer Müller*

*Technische Universität Braunschweig, Institut für Fachdidaktik der Naturwissenschaften, Abteilung Physik und Physikdidaktik, Bienroder Weg 82, 38106 Braunschweig

dennis.jaeger@tu-bs.de, rainer.mueller@tu-bs.de

Kurzfassung

Eine gute Repräsentation kann in hohem Maße zu einer erfolgreichen Lösung eines Problems beitragen [1, 6, 21]. Aus kognitionspsychologischer Sicht erscheint insbesondere die mit der Repräsentation verknüpfte Wiedergabe und Reduktion der zur Lösung notwendigen Informationen aus dem Kontext der Problemstellung mit einer Verringerung der Elementinteraktivität und der kognitiven Belastung einher zu gehen [40]. Im Rahmen einer Vorstudie mit 170 Schülerinnen und Schülern der Klassen 7 bis 10 untersuchten wir neben dem Einfluss der Repräsentation auf die Leistung die Rolle der kognitiven Belastung im Problemlöseprozess.

1. Einleitung

In der Literatur wird zwischen diversen Arten von Repräsentationen unterschieden. Allgemein kann unter einer Repräsentation grob ein Bild, welches die Struktur der repräsentierten Situation wiedergibt, verstanden werden [11]. Dieses kann nach Ibrahim und Rebello [11] intern (im Kopf) oder extern (mit Stift und Papier) konstruiert werden. Den physikalischen Repräsentationen wird eine hohe Bedeutung beim Lösen des repräsentierten physikalischen Problems zugeschrieben [2, 18, 21]. Insbesondere bei textintensiven Arbeitsaufträgen erscheint aus einer kognitionspsychologischen Perspektive und unter Berücksichtigung des Konstruktions-Integrationsmodells nach [2, 4, 13] eine mit der Repräsentation erfolgte Reduktion auf die zielführenden Informationen und Anknüpfung an physikalische Formeln, die Anfertigung einer adäquaten Lösung zu erleichtern. Im Rahmen der Cognitive Load Theory ist davon auszugehen, dass eine physikalische Repräsentation kognitiv entlastend wirken und diese freiwerdenden kognitiven Kapazitäten den Lösungsprozess begünstigen können. Ob diese plausibel erscheinenden Mechanismen auf diese Weise wirken, ist Gegenstand der vorliegenden Kausalanalyse. Bevor im Folgenden die Studie und ihre Rahmenbedingungen vorgestellt werden, sollen zunächst zentrale Begriffe voneinander abgegrenzt und erläutert werden.

1.1. Aufgaben und Probleme

Während die Bedeutung des Problemlösens in der Literatur recht einheitlich als besonders hoch bewertet und diese Fähigkeit als „Schlüsselqualifikation“ bezeichnet [5] wird, weichen Definitionen eines

Problems in Abgrenzung zu einer Aufgabe durchaus voneinander ab vgl. z.B. [3, 42].

Reif [38] definiert ein Problem als eine Aufgabe, die eine Sequenz von Aktionen vom Ausgangs- zum Zielzustand erfordert. Anderson [39] setzt Problemlösen und Denken gleich, da für ihn das Denken stets mit einer Absicht verbunden ist, Ziele zu erreichen. Konträr zu diesen Definitionen findet heute allgemein eine differenziertere Betrachtung statt. Einem Problem werden gemeinhin ein Ausgangszustand, eine Barriere und ein Zielzustand zugeschrieben vgl. z. B. [3, 25, 36, 43]. Bei einer Aufgabe sind Routinen zur Lösung bekannt, sodass reproduktive Denkprozesse die Lösung der Aufgabe ermöglichen. Die Lösung eines einfachen Problems erfordert darüber hinaus konstruktive Denkprozesse zur Überwindung der Barriere [3].

Anhand dieser Definitionen erscheint eine Abgrenzung der beiden Begriffe auf dem ersten Blick gut möglich, jedoch ist diese selten eindeutig und vom Lernenden abhängig. Je nachdem ob bei dem Paar (Arbeitsauftrag, Person) eine Barriere entsteht, dessen Überwindung konstruktive Denkprozesse erfordert, kann von einer Aufgabe oder einem Problem gesprochen werden. Problematisch, da nicht völlig objektiv erscheint die Entscheidung, ob ein notwendiger Denkprozess bereits als konstruktiv oder nur als rein reproduktiv einzustufen ist. Eine allgemeine Übersicht zum Thema findet man in [3, 25], eine Übersicht mit Fokus auf die Physik z.B. in [7].

Da diese Frage nicht im Fokus der Untersuchung steht, werden die Begriffe Aufgabe und Problem hier daher, wie auch in verschiedener Literatur üblich [21, 41], synonym verwendet.

1.2. Cognitive Load Theory

Im Rahmen der Theorie der kognitiven Belastung beschäftigt man sich mit Anforderungen an die menschliche Kognition. Neue zu verarbeitende Anforderungen werden über die Sinnesorgane zusammen mit assoziierten Informationen und Informationsverarbeitungsstrategien aus dem Langzeitgedächtnis in ein sehr limitiertes Arbeitsgedächtnis geladen und dort analysiert [32, 34]. Anforderungen lassen sich unter anderem in einen Teil, der intrinsische Belastungen und einen Teil, der extrinsische Belastungen hervorruft, einteilen. Überschreitet die Summe aus beiden einen individuellen Grenzwert, kann es zu einer Überlastungssituation kommen, in der Lernen und eine erfolgreiche Lösung der Aufgabe sehr unwahrscheinlich werden vgl. z.B. [12, 28, 32, 33, 34, 40]. Natürlich gilt es daneben auch eine Unterforderungssituation zu vermeiden [28]. Während intendierte Anforderungen, wie die Komplexität einer Aufgabe eine intrinsische Belastung hervorruft, kann eine ungünstige Gestaltung des Aufgabenmaterials, wie zu komplizierte, aber auch langweilige Texte zu einer extrinsischen Belastung führen [40]. Es wird deutlich, dass die Tatsache, ob eine Anforderung als extrinsisch oder intrinsisch zu bezeichnen ist, vom Material, seiner Gestaltung und dem Präsentationsmodus sowie von den Voraussetzungen der Lernenden und den definierten Lernzielen abhängt. Insbesondere, wenn das Arbeitsmaterial eine komplexe Darstellungsform oder diverse Informationen beinhaltet, die verarbeitet und nach Relevanz sortiert werden müssen, erscheinen sinnvolle, da potentiell belastungsreduzierende Strategien, beim Lösen eine förderliche Rolle spielen zu können. Als eine solche Strategie lassen sich physikalische Repräsentationen bezeichnen, da sie als Ausdruck einer Abstrahierung, Umstrukturierung sowie Reduktion des Problems auf seinen prägnanten physikalischen Kern verstanden werden können.

1.3. Physikalische Repräsentation

Beim Lösen physikalischer Aufgaben kann zwischen verschiedenen Arten einer Repräsentation des Problems unterschieden werden. Allgemein wird sie „als wichtiger Bestandteil problemlösenden Denkens“ beschrieben [5]. Unter einer Repräsentation verstehen Chi et al. in [1] eine „[...] cognitive structure corresponding to a problem, constructed by a solver on the basis of his domain-related knowledge and its organization. A representation can take a variety of forms.“ Darüber hinaus wird dort festgestellt, dass Komponenten einer Repräsentation mit dem Problem korrespondieren und der Anfangszustand als auch der gewünschte Zielzustand sowie anwendbare Problemlöseoperatoren beinhaltet. Dies deckt sich mit der Ziel- und Situationsanalyse von Duncker nach [5], die auch als Methoden zum heuristischen Denken bezeichnet werden.

Allgemein kann zwischen interner und externer Repräsentation unterschieden werden (vgl. z.B. [11, 25, 26, 31]). Zur internen Repräsentation werden Inhalte gezählt, die das zu betrachtende Problem im Gedächtnis repräsentieren, weshalb sie auch als mentale Repräsentation bezeichnet wird [25]. Bei Texten als Instruktionsmaterial gilt nach dem Konstruktions-Integrationsmodell [13] als Voraussetzung der Bildung einer solchen Repräsentation das Laden von Informationen aus dem Text (Schritt 1) und das Laden von aktivierten, mit dem Problem assoziierten Inhalten aus dem Langzeitgedächtnis in das Arbeitsgedächtnis (Schritt 2) vgl. Abb.1.

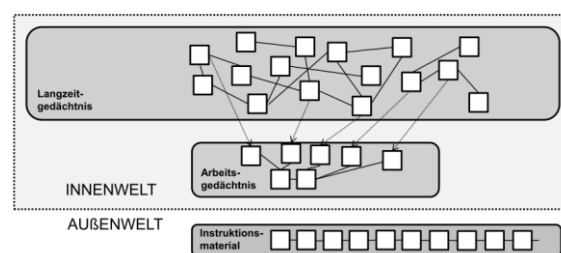


Abb.1 Konstruktions-Integrationsmodell nach Kintsch [13]; Schritt 2: Aktivierung und Laden assoziierter, bekannter Inhalte ins Arbeitsgedächtnis. Bild nach Friedrich, Anderson [4, 39], verändert.

Diese ersten Schritte des Modells, die die Bildung einer internen Repräsentation veranschaulichen sollen, scheinen für die Erstellung einer externen, also außerhalb des Gedächtnisses gespeicherten Repräsentation, wie eine Niederschrift, notwendig. Die physikalische Repräsentation ist nach Larkin [18] nah an den das Problem beschreibenden physikalischen Prinzipien angebunden. Darunter kann beispielsweise eine verschriftliche, physikalische Darlegung des Sachverhaltes verstanden werden. Auch in Reinhold et al. [21] handelt es sich um eine Übersetzung einer (alltagssprachlich formulierten) Problemstellung in die Sprache der Physik, was beispielsweise eine verbildlichte physikalische Betrachtung des Sachverhaltes sein kann.

In Studien lässt sich zeigen, dass eine adäquate physikalische Repräsentation sehr förderlich für den Lösungsprozess sein kann z.B. [26, 31, 43, 44]. Es wird darüber hinaus davon ausgegangen, dass eine solche in der Lage ist, eine zukünftige interne Repräsentation zu beeinflussen und sich dadurch auch positiv auf den Lernprozess auszuwirken kann [31]. Anfänger unterscheiden sich von Experten in der Qualität ihrer Repräsentation. Während die „Repräsentation [von Anfängern] wenig für die quantitative Darstellung des [untersuchten] Vorgangs“ leistet, „versuchen [Experten] [...] die Aufgabe in physikalischen Begriffen zu repräsentieren und benutzen die in der Physik üblichen Idealisierungen“ [1,2, zitiert aus 21]. Ähnliche Ergebnisse finden sich auch in Studien, die auf nicht mathematische Repräsentationen fokussieren, z.B. Savelsbergh et al. nach [7].

Eine physikalische Repräsentation eines Problems kann stets intern oder extern also im Kopf oder auf dem Papier gebildet werden. Wie dargelegt, scheint die interne Repräsentation die daraufhin gebildete externe zu beeinflussen. Genauso liegt es nahe, dass die neu gebildete externe Repräsentation eine zukünftig gebildete interne Repräsentation zu einem Problem einer vergleichbaren physikalischen Struktur beeinflusst und auf diese Weise Lernen unterstützt wird.

In Anlehnung an die genannten Quellen wird in der vorliegenden Studie eine physikalische Repräsentation mit einer Verschriftlichung verknüpft. Genauer wurde das Konstrukt *Qualität der physikalischen Repräsentation eines Problems* in dieser Studie über die Verschriftlichung der internen Repräsentation der Schülerinnen und Schüler operationalisiert.

Der positive Einfluss einer adäquaten Repräsentation auf den Lösungs- und Lernprozess scheint empirisch recht gut abgesichert. Kaum untersucht scheint jedoch die Frage, wie dieser positive Einfluss funktioniert, bzw. welcher Mechanismus hier am Werk ist. Wie schon zuvor erwähnt, bietet die Cognitive Load Theory einen Erklärungsansatz, da diese darauf hindeutet, dass eine adäquate Repräsentation eine Reduktion der kognitiven Belastung zur Folge haben kann, was wiederum dazu führt, dass mehr kognitive Kapazitäten für den Kern des Problems zur Verfügung stehen, sodass in der Folge die Lösungswahrscheinlichkeit steigt. Neben der zu erwartenden kognitiven Entlastung auf Grund einer Reduktion auf zur Lösung notwendige Parameter sehen Simon & Simon [44] positive Effekte infolge der durch die Repräsentation erzeugte auf Symbolen fundierte Ausgangsbasis zur Generierung der physikalischen Gleichungen. Hier ist infolge der Cognitive Load Theory davon auszugehen, dass die Anknüpfung an bekannte physikalische Gleichungen im Langzeitgedächtnis erleichtert und so weniger kognitive Kapazitäten belegt sind, da entsprechende Symbole auch in der abgespeicherten Gleichung wiederzufinden sind. Auch Larkin argumentiert nach [31] dafür, dass eine externe Repräsentation das Problemlösen dadurch vereinfacht, dass es die assoziierte mentale Arbeitsbelastung reduziert. Eine empirisch fundierte Absicherung dieser Argumentationen mithilfe der Messung der kognitiven Belastung liegt nach dem Wissen der Autoren bisher so nicht vor.

2. Fragestellung

Bekannt ist bereits, dass physikalische Repräsentationen lösungsförderlich sein können. Die bisherigen Betrachtungen legen darüber hinaus nahe, dass sie mit einer Reduktion der kognitiven Belastung einhergehen und darüber die Lösung erleichtern können. Mit folgenden Hypothesen soll dies näher untersucht werden:

H1) Die Qualität der physikalischen Repräsentation hat einen positiven Einfluss auf die Leistung im Problemlöseprozess.

H2) Die Qualität der physikalischen Repräsentation hat einen negativen Einfluss auf die kognitive Belastung im Problemlöseprozess.

H3) Die kognitive Belastung ist ein Mediator von Qualität der Repräsentation auf die Leistung.

3. Studiendesign

Als Gelegenheitsstichprobe für die Studie konnten drei siebte, eine achte und drei zehnte Klassen eines Braunschweiger Gymnasiums gewonnen werden. Insgesamt nahmen damit 170 Probanden (84 weiblich, 15 keine Angabe) mit einem Durchschnittsalter von $M = 14,2$ ($SD = 1,64$) zwischen 11 und 18 Jahren teil. Alle Schulklassen haben die Thematik „gleichförmige Bewegung“ zuvor behandelt. Während die Behandlung des Themas in der 8. Klasse ein Jahr zurücklag, fand sie in den anderen Klassen erst wenige Tage bis Wochen zuvor statt.

Die Studie umfasste zwei Erhebungstermine zwischen denen eine Woche Zeit lag. Jeder Termin nahm 45 Minuten Zeit in Anspruch. Während beim ersten Termin relevante personenbezogene Variablen, wie beispielsweise das Fachwissen zur Thematik erhoben wurde, fand beim zweiten Termin die eigentliche Untersuchung statt, bei der eine klassenweise Einteilung in vier Gruppen stattfand. Neben der Blockrandomisierung mit denen die klassenspezifischen Variablen kontrolliert wurden, wurden auch die personenbezogenen Variablen kontrolliert, sodass keine statistischen Unterschiede zwischen den vier Gruppen in zentralen Variablen festgestellt werden konnten. Die vier Gruppen erhielten verschiedene Instruktionstexte, auf die die sich anschließenden Aufgaben bezugnahmen. Es handelte sich um einen verkürzten Zeitungsartikel über einen Schwimmwettkampf in Rio de Janeiro 2016. Die vier Versionen unterschieden sich in ihrem Lesbarkeitsindex und ihrer Authentizität entsprechend Tab.1. Die sich anschließenden Aufgaben orientieren sich an Wiesner et al. [49] und sind in der authentischen Version im Anhang zu finden.

LIX hoch	Gruppe 2 (39 SuS)	Gruppe 4 (39 SuS)
LIX niedrig	Gruppe 1 (38 SuS)	Gruppe 3 (44 SuS)
	traditionell	authentisch

Tab.1 2x2 Design der Studie

Die Verwendung von verschiedenen Instruktionstexten diente weiteren Untersuchungsschwerpunkten, auf die hier nicht eingegangen werden kann. Da nach den bisherigen Ausführungen eine physikalische Repräsentation unabhängig vom Instruktionstext

text einen positiven Einfluss auf die kognitive Belastung und Leistung haben sollte, schränkt dies die Untersuchung nicht weiter ein. In Folgestudien ließe sich an dieser Stelle untersuchen, ob komplexere Texte bei Probanden gleichen spezifischen Fachwissens eher zur Produktion einer Repräsentation führen.

Im Folgenden wird die Operationalisierung aller für die Studie wichtigen Konstrukte dargelegt.

3.1. Material und Messinstrumente

Kognitive Belastung: Während die Theorie sehr breit akzeptiert ist, hat sich kein Standardmaß zur Messung der kognitiven Belastung etabliert. Nach Schnotz & Kürschner [28] gibt es mit subjektiven Bewertungen, physiologischen und leistungs-basierten Messungen im Wesentlichen drei Methoden, wovon besonders erstere intensive Verwendung finden vgl. [20]. Auch bei diesen introspektiven Messungen wird verschieden vorgegangen. So unterscheiden sich Studien hier häufig in der verwandten Anzahl an Items und darin, auf welche Art der kognitiven Belastung sie abzielen. Exemplarisch werden in [17] sieben Items, in [15] elf Items, in [46] zwei Items isoliert und in [47] nur ein Item betrachtet. Eine differenzierte Messung der Belastungsarten schlagen bspw. Leppink et al. [20] vor. Da die kognitive Belastung in der vorliegenden Studie nach der Bearbeitung jeder Aufgabe erhoben werden sollte, wurde eine zeitökonomische Messung einerseits notwendig. Andererseits zielten wir auf eine breitere und zuverlässigere Messung als dies mit einem Item möglich wäre, sodass insgesamt drei Items [12, 22, 48] mit siebenstufiger Skalierung zur Anwendung kamen. Untersuchungen u.a. von Lepink et al. [20] und in [8] deuten vorsichtig darauf hin, dass die Items das Konstrukt breit abzubilden scheinen und dennoch eine Dimension darstellen. Sie wurden daher als Indikator für die kognitive Gesamtbelastung verwendet.

Physikalische Repräsentation: Zur Operationalisierung der Qualität der physikalischen Repräsentation wurde ein Manual verwendet. Dieses ist angelehnt an [17] und orientiert sich an den Ausführungen zu Kapitel 1.3. Genauer wurde die Situations- und Zielanalyse bewertet, indem es Punkte auf die korrekte Nennung der benötigten Formelzeichen, Zahlenwerte und physikalische Einheiten sowie auf die Kennzeichnung des physikalisch korrekten Zielzustandes vergeben wurden. Dabei wurde den Lernenden der mithilfe der vorgefertigten Begriffe *Gegeben:* und *Gesucht:* ein Anreiz gegeben, ihre interne Repräsentation des Problems zu explizieren. Es erfolgte jedoch keine explizite Aufforderung dazu.

Leistung: Die Leistung im Problemlöseprozess wurde anhand eines zu diesem Zwecke entwickelten Manuals erstellt. Erste bisherige, unveröffentlichte

Untersuchungen deuten auf eine hinreichende Objektivität des Manuals hin. Wichtig hierbei ist, dass die Items zur Messung der Qualität der Repräsentation nicht für die Messung der Leistung herangezogen wurden, wie es in Klassenarbeiten häufig vorkommen würde. Ein Zusammenhang erscheint daher nicht selbstverständlich.

4. Ausgewählte Ergebnisse

Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse präsentiert und auf die Hypothesen eingegangen. Es sei jedoch erwähnt, dass die Stichprobengröße sich infolge der Nichtteilnahme einiger Probanden an hier relevanten zweiten Termin auf 160 reduzierte und sich lediglich für die Aufdeckung möglicher mittlerer Mediatoreffekte eignet [37]. Zur Beantwortung der Hypothesen betrachten wir Abb.2 und Tab.2. Für die Analysen wurde das Macro *Process* [10] verwendet.

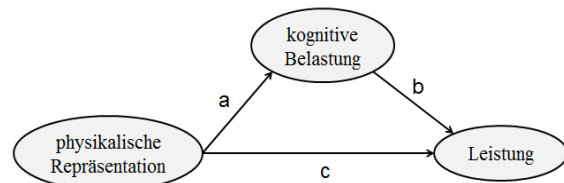


Abb.2 Pfadmodell der Mediatoranalyse

Aufgabe Pfad	Aufgabe 1a/b/c	Aufgabe 2	Aufgabe 3
a	-0,29**/ -0,28**/ -0,35**	n.s.	n.s.
b	-0,41**/ -0,33**/ -0,30**	n.s.	-0,29**
c	0,37**/ 0,44**/ 0,43**	0,58**	0,52**
Varianz- aufklärung Leistung	44 %/ 48 %/ 46 %	39 %	38 %

Tab.2 standardisierte Regressionsgewichte nach Aufgabe vgl. Abb.2. n.s.: nicht signifikant; * p < 0,05; ** p < 0,01.

In Tab.2 finden sich jeweils die standardisierten Regressionskoeffizienten des jeweiligen Pfades. Beispielsweise bedeutet dies, dass für die kognitive Belastung zweier Lernenden, die sich in ihrer physikalischen Repräsentation um eine Standardabweichung

chung unterscheiden, ein Unterschied von 0,35 Standardabweichungen bei Aufgabe 1c prognostiziert wird.

Hypothese 1 und 2 lassen sich hier dann als bestätigt ansehen, wenn es einen signifikanten Pfad gibt, da in diesem Falle die Vorzeichen in der hypothetisierten Richtung sind. Hierbei muss beachtet werden, dass bei dieser Analyse der Fokus auf Hypothese 3 lag und diese mithilfe des Pfadmodells untersucht werden kann. Schlüsse mithilfe dieses Pfadmodells auf die ersten beiden Hypothesen sind hier daher insofern verzerrt, als dass die entsprechenden Regressionskoeffizienten bei separater Schätzung der Pfade nicht denen in Abb.2 entsprechen würden. So wäre der Regressionskoeffizient des separaten Pfades von Physikalische Repräsentation auf Leistung größer als jener von Pfad c.

Hypothese 3 lässt sich nur bei Aufgabe 1 bestätigen. Hier konnte sowohl ein indirekter (Mediation über die kognitive Belastung) als auch ein direkter Effekt auf die Leistung festgestellt werden vgl. [10].

5. Zusammenfassung und Ausblick

In der Studie wurde im Rahmen eines Kausalmodells untersucht, inwieweit eine adäquate physikalische Repräsentation sich über eine Senkung der kognitiven Belastung auf die Leistung auswirkt. Dies konnte bei einem Teil der Aufgaben bestätigt werden. Hierbei muss beachtet werden, dass die vorliegenden Analysen lediglich Kausalanalysen auf Grundlage der Varianzen der betrachteten Variablen sind. Ein Nachweis von tatsächlichen Kausalitäten ist somit nicht möglich. Die Daten würden einer solchen zumindest bei Aufgabe 1 jedoch nicht widersprechen.

Die vorliegenden Befunde können unter Annahme einer validen Messung (Hinweise darauf: z.B. [20]) teilweise Hinweise zu der Frage liefern, warum beziehungsweise wie die Qualität einer Repräsentation beim Lösen helfen kann. Dennoch sind bei der Bewertung der Ergebnisse einige Einschränkungen zu berücksichtigen. Eine Limitation ergibt sich durch die Operationalisierung der Qualität der Repräsentation. Hier werden nur dann Punkte vergeben, wenn eine Verschriftlichung stattfand, was dazu führt, dass sehr kompetente Lösende, die die Verschriftlichung der Repräsentation für unnötig hielten, hier keine Punkte erhalten, obwohl sie wohl über eine gute interne Repräsentation verfügen. Dies schränkt die Validität der verwendeten Messung ein. Zudem wird darauf aufmerksam gemacht, dass die vorliegenden Aussagen bei einer anderen möglichen Operationalisierung anders ausfallen können. Diese könnte aber auch einen geringeren Grad an Objektivität aufweisen, als das hier verwendete Maß.

Abschließend lässt sich feststellen, dass alle Aufgabenteile bei denen eine Bestätigung des Modells möglich war zu Beginn der Untersuchung lagen. Denkbar wäre daher, dass die wiederkehrenden identischen Items bei den Aufgaben dazu führten, dass eine gewissenhafte Bearbeitung besonders zu Beginn, also beim erstmaligen Kontakt mit den Items stattfand. Für zukünftige Studien könnte auch eine differenzierte Messung der verschiedenen Belastungsarten weiterhelfen, die arbeitenden Wirkungszusammenhänge genauer aufzuklären.

6. Literatur

- [1] Chi, M.T.H.; Feltovich P.J. & Glaser R. (1981): Categorization and representation of physics problems by experts and novices. In: *Cognitive Science* 5, p. 121-152.
- [2] Chi, M.T.H.; Glaser, R. & Rees, E. (1982): Expertise in problem solving. In: R.J. Sternberg (Ed.), *Advances in the psychology of human intelligence*, (Vol. 1). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- [3] Franz, T.; Steib, C.; Frie, T.; Strahl, Alexander (2015): Arbeitsgedächtnis und experimentelle Physikaufgaben. Vorstellung einer Masterarbeit. DPG Frühjahrstagung in Wuppertal. *PhyDid.B* DD06.01.
- [4] Friedrich, M. C.G. (2017): Textverständlichkeit und ihre Messung. Waxmann: Münster.
- [5] Funke, J. (2003): Problemlösendes Denken. Kohlhammer Standards Psychologie: Stuttgart.
- [6] Heller, J.I. & Reif, F. (1984): Prescribing Effective Human Problem-Solving Processes: Problem Description in Physics. *Cognition and Instruction*, 1984, I(2) 177-216.
- [7] Hsu, L.; Brewster, E.; Foster, T.M.; Harper, K.H. (2003): Resource Letter RPS-1: Research in Problem Solving. *American Association of Physics Teachers*.
- [8] Jaeger, D.; Itsios, C.; Franz, T. & Müller, R. (2017): Cognitive Load und Aufgabenmerkmale - Verwendung von Zusatzfragen bei authentischen Problemen -. DPG Frühjahrstagung in Dresden. *PhyDid. B*, DD 13.1. Verfügbar unter: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/792>
- [9] Jaeger, D.; Franz, T. & Müller, R. (2017): Cognitive Load und authentische Probleme. In C. Maurer (Hrsg.), *Qualitätsvoller Chemie- und Physikunterricht - normative und empirische Dimensionen. Jahrestagung in Regensburg 2017* (Bd. 38, S. 687-690). Regensburg: Universität Regensburg. Verfügbar unter: http://www.gdcp.de/images/tagungsbaende/GD_CP_Band38.pdf
- [10] Hayes A.F. (2013): *Introduction to Mediation, Moderation, and Conditional Process Analysis. A Regression –Based Approach*. The Guilford Press.

- [11] Ibrahim, B. & Rebello, N.S. (2013): Role of mental representations in problem solving: Students' approaches to nondirected tasks. In: *Physical Review Special Topics. Physics Education Research*. 9.
- [12] Kalyuga, S.; Chandler, P.; Sweller, J. (1999): Managing Split-attention and Redundancy in Multimedia Instruction. *Applied Cognitive Psychology*, (13), 351-371.
- [13] Kintsch, W. (1988): The Role of Knowledge in Discourse Comprehension: A Construction-Integration Model. *American Psychological Association. Psychological Review*. Vol. 95, No. 2, 163-182.
- [14] Krippendorff, K. (2004): *Content analysis: An introduction to its methodology*. Thousand Oaks, California: Sage.
- [15] Kuensting, J. (2007): *Effekte von Zielqualität und Zielspezifität auf selbstreguliert-entdeckendes Lernen durch Experimentieren*. Dissertation Universität Duisburg-Essen. Fachbereich Bildungswissenschaften.
- [16] Kuhn, J., Müller, A., Müller, W. & Vogt, P. (2010): Kontextorientierter Physikunterricht. Konzeptionen, Theorien und Forschung zu Motivation und Lernen. *PdN-PhiS* 5/59.
- [17] Kuhn, J. (2010): *Authentische Aufgaben im theoretischen Rahmen von Instruktionen- und Lehr-Lern-Forschung: Effektivität und Optimierung von Ankermedien für eine neue Aufgabekultur im Physikunterricht*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- [18] Larkin, J. (1981): *The Role of Problem Representation in Physics*. Mental Models Conference, University of California, San Diego, October, 1980.
- [19] Larkin, J.H. & Simon, H.A. (1987): Why a Diagram is (Sometimes) Worth Ten Thousand Words. *Cognitive Science* 11, 65-99.
- [20] Leppink, J., Paas, F., Van der Vleuten, C.P.M., Van Gog, T. & Van Merriënboer, J.J.G. (2013): Development of an instrument for measuring different types of cognitive load. *Behav. Res. Psychonomic Society, Inc.* 2013.
- [21] Reinhold, P., Lind G. & Friege G. (1999): Wissenszentriertes Problemlösen in Physik. *ZfDN*, Jg.5, Heft 1, S. 41-62.
- [22] Paas, F. (1992): Training Strategies for Attaining Transfer of Problem-Solving Skill in Statistics: A Cognitive-Load Approach. *Journal of Educational Psychology*, Vol. 84, No. 4, 429-434.
- [23] Paas, F., Van Merriënboer, J. & Adam, J. (1994): Measurement of Cognitive Load in Instructional Research. *Perceptual and Motor Skills*. 79, 419-430.
- [24] Rabe, T. & Mikelskis, H.F. (2007): Kohärenz-bildungshilfen und Selbsterklärungen: Fördern sie das Physiklernen?. *ZfDN*; Jg. 13.
- [25] Robertson. S.I. (2001): *Problem solving*. Psychology Press.
- [26] Rosengrant, D., Van Heuvelen, A., Etkina, E. (2005): Free-Body Diagrams: Necessary or Sufficient?
- [27] Sabella, M. & Redish, E.F. (2007): Knowledge activation and organization in physics problem-solving. *American Journal of Physics*.
- [28] Schnotz, W. & Kürschner, C. (2007): A reconsideration of cognitive load theory. *Educational Psychology Review*, 19 (4), 469-508.
- [29] Singh, C. (2016): *Problem Solving and Learning*. Physics Education.
- [30] Simon, H.A. (1977): *Models of Discovery and other Topics in the Methods of Science*. Dordrecht: Reidel.
- [31] Solaz-Portolés J.J., Lopez, V.S. (2007): Representations in problem solving in science: Directions for Practice. *Asia-Pacific Forum on Science Learning and Teaching*, Vol. 8.Issue 2. Article 4. p.1.
- [32] Sweller, J. (1994): Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning and Instruction*, 4 (4), 295-312.
- [33] Sweller, J., Van Merriënboer, J., Paas, F. (1998): Cognitive Architecture and Instructional Design. *Educational Psychology Review*, 10 (4), 251-296.
- [34] Miller, G. A. (1956): The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological review*, 63 (2), 81.
- [35] Nesbit, J.C., Hadwin, A.F. (2006): *Handbook of Educational Psychology. Methodological Issues in Educational Psychology*. Routledge.
- [36] Polya, G. (1949): *Schule des Denkens*. Berlin.
- [37] Baltés-Götz, B. (2015): *Mediator- und Moderatoranalyse per multiple Regression mit SPSS*. Zentrum für Informations-, Medien- und Kommunikationstechnologie (ZIMK).
- [38] Reif, F. (1995): *Understanding Basic Mechanics*. Wiley, New York.
- [39] Anderson, J. R. (1983): *The architecture of cognition*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- [40] Sweller, J., Ayres, P., Kalyuga, S. (2011): *Cognitive Load Theory*. Springer New York Dordrecht Heidelberg London.
- [41] Brandenburger, M.; Mikelskis-Seifert, S.; Labudde, P. (2014): *Problemlösen in der Mechanik: Eine Untersuchung mit Studierenden*. DPG Frühjahrstagung in Frankfurt.
- [42] Smith, M. U. (1991): *A View from Biology*. In: M. U. Smith (Hg.): *Toward a unified theory of problem solving. Views from the content domains*. Hillsdale NJ: Lawrence Erlbaum Associates, S. 1-19.
- [43] Newell, A.; Simon, H. A. (1972): *Human problem solving*. Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall.

- [44] Simon, D.P., & Simon, H.A. (1978): Individual differences in solving physics problems. In: R.S. Siegler (Ed.), *Children's thinking: What develops?* Hillsdale, N.J.: Erlbaum.
- [45] Eylon, B.S. & Reif, F. (1984): Effects of knowledge organization on task performance. In: *Cognition and Instruction*. Vol. 1, p. 5-44.
- [46] Koenen, J. (2014). Entwicklung und Evaluation von experimentunterstützten Lösungsbeispielen zur Förderung naturwissenschaftlich-experimenteller Arbeitsweisen. In: Niedderer, H.; Fischler, H.; Sumfleth, E. (Hrsg.): *Studien zum Physik- und Chemielernen*. Band 171. Berlin: Logos.
- [47] Jaeger, D.; Müller, R. & Franz, T. (2016). Aufgabenschwierigkeit und Cognitive Load. In: C. Maurer (Hrsg.), *Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis*. Jahrestagung in Zürich 2016 (Bd. 37, S. 91-94). Regensburg: Universität Regensburg. Verfügbar unter: http://gdcp.de/images/tagungsbaende/GDCP_Band37.pdf
- [48] Ayres, P. (2006): Using subjective measures to detect variations of intrinsic load within problems. In: *Learning and Instruction*, 16, p. 389-400.
- [49] Wiesner, H.; Schecker, H. & Hopf, M. (2011): *Physikdidaktik kompakt*. Aulis Verlag.

Anhang

Aufgabe 1:

Berechne die Durchschnittsgeschwindigkeit von

- a) Phelps, le Clos und Cseh
- b) Schooling
- c) McKee

in m/s.

Aufgabe 2:

Berechne den zeitlichen Vorsprung Schoolings vor Phelps, le Clos und Cseh beim Anschlag.

Aufgabe 3:

Erstaunlich ist, dass Larsson 1972 nur 3 mm Vorsprung vor McKee beim Anschlag hatte.

Berechne den Streckenvorsprung Schoolings vor Phelps, le Clos und Cseh beim Anschlag in Meter. Was fällt Dir auf?

Teaching basic metrology concepts.

A multiple intelligences didactical approach

Hector Jaimes Paredes¹

¹UNAM-ENP-No.8 "Miguel E. Schulz" Colegio de Física, salón B-212
Av. Lomas de Plateros s/n Esq. Merced Gómez C.P. 01600, Mexico City
hjaimesp@gmail.com

Abstract

The adequate teaching of some metrology basic concepts at the senior high school level, may offer interesting results when used for the development of the student's scientific skills. But inside the classroom, the students have different learning styles (for example: visual, aural, kinesthetic etc.). How to teach issues like the SI base quantities/units within these learning diversity in the same classroom? As a part of an educational research project and based on the contributions of Howard Gardner and others in the area of Multiple Intelligences (MI), a didactical strategy for teaching SI units using the so called "learning-stations" will be proposed.

1. Why to teach basic metrology concepts at senior high school level?

As a fundamental part of the science language, we ought to recognize that metrology concepts play a very important role when we try to depict reality through physical quantities. A number without units, may be enough for a mathematical analysis, but for experimental sciences, it has any relationship with the natural world. Any number has to be followed by units for considering it a physical quantity. At senior high school level at Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) in Mexico City, the lack of specific didactical approaches for teaching physical quantities and other metrology concepts, may have led to important problems in the student's Physics learning process. Some of the problems and advantages of including this topic in the official study programs are:

- Weak understanding of physical quantities lead to conceptual failures. May be that is the reason why, by problem solving, many students arrive to correct numeric results but without knowing what do these numbers physically mean [10].
- Understanding physical quantities from a constructivist point of view, may help students to understand basic and complex physics concepts.
- Teaching physical quantities from a constructivist point of view, is a powerful tool for developing scientific skills like analyzing physical problems and phenomena.
- Confusing concepts potentially may get clearer. Knowing how physical quantities may be figured out through their units, may help to differentiate confusing concepts. For example: mass [kg]

\neq weight [N]; current [A] \neq power [W]. May be the student doesn't understand deeply the difference between mass and weight but only guided by the units from each quantity, students may realize that we are speaking about two different concepts.

- Developing dimensional analysis skills can provide a powerful tool for understanding science concepts

2. Theoretical framework.

For developing the didactical strategy we propose, we need to support our findings on the contributions of Howard Gardner, Dunn&Dunn and some game-based-education theorists like Huizinga, Prensky and Dave Moursund.

Gardner's multiple intelligences (MI): Since the publishing of Howard Gardner's *Frames of Mind: The Theory of Multiple Intelligences* in 1983, many other authors have written about the educative consequences of this vision. Gardner considers intelligence not as a unitary concept that involves different capabilities, but a net of interrelated capability sets that may be used in different ways, together or separate and that, from learned experiences in the past, let the individual to successfully respond to new situations and problems.

Assuming this definition of what intelligence is, Gardner establishes that the people's intelligence is the result of activating or not activating certain intelligence potentials. This activation is strongly related to the specific culture around an individual, the chances offered by this culture and the decisions

taken by the individual, the family, the teachers and other social actors.

Initially Gardner lists 8 different intelligences: Naturalistic, intrapersonal, interpersonal, visual-spatial, musical, bodily-kinesthetic, verbal-linguistic and logical-mathematical. A person may tend to solve problems using one or even more than two of these intelligences classification. The number of intelligences has increased since then.

Rita and Kenn Dunn's learning styles proposal (LS): although there are a variety of theorists that speak about the different manners an individual can learn, the Dunn&Dunn is the most widespread focus within the educational world. Dunn&Dunn adopt the idea that people have different ways to assimilate knowledge (different learning styles). They say that teachers need to use didactical strategies that benefit every student's learning style and this can be achieved by redesigning the classroom, developing small-group techniques and the use of learning stations or differenced instructional areas. These learning styles are well connected with the multiple intelligences view. Each person may possess multiple intelligences, but he/she tends to use one learning style over the others. Other authors also propose the need of diverse activities that activate the so called multiple memory pathways to get a better knowledge retention in mind, a variety of activities activates mental pathways related with visual, auditive, kinesthetic, which reinforce a concept learning.

Game based learning: since the writing of Johan Huizinga's *Homo Ludens* in the beginning of the 20th century the literature concerned with the use of games in education grows every day. Playing games for learning a topic has many advantages, according to Marc Prensky when speaking about games: They are a kind of fun, what means enjoyment and pleasure to us. They are a kind of play, what means intense involvement. They have rules, which means a structure. They have goals, which means motivation to us. They are interactive, so they lead us to action. They feedback us, so we learn. They have conflict/competition/challenge/opposition, what means adrenaline to us. Their problems need to be solved, so we need to be creative. They make us to interact with others, and they have representation and story, so that means emotion to us. Duit [16] also rescues the fact that ludic teaching dynamics, apart from achieving motivation, also may have an emotional contribution to affection and the commitment needed for a meaningful learning.

In his book *Introduction to Using Games in Education: A Guide for Teachers and Parents*, Dave Moursund, adds other educational goals possible with games:

- a) Learning to learn and to help others learn; learning about one's strengths and weaknesses as a learner.
- b) Learning to work both individually and collaboratively with a team on a large, long, challenging project.
- c) Learning for transfer of learning.
- d) Learning to improve one's creativity.
- e) Learning that helps increase one's level of cognitive development and cognitive maturity

The importance of teaching through games, increases in the case of physics, since several studies show that senior high school students tend to get demotivated about this science subject when they do not find any relationship between real life and the physics knowledge. So, the games we need for motivation, also we need them to be contextualized [10, 11, 12, 13, 14, 15]

The didactical problem with the Multiple Intelligences approach.

When trying to apply Gardner's approach to our classroom, we find difficulties:

- a) Diagnosis to identify a dominant learning style in the classroom is not easy, especially because one person may dispose of more than one learning style
- b) Designing a lesson according to a dominant learning style, may be very demanding for the teacher and may be discriminatory against students that have different learning styles (inclusion problem), e.g. a kinesthetic student is assessed only through a reading activity. This strategy can be demotivating as well as boring to some students, which means, it becomes anti-pedagogic.
- c) Paying attention to only one or two learning styles when designing a lesson may be not learning-efficient, because knowledge assimilation needs reinforcement and the activation of different synaptic ways in the brain
- d) Learning a concept needs some rehearsal but lesson's time is limited
- e) Group size is a hurdle: In Mexico and other Latin-American countries, typical senior high school groups rank from 30 to 60 or even more students. This situation worsens the above mentioned didactical hurdles.

As a possible solution to these didactical problems, Dunn&Dunn propose the use of learning stations. To solve the inclusion problem of MI, the classroom is divided into *learning stations*. From station to station the involved activities vary to stimulate different learning styles and intelligence types. At each

station a concept may be partially learned or reinforced. Learning stations may provide the means for differentiated instruction (Binnendifferenzierung).

Using learning stations as a didactical strategy is a very popular resource at German schools [17]. Although this proposal may solve the inclusion problem, learning stations may still have some deficiencies:

- a) Time limitation may still be a hurdle
- b) The strategy may not be effective if it is not motivating to the students.

3. Our solution: ludic learning stations approach

Facing the didactical problems exposed by the multiple intelligences and learning styles theories, and considering the advantages of game-based learning, we propose a strategy, a ludic learning stations approach for strengthening the concepts behind the teaching of physical quantities and their SI units. This proposal has the following features:

- a) The classroom will be divided into 5 learning stations where different learning styles are stimulated. The objective is to give a solution to the inclusion problem exposed above, so we need to develop strategies that give students the chance to learn according to the intelligence type/learning style they are used to.
- b) Similar contents, that is base/derived quantities and units, are worked inside each learning station. The learning stations approach can be applied either by activities that help to learn partial concepts of a whole topic at each station or as we propose here, by activities that help to learn the same contents in different didactical ways. We selected this last approach, because we need the students to rehearse the knowledge about physical quantities and also is desirable that they could transfer this knowledge into different contexts.
- c) The selected activities at each learning station are designed to be ludic and entertaining for the students, as we exposed about game-based learning, this may help to inject a high motivation dose to the didactical strategy.
- d) The whole time students will participate in couples, in such a way to speed up the dynamics of the whole learning stations strategy and letting the students to realize the advantages of collaborative work between them.
- e) A very important aspect of this strategy is that all students must go through all the five learning stations in order to give them the chance to assimilate knowledge not only through the learning style they are used to, but also to get it in other ways, what accomplish with the requirement of knowledge rehearsal written lines above. Considering this, all couples must participate at least

once in each learning station and only 4 couples maximum are allowed to occupy one station simultaneously.

- f) As we may infer, there is no learning-stations specific order to be accomplished, and also we have the problem of how to control which activity has been already accomplished by each couple. A solution to this problem, could be giving a control sheet to each couple with the list of activities to be done and every time the couple has already finished activities at a learning station, the teacher can seal or sign on the corresponding space on the control sheet.
- g) The 5 learning stations include the following activities: Station 1-Bingo: each student couple has a bingo style board, with 9 squares. Each square has the name of a physical quantity (force, length, time etc.). The conducting student will be designated according to the last name's alphabetical order of all the station participants. This student has a bunch of cards aleatory mixed, each with an image depicting a physical phenomenon/action and a sentence describing any physical aspect and units related with the image. For example, the image shows a running car and the sentence says "A car runs at 60 km/h". The conducting student shows aleatory the cards to the others and the participants must infer if the image and sentence showed are related to any of the quantity names on their bingo board. In our example, the board square with the name "velocity" may be selected. Wins the first couple that finishes with selecting all squares on its board. Station 2-Memory: similar to the traditional game, the participants must try to collect card pairs similar to each other, but in this case a card pair is made by an image with sentence and the name of the quantity it represents, just the same pairing criteria as by the bingo game. Wins the couple that collects the higher amount of card pairs. Station 3- Domino: Instead of playing with seven numbers, we play with the seven base quantities. Each of the 28 tokens is divided, one half has the physical quantity name and the other half, is an image with sentence and units. The pairing criteria for placing the domino tokens is the same as by the games described previously. Station 4-Measuring instruments: on the table the students have different measuring instruments (rulers, chronometers, thermometers, test tubes, flasks etc.) There is a list of different measuring activities. The students must select three activities that involve each a different physical quantity. The students write down their results and draw the instruments they used on the control sheet. Station 5- Phenomena analysis: In this station the students have diverse objects on the table that involve physical phenomena. The students must

write down on the control sheet a list of 5 or 6 physical quantities they observe are present on one selected phenomenon and their as well as the possible measuring units for such quantities.

h) As we said when speaking about the learning stations theory, time may be a hurdle if activities are not well defined neither motivating enough for the students to be accomplished. Also there is some risk that students prefer to remain or repeat participation at a specific learning station, and forget to participate at the others. To solve the time problem and speed up the whole dynamics, we suggest to give a rally or contest format to the ludic learning stations lesson. The winner couple will be the first to participate at least once in each 5 learning stations and this can be controlled with the control sheet. If the teacher considers that there is enough time to complete a second round or that the winner couple will be the first on participating at least twice in each station, it can be done. According to our first experience with this proposal, the winner couple can make a whole learning stations round in approximately 40 minutes and the whole students group needs a bit more than one hour to complete it.

i) After finishing the learning stations dynamics, we propose to activate all senses with a musical activity, an activity based on a song (The Units Rap) with an understandable explanation of the seven base quantities and their units, that let the students to detonate their creativity and simultaneously helps them to remember the base quantities that build more complex physical concepts and that are considered when executing dimensional analysis. This is a reinforcement activity that consist on dividing the group into seven teams, each team will get in charge of singing the verse corresponding to one specific base quantity/unit. The refrain will be sung by the whole group each time a verse has been finished when interpreting the Units Rap. After showing the song to the students and letting them some time to rehearse, we can conduct a contest, where the team with the best choreography and creativity when singing their corresponding verse will be the winner. Besides of its mnemonics character, this closing activity stimulates the student's musical and kinesthetic intelligences.

As we can see from the learning stations dynamics description, the activities are planned to stimulate different intelligence types and are aimed for giving students a chance of using different learning styles. The five ludic learning stations proposal stimulate 6 of 8 intelligences types:

- a) Bingo (visual-linguistic)
- b) Memory (visual-linguistic)

- c) Domino (visual-linguistic-logical)
- d) Measuring instruments (kinesthetic-logical)
- e) Analyze physical phenomena (kinesthetic-visual)
- f) Always work in couples (interpersonal)
- g) Musical closing activity (musical intelligence-kinesthetic-interpersonal)

Naturalistic intelligence may be stimulated if instead of participating at station 5 inside the classroom or laboratory, the students have the chance to analyze natural phenomena outside of in open-air environments. Intrapersonal intelligence may be further considered.

4. Some first results

The proposed learning stations strategy was tested recently as a fundamental part of a physics education research for developing the student's scientific observation skills. The proposal was tested within a group of 30 students at Escuela Nacional Preparatoria No. 8 "Miguel E. Schulz", a senior high school that belongs to the UNAM. The intervention took place from February 27th until March 13th 2018. The learning stations proposal was applied within this period.

This first experience gave us some important data for a further strategy's improvement. For example, there is a "cycle time" for completing the activities through the five learning stations. The fastest couple needed only 33 minutes, the rest of the group ended the activity approximately after a bit more than an hour. We identify the need to balance the time consumed at each station, because some station's activities are completed "too" fast and others don't, for example the bingo station was completed very fast causing saturation on other stations, so we need to modify the bingo activity in order to last longer and eliminate the bottle neck it causes.

As we said, the learning stations strategy was only a part of a whole didactical sequence, which was evaluated through pre-tests and post-tests results. The tests were divided in two parts, the first part was addressed to assess the improvement on the student's scientific observation skills. The second part was focused to assess the improvement on the learning of conceptual content related with physical quantities and units, this mean, the results obtained at this second part of the pre- and post-tests are directly linked with the learning stations strategy proposed. The results have been very positive, we got a 30% improvement on the learned conceptual knowledge content.

5. Conclusions

The adequate teaching of metrology concepts, especially those related to the understanding of basic and derived physical quantities, may have important

advantages for the students when learning physics. The need of scientific alphabetization expressed by Duit [16] may be achieved through an effective teaching of this topic.

As different research documents show, physics teachers must develop didactical strategies that are able to motivate the students to learn the subject, through contextualized situations, game-based learning activities and giving them the opportunity to learn with their accustomed learning style by using inclusion didactical dynamics like those allowed by the learning-station approach.

The outcome with a first practical experience applying a ludic learning-stations didactical proposal has produced some encouraging results. More research via practical cases is needed to validate the proposed methodology's effectiveness

6. References

- [1] Gardner, Howard (2010). *La inteligencia reformulada: las inteligencias múltiples en el siglo XXI*. Paidós
- [2] Gardner, Howard. (2015). *Inteligencias Múltiples, la teoría en la práctica*. Paidós
- [3] Dunn, Rita (1995) *Strategies for Educating Diverse Learners*. Phi Delta Kappa Educational Foundation. Bloomington, Estados Unidos. In <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED382598.pdf> Stand: Mai 11th 2018
- [4] Corbin, B. (2008) *Unleashing the potential of the teenage brain. 10 powerful ideas*. California, Corwin Press.
- [5] Huizinga, J. (2007) *Homo ludens*. El libro de bolsillo-Alianza editorial. Madrid. <http://zeitgenoessischeaesthetik.de/wp-content/uploads/2013/07/johan-huizinga-homo-ludens-espan%CC%83ol.pdf> Stand: Mai 11th 2018
- [6] Prensky, Marc. (2001) *Digital Game-Based Learning*. Mc Graw-Hill. <http://www.marcprensky.com/writing/Prensky%20-%20Digital%20Game-Based%20Learning-Ch5.pdf> Stand: Mai 11th 2018.
- [7] Moursund, Dave (2006). *Introduction to Using Games in Education: A Guide for Teachers and Parents*. University of Oregon.p.30 <http://pages.uoregon.edu/moursund/Books/Games/Games.pdf>. Stand: Mai 11th 2018
- [8] Corbin, B. (2008) *Unleashing the potential of the teenage brain. 10 powerful ideas*. California, Corwin Press.
- [9] Jensen, Eric. (2004). *Cerebro y aprendizaje. Competencias e implicaciones educativas*. Nancea: Madrid
- [10] Docktor, J.; Mestre, J. (2014) *Synthesis of discipline-based education research in physics*. Physical review special topics-Physics education research. 10, 020119. <https://pdfs.semanticscholar.org/900a/3596bdf035eb7839d575d13eccaad19e2a61.pdf> Stand: 30th Mai 2018
- [11] Solbes, J.; Montserrat, R.; Furió, C., (2007) *El desinterés del alumnado hacia el aprendizaje de la ciencia: implicaciones en su enseñanza*. Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales, 21. <https://ojs.uv.es/index.php/dces/article/view/2428> Stand: 30th Mai 2018
- [12] Arandía, E.; Zuzá, K.; Guisasola, J. (2016) *Actitudes y motivaciones de los estudiantes de ciencias en Bachillerato y Universidad hacia el aprendizaje de la Física*. Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias 13 (3), 558-573. <http://hdl.handle.net/10498/18497> Stand: 30th Mai 2018
- [13] Dávila Acedo, M. A., et al. (2016) *Las emociones en el aprendizaje de física y química en educación secundaria. Causas relacionadas con el estudiante*. Educación Química <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0187893X16300015> Stand: 30th Mai 2018
- [14] Derek Cheung, (2018) *The key factors affecting students' individual interest in school science lessons*, International Journal of Science Education, 40:1, 1-23, <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09500693.2017.1362711> Stand: 30th Mai 2018
- [15] Williams, C.; Stanistreet, M., Spall, K. (2003) *Why aren't secondary students interested in physics?*, Physics Education 38(4), IOP Publishing Ltd http://users.df.uba.ar/sgil/physics_paper_doc/papers_phys/teaching/williams.pdf Stand: 30th Mai 2018
- [16] Duit, R. & Treagust, D.F. (2003) *Conceptual change: A powerful framework for improving science teaching and learning*, International Journal of Science Education, 25:6, 671-688, <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09500690305016> Stand: 30th Mai 2018
- [17] Di Fuccia, D.; Witteck, T.; Markic, S. Eilks, I. (2012) *Trends in Practical Work in German Science Education*, Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education, 8(1), 59-72 <http://www.ejmste.com/Trends-in-Practical-Work-in-German-Science-Education.74722.0.2.html> Stand: 30th Mai 2018

LemaS-DiaMINT: Diagnosebasierte individuelle Förderung leistungsstarker und potentiell leistungsfähiger Schülerinnen und Schüler im Sach-, Naturwissenschafts- und Physikunterricht

Hilde Köster, Volkhard Nordmeier

Freie Universität Berlin, Fachbereich Physik, Arnimallee 14, 14195 Berlin
hilde.koester@fu-berlin.de, volkhard.nordmeier@fu-berlin.de

Kurzfassung

DiaMINT zielt als Teilprojekt des durch das BMBF geförderten Verbundprojekts ‚Leistung macht Schule‘ (LemaS) am Standort FU Berlin auf die Entwicklung und Evaluation adaptiver Konzepte für eine diagnosebasierte individuelle Förderung von (potentiell) leistungsstarken Schülerinnen und Schülern in den Fächern Sachunterricht, Naturwissenschaften sowie Physik ab.

Im Projekt werden gemeinsam mit den Schulen pädagogische Leitbilder entworfen und darauf aufbauend domänenspezifische Diagnosetools und Förderungsmöglichkeiten entwickelt, erprobt und evaluiert. Berücksichtigt werden dabei die jeweiligen Besonderheiten des Faches, die Rahmenbedingungen in den beteiligten Schulen sowie die spezifischen Potenziale und Bedürfnisse der Schülerinnen und Schüler. Die entwickelten Instrumente werden zunächst in Lehr-Lern-Labor-Situationen an der Universität getestet. Dabei werden auch Studierende bereits frühzeitig in Theorie und Praxis der Identifikation und Forderung leistungsstarker bzw. potentiell leistungsfähiger Kinder im Sach-, Naturwissenschafts- und Physikunterricht eingeführt.

1. Ausgangslage und Forschungsstand

Neuere Forschungsergebnisse lassen den Schluss zu, dass einerseits die Diagnosekompetenzen von Lehrkräften im Hinblick auf Leistungspotentiale ausgebaut und andererseits auch die Kompetenz zur Umsetzung von durch Diagnose gewonnenen Erkenntnissen in adäquate individuelle Fördermaßnahmen ausgebaut werden müssen (vgl. Käpnick, 2014; Müller-Oppliger, 2014, S. 131). Zudem kann davon ausgegangen werden, dass die schulischen Bedingungen den Lernbedürfnissen von Kindern insgesamt noch zu selten entsprechen. Gabriele Weigand fordert daher eine „grundsätzliche Verlagerung von Prioritäten auch bei den Lehrpersonen“ (Weigand, Hackl, Müller-Oppliger & Schmidt, 2014, S. 22) hin zu einer Fokussierung auf die Person des Kindes oder Jugendlichen und deren Bildungs- und Begabungsprozesse. Der Ansatz der personorientierten Begabungsförderung (ebd.) legt einen Schwerpunkt auf die Persönlichkeitsbildung, in die das (auch fachbezogene), individuelle Lernen eingebettet werden muss. Besondere Leistungspotenziale von Schüler*innen werden in diesem Theorierahmen als Dispositionen verstanden, die sich in dynamischen, hochkomplexen und zugleich individuell geprägten Prozessen stetig entwickeln bzw. weiterentwickeln (vgl. z. B. iPEGE, 2012; Fischer & Fischer-Ontrup, 2014; Weigand et al., 2014) und durch wechselseitige Beeinflussungen intra- und interpersonaler Katalysatoren wesentlich mitbestimmt werden (Käpnick, 2010).

Eine gute Passung zwischen der individuellen Lernausgangslage und dem jeweiligen Unterrichtsangebot ist dabei eine unverzichtbare Voraussetzung dafür, Leistungspotentiale ausschöpfen zu können (z. B. Connor, Morrison, Fishman, Schatschneider & Underwood, 2007). Dass eine solche ‚Passung‘ nur in einem stetigen wechselseitigen Prozess zwischen einer fundierten Diagnostik und einer hierauf basierenden adaptiven Förderung optimiert werden kann, ist ebenfalls unstrittig (z. B. Schrader, 2017). Zu bedenken ist dabei aber, dass diagnostische Kompetenzen domänenspezifisch sind (vgl. Blömeke, Gustafsson & Shavelson, 2015; Berliner, 2001, 2004; Kunter et al., 2013).

Studien zeigen, dass Konzepte einer diagnosebasierten individuellen Förderung von Schüler*innen in der (deutschen) Schulpraxis bisher eher selten realisiert werden (Philipp & Souvignier, 2016; Sjuts, 2017). Wo dies stattfindet, richten sich die Fördermaßnahmen (z. B. durch Binnendifferenzierung oder z. B. (Hoch-) Begabtenförderprogramme) jedoch oft recht einseitig auf schulischen ‚Lernstoff‘. Sowohl Enrichment- als auch Akzelerationskonzepte beziehen sich vorrangig auf curricular vorgesehene Inhalte (vgl. Behrensen & Solzbacher, 2016, S. 74 ff.; 96 ff.), verfehlen das Ziel der individuellen Förderung (Weigand et al., 2014, S. 166 f.) oder sind „recht eng an schulischen Leistungen orientiert“ (Seitz, Pfahl, Lassek, Rastede, & Steinhaus, 2016, S. 14).

Auch in sogenannten ‚horizontalen Enrichment‘-Fördermaßnahmen, die über curriculare Inhalte hinaus gehen (vgl. Müller-Oppliger, 2015, S. 49 ff.),

geben zumeist die Lehrkräfte die Inhalte vor. Individuelle Potenziale außerhalb curricularer Inhalte bleiben hierbei vermutlich unentdeckt.

2. Ziele im Projekt LemaS

Das durch das BMBF geförderte Verbundprojekt **LemaS** („Leistung macht Schule“) mit 300 beteiligten Schulen und Wissenschaftler*innen an 16 Hochschulen ist einerseits auf die wissenschaftliche Begleitung von Schulen bei der Entwicklung eines ressourcen- und potenzialorientierten Leitbildes sowie den Aufbau einer kooperativen Netzwerkstruktur ausgerichtet und andererseits auf die Diagnose, Entfaltung und Entwicklung besonderer (Leistungs-) Potenziale von Schüler*innen und Schülern in der Grundschule und den Sekundarstufen. Die Lehrkräfte sollen unterstützt werden Leistungspotentiale und -stärken bei Lernenden zu erkennen und einen Leistungsbegriff zu entwickeln, der neben schulischen Zielen auch die individuelle Persönlichkeitsbildung und den Lebenskontext berücksichtigt. Fach- und inhaltsbezogen werden Instrumente für die Diagnose besonderer Potenziale bei den Lernenden sowie fachdidaktische Konzepte für einen adaptiven Unterricht und eine bereichsspezifische individuelle Förderung erarbeitet und erprobt.

3. Potenziale: Theoretischer Hintergrund

Inwiefern die schulische (und damit verbunden auch die persönliche) Entwicklung gelingt, ist abhängig von einer guten Passung zwischen individueller Lernausgangslage und aktivierenden Lernangeboten (Connor et al., 2007; Eccles et al., 1993). Adaptiver Unterricht, der den individuellen Lernbedürfnissen entgegenkommt, findet derzeit in Schulen aber eher selten statt (Westphal, 2016; Lankes & Carstensen, 2007; Schrader & Helmke, 2008). Studienergebnisse zeigen, dass Lehrkräfte mit konstruktivistischen Überzeugungen und solche mit guten Diagnosekompetenzen häufiger differenzierende Unterrichtsmaterialien einsetzen als transmissiv eingestellte (Richter, Böhme, Becker, Pant & Stanat, 2014; Anders, Kunter, Brunner, Krauss & Baumert, 2010; Westphal, 2016). Insgesamt fördern Lehrkräfte eher leistungsschwächere als leistungsstarke Schüler*innen (Schroeders, Schipolowski, Zettler, Golle & Wilhelm, 2016). Gleichzeitig zeigen Schüler*innen in Risikolagen in Deutschland immer noch geringere schulische Leistungen, sind und fühlen sich weniger erfolgreich (Ehmke & Jude, 2010; Andresen & Hurlmann, 2013; Ikeda & Garcia, 2014) und ihre Interessen und schulischen Ambitionen werden weniger unterstützt (Dumont, Maaz, Neumann & Becker, 2014; Watermann, Daniel & Maaz, 2014; Stamm, 2014). Leistungsstarke Schüler*innen dagegen langweilen sich nicht selten im Regelunterricht (Hoyer, Haubl & Weigand, 2014; Preckel, Götz & Frenzel, 2010), was zu Motivations- und Leistungseinbußen sowie generell zu Entwicklungsrisiken führen

kann (Fischer & Fischer-Ontrup, 2016; Gronostaj, Werner, Bochow & Vock, 2016; Käpnick, 1999; Sjuts, 2017).

Fördermaßnahmen wie Enrichment und Akzeleration zeigen durchaus Erfolge (Kim, 2016), jedoch naturgemäß nur dann, wenn die Potenziale der Lernenden entdeckt worden sind. Da Leistungspotenziale bereichsspezifisch sind (vgl. Blömeke et al., 2015; Berliner, 2004), ist eine dem Leistungsbereich entsprechende Diagnostik erforderlich (Schrader, 2017).

4. Ziele und Fragestellungen der LemaS-DiaMINT-Teilprojekte am Standort FU Berlin

4.1 LemaS-DiaMINT Sachunterricht

Das Ziel des Teilprojekts **LemaS-DiaMINT Sachunterricht** ist die diagnosebasierte individuelle Förderung leistungsstarker und potenziell leistungsfähiger Schüler*innen im Sachunterricht (mit den Schwerpunkten Naturwissenschaften und Informatische Bildung).

Das Hauptziel dieses Teilprojekts besteht darin, ein im Regelunterricht anwendbares Diagnosetool sowie adaptive Konzepte und Lernumgebungen für eine diagnosebasierte individuelle Förderung zu entwickeln, die den jeweiligen Besonderheiten des Faches sowie den spezifischen Potenzialen und Bedürfnissen von Kindern entsprechen und lernfördernde oder -hemmende intra- und interpersonale Einflussfaktoren berücksichtigen. Grundlage für die Entwicklung des Diagnoseinstruments ist das Konzept des Freien Explorierens und Experimentierens (FEE; Köster, 2006), das einen Schwerpunkt auf interessegeleitetes, selbstbestimmtes und forschendes Lernen legt.

Die Instrumente bzw. Konzepte werden gemeinsam mit den Lehrkräften in der Unterrichtspraxis in Sinne des Design-based Research-Ansatzes entwickelt und formativ evaluiert.

4.2 LemaS-DiaMINT Physik

Das Ziel des Teilprojekts **LemaS-DiaMINT Physik** ist die diagnosebasierte individuelle Förderung leistungsstarker und potenziell leistungsstarker Schülerinnen und Schüler im Physikunterricht der Sekundarstufe I. Im Teilprojekt werden adaptive Unterrichtskonzepte entwickelt und erprobt bzw. bereits vorhandene Konzepte an den Schulen evaluiert. Hierbei werden insbesondere lernfördernde oder -hemmende intra- und interpersonale Einflussfaktoren untersucht. Darüber hinaus werden exemplarisch Lernarrangements für den Einsatz im Physikunterricht entwickelt, die insbesondere selbstregulierendes bzw. selbstbestimmtes und forschendes Lernen ermöglichen und Physik(MINT)-bezogenen Gender-spezifika Rechnung tragen. Die Lernarrangements und die Diagnose-Fördertools sollen auch in Lehr-Lern-Labor-Seminaren an der Universität erprobt werden, so dass die beteiligten Studierenden bereits frühzeitig sowohl in die Theorie als auch in die Pra-

xis der Identifikation und Förderung leistungsstarker bzw. potenziell leistungsfähiger Schülerinnen und Schüler im Physikunterricht eingeführt werden.

4.3 Ausgangs-Fragen

Um die Ziele in beiden Teilprojekten realisieren zu können, sind folgende Fragen im Vorfeld des Einsatzes von Diagnoseinstrumenten und Lernarrangements in den Schulen zu beantworten:

Bezogen auf das schulische Umfeld:

- Welche schulischen und außerschulischen Rahmenbedingungen sollten aus theoretischer Sicht gegeben sein, um allen Kindern möglichst optimale MINT-bezogene Entwicklungsmöglichkeiten im Sach- und Physikunterricht zu bieten?
- Welche Rahmenbedingungen herrschen an den Grundschulen hinsichtlich des MINT-bezogenen Sachunterrichts (bzw. in Berlin auch für den Naturwissenschaftsunterricht der Grundschule) und dem Physikunterricht bzgl. der Identifikation und Förderung leistungsstarker und potenziell leistungsfähiger Schülerinnen und Schüler (Ausbildungsgrad bei den Lehrkräften, räumliche, material- und medienbezogene Ausstattung, zur Verfügung stehender zeitlicher Rahmen für MINT-bezogenes Lernen)?
- Inwiefern bestehen bereits besondere MINT-Schulprofile, Förderansätze oder -programme?
- Wie können die Rahmenbedingungen gegebenenfalls ko-konstruktiv im Sinne des Vorhabens verändert bzw. optimiert werden (z. B. Fortbildungsangebote für Lehrkräfte in Hinblick auf fachlich- und fachdidaktische Kompetenzen und auf die besonderen Bedarfe leistungsstarker und potenziell leistungsfähiger Schülerinnen und Schüler; gemeinsames Entwickeln und Schaffen von spezifisch auf MINT ausgerichtete Erfahrungs- und Lernräume bzw. -zeiten).

Fachbezogen:

- Welche domänenspezifischen didaktischen Aspekte sind für die Entwicklung von Lernarrangements zu beachten, damit alle Schülerinnen und Schüler, aber insbesondere leistungsstarke und potenziell leistungsfähige Schülerinnen und Schüler im Sach- und Physikunterricht hinsichtlich einer möglichst optimalen Ausprägung von Interessenprofilen und Kompetenzen profitieren können?

Bezogen auf die Diagnose:

- Welche Erfassungsinstrumente für die Identifikation von leistungsstarken und potenziell leistungsfähigen Schülerinnen und Schülern und welche Informationsquellen stehen zur Verfügung bzw. können ggf. adaptiert werden?

- Welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede gibt es zwischen Diagnose- und Förderkonzept-Formaten verschiedener MINT-Fächer?

Übergreifend:

- Welche konkreten Bestandteile sollten die mit den anderen Projektteilnehmer*innen entwickelten Konzepte und digitalen Medien für eine diagnosebasierte individuelle Förderung von leistungsstarken und potenziell leistungsfähigen Schülerinnen und Schülern im Regelunterricht jedes MINT-Faches enthalten (projektübergreifende Fragestellung)?
- Wie sollten die Konzepte für die Lehrkräfte praktikabel in Form konkreter Diagnose- und Fördermaterialien aufbereitet sein?

5. Literatur

- Anders, Y., Kunter, M., Brunner, M., Krauss, S. & Baumert, J. (2010). Diagnostische Fähigkeiten von Mathematiklehrkräften und die Leistungen ihrer Schülerinnen und Schüler. *Psychologie in Erziehung und Unterricht*, 57(3), 175-193.
- Andresen S. & Hurrelmann, K. (2013): *Kinder in Deutschland. 3. World Vision Kinderstudie*. Weinheim: Beltz.
- Berliner, D. C. (2001). Learning about and learning from expert teachers. *Educational Research* 35, 463-482.
- Berliner, D. C. (2004). Describing the behavior and documenting the accomplishments of expert teachers. *Bulletin of Science, Technology & Society*, 24, 200-212.
- Behrens, B. & Solzbacher, C. (Hrsg.) (2016): *Grundwissen. Hochbegabung in der Schule. Theorie und Praxis*. Weinheim und Basel: Beltz.
- Blömeke, S.; Gustafsson, J.-E. & Shavelson, R.J. (2015). Beyond dichotomies: Competence viewed as a continuum. *Zeitschrift für Psychologie*, 223, 3-13.
- Connor, C. M., Morrison, F. J., Fishman, B. J., Schatschneider, C., & Underwood, P. (2007). Algorithm-guided individualized reading instruction. *Science*, 315, 464-465.
- Dumont, H., Maaz, K., Neumann, M. & Becker, M. (2014). Soziale Ungleichheiten beim Übergang von der Grundschule in die Sekundarstufe I: Theorie, Forschungsstand, Interventions- und Fördermöglichkeiten. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft, Sonderheft 24*, 141-165.
- Eccles, J. S., Midgley, C., Wigfield, A., Buchanan, C. M., Reuman, D., Flanagan, C., & Mac Iver, D. (1993). Development during adolescence: The impact of stage-environment fit on young adolescents' experiences in schools and in families. *American psychologist*, 48, 90.
- Ehmke, T. & Jude, N. (2010). Soziale Herkunft und Kompetenzerwerb. In E. Klieme, C. Artelt, J. Hartig, N. Jude, O. Köller, M. Prenzel & P. Sta-

- nat (Hrsg.), PISA 2009: Bilanz nach einem Jahrzehnt (231-254). Münster: Waxmann.
- Fischer, C. & Fischer-Ontrup, C. (2014). Begabung, Talent und Lern- & Leistungsschwierigkeiten. In M. Stamm (Hrsg.), *Handbuch Talententwicklung: Theorien, Methoden und Praxis in Psychologie und Pädagogik* (S. 393-404). Bern: Huber.
- Fischer, C. & Fischer-Ontrup, C. (2016). Mehrfach außergewöhnlich: Besonders begabte Kinder mit Lern- und Leistungsschwierigkeiten. *Lernen und Lernstörungen*, 5, 207-218.
- Gronostaj, A., Werner, E., Bochow, E. & Vock, M. (2016). How to learn things at school you don't already know: Experiences of gifted grade skippers in Germany. *Gifted Child Quarterly*, 60(1), 31-46.
- Hoyer, T., Haubl, R. & Weigand, G. (Hrsg.). (2014). *Sozio-Emotionalität von hochbegabten Kindern: Wer sie sind - was sie bewegt - wie sie sich entwickeln*. Weinheim: Beltz.
- Ikeda, M. & García, E. (2014). Grade repetition: A comparative study of academic and non-academic consequences. *OECD Journal: Economic Studies*, 2013 (1), 269-315.
- iPEGE 2012. *Professionelle Begabtenförderung. Erprobte Studienmodule*. Salzburg: ÖZBF.
- Käpnick, F. (1999). Notwendigkeiten und Möglichkeiten einer verstärkten Integration mathematisch begabter Kinder in den „normalen“ Unterricht. *Mathematische Unterrichtspraxis*, 4, 3-11.
- Käpnick, F. (Hrsg.) (2010): *Das Münsteraner Projekt „Mathe für kleine Asse“*. Perspektiven von Kindern, Studierenden und Wissenschaftlern (Bd. 2 der Reihe Schriften zur mathematischen Begabungsforschung; hrsg. von F. Käpnick). Münster: WTM.
- Käpnick, F. (2014). *Mathematiklernen in der Grundschule*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Kim, M. (2016). A meta-analysis of the effects of enrichment programs on gifted students. *Gifted Child Quarterly*, 60, 102-116.
- Köster, H. (2006). *Freies Explorieren und Experimentieren – eine Untersuchung zur selbstbestimmten Gewinnung von Erfahrungen mit physikalischen Phänomenen im Sachunterricht*. Berlin.
- Kunter, M., Baumert, J., Blum, W., Klusmann, U., Krauss, S. & Neubrand, M. (Hrsg.) (2013). *Cognitive activation in the mathematics classroom and professional competence of teachers: Results from the COACTIV project*. New York: Springer.
- Lankes, E. M. & Carstensen, C. H. (2007). Der Lesunterricht aus der Sicht der Lehrkräfte. In W. Bos, S. Hornberg, K.-H. Arnold, G. Faust, L. Fried, E.M. Lankes, K. Schwippert, & R. Valtin (Hrsg.), *IGLU 2006*
- Philipp, M. & Souvignier, E. (Hrsg.). (2016). *Implementation von Lesefördermaßnahmen. Perspektiven auf Gelingensbedingungen und Hindernisse*. Münster: Waxmann.
- Preckel, F., Götz, T. & Frenzel, A. (2010). Ability grouping of gifted students: Effects on academic self-concept and boredom. *British Journal of Educational Psychology*, 80, 451-472.
- Richter, D., Böhme, K., Becker, M., Pant, H. A. & Stanat, P. (2014). Überzeugungen von Lehrkräften zu den Funktionen von Vergleichsarbeiten: Zusammenhänge zu Veränderungen im Unterricht und den Kompetenzen von Schülerinnen und Schülern. *Zeitschrift für Pädagogik*, 60(2), S. 225-244.
- Seitz, S.; Pfahl, L.; Lassek, M.; Rastede, M. & Steinhaus, F. (Hrsg.) (2016). *Hochbegabung inklusive. Inklusion als Impuls für Begabungsförderung an Schulen*. Weinheim und Basel: Beltz.
- Schrader, F.-W. & Helmke, A. (2008). Determinanten der Schulleistung. In M. Schweer (Hrsg.), *Lehrer-Schüler-Interaktion. Inhaltsfelder, Forschungsperspektiven und methodische Zugänge* (2. Aufl., S. 285-302). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Schrader, F.-W. (2017). Diagnostische Kompetenz von Lehrkräften – Anmerkungen zur Weiterentwicklung des Konstrukts. In A. Südkamp & A.-K. Praetorius (Hrsg.), *Diagnostische Kompetenz von Lehrkräften*, 247-255. Münster: Waxmann.
- Schroeders, U., Schipolowski, S., Zettler, I., Golle, J. & Wilhelm, O. (2016). Do the smart get smarter? Development of fluid and crystallized intelligence in 3rd Grade. *Intelligence*, 59, 84-95.
- Sjuts, B. (2017). *Mathematisch begabte Fünft- und Sechstklässler. Theoretische Grundlegung und empirische Untersuchungen*. Münster (unveröff. Promotion).
- Stamm, M. (2014). Minoritäten als Begabungsreserven. In M. Stamm (Hrsg.), *Handbuch Talententwicklung. Theorien, Methoden und Praxis in Psychologie und Pädagogik* (375- 384). Bern: Huber.
- Watermann, R., Daniel, A. & Maaz, K. (2014). Primäre und sekundäre Disparitäten des Hochschulzugangs. Erklärungsmodelle, Datengrundlagen und Entwicklungen. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft, Sonderheft 24*, 233-261.
- Weigand, G.; Hackl, A.; Müller-Oppliger, V. & Schmid, G. (2014). *Personorientierte Begabungsförderung. Eine Einführung in Theorie und Praxis*. Weinheim und Basel: Beltz.
- Westphal, A. (2016). *Diagnostische Kompetenzen von Lehrkräften: Urteilstendenzen, Zusammenhänge mit dem Unterrichtshandeln und Entscheidungen zum Klassenüberspringen*. Potsdam: Universität Potsdam.

Das Schulbuch im fächerübergreifenden naturwissenschaftlichen Unterricht

- Eine vergleichende empirische Analyse -

Johannes Lewing*, Susanne Schneider*

*Georg-August-Universität Göttingen, Didaktik der Physik, Friedrich Hund-Platz 1, 37077, Göttingen
johannes.lewing@uni-goettingen.de, sschnei@gwdg.de

Kurzfassung

In der Diskussion um integrierten naturwissenschaftlichen Unterricht wird häufig anhand der inhaltlichen Struktur sowohl pro fächerübergreifenden, also auch pro fachsystematischen Unterricht argumentiert. Inwiefern sich die Sachstrukturen der beiden Varianten unterscheiden, ist derzeit noch nicht hinreichend geklärt. In diesem Beitrag wird untersucht, ob eine automatisierte Extraktion von Sachstrukturen aus Schulbüchern möglich ist, und ob ein Unterschied zwischen den zentralen Konzepten in Physikschulbüchern und Schulbüchern für das integrierte Fach feststellbar ist. Anhand der Schulbuchreihen *Universum Physik* für das Fach Physik und *PRISMA Naturwissenschaften* für das integrierte Fach wird exemplarisch gezeigt, dass eine automatisierte Extraktion der Sachstruktur gelingt, anhand derer die zentralen Konzepte verglichen werden können. Erste Ergebnisse zeigen Unterschiede zwischen den beiden Schulbüchern.

1. Einleitung

Integrierter naturwissenschaftlicher Unterricht (INU) hat sich deutschlandweit in den vergangenen Jahren immer weiter im Anfangsunterricht etabliert. Zum Teil werden allerdings auch in der gesamten Sekundarstufe I Naturwissenschaften integriert unterrichtet, wie an der integrierten Gesamtschule in Niedersachsen¹. In der Diskussion um den fächerübergreifenden Unterricht werden oft Argumente eingebracht, die sich auf die inhaltliche Struktur der Fächer beziehen, aber größtenteils nur unzureichend empirisch belegt sind, sodass hier ein Beitrag zu diesem Thema geleistet werden soll.

2. Theorie

2.1 Diskussion um INU

In der Diskussion um INU wird aus Sicht der Befürworter argumentiert, dass fächerübergreifender Unterricht das Verbinden bereits gelernter und neu zu erlernender Wissensbestandteile begünstigt (Labudde, 2014). Weiter soll das „interdisziplinäre Vernetzen von Inhalten [...] neue Einsichten ermöglich[en]“ und somit das Interesse der Schülerinnen und Schüler fördern (ebd., S. 14). Aus Sicht der Kritiker spricht nach Merzyn (2013) gegen den fächerübergreifenden Unterricht vor allem die „Ordnung und Struktur“ (S. 266) der fachsystematischen Variante, welche „Umwege und Abwege“ (ebd.) vermeidet. Auch gewährleistet der übersichtliche Aufbau durch die Fachlogik ein angemessenes Unterrichtsniveau. In der Schulstudie der DPG (2016) wird darüber hinaus davor gewarnt, dass zentrale Konzepte in einem fächerübergreifenden Fach vernachlässigt werden, wenn fachsystematische Unterrichtsphasen fehlen. Die genannten Argumente im-

plizieren einen Unterschied in der inhaltlichen Struktur des integrierten Fachs und des fachsystematischen Unterrichts, dem im Folgenden nachgegangen werden soll.

2.2 Sachstrukturen

Unter dem Begriff der Sachstruktur wird im Folgenden die *Sachstruktur für den Physikunterricht* verstanden, welche in Abgrenzung zur *Sachstruktur der Wissenschaft Physik* aktiv entwickelt werden kann (Brückmann, 2009). Die Autorin beschreibt diese Sachstrukturen für den Physikunterricht als „sachliche, unter logischen und systematischen Gesichtspunkten gegliederte Struktur der fachlichen Inhalte“ (ebd., S. 57). Dabei zählen zu den fachlichen Inhalten „Begriffe, Konzepte, Modelle und Prinzipien als auch [...] die Methoden, Denk- und Arbeitsweisen und die Vorstellungen über die Natur der Naturwissenschaften“ (ebd.). Nach ähnlicher Definition wurden diverse Videografiestudien durchgeführt, in denen Sachstrukturdiagramme extrahiert wurden (Brückmann, 2009; Liepertz, 2017; Müller & Duit, 2004). Dagegen fokussieren sich andere Studien ausschließlich auf die fachlichen Konzepte innerhalb der Sachstruktur, sodass vor allem die verwendeten Fachbegriffe und deren Verknüpfungen untereinander in Concept Maps betrachtet werden. Dazu zählen zum Beispiel Härtig (2010) und Helaakoski und Viiri (2014). Während in der Schulbuchanalyse von Härtig auch die Relationen, also die Art der Verbindung zwischen Fachbegriffen ebenfalls extrahiert wird, ist diese bei Helaakoski und Viiri vernachlässigt worden. Letztere konnten in ihrer Videostudie von Physikunterricht eine Korrelation zwischen Vernetzung der Fachbegriffe und Lernerfolg der Schülerinnen und Schüler feststellen, weshalb in

diesem Beitrag diese Operationalisierung der konzeptuellen Sachstruktur gewählt wurde.

2.3 Schulbücher

Schulbüchern wird in der Literatur starke Bedeutung in der Vermittlung zwischen intendiertem und umgesetztem Curriculum zugesprochen (Bierema, Schwartz & Gill, 2017; Oelkers & Reusser, 2008). Merzyn (1994), sowie Härtig, Kauertz und Fischer (2012) betonen des Weiteren die Rolle des Schulbuchs bei der Vorbereitung des Unterrichts. In Bezug auf das zum Teil fachfremde Unterrichten des integrierten Fachs Naturwissenschaften kann angenommen werden, dass sich diese Rolle weiter verstärkt. Schulbücher werden hier also als Annäherung an den eigentlichen Unterricht verstanden.

2.4 Forschungsinteresse

Um den Argumenten in der Diskussion um fächerübergreifenden Unterricht mit einer hohen Stichprobengröße nachzugehen, bietet es sich an, Sachstrukturen maschinell extrahieren zu lassen. Aus diesem Grund besteht das erste Forschungsinteresse darin, ob sich konzeptionelle Sachstrukturen automatisiert aus Schulbüchern extrahieren lassen. Anschließend kann die Forschungsfrage geprüft werden, inwiefern sich die Sachstrukturen zwischen Physikschulbüchern und Schulbüchern für das integrierte Fach unterscheiden. Aufgrund der oben beschriebenen Diskussion um den INU besteht zum einen die Hypothese, dass grundsätzlich eine stärkere Vernetzung der physikalischen Konzepte im Physikschulbuch stattfindet und zum zweiten, dass sich die beiden Schulbucharten hinsichtlich ihrer zentralen Konzepte unterscheiden.

3. Methoden

3.1 Stichprobe

In diesem Beitrag soll exemplarisch die Analyse zweier aktueller Schulbuchreihen vorgenommen werden. Für den integrierten Unterricht Naturwissenschaften in der integrierten Gesamtschule wurde die Reihe *PRISMA Naturwissenschaften* (Bergau et al., 2013a; Bergau et al., 2013b; Bergau et al., 2014) aus dem Klett-Verlag und für das Fach Physik am Gymnasium *Universum Physik* (Bengelsdorff et al., 2015; Carmesin et al., 2015a; Carmesin et al., 2015b) von Cornelsen gewählt. Es handelt sich dabei um zwei in Niedersachsen zugelassene und nach Einschätzung der Autoren weit verbreitete Schulbücher, welche für die gesamte Sekundarstufe I als Begleitband fungieren. In die Analyse gingen 500 Seiten aus *Universum Physik* und 1176 Seiten aus *PRISMA Naturwissenschaften* ein. Dabei werden im zweiten Schulbuch neben der Physik auch Inhalte aus Biologie und Chemie behandelt.

3.2 Automatisierte Erstellung von Concept-Maps

Zur Visualisierung und Analyse der Sachstrukturen werden Concept Maps nach Novak und Cañas (2008) in nicht-hierarchischer Form verwendet. Diese Form der Darstellung ermöglicht einen Ver-

gleich der beiden Schulbucharten über grafentheoretische Parameter.

Zur Generierung des Textkorpus werden die Schulbücher mittels eines Dokumentenscanners eingescannt. Anschließend wird über eine OCR-Texterkennung der Text extrahiert.

Die Erstellung der Concept Maps aus dem Text der Schulbücher erfolgt anschließend über ein R-Skript, welches sich am Kodiermanual von Härtig (2010) orientiert. Nach Härtig (2010) wird jeder Satz einzeln analysiert und alle vorkommenden Fachbegriffe werden als Knoten eingezeichnet, sowie mit einer Kante untereinander verbunden. Als Fachbegriff zählen dabei solche Begriffe, die in einem physikalischen Kontext eindeutig definiert sind und sich nach Schurz (2006) einer der Kategorien logisch, empirisch oder theoretisch zuordnen lassen. Die Fachbegriffe zweier aneinander stehender Sätze werden genau dann miteinander in Verbindung gesetzt, wenn ein einleitendes Satzglied des folgenden Satzes („Dazu“, „Hiermit“, ...) durch den entsprechenden Fachbegriff des ersten Satzes eindeutig ersetzt werden kann. Auf eine Identifikation verbindender Satzglieder wurde in der Automatisierung verzichtet, sodass grundsätzlich alle Fachbegriffe eines Satzes mit denen des Folgesatzes verbunden werden. Zur Kodierung wurde in der Studie von Härtig (2010) ein Register an Fachbegriffen aufgestellt, welches während des Kodierens stetig erweitert wurde und schließlich 1891 physikalische Fachbegriffe umfasste. Dieses Register wurde dieser Studie zur Verfügung gestelltⁱⁱ. Damit die Fachbegriffe in ihrer deklinierten Form im Text gefunden werden können, müssen die Begriffe des Registers, sowie die Wörter der Schulbuchtexte mit Hilfe eines Stemming-Algorithmus (Bouchet-Valat, 2015) auf ihren Wortstamm reduziert werden. Erst nach diesem Schritt können die Fachbegriffe in ihrer Wortstammform aus dem Text mit ihrer entsprechenden Satznummer extrahiert werden.ⁱⁱⁱ

3.3 Grafentheoretische Parameter

In der Grafentheorie gibt es verschiedene Zentralitätsmaße, die auf die entstehenden Begriffsnetze angewandt werden können. Allerdings sind diese in Bezug auf eine inhaltliche Bedeutung nur unzureichend theoretisch fundiert (Mutschke, 2010), sodass der Fokus auf eine direkter abzuleitende Größe gelegt werden soll, die im Folgenden als effektiver Grad bezeichnet wird. Der effektive Grad eines Konzepts berechnet sich aus der Summe der Kantengewichte aller angrenzenden Kanten an das Konzept. Somit steigt der effektive Grad beispielsweise um 1, wenn das betrachtete Konzept mit einem anderen zusammen in zwei angrenzenden Sätzen auftritt, bzw. um 2, wenn dieses Konzept mit zwei anderen Konzepten auftritt, usw. Abbildung 1 zeigt das Begriffsnetz zum Text: „Alle Körper zeigen Trägheit. Ohne äußere Einwirkung verharren sie infolge der Trägheit im Zustand der Ruhe oder der gleichförmig geradlinigen Bewegung (Trägheits-

satz). Körper zeigen eine größere Trägheit, wenn ihre Masse größer ist“ (Auszug aus *Impulse Physik*: Bredthauer, Bruns, Grote & Köhnke, 2009, S. 100).

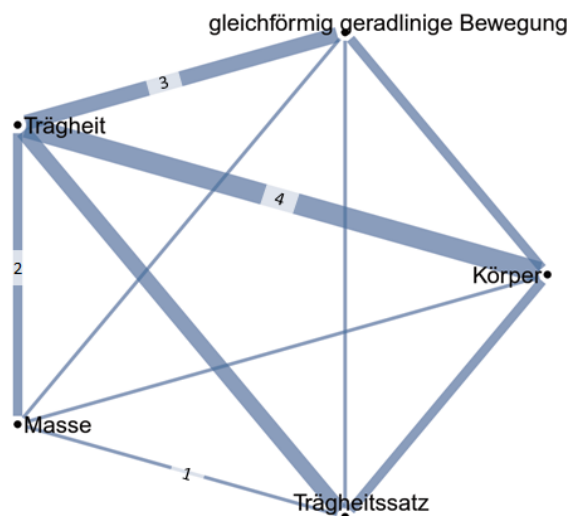


Abb. 1: Begriffsnetz zum Textausschnitt zur Trägheit

Das Konzept „Trägheit“ hat den höchsten effektiven Grad mit $d_{\text{eff}} = 12$. In Bezug auf die Forschungshypothesen wird also vermutet, dass sich sowohl die Konzepte mit den höchsten effektiven Graden zwischen Physik- und INU-Schulbüchern unterscheiden, als auch die Konzepte im Physikschulbuch grundsätzlich einen höheren effektiven Grad aufweisen.

4. Ergebnisse

Bei Anwendung des R-Skripts auf Physikschulbücher ergeben sich umfangreiche Concept Maps. Innerhalb dieser lassen sich die in dem jeweiligen Werk behandelten Themengebiete wie Magnetismus, Elektrizitätslehre oder Mechanik sinngemäß als zum Teil abgegrenzte Begriffscluster wiederfinden. Die zentralen Begriffe sind gekennzeichnet durch besonders viele und stark gewichtige Relationen mit anderen Konzepten.

Es lassen sich nun für die beiden oben genannten Schulbuchreihen die Begriffsnetze extrahieren und

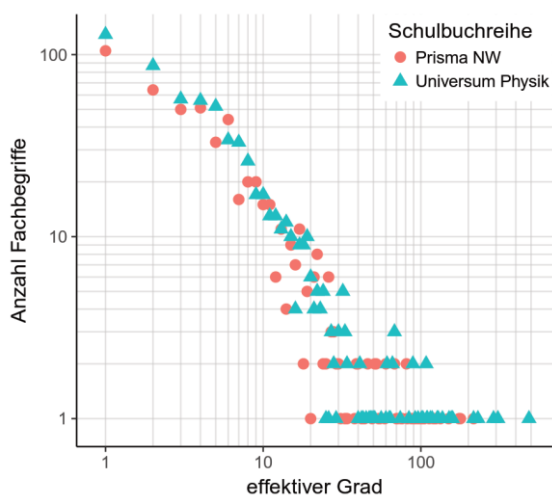


Abb. 2: Häufigkeitsverteilung effektiver Grad

die effektiven Grade der in ihnen enthaltenen Konzepte berechnen. In Abbildung 2 sind die Häufigkeitsverteilungen in doppelt logarithmischer Auftragung dargestellt. Ein Wilcoxon-Test ($p = 0,65$) zeigt, dass sich die beiden Verteilungen nicht signifikant unterscheiden.

Beim direkten Vergleich der zentralen Konzepte wird deutlich, dass diese im Physikschulbuch wesentlich stärker vernetzt sind bzw. höhere effektive Grade aufweisen (Tabelle 1). So ist der Energie-Begriff in *Universum Physik* der am

Rang	<i>Universum Physik</i>	<i>PRISMA Naturwissenschaften</i>
1	Energie (486)	Atom (217)
2	Körper (308)	Energie (178)
3	Kraft (289)	Elektron (175)
4	Temperatur (230)	Körper (150)
5	Spannung (216)	Spannung (133)

Tab. 1: Fachbegriffe mit höchstem effektiven Grad (d_{eff})

stärksten vernetzte Begriff, während er in *PRISMA Naturwissenschaften* zwar an zweiter Stelle steht, aber deutliche Unterschiede in der absoluten Zahl an Vernetzungen aufweist. Genauso ist der in der Physik besonders präzise Kraft-Begriff im Physikschulbuch stark vernetzt, wohingegen dieser im INU-Schulbuch eine geringere Bedeutung zu haben scheint (7. Rang, $d_{\text{eff}} = 114$).

Die genauere Betrachtung der Vernetzung des Energie-Begriffs führt zu dem in Abbildung 3 dargestellten Histogramm. Die Binbreite ist logarithmisch gewählt und die rechte Begrenzung stellt die abgeschlossene Intervallgrenze dar. Es ist zu erkennen, dass sowohl im Physik- als auch im INU-Schulbuch die meisten Begriffe genau einmal mit dem Energie-Begriff in Verbindung stehen. Im Bereich der starken Vernetzung fällt auf, dass in *Universum Physik* insgesamt 30 Begriffe öfter als 25 mal mit „Energie“ verknüpft sind, während dies für

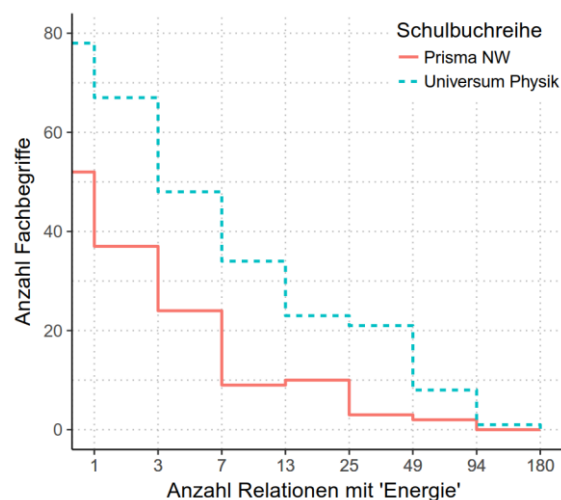


Abb. 3: Histogramm zur Vernetzungsstärke mit dem Energie-Begriff

- Bergau, M., Boldt, J., Hänsel, M., Hell, K., Hoffmann, L., Kalusche, D., . . . Willmer-Klumpp, C. (2013b). *Prisma Naturwissenschaften 1* (1. Auflage, Differenzierende Ausgabe mit CD-ROM, Ausg. A). Stuttgart: Klett.
- Bergau, M., Geissler, G., Hell, K., Jung, U., Maiworm, M., Nelke, S., . . . Tebeck, S. (2014). *Prisma Naturwissenschaften 3* (1. Aufl., Differenzierende Ausgabe mit CD-ROM, Ausg. A). Stuttgart, Leipzig: Klett.
- Bierema, A. M.-K., Schwartz, R. S., & Gill, S. A. (2017). To what extent does current scientific research and textbook content align? A methodology and case study. *Journal of Research in Science Teaching*, 54(8), 1097–1118.
- Bouchet-Valat, M. (2015). *Package 'SnowballC'*.
- Bredthauer, W., Bruns, K. G., Grote, M., & Köhncke, H. (2009). *Impulse Physik 9/10* (Niedersachsen, G8, Neubearb., 1. Aufl.). Stuttgart: Klett.
- Brückmann, M. (2009). *Sachstrukturen im Physikunterricht: Ergebnisse einer Videostudie*. Berlin: Logos.
- Carmesin, H.-O., Kahle, J., Konrad, U., Pröhl, I. K., Trumme, T., Bogenberger, B., . . . Wienbruch, U. (2015a). *Universum Physik 9/10* (Niedersachsen G9, 1. Auflage, 3. Druck). Berlin: Cornelsen.
- Carmesin, H.-O., Kahle, J., Konrad, U., Trumme, T., Witte, L., Bogenberger, B., . . . Wienbruch, U. (2015b). *Universum Physik 7/8* (Niedersachsen G9, 1. Auflage, 3. Druck). Berlin: Cornelsen.
- DPG (Ed.). (2016). *Physik in der Schule: Hauptteil mit Anlage Basiskonzepte. Studien der Deutschen Physikalischen Gesellschaft e.V.* Bad Honnef: Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.
- Härtig, H. (2010). *Sachstrukturen von Physikschulbüchern als Grundlage zur Bestimmung der Inhaltsvalidität eines Tests*. Berlin: Logos.
- Härtig, H., Kauertz, A., & Fischer, H. E. (2012). Das Schulbuch im Physikunterricht: Nutzung von Schulbüchern zur Unterrichtsvorbereitung in Physik. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 65(4), 197–200.
- Helaakoski, J., & Viiri, J. (2014). Content and content structure of physics lessons and students' learning gains. In: HE Fischer, P. Labudde, K. Neumann, & J. Viiri,(Eds.) *Quality of instruction in physics. Comparing Finland, Germany and Switzerland*. Waxmann, Münster, 93–110.
- Labudde, P. (2014). Fächerübergreifender naturwissenschaftlicher Unterricht - Mythen, Definitionen, Fakten. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 20(1), 11–19.
- Liepert, S. (2017). *Zusammenhang zwischen dem Professionswissen von Physiklehrkräften, dem sachstrukturellen Angebot des Unterrichts und der Schülerleistung*, Berlin: Logos.
- Merzyn, G. (1994). *Physikschulbücher, Physiklehrer und Physikunterricht: Beiträge auf der Grundlage einer Befragung westdeutscher Physiklehrer*. IPN: Vol. 139. Kiel: IPN.
- Merzyn, G. (2013). Fachsystematischer Unterricht: Eine umstrittene Konzeption. In: *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 66(5), 265–269.
- Müller, C. T., & Duit, R. (2004). Die unterrichtliche Sachstruktur als Indikator für Lernerfolg - Analyse von Sachstrukturdiagrammen und ihr Bezug zu Leistungsergebnissen im Physikunterricht. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 10, 147–161.
- Mutschke, P. (2010). Zentralitäts- und Prestigemaße. In C. Stegbauer & R. Häußling (Eds.), *Netzwerkforschung: Vol. 4. Handbuch Netzwerkforschung* (pp. 365–378). Wiesbaden: VS Verl. für Sozialwissenschaften.
- Niedersächsisches Kultusministerium (Ed.). (2016). *Die niedersächsischen allgemein bildenden Schulen in Zahlen: Stand: Schuljahr 2015/2016*. Hannover: Niedersachsen.
- Novak, J. D., Cañas, A. J. (2008). The theory underlying concept maps and how to construct and use them.
- Oelkers, J., & Reusser, K. (2008). *Qualität entwickeln, Standards sichern, mit Differenz umgehen. Bildung - Ideen zünden! Vol. 27*. Bonn: BMBF.
- Schurz, G. (2006). *Einführung in die Wissenschaftstheorie*. Darmstadt: Wiss. Buchges.
- Silge, J., & Robinson, D. (2016). tidytext: Text Mining and Analysis Using Tidy Data Principles in R. *The Journal of Open Source Software*, 1(3), 37.

ⁱ Im Schuljahr 2015/2016 betrug der Anteil der Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe I an der integrierten Gesamtschule in Niedersachsen etwa 14 % gegenüber 33 % auf einem Gymnasium (Niedersächsisches Kultusministerium, 2016).

ⁱⁱ Wir bedanken uns bei Herrn Härtig zur Bereitstellung des Registers. Das originale Register wurde leicht verändert: Die Wörter, die nach der Wortstammreduktion nicht mehr eindeutig den Fachbegriffen zuzuordnen waren, wurden entfernt.

ⁱⁱⁱ Zur Erkennung von Sätzen und weiteren Text-Mining Aufgaben wurde das R-Paket Tidytextmining (Silge & Robinson, 2016) verwendet.

Konzepte Studierender zur Unsicherheit von Messdaten

Philipp Möhrke*, Barbara Pampel⁺, Bernd-Uwe Runge*

*Universität Konstanz, FB Physik, 78457 Konstanz,

⁺ Universität Konstanz, FB Informatik und Informationswissenschaft, 78457 Konstanz

philipp.moehrke@uni-konstanz.de, barbara.pampel@uni-konstanz.de, bernd-uwe.runge@uni-konstanz.de

Kurzfassung

Der Umgang mit Messunsicherheiten ist in den experimentellen Naturwissenschaften von zentraler Bedeutung, da erst sie ein Ergebnis bewert- und vergleichbar machen. Der Umgang mit Messdaten und ihren Unsicherheiten ist daher zentraler Gegenstand der Ausbildung in den physikalischen Praktika. Nichtsdestotrotz zeigen Studien gravierende Fehlvorstellungen in diesem Bereich, die auch auf voruniversitäre Präkonzepte der Studierenden zurückgehen. Selbst bei der Auswertung von Dissertationen im Fach Physik können einige dieser Fehlvorstellungen noch gefunden werden. Um das Lernen der Studierenden genauer beobachten und Fehlkonzepte diagnostizieren zu können, wurden im Laufe des ersten Studiensemesters die mentalen Modelle Studierender mittels Concept-Maps abgebildet. Der Vergleich ihrer inhaltlichen Struktur mit Concept-Maps von Experten, unter anderem auf der Basis verschiedener graphentheoretischer Maße, ermöglicht die Bewertung der inhaltlichen Güte dieser Concept-Maps. So konnten im Längsschnitt Lernfortschritte, aber auch persistente Fehlkonzepte diagnostiziert werden.

1. Einleitung

Jede Messung ist mit Störungen, kleinen Abweichungen oder Unregelmäßigkeiten behaftet, so dass man bei wiederholter Messung eine ganze Sammlung unterschiedlicher Ergebnisse erhält. Die Angabe von Messergebnissen oder Referenzwerten als reiner Zahlenwert ohne eine Unsicherheit, also ohne ein zugeordnetes Intervall, in dem die Messergebnisse mit einer vereinbarten Wahrscheinlichkeit liegen, wird dem Messvorgang nicht gerecht. Auch ist ein Vergleich zweier Ergebnisse schlicht nicht möglich. Denn selbst eine kleine Differenz zwischen zwei Messwerten kann bei entsprechend kleinen Messunsicherheiten immer noch signifikant sein. Bei größeren Unsicherheiten würde das Urteil hingegen anders ausfallen.

Wie Unsicherheiten von Messdaten angegeben, miteinander verrechnet und Messergebnisse angegeben werden, wird seit 1995 eindeutig durch einen Leitfaden der ISO, den *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, kurz GUM, geregelt. Dieser ist in leicht geänderter Form von 2008 noch immer gültig (JCGM, 2008). Der Umgang mit Messdaten sollte also schon lange keine Frage der Fachkultur oder gar persönlichen Vorliebe sein, sondern ist auf internationalem Niveau eindeutig vereinbart. Sobald Messdaten erhoben und betrachtet werden, ist es also zwingend erforderlich die Unsicherheit der erhobenen Daten zu thematisieren.

Dies trifft bereits in der Schule zu, aber spätestens im Physikstudium muss der fachgerechte Umgang mit Messdaten und deren Unsicherheiten ein zentrales Element darstellen. Einige Autoren fordern eine

strukturierte Behandlung dieses wichtigen Themas bereits im Physikunterricht der Sekundarstufe I und II, da hier bereits in diversen Experimenten Daten erhoben und bewertet werden (Hellwig, 2012). Auch finden sich Vorschläge, wie dieses Thema bereits in der Grundschule behandelt werden kann (Munier, 2012). Doch spätestens bei Physik-Studierenden ist die Relevanz dieses Themas unbestreitbar und ist expliziter Bestandteil der Laborpraktika an Universitäten.

Auch nach einer eingehenden Beschäftigung mit diesem Thema zeigen Studierende inadäquate Konzepte im Bezug auf den Umgang mit Messdaten (Séré, Journeaux und Larcher, 1993, Allie, 1998). Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass Studierende abhängig von der Situation unterschiedlichen handlungsleitenden Kognitionen folgen (Heinicke, 2012). So kommt der Diagnose des konzeptuellen Verständnisses zum Thema Messunsicherheiten ein großer Stellenwert zu, um das Lernen auf diesem Gebiet weiter zu erkunden.

2. Hintergründe

Der Lerntheorie Ausubels folgend bedeutet Lernen den Aufbau eines Netzwerkes aus Wissen über einzelne Konstrukte oder Konzepte sowie die Art ihrer Verknüpfung miteinander. „Meaningful learning“ zeichnet sich nach seiner Theorie durch einen Ausbau des Netzwerkes durch das Hinzufügen neuer Konzepte sowie einer guten Anbindung dieser neuen Konzepte an die bereits bestehende Struktur aus (Ausubel, 1963).

Novak und seine Mitarbeiter entwickelten ausgehend von dieser Theorie die Methode des Concept-Mappings, dass eine Externalisierung der Wissensstruktur in einen Graphen darstellt. In diesem Graphen werden die Konzepte des Netzwerkes als Knoten, die Verbindungen oder Proportionen als Kanten zwischen diesen dargestellt. Die sogenannten Concept-Maps erwiesen sich in einer Studie von Novak u. Cañas (2006) als robustes und reliables Werkzeug, um auch über verschiedene Interviewer hinweg konsistente Abbildungen des Wissensstands von Probanden zu erhalten. Dieser anfängliche Einsatz (von Forschern erstellte Concept-Maps) ist inzwischen aber gegenüber der vielfältigen Verwendung als Diagnose- und Bewertungsinstrument (von Lernenden erstellte Concept-Maps, die vom Lehrenden ausgewertet werden) in den Hintergrund getreten (Fischler u. Peuckert, 2000).

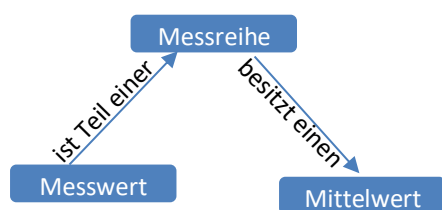


Abbildung 1: Beispiel einer Concept-Map

Zu diagnostischen Zwecken finden sich in der Literatur verschiedenen Methoden, die Concept-Maps Lernender zu bewerten. Eine Übersicht möglicher Bewertungsmethoden, die von einer holistischen Betrachtung über das Zählen vereinbarter essenzieller Verbindungen bis zum Vergleich mit der Map eines Experten gehen, finden sich im Buch von Fischler und Peuckert (2000) und sollen hier nicht weiter dargestellt werden.

Concept-Maps bieten also abseits von praxisnahen oder auch praxisfernen Aufgaben, die eine Anwendung der vorhandenen Wissensstrukturen durch die Probanden erfordern, die Möglichkeit, die Wissensstruktur zu einem Thema selbst zu erheben. Auch hier kann natürlich nicht ausgeschlossen werden, dass die

externalisierte Wissensstruktur abhängig von der konkreten Fragestellung beeinflusst wird oder sich erst durch die Bearbeitung der Aufgabe ausbildet (vgl. auch Schecker und Klieme, 2000). Diese Methode bildet aber neben den klassischen Zugängen über schriftliche Tests oder die Beobachtung der Probanden bei Experimentieraufgaben einen weiteren Zugang, die das durch die anderen Methoden gewonnene Bild vervollständigen kann.

3. Erhebung

Für die hier vorgestellte Fallstudie wurden von 45 Studierenden (B.Sc. und B.Ed. Physik) zum Ende einer achtwöchigen Einführung in das Arbeiten mit Messdaten und den Umgang mit Messunsicherheiten im ersten Studiensemester Concept-Maps zu eben diesem Thema erstellt. Zur Erstellung wurde das webbasierte Tool YEd-Live (yWorks GmbH, 2017) verwendet, über welches allen Probanden eine vorgegebene Liste von 12 Begriffen vorgegeben wurde, die zur Beantwortung einer Fokusfrage („Ist das Ergebnis des Experiments mit dem Literaturwert vereinbar?“) über Kanten miteinander verbunden werden sollten. Die eingefügten Kanten mussten darüber hinaus unter Verwendung von Verben beschriftet werden. Dabei soll die Einheit von Konzept A (z. B. „Einzelmessung“), Konzept B (z. B. „Messreihe“) und Kantenbeschriftung (z. B. „ist Teil einer“) eine Aussage ergeben (hier: „Einzelmessung ist Teil einer Messreihe“). Die verwendeten Begriffe der Knoten wurden alle in der Einführungsvorlesung eingeführt, in flankierenden Aufgaben vertieft und im Praktikum des ersten Semesters verwendet.

Des Weiteren wurde von den Praktikumsleitern und ausgewählten Lehrenden der Universität Konstanz eine gemeinsame Experten-Map auf Basis der Begriffe gebildet.

4. Auswertung

Zur Bewertung der Maps wurde in einem ersten Schritt eine Reihe von sieben essenziellen Relationen definiert, deren Vorkommen in den einzelnen Maps gezählt wurde. Eine Bewertung und ggf. Bereinigung

Essenzielle Relation	Anteil, gesamt		Anteil, oberes Quartil	
Einzelmessung - Messreihe	33	73%	11	100%
Messreihe - Mittelwert	29	64%	10	91%
Mittelwert - Messergebnis	26	58%	10	91%
Messunsicherheit - Messergebnis	17	38%	7	64%
Messreihe - Standardabweichung des Mittelwerts	12	27%	3	27%
Standardabw. des Mittelwerts - Messunsicherheit	12	27%	7	64%
Messreihe - Standardabweichung der Stichprobe	9	20%	7	64%

Tabelle 1: Häufigkeit der essentiellen Relationen in der Gesamtstichprobe und dem oberen Quartil (Gesamtzahl der essentiellen Relationen) der Concept-Maps

der Maps um fachlich falsch beschriftete Kanten wurde bei den hier gezeigten Daten nicht vorgenommen. Die ausgewerteten Maps spiegeln also die unkorrigierten Konzepte der Probanden dar. Die Ergebnisse dieser Zählungen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Klar erkennbar ist eine Hierarchie in der Häufigkeit der essenziellen Relationen. So findet sich in der Gesamtstichprobe der Maps (nach Gesamtzahl der auftretenden essenziellen Relationen) zum Beispiel die Verbindung zwischen den Begriffen „Einzelmessung“ und „Messreihe“ mehr als dreimal so häufig wie die Verbindung zwischen „Messreihe“ und „Standardabweichung der Stichprobe“.

Betrachtet man das obere Quartil der Maps, so findet man eine fast identische Reihung. Allerdings, wie nicht anders zu erwarten, bei wesentlich höheren relativen Häufigkeiten der einzelnen Verknüpfungen. Lediglich die Verbindung zwischen „Messreihe“ und

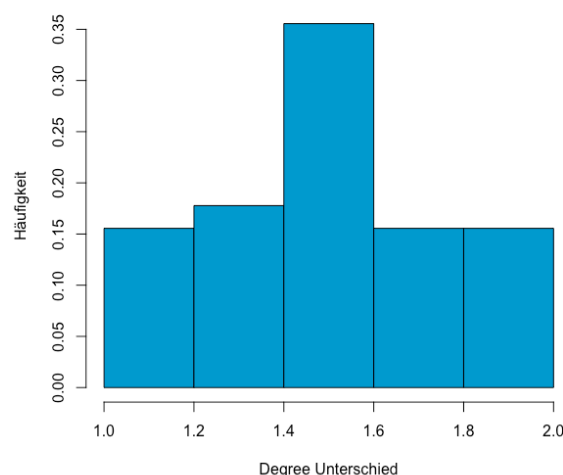


Abbildung 2: Verteilung der Summe der Degree-Unterschiede der Concept-Maps zur Experten-Map

„Standardabweichung des Mittelwertes stünde jetzt auf dem letzten Platz. Die häufigsten drei Konzepte sind bei nahezu allen Maps enthalten. Diese Reihung kann so als eine Reihung der Komplexität des hinter der Verbindung stehenden Konzeptes gewertet werden.

Graphentheoretische Zentralitätsmaße lassen neben der Betrachtung der einzelnen Konzepte eine Gesamtbewertung der Concept-Maps über einen Vergleich mit der Experten-Map zu. Da die genauen Strukturen von Maps unterschiedlicher Experten teilweise stark differieren, wird auf einen Vergleich der Zentralitäten der einzelnen Konzepte zur Experten-Map zurückgegriffen. Dafür wird der Knotengrad aller Knoten bestimmt und anschließend die Summe der Absolutdifferenzen zwischen Experten-Map und Studierenden-Maps für eine Bewertung gebildet. Die Verteilung der so gewonnenen Bewertung ist in Abbildung 2 zu erkennen. Die Verteilung ist klar unimodal allerdings nicht normalverteilt ($p=0.03$ Shapiro-Wilk).

Diese Art der Bewertung zeigt eine starke Korrelation ($r = .62$ nach Spearman) mit einer kriteriengestützten holistischen Bewertung durch Experten.

5. Fazit

Die Auswertung von Concept-Maps bietet eine weitere Möglichkeit, das konzeptuelle Verständnis Lernender zu erheben. Über die Betrachtung der Verbindungen in den Maps kann so zum Beispiel eine Reihung im Lernen der dahinterliegenden Konzepte ermittelt werden. Der Vergleich von Experten- und Probanden-Maps über den Vergleich der Zentralitäten der einzelnen Konzepte bietet darüber hinaus eine Möglichkeit der automatisierten Bewertung von Maps, die einer holistischen Bewertung durch einen Experten vergleichbar ist.

6. Literatur

- Allie, S.; Buffler, A.; Campbell, B.; Lubben, F.: First-year physics students' perceptions of the quality of experimental measurements. In: *International Journal of Science Education* Bd. 20 (1998), Nr. 4, S. 447
- Ausubel, D. G.: Cognitive Structure and the Facilitation of Meaningful Verbal Learning. In: *Journal of teacher education* 14 (1963), Nr. 2, S. 217
- Fischler, H. (Hrsg.); Peuckert, J. (Hrsg.): *Concept mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie*. Logos Verlag Berlin, 2000
- Heinicke, S.: *Aus Fehlern wird man klug*. Berlin : Logos Verlag, 2012
- Hellwig, Julia: *Messunsicherheiten verstehen*, Ruhr-Universität Bochum, 2012
- JCGM: 100:2008 - Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) / Joint Committee for Guides in Metrology. 2008.
- Munier, V.; Merle, H.; Brehelin, D.: Teaching Scientific Measurement and Uncertainty in Elementary School. In: *International Journal of Science Education* 35 (2012), Nr. 16, S. 2752
- Schecker, H.; Klieme, E.: Erfassung physikalischer Kompetenz durch Concept-Mapping-Verfahren. In: Fischler, H. (Hrsg.); Peuckert, J. (Hrsg.): *Concept mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie*. Logos Verlag Berlin, 2000, S. 23
- Seefeldler, R.: Konzepte zur Unsicherheit im *physikalischen Messprozess bei Physikstudierenden - Eine Untersuchung mit Concept-Maps*, wissenschaftliche Arbeit (2017)
- Séré, M.-G.; Journeaux, R.; Larcher, C.: Learning the statistical analysis of measurement errors. In: *International Journal of Science Education* 15 (1993), Nr. 4, S. 427
- yWorks, 2018 <https://www.yworks.com/yed-live/>

Weiterentwicklung eines Testinstruments zum einfachen Stromkreis

Louisa Morris*, Lana Ivanjek*, Jan-Philipp Burde^x, Liza Dopatka^o, Claudia Haagen-Schützenhöfer⁺, Thomas Schubatzky⁺, Verena Spatz^o, Thomas Wilhelm^x, Martin Hopf*

* Universität Wien, Didaktik der Physik, Porzellangasse 4, 1090 Wien

^x Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt,

^o Institut für Physik, Physikdidaktik, Technische Universität Darmstadt, Hochschulstraße 12, 64289 Darmstadt,

⁺Institut für Physik, Physikdidaktik, Karl-Franzens-Universität Graz, Universitätsplatz 5, 8010 Graz

lana.ivanjek@univie.ac.at, burde@physik.uni-frankfurt.de, Liza.Dopatka@physik.tu-darmstadt.de, claudia.haagen@uni-graz.at, thomas.schubatzky@uni-graz.at, Verena.Spatz@physik.tu-darmstadt.de, wilhelm@physik.uni-frankfurt.de, martin.hopf@univie.ac.at

Kurzfassung

Nach dem Unterricht haben viele Schüler/innen Schwierigkeiten mit dem Verständnis der Elektrizitätslehre. Auch wenn es einige Testinstrumente zu diesem Thema gibt, wird in diesen die Spannung wenig behandelt. Daher wurde der Test von Urban-Woldron und Hopf (2012) um Items zur Spannung ergänzt sowie insgesamt optimiert. Mithilfe eines Leitfadenskatalogs wurden neun Schüler/innen aus Wien im Alter von 14 bis 15 Jahren zu einfachen Stromkreisen mit dem Schwerpunkt Spannung befragt. Aus den Antworten der Schüler/innen kristallisierten sich verschiedene Vorstellungen heraus, die zusammengefasst wurden und als Basis für die Entwicklung von zweistufigen Testitems dienten. Die erste Stufe bezieht sich auf die Konzepte der Schüler/innen und die zweite Stufe fragt nach den Erklärungen. Der daraus entstandene Multiple-Choice Test wurde mehreren Klassen in Österreich und Deutschland vorgelegt und ausgewertet. Die Ergebnisse wurden einer Rasch-Analyse unterzogen, um lineare Werte der Item-Schwierigkeiten zu erhalten. Das neu entwickelte Testinstrument wird aktuell für die Überprüfung der Wirksamkeit mehrerer Unterrichtskonzepte zur Elektrizitätslehre verwendet.

1. Einleitung

Die Elektrizitätslehre, vor allem der Begriff der Spannung, stellt eine große Herausforderung für viele Schüler/innen dar. Gleichzeitig ist der einfache Stromkreis ein üblicher Teil des Curriculums in der Sekundarstufe I. Zahlreiche fachdidaktische Forschungen zeigen, dass Schüler/innen und Studierende viele Schwierigkeiten beim Verständnis der Elektrizitätslehre haben. So zeigten z.B. McDermott und Shaffer (1992), dass nur 15% der Studierenden der Einführungsvorlesungen die Helligkeiten von Glühlampen in einfachen Stromkreisen vorhersagen können.

Basierend auf früherer Forschung (McDermott & Shaffer, 1992; Rhöneck, 2011; Urban-Woldron & Hopf, 2012) können wir die Schülervorstellungen zum einfachen Stromkreis folgendermaßen zusammenfassen: Stromverbrauchsvorstellung, fehlende Differenzierung von Spannung und Strom, Batterie als konstante Stromquelle, lokales Denken und sequentielle Argumentation, Schwierigkeiten mit dem Widerstandsbegriff, Probleme mit der topologischen Struktur, Abhängigkeit der Stromstärke von der Entfernung zur Batterie und die Vorstellung, dass sich die Spannungen der Batterie unabhängig von der Schaltungsart summieren.

Das Ziel dieser Studie ist es daher, mithilfe von Interviews mit Schüler/innen neue Items für einen Two-Tier-Test zum einfachen Stromkreis und insbesondere zur Spannung zu entwickeln. Two-Tier-Tests bestehen aus zweistufigen Testitems. Sie haben alle Vorteile eines Multiple-Choice Tests, aber sie geben zusätzlich auch Einblicke in die Denkwege der Schüler/innen. Sie sind einfach zum Auswerten und ermöglichen so den Lehrenden einen schnellen Einblick in die Schwierigkeiten der Lernenden.

Bereits bekannte und erprobte Testinstrumente zum einfachen Stromkreis (Binder, 2011; Engelhardt & Beichner, 2004; Halloun, 2007; Urban-Woldron & Hopf, 2012) wurden bei der Erstellung eines Leitfadenskatalogs für die Interviewphase berücksichtigt und benutzt. Von besonderer Wichtigkeit sind dabei der DIRECT (Determining and Interpreting Resistive Electric Circuit Concepts Test), ein von Engelhardt und Beichner (2004) entwickeltes Testinstrument zu Gleichstromkreisen, und der Test von Urban-Woldron und Hopf (2012), der gängige Schülervorstellungen in der Elektrizitätslehre gut abbilden kann.

2. Theoretischer Hintergrund

Die meisten Lernenden besitzen bereits vor dem Physikunterricht ausgeprägte Vorstellungen und Denkweisen zu physikalischen Phänomenen. Diese mitgebrachten Vorstellungen stehen jedoch häufig im Widerspruch zu den tatsächlichen physikalischen Konzepten, was zu Lernschwierigkeiten führen kann (Duit, 2004). Neben Vorstellungen, die aus dem Alltag generiert werden, gibt es aber auch Behauptungen, die sozusagen in der jeweiligen Situation (zum Beispiel im Unterricht selbst) von Schüler/innen erfunden werden (Duit, 2011). Niedderer und Schecker bezeichnen diese Fälle als „deep structures“ und „current constructions“ (1992). „Current constructions“ werden als Aktionen, Aussagen und Erwartungen in der konkreten gegebenen Situation beschrieben, die meistens in der jeweiligen Situation entstehen, indem auf andere stabile, kognitive Elemente zurückgegriffen wird. Mit „deep structures“ werden hingegen die tiefsitzenden, stabilen Strukturen selbst bezeichnet. Auch „current constructions“ sind veränderlich. Sie können zu „deep structures“ werden. Dieser Fall tritt zum Beispiel ein, wenn sich ein Konzept in mehreren Situationen bewährt (Niedderer & Schecker, 1992). Im Hinblick auf die Interviews und erste Testergebnisse dieser Forschung, gehen wir eher von ‚current constructions‘ als von ‚deep structures‘ aus. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Schüler/innen aus der jeweiligen Situation heraus ad hoc Begründungen generierten.

3. Forschungsdesign

3.1. Interviews

In einer ersten Phase wurden neun halbstrukturierte Interviews mit Schülern/innen zum einfachen Stromkreis durchgeführt, mit besonderem Schwerpunkt auf der Spannung. Dafür wurde ein Leitfadenskatalog erstellt, der aus einer Einstiegsfrage und zwölf Hauptfragen (mit ein bis drei Unterfragen) zusammengesetzt ist.

Alle Interviews gliederten sich nach dem in Abbildung 1 dargestellten Schema. Den Schüler/innen wurde erklärt, dass ihre Antworten keinerlei Auswirkungen auf ihre Noten haben und vertraulich behandelt werden. Außerdem wurde ihnen mitgeteilt, dass die Lösungen für die Fragen erst am Ende des Interviews mitgeteilt werden könnten. Als nächstes wurden den Schüler/innen alle Schaltsymbole, die für das Interview notwendig waren, gezeigt, um sicherzustellen, dass sie allen bekannt waren. Das Interview wurde daraufhin mit der Einstiegsfrage eingeleitet, bei der eine Glühlampe mithilfe von einem Drahtstück und einer Batterie zum Leuchten gebracht werden musste. Im Anschluss daran wurden die Hauptfragen gestellt. Dabei wurden die Schüler/innen stets nach ihren Begründungen gefragt. Das Ende des Interviews wurde den Interviewpartnern/innen klar signalisiert.



Abb.1: Interviewschema

Für die Interviews wurden neun Schüler/innen im Alter von 14 bis 15 Jahren befragt (sechs weiblich und drei männlich). Sie besuchten jeweils eine von zwei Schulen, wobei die erste Schule (Schule 1) ein Realgymnasium und die zweite Schule (Schule 2) ein Bundesoberstufengymnasium ist. Je drei Schüler/innen besuchten dieselbe Klasse und wurden von demselben Physiklehrer in Elektrizitätslehre unterrichtet. Die Interviews dauerten zwischen 17 und 48 Minuten und wurden an vier Terminen im Herbst 2017 durchgeführt.

Die Interviews wurden transkribiert, analysiert, in kurze Aussagen zusammengefasst und kodiert, damit die Antworten aus den Interviews als Distraktoren für die neuen Testitems dienen können.

3.2. Zweistufiges Testinstrument

Um die Verständnisschwierigkeiten von Schüler/innen in einer großen Stichprobe erfassen zu können, wurde ein zweistufiges Testinstrument konzipiert. Die erste Stufe bezieht sich auf die Konzepte der Schüler/innen und die zweite Stufe fragt nach den Erklärungen. Die Begründungen auf der zweiten Stufe wurden aus den Ergebnissen der Interviews abgeleitet oder basieren auf schon bekannten Schülervorstellungen. Das so entwickelte neue Instrument besteht aus 32 zweistufigen Testitems, die in zwei Testhefte aufgeteilt und über zehn gemeinsame Items verankert wurden.

Item 2		Betrachte den Stromkreis.	
a)		Welche Spannung liegt zwischen den Punkten 1 und 2 an?	
A	<input type="checkbox"/>	Zwischen den Punkten 1 und 2 liegt keine Spannung an.	
B	<input type="checkbox"/>	Zwischen den Punkten 1 und 2 liegt eine Spannung von 6V an.	
C	<input type="checkbox"/>	Zwischen den Punkten 1 und 2 liegt eine Spannung zwischen 5,1 V und 5,9 V an.	
D	<input type="checkbox"/>	Zwischen den Punkten 1 und 2 liegt eine Spannung von 5 V an.	
b)		Warum? Wähle jene Aussage aus, die am besten zu deiner Begründung passt.	
A	<input type="checkbox"/>	Die Spannung nimmt mit zunehmendem Abstand zur Batterie ab.	
B	<input type="checkbox"/>	Der Innenwiderstand der Batterie ist nicht zu vernachlässigen.	
C	<input type="checkbox"/>	In einem offenen Stromkreis kann keine Spannung anliegen.	
D	<input type="checkbox"/>	Die Punkte 1 und 2 sind direkt mit den Polen der Batterie verbunden.	
E	<input type="checkbox"/>	In einem offenen Stromkreis ohne Widerstand kann keine Spannung anliegen.	

Abb.2: Beispiel eines Testitems

Ein Beispiel eines Testitems zur Spannung ist in Abbildung 2 dargestellt. Dieses Testitem illustriert gut, wie die Items im Test konstruiert wurden. Zu jeder Antwort der ersten Stufe passt mindestens eine Begründung auf der zweiten Stufe. Falls zum Beispiel

die Schüler/innen bei dieser Frage denken, dass zwischen den Punkten 1 und 2 keine Spannung anliegt, weil in einem offenen Stromkreis keine Spannung anliegen kann, können sie Kombination AC oder AE auswählen, je nachdem, ob sie denken, dass dabei auch ein Widerstand eine Rolle spielen könnte. Die Schülervorstellung, dass die Spannung mit zunehmendem Abstand von der Batterie abnimmt, zeigt sich in den Kombinationen CA und DA.

Die Daten wurden mithilfe des WINSTEPS-Programms (J. Michael Linacre, 1994; J. M. Linacre & Wright, 1993) einer Rasch Analyse unterzogen, um lineare Werte der Item-Schwierigkeiten zu erhalten. Bei der Analyse wurden beide Stufen (a & b) der Testitems zunächst als eine Frage betrachtet und nur als korrekt (1 Punkt) bewertet, wenn beide Stufen richtig beantwortet wurden. Wenn eine oder beide Stufen falsch waren, wurde die Antwort als nicht korrekt (0 Punkte) bewertet. Eine zweite Analyse wurde durchgeführt, bei der jede Stufe als separate Frage betrachtet wurde, um mehr Information über jede einzelne Teilfrage zu bekommen.

An der Austestung der neuen Testitems nahmen 228 Schüler/innen aus der achten bzw. neunten Schulstufe in Wien, Frankfurt und Graz teil. Alle Schüler/innen waren in der siebten bzw. achten Schulstufe bereits in Elektrizitätslehre unterrichtet worden.

4. Ergebnisse

4.1. Ergebnisse aus der Interviewstudie

Die Interviews zeigten, dass die befragten Schüler/innen deutliche Probleme mit dem Verständnis der Elektrizitätslehre auch noch nach dem Unterricht hatten. Es kristallisierten sich insbesondere fünf wiederkehrende Vorstellungen heraus. Diese sind: Spannung hängt von der Entfernung zur Batterie ab, Spannung wird verbraucht, fehlende Differenzierung von Spannung und Strom, Spannung ist gleichmäßig im Stromkreis verteilt und Verwechslung von Serien- und Parallelschaltung.

Vier von neun Schüler/innen sagten bei den Interviews, dass je weiter die Glühlampe von der Batterie entfernt ist, desto weniger Spannung liegt zwischen ihren Anschlüssen an. Folgende Interviewsequenz zeigt wie die Schüler/innen das begründen: „Ähm, also ich glaube am Lämpchen 1 ist mehr Spannung als am Lämpchen 2, weil da muss der Strom ja auch einen längeren Weg, sozusagen, zur Lampe gehen.“

Eine weitere wiederkehrende Vorstellung aus den Interviews ist die Idee, dass die Spannung durch die Glühlampen verbraucht wird. Deswegen sagten die Schüler/innen, dass die Spannung vor der Glühlampe größer ist als nachher.

Fehlende Differenzierung zwischen Spannung und Strom wurde schon in der Literatur dokumentiert (Duit & Rhöneck, 1998) und während der Interviews weiter bestätigt. Schüler/innen verwechselten die Begriffe Spannung und Strom und sie verwendeten Formulierungen wie „Spannung durchfließt“ und „die

Spannung wird weniger, weil der Strom einen längeren Weg hat“.

Zwei Schüler/innen gingen von der richtigen Vorstellung aus, dass die Batterie eine konstante Spannungsquelle ist, aber behaupteten dann weiter, dass die Spannung an allen Punkten im Stromkreis gleich groß sei und dass an allen Glühlampen die Spannung der Batterie anliege, unabhängig von der Schaltungsart.

Dazu zeigten die Interviewergebnisse, dass viele Schüler/innen kein richtiges Konzept von Serien- und Parallelschaltungen haben. Beide Schaltungsarten wurden während der Interviews verwechselt. Die befragten Schüler/innen nutzen drei falsche Kriterien, um zu entscheiden, ob es sich um eine Parallel- oder Serienschaltung handelt: „bei einer Serienschaltung müssen die Glühlampen gegenüber voneinander liegen“, „bei einer Serienschaltung müssen zwei Glühlampen entlang eines Drahtes direkt nebeneinander liegen“ und „bei Parallelschaltungen müssen sie direkt gegenüber voneinander liegen“.

4.2. Testergebnisse

In den Abbildungen 3a und 3b sind die Item-Person Maps für die Populationen abgebildet. Abbildung 3a zeigt die Verteilung der Stichprobe, wenn beide Stufen der Aufgaben zusammen als ein Item betrachtet werden. Abbildung 3b zeigt die gleiche Population, wenn jede Stufe der Aufgaben als separates Item betrachtet wurde. Die linke Seite der Abbildung zeigt die Verteilung der Schüler/innen nach Personenfähigkeit, wobei die fähigeren Schüler/innen sich im oberen Teil der Verteilung befinden und die weniger fähigen im unteren Teil. Auf der rechten Seite der Verteilung befinden sich die Testitems geordnet nach dem Schwierigkeitsgrad: schwierigere Items befinden sich ganz oben, ganz einfache unten. Man merkt sofort, dass der Test zu schwer für diese Population ist. Das kann mehrere Gründe haben: Neben den bekannten Schwierigkeiten der Schüler/innen mit der Elektrizitätslehre mussten wir auch eine niedrige Motivation während der Austestung wie auch viele Misfitting-Personen bei der Analyse feststellen. Noch dazu wurde der Test erst ein Jahr nach dem Elektrizitätslehreunterricht durchgeführt.

Die Item-Reliabilität für die gemeinsame Analyse der beiden Stufen liegt bei 0,95 und die Personen-Reliabilität liegt bei 0,60. Bei der getrennten Analyse der Stufen beträgt die Item-Reliabilität 0,96 und die Person-Reliabilität 0,66. Während die Item-Reliabilität in beiden Analysen angemessen ist, zeigt die niedrigere Person-Reliabilität, dass es notwendig wäre, den Test weiterzuentwickeln. Unsere Analyse zeigte auch einige Misfitting Items.

Das sind vor allem die Items im oberen Teil der Verteilung, die zu schwierig für diese Population waren. Es ist auch zu bemerken, dass es ein Loch an der Stelle der Itemverteilung gibt, wo weniger fähige Schüler/innen sind. Das bedeutet, dass noch einige einfachere Items im Test fehlen.

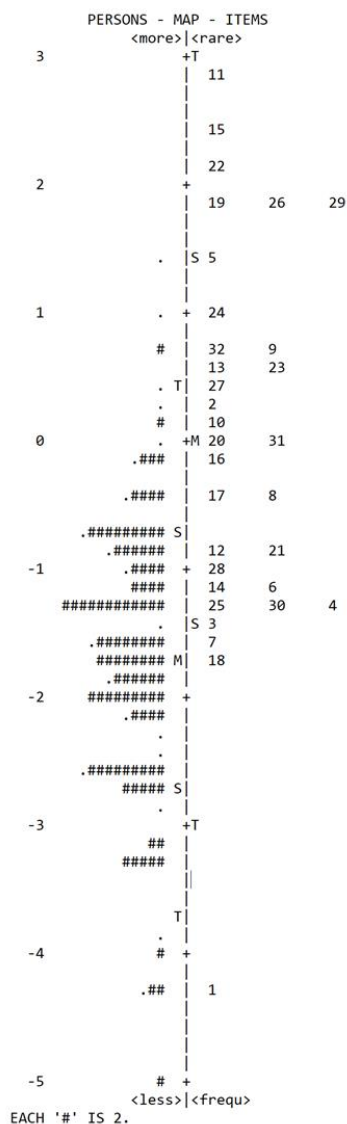


Abb.3a Item-Person Map aus der Raschanalyse bei gemeinsamer Auswertung

Bei der Verteilung der Fragen ist sichtbar, dass die Spannungitems für die Schüler/innen besonders schwierig waren, während die Fragen, die auf offene oder geschlossene Stromkreise abzielen, leichter waren und besser beantwortet wurden. Die Items, die abfragen, ob die Stromstärke bei Serienschaltungen konstant sind, zeigen eine mittlere Schwierigkeit.

Am Beispiel von Item 2 aus dem Test (Abbildung 2) kann man sehen, wie die Schüler/innen auf die Fragen antworteten. Dieses Item befindet sich in beiden Testheften und wurde von allen 228 Proband/innen beantwortet. Die Schüler/innen sollten hierbei angeben, welche Spannung zwischen den Punkten 1 und 2 anliegt. Die richtige Antwortkombination ‚BD‘, dass zwischen den Punkten 1 und 2 eine Spannung von 6 V anliegt, da die Punkte 1 und 2 direkt mit den Polen

der Batterie verbunden sind, wurde von rund 15 % der Schüler/innen gewählt.

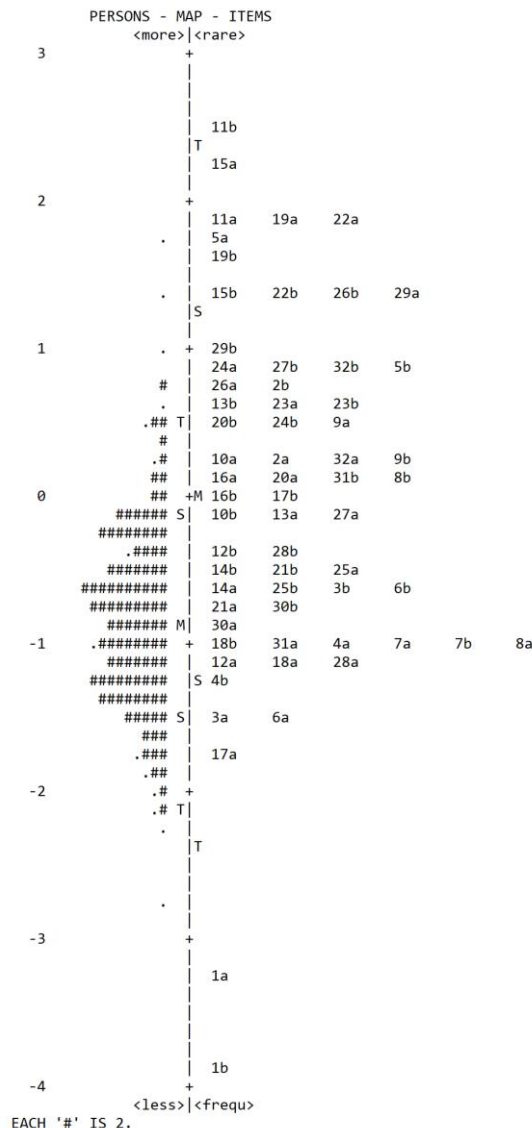


Abb.3b Item-Person Map aus der Raschanalyse bei getrennter Auswertung

Die häufigste falsche Antwortkombination war AC (zwischen den Punkten 1 und 2 kann keine Spannung anliegen, da der Stromkreis offen ist), die rund 53 % der Schüler/innen ankreuzten. Die zweithäufigste falsche Antwortkombination war AE (zwischen den Punkten 1 und 2 kann keine Spannung anliegen, da es sich um einen offenen Stromkreis ohne Widerstand handelt), die rund 11 % der Schüler/innen angaben. Diese beiden Antwortkombinationen deuten wieder auf eine Verwechslung zwischen Strom und Spannung hin. Außerdem wurden noch die Antwortkombinationen CA (3 %) und DA (< 1 %) von den Schüler/innen gewählt.

Rund 17 % der Proband/innen entschieden sich für unlogische Kombinationen, die einen Widerspruch in sich enthalten. Dafür könnte fehlende Motivation ein

Grund sein und solche Antworten tragen leider auch zu Misfits und niedrigeren Personen-Reliabilitäten bei.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Sowohl die Interviews als auch die Testergebnisse zeigen, dass Schüler/innen viele Schwierigkeiten mit der Elektrizitätslehre haben, besonders mit dem Begriff der Spannung. Es wurde bestätigt, dass die Schüler/innen nach dem Elektrizitätslehreunterricht kein Konzept der Spannung haben und Gelerntes nicht auf den einfachen Stromkreis anwenden können. Die Schwierigkeiten, die in den Interviews gefunden wurden, zeigten sich auch im Test.

Deswegen sind gut erforschte und erprobte Unterrichtskonzepte zu diesem Thema notwendig. Innerhalb der EPo-EKo Studie werden dafür zwei unterschiedliche Konzepte erprobt und evaluiert: das Frankfurter Elektronengasmodell (Burde & Wilhelm, 2016) und ein kontextorientiertes Unterrichtskonzept zur E-Lehre. Anhand von ersten Testergebnissen wird auch die erste Version des Tests überarbeitet. Dabei ist geplant, einige Fragen zu vereinfachen.

6. Literatur

- Binder, R. (2011). Weiterentwicklung zweistufiger Fragebögen als Test- und Kontrollinstrument zur Evaluierung von Schülervorstellungen zum elektrischen Widerstand (Diplomarbeit). Universität Wien.
- Burde, J.-P.; Wilhelm, T. (2016). Das Elektronengasmodell im Anfangsunterricht. *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 65, Nr. 8, S. 18 – 24
- Duit, R. (2004). Schülervorstellungen und Lernen von Physik. PIKO-BRIEF NR. 1. <http://www.ipn.uni-kiel.de/de/das-ipn/abteilungen/didaktik-der-physik/piko> (Stand Mai 2018)
- Duit, R. (2011). Alltagsvorstellungen berücksichtigen. In R. Müller, R. Wodzinski & M. Hopf (Hrsg.), *Schülervorstellungen in der Physik*. Köln: Aulis-Verl. Deubner.
- Duit, R., & Rhöneck, C. v. (1998). Learning and understanding key concepts of electricity. In A. Tiberghien (Hrsg.), *An I.C.P.E. Book. Connecting research in physics education with teacher education*. S.l.: International Commission on Physics Education.
- Engelhardt, P. V., & Beichner, R. J. (2004). Students' understanding of direct current resistive electrical circuits. *American Journal of Physics*, 72(1), 98–115. <https://doi.org/10.1119/1.1614813>
- Halloun, I. (2007). *Evaluation of the Impact of the New Physics Curriculum on the Conceptual Profiles of Secondary Students*. Beirut, Lebanon: Phoenix series / Lebanese University.
- Linacre, J. M., & Wright, B. D. (1993). *A user's guide to BIGSTEPS: Rasch-model computer program*. Chicago: MESA Press.

- Linacre, J. M. (1994). *Many-facet Rasch measurement* (2. ed.). Chicago: MESA Press.
- McDermott, L. C., & Shaffer, P. S. (1992). Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part I: Investigation of student understanding. *American Journal of Physics*, 60(11), 994–1002.
- Niedderer, H., & Schecker, H. (1992). Towards an explicit description of cognitive systems for research in physics learning. In R. Duit, F. M. Goldberg, & H. Niedderer (Hrsg.), *IPN: Vol. 131. Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies; proceedings of an International Workshop held at the University of Bremen, March 4-8, 1991* (pp. 74–98). Kiel: IPN
- Rhöneck, C. v. (2011). Vorstellungen vom elektrischen Strom und zu den Begriffen Strom, Spannung und Widerstand. In R. Müller, R. Wodzinski & M. Hopf (Hrsg.), *Schülervorstellungen in der Physik*. Köln: Aulis-Verl. Deubner.
- Urban-Woldron, H., & Hopf, M. (2012). Entwicklung eines Testinstruments zum Verständnis in der Elektrizitätslehre. *ZfDN*, 18, 201–227.

Interviewstudie zu den Mindsets von Physiklehrkräften

Verena Spatz*, Jonas Lippmann*

*Physikdidaktik, FB Physik, TU Darmstadt, Hochschulstraße 12, 64289 Darmstadt
Verena.Spatz@physik.tu-darmstadt.de, Jonas.Lippmann@mail.de

Kurzfassung

In den USA haben die Forschungsergebnisse von C. Dweck gezeigt, dass die Überzeugungen von Kindern und Jugendlichen zu ihren Fähigkeiten in einem bestimmten Fach für deren Lernwege entscheidend sind. Nach dieser Theorie der Mindsets unterscheidet man zwei Grundtypen: Werden die Fähigkeiten in einem bestimmten Bereich auf angeborene Begabung zurückgeführt und damit als statisch angesehen, spricht man von einem *Fixed-Mindset*. Werden diese Fähigkeiten hingegen als erlern- und entwickelbar angesehen, spricht man von einem *Growth-Mindset*.

Die Mindsets von Kindern und Jugendlichen werden wiederum geprägt durch die entsprechenden Überzeugungen ihrer Lehrkräfte. Im Bereich der Physik liegen zu diesen Überzeugungen der Lehrkräfte bisher jedoch nur sehr wenige Erkenntnisse vor. Aus diesem Grund wurde in einer explorativen Studie zunächst der Frage nachgegangen, ob sich die Typisierung „*Fixed-* oder *Growth-Mindset*“ entsprechend der Theorie von C. Dweck bei Physiklehrkräften am Gymnasium finden lässt. Dies wurde mithilfe von N=14 leitfadengestützten Interviews im Raum Darmstadt untersucht, die mit MAXQDA kategorienbasiert ausgewertet wurden. Auf diese Weise konnten vier der interviewten Personen dem *Fixed-Mindset* und zwei Personen dem *Growth-Mindset* zugeordnet werden. Jeweils vier weitere Personen wurden als Mischtypen, sog. *Mixed-Mindsets*, mit einer Tendenz zum *Fixed-* bzw. zum *Growth-Mindset* charakterisiert.

1. Theoretischer Hintergrund

1.1. Mindset-Theorie nach C. Dweck

„Dafür hatte ich nie eine Begabung!“ oder „Diese Begabung liegt bei uns einfach nicht in der Familie!“ In vielen Situationen des Schul- und Universitätsalltages entsteht der Eindruck, dass diese Aussagen weitverbreitete Meinungsbilder widerspiegeln. Nicht nur Kinder und Jugendliche, sondern auch deren Eltern und Lehrkräfte äußern sich häufig in dieser Weise.

Statt von begabten und unbegabten Menschen zu sprechen, eröffnet Carol S. Dweck mit ihrer Forschung eine andere Perspektive auf die Problematik. Sie unterscheidet zwischen zwei Mindsets, die das Denken und Handeln prägen (Dweck, 2016a): Personen mit einem *Fixed-Mindset* sind überzeugt, dass Intelligenz angeboren ist und Erfolg in einem bestimmten Bereich nur mit einer Begabung erreicht werden kann. Schülerinnen und Schüler mit diesem Mindset nehmen Schule eher als Institution wahr, in der Leistungen getestet werden. Sie sind bemüht, möglichst clever zu wirken („Performance-Goals“) und meiden Herausforderungen, da sie die Gefahr des Scheiterns sehen. Anstrengung wird negativ erlebt, als Zeichen dafür, dass die Begabung fehlt. Personen mit einem *Growth-Mindset* dagegen sind überzeugt, dass Intelligenz entwickelt werden kann und beharrliches Lernverhalten notwendig ist, um in einem bestimmten Bereich erfolgreich zu sein. Schülerinnen und Schüler mit diesem Mindset sehen Schule eher als Institution, in der Kompetenzen erworben werden. Sie sind bestrebt, an Herausforderungen zu wachsen („Learning-

Goals“); Anstrengung wird daher positiver empfunden, als der steinige Weg zum Erfolg.

Die Untersuchungen von Dweck zeigen, dass zumindest in den USA die Verteilung von *Fixed-* und *Growth-Mindset* insgesamt etwa ausgewogen zu sein scheint. Aus der Bevölkerung werden je etwa 40 % dem *Fixed-* bzw. *Growth-Mindset* zugeordnet, für etwa 20 % ist dagegen keine eindeutige Zuordnung möglich (Dweck, 2008). Eine Möglichkeit dieser „mixture of fixed and growth mindsets“ (Dweck, 2016b) besteht zum Beispiel darin, dass von angeborenen Begabungen ausgegangen wird, die jedoch durch Übung und Training entwickelt werden müssen. Jede Person hätte demnach unterschiedliche Voraussetzungen und Leistungsgrenzen der erreichbaren Fähigkeiten.

1.2. Einfluss des Mindsets auf das Lernverhalten von Schülerinnen und Schülern

Wie bereits angeklungen verfolgen Schülerinnen und Schüler mit einem *Fixed-Mindset* „Performance-Goals“ und sind daher bemüht, möglichst clever zu wirken. Erfolg wird auf die eigene Begabung zurückgeführt. Wenn eine Aufgabe gelöst wurde, hat man die eigene Begabung nachgewiesen. Neue, schwierigere Herausforderungen, an denen man allerdings scheitern könnte, würden diesen zuvor erbrachten Beweis gefährden. Wieso sollte man dieses Risiko eingehen? Demnach scheuen Schülerinnen und Schüler mit einem *Fixed-Mindset* neue Herausforderungen (Smiley & Dweck, 1994; Dweck, 2009). Um das eigene Selbstwertgefühl nicht zu belasten, können präventive Maßnahmen zur Entschuldigung von

schlechten Leistungen getroffen werden, wie beispielsweise ein absichtliches geringes Lernverhalten vor einer Klausur (Ommundsen, 2001). Durch solche „Selbstbehinderungsstrategien“ (Berglas & Jones, 1978) riskieren *Fixed-Mindsets* das Verfehlen langfristiger Ziele, zur Wahrung kurzfristiger Interessen (Zuckerman et al., 1998). „[...] nichts ist schlimmer als zu sagen: >>Ich habe mein Bestes gegeben und es war nicht genug. << [...] Wenn sich also jemand anstrengen muss, dann lässt dies Zweifel an seinem Talent aufkommen. Und zum Zweiten lässt die Anstrengung keinen Platz mehr für Entschuldigungen. Wer sich nicht anstrengt, kann immer behaupten, >> Ich hätte so gut sein können wie XY. <<“ (Dweck, 2016a, S. 55). Anstrengung wird als etwas Negatives erlebt. So werden nicht nur Rückschläge und Misserfolg als Zeichen von fehlender Begabung aufgefasst, sondern gleichfalls auch Erfolge, die nur durch eine große Anstrengung zustande gekommen sind (Hong et al., 1998).

Schülerinnen und Schüler mit einem *Growth-Mindsets* dagegen verfolgen „Learning-Goals“ und sind dementsprechend bestrebt, an Herausforderungen zu wachsen. Erfolg wird mit Anstrengung begründet. Wenn man eine Aufgabe gelöst hat, belohnt dies die eigene Anstrengung. Neue Aufgaben auf einem ähnlichen Schwierigkeitsniveau, an denen man nichts Neues erarbeiten kann, erscheinen nun überflüssig. Wieso sollte man die Zeit hierfür aufwenden? Schülerinnen und Schüler mit einem *Growth-Mindset* schätzen neue Herausforderungen. Um mit schlechten Leistungen umzugehen werden ganz andere Strategien angewendet. *Growth-Mindsets* schauen sich ihre Fehler an um daraus zu lernen (Müller & Dweck, 1998). Sie versuchen Verbindungen zu anderen Themengebieten zu knüpfen (Grant & Dweck, 2003). Der Satz >>Ich hätte so gut sein können wie XY.<< ist für sie keine Entschuldigung, sondern ein Misserfolg, da er bedeutet, dass man sich nicht genug angestrengt hat (Dweck, 2016a). Anstrengung ist nichts Negatives, sondern wird als positiv empfunden. Es bleibt mühevoll, aber eben auch die Möglichkeit, die eigenen Fähigkeiten weiter zu entwickeln.

1.3. Einfluss der Lehrkräfte auf die Mindsets ihrer Schülerinnen und Schüler

Hinsichtlich des Einflusses von Lehrkräften auf die Mindsets ihrer Schülerinnen und Schüler liegen ebenfalls einige Studien vor. So konnte Rheinberg et al. (2000) feststellen, dass bei Lehrpersonen mit einem *Fixed-Mindset* weniger Schülerinnen und Schüler eine positive Lernentwicklung nehmen, als bei Lehrpersonen mit einem *Growth-Mindset*. Dies kann auf mehrere Aspekte zurückzuführen sein.

So lässt sich eine Lehrperson, welche *Fixed-Mindset* orientiert ist, von einer einzigen bekannten Note deutlich stärker beeinflussen. Ist einer Lehrkraft mit einem *Fixed-Mindset* die Vorjahresnote bekannt, so ist sie der Meinung, bereits hierdurch eine gute Einschätzung über die Leistungsfähigkeit des/der Lernenden

erhalten zu haben. Die Fähigkeiten werden von diesen Lehrpersonen schließlich als festgesetzt und bestenfalls leicht veränderbar angesehen. So zitiert Dweck die Aussage einer anonymen Lehrperson: „Wenn ich die Intelligenz eines Schülers kenne, dann kann ich seine weitere Schullaufbahn gut vorhersagen. [...] Als Lehrer habe ich keinen Einfluss auf die intellektuelle Leistungsfähigkeit meiner Schüler.“ (Dweck, 2016a, S.81).

Eine Lehrkraft mit einem *Growth-Mindset* hingegen ist eher nicht der Meinung, aus der Vorjahresnote auf die Leistungsfähigkeit des/der Lernenden zurückschließen zu können. Sie geht von veränderbaren Fähigkeiten aus, welche entwickelbar sind. Auch hierzu zitiert Dweck die Aussage einer anonymen Lehrperson: „Die Leistungsfähigkeit lässt sich nicht durch eine einzige Bewertung beurteilen. Sie können die Steigung einer Linie ja auch nicht an einem einzelnen Punkt errechnen, schon aus dem einfachen Grund, dass dieser Punkt keine Linie ist. Ein Punkt verrät gar nichts, keine Tendenz, keine Entwicklung, keinen Mangel an Einsatz, schon gar kein Talent oder Nichttalent.“ (Dweck, 2016a, S.39)

Beide Sichtweisen der Lehrpersonen können wiederum zur „selbsterfüllenden Prophezeiung“ (Rustemeyer, 2016) führen. So konnten zum Beispiel De Boer, Pijl & Minnaert (2010) einen Langzeiteffekt der Erwartung von Lehrkräften auf die Leistungsentwicklung ihrer Schülerinnen und Schülern nachweisen.

Weiterhin beeinflusst das Mindset der Lehrkräfte deren Feedback gegenüber den Schülerinnen und Schülern, wobei dies wiederum einen Einfluss auf die Ausbildung von deren Mindsets hat (Müller & Dweck, 1998; Kamins & Dweck, 1999; Cimpian et al., 2007; Rattan, Good & Dweck, 2012): Dieses Feedback kann sich zum einen auf die Merkmale einer Person beziehen, wie deren Fähigkeit oder Intelligenz (personenbezogenes Lob/Feedback). Zum anderen kann es sich auf den Lernprozess, die Lernstrategie oder die Anstrengung beziehen (prozessbezogenes Lob/Feedback).

Um die Auswirkungen von personen- und prozessorientiertem Lob zu untersuchen, führten Kamins und Dweck (1999) eine Studie mit Kindergartenkindern durch. Sie fanden heraus, dass ein prozessbezogenes Lob positivere Effekte hat auf die Ergebnisbewertung und die Selbsteinschätzung sowie das Verlangen, sich mit der Thematik weiterhin zu beschäftigen (Kamins & Dweck, 1999). Ein prozessbezogenes Feedback fördert das Ausbilden von „Learning-Goals“ und das *Growth-Mindset* (Gunderson et al., 2013; Dweck, 2008; Mueller & Dweck, 1998; Rattan et al., 2012), während ein personenbezogenes Feedback „Performance-Goals“ und das *Fixed-Mindset* begünstigt (Dweck, 2008; Müller & Dweck, 1998; Rattan et al., 2012).

2. Fragestellung

Aus der Literatur geht hervor, sich das Mindset von Schülerinnen und Schülern stark auf deren Motivation, die Anstrengungsbereitschaft und das Lernverhalten auswirkt (Smiley & Dweck, 1994; Müller & Dweck, 1998; Grant & Dweck, 2003; Dweck, 2009). Dabei wird das Mindset der Schülerinnen und Schüler wiederum durch das Mindset ihrer Lehrpersonen beeinflusst (Rheinberg et al., 2000; Müller & Dweck, 1998; Kamins & Dweck, 1999; Cimpian et al., 2007; Rattan, Good & Dweck, 2012).

Es liegen derzeit jedoch keine Studien zur Ausprägung der Mindsets unter Physiklehrkräften vor, die sich auf deren Vorstellungen zum fachspezifischen Lehren und Lernen beziehen. In einer explorativen Studie sollte daher die folgende übergeordnete Fragestellung untersucht werden: „Kann Physiklehrkräften bezüglich des Wissenserwerbs in ihrem Fach ein Mindset nach C. Dweck zugeordnet werden?“

Um Rückschlüsse hierauf ziehen zu können, wurde zunächst den folgenden drei untergeordneten Forschungsfragen nachgegangen: Komplex A (*Leistungszurückführung*): Worauf führen Physiklehrkräfte die von starken und schwachen Schülerinnen und Schülern erbrachten Leistungen im Fach Physik zurück? Komplex B (*Fähigkeitsentwicklung*): Wie schätzen Physiklehrkräfte die mögliche Fähigkeitsentwicklung ihrer Schülerinnen und Schüler im Fach Physik ein? Komplex C (*Begabungsbegriff*): Glauben die Physiklehrkräfte, dass es etwas wie eine physikalische Begabung gibt und wie definieren sie diese?

3. Methode

Die Grundlage für eine entsprechende Charakterisierung von Fachlehrkräften sind ihre je individuellen Vorstellungen zum Lehren und Lernen von Physik, wodurch eine gewisse Offenheit der Forschungsmethode gefordert wird. Aus diesem Grund wurden mit Hilfe eines Leitfadens themenzentrierte Einzelinterviews durchgeführt.

Um Interviewpartnerinnen und -partner zu gewinnen, wurden Gymnasien in Hessen durch E-Mails kontaktiert. Mit den Physiklehrkräften, die ihre Bereitschaft signalisiert hatten, wurden Einzeltermine für eine persönliche Durchführung der Interviews an den jeweiligen Schulen vereinbart (wobei das genaue Thema der Studie nicht genannt wurde, so dass keine Vorbereitung stattfinden konnte).

Vor Beginn des eigentlichen Interviews wurde den Befragten der Zweck des Interviews erläutert und für ihre Bereitschaft zur Mitwirkung gedankt. Zudem wurde die Anonymität der Auswertung zugesichert.

Als Beginn der Interviews boten sich Fragen an, die sich direkt auf die eigene Person beziehen, z. B. „Warum sind Sie Physiklehrerin oder Physiklehrer geworden?“

Es folgten Fragen zum Komplex A der *Leistungszurückführung*: „Denke Sie bitte an eine Ihrer Physikklassen der Mittelstufe. Beschreiben Sie kurz in

zwei Sätzen den/die leistungsstärkste/n Lernende/n (den/die leistungsschwächste/n Lernende/n). Worauf führen Sie dessen/deren Leistungen zurück?“

Dann folgten Fragen zum Komplex B der *Fähigkeitsentwicklung*: „Angenommen, Sie würden in ein paar Wochen mit dieser Klasse einen Test über den Physikstoff des bisherigen Schuljahres schreiben. Denken Sie, jede/r Schüler/in könnte eine sehr gute Note bekommen? Denken Sie, jede/r Ihrer Schüler/innen könnte einen Physik-Leistungskurs (ein Physikstudium) erfolgreich abschließen?“

An geeigneter Stelle wurden im Verlauf des Interviews außerdem die Fragen zum Komplex C des *Begabungsbegriffs* angeführt, sobald die Lehrkraft dieses Konzept erstmals verwendete: „Was genau bedeutet eine Begabung für Sie, beispielsweise im Fach Physik? Wie merkt man, dass jemand eine angeborene Begabung für Physik hat?“

Gegebenenfalls folgte auf diese drei Fragenkomplexe eine Sondierungsphase um die Aussage der Lehrpersonen im Hinblick auf die Forschungsfragen zu konkretisieren.

Die Interviews wurden als Audiodateien aufgezeichnet und anschließend transkribiert. Die Auswertung erfolgte mit der Datenanalysesoftware MAXQDA. Hierzu wurden die Aussagen der Lehrkräfte paraphrasiert und generalisiert (in Anlehnung an die Qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring, 2015). Diese wurden anschließend entlang der drei Fragenkomplexe je einer von vier abgestuften Kategorien von K1 bis K4 zugeordnet, welche nach der Theorie der Mindsets definiert sind (Tab. 1):

Dabei wurden der Kategorie K1 solche Aussagen zugeordnet, welche von einer angeborenen Begabung sprechen. Äußerungen, dass eine gute Leistung aufgrund von Begabung und nicht aufgrund von Fleiß entstanden sei, wurden hier ebenfalls zugeordnet. In dieser Kategorie wird die Begabung als notwendiges Kriterium aufgefasst, um bereits in der Mittelstufe gute bis sehr gute Leistungen zu erbringen, und um einen Physik-Leistungskurs, beziehungsweise ein Physikstudium zu absolvieren.

Der Kategorie K2 wurden solche Aussagen zugeschrieben, welche die Begabung eher für eine angeborene als für eine entwickelbare Komponente halten. Entsprechend wurden Aussagen, welche Leistungen zusätzlich zu einer bestehenden Begabung auch auf ein gutes Lernverhalten zurückführen, der Kategorie K2 zugeordnet, solange die Begabung hierbei stärker gewichtet wurde. In diese Kategorie fallen auch Aussagen, die die physikalischen Fähigkeiten in einem bestimmten aber begrenzten Umfang als entwickelbar ansehen, sodass in der Mittelstufe mit großer Anstrengung gute und sehr gute Leistungen erbracht werden können, nicht jedoch in einem Physik-Leistungskurs beziehungsweise in einem Physikstudium.

In der Kategorie K3 sind dann solche Aussagen enthalten, welche die Begabung eher als entwickelt und weniger als angeboren ansehen. Die angeborene

Komponente wird lediglich als hilfreich, aber nicht als notwendig erachtet, um gute bis sehr gute Leistungen zu erreichen. Dementsprechend wurden auch Äußerungen, die die Leistungen stärker auf das Lernverhalten als auf die bestehende Begabung zurückführen, der Kategorie K3 zugewiesen. So fallen in diese Kategorie auch Aussagen, welche gute bis sehr gute Leistungen in einem Physik-Leistungskurs oder einem Physikstudium aufgrund von Lernverhalten und Anstrengungsbereitschaft für möglich erachten.

In der Kategorie K4 wurden schließlich solche Aussagen subsummiert, welche die Begabung als entwickelbar definieren. Es wurden hier auch diejenigen Aussagen zur Leistungszurückführung zusammengefasst, welche sich ausschließlich auf das Lernverhalten beziehen. Hierzu können auch Lernstrategien und -prozesse aufgeführt werden. Dadurch ist es für jede/n Lernenden möglich, einen Physik-Leistungskurs oder ein Physikstudium erfolgreich abzuschlie-

ßen, wenn er/sie das nötige Lernverhalten und die nötige Anstrengungsbereitschaft aufbringt und gegebenenfalls soziale Faktoren unterstützend hinzukommen.

Für die Gesamtauswertung erfolgte schließlich eine skalierende Einzelstrukturierung. Dabei wurden die Aussagen eines jeden Interviews nochmals analysiert, um aus der Zuordnung der Aussagen zu den Kategorien ggf. eine Typisierung entsprechend der Mindsets ableiten zu können. Eine reine Häufigkeitsbetrachtung der Aussagen in den einzelnen Kategorien reichte dabei meist nicht aus, sodass eine Kontextanalyse hinzugezogen werden musste. Dabei wurde in jedem Einzelfall dargestellt, welche alternative Typisierung in Betracht kommen könnte und wodurch sich die vorgenommene Typisierung begründet („argumentative Interpretationsabsicherung“ nach Mayring, 1996).

	K1 entspricht dem Fixed-Mindset	K2 tendiert zum Fixed-Mindset	K3 tendiert zum Growth-Mindset	K4 entspricht dem Growth-Mindset
Komplex A) Leistungszurückführung	Erbrachte Leistungen (sowohl gute als auch schlechte Leistungen) werden deutlich stärker auf Begabung, als auf das Lernverhalten zurückgeführt „[Ich habe einen] Schüler [der] so begabt ist, dass er sicher nicht viel dafür tun muss.“ (Interviewpartner/in 1, Z. 71)	Erbrachte Leistungen (sowohl gute als auch schlechte Leistungen) werden sowohl auf Begabung, als auch auf das Lernverhalten zurückgeführt „Also [der Schüler] könnte bestimmt etwas erreichen, wenn er mehr tun würde, aber letzten Endes fehlen da auch die kognitiven Voraussetzungen.“ (Interviewpartner/in 3, Z. 178-180)	Erbrachte Leistungen (sowohl gute als auch schlechte Leistungen) werden stärker auf das Lernverhalten, als auf eine Begabung zurückgeführt „Das Wichtigste [für die Leistungen der Schülerinnen und Schüler] ist immer Interesse. Wer Interesse hat, müht sich und entwickelt dann immer Begabung.“ (Interviewpartner/in 12, Z. 171-172)	Erbrachte Leistungen (sowohl gute als auch schlechte Leistungen) werden komplett auf das Lernverhalten zurückgeführt „[Die Leistungen sind darauf zurückzuführen, dass die Schülerin] strukturiert lernt, dass sie die Angebote, die gemacht werden, nutzt und damit auch sehr effektiv umgeht.“ (Interviewpartner/in 4, Z. 147-148)
Komplex B) Fähigkeitsentwicklung	Physikalische Fähigkeiten können nicht/kaum entwickelt werden „[Für ein Physikstudium] würde ich [die nötigen Voraussetzungen] sogar noch viel stärker auf die Begabung konzentrieren. Bestimmt 80% oder 90% Begabung.“ (Interviewpartner/in 1, Z. 121-122)	Physikalische Fähigkeiten können teilweise entwickelt werden „Jemand der nicht so begabt ist, der könnte durch Fleiß, Ehrgeiz, Engagement in den Dreierbereich kommen und die anderen könnten durchaus auch Zweier oder Einser schreiben.“ (Interviewpartner/in 3, Z. 210-212)	Physikalische Fähigkeiten können erheblich entwickelt „Also wenn das die [talentfreien] Schüler sind [...], dann schaffen die auch ein Physikstudium. [...] Mit genügend Willen ist das alles machbar.“ (Interviewpartner 10, Z. 174-178)	Physikalische Fähigkeiten entwickeln sich aufgrund eines Lernprozesses „Absolut. [...] wenn [der Schüler] hinreichend viel Zeit und Engagement investiert, wird er [ein Physikstudium] schaffen. Warum denn nicht?“ (Interviewpartner 4, Z. 214-216)
Komplex C) Begabungsbegriff	Physikalische Begabung ist angeboren „Begabung ist ein gewisser Startvorteil den man geschenkt bekommt.“ (Interviewpartner/in 6, Z. 97-98)	Physikalische Begabung ist stärker angeboren als entwickelt „Also ich kann eine [...] Grundbegabung haben, denke ich. [...] Aber je nachdem welcher Typ ich bin, kann ich die gewisse Begabung fördern [...]“ (Interviewpartner/in 3, Z. 76-82)	Physikalische Begabung ist stärker entwickelt als angeboren „Es muss natürlich ein gewisses Lernverhalten vorhanden sein, damit ein gewisses Talent sichtbar wird und umgekehrt.“ (Interviewpartner/in 10, Z. 123-124)	Physikalische Begabung ist entwickelt bzw. existiert nicht „Ich glaube nicht, dass es ein grundsätzliches physikalisches Kompetenz-Gen gibt.“ (Interviewpartner/in 13, Z. 121-122)

Tab.1: Kategorienschema in den drei Fragenkomplexen mit Ankerbeispielen

4. Ergebnisse

Es wurden $N=14$ an hessischen Gymnasien tätige Physiklehrkräfte befragt, wovon drei weiblich ($n=3$) und elf männlich ($n=11$) waren. Die befragten Physiklehrkräfte unterrichten überwiegend Mathematik als Zweitfach ($n=12$). Lediglich je eine Physiklehrkraft unterrichtet Deutsch ($n=1$) und Sport ($n=1$) als Zweitfach. Von den interviewten vierzehn Physiklehrkräften ist die Hälfte Quereinsteiger ($n=7$), wovon eine Lehrperson zusätzlich die Erste Staatsprüfung abgelegt hat. Die restlichen sieben Lehrkräfte haben sowohl die Erste als auch die Zweite Staatsprüfung abgelegt ($n=7$). Den Lehrberuf übten zum Zeitpunkt der Befragung fünf Lehrkräfte bereits länger als zehn Jahre aus. Zwei Lehrkräfte befanden sich im Referendariat ($n=2$). Vier Lehrkräfte befanden sich innerhalb des ersten bis fünften Berufsjahres ($n=4$), die restlichen drei Lehrkräfte im sechsten bis zehnten Berufsjahr ($n=3$).

4.1. Ergebnisse im Komplex A Leistungszurückführung

Im ersten Schritt bezieht sich die Analyse auf die Aussagen, welche zu den Leistungen des/der starken Lernenden getätigt wurden. In Kategorie K1 wurden die Interviewpartner/innen 1, 8, 11 und 14 eingeordnet. Diese führten die guten Leistungen auf eine Begabung zurück und nicht auf Fleiß. So beschrieb Interviewpartner/in 1 einen „Schüler [der] so begabt ist, dass er sicher nicht viel dafür tun muss.“ (Interviewpartner/in 1, Z. 71). Zwar wurde dem/der leistungsstarken Lernenden teilweise auch ein gutes Lernverhalten attestiert, jedoch wurde stets die Begabung als Hauptmerkmal genannt. In die Kategorie K2 wurden die Interviewpartner/innen 2, 5, 6, 9, 10 und 13 eingeteilt. Diese erkannten sowohl ein gutes Lernverhalten des/der leistungsstarken Lernenden, als auch eine vorhandene physikalische Begabung. Die Begabung wurde in diesen Fällen häufig als Hauptgrund dafür genannt, in welchem Maß Lernaufwand und Anstrengung erbracht werden müssten. Interviewpartner/in 3 und 12 wurden hingegen in die Kategorie K3 zugeordnet. Auch diese sehen eine physikalische Begabung als gegeben an. Allerdings wurde diese gegenüber dem Lernverhalten schwächer gewichtet, beziehungsweise das Interesse als Einflussfaktor betont, „Das Wichtigste ist immer Interesse. [...] wer Interesse hat müht sich und entwickelt dann immer Begabung“ (Interviewpartner/in 12, Z. 170-171). Die Meinung, dass die guten physikalischen Leistungen des/der leistungsstarken Lernenden lediglich durch einen Lernprozess entstanden sind, und keinen Bezug zu einer physikalischen Begabung haben, entspricht der Kategorie K4, welche die Interviewpartner/innen 4 und 7 vertreten.

Im zweiten Schritt bezieht sich die Analyse auf die Aussagen, welche zu den Leistungen des/der schwachen Lernenden getätigt wurden. Die Meinungen, dass der/die Lernende aufgrund einer fehlenden Begabung schlechte Leistungen erbringt, entspricht der

Kategorie K1: „Es gibt sicherlich auch Schüler, denen die Begabung fehlt“ (Interviewpartner/in 9, Z. 181). Oder: „Ich gebe ihr das Gefühl, dass wenn sie ihr Bestes gemacht hat, das reicht. Mehr kann sie nicht.“ (Interviewpartner 5, Z. 180-181). Neben den zitierten Interviewpartner/innen 5 und 9 wurde hier auch die Lehrperson 6 eingruppiert. In Kategorie K2 wurden die Interviewpartner/innen 1 und 3 einsortiert, welche das Lernverhalten zwar ansprechen aber weniger stark gewichten. In die Kategorie K3 wurden dann die Interviewpartner/innen 2, 8 und 14 einsortiert, welche das Lernverhalten als Hauptgrund für schlechte physikalische Leistungen stärker gewichten, „da ist Begabung zweitrangig“ (Interviewpartner 2, Z. 106-107). Dass hingegen die schlechten Leistungen des/der schwachen Lernenden ausschließlich auf das Lernverhalten zurückzuführen sind und nicht auf eine fehlende physikalische Begabung, entspricht der Kategorie K 4. In dieser Weise äußerten sich die Interviewpartner/innen 4, 7, 10, 11, 12 und 13.

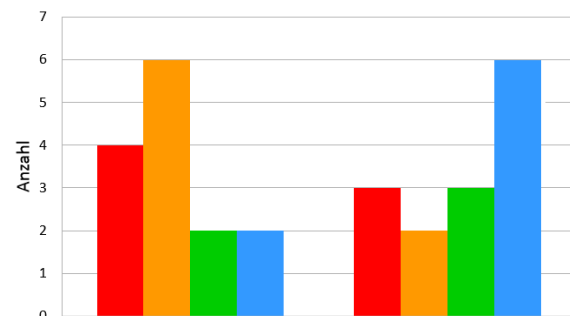


Abb.1: Typisierung der Physiklehrkräfte entsprechend der Kategorisierung ihrer Aussagen zum Fragenkomplex A) Leistungszurückführung (K1 rot, K2 orange, K3 grün, K4 blau), links: Angaben zu starken Lernenden, rechts: Angaben zu schwachen Lernenden

4.2. Ergebnisse im Komplex B Fähigkeitsentwicklung

Im dritten Schritt wurden die Aussagen der Lehrkräfte hinsichtlich der möglichen Fähigkeitsentwicklung ihrer Schülerinnen und Schüler kategorisiert. Hierbei wurden die Interviewpartner/innen 1, 5, 6 und 8 in die Kategorie K1 eingeordnet. Darunter fallen allerdings auch einige Lehrkräfte, welche Begabung sowohl als angeborenen, wie auch als erworben ansehen. Diese Lehrkräfte haben jedoch die Vorstellung, dass die Entwicklung von Fähigkeiten je nach Begabung stark begrenzt ist. Entsprechend gaben sie an, dass zum Absolvieren eines Physik-Leistungskurses oder eines Physikstudiums eine Begabung notwendig sei. Auch wurde die Begabung von diesen Interviewpartnern/innen mit steigendem Anforderungsniveau im Leistungskurs oder im Physikstudium viel stärker gewichtet, so zum Beispiel von Interviewpartner/in 1: „Ja. Da würde ich das sogar noch viel stärker auf die Begabung konzentrieren. Bestimmt 80% oder 90% Begabung“ (Interviewpartner/in 1, Z. 121-122). In die Kategorie K2 wurden die Interviewpartner/innen 3, 11 und 14 eingeordnet, welche aussagen, dass sich physikalische

Fähigkeiten eingeschränkt entwickeln lassen. Allerdings seien auch bei großer Anstrengung keine guten oder sehr guten Leistungen zu erwarten, wenn die Begabung fehle. Demgegenüber wurden in die Kategorie K3 die Interviewpartner/innen 2, 9, 10, 12 und 13 zugeordnet, welche betonen, dass sich physikalische Fähigkeiten deutlich steigern lassen. Durch Anstrengung seien auch dann gute oder sehr gute Leistungen zu erreichen, wenn die Begabung fehlt. Diese Lehrkräfte sind zum Teil auch der Meinung, dass sowohl eine Begabung wie auch Anstrengung nötig seien, um einen Leistungskurs oder ein Physikstudium erfolgreich abschließen zu können, wobei sie allerdings das Lernverhalten deutlich stärker gewichten. Interviewpartner/in 10 äußert sich etwa dahingehend, dass die Begabung den Lernaufwand zwar beeinflusst, jedoch keine notwendige Voraussetzung darstellt. Auch sei eine Begabung für gute oder sehr gute Leistungen nicht hinreichend: „Also wenn das alles die [Schülerinnen und] Schüler sind, die [...] in den Leistungskurs, wo sie talentfrei sind, gegangen sind und das geschafft haben, dann schaffen die auch ein Physikstudium. [...] Das würde ich dann auch sagen. Mit genügend Willen ist das alles machbar.“ (Interviewpartner 10, Z. 174-178). Die Interviewpartner/innen 4 und 7 – zugeordnet zur Kategorie K4 – gehen demgegenüber davon aus, dass sich physikalische Fähigkeiten ausschließlich aufgrund eines Lernprozesses entwickeln. Diese Lehrkräfte glauben, dass alle Schülerinnen und Schüler bei entsprechendem Lernverhalten auch ein Leistungskurs und ein Physikstudium absolvieren können. Interviewpartner/in 7 antwortet beispielsweise auf die entsprechende Frage: „Wenn er den Fleiß an den Tag legt und sich dahinterklemmt, ja!“ (Interviewpartner/in 7, Z. 177)

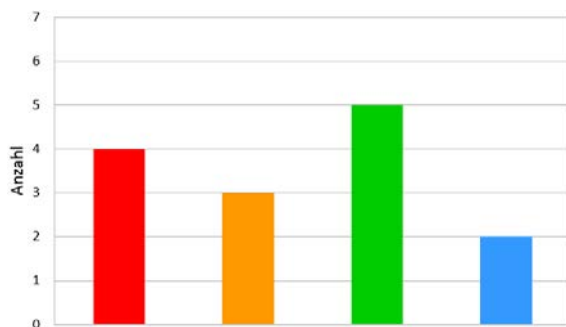


Abb.2: Typisierung der Physiklehrkräfte entsprechend der Kategorisierung ihrer Aussagen zum Fragenkomplex B) Fähigkeitsentwicklung (K1 rot, K2 orange, K3 grün, K4 blau)

4.3. Ergebnisse im Komplex C Begabungsbegriff

Hinsichtlich der Begabungsdefinition wurde am häufigsten von fachlich-kognitiven Fähigkeiten gesprochen, die angeboren seien (Kategorie K1). „Begabung ist ein gewisser Startvorteil, den man geschenkt bekommt.“ (Interviewpartner/in 6, Z. 97-98). Diese Ansicht vertraten die Interviewpartner/innen 1, 2, 5, 6, 8 und 14. Weitere Interviewpartner/innen trafen

auch die Aussage, dass sich diese Fähigkeiten entwickeln lassen, wobei die Grenze des zu erreichenden Entwicklungsniveaus durch die angeborene Begabung mehr oder minder stark bestimmt werde. Die Interviewpartner/innen 3 und 11 sind beispielsweise der Überzeugung, dass es eine angeborene Komponente der Begabung gibt. Sie sehen diese als vorrangig an und wurden daher der Kategorie K2 zugeordnet. Ebenso sind die Interviewpartner/innen 9 und 10 der Meinung, dass es eine angeborene Komponente der Begabung gibt. Sie sehen diese allerdings als zweitrangig an und wurden daher der Kategorie K3 zugeteilt. Von einigen Interviewpartner/innen, die die Kategorie K4 bilden, wurde eine angeborene genetische Komponente der fachlich-kognitiven Fähigkeiten bestritten: „Ich glaube nicht, dass es ein grundsätzliches physikalisches Kompetenz-Gen gibt“ (Interviewpartner 13, Z. 121-122). Interviewpartner 4, 7, 12 und 13 vertreten eine solche Meinung. „Ich glaube, dass sich Begabung [...] entwickelt, wenn man mathematisch schon sehr stark ist und schon viel im Bereich Chemie oder Biologie kann und weiß, dann wird man auch in Physik gute Leistungen erbringen [...] Was aber auf der vorherigen Lerngeschichte und weniger auf einer überdurchschnittlichen Begabung beruht.“ (Interviewpartner 13, Z. 129-132) Oder: „Das Wort Begabung [...] interpretiere ich ein bisschen anders. [...] Begabung ist ein [Interesse]. Ich habe ein durchdringendes Interesse an einer Sache und [...] kann mich zu jeder Tages- und Nachtzeit damit beschäftigen.“ (Interviewpartner/in 7, Z. 236-239)

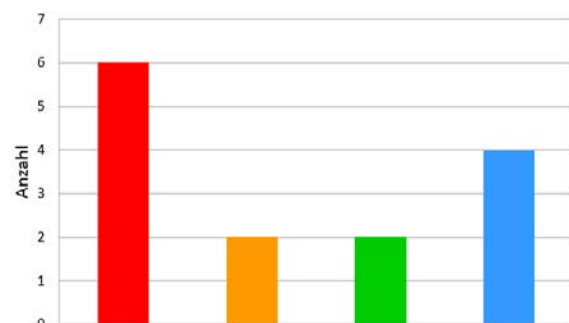


Abb.3: Typisierung der Physiklehrkräfte entsprechend der Kategorisierung ihrer Aussagen zum Fragenkomplex C) Begabungsbegriff (K1 rot, K2 orange, K3 grün, K4 blau)

4.4. Gesamtergebnisse

Bei der Typisierung der Lehrkräfte entsprechend der Kategorisierung ihrer Aussagen (Tab. 2) wurden von den insgesamt vierzehn Lehrkräften vier dem *Fixed-Mindset* (Interviewpartner 1, 5, 6 und 8) und zwei dem *Growth-Mindset* (Interviewpartner 4 und 7) zugeordnet. Auffällig dabei ist, dass sowohl bei dem *Fixed-Mindset*, als auch bei dem *Growth-Mindset* kein Grenzfall aufgetreten ist, sondern dass diese sechs Interviewpartner/innen gut der jeweiligen Kategorie zugeordnet werden konnten.

	K1 entspricht dem <i>Fixed-Mindset</i>	K2 tendiert zum <i>Fixed-Mindset</i>	K3 tendiert zum <i>Growth-Mindset</i>	K4 entspricht dem <i>Growth-Mindset</i>
Komplex A)	Leistungsstarke Lernende			
Leistungszurückführung	Interviewpartner/innen 1, 8, 11 und 14	Interviewpartner/innen 2, 5, 6, 9, 10 und 13	Interviewpartner/innen 3 und 12	Interviewpartner/innen 4 und 7
	Leistungsschwache Lernende			
	Interviewpartner/innen 5, 6 und 9	Interviewpartner/innen 1 und 3	Interviewpartner/innen 2, 8 und 14	Interviewpartner/innen 4, 7, 10, 11, 12 und 13
Komplex B)	Fähigkeitsentwicklung			
	Interviewpartner/innen 1, 5, 6 und 8	Interviewpartner/innen 3, 11 und 14	Interviewpartner/innen 2, 9, 10, 12 und 13	Interviewpartner/innen 4 und 7
Komplex C)	Begabungsbegriff			
	Interviewpartner/innen 1, 2, 5, 6, 8 und 14	Interviewpartner/innen 3 und 11	Interviewpartner/innen 9 und 10	Interviewpartner/innen 4, 7, 12 und 13
Gesamtergebnis	<i>Fixed-Mindset</i>	<i>Mixed-Mindset mit Tendenz zum Fixed-Mindset</i>	<i>Mixed-Mindset mit Tendenz zum Growth-Mindset</i>	<i>Growth-Mindset</i>
	Interviewpartner/innen 1, 5, 6 und 8	Interviewpartner/innen 2, 3, 11 und 14	Interviewpartner/innen 9, 10, 12 und 13	Interviewpartner/innen 4 und 7

Tab.2: Typisierung der Physiklehrkräfte (Interviewpartner/innen 1 bis 14) entsprechend der Kategorisierung ihrer Aussagen in den drei Fragenkomplexen und daraus resultierendes Gesamtergebnis

So gehen alle vier *Fixed-Mindsets* davon aus, dass es eine angeborene Begabung gibt, welche für erbrachte Leistungen wesentlich ist. „ich denke für [eine Note] Eins [oder eine Note] Zwei, da fehlt bei einigen eben die Begabung. Die würden das auch mit intensiven Vorbereiten nicht auf eine Eins oder Zwei schaffen.“ (Interviewpartner 1, Z. 103-105).

Die beiden *Growth-Mindsets* vertreten hingegen die Meinung, dass es so etwas wie physikalische Begabung nicht gibt und setzen diesen Begriff mit erwerbbarer Fähigkeiten gleich: „Da sind wir wieder bei dem Wort Begabung. [Eine starke Schülerin] hat sich vielleicht früh mit bestimmten Dingen, Fragestellungen, Denkweisen auseinandergesetzt, die sich manifestiert haben, die sich weiterentwickeln haben“ (Interviewpartner 7, Z. 97-100).

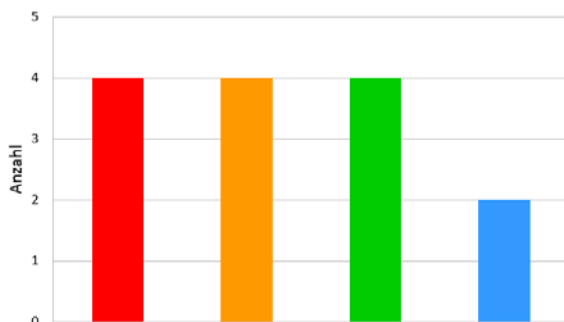


Abb.4: Gesamtergebnis der Typisierung der Physiklehrkräfte entsprechend der Kategorisierung ihrer Aussagen (*Fixed-Mindset* rot, *Mixed-Mindset mit Tendenz zum Fixed-Mindset* orange, *Mixed-Mindset mit Tendenz zum Growth-Mindset* grün, *Growth-Mindset* blau)

Die restlichen Interviewpartner wurden in die *Mixed-Mindsets* zugeordnet. Dabei befinden sich Interviewpartner/innen 2, 3, 11 und 14 in dem *Mixed-Mindset mit Tendenz zum Fixed-Mindset* und die Interviewpartner/innen 9, 10, 12 und 13 in dem *Mixed-Mindset mit Tendenz zum Growth-Mindset*.

5. Diskussion

Bei der Leistungszurückführung fällt auf, dass bei der Frage nach der/dem schwachen Lernenden häufiger auf die Begabung angesprochen wird (zehn der vierzehn Interviewpartner/innen sind den Kategorien K1 und K2 zugeordnet), während bei der Frage nach der/dem starken Lernenden häufiger auf das Lernverhalten eingegangen wird (neun der vierzehn Interviewpartner/innen sind den Kategorien K3 und K4 zugeordnet). Anzumerken ist diesbezüglich, dass die Interviewpartner/innen bei der Leistungszurückführung eine/n Lernende aus einer ihrer eigenen Klassen beschreiben sollten. Es findet demnach eine direkte Bezugnahme zu einer bestimmten Schülerin oder einem bestimmten Schüler statt, wodurch eine Generalisierung der Leistungszurückführung anderer Schülerinnen und Schüler eventuell nicht gegeben ist (wenngleich manche Lehrkräfte im Interview zunächst allgemeine Aussagen bezüglich leistungsstarker und leistungsschwacher Lernender tätigten). Außerdem merkten einige Interviewpartner/innen an, dass aufgrund des fehlenden Lernverhaltens für die/den schwache/n Lernende/n eine Aussage über eine mögliche physikalische Begabung nicht möglich sei.

Stärker als der Komplex A (*Leistungszurückführung*) wurden daher die Komplexe B (*Fähigkeitsentwicklung*) und C (*Begabungsbegriff*) beim Gesamtergebnis der Typisierung der Physiklehrkräfte gewichtet. Generell ist dennoch zu betonen, dass die Typisierung trotz methodischem Vorgehen subjektiv sein kann. Entsprechend ist eine scharfe Grenzziehung - insbesondere zwischen den *Mixed-Mindset* Kategorien - nicht möglich. Zwar sind die einzelnen Zuordnungen zu den Kategorien K1 bis K4 in unserer Analyse ausführlich und nachvollziehbar geschildert (Lippmann,

2017), dennoch wäre es bei der Auswertung des vorliegenden Materials durch eine andere Person möglich, dass Grenzfälle anders bewertet werden. Es könnten andere Auswahlregeln angewendet werden, einzelnen Aussagen eine größere oder geringere Bedeutsamkeit zugestanden werden, usw. So könnte letztlich ein anderes Gesamtbild der Typisierung entstehen. Dennoch sind grundlegende Verschiebungen über benachbarte Kategorien hinweg nicht zu erwarten. Gerade die Zuordnung der beiden extremen Ausprägungen des *Fixed-* und des *Growth-Mindset* konnte zweifelsfrei vorgenommen werden. Daher ist eine positive Antwort auf die Forschungsfrage: „Kann Physiklehrkräften bezüglich des Wissensserwerbs in ihrem Fach ein *Mindset* nach C. Dweck zugeordnet werden?“ möglich.

Bei der Typisierung der Physiklehrkräfte muss jedoch festgehalten werden, dass die *Mindset*-Theorie grundsätzlich davon ausgeht, dass keinem Individuum ein reines *Fixed-Mindset* beziehungsweise ein reines *Growth-Mindset* zugeordnet werden kann, sondern dass jedes Individuum sein eigenes *Mixed-Mindset* ausbildet. Dieses kann mehr oder minder zu einer der beiden extremen Formen der *Mindsets* tendieren (Dweck, 2015). Dies ist aus der dargestellten Analyse ebenfalls ersichtlich: Wenn eine Physiklehrkraft beispielsweise als *Fixed-Mindset* oder als *Growth-Mindset* typisiert wurde, so bedeutet dies in der Regel nicht, dass sie ausschließlich Überzeugungen äußert die dem *Fixed-Mindset* oder dem *Growth-Mindset* entsprechen. Lediglich in der Zusammenstellung ihrer Aussagen wird deutlich, dass sie überwiegend Überzeugungen vertritt, welche entsprechend dem *Fixed-Mindset* in der Kategorie K1 oder entsprechend dem *Growth-Mindset* in der Kategorie K4 zuzuordnen sind.

6. Literatur

- [1] Berglas S. & Jones E. (1978). Drug choice as a self-handicapping strategy in response to non-contingent success. *Journal of Personality and Social Psychology* (Vol. 36), S. 405-417.
- [2] De Boer, A., Pijl, S.J., & Minnaert, A. (2010). Regular primary schoolteachers' attitudes towards inclusive education: a review of the literature. *International Journal of Inclusive Education*, 15(3), 331-353.
- [3] Cimpian, A., Acre, H.-M., Markmann, E. M. & Dweck, C. S. (2007). Subtle linguistic cues impact children's motivation. *Psychological Science*, 18, 314-316.
- [4] Dweck, C. (2008). *Mindsets and Math/Science Achievements. The Opportunity Equation*. Stanford University.
- [5] Dweck, C. (2009). Developing Talent Through a Growth Mindset. *Olympic Coach* (Vol. 21, No. 1), 4-7.
- [6] Dweck, C. (2016a). *Selbstbild: Wie unser Denken Erfolge oder Niederlagen bewirkt*. München/Berlin: Piper Verlag GmbH.
- [7] Dweck, C. (2016b). What Having a "Growth Mindset" actually means. *Havard Business Review*.
- [8] Grant, H. & Dweck, C. (2003). Clarifying achievement goals and their impact. *Journal of Personality and Social Psychology* (Vol. 85), 541-553.
- [9] Gunderson, E., Gripshover, S., Romero, C., Dweck, C., Goldin-Meadow, S., & Levine, S. (2013). Parent Praise to 1- to 3-Year Olds Predicts Children's Motivational Framework 5 Years Later. *Child Development* (Vol. 84, No.5), 1526-1541.
- [10] Kamins, M. & Dweck, C. (1999). Person vs process praise and criticism: Implications for contingent self-worth and copin., *Developmental Psychology*, 35, 835-847.
- [11] Lippmann, J. (2017): Interviewstudie zu den *Mindsets* von Physiklehrkräften. Wissenschaftliche Hausarbeit am Fachbereich Physik der Technischen Universität Darmstadt
- [12] Mayring, P. (1996). *Einführung in die qualitative Sozialforschung*. Weinheim: Psychologie Verlags Union.
- [13] Mayring, P. (2015). *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken*. Weinheim und Basel: Beltz Verlag.
- [14] Müller, C.M. & Dweck, C. (1998). Praise for Intelligence Can Undermine Children's Motivation and Performance. *Journal of Personality and Social Psychology*. (Vol. 75, No. 1), 33-52.
- [15] Ommundsen, Y. (2001). Self-handicapping strategies in physical education classes: The influence of implicit theories of the nature of ability and achievement goals. *Psychology of Sport & Exercise* (Vol. 2), 139-156.
- [16] Rattan, A., Good, C. & Dweck, C. (2012). „It's ok – Not everyone can be good at math“: Instructors with an entity theory comfort (and demotivate) students. *Journal of Experimental Social Psychology*.
- [17] Rheinberg, F., Vollmeyer, R., & Rollett, W. (2000). Motivation and action in self-regulated learning. In: Boekaerts, M., Pintrich, P. & Zeidner, M. (Eds.). *Handbook of self-regulation*. San Diego: Academic Press. 503-529.
- [18] Rustemeyer, R. (2004). *Einführung in die Unterrichtspsychologie*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- [19] Simley, P. & Dweck, C. (1994). Individual Differences in Achievement Goals among Young Children. *Child Development*, (Vol. 65), 1723-1743.
- [20] Zuckerman, M., Kieffer, S. C. & Knee, C. R. (1998). Consequences of self-handicapping effects on coping, academic performance, and adjustment. *Journal of Personality and Social Psychology* (Vol. 74), 1619-1628.

Implementierung modellbildender Lernangebote in das physikalische Praktikum

Albert Teichrew*, Roger Erb*

*Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt
teichrew@physik.uni-frankfurt.de, roger.erb@physik.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

Modellbildung ist neben der Durchführung von Experimenten ein wesentlicher Schritt naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung. Die Erfahrung zeigt, dass das Experimentieren und vor allem das Interpretieren der gewonnenen Daten schwerfällt, wenn das physikalische Modell nicht verstanden wurde, das dem Experiment zugrunde liegt. Das Durcharbeiten einer herkömmlichen Versuchsbeschreibung im Vorfeld des physikalischen Praktikums ist für eine eingehende Auseinandersetzung mit den relevanten Modellen nicht ausreichend. In dem von der Joachim Herz Stiftung geförderten Lehrvorhaben wird zur Vorbereitung auf Versuche zur geometrischen Optik im physikalischen Praktikum eine online Lernumgebung eingesetzt, die Modellbildung innerhalb der Dynamischen Geometrie-Software GeoGebra ermöglicht und zum virtuellen Experimentieren an mehreren Modellen auffordert. Im Rahmen einer explorativen Evaluationsstudie soll hierbei geklärt werden, wie und durch welche Einflussfaktoren sich der Einsatz digitaler Modellexperimente auf das Fachwissen einerseits und die Handlungen im Praktikum andererseits auswirkt.

1. Einleitung

Das Experiment gilt als das zentrale Verfahren naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung. In aktuellen Studien wurde die Auswirkung unterschiedlicher Sozialformen und Offenheitsgrade bei der Durchführung und Auswertung von Experimenten auf den Fachwissenszuwachs von Schülerinnen und Schülern untersucht [1], [2]. Die Ergebnisse legen nahe, dass die Unterrichtsform keinen signifikanten Einfluss auf den Fachwissenszuwachs hat. Die erfolgreiche Durchführung und Auswertung eines Experiments in der Schule ist dennoch als hinreichende Bedingung für den Ausbau von Fachwissen anzusehen. Als notwendige Bedingung könnte allerdings die Vorbereitung des Experiments eine größere Rolle spielen. Denn dort liegt häufig die Ursache für mögliche Fehler während des Experimentierens und beim Interpretieren der Daten.

Eine entscheidende Hilfestellung könnte die Arbeit mit Modellen liefern. Der Lösungsansatz, der mit dem vorgestellten Lehrvorhaben verfolgt und untersucht wird, sieht zum einen eine Auseinandersetzung mit digitalen Modellexperimenten zum behandelten Phänomen vor und zum anderen eine Überprüfung der aus dem Modell formulierten Hypothesen im anschließend durchgeführten Experiment.

In diesem Beitrag werden zunächst Ansichten zur Rolle der Modelle im Unterricht und ihre Bedeutung für die Erkenntnisgewinnung diskutiert. Auf Basis eines Strukturmodells, das sowohl Modellbildung als auch den Experimentierprozess beinhaltet, wird anschließend der Einsatz digitaler Medien zur Erarbeitung von Denkmodellen begründet und anhand der entwickelten Lernumgebung verdeutlicht.

Schließlich werden daran anknüpfende Forschungsfragen und das Studiendesign vorgestellt.

2. Forschungslage

Konzepte, die einen expliziten Unterricht über Modelle vorsehen, sind bereits entwickelt und untersucht worden. Ausschlaggebend waren dabei eine Vermittlung des hypothetischen Charakters naturwissenschaftlicher Modelle und eine explizit stattfindende Reflexion und Diskussion der Modellbildung und Modellnutzung [3]. Diese Faktoren hängen jedoch in erster Linie von der Modellkompetenz der Lehrkräfte selbst ab. In Interventionsstudien wird die Qualität der Umsetzung solcher Unterrichtsphasen in der Regel nicht kontrolliert.

Als Modellkompetenz wird ein System aus Kenntnissen und Fähigkeiten zur Bewältigung von Anforderungen im Umgang mit naturwissenschaftlichen Modellen bezeichnet. Zur Strukturierung der Modellkompetenz wurden fünf Teilkompetenzen formuliert und im Kontext der Biologie empirisch untersucht [4], [5]. Mit der Teilkompetenz „Eigenschaften von Modellen“ wird die Beziehung zwischen dem Original und dem Modell aufgegriffen. Unter „Alternative Modelle“ werden unterschiedliche Modelle zu einem Ausgangsgegenstand thematisiert. Der „Zweck von Modellen“ beinhaltet die verschiedenen Arten des Einsatzes von Modellen. In den Teilkompetenzen „Testen von Modellen“ und „Ändern von Modellen“ werden schließlich Möglichkeiten der Überprüfung und die Bedingungen für eine Überarbeitung abgedeckt. Die dazugehörigen drei Niveaustufen differenzieren die Ansichten: Modelle sind direkte Kopien der realen Welt, Modelle dienen der idealisierten Beschreibung von

etwas, Modelle werden als Anwendung für etwas eingesetzt (zur Erkenntnisgewinnung). Im Biologieunterricht wird viel mit gegenständlichen Modellen gearbeitet, die der Anschauung dienen. Dabei kann es durchaus vorkommen, dass Schülerinnen und Schüler alle Eigenschaften eines Modellobjekts fälschlicherweise mit denen des Originals gleichsetzen, was als niedrigste Stufe der Modellkompetenz verwendet wird. Im Physikunterricht hingegen treten Modelle weniger als Objekte und mehr als Denkmodelle auf. Auf der niedrigsten Stufe verorten wir deshalb die naive, aber verbreitete Ansicht, Modelle seien Erklärungen, die das Wesen und die Ursachen der Vorgänge in der Welt vollständig und alternativlos wiedergeben [6].

Um diesen Vorstellungen entgegenzuwirken, wird in phänomenologischen Ansätzen eine frühe Modellorientierung vermieden [7]. Stattdessen werden Lernprozesse unterstützt, die mithilfe von Sinneserfahrungen und deren Beschreibungen einen natürlichen Zugang zur Physik bieten. Das schließt jedoch einen reflektierten Umgang mit Modellen nicht aus. Dieser kann sich in einem Unterricht widerspiegeln, der von dem direkt erfahrbaren Phänomen ausgeht, sich aber auch am wissenschaftlichen Erkenntnisprozess orientiert. Bei den Ideen der Physik handelt es sich vor allem um kreative Denkmodelle, deren Konstruktion das Absehen von den phänomenologischen Gegebenheiten voraussetzt [8].

In Kompetenzmodellen zur Erkenntnisgewinnung wird zwischen naturwissenschaftlichen Untersuchungen, Modellbildung und einer wissenschaftstheoretischen Reflexion unterschieden [9], [10]. Als Modellbildung wird dabei der Bestandteil bezeichnet, der diese spezifische Methode des naturwissenschaftlichen Arbeitens beinhaltet. Die Ergebnisse der auf dieser Basis entwickelten Kompetenztests sind bezüglich der Aufteilung der Erkenntnisgewinnung in drei unabhängige Bereiche nicht eindeutig. Die grundsätzliche Möglichkeit, den Kompetenzbereich der Erkenntnisgewinnung mit schriftlichen

Tests abzudecken, mit denen die Qualität des naturwissenschaftlichen Arbeitens nicht erfasst werden kann, steht zur Diskussion.

Strukturmodelle zum wissenschaftlichen Denken oder experimenteller Kompetenz haben das Ziel, naturwissenschaftliche Erkenntnisgewinnung als komplexen Problemlöseprozess abzubilden, der mehrere Schritte zu durchlaufen hat [11]. Dabei stehen die Schritte Planung, Durchführung und Auswertung eines Experiments im Zentrum, die mit Experimentiertests erfasst werden können [12], [13]. Allerdings fehlt es bislang an etablierten Strukturmodellen, die Modellbildung und Experiment in einem gemeinsamen Problemlöseprozess abbilden. Genauso bleibt es bei dem wichtigen Schritt „Hypothesen generieren“ offen, wie und woraus Hypothesen gewonnen werden können. Gerade das bereitet vielen Schülerinnen und Schülern Schwierigkeiten.

3. Kreislauf der Erkenntnisgewinnung

Das von der Joachim Herz Stiftung geförderte Lehrvorhaben basiert auf dem sogenannten Kreislauf der Erkenntnisgewinnung, der sich um vier Stationen anordnet und aus acht Schritten besteht [6] (siehe Abb.1). Die Stationen sind als wesentliche Unterrichtsgegenstände zu betrachten, die im Laufe des Kreislaufs sowohl als Lernprodukt als auch als Ausgangsmaterial für das weitere Vorgehen dienen. Ein Phänomen kann beispielsweise sowohl aus einer Beobachtung entwickelt als auch aus einem naturwissenschaftlichen Modell rekonstruiert werden. Gleichzeitig kann ein Phänomen als Grundlage dessen betrachtet werden, was modelliert werden soll, oder als Kenntnisstand, mit dem neue Beobachtungen eingeordnet werden können. Die ersten vier Schritte zielen auf die Einführung der Unterrichtsgegenstände ab, die in den nachfolgenden vier Schritten reflektiert werden:

1. Aus Beobachtungen ein unbekanntes Phänomen oder eine Fragestellung **entwickeln**.
2. Für ein Phänomen ein Modell **konstruieren**.

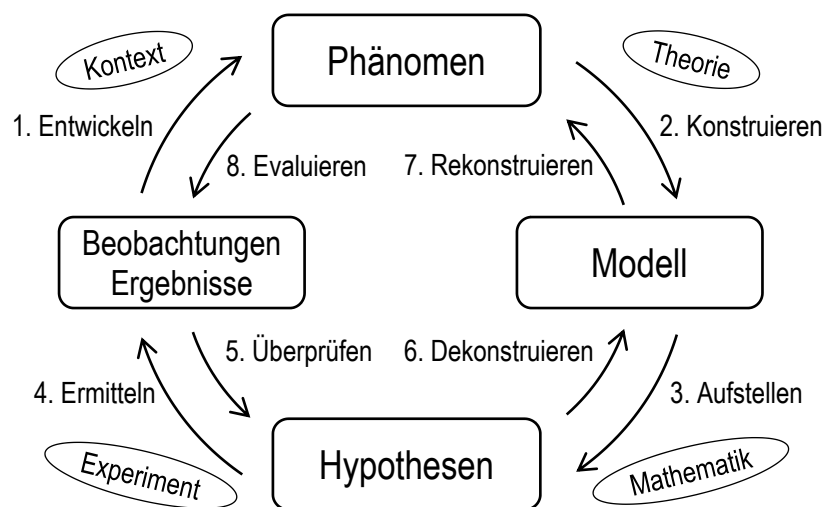


Abb.1: Kreislauf der Erkenntnisgewinnung: Schritte (Pfeile), Stationen (abgerundete Rechtecke) und Hilfsmittel (Ovale).

3. Mithilfe des Modells Hypothesen **aufstellen**.
4. Hypothesengeleitet experimentelle Ergebnisse **ermitteln**.
5. Mit experimentellen Ergebnissen Hypothesen **überprüfen**.
6. Anhand gestützter oder falsifizierter Hypothesen das Modell bestätigen oder **dekonstruieren**.
7. Aus dem revidierten Modell das Phänomen **rekonstruieren**.
8. Mithilfe der Kenntnisse zum behandelten Phänomen oder der beantworteten Fragestellung neue Beobachtungen **evaluieren**.

Die Beobachtungen, die zu einem Phänomen führen, können dem Alltag, der Natur oder einer experimentellen Demonstration entstammen. Dieser Schritt sollte in der Regel in einem passenden Kontext eingebettet werden. Das zum Phänomen passende (Denk-)Modell wird entweder aus bereits behandelten Konzepten zusammengesetzt oder neu erlernt. Wir sprechen an dieser Stelle von Modellbildung (Modell erarbeiten). Dieser Schritt greift auf physikalische Theorien zurück, die nicht im Unterricht selbstständig entwickelt werden können. Das Modell soll dabei nicht als Erklärung des Phänomens dienen, sondern die möglichen Zusammenhänge beschreiben, aus denen sich anschließend konkrete Hypothesen aufstellen lassen. Die Hypothesen werden formuliert als qualitative oder quantitative Zusammenhänge, die sich unmittelbar aus den Bestandteilen des Modells ergeben (Modell anwenden). Dabei wird eine Art von Mathematisierung nötig sein, die entweder mit vorhandenem Wissen aus dem Mathematikunterricht erfolgt oder entsprechend aufgearbeitet werden muss. Experimentelle Ergebnisse dienen in dem Kreislauf dazu, die Modellhypothesen zu überprüfen. Dieser Schritt findet innerhalb eines Experiments unter kontrollierten Bedingungen statt, mit dem Hypothesen gestützt oder verworfen werden können. An dieser Stelle werden Nebeneffekte deutlich, die im Modell nicht berücksichtigt wurden (Modell überprüfen). Diese werden bei der Eingrenzung des Modells diskutiert und fließen somit in die Interpretation der Ergebnisse ein. Im Gegensatz dazu ist das Einstiegsexperiment auf die reine Erzeugung eines Effekts ausgerichtet.

Bei diesem Kreislauf handelt es sich um eine idealisierte Darstellung eines Lernprozesses, der nicht mit jedem Phänomen in allen Einzelheiten durchlaufen werden kann. Ein wesentlicher Teil ist unter anderem an das SDDS-Modell angelehnt [14]. Im Vorfeld eines hypothesenüberprüfenden Experiments (Suche im Experimentierraum) findet eine Suche im Hypothesenraum in zwei Schritten statt: Erstellung eines Denkmodells (generate frame) mit möglichen Zusammenhängen gewisser Größen (slots), das im nächsten Schritt mit konkreten Werten zu Hypothesen präzisiert wird (assign slot values). Danach folgt der Experimentierprozess, der sich in Planung, Durchführung und Auswertung unterteilt. Ebenso

werden einzelne Teilkompetenzen der Modellkompetenz in den Schritten rund um das Modell angesprochen und gefördert.

4. Dynamische Modellexperimente

Der Einsatz digitaler Medien hat den Anspruch das Lehren und Lernen zu verbessern. Mit einer Vielzahl von Anwendungen kann eine Steigerung der Effizienz oder Erleichterung der Kommunikation im Lernprozess erreicht werden. Mit dem Einsatz dynamischer Modellexperimente hingegen verfolgen wir das Ziel, wichtige Schritte im Kreislauf der Erkenntnisgewinnung durch eine besondere Art der Darstellung und Interaktionsmöglichkeit zu erleichtern. Durch eine Analyse der vier Unterrichtsgegenstände, mit denen man sich im Laufe der Erkenntnisgewinnung auseinandersetzt, wird folgendes Spannungsfeld deutlich:

Beobachtungen, experimentelle Ergebnisse und Hypothesen sind an die konkrete Situation gebunden, während das Phänomen und das Modell abstrakt formuliert werden. Gleichzeitig sind Beobachtungen, Ergebnisse und Phänomene an Ereignisse in der realen Welt gebunden, während Modelle und Hypothesen als gedankliche Konstrukte zu sehen sind. Beim Durchlaufen des Kreislaufs sind also mehrere Ebenenwechsel sowohl im Abstraktionsgrad als auch im Realitätsbezug nötig (siehe Abb.2).

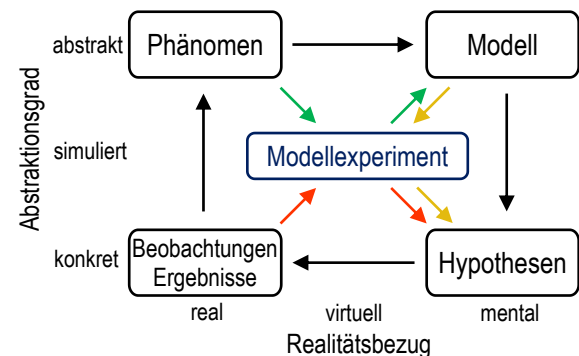


Abb.2: Dynamische Modellexperimente als Vermittler im Kreislauf der Erkenntnisgewinnung: Modell erarbeiten (grün), Modell anwenden (gelb), Modell überprüfen (rot).

An dieser Stelle lässt sich mithilfe dynamischer Modellexperimente Abhilfe schaffen. Sie sind in der virtuellen Welt angesiedelt und vermitteln zwischen dem, was real ist, und dem, was sich in dem Kopf einer Physikerin oder eines Physikers abspielt. Auf diese Weise können mithilfe dynamischer Darstellungen physikalische Denkmodelle konstruiert werden. Gleichzeitig wird in der Simulation durch Variation der Parameter eines abstrakten Modells eine explorative Lerntätigkeit ermöglicht, die konkrete Hypothesen hervorbringt. Die Gegenüberstellung von realen Ergebnissen und dem, was sich im Modellexperiment abspielt, erlaubt es schließlich das Modell zu überprüfen. Die Anwendung dieses theoretischen Konzepts wird am folgenden Beispiel zur Messung des Brechungswinkels skizziert.

In einem mit der dynamischen Geometrie-Software GeoGebra erstellten Modellexperiment kann der Lichtweg durch einen Halbkreiskörper durch Verschieben des Punktes P untersucht werden (siehe Abb.3). Je größer der Abstand vom Mittelpunkt des Halbkreiskörpers ist, desto stärker macht sich die zweifache Brechung beim Ein- und Austritt aus dem Körper bemerkbar.

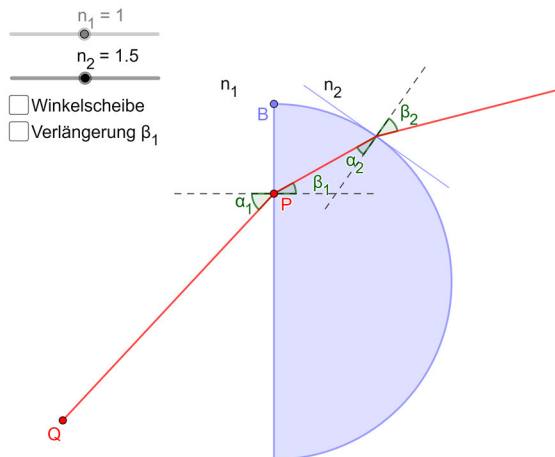


Abb.3: Dynamisches Modellexperiment zum Lichtweg durch einen Halbkreiskörper.

Was mit dem Modellexperiment gelernt werden kann, ist die Notwendigkeit, das Lichtbündel durch den Mittelpunkt des Blocks zu führen, um mit einer Winkelscheibe den Brechungswinkel beim Eintritt zu messen. Auf diese Weise wird ein Denkmodell zur Messung des Brechungswinkels erarbeitet. Gleichzeitig können durch Verschieben des Punktes Q verschiedene Brechungswinkel vorhergesagt und so das Modell angewendet werden (siehe Abb.4).

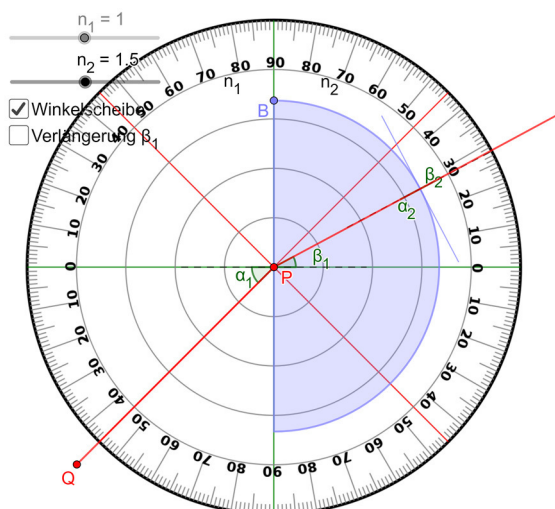


Abb.4: Einstellung zur Messung des Brechungswinkels.

Die Überprüfung der Hypothesen erfolgt anhand der Auswertung und Interpretation realer Messwerte im anschließend durchgeführten Experiment. Es besteht aber auch die Möglichkeit, diese Art dynamischer Modellexperimente direkt mit dem Experiment in Beziehung zu setzen. Im Sinne einer AR-

Anwendung (augmented reality) wird die Ansicht des Experiments mit dem hypothetischen Modell erweitert, das per Hand an die reale Situation angepasst wird. Der modellierte Lichtweg stimmt mit dem Weg des realen Laserbündels in allen Positionen bei der Einstellung der passenden Brechzahl gut überein (siehe Abb.5).



Abb.5: Überlagerung des Experiments und des Modells im Smartphone.

In diesem Anwendungsszenario stechen die Idealisierungen des Modells hervor. Zum Beispiel fehlen im Modellexperiment der reflektierte Strahl und andere Lichterscheinungen im Halbkreiskörper. Diese einfache Art einer zweidimensionalen AR-Anwendung wird realisiert, indem das Experiment von oben mit der Kamera eines Smartphones erfasst und das halbtransparente Bild in Echtzeit über das online verfügbare Modell gelegt wird.

5. Online Lernumgebung

Die theoretischen Überlegungen bildeten die Grundlage für den Aufbau einer Lernumgebung, die zur Vorbereitung auf Versuche im Praktikum der Optik eingesetzt wird. Der Kurs „Modellbildung mit GeoGebra“ wurde auf der Moodle-Lernplattform der Goethe-Universität Frankfurt aufgebaut und beinhaltet dynamische Modellexperimente und für die Studie benötigte Messinstrumente. Die physikalischen Inhalte sind zu einzelnen Lektionen zusammengefasst, die dem Kreislauf der Erkenntnisgewinnung folgen (siehe Tab.1).

Nr. Lektion	Beobachtung	Phänomen	Modell	Hypothese
1. Lichtausbreitung	Lichterscheinungen am Himmel	Schattengrenzen	Verschiedene Lichtwege über einen Punkt P	Licht nimmt zwischen zwei Punkten den kürzesten Weg.
2. Lichtreflexion	Spiegelungen im Wasser	Schattengrenzen am Spiegel	Verschiedene Lichtwege über einen Spiegel	Licht nimmt über einen Spiegel den kürzesten Weg, wobei das Reflexionsgesetz gilt.
3. Lichtbrechung	Füße im Wasser	Schattengrenzen im Plexiglaklotz	Verschiedene Lichtwege durch die Grenzfläche zwischen zwei Medien	Licht nimmt an einer Grenzfläche zwischen zwei Medien den Weg mit der kürzesten Laufzeit (qualitative Form des Brechungsgesetzes).
4.1 Halbkreiskörper	Halbkreiskörper aus Plexiglas	Zweifache Brechung am Halbkreiskörper	Lichtweg durch einen Halbkreiskörper	Licht wird beim Ein- und Austritt gebrochen. Zur Messung des Brechungswinkels beim Eintritt muss die Mitte des Halbkreiskörpers getroffen werden.
4.2 Brechungsgesetz			Winkel und Strecken am Einheitskreis	Das Produkt aus n_1 und $\sin(\alpha)$ ist gleich dem Produkt aus n_2 und $\sin(\beta)$ (quantitative Form des Brechungsgesetzes).
5.	Experimente mit Halbkreiskörpern aus Plexiglas zum Brechungsgesetz und Bestimmung der Brechzahl einer Flüssigkeit			
6.1 Totalreflexion	Aufsteigende Luftblase	Blick aus einem Aquarium	Intensitäten bei Brechung und Reflexion	Totalreflexion liegt beim Übergang von optisch dichten in optisch dünne Medien ab einem Grenzwinkel vor, bei dem der Brechungswinkel von 90° erreicht wird.
6.2 Optische Hebung	Münze im Wasser	Stich ins Wasser	Optische Hebung im Behälter	Optische Hebung hängt von Füllhöhe, Aufsichtswinkel und Brechzahl der Flüssigkeit ab.

Tab.1: Inhaltliche Übersicht der bisherigen Lektionen des Kurses.

Ausgehend von einer allgemeinen Beobachtung wird ein physikalisches Phänomen eingegrenzt. Die Studierenden arbeiten mit einem passenden dynamischen Modell und konstruieren eine Modellvorstellung des jeweiligen Phänomens. Sie wenden das Modell an, um Hypothesen und physikalische Aussagen daraus abzuleiten (Lektionen 1 bis 4). Die Hypothesen und Modellvorstellungen werden mit im Praktikum durchgeführten Experimenten überprüft (Lektion 5). Weiterführende Phänomene werden im Protokoll vertiefend behandelt (Lektion 6).

6. Forschungsfragen

Die praktische Ausgangslage für die Entwicklung eines modellbildenden Lernangebots ergibt sich aus der eingangs geschilderten Erfahrung, dass beim Lesen einer Versuchsbeschreibung einem Experiment zugrundeliegende qualitative und quantitative Zusammenhänge nicht klar werden, was die Ergebnisse im Praktikum beeinträchtigt. Die theoretische Ausgangslage lässt sich (angelehnt an das erweiterte kognitive Motivationsmodell von Heckhausen und Rheinberg [15]) folgendermaßen beschreiben: Der Lernprozess im Laufe eines Praktikumsversuches besteht aus einer

- Lernsituation** (Versuchsbeschreibung und Kolloquium), die in Verbindung mit der
- Person** (Selbstwirksamkeitserwartungen und intrinsische Motivation) keinen positiven Einfluss auf die
- Lernaktivitäten** (Vorbereitung, Durchführung und Auswertung des Experiments),
- Lernresultate** (Hypothesen, Messergebnisse, Schlussfolgerungen und Fachwissen) und

e) **Folgen** des Praktikums (Protokoll und Notenpunkte) hat.

In Verbindung mit dem entwickelten Lernangebot stellt sich daraufhin die allgemeine Forschungsfrage:

F: Welchen Einfluss haben dynamische Modellexperimente als Lernaktivität zur Vorbereitung eines Praktikumsversuches auf dessen Lernresultate?

Im Rahmen einer explorativen Evaluationsstudie muss dafür folgende, qualitative Forschungsfrage beantwortet werden:

F1: Wie gehen Studierende mit dynamischen Modellexperimenten um?

F2: Wie gestaltet sich die Hypothesenbildung anhand dynamischer Modellexperimente?

Parallel dazu soll folgende, quantitative Forschungsfrage beantwortet werden:

F3: Wie lassen sich die verschiedenen Lernresultate im Praktikum durch das spezifische Zusammenwirken der einzelnen Komponenten des Lernprozesses im Praktikum erklären?

7. Erhebungsmethoden

Für den qualitativen Teil der Arbeit werden Hypothesen in Form von Texteingaben gespeichert. An einem Präsenztage wird die Lernumgebung außerdem zur Vorbereitung einer Experimentierphase genutzt. Währenddessen werden Protokolle handschriftlich ausgefüllt, in denen Beobachtungen, experimentelle Ergebnisse sowie Schlussfolgerungen notiert werden. Vom Umgang mit den Modellen und dem Experimentiermaterial werden Bildschirm- bzw. Videoaufnahmen gemacht (siehe Abb.6).

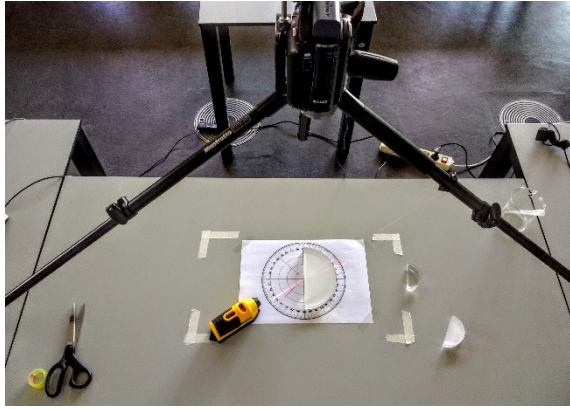


Abb.6: Experimentiertisch und Aufnahmefläche.

Zu verschiedenen Messzeitpunkten werden für den quantitativen Teil in die Lernumgebung integrierte Fragebögen ausgefüllt. Dazu gehören neben persönlicher Angaben intervallskalierte Umfragen bezüglich

- mathematischer [15], computerbezogener [16] und experimenteller Selbstwirksamkeitserwartungen [17],
- intrinsischer Motivation bei der Arbeit mit den Modellen [18],
- Bewertung der Lernumgebung zur Vorbereitung auf den Praktikumsversuch (angelehnt an die Ergänzung E-Learning der Lehrveranstaltungsevaluation der Goethe-Universität Frankfurt).

Außerdem wird das Fachwissen bezüglich der Brechung mit Items eines Rasch-skalierten Tests für die geometrische Optik erhoben [19].

Mit der Kombination der verschiedenen Erhebungsmethoden wird eine gegenseitige Ergänzung persönlicher Merkmale und bewährter Skalen mit inhaltlichen Aussagen und beobachteten Handlungsmustern angestrebt. Nach Abschluss der Erhebung wird eine qualitative, quantitative und integrative Auswertung vollständiger Datensätze aller Probanden angestrebt, um den Lernprozess im Praktikum als Ganzes und in allen Fällen zu analysieren.

Für die Auswertung der Aufnahmen während der Arbeit mit den dynamischen Modellexperimenten ist eine Kombination aus niedrig und hoch inferenten Verfahren vorgesehen. Die Lernaktivitäten werden anhand folgender deduktiv entwickelter Kriterien bewertet (siehe Tab.2).

Verfahren	Kriterium	Beispielitem
Niedrig inferent	Intensität	Bearbeitungszeit in s
	Leistung	Die Versuchsperson betätigt x von n Bedienelementen mindesten einmal.
Hoch inferent	Bereitschaft	Die Versuchsperson arbeitet aktiv mit dem Modell.
	Kompetenz	Die Versuchsperson erforscht das Modell Schritt für Schritt.

Tab.2: Beispielitems für die Einschätzung der Aufnahmen nach Kriterien mit entsprechenden Verfahren (Erweiterung möglich).

Als Ergebnis wird eine Unterteilung der Stichprobe anhand der verschiedenen Ausprägungen ihrer Lernaktivität am Modellexperiment (Vorbereitung) angestrebt und eine Abhängigkeit von den quantitativ erhobenen Personenmerkmalen explorativ untersucht. Erwartungsgemäß sollte sich eine höhere Lernaktivität am Modell am stärksten auf die Lernresultate des Versuches auswirken und als ein Prädiktor für die Qualität der restlichen Lernaktivitäten im Laufe des Experiments (Durchführung und Auswertung) zeigen.

8. Zusammenfassung

Aus unserer Sicht spielen Modelle eine große Rolle für die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung eines Experiments und die damit verbundene naturwissenschaftliche Erkenntnisgewinnung sowohl in der Forschung als auch in der Schule. Um adäquate Denkmodelle bezüglich im Physikunterricht behandelte Phänomene zu etablieren, wird der Einsatz dynamischer Modellexperimente vorgeschlagen. Mit einem Mixed-Methods-Design mit parallelen qualitativen und quantitativen Anteilen wird eine explorative Einschätzung der verständnisfördernden Wirkung dynamischer Modellexperimente beabsichtigt. Die Ergebnisse aus Befragungen und Kurztests werden mit Videoratings zum Umgang mit den Modellen und dem Experiment sowie qualitativen Aussagen der Studierenden verknüpft, um ein umfassendes Bild zu erhalten. Die darauf aufbauende Differenzierung sollte es erlauben, Lernprozesse im Laufe eines Praktikumsversuches besser zu verstehen.

9. Literatur

- [1] J. Winkelmann, Auswirkungen auf den Fachwissenszuwachs und auf affektive Schülermerkmale durch Schüler- und Demonstrationsexperimente im Physikunterricht. Berlin: Logos Verlag, 2015.
- [2] L. Muth, Einfluss der Auswertephase von Experimenten im Physikunterricht: Ergebnisse einer Interventionsstudie zum Zuwachs von Fachwissen und experimenteller Kompetenz von Schülerinnen und Schülern. Berlin: Logos Verlag, 2018.
- [3] A. Leisner, Entwicklung von Modellkompetenz im Physikunterricht: Eine Evaluationsstudie in der Sekundarstufe I. Berlin: Logos Verlag, 2005.
- [4] A. Upmeyer zu Belzen und D. Krüger, „Modellkompetenz im Biologieunterricht“, Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, Bd. 16, S. 41–57, 2010.
- [5] M. Krell, Wie Schülerinnen und Schüler biologische Modelle verstehen: Erfassung und Beschreibung des Modellverstehens von Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe I. Berlin: Logos Verlag, 2013.

- [6] A. Teichrew und R. Erb, „Entwicklung der Modellkompetenz mit dem Zeigermodell am Doppelspalt“, in *Qualitätvoller Chemie- und Physikunterricht- normative und empirische Dimensionen*, C. Maurer, Hrsg. Universität Regensburg: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Regensburg 2017, 2018, S. 816.
- [7] N. Westphal, „Evaluation von phänomenbasiertem Physikunterricht: Seine Merkmale und Wirkungen auf Stereotypen, Selbstkonzept und Interesse“, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Berlin, 2014.
- [8] H. Muckenfuß, „Retten uns die Phänomene? Anmerkungen zum Verhältnis von Wahrnehmung und Theorie.“, *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik*, Bd. 12, Nr. 63–64, S. 74–77, 2001.
- [9] P. Straube, *Modellierung und Erfassung von Kompetenzen naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung bei (Lehramts-) Studierenden im Fach Physik*. Berlin: Logos Verlag, 2016.
- [10] C. Gehlen, *Kompetenzstruktur naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung im Fach Chemie*. Berlin: Logos Verlag, 2016.
- [11] J. Mayer, „Erkenntnisgewinnung als wissenschaftliches Problemlösen“, in *Theorien in der biomedizinischen Forschung*, D. Krüger und H. Vogt, Hrsg. Springer, 2007, S. 177–186.
- [12] D. Nawrath, V. Maiseyenko, und H. Schecker, „Experimentelle Kompetenz - Ein Modell für die Unterrichtspraxis.“, *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, Bd. 60, Nr. 6, S. 42–49, 2011.
- [13] Heike Theißen, Horst Schecker, Knut Neumann, Bodo Eickhorst, und Martin Dickmann, „Messung experimenteller Kompetenz - ein computergestützter Experimentierertest -“, *PhyDid - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, Bd. 1, Nr. 15, S. 26–48, 2016.
- [14] D. Klahr und K. Dunbar, „Dual Space Search During Scientific Reasoning“, *Cognitive Science*, Bd. 12, Nr. 1, S. 1–48, 1988.
- [15] C. Bescherer, *Selbsteinschätzung mathematischer Studierfähigkeit von Studienanfängerinnen und -anfängern. Empirische Untersuchung und praktische Konsequenz*. 2003.
- [16] C. Spannagel und C. Bescherer, „Computerbezogene Selbstwirksamkeitserwartung in Lehrveranstaltungen mit Computernutzung“, *Notes on Educational Informatics - Section A: Concepts and Techniques*, 5(1), S. 23–43, 2009.
- [17] H.-D. Körner und S. Ihringer, „Selbstwirksamkeit beim Experimentieren – Mädchen und Jungen in den Naturwissenschaften“, in *Vielfalt geschlechtergerechten Unterrichts: Ideen und konkrete Umsetzungsbeispiele für die Sekun-*
darstufen, 1. Aufl., C. Wiepcke und M. Kampshoff, Hrsg. Berlin: epubli, 2016, S. 106–140.
- [18] M. Wilde, K. Bätz, A. Kovaleva, und D. Urhahne, „Überprüfung einer Kurzskala intrinsischer Motivation (KIM)“, *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, Bd. 15, 2009.
- [19] J. Weber, J. Winkelmann, R. Erb, F. Wenzel, M. Ullrich, und H. Holger, „Ein Fachwissenschaftstest zur geometrischen Optik“, in *Implementations fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis*, C. Maurer, Hrsg. Universität Regensburg: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Zürich 2016, 2017, S. 107.

Experimentelle Fähigkeiten in der Grundschule diagnostizieren und individuell fördern

Rasmus Viefers*, Heike Theyßen*, Nico Schreiber*

*Universität Duisburg- Essen

rasmus.viefers@uni-due.de, heike.theysen@uni-due.de, nico.schreiber@uni-due.de

Kurzfassung

Bereits im Grundschulalter sollen Schülerinnen und Schüler experimentelle Fähigkeiten erwerben. Dazu gehört u. a. die Variablenkontrollstrategie (VKS). Untersuchungen konnten zeigen, dass die VKS bereits in der Grundschule vermittelbar ist. Allerdings sind der Erwerb und die Anwendung mit einer hohen kognitiven Belastung verbunden. Zur Reduzierung der kognitiven Belastung bieten sich als Unterstützungsangebote beispielsweise gestufte Lernhilfen oder Lösungsbeispiele an. Eine Gemeinsamkeit dieser Unterstützungsangebote ist, dass beide die Selbstregulationsfähigkeit der Schülerinnen und Schüler fördern. Unterschiede liegen insbesondere in dem Ausmaß der Autonomie, die die Schülerinnen und Schüler bei der Nutzung der Unterstützungsangebote erleben können. Daher werden beide Unterstützungsangebote hinsichtlich ihrer Wirkung auf die individuelle Förderung experimenteller Fähigkeiten, differenziert nach Lernvoraussetzungen (z. B. Leseverständnis, Selbstregulationsfähigkeit, Vorwissen), in der Grundschule kontrastierend untersucht. Dafür wurde ein Testinstrument zur Erfassung der VKS bei Grundschulkindern entwickelt, das neben einem schriftlichen Teil auch einen hands-on Teil enthält.

1. Einleitung

Bereits in der Grundschule sollen die Schülerinnen und Schüler im Sachunterricht eigenständig Experimente planen und durchführen (GDSU, 2013, S. 40). Dabei sollen experimentelle Fähigkeiten erworben werden. Diese Fähigkeiten können in den Phasen der Planung, Durchführung und Auswertung verortet werden (z.B. Emden & Sumfleth, 2016). Damit sind unterschiedliche Konzepte verknüpft (Übersicht z.B. bei Vorholzer, von Aufschnaiter, & Kirschner, 2016). Ein zentrales Konzept ist die Variablenkontrollstrategie (VKS), die in allen drei Phasen relevant ist (z. B. Kalthoff, Theyßen & Schreiber, 2018). Insofern ist es wenig verwunderlich, dass das Konzept der VKS schon in der Grundschule erworben werden soll (s. GDSU, 2013, S. 40).

Der Erwerb der VKS ist allerdings mit Lernaufgaben verbunden, die häufig zu einer erhöhten kognitiven Belastung führen (Schwichow, 2015, S.86). Außerdem konnte gezeigt werden, dass Schülerinnen und Schüler bis hinein in die Sekundarstufe I die VKS selten korrekt anwenden (Bullock & Sodian, 2003). Folglich sind beim Lernen der VKS Unterstützungsangebote wünschenswert, die die Schülerinnen und Schüler kognitiv entlasten und die Anwendung der VKS beim Experimentieren erleichtern. Diese Kriterien erfüllen z. B. das Lernen mit gestuften Lernhilfen und das Lernen mit Lösungsbeispielen. Beide Unterstützungsangebote werden bereits in der Primarstufe eingesetzt und sind Gegenstand der hier beschriebenen Studie.

2. Lernen mit gestuften Lernhilfen und Lösungsbeispielen - Grundlagen

Lösungsbeispiele zeigen zu einer Aufgabenstellung die einzelnen Lösungsschritte auf, die schließlich zur Lösung der Aufgabenstellung führen (Renkl, Gruber, Weber, Lerche & Schweizer, 2003, S.94). Dadurch soll deutlich werden, wie ähnliche Aufgabenstellungen von den Lernenden selbst gelöst werden können (ebd.). Zusätzliche Prompts fordern die Schülerinnen und Schüler zur Selbsterklärung auf, indem sie den Text des Lösungsbeispiels reflektieren und nochmals die wichtigsten Informationen in eigenen Worten wiedergeben sollen (Renkl, 2014).

Dagegen erhalten Lernende beim Lernen mit gestuften Hilfen neben der Aufgabenstellung nur gestufte Hilfekarten, die sie bei Bedarf selber auswählen müssen. Folglich entscheiden die Lernenden selbst über Zeitpunkt und Nutzung der Hilfekarten (Franke-Braun, Schmidt-Weingand, Stäudel & Wodzinski, 2008).

Beide Unterstützungsangebote wurden in verschiedenen Studien mit Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe I untersucht (Lösungsbeispiele: vgl. z.B. Baumann, 2014; Koenen, 2014; Schmidt-Bocherding, Hänze, Wodzinski & Rincke, 2013; gestufte Lernhilfen: vgl. z.B. Franke- Braun, 2008; Schmidt-Bocherding et al., 2013). Dabei zeigte sich, dass die Unterstützungsangebote durch ihre Struktur und ihren Aufbau zu einer Reduzierung der kognitiven Belastung beitragen (Lösungsbeispiele: vgl. z.B. Niegemann, Hessel, Hein, Hupfer & Zobel, 2008, S.47; gestufte Lernhilfen: vgl. z.B. Franke- Braun,

2008, S.74). Außerdem kann im Kontext des Experimentierens ein Lernzuwachs durch das Arbeiten mit gestuften Lernhilfen und Lösungsbeispielen nachgewiesen werden, allerdings kein Unterschied im Lernzuwachs zwischen beiden Unterstützungsangeboten (Schmidt-Borcherding et al., 2013). Ein Grund dafür könnte sein, dass bei der Analyse die verschiedenen Lernvoraussetzungen der Lernenden unberücksichtigt geblieben sind. Denn unterschiedliche Lernvoraussetzungen können einen Einfluss auf den Lernerfolg, z. B. beim Lernen mit Lösungsbeispielen, haben.

Ein Beispiel dafür ist der expertise reversal effect, der in mehreren Studien nachgewiesen werden konnte (s. z. B. Kalyuga, 2007; Kalyuga, Ayres, Chandler & Sweller, 2003; Spanjers, Wouters, van Gog, van Merriënboer, 2011). So vergleichen Kalyuga & Sweller (2004) den Lernerfolg in gut geführten Lösungsbeispielen und eher offenen Problemlöseaufgaben unter Berücksichtigung des Vorwissens der Lernenden. Das Ergebnis zeigt, dass Lernende mit geringerem Vorwissen eher von den geführten Lösungsbeispielen, Lernende mit höherem Vorwissen eher von den Problemlöseaufgaben profitieren.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Lösungsbeispielen und gestuften Lernhilfen ist der Grad der Führung der Lernenden. Beim Arbeiten mit Lösungsbeispielen werden den Lernenden der Lösungsweg und die Lösung der Aufgabenstellung weitestgehend vorgegeben. Beim Arbeiten mit gestuften Lernhilfen müssen die Lernenden selbstständig die Lösung erarbeiten und dazu, wenn nötig, auf Hilfekarten zurückzugreifen.

Es lässt sich vermuten, dass der unterschiedliche Grad an Führung beider Unterstützungsangebote sich in der Autonomie und in dem notwendigen Maß an Selbstregulation, welches für ein erfolgreiches Lernen mit dem Arbeitsmaterial nötig ist, niederschlägt.

Fazit: In der Grundschule soll das Konzept der VKS gefördert werden. Als Unterstützungsangebote bieten sich gestufte Lernhilfen und Lösungsbeispiele an. Deren Lernwirksamkeit hängt potenziell von den Lernvoraussetzungen der Kinder ab. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund heterogener Lerngruppen relevant, in denen beispielsweise manche Lernende von der Autonomie beim Arbeiten mit gestuften Lernhilfen überfordert und andere Lernende bei der Bearbeitung von Lösungsbeispielen unterfordert sein könnten. Folglich sind die Unterstützungsangebote in Abhängigkeit von den Lernvoraussetzungen zu unterbreiten.

3. Ziel und Fragestellung

Das Ziel der vorliegenden Studie ist zu zeigen, dass Schülerinnen und Schüler durch die Unterstützungsangebote gestufte Lernhilfen und Lösungsbeispiele unterschiedlich stark beim Erwerb der VKS geför-

dert werden können, in Abhängigkeit von ihren Lernvoraussetzungen. Um das Ziel zu erreichen, wird die folgende Fragestellung bearbeitet: „Wie wirkt das Lernen mit gestuften Lernhilfen und Lösungsbeispielen auf den Erwerb der VKS unter Berücksichtigung unterschiedlicher Lernvoraussetzungen in der Grundschule?“

4. Studiendesign

Der Fragestellung soll mit einer Interventionsstudie mit zwei Interventionsgruppen im Prä-Post Design nachgegangen werden (s. Abb. 1).

Vortest (90 Minuten)		
Variablenkontrollstrategie (schriftlich/ hands-on)		KV 1
Intervention (2 x 90 Minuten)		Prozessdaten
Lösungsbeispiele zu Experimenten mit VKS	gestufte Lernhilfe zu Experimenten mit VKS	Nutzung Motivation cognitive load
Nachtest (90 Minuten)		
Variablenkontrollstrategie (schriftlich/ hands-on)		KV 2

Abb. 1: Übersicht über das Studiendesign (Ablauf, Interventionen und Variablen; KV1 und KV2: Kontrollvariablen, Details siehe Text)

Die Gesamtdauer der Erhebungen beträgt vier Doppelstunden. Dabei entfällt jeweils eine Doppelstunde auf den Vor- bzw. Nachtest. Hier werden neben einem Test zur VKS mehrere Kontrollvariablen zur Erhebung der Lernvoraussetzungen erfasst. Diese werden verteilt auf Vor- und Nachtest:

Im Vortest (KV 1):

- Alter
- Selbstkonzept (adaptiert nach Brell, 2008)
- Selbstregulationsfähigkeit (gekürzter/ adaptierter FSL-7 Test; Ziegler, Stöger & Grassinger, 2010)

Im Nachtest (KV 2):

- Lesefähigkeit (Teilskalen des ELFE Leseverständnistests; Lenhard & Schneider, 2006)

Die anderen beiden Doppelstunden entfallen auf die Intervention. In der Intervention arbeiten die Schülerinnen und Schüler in Partnerarbeit entweder mit Lösungsbeispielen oder mit gestuften Lernhilfen. Bei der Bearbeitung des Materials werden mit Kurzskalen Prozessdaten zur situationalen Motivation und zur kognitiven Belastung erhoben. Auch diese Variablen werden zur Beschreibung der Lernvoraussetzungen der Lernenden genutzt.

4.1. Interventionen

Folgt man Chen & Klahr (1999) und Schwichow (2015), umfasst die VKS vier Facetten:

- Die *Planung* variablenkontrollierter Experimente,
- die *Interpretation* von Daten aus variablenkontrollierten Experimenten,
- die *Identifikation* von variablenkontrollierten Experimenten und

- das *Verständnis* der fehlenden Aussagekraft konfundierter Experimente.

Durch die Interventionen sollen diese vier Facetten gefördert werden. Dazu haben die Schülerinnen und Schüler in beiden Interventionsgruppen die Möglichkeit, schriftliche Aufgaben und Experimentieraufgaben zur VKS in Partnerarbeit zu bearbeiten. Dabei werden ihnen verschiedene Aufgaben gestellt, die die verschiedenen Facetten der VKS fördern.

Die Aufgaben und Experimente sind eingebettet in vier Themen: Marmelbahnen, Federn, Brausetabletten und Schaukeln. Bei jedem Thema können drei Variablen verändert werden (vgl. Tabelle 1). In dem Arbeitsmaterial zu den Themen werden jeweils zwei dieser Variablen explizit auf ihren Einfluss auf das Experiment untersucht.

Thema	Mögliche Variablen
Marmelbahnen	Höhe der Bahn* Boden der Bahn* Größe der Marmel
Federn	Länge der Feder* Breite der Feder* Größe des angehängten Gewichts
Brausetabletten	Temperatur des Wassers* Menge des Wassers* Art der Tablette
Schaukeln	Länge des Seils* Masse des angehängten Gewichts* Größe der Auslenkung

Tabelle 1: Variablen der Experimente (* in Arbeitsmaterial untersucht)

Im Folgenden wird dargestellt, wie die Intervention in Abhängigkeit vom Unterstützungsangebot – Lösungsbeispiel (4.1.1) und gestufte Lernhilfe (4.1.2) – gestaltet wurde.

4.1.1. Lösungsbeispiele


Für jedes Thema wurden die Aufgaben und Experimente in ein Lösungsbeispiel integriert. Die Gestaltung der Lösungsbeispiele orientiert sich an bekannten Gestaltungskriterien (Nummern vgl. Abb. 2):

- Coverstory mit Identifikationsmöglichkeiten (1)
- Verknüpfen von Textinhalten und Bildstrukturen (2)
- Farbliches Hervorheben zentraler Begriffe (3)
- Zusammenfassung der Handlungsschritte durch Protagonisten (4)
- Anregung zur Selbsterklärung durch Prompts (5)
- Einteilung in Sinnabschnitte (Einteilung des Experiments in verschiedene Sinnabschnitte. Je Abschnitt eine neue Seite)

(Übersicht nach Schübler, 2017 basierend auf u.a. Kölbach, 2011; Mayer, 2009; Renkel, 2014)

Die Umsetzung der Gestaltungskriterien ist der folgenden, exemplarischen Abbildung 2 zu entnehmen.

Tom: „Okay, wir wissen jetzt, dass die Marmel schneller das Ende einer Bahn erreicht, wenn der Boden glatt ist und wenn die Bahn hoch ist. Hätten wir das nicht auch mit einem einzigen Vergleich herausfinden können? Wir hätten direkt eine niedrige Bahn mit welligem Boden und eine hohe Bahn mit glattem Boden vergleichen können.“ (1)



Suse: „Das ist keine gute Idee! Überlegen wir mal zusammen! Was hättest du bei deinem Vergleich beobachtet?“ (2)

Tom: „Ich hätte beobachtet, dass die Marmel auf der glatten hohen Bahn schneller das Ende der Bahn erreicht.“

Suse: „Genau! Und wie würdest du dann unsere erste Frage beantworten? Bestimmt der Boden, wie schnell eine Marmel das Ende der Bahn erreicht?“ (3)

Tom: „Ja, die Marmel ist auf der Bahn mit dem glatten Boden schneller unten.“

Suse: „Das kann aber auch daran liegen, dass die Bahn höher ist. Wir haben doch bei unserem zweiten Vergleich herausgefunden, dass die Marmel bei einer höheren Bahn schneller das Ende der Bahn erreicht.“

Tom: „Stimmt. Dann weiß ich ja gar nicht, ob die Höhe auch wichtig ist.“

Suse: „Genau. Deshalb müssen wir zwei Vergleiche machen. Einmal muss man den Boden der Bahn untersuchen. Dazu muss die Höhe bei beiden Bahnen gleich sein. Die Böden der Bahnen müssen sich aber unterscheiden. Und einmal muss man die Höhe der Bahn untersuchen. Dazu müssen die Böden der Bahnen gleich sein. Die Höhe der Bahnen muss sich aber unterscheiden.“ (4)

Aufgabe:

Begründe, warum Suse findet, dass Toms Idee nicht gut ist! Was Tom und Suse oben besprochen haben, hilft dir bei der Antwort. (5)

Suse findet Toms Idee nicht gut, weil...

Abb. 2: Beispielsseite aus dem Lösungsbeispiel Marmelbahnen (Nummern verweisen auf Gestaltungskriterien; vgl. Text)

4.1.2. Gestufte Lernhilfen

Wie bei den Lösungsbeispielen wurden die Aufgaben und Experimente in Lernmaterial mit gestuften Lernhilfen integriert. Hierbei wurde auf eine möglichst große Passung zwischen den beiden Angeboten geachtet. Zum einen sind die zu bearbeitenden Aufgaben dieselben. Zum anderen wurden die Aufgaben ebenfalls in eine Coverstory mit passenden Bildstrukturen eingebettet. Im Gegensatz zu der Intervention „Lösungsbeispiele“ wird dadurch aber kein Hinweis gegeben, wie die Aufgabe zu lösen ist.

Für die Bearbeitung der Aufgaben und Experimente erhalten die Schülerinnen und Schüler gestufte Hilfefkarten. Bei der Gestaltung der Hilfefkarten wurden folgende Kriterien berücksichtigt (Nummern vgl. Abb. 3):

- Paraphrasieren der Aufgabe (1)
- Fokussierung auf wichtige Textstellen (2)
- Visualisierung des Erarbeiteten (3)
- Elaborierung von Unterzielen (4)
- Aktivierung von Vorwissen (wenn dies mit Rückbezug auf bereits gelöste Aufgaben möglich ist)

(Hänze, Schmidt-Weigand. & Stäudel, 2010; Schmidt-Weigand, Franke-Braun & Hänze, 2008)

Die Umsetzung der Gestaltungskriterien ist der folgenden, exemplarischen Abbildung 3 zu entnehmen.

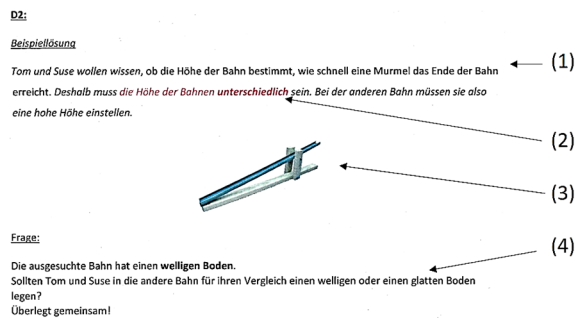


Abb. 3: Exemplarische Hilfefkarte zu Murmelbahnen (Nummern verweisen auf Gestaltungskriterien; vgl. Text)

Wenn die Aufgaben und Experimente beendet wurden, sind die Schülerinnen und Schüler aufgefordert, ihre Lösung mit Hilfe einer Musterlösung zu überprüfen. Die Musterlösung erhält alle Informationen, die auch im Lösungsbeispiel enthalten sind. Dadurch soll sichergestellt werden, dass alle Schülerinnen und Schüler unabhängig von ihrer Interventionsgruppenzugehörigkeit dieselben Informationen zur VKS erhalten.

4.2. VKS- Test

Der Test zur Erfassung der VKS sollte alle in 4.1 beschriebenen Facetten der VKS abdecken. Zudem sollte er neben schriftlichen Anteilen auch hands-on Anteile enthalten, um die Fähigkeit der Schülerinnen und Schüler zur Umsetzung der VKS im praktischen Handeln zu erfassen (insb. Facette der Planung). Des Weiteren sollte der VKS Test für die Testung von Dritt- und Viertklässlern geeignet sein und eine gewisse Passung zu der von uns geplanten Intervention aufweisen.

In einer Literaturrecherche konnten einige Tests zur Erfassung der VKS identifiziert werden (z. B. Bullock & Sodian 2003; Bohrmann 2017; Chen & Klahr, 1999; Schwichow, 2015; Vorholzer 2016).

Diese Tests erfüllten die von uns gestellten Kriterien jeweils nur teilweise.

Einige der Tests wurden für eine andere Zielgruppe konzipiert (Schwichow, 2015; Vorholzer 2016). Bei anderen Tests fehlten die von uns gewünschte Passung zu der Intervention (Bullock & Sodian, 2003; Chen & Klahr, 1991).

Auch der Test von Bohrmann (2017) konnte nicht herangezogen werden, da er zu kurz vor dem Beginn der Hauptstudie publiziert wurde. Die gefundenen Tests enthielten zudem keine, nur teilweise oder nicht zur Intervention passende hands-on Anteile. Daher wurde ein neuer VKS Test konzipiert, der die genannten Kriterien erfüllt.

Bei der Konzeption der Items orientierten wir uns an den in 4.1. vorgestellten vier Facetten. Für die schriftlichen Items lehnten wir uns an den Test von Schwichow (2015) an, der sprachlich an die Ziel-

gruppe (3./ 4. Jahrgangsstufe) und an die Kontexte der Intervention angepasst wurde. Die hands- on Items wurden neu entwickelt. Im Folgenden werden die Überlegungen zur Testentwicklung dargestellt und an jeweils einem exemplarischen Item verdeutlicht.

Der Test enthält zu zwei Themengebieten (Murmeln, Stromkreise) jeweils sechs schriftliche und drei hands- on Items, also insgesamt 18 Items. Am Ende jedes Items sollen die Schülerinnen und Schüler angeben, ob sie sich bei ihrer Antwort (bei den schriftlichen Items) oder bei ihrem experimentellen Aufbau (hands-on Items) sicher oder unsicher sind. Diese angegebene Sicherheit kann in der Auswertung als zusätzliches Kriterium herangezogen werden.

4.2.1. Schriftliche Items

Bei schriftlichen Items wird zwischen zwei Typen unterschieden (Typ 1 und Typ 2). Beide werden im Folgenden vorgestellt.

Schriftliche Items Typ 1

In diesen Items erhalten die Schülerinnen und Schüler im Itemstamm eine Frage, z. B.: „Bestimmt die Höhe einer Bahn, wie schnell eine Murmel rollt?“ Darunter finden sie vier unterschiedliche Vergleichsexperimente. Ein Vergleichsexperiment besteht aus zwei Aufbauten. An beiden Aufbauten soll das Experiment gleichzeitig durchgeführt und beobachtet werden. Die Schülerinnen und Schüler haben die Aufgabe, das Vergleichsexperiment auszuwählen, mit dem die Frage beantwortet werden kann. Um diese Items richtig zu lösen, muss von den Schülerinnen und Schülern das passende Vergleichsexperiment ausgewählt werden (Facette *Identifikation*) und sie müssen verstanden haben, dass konfundierte Experimente keine Beantwortung der Frage zulassen (Facette *Verständnis*).

In Abb. 4 ist ein exemplarisches Item dargestellt.

Neben einer richtigen Antwortmöglichkeit existieren drei Distraktoren, die in folgender Systematik konstruiert sind:

- Ein einfach konfundierter Vergleich, hier ist neben der unabhängigen Variable eine weitere verändert.
- Ein zweifach konfundierter Vergleich, hier sind neben der unabhängigen Variable zwei weitere Variablen verändert.
- Ein Vergleich, mit dem eine andere Variable als die unabhängigen Variable untersucht werden kann.

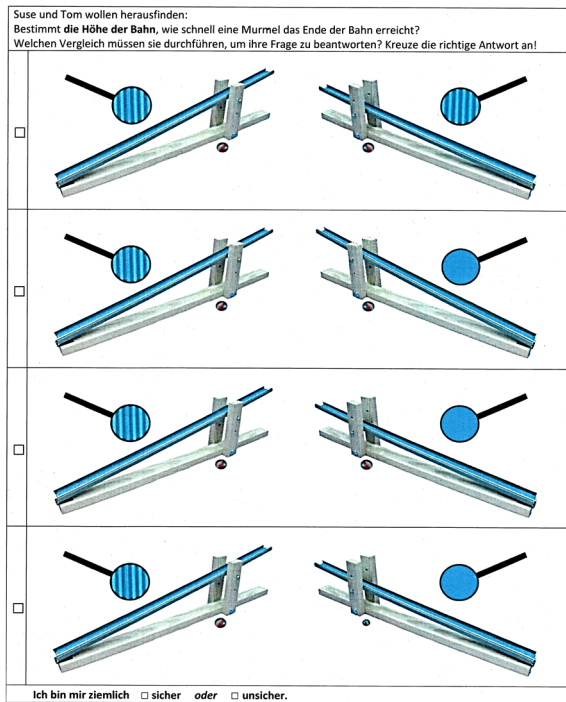


Abb. 4: Beispiel für ein schriftliches Item Typ 1

Schriftliche Items Typ 2

Bei diesen Items erhalten die Schülerinnen und Schüler das Bild eines Vergleichsexperiments, in dem eine Beobachtung gemacht werden kann (s. Beispiel in Abb. 5).

Aus dieser Beobachtung sollen sie geeignete Schlüsse ziehen. Dazu finden die Schülerinnen und Schüler unter dem Bild drei mögliche Schlussfolgerungen zur Auswahl. Als vierte Möglichkeit kann ausgewählt werden, dass keine der genannten Schlussfolgerungen aus der Beobachtung gezogen werden kann. Es existieren für jedes Themengebiet drei Subtypen dieser Items, je nachdem welches Vergleichsexperiment gezeigt wird:

- Variablenkontrolliertes Vergleichsexperiment: Hier kann eine Schlussfolgerung gezogen werden. Es ist die richtige Schlussfolgerung auszuwählen (Facette *Interpretation*).
- Konfundiertes Vergleichsexperiment: Hier muss erkannt werden, dass keine Beobachtung gemacht werden kann (Facette *Verständnis*).
- Vergleichsexperiment, bei dem beide Aufbauten identisch sind. Auch hier muss erkannt werden, dass keine Schlussfolgerung gezogen werden kann (Facette *Verständnis*).

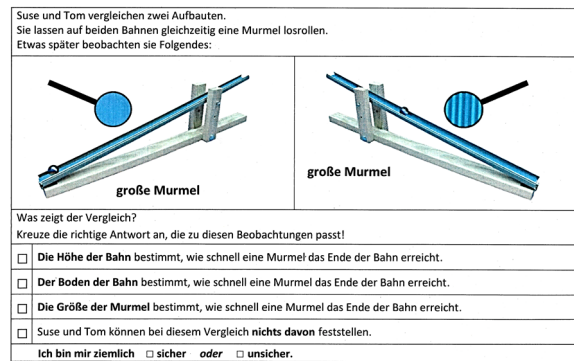


Abb. 5: Beispiel für ein schriftliches Item Typ 2

4.2.2. hand- on Items

Bei den hands-on Items sollen die Schülerinnen und Schüler ein Vergleichsexperiment aufbauen, mit dem eine vorgegebene Vermutung überprüft werden kann (s. Beispiel in Abb. 6), und dieses Experiment durchführen.

Die Hälfte des Vergleichsexperiments ist vorgegeben und bereits aufgebaut. In dem Beispiel wäre dies eine Murmelbahn auf einer bestimmten Höhe mit festgelegtem Boden und Murmel. Die Schülerinnen und Schüler sollen nun eine zweite Murmelbahn so aufbauen, dass sie damit die in dem Item vorgegebene Vermutung durch einen Vergleich überprüfen können. Anschließend sollen die Schülerinnen und Schüler das Vergleichsexperiment durchführen.

Als Ergebnis geben sie an, welche Beobachtung sie gemacht haben. Ausgewertet wird nur die Berücksichtigung der Variablenkontrolle beim Vergleich (Facette *Planung*)¹. Dazu werden die für den Vergleich ausgewählten Materialien und die aufgebaute Anordnung von Testleiterinnen und Testleitern in einer Tabelle erfasst und fotografiert.

Suse und Tom vermuten:

„Der Boden der Bahn bestimmt, wie schnell eine Murmel das Ende der Bahn erreicht.“

Sie möchten ihre Vermutung mit einem Vergleich überprüfen. Eine Murmelbahn haben sie schon aufgebaut.

Aufgabe:



Hilf Tom und Suse!
Baue den Vergleich vollständig auf. Nutze die Materialien aus der Box! Führe dann den Vergleich durch!

Abb. 6: Beispiel für ein hands-on Item

¹ Die Richtigkeit der Beobachtung wird nicht ausgewertet, weil hier durch falsche Berücksichtigung der VKS Folgefehler entstehen können. Deshalb wird auch nicht verlangt, dass die Schülerinnen und Schüler Schlussfolgerungen aus der Beobachtung ziehen.

5. Pilotierung

Intervention und VKS Test wurden pilotiert. Die Pilotierungen werden im Folgenden beschrieben und die Pilotierungsergebnisse berichtet.

5.1. Erste Pilotierung

Die erste Pilotierung diente der Erprobung der Interventionen und der schriftlichen Tests im Prä-Post Design. In der hier eingesetzten Version enthielt der Test noch Items zu vier Themengebieten (Schaukeln, Marmelbahnen und Federn als Themengebiete der Intervention und als nicht behandeltes Themengebiete Stromkreise), die auf zwei Testheftversionen aufgeteilt wurden (vgl. Tabelle 2). Für jedes Themengebiete existierten, wie in der Hauptstudie, drei schriftliche Items Typ 1 und drei schriftliche Items Typ 2.

Thema	Testheft A	Testheft B
Schaukeln	x	x
Stromkreise	x	x
Marmelbahnen	x	-
Federn	-	x

Tabelle 2: Verteilung der Themen auf Testhefte (x: in Testheft enthalten)

Die Testdauer betrug, wie in der Hauptstudie, zwei Doppelstunden, die Interventionsdauer ebenfalls zwei Doppelstunden (s. Abb. 1). Die Stichprobe umfasste 81 Schülerinnen und Schüler der dritten Klasse kurz vor den Sommerferien, von denen 56 vollständige Datensätze gewonnen werden konnten.

Die Bearbeitungszeit wurde sowohl in der Intervention als auch in dem Test eingehalten. Während der Bearbeitung wurden wenige Rückfragen oder Verständnisfragen geäußert.

Für die Berechnung der Testergebnisse wurde ein Item dann als richtig angesehen, wenn die Antwort richtig war. Die Sicherheit wurde nicht berücksichtigt. Die Testergebnisse zeigen keine Boden- oder Deckeneffekte und die Reliabilitäten sind für beide Testhefte und für Prä- und Posttest zufriedenstellend (Prä: $a > .78$ / Post: $a > .87$). Auch die statistische Analyse zeigte einen signifikanten Lernzuwachs. Eine genauere Übersicht findet sich in Abbildung 7.

Auch eine Auswahl von Items zeigt bereits zufriedenstellende Reliabilitäten. Daher wurde zur Reduzierung der Testzeit für die zweite Pilotierung und die Hauptstudie ein Testheft zusammengestellt, das nur die Items zu den Themengebieten Stromkreise und Marmelbahnen enthält. Mit dem Thema Stromkreise ist ein Thema vertreten, das in der Intervention nicht behandelt wird und somit eine Transferleistung erfordert. Das Thema Marmelbahnen wurde ausgewählt, weil es in der Intervention von allen Schülerinnen und Schüler bearbeitet worden sein sollte und die Details der Experimente in der foto-

grafischen Darstellung besonders gut erkennbar sind.

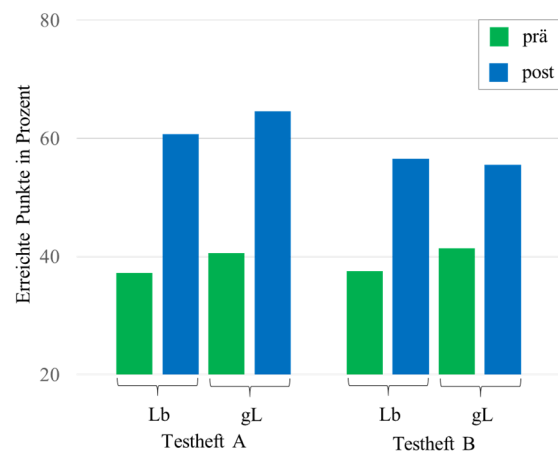


Abb. 7: Erreichte Punktzahl in Prozent (Mittelwerte) getrennt nach Testheften, Interventionen (Lb: Lösungsbeispiele, gL: gestufte Lernhilfen) sowie Prätest und Posttest

5.2. Zweite Pilotierung

In der zweiten Pilotierung wurde der vollständige VKS Test eingesetzt: der hands-on Anteil sowie der auf zwei Themen reduzierte schriftliche Anteil. Die zweite Pilotierung diente primär der Erprobung des hands-on Anteils und der damit verbundenen Logistik. Die Testdauer betrug eine Doppelstunde. Die Stichprobe umfasste dieselben 81 Schülerinnen und Schüler wie in der ersten Pilotierung, die inzwischen nach den Sommerferien die vierte Klasse besuchten. Es konnten 65 vollständige Datensätze gewonnen werden. Auch hier wurde die angegebene Sicherheit nicht in die Auswertung aufgenommen.

Auch bei dieser Pilotierung traten keine Decken- oder Bodeneffekte auf und bei der Durchführung gab es wenige Nachfragen. Die Reliabilität des Gesamttests ist mit $a = .86$ zufriedenstellend (Pilotierung II: schriftlicher Teil: $a = .87$; hands-on Teil: $a = .72$).

5.3. Fazit der Pilotierungen

Durch die Pilotierung konnte gezeigt werden, dass sowohl durch das Lernen mit gestuften Lernhilfen als auch durch das Lernen mit Lösungsbeispielen eine Förderung der VKS in der Grundschule möglich ist. Die Ergebnisse untermauern die Ergebnisse der Studie von Schmidt-Borcherding et al. (2013), die ebenfalls eine Lernwirksamkeit der beiden Unterstützungsangebote feststellen konnten und keinen Unterschied der Lernwirksamkeit zwischen den Unterstützungsangeboten.

Aufgrund der zufriedenstellenden Testkennwerte wurde entschieden, den VKS-Test der zweiten Pilotierung für die Hauptstudie zu nutzen.

6. Ausblick

In der zurzeit laufenden Hauptstudie wird die Wirkung der Intervention unter Berücksichtigung der Lernvoraussetzungen im Prä-Post Design durch den VKS-Test untersucht. Insgesamt wird eine Stichprobe von ca. 200 Schülerinnen und Schülern der vierten Klasse angestrebt. Mit dieser vergrößerten Stichprobe erhoffen wir uns nicht nur Aussagen über die Lernwirksamkeit der Unterstützungsangebote machen zu können, sondern auch den Zusammenhang der unterschiedlichen Lernvoraussetzungen mit der Wirksamkeit der Angebote näher untersuchen zu können, um die eingangs formulierte Fragestellung zu beantworten.

7. Literatur

- Baumann, S. (2014). *Selbständiges Experimentieren und konzeptuelles Lernen mit Beispielaufgaben in Biologie* (Biologie lernen und lehren, Bd. 8). Diss.-Universität Duisburg-Essen, 2013. Berlin: Logos.
- Bohrmann, M. (2017). *Zur Förderung des Verständnisses der Variablenkontrolle im naturwissenschaftlichen Sachunterricht* (Studien zum Physik- und Chemielernen, Bd. 235). Berlin: Logos.
- Brell, C. (2008). *Lernmedien und Lernerfolg - reale und virtuelle Materialien im Physikunterricht. Empirische Untersuchungen in achten Klassen an Gymnasien (Laborstudie) zum Computereinsatz mit Simulation und IBE* (Studien zum Physik- und Chemielernen, Bd. 74). Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2007. Berlin: Logos.
- Bullock, M. & Sodian, B. (2003). Entwicklung des wissenschaftlichen Denkens. In W. Schneider & F. E. Weinert (Hrsg.), *Entwicklung, Lehren und Lernen. Zum Gedenken an Franz Emanuel Weinert* (1. Aufl., S.75-92). Göttingen u.a.: Hogrefe-Verlag GmbH & Co. KG.
- Chen, Z. & Klahr, D. (1999). All Other Things Being Equal. Acquisition and Transfer of the Control of Variables Strategy. *Child Development*, 70 (5), 1098-1120.
- Emden, M. & Sumfleth, E. (2016). Assessing students' experimentation processes in guide inquiry. *International Journal of Science and Mathematics Education* (14), 29-54.
- Franke-Braun, G. (2008). *Aufgaben mit gestuften Lernhilfen. Ein Aufgabenformat zur Förderung der sachbezogenen Kommunikation und Lernleistung für den naturwissenschaftlichen Unterricht* (Studien zum Physik- und Chemielernen, Bd. 88). Univ., Diss.-Kassel, 2008. Berlin: Logos.
- Franke-Braun, G., Schmidt-Weigand, F., Stäudel, L. & Wodzinski, R. (2008). Aufgaben mit gestuften Lernhilfen- ein besonderes Aufgabenformat zu kognitiven Aktivierung der Schülerinnen und Schüler und zur Intensivierung der sachbezogenen Kommunikation. In *Lernumgebungen auf dem Prüfstand. Zwischenergebnisse aus den Forschungsprojekten* (Lehren - Lernen - Literacy, Bd. 2, S.27-42). Kassel: Kassel Univ. Press.
- Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts. (2013). *Perspektivrahmen Sachunterricht* (Vollständig überarbeitete und erweiterte Ausgabe). Bad Heilbrunn: Verlag Julius Klinkhardt.
- Hänze, M., Schmidt-Weigand, F. & Stäudel, L. (2010). Gestufte Lernhilfen. In S. Boller (Hrsg.), *Innere Differenzierung in der Sekundarstufe II. Ein Praxishandbuch für Lehrer/innen* (Pädagogik, S.63-73). Weinheim u.a.: Beltz.
- Kalthoff, B., Theyßen, H. & Schreiber, N. (2018). Explicit Promotion of Experimental Skills. And What About the Content- Related Skills? *International Journal of Science Education*.
- Kalyuga, S. (2007). Expertise Reversal Effect and Its Implications for Learner-Tailored Instruction. *Educational Psychology Review*, 19 (4), 509-539.
- Kalyuga, S., Ayres, P., Chandler, P. & Sweller, J. (2003). The Expertise Reversal Effect. *Educational Psychologist*, 38 (1), 23-31
- Kalyuga, S. & Sweller, J. (2004). Measuring Knowledge to Optimize Cognitive Load Factors During Instruction. *Journal of Educational Psychology*, 96 (3), 558-568.
- Koenen, J. (2014). *Entwicklung und Evaluation von experimentunterstützten Lösungsbeispielen zur Förderung naturwissenschaftlich-experimenteller Arbeitsweisen* (Studien zum Physik- und Chemielernen, Bd. 171). Univ., Diss.--Duisburg-Essen, 2014. Berlin: Logos.
- Kölbach, E. (2011). *Kontexteinflüsse beim Lernen mit Lösungsbeispielen* (Studien zum Physik- und Chemielernen, Bd. 123). Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2011. Berlin: Logos.
- Lenhard, W. & Schneider, W. (2006). *Ein Leseverständnistest für Erst- und Sechstklässler. ELFE 1-6*: Hogrefe Göttingen.
- Mayer, R. E. (2009). *Multimedia learning* (Second edition). Cambridge: Cambridge University Press.
- Niegemann, H. M., Domagk, S., Hessel, S., Hein, A., Hupfer, M. & Zobel, A. (2008). *Kompendium multimediales Lernen*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Renkl, A. (2014). Toward an instructionally oriented theory of example-based learning. *Cognitive Science*, 38 (1), 1-37.
- Renkl, A., Gruber, H., Weber, S., Lerche, T. & Schweizer, K. (2003). Cognitive Load beim Lernen aus Lösungsbeispielen. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 17 (2), 93-101.
- Schmidt-Borcherding, F., Hänze, M., Wodzinski, R. & Rincke, K. (2013). Inquiring scaffolds in la-

- laboratory tasks. An instance of a “worked laboratory guide effect”? *European Journal of Psychology of Education*, 28 (4), 1381-1395.
- Schmidt-Weigand, F., Franke-Braun, G. & Hänze, M. (2008). Erhöhen gestufte Lernhilfen die Effektivität von Lösungsbeispielen? Eine Studie zur kooperativen Bearbeitung von Aufgaben in den Naturwissenschaften. *Unterrichtswissenschaft*, 36 (4), 365-384.
- Schüßler, K. (2017). *Lernen mit Lösungsbeispielen im Chemieunterricht*. Dissertation, Universität Duisburg-Essen; Berlin: Logos.
- Schwichow, M. (2015). *Förderung der Variablen-Kontroll-Strategie im Physikunterricht*. Dissertation, Universität Kiel.
- Spanjers, I. A.E., Wouters, P., van Gog, T. & van Merriënboer, J. J.G. (2011). An expertise reversal effect of segmentation in learning from animated worked-out examples. *Computers in Human Behavior*, 27 (1), 46-52.
- Vorholzer, A. S. (2016). *Wie lassen sich Kompetenzen des experimentellen Denkens und Arbeitens fördern? Eine empirische Untersuchung der Wirkung eines expliziten und eines impliziten Instruktionsansatzes* (Studien zum Physik- und Chemielernen, Bd. 197). Berlin: Logos.
- Vorholzer, A., Aufschnaiter, C. von & Kirschner, S. (2016). Entwicklung und Erprobung eines Tests zur Erfassung des Verständnisses experimenteller Denk- und Arbeitsweisen. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 22 (1), 25-41.
- Ziegler, A., Stöger, H. & Grassinger, R. (2010). Diagnostik selbstregulierten Lernens mit dem FSL-7. *Journal für Begabtenförderung*, 10 (1), 24-33.

Experimentieren im Physikunterricht: Wechselwirkung zwischen Überzeugungen von Lehrkräften und unterschiedlichen Experimentiersituationen

Jan Winkelmann*, S. Franziska C. Wenzel[†], Holger Horz[†], Mark Ullrich[†], Jeremias Weber*, Roger Erb*

*Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max von Laue Straße 1, 60438 Frankfurt,

[†]Institut für Psychologie, Goethe-Universität, Theodor-W.-Adorno-Platz 6, 60629 Frankfurt

winkelmann@physik.uni-frankfurt.de, wenzel@psych.uni-frankfurt.de, horz@psych.uni-frankfurt.de, m.ullrich@psych.uni-frankfurt.de, jeremias.weber@physik.uni-frankfurt.de, roger.erb@physik.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

Im Rahmen einer umfangreichen Längsschnittstudie zum Kompetenzerwerb im Physikunterricht (KoPhy) wurde unter anderem der Lernzuwachs durch unterschiedliche Experimentiersituationen untersucht. Aktuelle Forschungsergebnisse lassen die Vermutung gerechtfertigt erscheinen, dass nicht das Experimentieren an sich – als Schülerexperiment oder als Demonstrationsexperiment – für den Lernerfolg ausschlaggebend ist. Vielmehr scheint eine Wechselwirkung zwischen der jeweilig unterrichtenden Lehrkraft und der Experimentiersituation zu bestehen. In der hier vorgestellten Studie wird versucht, diese Wechselwirkung mit Hilfe der physikbezogenen Überzeugungen der Lehrkräfte zu erklären. In diesem Beitrag werden erste Ergebnisse präsentiert und mögliche Konsequenzen für die Unterrichtsgestaltung sowie die Physiklehrerausbildung diskutiert.

1. Einleitung

Umfangreiche Reviews zum Thema „Lernen in den Naturwissenschaften“ zeigen, dass „laboratory work“ lediglich kleine Beiträge zu einem verbesserten Verständnis von Naturwissenschaften zu leisten vermag (Hofstein & Lunetta, 2004; Singer, Hilton, & Schweingruber, 2006). Diese Überblicksbeiträge erfassen den Einfluss des praktischen Arbeitens auf das Gesamtverständnis von Naturwissenschaften, also zum Beispiel auch Wissen über die Arbeitsweisen dieser Wissenschaften. Ein aktuelleres Review mit stärkerem Fokus auf die Wissensvermittlung naturwissenschaftlicher Inhalte findet sich bei Millar (2010). Andere Studien, bei denen der Einsatz von Schüler- bzw. Demonstrationsexperimenten direkt verglichen wurde (z.B. Hopf, 2007; Winkelmann & Erb, im Druck) lassen erwarten, dass Unterschiede in der Unterrichtsorganisation, also auf der Ebene der Sichtstruktur, nicht entscheidend zumindest für den Unterrichtserfolg in fachlicher Hinsicht sind. Entscheidender sind vielmehr tieferliegende Prozesse und damit verbunden die Lehrperson selbst (z. B. auch Hattie, 2013).

2. Studiendesign

In einer umfangreichen längsschnittlichen Erhebung wurde der Einfluss dreier verschiedener Experimentiersituationen auf den Lernzuwachs von Schülerinnen und Schülern der 7. und 8. Jahrgangsstufe untersucht (Projekt KoPhy, Erb & Horz, 2017).

Eine Teilfrage des Projekts lautet: Welche Auswirkung hat die Interaktion von Lehrercharakteristika und Experimentiersituation auf die Kompetenzentwicklung von Schülerinnen und Schülern im Fach Physik? Ausgehend von bisherigen Forschungsergebnissen, wurden die folgenden zwei Hypothesen formuliert:

H.1.: Lehrkräfte mit zahlreichen konstruktivistischen Überzeugungen hinsichtlich des Lehrens und Lernens bewirken bei den Schülerinnen und Schülern dann einen größeren Fortschritt im Kompetenzbereich „Fachwissen“, wenn sie ein Treatment mit höherer Eigensteuerung unterrichten.

H.2.: Lehrkräfte mit wenigen konstruktivistischen Überzeugungen hinsichtlich des Lehrens und Lernens bewirken bei den Schülerinnen und Schülern dann einen größeren Fortschritt im Kompetenzbereich „Fachwissen“, wenn sie ein Treatment mit geringerer Eigensteuerung unterrichten.

Wir vermuten also eine Passung zwischen der Überzeugung der unterrichtenden Lehrkraft und einer entsprechenden Experimentiersituation, die zum Erfolg bei Schülerinnen und Schülern führen sollte.

3. Messinstrumente

Im Rahmen der Studie wurden verschiedene Tests zum Einsatz gebracht. Als Kontrollvariablen wurden personengebundenen Daten sowie zwei Skalen des Kognitionsfähigkeitstests (KFT, V3 & N2; Heller & Perleth, 2000) erhoben. Auf Seiten der Schülerinnen und Schüler wurden als abhängige Variablen das

aktuelle Interesse an Physik (Schulz, 2011) sowie deren Kompetenz in den Bereichen der Erkenntnisgewinnung (Glug, 2009) und des Fachwissens (Weber et al., 2017) erhoben. Die unterrichtenden Lehrkräfte wurden gebeten, Skalen zu ihren Überzeugungen zum Lehren und Lernen von Physik zu bearbeiten (Lamprecht, 2011). Da im vorliegenden Beitrag der Fokus auf der Wechselwirkung zwischen fachlichem Wissen der Schülerinnen und Schüler und den Überzeugungen der Lehrkräfte liegt, werden beide Tests im Folgenden etwas näher beschrieben.

3.1 Fachwissenstest geometrische Optik

Der verwendete Fachwissenstest zur geometrischen Optik geht auf Winkelmann (2015) zurück. Inhaltlich fokussiert der Test auf die Lichtbrechung. Bestehende Items des damaligen Tests wurden hinsichtlich zentraler psychometrischer Aspekte und unter Nutzung von Modellen der Item-Response-Theorie (IRT) analysiert und problematische Items überarbeitet. Überarbeitete und neu entwickelte Items wurden im Rahmen einer Pilotstudie IRT-skaliert und entsprechend ihrer psychometrischen Güte für den Fachwissenstest selektiert oder eliminiert. Zuletzt wurden aus dem so gewonnenen Itempool ($n = 48$) Testhefte zusammengestellt, die eine Erfassung des Fachwissens im Bereich „Geometrische Optik“ über verschiedene Messzeitpunkte hinweg und damit die Verfolgung der Entwicklung des Fachwissens über die Zeit, erlauben. Dabei wiederholt sich jeweils nur ein Teil der Items über mehr als einen Messzeitpunkt, diese werden Ankeritems genannt. Die übrigen Items sind messzeitpunktspezifisch ausgewählt. Insbesondere wurde dabei die Schwierigkeit der einzelnen Items an die zu erwartende Personenfähigkeit angepasst: Im Pretest wurden also besonders einfache Items genutzt, im Posttest dafür schwerere Items. Um Reihenfolgeeffekte soweit wie möglich zu minimieren, wurden für jeden Messzeitpunkt fünf Testhefte anhand eines balancierten unvollständigen Testheftdesigns erstellt (Osterlind & Everson, 2009). Insgesamt weist der so entwickelte Fachwissenstest eine Bearbeitungsdauer von ca. 25 Minuten auf und erlaubt eine änderungssensitive sowie reliable Erfassung des Fachwissens.

3.2 Überzeugungen von Lehrkräften

Um die Überzeugungen der unterrichtenden Lehrkräfte in Hinblick auf die Physik als Unterrichtsfach und Wissenschaft zu erheben, wurden Skalen von Lamprecht (2011) verwendet. Für die Überzeugungen zum Unterrichtsfach Physik kamen die Skalen „Selbstständiges Lernen von Physik“ (SL) sowie „Rezeptartiges Lernen“ (RL) und für die Überzeugungen zur Wissenschaft Physik die Skalen „Stellenwert der Wissenschaft Physik“ (WPh) sowie „Wahrheitsanspruch und Eindeutigkeit von Physik“ (WuE) zum Einsatz.

Im Rahmen seiner Arbeit gelang es Lamprecht, seine in den Blick genommenen Lehrkräfte (Quer-

einsteiger in das Lehramt Physik) auf Grundlage ihrer Überzeugungen als drei unterschiedliche Lehrertypen zu beschreiben: den Trainingstyp, den diskursiven Typ und den Vermittlungstyp.

4. Auswertung

An der Studie nahmen insgesamt über 1000 Schülerinnen und Schüler in Hessen und Nordrhein-Westfalen teil. Die in diesem Beitrag vorgestellten, ersten Ergebnisse beziehen sich auf Daten von 944 Schülerinnen und Schülern sowie 51 Physiklehrkräften.

4.1 Mehrebenen-Analyse

Um eine Aussage über den Einfluss der verschiedenen Experimentiersituationen auf den Lernzuwachs der Schülerinnen und Schüler treffen zu können, wurden die Schülerleistungen zu den verschiedenen Messzeitpunkten im Rahmen einer Mehrebenen-Analyse untersucht. Eine Mehrebenen-Analyse der Schülerdaten ist aus zweierlei Gründen einer Varianzanalyse vorzuziehen. Zum einen sind die Schülerdaten voneinander abhängig (sie sind „genestet“). Dadurch würden in einer Varianzanalyse Zusammenhänge falsch benannt und Varianzanteile auf Klassenebene unterschätzt werden. Zum anderen ist auf diese Weise eine Imputation fehlender Werte möglich, was in einer Varianzanalyse mit Messwiederholung in SPSS nicht möglich ist.

Den in Abschnitt fünf vorgestellten (vorläufigen) Ergebnissen liegt ein nach dem Maximumlikelihood Verfahren geschätztes Modell zu Grunde. Dabei gehen wir nicht von einem linearen Verlauf zwischen Pre- Post- und Follow-Up-Test aus. Die Fitwerte sind überzeugend: Chi Square .59 bei 2 df; RMSEA < .0001; CFI 1; SRMR .005 (within / Schüler) und .001 (between / Klasse).

4.2 Identifikation von Lehrertypen

An der hier vorgestellten Studie nahmen 51 Lehrkräfte mit ihren Klassen teil. Die Anzahl ist zu gering, um damit eine sinnvolle Clusteranalyse, wie bei Lamprecht (2011), durchzuführen. Die Skalen von Lamprecht wurden auch im Projekt proPHI der Arbeitsgruppe Korneck, Oettinghaus & Lamprecht (2016) eingesetzt. Durch die Kombination dieser Daten mit den unsrigen gelang eine zuverlässige Zuordnung der teilgenommenen Lehrkräfte zu den von Lamprecht beschriebenen Lehrertypen. Abbildung 1 zeigt eine ähnliche Ausprägung der Skalen für die jeweiligen Lehrertypen. Deutlich ist die Gegenläufigkeit von Trainings- und diskursivem Muster zu erkennen. Allerdings sind die positiven Ausprägungen in den Skalen RL und WPh etwas geringer. Das Vermittlungsmuster liegt auch bei uns über den Ausprägungen der anderen beiden Muster, allein in der Skala zum selbstständigen Lernen ist dieses

Muster in unseren Daten etwas schwächer ausgeprägt.

Die (wieder)gefundenen Lehrertypen sind in der vorliegenden Studie bisher wie folgt mit Lehrkräften besetzt: Trainingsmuster n = 13, diskursives Muster n = 23 und Vermittlungsmuster n = 14.

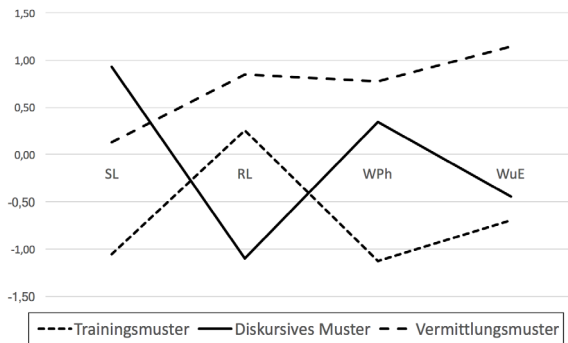


Abb. 1: In vorliegender Studie gelang eine vergleichbare Typenbildung wie bei Lamprecht (2011).

5. Erste Ergebnisse

Betrachtet man in der Mehrebenen-Analyse den Einfluss der verschiedenen unabhängigen Variablen (Experimentiersituation bzw. Lehrertyp), zeigen sich keine Effekte auf den Lernzuwachs der Schülerinnen und Schüler. Dies bestätigt eigene Vorarbeiten (Winkelmann, 2015). Lediglich mittels einer Dummy-Codierung der Variable Experimentiersituation (demo = 00) unterscheidet sich die Situation „Kochbuch“ im Verlauf über die drei Messzeitpunkte leicht signifikant (mit kleinem Effekt) von beiden anderen Treatments

5.1 Wechselwirkung

Aufgrund der Ergebnisse von Winkelmann (2015) ist zu vermuten, dass es eine Interaktion zwischen der erlebten Experimentiersituation und der unterrichtenden Lehrkraft besteht. In der damaligen Studie konnte diese Wechselwirkung berichtet, jedoch nicht erklärt werden.

Eine Möglichkeit, die unterrichtenden Lehrkräfte näher zu beschreiben, liegt in der Analyse ihrer Überzeugungen zum Lehren und Lernen von Physik. Für die Analyse möglicher Wechselwirkungen zwischen den Lehrkräften und den Experimentiersituationen wurden sämtliche möglichen Kombinationen mit einer ausgewählten Kombination verglichen (Dummy-Codierung mit „Training x Demo“ = 0). Abbildung 2 fasst die so aufgespannte Matrix zusammen.

Es zeigt sich, dass es in der oberen Zeile (nur Trainingsstyp-Lehrkräfte) sowie in der ersten Spalte (nur Experimentiersituation Demo) leicht signifikante Unterschiede zur „Null-Zelle“ gibt. Eine vorsichtige Interpretation kann lauten: Die Kombination aus Lehrertyp und Experimentiersituation (insbesondere mit starker Lenkung = Demo) spielt eine Rolle für den Leistungsverlauf der Schüler. Außerdem er-

Interaktionsterme dummy codiert (demo / training = 00)

(Training x Demo)	Training x Kochbuch *	Training x Guided *
Vermittlung x Demo *	Vermittlung x Kochbuch	Vermittlung x Guided
Diskursiv x Demo *	Diskursiv x Kochbuch	Diskursiv x Guided

Abb. 2: Zusammenfassung der Interaktionsterme für die Wechselwirkung zwischen Lehrertyp und Experimentiersituation.

scheint insbesondere das Trainingsmuster für Interaktionen interessant bzw. anfällig.

Allerdings müssen diese Ergebnisse unter folgenden Einschränkungen betrachtet werden: Sämtliche gefundenen Unterschiede sind nur knapp signifikant. Die einzelnen Zellen der Matrix (Abb. 2) sind nicht gleich stark und auch nur schwach besetzt (in die Analyse konnten bisher nur Daten von 38 Lehrkräften aufgenommen werden). Noch ist zudem nicht geklärt, in welche Richtung die leicht signifikanten Unterschiede zu interpretieren sind. D.h. es ist noch nicht klar, ob die Kombinationen ein besseres oder schlechteres Ergebnis erzielten.

6. Zusammenfassung

Aktuell erwarten wir noch Daten von 14 weiteren Klassen, die mit in die Analyse aufgenommen werden sollen. Mit dem Hinweis auf die Vorläufigkeit der hier beschriebenen Analysen kann zusammengefasst werden:

1. Frühere Befunde können bestätigt werden:

Es ist zum einen gelungen, die Lehrertypen von Lamprecht auch in den unsrigen Daten wieder zu finden. Darüber hinaus konnten die Ergebnisse (eigener) früherer Arbeiten zu Auswirkungen des Experimentierens auf den Lernzuwachs bestätigt werden: Ob mit Schüler- oder Demonstrationsexperimenten unterrichtet wird, hat keine Bedeutung für den Lernzuwachs.

2. Lehrertypen und Treatment haben jeweils keinen Effekt auf das Fachwissen.

Neben der Art des Experimentierens scheint auch der Lehrertyp für sich alleine genommen keinen Einfluss auf den Lernerfolg von Schülerinnen und Schülern zu haben.

3. Interaktionen zwischen Lehrertypen und Experimentiersituation

Die Interaktion wird bei starker Lenkung (durch die Lehrkraft oder durch das Treatment) ansatzweise signifikant. Dieses Ergebnis kann zum jetzigen Zeitpunkt allerdings nur sehr vorsichtig interpretiert werden. Es stehen weitere Analysen aus.

7. Ausblick

Um einen tieferen Einblick in die vorliegenden Daten zu erhalten, sollen weitere Analysen durchgeführt werden. So steht eine Kontrolle der Dummy-Codierung aus: Werden sich ähnliche signifikante Unterschiede zeigen, wenn andere Kombinationen als „Null-Zelle“ definiert werden? Außerdem wurde bisher nicht mit dem vollständigen Datensatz gerechnet. Statt der bisherigen 38 Klassen werden am Ende Daten von 50 Klassen bzw. etwa 1250 Schülerinnen und Schülern zur Verfügung stehen. Mit dem vollständigen Datensatz sollen dann weitere statistische Analyseverfahren zum Einsatz gebracht werden, etwa eine Piece-wise Analyse der Leistungsentwicklung zwischen Pre- und Posttest sowie zwischen Post und verschiedenen Follow-Up-Zeitpunkten. Auch sollen weitere Kontrollvariablen wie das Geschlecht oder die Lehrererfahrung in das Modell der Mehrebenen-Analyse aufgenommen werden.

8. Literatur

- Erb, R. & Horz, H. (2017). Experimentieren in Physik. In BMBF (Hrsg.), *Optimale Lern- und Bildungschancen für Kinder und Jugendliche. Aktuelle Forschungsergebnisse für die Bildungspraxis*, S. 8-9. Zuletzt aufgerufen am 12.5.2018 unter: https://www.bmbf.de/pub/Optimale_Lern_und_Bildungschancen_fuer_Kinder_und_Jugendliche.pdf
- Hattie, J. (2013). *Lernen sichtbar machen*. Schneider Verlag Hohengehren.
- Heller, K. A., & Perleth, C. (2000). *Kognitiver Fähigkeitstest für 4. bis 12. Klassen, Revision (KFT 4-12+R)*. Göttingen: Beltz Test GmbH.
- Glug, I. (2009). *Entwicklung und Validierung eines Multiple-Choice-Tests zur Erfassung prozessbezogener naturwissenschaftlicher Grundbildung*. Kiel: IPN.
- Hofstein, A., & Lunetta, V. N. (2004). The Laboratory in Science Education: Foundations for the Twenty-First Century. *Science Education*, 88, 28-54.
- Hopf, M. (2007). Problemorientierte Schülerexperimente. In H. Niedderer, H. Fischler, E. Sumfleth (Hrsg.), *Studien zum Physik- und Chemielernen*. Band 68. Berlin: Logos.
- Korneck, F., Oettinghaus, L., & Lamprecht, J. (2016). *Komponenten professioneller Handlungskompetenz von Quereinsteigern und Lehramtsstudierenden des Haupt- und Realschullehrerstudiums im Fach Physik (proPHI)*. Version: 1. IQB – Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen. Datensatz. http://doi.org/10.5159/IQB_proPHI_v1
- Lamprecht, J. (2011). Ausbildungswege und Komponenten professioneller Handlungskompetenz. Vergleich von Quereinsteigern mit Lehramtsabsolventen für Gymnasien im Fach Physik. In H. Niedderer, H. Fischler, E. Sumfleth (Hrsg.), *Studien zum Physik- und Chemielernen*, Band 125. Berlin: Logos Verlag.
- Millar, R. (2010). Practical work. In J. Osborne & J. Dillon (Eds.), *Good practice in science teaching: What research has to say* (pp. 108-134). Maidenhead, Great Britain: Open University Press.
- Osterlind, S. J. & Everson, H. T. (2009). *Differentialitem functioning* (Vol. 161). Sage Publications.
- Schulz, A. (2011). Experimentierspezifische Qualitätsmerkmale im Chemieunterricht. Eine Videostudie. In H. Niedderer, H. Fischler, E. Sumfleth (Hrsg.), *Studien zum Physiklernen*. Band 113. Berlin: Logos Verlag.
- Singer, S. R., Hilton, M. L., & Schweingruber, H. A. (2006). *America's Lab Report. Investigations in High School Science*. Washington, DC: The National Academies.
- Weber, J., Winkelmann, J., Erb, R., Wenzel, F., Ullrich, M., & Horz, H. (2017). Entwicklung eines Fachwissenstests in der geometrischen Optik. In H. Grötzebach & V. Nordmeier (Hrsg.), *PhyDid B – Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung des Fachverbands Didaktik der Physik in Hannover 2016*. Beitrag DD. 17.03.
- Winkelmann, J. & Erb, R. (2018). Der Einfluss von Schüler- und Demonstrationsexperimenten auf den Lernzuwachs in Physik. *Phydid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, (1) 17, 21-33.
- Winkelmann, J. (2015). Auswirkungen auf den Fachwissenszuwachs und auf affektive Schülermerkmale durch Schüler- und Demonstrationsexperimente im Physikunterricht. In H. Niedderer, H. Fischler, & E. Sumfleth (Hrsg.), *Studien zum Physik- und Chemielernen*. Band 179. Berlin: Logos Verlag.

Elementarisierungen zu Strömungen und Strukturbildungen

Kai Bliesmer, Michael Komorek

Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Carl-von-Ossietzky-Straße 9-11, 26129 Oldenburg

kai.bliesmer@uni-oldenburg.de, michael.komorek@uni-oldenburg.de

Kurzfassung

Die Nationalparkhäuser des Niedersächsischen Wattenmeeres sind außerschulische Lernorte. Dort thematisieren die Betreiber/innen mit ihren Ausstellungen die systemische Dynamik an der Küste und im Ozean. Allerdings mangelt es an Exponaten, die Phänomene unter physikalischer Perspektive beleuchten und passende Erklärungen sowie Modelle anbieten. Die physikalische Sichtweise auf dynamische Prozesse in der Küsten- und Ozeanregion ist jedoch unabdingbar, da erst die Interdependenz von Strömungen und Strukturbildungen die systemische Dynamik dieser Regionen konsistent charakterisiert. Um die Ausstellungen diesbezüglich weiterzuentwickeln, wird eine Didaktische Rekonstruktion vorgenommen, deren Kern die Elementarisierung von Strömungen und Strukturbildungen darstellt. Ziel ist die Formulierung von didaktischen Leitlinien für die zukünftige Ausstellungsgestaltung. Diese soll den Betreiber/innen der Nationalparkhäuser dabei helfen, Strömungs- und Strukturphänomene für zukünftige Exponate aufzubereiten.

1. Einleitung

Die Dynamik von Wasser, Luft und granularer Materie in Form vielgestaltiger Strömungs- und Strukturbildungsphänomene prägt das Erscheinungsbild von Küstengebieten rund um den Globus. Durch komplexe systemische Wechselwirkungen werden weitläufige Küstenstrukturen erzeugt, die verschiedensten Organismen als überaus geeignete Lebensräume dienen und wiederum selbst von ihnen geformt werden. Das gilt insbesondere für das Wattenmeer der Nordsee – ein äußerst produktives Ökosystem mit hoher physikalischer Dynamik. Die ausgeprägte Interdependenz dieser physikalischen Dynamik und der biologischen Vielfalt galt für die Welterbekommission der UNESCO als bestechendes Argument, das Wattenmeer in ihren Katalog der Weltnaturerben aufzunehmen (UNESCO World Heritage Committee, 2009, S. 183-186). Um den erlangten Status als Weltnaturerbe sowohl zu popularisieren als auch zu plausibilisieren, sind mit Fokus auf das Wattenmeer allein in Niedersachsen 18 Nationalparkhäuser gegründet worden, die als außerschulische Lernorte dienen und jedermann, insbesondere Schüler/innen, Zugang bieten.

In den Ausstellungen der Nationalparkhäuser wird thematisiert, dass es sich bei Küstengebieten um bedeutsame Lebens- und Wirtschaftsräume handelt, die bisweilen sensibel und komplex auf klimatische Veränderungen und Umwelteinflüsse reagieren. Im Hinblick auf ihre außerschulischen Lernangebote sind die Leiter/innen der Nationalparkhäuser also als „Ausstellungsmacher/innen“ tätig. Die Ausstellungen sind Gegenstand des hier beschriebenen Forschungs- und Entwicklungsvorhabens.

2. Vorstudien

Um das Forschungs- und Entwicklungsfeld der Ausstellungen zu Küsten- und Meeresregionen aufzuschließen, wurden zwei Vorstudien (Bliesmer, 2016; Roskam, 2016) durchgeführt. Das Erkenntnisinteresse orientierte sich daran, inwiefern physikalische Inhalte in den Ausstellungen angesprochen werden, wer an der Aufbereitung beteiligt ist und nach welchen Prinzipien sie erfolgt. Zur Klärung wurden in beiden Vorstudien leitfadengestützte, teilstandardisierte Experteninterviews durchgeführt; und zwar mit den Ausstellungsmacher/innen der Nationalparkhäuser bzw. mit den pädagogisch Verantwortlichen der Bildungsangebote an Meeresforschungsinstituten. Auch Forschungsinstitute thematisieren Inhalte zur Küsten- und Meeresdynamik, sodass sich ein breiteres Feld entsprechender außerschulischer Lernangebote im Themenfeld ergab.

Die Ergebnisse der Vorstudien zeigen, dass in den vorgehaltenen Bildungsangeboten eine starke Fokussierung auf biologische Aspekte vorherrscht. Phänomene an der Küste und im Ozean werden nur sehr selten aus physikalischer Sicht betrachtet. Physikalische Erklärungen und Modelle kommen nur am Rande vor. Begründet wird dies mit der hohen Komplexität entsprechender Inhalte, die Besuchenden überfordere. Allerdings wünschen sich die Ausstellungsmacher/innen mehr angemessen aufbereitete physikalische Inhalte in ihren Ausstellungen; insbesondere dazu, die Klassifizierung des Wattenmeeres als Weltnaturerbe im Sinne der UNESCO abbilden zu können. Allerdings steht ihnen ein physikalischer Zugang wegen ihres beruflichen Werdegangs eher fern. Gleiches gilt für fachdidaktische Überlegungen zur Planung neuer Ausstellungsexpo-

nate. Diesbezüglich wird direkt mit Werkstätten und Ausstellungsagenturen kooperiert. In dieser Kooperation wird vor allem Wert auf eine ästhetische Raumgestaltung und einen stabilen Exponatbau gelegt, sodass optisch ansprechende und robuste Ausstellungsstücke entstehen. Allerdings verfügt kaum einer der Beteiligten über eine ausgewiesene Expertise zur physikdidaktischen Analyse und Aufbereitung neuer Inhalte, um sie in lernwirksame Exponate zu überführen. Die in den Vorstudien identifizierten Defizite und Wünsche der Ausstellungsmacher/innen geben daher Anlass für breite physikdidaktische Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten, die in fruchtbare Weiterentwicklungen der Ausstellungen münden können.

3. Zielsetzungen

Das Ziel des hier vorgestellten Vorhabens ist eine solche Weiterentwicklung der Ausstellungen in den Nationalparkhäusern, dass physikalische Aspekte der Küsten- und Meeresdynamik integrale Bestandteile ihrer Exponate werden. Durch die Vorstudien (Bliesmer, 2016; Roskam, 2016) lassen sich Ziele auf zwei Ebenen formulieren:

- Die physikdidaktische Aufarbeitung von Strömungs- und Strukturphänomenen, die physikalische Aspekte der Küsten- und Meeresregion in Ausstellungen verdeutlichen.
- Das Ausarbeiten des Vorgehens, sodass Ausstellungsmacher/innen die fachdidaktische Idee des Aufeinanderbeziehens von Fach- und Lernendenperspektive verständlich wird.

Beide Ziele sind ein Ausdruck der Maxime, Ausstellungsmacher/innen anzuregen, *selbst* aktiv zu werden. Wir verfolgen nicht das Ziel, eigene Exponate zu bauen, um deren Ausstellungen zu ergänzen. Im konkreten Bau der Exponate sind die Beteiligten uns Physikdidaktiker/innen im Hinblick auf Ästhetik und Haltbarkeit ohnehin überlegen. Der Mangel besteht vielmehr hinsichtlich fachdidaktischer Planungskompetenz, sodass es hier um die Unterstützung geht, Exponate auf Basis fachdidaktischer Grundideen zu planen.

Dazu werden *Leitlinien für Ausstellungsmacher/innen* zum Themenfeld der Strömungs- und Strukturphänomene formuliert, die es ihnen ermöglichen sollen, fachwissenschaftliche Sachstrukturen von Strömungs- und Strukturphänomenen für lernwirksame Exponate zu rekonstruieren.

4. Forschungs- und Entwicklungsmodell

Die angestrebten Leitlinien fußen auf einer vorzunehmenden Elementarisierung (Bleichroth, 1991) zu Strömungen und Strukturbildungen, gehen aber auch darüber hinaus, um die praktische Anwendbarkeit für die AusstellungsmacherInnen zu gewährleisten. Die Leitlinien müssen zum einen dabei helfen, die fachwissenschaftlichen Sachstrukturen der Strömungs- und Strukturphänomene zu entschlüsseln,

die sie in den Ausstellungen thematisieren wollen. Deshalb stellen die Leitlinien die fachlichen Kerne (Elementaria) der zugehörigen Inhalte dar, die mit Blick auf mögliche Besuchende herausgearbeitet werden. Zum anderen müssen derartige Leitlinien dabei helfen, die fachwissenschaftlichen Sachstrukturen so zu rekonstruieren, dass *Sachstrukturen für Vermittlungszwecke* entstehen. Deshalb werden Hinweise unterbreitet, wie die Elementaria mit kontextspezifischem Wissen angereichert, verknüpft und so zu einer Sachstruktur für Vermittlungszwecke rekonstruiert werden können.

Die zu entwickelnden Leitlinien lassen sich im Forschungs- und Entwicklungsmodell der Didaktischen Rekonstruktion (Duit et al., 2012) verorten; dort sind sie der didaktischen Strukturierung gleichbedeutend.



Abb.1: Didaktische Rekonstruktion zur Entwicklung von Ausstellungen (modifiziert nach Duit et al., 2012)

Die grafische Darstellung zeigt die vorzunehmende Elementarisierung im Zentrum. Sie ist zunächst zu leisten. Dazu bedarf es sowohl einer sachstrukturellen Analyse als auch einer empirischen Untersuchung der Lernendenvorstellungen von Strömungs- und Strukturbildungsphänomenen.

Die Elementarisierung befindet sich gewissermaßen im Spannungsfeld des fachdidaktischen Triplets, das dadurch die Aufgabenstellung für den Forschungsprozess vorgibt: Es ist zu klären, welche Elementarisierungsprozesse sich im Themengebiet von Strömungs- und Strukturphänomenen durchführen lassen. Diese müssen einen Bezug zu den Ergebnissen einer fachlichen Analyse haben, einen Bezug zu den empirisch erhobenen Vorstellungen der Lernenden und einen Bezug zu dem Ziel, Leitlinien für Ausstellungsmacher/innen zu entwickeln. Ist die Elementarisierung abgeschlossen, muss sie angereichert werden, um die angestrebten Leitlinien zu entwickeln.

Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion dient als zentrales Strukturierungsmittel. Hier werden alle zu leistenden Teilaufgaben zusammengeführt. Deshalb gibt das Modell die Struktur nachfolgender Kapitel vor.

4.1. Fachwissenschaftliche Perspektive

Strömungs- und Strukturphänomene stellen sich an der Küste und im Ozean in Form von vielerlei Erscheinungen dar: Rippel, Dünen, Tsunamis, Monsterwellen sowie Wirbelstraßen und Strudel sind nur einige Beispiele und zeugen von einem beachtlichen

Potenzial, sie unter physikalischer Perspektive zu thematisieren. Im Hinblick auf eine vorzunehmende Elementarisierung ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den Phänomenen quasi um Kontexte handelt, die in abstrakte physikalische Wissensbereiche eingebettet sind. Die Identifizierung grundlegender und gemeinsamer fachlicher Inhalte der vielgestaltigen Strömungs- und Strukturbildungsphänomene ist der erste Schritt der Elementarisierung.

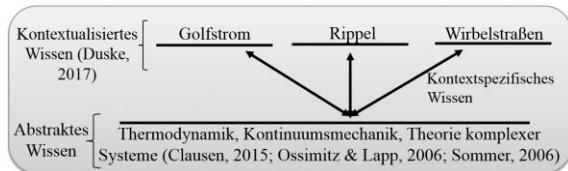


Abb.2: Physikalische Wissensgebiete als fachlicher Kern verschiedener Strömungs- und Strukturphänomene

Zu den grundlegenden Bereichen zählen Thermodynamik, Kontinuumsmechanik und insbesondere auch die Theorie komplexer Systeme. Die Bedeutung letzterer wird im Folgenden anhand von fünf Charakteristika komplexer Systeme näher verdeutlicht. Sie wurden mit Aspekten der Kontinuumsmechanik und Thermodynamik verknüpft und bezogen auf den Kontextbereich der Strömungs- und Strukturphänomene in der Küsten- und Meeresregion herausgearbeitet. Dazu wurde eine Analyse fachwissenschaftlicher Literatur zur Thermodynamik (u.a. Blundell & Blundell, 2010), zur Kontinuumsmechanik (u.a. Spurk & Aksel, 2010; Durst, 2006) und zur Theorie komplexer Systeme (u.a. Bar-Yam, 2003; Mainzer, 1999) vorgenommen.

Mit den fünf Charakteristika wurde ein fachliches Konstrukt erzeugt, das zentrale Inhalte der Nichtgleichgewichtsthermodynamik sowie der nichtlinearen Dynamik abbildet und dabei die Küsten- und Meeresregion als ein komplexes System erachtet.

4.1.1. Charakteristikum der Emergenz

Die Theorie komplexer Systeme sieht ein System als einen Verbund von Systemelementen an, die in komplexer Weise miteinander wechselwirken. Das führt zu neuen Systemeigenschaften und Strukturen, die nicht durch eine Betrachtung einzelner, isolierter Elemente erklärt werden können (Bar-Yam, 1997). Werden Elemente verändert oder gar entfernt, hat dies Auswirkungen auf das gesamte System. Die Intensität der Auswirkungen hängt davon ab, wie robust oder sensibel es auf Veränderungen reagiert. Das *Ganze* ist also im wahrsten Sinne mehr als *die Summe seiner Teile*. Mit Blick auf das Studium komplexer Systeme spricht Clausen (2015) von einer notwendigen Überwindung der ehemals erfolgreichen mechanistischen Vorstellung, man könne ein System einzig durch das Zerlegen und Studieren seiner Bestandteile verstehen lernen. Nach Bar-Yam (2007) müssen die Bestandteile komplexer Systeme stets im Kontext des Gesamtsystems betrachtet werden. Diesen Umstand erklärt Pfeiler (2016) mit einem fehlenden Superpositionsprinzip, was sich

durch die hohe Interpendenz der Systembestandteile begründet. An seine Stelle träten andere Prinzipien wie etwa ein multiplikatives Skalenprinzip (Selbstähnlichkeit).

Alle aufgeführten Struktur- und Strömungsphänomene lassen sich als komplexe Systeme fassen. In ihnen wechselwirken Luft- bzw. Wasserströmungen dynamisch und komplex mit weiterer Materie an der Küste und im Ozean; sie alle sind damit Systemelemente. Schon das Beispiel von Sandrippeln vermag das zu illustrieren: Die Rippelstrukturen ergeben sich durch ein komplexes Zusammenspiel einer Vielzahl von Sandkörnern mit einer Luftströmung (äolische Rippel) bzw. einer Wasserströmung (aquatische Rippel). Die Bewegung eines einzelnen Sandkorns kann die Entstehung von Rippeln nicht erklären; ein Sandkorn vermag kein Rippelmuster zu bilden. Erst das kollektive Zusammenwirken vieler Sandkörner erzeugt eine Eigenschaft des Systems, in dem die Körner und strömende Fluide Systemelemente darstellen.

4.1.2. Charakteristikum der Offenheit

Komplexe Systeme sind gedankliche Konstruktionen, bei denen immer bestimmte Elemente in den Blick genommen werden, deren Zusammenspiel interessantes Verhalten bewirkt (Bar-Yam, 1997). Es werden demnach Grenzen gezogen, Systemgrenzen, die aber nicht räumlich gemeint sind und das System abschließen oder gar isolieren (Grotzinger & Jordan, 2017). Komplexe Systeme sind offen.

Eine wichtige Zustandsgröße zur Unterscheidung von offenen und isolierten Systemen ist die Entropie S . Allgemein kann ihre Veränderung entweder durch einen Entropieaustausch mit der Umgebung erfolgen oder durch eine Entropieproduktion im Systeminneren (Prigogine, 1978).

$$dS = d_e S + d_i S \quad \{1\}$$

In isolierten Systemen außerhalb des thermodynamischen Gleichgewichts wird gemäß dem 2. Hauptsatz solange Entropie produziert, bis das System einen Gleichgewichtszustand erreicht (Blundell & Blundell, 2010). Die Einstellung des Gleichgewichts erfolgt über Flüsse von Materie und Energie J_i im System. Da es in isolierten Systemen per Definition keinen Entropieaustausch mit der Umgebung gibt, gilt:

$$dS > 0, \text{ weil } d_e S = 0 \wedge d_i S > 0 \quad \{2\}$$

Die Entropieproduktion im Inneren ist beendet, wenn das System das thermodynamische Gleichgewicht erreicht. In diesem Zustand ist die Systementropie maximal und es findet keinerlei Veränderung mehr statt.

$$dS = d_e S = d_i S = 0 \quad \{3\}$$

Daran ist zu erkennen, dass es sich beim thermodynamischen Gleichgewichtszustand um einen stabilen *Attraktor* für isolierte Systeme handelt (Prigogine, 1978). Denn das isolierte System würde nach jedem Eingriff, der es vom Gleichgewicht entfernt, mit der

Zeit unweigerlich dorthin zurückkehren. Einflüsse werden quasi gedämpft (Schurz, 2006).

Offene Systeme unterscheiden sich von geschlossenen insofern, als sie kein thermodynamisches Gleichgewicht erreichen können, weil es im System ständig Zu- und Abflüsse J_i von Materie und Energie gibt. Allerdings sind in offenen Systemen zwingend zwei verschiedene Entfernungen vom thermodynamischen Gleichgewicht zu unterscheiden (Schurz, 2006; Schlichting, 2000):

In die erste Kategorie fallen offene Systeme, die sich noch relativ nahe am thermodynamischen Gleichgewicht befinden. Sie können einen speziellen Zustand einnehmen, in dem sich die Zu- und Abflüsse von Energie und Materie die Waage halten.

$$\sum J_i = 0 \quad \{4\}$$

Er wird als Fließgleichgewicht bezeichnet und repräsentiert einen Zustand, in dem die Entropieproduktion im Inneren einem Minimum entgegenstrebt.

$$d_i S \rightarrow \min \quad \{5\}$$

Jenes ist gleichbedeutend mit einer Minimierung der Dissipation im System. Es ist daher als Prinzip minimaler Dissipationsrate bekannt, das von Prigogine (1978) formuliert wurde. Die Fließgleichgewichte sind damit stabile Attraktoren für offene Systeme nahe am thermodynamischen Gleichgewicht. Nach jedem Eingriff in das System kehrt es also mit der Zeit wieder in den Fließgleichgewichtszustand zurück. Auch hier werden Einflüsse also gedämpft.

Die zweite Kategorie beinhaltet Systeme fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht. Die genannten Prinzipien der Entropiemaximierung oder der Minimierung der Dissipationsrate gelten hier nicht. Es herrschen also keine stabilen Attraktoren vor. Einflüsse in solche Systeme werden folglich nicht unbedingt gedämpft, sodass diese Systeme ein sehr interessantes und kontraintuitives Verhalten zeigen können (Schurz, 2006). Zu genau dieser Kategorie gehören die komplexen Systeme und damit auch die Küsten- und Meeresregionen.

4.1.3. Charakteristikum der Dynamik

Die geschilderten Materie- und Energieflüsse treten außerhalb des thermodynamischen Gleichgewichts auf und sind ein Ausdruck von Dynamik. Da sie in offenen, komplexen Systemen stets präsent sind, ist Dynamik ein wesentliches Charakteristikum. Sie wird von thermodynamischen Kräften X_i angetrieben (Blundell & Blundell, 2010). In geschlossenen und offenen Systemen nahe dem thermodynamischen Gleichgewicht hängen sie über einen Proportionalitätsfaktor L linear mit den Materie- und Energieflüssen zusammen (Schurz, 2006).

$$J_i = L \cdot X_i \quad \{6\}$$

Thermodynamische Kräfte sind zum Beispiel Temperatur- oder Konzentrationsgradienten. In ihrer Folge setzen Flüsse von Materie und Energie in Richtung des thermodynamischen Gleichgewichts ein. Da sich die Gradienten durch diese Flüsse ver-

ringern, sind sie als *Ausgleichsprozesse* zu deuten, die einen Wärme- bzw. Massentransport repräsentieren. In geschlossenen Systemen können solche Gradienten vollständig verschwinden, in offenen Systemen nicht. Dort sind sie stets vorhanden und mit ihnen geht eine Veränderung der inneren Entropie einher (Prigogine, 1978). In der Nähe des thermodynamischen Gleichgewichts gilt:

$$\frac{d_i S}{dt} = \sum_i J_i \cdot X_i > 0 \quad \{7\}$$

Mit Blick auf den Kontext des Küsten- und Meeresystems vollziehen sich die Wärme- und Massentransportprozesse in den Fluiden Luft und Wasser. Es müssen allerdings Transportprozesse, die sich auf mikroskopischer Ebene ereignen, von denen auf makroskopischer Ebene unterschieden werden (Wilde, 1978; Spurk & Aksel, 2010).

Auf der mikroskopischen Ebene setzen molekulare Transportprozesse ein, die auf der unablässigen Molekularbewegung der konstituierenden Teilchen beruhen. Dadurch setzt bei vorhandenen Gradienten ein Fluss von Wärme und Masse (bzw. Stoffmenge) gemäß Gleichung {6} ein. Die Proportionalitätsfaktoren sind in diesem Fall der Wärmeleitfähigkeitskoeffizient (vgl. {8}) bzw. der Diffusionskoeffizient (vgl. {9}) (Kraume, 2012; Wilde, 1978).

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \lambda \cdot \frac{dT}{dy} \quad \{8\}$$

$$\dot{n} = D \cdot \frac{dc}{dy} \quad \{9\}$$

Je höher die Temperatur- und Konzentrationsgradienten werden, desto höher werden auch die Dichtegradienten im Fluid. Dies führt zu immer höheren inneren Kräften, die bewirken, dass Luft und Wasser mit einer Geschwindigkeit v_x zu strömen beginnen. Das ist die sogenannte freie Konvektion (Spurk & Aksel, 2010). Durch die makroskopische Fluidbewegung werden die auf der Molekularbewegung basierenden Transportprozesse von zusätzlichen konvektiven Prozessen überlagert. Für eine eindimensionale Strömung (Bartelmann et al., 2015) gilt:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = c_p \cdot T \cdot \rho \cdot v_x \quad \{10\}$$

$$\dot{n} = c \cdot A \cdot v_x \quad \{11\}$$

Zusätzlich zu Temperatur- und Konzentrationsgradienten sind äußere Kräfte auf ein Fluid eine weitere Möglichkeit, Strömungen hervorzubringen. Die Gezeiten sind ein Beispiel. Solche Strömungen werden erzwungene Konvektion genannt. Dabei kommt es zu einer Übertragung von Impuls durch das Fluid. Und auch hier gibt es eine molekulare und eine konvektive Variante. Mit dem bedeutenden Unterschied allerdings, dass die molekulare Variante nicht unabhängig von der konvektiven auftritt. Zwar finden

auch im ruhenden Fluid molekulare Stöße statt, allerdings wird in der Bilanz kein gerichteter Impuls übertragen. Und sobald äußere Kräfte wirken, also ein Impuls von außen übertragen wird, beginnen die Fluide wegen ihrer Schubspannungsfreiheit sofort zu strömen, sodass augenblicklich konvektive Transportprozesse einsetzen. Die äußeren Kräfte führen dabei zu Impulsdichtegradienten dI_x/dy im Fluid. Das erklärt die Verzerrung der Fluide. Der Impulsdichtegradient ist einer Verzerrungsgeschwindigkeit τ über die kinematische Viskosität ν proportional (Worthoff & Siemens, 2012). Für die molekulare Variante gilt:

$$\tau = \nu \cdot \frac{dI_x}{dy} \quad \{12\}$$

Auf makroskopischer Ebene kommt es durch die Fluidbewegung mit der Zeit zu einer räumlichen Verteilung des Impulses (Bartelmann et al., 2015).

$$\frac{\dot{p}}{A} = \rho \cdot v_x^2 \quad \{13\}$$

In Systemen fernab vom Gleichgewicht hängen die thermodynamischen Kräfte nicht mehr gemäß Gleichung {6} mit den Materie- und Energieflüssen zusammen, sondern haben komplexere Gestalt. Entsprechend sind auch die Transportgleichungen komplexer (Schurz, 2006). Dennoch zeigt die Betrachtung in einfacheren Systemen, dass es im Wesentlichen drei Faktoren gibt, welche die Dynamik, auch im komplexen Küsten- und Ozeansystem, antreibt: (1) Temperatur- und (2) Konzentrationsgradienten in den Fluiden (freie Konvektion) sowie äußere Kräfte auf das Fluid (erzwungene Konvektion). Zentral für die Dynamik an der Küste und im Ozean sind somit die Strömungen von Luft und Wasser.

4.1.4. Charakteristikum der Nichtlinearität

Das komplexe Verhalten in den emergenten, offenen und dynamischen Systemen äußert sich in Form von Kreisläufen sowie Rückkopplungen negativer (Regulation) und positiver Art (Verstärkung) (Bar-Yam, 1997). Ferner können in den Systemen sogenannte Kippunkte vorkommen, die auch als *tipping points* (Gladwell, 2001) bekannt sind. Ein Beispiel hierzu ist das Umkippen eines Gewässers.

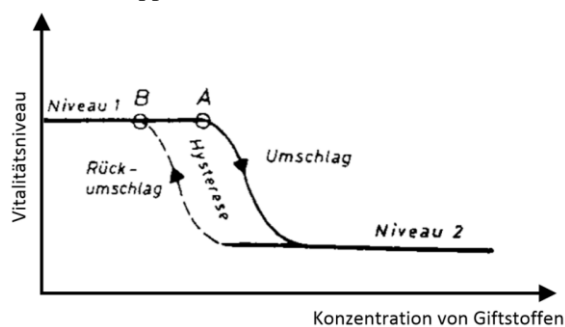


Abb.3: Vitalitätsniveau eines Gewässers in Abhängigkeit von dessen Giftkonzentration (modifiziert nach Schurz, 2006, S. 30)

In diesem Beispiel verhält sich das Gewässersystem in bestimmten Bereichen robust. So könnte man zu der tückischen Folgerung gelangen, das Vitalitätsniveau sei gänzlich unabhängig von der Giftstoffkonzentration. In anderen Bereichen allerdings reagiert das System äußerst sensibel. Denn bei einer bestimmten Giftstoffkonzentration bewirkt eine unwesentliche Erhöhung derselben ein drastisches Absinken des Vitalitätsniveaus. Überdies zeigt sich ein Hystereseverhalten, sodass die Giftstoffkonzentration weit unter den ursprünglichen Wert zurückgeführt werden muss, um das anfängliche Vitalitätsniveau wiederherzustellen.

Jacobeit (2007) nutzt solche Prinzipien komplexen Systemverhaltens zur Beschreibung des Klimasystems. Schurz (2006, S. 11) nennt diese Prinzipien „Systemgesetze“. Er setzt sie in Beziehung zu den Naturgesetzen, und führt aus, dass sie zwar auf letzteren beruhen, nicht jedoch deren Strenge aufweisen. In bestimmten Bereichen vermag ein komplexes System daher Einflüsse zu tolerieren, wobei die Pufferkapazitäten allerdings begrenzt seien.

Die genannten Systemgesetze illustrieren auch einen starken Zusammenhang zum deterministischen Chaos. Das Beispiel der Rippelbildung verdeutlicht, dass die Bewegung einzelner Sandkörner deterministisch ist. Genauso wie die Bewegung von Wasser- und Luftmassen bei der Entstehung tropischer Wirbelstürme. Dennoch lässt sich deren Struktur nicht beliebig genau vorhersagen. Zum einen wegen der hohen Anzahl beteiligter Systemkomponenten, zum anderen aber auch wegen der – in der Chaostheorie zentralen – infinitesimal sensitiven Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen (Mainzer, 1999).

Alle Darlegungen knüpfen an die benannten Materie- und Energieflüsse im vorigen Kapitel an. Lediglich in der Nähe des thermodynamischen Gleichgewichts kann ihr Zusammenhang zu den antreibenden thermodynamischen Kräften linear modelliert werden. Komplexe Systeme befinden sich fernab des thermodynamischen Gleichgewichts, lineare Modellierungen genügen dort nicht (Prigogine, 1978). Die hier aufgeführten Systemgesetze sind ein Ausdruck dafür, dass nichtlineare Modellierungen nötig sind, um komplexe Systeme näher zu beschreiben.

$$J_i = f(X_i) \quad \{14\}$$

Dahingehend manifestiert sich die Herausforderung bei der Auseinandersetzung mit Strömungs- und Strukturphänomenen im kontraintuitiven Verhalten. Dazu zählt auch die Schwierigkeit, dass in bestimmten Bereichen schon kleine Einflüsse große Veränderungen nach sich ziehen, die zudem in beachtlichem räumlichen oder zeitlichen Abstand zum ursprünglichen Einfluss stehen können.

4.1.5. Charakteristikum der Selbstorganisation

Der für diesen Kontextbereich bedeutendste Ausdruck nichtlinearen Verhaltens ist die Selbstorganisation (Mainzer, 1999). Denn die Systemzustände stehen für vielgestaltige räumliche und zeitliche

Strukturen und damit für den zweiten interessierenden Phänomenbereich. Schon im Gewässerbeispiel in Abb. 3 sind zwei Vitalitätszustände zu erkennen, die von der Giftstoffkonzentration abhängig sind und als selbstorganisierte Strukturen begriffen werden können. Auch viele weitere Phänomene an der Küste und im Ozean können im Hinblick auf ihre strukturbildenden Merkmale betrachtet werden: die Solitonen bei Tsunamireignissen, die Konvektionszelle beim Golfstrom, die Periodizität der Gezeiten oder auch die Anhäufung granularer Materie bei Rippeln, Dünen und der Verlagerung ganzer Inseln.

Für alle sind Selbstorganisationsprozesse maßgeblich, und für diese wiederum statistische Schwankungen im System (Prigogine, 1978; Schurz, 2006). Bereits die Maxwell-Boltzmann-Verteilung zeigt, dass die Molekülgeschwindigkeiten in einem Gas statistisch verteilt sind. Auch für andere Größen gelten statische Verteilungen, innerhalb derer Systemkomponenten fluktuieren. Diese zufälligen Fluktuationen werden in offenen Systemen fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht nicht unbedingt gedämpft, weil es keine stabilen Attraktoren gibt. Sie können daher anwachsen. Um dies zu quantifizieren, führte Prigogine (1978) Berechnungen durch und zeigte den Einfluss einer Fluktuation anhand folgender Gleichung 2. Ordnung.

$$S = S_0 + \delta S + \frac{1}{2} \delta^2 S \quad \{15\}$$

Hierbei bezeichnet S_0 die maximale Entropie im thermodynamischen Gleichgewicht und δ den Grad der Fluktuation. In der Nähe des Gleichgewichts, in denen stabile Attraktoren vorherrschen, ist der Term 1. Ordnung wegen der Maximierung der Entropie gleich null. Damit ist die Differenz zwischen momentaner Entropie S und maximaler Entropie S_0 nur durch den Term 2. Ordnung gegeben. Er wird als Exzessentropie (Prigogine, 1978; Schurz, 2006; Olah, 2011) bezeichnet. Die Exzessentropie muss stets negativ sein, da S_0 das Maximum der Entropie darstellt. Allerdings hängt von ihrer Veränderung ab, ob das System stabil ist oder nicht. In Systemen nahe am thermodynamischen Gleichgewicht werden Einflüsse gedämpft. Beim Zubewegen auf den Gleichgewichtszustand – ein stabiler Attraktor – ist die Veränderung der Exzessentropie also positiv. Denn sie wächst ausgehend von einem negativen Wert an und verschwindet im Gleichgewichtszustand schließlich. Damit gilt für stabile Zustände:

$$\frac{d(\delta^2 S)}{dt} > 0 \quad \{16\}$$

Fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht werden Einflüsse nicht unbedingt gedämpft, da keine stabilen Attraktoren existieren. Hier kann die Exzessentropie ausgehend von einem negativen Wert immer kleiner werden, also ins Negative anwachsen. Daher gilt für die Exzessentropieproduktionsrate in solchen instabilen Systemzuständen:

$$\frac{d(\delta^2 S)}{dt} < 0 \quad \{17\}$$

Die Exzessentropieproduktionsrate kann somit als Stabilitätskriterium fungieren (Olah, 2011) und beschreibt, wie sich Fluktuationen auswirken. Im komplexen System können Fluktuationen anwachsen und es kommt zu einer positiven Rückkopplung, einer Selbstverstärkung. Die zufällige Veränderung einer Systemkomponente bewirkt also, dass andere in gleicher Weise beeinflusst werden.

Haken (1991) prägte diesbezüglich den Begriff der Versklavung. Entscheidend für die Selbstorganisation ist allerdings das Wechselspiel zwischen positiven und negativen Rückkopplungen (Schlichting, 2000). Ab einem bestimmten Verstärkungsgrad treten negative Rückkopplungen zunehmend zutage, sodass der Verstärkung Grenzen gesetzt werden. Das System regelt sich ein. Es organisiert sich selbst.

Dass es sich dabei um eine Strukturbildung handelt, wird erneut am Beispiel der Sandrippel deutlich. Wegen statistischer Fluktuationen sind die Sandkörner nicht gleichmäßig verteilt. An einem Ort mit zeitweilig höherer Dichte an Sandkörnern, kommt es durch die vermehrten Stöße zu einer höheren Dissipation als an Orten mit weniger Sandkörnern. Folglich ist die durchschnittliche kinetische Energie von Sandkörnern an Orten mit mehr Körnern geringer als an Orten mit wenigen Körnern. Daher ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich Sandkörner von bereits entstandenen Anhäufungen entfernen geringer als der umgekehrte Fall. Dies begründet die Selbstverstärkung im System. Allerdings können die Anhäufungen nicht beliebig stark anwachsen. Je höher die Anhäufung wird, desto steiler wird sie. Bei einer bestimmten Steilheit wird ein kritischer Winkel erreicht, ab dem die Gravitation dafür sorgt, dass die Körner von der Anhäufung hinunterrollen. Dieser Effekt komplettiert das Wechselspiel positiver und negativer Rückkopplungen (Schlichting & Nordmeier, 1996). Es bewirkt eine Selbstorganisation im System aus Sand und Strömungen.

Der Prozess ist als dissipative Strukturbildung bekannt (Schlichting, 2000). Die auslösenden Fluktuationen bilden gewissermaßen den Keim von Ordnung in einem System, das sich durch nichtlineares Verhalten auf Basis deterministischer Funktionen selbst zu organisieren vermag.

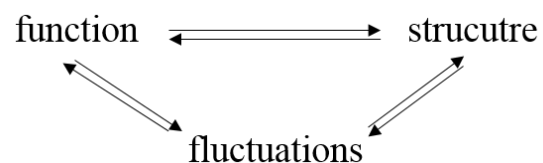


Abb. 4: Das Zusammenspiel von Funktion, Fluktuation und Struktur (Prigogine, 1978, S. 781)

4.1.6. Zusammenfassung und Gesamtrahmen

Die dargestellten Charakteristika zeigen, dass die gesamte Küsten- und Meeresregion als komplexes System angesehen werden muss. Es ist offen. Ständig gegenwärtige Temperatur- und Konzentrationsgradienten sowie äußere Kräfte treiben die Dynamik an. Sie drückt sich in Form von Wasser- und Luftströmungen aus und kann gewissermaßen als *Ausgleichsprozess* verstanden werden. Die strömenden Fluide wechselwirken mit der vielfältigen Materie an der Küste und im Ozean, dessen Zusammenspiel neue emergente Systemeigenschaften herbeiführt. Sie sind so komplex, dass lineare Modellierungen nicht genügen. Insbesondere Rückkopplungen sind für das nichtlineare Verhalten der Systeme von zentraler Bedeutung.

Genau an dieser Stelle zeigt sich, dass *Ausgleich* und *Struktur* zwei Seiten ein und derselben Medaille sind. Während der Ausgleichsprozesse vermögen statistische Fluktuationen im Zusammenspiel mit Rückkopplungen Selbstorganisationsprozesse hin zu einer dissipativen Strukturbildung auszulösen. Genau bei diesen Strukturbildungen handelt es sich um all die aufgeführten Phänomene von den Rippeln bis zum Tsunami. Sie stimulieren wegen ihrer strukturellen Eigenschaften unsere Wahrnehmungsprozesse von Mustern in der Natur und werden daher von uns in besonderem Maße erkannt sowie mit charakterisierenden Namen bezeichnet.

Diese zwei Seiten der Medaille zeigen die Notwendigkeit auf, neben Aspekten der Mechanik und Thermodynamik auch die Theorie komplexer Systeme für die angestrebte Elementarisierung heranzuziehen. Denn, wie Bar-Yam (2007) ausführt, zeigen sich die strukturellen Eigenschaften komplexer Systeme auf einer mittleren Zeitskala. Diesbezüglich legen mechanische Betrachtungen den Fokus auf zu kurze und thermodynamische Betrachtungen den Fokus auf zu lange Zeitskalen. Mechanik und Thermodynamik müssen also unter der Perspektive komplexer Systeme gedacht werden.

Nur so können die von den Ausstellungsmacher/innen gewünschten systemischen Eigenschaften der Küsten- und Meeresregion – wie die Sensibilität gegenüber Störungen, bestimmte Interdependenzen und das daraus folgende kontraintuitive Verhalten – physikalisch fundiert betrachtet werden.

4.2. Perspektive der Ausstellungsbesuchenden

Die fachlichen Darstellungen sind als vorläufige Elementarisierungen zu verstehen, denn noch fehlt die Perspektive der Lernenden, die ggf. die fachliche Strukturierung noch zu verändern zwingt, damit sie angemessen ist. Um die Sichtweise der Besuchenden in Ausstellungen zu erheben, bedarf es einer empirischen Studie. Mithilfe einer Reihe von problemzentrierten Interviews nach Witzel (1985) soll daher die Denk- und Erfahrungswelt von Lernenden erkundet werden. Es ist zu betonen, dass es nicht darum geht, defizitorientiert vorzugehen. Die fachliche

Richtigkeit von Wissen und Vorstellungen der Besuchenden kann zwar *eine* Referenz darstellen, aber darf nie die alleinige Referenz sein. Im Erkenntnisinteresse steht das befragte Individuum im Hinblick darauf, wie es seine Vorstellungen als Denkwerkzeuge nutzt, um verschiedene Strömungs- und Strukturphänomene zu entschlüsseln. Im geplanten Interview werden zwei Exponate im Zentrum stehen, die jeweils ein Strömungs- bzw. ein Strukturphänomen darstellen. Beide Exponate dienen als erzählgenerierende Impulse und Anlass, über Strömungs- und Strukturphänomene nachzudenken und zu sprechen. Die Umsetzung dieser empirischen Studie steht noch aus, wird aber zurzeit vorbereitet.

4.3. Didaktische Strukturierung

Die vorgenommene Elementarisierung ist Kern der didaktischen Strukturierung. Didaktische Strukturierung bedeutet im vorliegenden Fall die Formulierung didaktischer Leitlinien für die besagten Ausstellungsmacher/innen. Die Leitlinien fußen auf der Elementarisierung, gehen aber auch darüber hinaus. Sie sollen die fachlichen Grundlagen aufzeigen, aber auch verdeutlichen, inwiefern die fachliche Sicht von derjenigen der Lernenden abweicht bzw. an welchen Stellen, in Bezug auf welche Begriffe und Konzepte beide übereinstimmen. Der Vergleich zwischen fachlicher Sicht und Sicht der Besuchenden ist deswegen zentral, weil er deutlich macht, in welchen Bereichen die Ausstellungsmacher/innen an brauchbarem Vorwissen der Besuchenden anknüpfen können und wo sie entweder den Besuchenden beim Umdeuten ihrer Vorstellungen helfen oder aber die Vorstellungen mit fachlichem Wissen konfrontieren müssen (Duit, 2002).

Die Leitlinien sind damit ein Anreiz für die Ausstellungsmacher/innen, die Sachstrukturen ausgewählter Strömungs- und Strukturphänomene als Basis für die Planung neuer Exponate zu rekonstruieren. Nach der Formulierung dieser Ausstellungsleitlinien sollen sie ebenfalls empirisch untersucht werden. Dazu dienen Experteninterviews (Bogner, Littich & Menz, 2005) zu den Leitlinien, und zwar mit:

- a) FachwissenschaftlerInnen
- b) FachdidaktikerInnen
- c) AusstellungsmacherInnen

Diese drei Personengruppen sind zentrale Akteure im Handlungsfeld von Ausstellungen. Die Fachwissenschaftler/innen sollen bewerten, inwiefern die Leitlinien fachgerecht sind. Fachdidaktiker/innen sollen beurteilen, inwieweit sie an die Bedürfnisse von Lernenden angepasst sind. Und Ausstellungsmacher/innen sollen schließlich entscheiden, ob die Leitlinien zum Zwecke der Ausstellungsgestaltung zielgerecht sind. Auf der Grundlage sämtlicher Rückmeldungen wird der erste Satz von Leitlinien überarbeitet, um sie in Form einer Handreichung den Ausstellungsgestalter/innen zur Verfügung zu stellen.

5. Literatur

- [1] Bartelmann, M., Feuerbacher, B., Krüger, T., Lüst, D., Rebhan, A. & Wipf, A. (2015). *Theoretische Physik*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [2] Bar-Yam, Y. (2003). *Dynamics of Complex Systems*. Boulder, Colorado: Westwing Press.
- [3] Bleichroth, W. (1991). Elementarisierung, das Kernstück der Unterrichtsvorbereitung. *Naturwissenschaft im Unterricht. Physik*, 39, 4-11.
- [4] Bliesmer, K. (2016). *Fachdidaktische Analyse von Bildungsangeboten norddeutscher Meeresforschungsinstitute*. Masterarbeit: Universität Oldenburg.
- [5] Blundell, S. J. & Blundell, K. M. (2010). *Concepts in Thermal Physics*. Oxford: University Press.
- [6] Bogner, A., Littich, B. & Menz, W. (2005). *Das Experteninterview. Theorie, Methode, Anwendung*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- [7] Clausen, S. (2015). *Systemdenken in der außerschulischen Umweltbildung*. Münster: Waxmann.
- [8] Duit, R. (2002). Alltagsvorstellungen und Physik lernen. In E. Kircher & W. Scheider (Hrsg.), *Physikdidaktik in der Praxis* (S. 1-26). Berlin, Heidelberg: Springer.
- [9] Duit, R., Gropengießer, H., Kattmann, U., Komorek, M. & Parchmann, I. (2012). The Model of Educational Reconstruction – a Framework for improving Teaching and learning Science. In: D. Jorde & J. Dillon (Hrsg.), *Science Education Research and Practice in Europe* (S. 13-37). Rotterdam, Boston, Taipei: Sense Publishers.
- [10] Durst, F. (2006). *Grundlagen der Strömungsmechanik: eine Einführung in die Theorie der Strömung von Fluiden*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [11] Duske, P. (2017). *Bilingualer Unterricht im Fokus der Biologiedidaktik. Auswirkungen von Unterrichtssprache und -kontext auf Motivation und Wissenserwerb*. Berlin, Heidelberg: Springer VS.
- [12] Gladwell, M. (2001). *The Tipping Point. How Little Things Can Make a Big Difference*. London: Abacus.
- [13] Grotzinger, J. & Jordan, T. (2017). *Press/Siever Allgemeine Geologie*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [14] Haken, H. (1991). *Die Selbststrukturierung der Materie. Synergetik in der unbelebten Welt*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- [15] Jacobeit, J. (2007). Zusammenhänge und Wechselwirkungen im Klimasystem. In W. Endlicher & F.-W. Gerstengarbe (Hrsg.), *Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke* (S. 1-16). Potsdam: Institute for Climate Impact Research.
- [16] Kraume, M. (2012). *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik. Grundlagen und apparative Umsetzungen*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [17] Mainzer, K. (1999). *Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [18] Mayring, P. & Prenzel, M. (2011). Research on Interest in Science: Theories, Methods and Findings. *International Journal of Science Education*, 33, 27-50.
- [19] Olah, N. (2011). *Einsteins trojanisches Pferd. Eine thermodynamische Deutung der Quantentheorie*. Wien, New York: Springer.
- [20] Ossimitz, G. & Lapp, C. (2006). *Das Metanoia-Prinzip. Eine Einführung in systemgerechtes Denken und Handeln*. Hildesheim: Franzbecker Verlag.
- [21] Pfeiler, W. (2016). *Experimentalphysik. Band II: Wärme, Nichtlinearität, Relativität*. Berlin, Boston: De Gruyter.
- [22] Prigogine, I. (1978). Time, Structure and Fluctuations. *Science*, 99, 777-785.
- [23] Roskam, A. (2016). *Fachdidaktische Analyse außerschulischer Repräsentationen der (geo-) physikalischen Dynamik im Wattenmeer und an der Küste*. Masterarbeit: Universität Oldenburg.
- [24] Schlichting, H. J. (2000). Von der Dissipation zur Dissipativen Struktur. *Praxis der Naturwissenschaften/Physik*, 49, 12- 16.
- [25] Schlichting, H. J. & Nordmeier, V. (1996). Strukturen im Sand. Kollektives Verhalten und Selbstorganisation bei Granulaten. *MNU*, 49, 323-332.
- [26] Schurz, J. (2006). *Systemdenken in der Naturwissenschaft. Von der Thermodynamik zur Allgemeinen Systemtheorie*. Heidelberg: Carl-Auer-Verlag.
- [27] Sommer (2006). *Untersuchung der Systemkompetenz von Grundschulern im Bereich Biologie*. Dissertation: Universität Kiel.
- [28] Spurk, J. & Aksel, N. (2010). *Strömungslehre. Einführung in die Theorie der Strömungen*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [29] UNESCO World Heritage Committee (2009). *Report of Decisions*, Seville, 22-30 June (WHC-09/33.COM/20).
- [30] Wilde, K. (1978). *Wärme- und Stoffübergang in Strömungen*. Darmstadt: Dr. Dietrich Steinkopf Verlag.
- [31] Witzel, A. (1985). Das problemzentrierte Interview. In G. Jüttemann (Hrsg.), *Qualitative Forschung in der Psychologie: Grundfragen, Verfahrensweisen, Anwendungsfelder* (S. 227-255). Weinheim: Beltz.
- [32] Worthoff, R. & Siemens, W. (2012). *Grundbegriffe der Verfahrenstechnik*. Weinheim: Wiley-VCH.

Das Elektronengasmodell aus Sicht der Lehrkräfte

Jan-Philipp Burde*, Thomas Wilhelm*

* Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt
burde@physik.uni-frankfurt.de, wilhelm@physik.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

Im Rahmen einer Design-Based-Research-Studie (DBR) unterrichteten 14 Lehrkräfte aus dem Frankfurter Raum ihre Klassen nach einem Unterrichtskonzept auf Basis des Elektronengasmodells. Die Grundidee dieses Unterrichtskonzepts für die Sekundarstufe I, das aufbauend auf Erkenntnissen aus Teaching Experiments entwickelt wurde, besteht darin, das elektrische Potenzial mit dem Luftdruck bzw. einem „elektrischen Druck“ im Leiter zu vergleichen und die elektrische Spannung so als „elektrischen Druckunterschied“ einzuführen.

In der Studie wurde ein für DBR-Projekte typischer multiperspektivischer Ansatz („Triangulation“) verfolgt, der neben einer quantitativen auch eine qualitative Evaluation des Unterrichtskonzepts vorsieht. Hierzu wurden im vorliegenden Fall die schulpraktischen Erfahrungen der Lehrkräfte mit dem neuen Unterrichtskonzept erhoben. Dabei zeigte sich, dass die Lehrkräfte dem Unterrichtskonzept grundsätzlich eine hohe Lernförderlichkeit bescheinigen, jedoch insbesondere in Bezug auf die Erklärung von Reihenschaltungen mit Hilfe von Übergangszuständen noch Verbesserungsbedarf sehen. Insgesamt 12 der 14 Lehrkräfte geben an, auch in Zukunft auf Grundlage des Elektronengasmodells unterrichten zu wollen.

1. Motivation

Viele Schülerinnen und Schüler besitzen auch am Ende der Sekundarstufe I kein eigenständiges Spannungskonzept. Stattdessen wird die Spannung von ihnen häufig als Eigenschaft oder Bestandteil des elektrischen Stroms wahrgenommen [1, 2]. Die Gründe für diese Lernschwierigkeiten sind vielfältig und reichen von einer verfrühten Mathematisierung der Zusammenhänge über tief verankerte Schülervorstellungen bis hin zur prinzipiellen Unanschaulichkeit der Elektrizitätslehre und ihrer zentralen Größen. Insbesondere die elektrische Spannung erscheint vielen Lernenden u.a. deshalb besonders abstrakt, weil sie im Gegensatz zum elektrischen Potenzial, das einem Leiterabschnitt lokal zugeordnet werden kann, eine Differenzgröße darstellt. Paradoxiertweise wird von den Lernenden jedoch meistens erwartet, ein Verständnis für die elektrische Spannung zu entwickeln, ohne dass das elektrische Potenzial im Unterricht behandelt wurde, obwohl die elektrische Spannung eine Potentialdifferenz darstellt. Darüber hinaus wird auch vermutet, dass die Sachstruktur des traditionellen Unterrichts nicht zur Förderung eines angemessenen Spannungskonzepts beiträgt, weil sich schwerpunktmäßig mit dem elektrischen Strom auseinandergesetzt wird, der in der Regel auch vor der elektrischen Spannung eingeführt wird. In der Folge wird bei der Analyse von Stromkreisen der Strom- und nicht der Spannungsbegriff zum Primärkonzept der Lernenden, obwohl die elektrische Spannung an Widerständen erst den elektrischen Strom verursacht [3]. Ohne ein Ver-

ständnis für die Ursache-Wirkungsbeziehung zwischen Spannung und Stromstärke ist ein angemessenes Verständnis für elektrische Stromkreise nicht zu erwarten. Ein weiterer Grund für die häufigen Lernschwierigkeiten der Lernenden in Zusammenhang mit der elektrischen Spannung besteht möglicherweise auch darin, dass es bisher an einer anschaulichen und dennoch erklärungs mächtigen Modellvorstellung mangelt.

2. Grundidee des Elektronengasmodells

Das Elektronengasmodell stellt einen vielversprechenden Ansatz dar, eine anschauliche und intuitive Erklärung der elektrischen Spannung und des elektrischen Potenzials zu liefern, indem dieses mit dem Luftdruck bzw. „elektrischen Druck“ verglichen wird [4]. Die Idee hinter dem „elektrischen Druck“ besteht darin, dass sich in Metallen freie Elektronen in Teilchenform befinden und dort aufgrund ihrer gegenseitigen Coulomb-Abstoßung einen von der Elektronendichte abhängigen „elektrischen Druck“ verursachen (für eine fachliche Auseinandersetzung sei auf [5] verwiesen). In Analogie zu Luftdruckunterschieden, die die Ursache für Luftströmungen sind, wird die elektrische Spannung so als „elektrischer Druckunterschied“ und somit Antrieb des elektrischen Stroms eingeführt. Die Überlegung hinter dieser didaktischen Elementarisierung des Spannungsbegriffs besteht darin, gezielt an die Vorerfahrungen der Lernenden z.B. mit Luftmatratzen und Fahrradreifen anzuknüpfen, bei denen Luftdruckunterschiede eine Luftströmung bewirken. Wichtig ist, dass hier kein fachlich korrektes Druck-

konzept mit der in der Sekundarstufe I teils schwierigen Differenzierung zwischen skalarem Druckbegriff und vektoriellem Kraftbegriff vorausgesetzt oder eingeführt wird. Vielmehr reicht für das hier angestrebte Verständnis ein intuitives Luftdruckkonzept im Sinne von „komprimierte Luft steht unter Druck, drückt gegen die Wände und hat das Bestreben sich auszudehnen“, um zu verstehen, dass eine Strömung von Bereichen hohen zu Bereichen niedrigeren Drucks strömt. Das Ziel des auf dem Elektronengasmodell aufbauenden Unterrichtskonzepts besteht darin, den Schülerinnen und Schülern ein fundiertes qualitatives Verständnis der Wirkungszusammenhänge in Stromkreisen inkl. eines hierzu nötigen eigenständigen Spannungsbegriffs bereits im Anfangsunterricht zu ermöglichen.

3. Die DBR-Studie

Nach einer theoriegeleiteten Entwicklung der grundlegenden Ideen und einer ersten Erprobung dieser Ideen im kleinen Rahmen mit Hilfe von Akzeptanzbefragungen bzw. Teaching Experiments [6] wurde ein entsprechendes Unterrichtskonzept inkl. passender Unterrichtsmaterialien wie z.B. Overheadfolien, Übungsaufgaben und Zusammenfassungen für den praktischen Einsatz im realen Physikunterricht entwickelt [7]. Dieses Unterrichtskonzept auf Basis des Elektronengasmodells wurde anschließend im Schuljahr 2015/16 im Frankfurter Raum empirisch evaluiert. Hierzu unterrichteten 14 Lehrkräfte insgesamt 19 Gymnasialschulklassen nach dem neuen Konzept (Treatmentgruppe), während weitere 17 Gymnasialschulklassen von 11 Lehrkräften traditionell unterrichtet wurden (Kontrollgruppe). Es zeigte sich, dass die Schülerinnen und Schüler der Treatment- gegenüber der Kontrollgruppe einen höchst signifikant höheren Lernzuwachs erzielten. Der Unterschied zwischen den beiden Gruppen entspricht einer Effektstärke von $d = .94$, was einen großen Effekt darstellt [8].

Im Sinne des Forschungsansatzes von Design-Based-Research (DBR) ist es jedoch nicht nur von Interesse zu untersuchen, ob die Schülerinnen und Schüler aufgrund des neuen Unterrichtskonzeptes einen höheren Lernerfolg erzielen, sondern auch, wie das neue Unterrichtskonzept von den Lehrkräften auf Basis ihrer Praxiserfahrungen beurteilt wird. Der Grund hierfür ist, dass das neue Unterrichtskonzept nur dann in der Schulpraxis ankommen kann, wenn es von den Lehrkräften akzeptiert wird. Ein wesentliches Ziel von DBR als Forschungsansatz besteht nämlich darin, Forschung zum „Zwecke der Innovation“ [9, S.53] zu betreiben. Hierrunter wird nicht die alleinige Existenz neuer Unterrichtsmaterialien oder didaktischer Erkenntnisse verstanden, sondern dass diese auch ihren Weg in die Unterrichtspraxis finden und dort von den Betroffenen als signifikante Verbesserung wahrgenommen werden. Design-Based-Research hat also bereits bei der For-

schungskonzeption die spätere Implementation der Forschungserkenntnisse in der Praxis im Blick, um einen Beitrag zur Überwindung der oft beklagten Kluft zwischen Forschung und Praxis zu leisten. Auch in Hinblick auf eine DBR-typische Überarbeitung des Unterrichtskonzepts zu einem späteren Zeitpunkt im Rahmen eines Re-Designs ist es wichtig, die Praxiserfahrungen der Lehrkräfte mit dem Unterrichtskonzept zu kennen, um die so gewonnenen Erkenntnisse in die Weiterentwicklung des Unterrichtskonzepts einfließen lassen zu können.

4. Qualitative Erhebung

Um ein Bild davon zu bekommen, wie die Lehrerinnen und Lehrer das Unterrichtskonzept bewerten, d.h. wo sie beispielsweise die Stärken des Unterrichtskonzepts und wo tendenziell Verbesserungsbedarf sehen, wurde ein Online-Fragebogen erstellt und per E-Mail an die Lehrkräfte verteilt. Der Fragebogen hatte einen Umfang von etwa 30 Minuten, gliederte sich in verschiedene thematische Abschnitte und nutzte zwei verschiedene Frageformate. Mit Hilfe von vorformulierten Aussagen und einer Antwortskala vom Likert-Typ wurde einerseits versucht, von den Lehrkräften eine Gesamteinschätzung zum Unterrichtskonzept zu bekommen. Das geschlossene Frageformat wurde gewählt, um bei diesen Fragen eine Vergleichbarkeit der Antworten zu gewährleisten. Die andererseits nahezu ausschließlich offenen Fragen zu unterschiedlichen Aspekten des Unterrichtskonzepts sollten den Lehrkräften hingegen ermöglichen, eine differenzierte Beschreibung ihrer jeweiligen Sichtweisen und Erfahrungen zu geben. Während die geschlossenen Fragen zur Gesamteinschätzung des Unterrichtskonzepts im Online-Fragebogen zwingend zu beantworten waren, hatten viele offene Fragen einen optionalen Charakter, weil davon ausgegangen wurde, dass nicht jede Lehrkraft zu jeder Frage etwas beizutragen hat. Insgesamt beteiligten sich 14 Lehrkräfte der Treatmentgruppe an dem Fragebogen.

5. Ergebnisse

Für 12 dieser 14 Lehrkräfte waren Neugier und Interesse an neuen Unterrichtsansätzen das Hauptmotiv, an der Studie teilzunehmen. Weitere zwei Lehrkräfte gaben an, mit ihrem bisherigen Vorgehen im Unterricht unzufrieden gewesen zu sein. Während ihrer bisherigen Lehrtätigkeit hatten zwölf Lehrkräfte bereits das Modell des geschlossenen, ebenen Wasserkreislaufs [10], fünf das Modell des offenen Wasserkreislaufs mit Höhenunterschied [11] und drei bereits das Autobahn-Modell im Unterricht genutzt. Einzelne Lehrkräfte berichteten darüber hinaus, u.a. bereits das Stäbchenmodell [12], das Fahrradkettenmodell bzw. den starren Elektronenring [13] sowie das Rucksackmodell [14] eingesetzt zu haben.

Das Unterrichtskonzept führt zu einem guten konzeptionellen Verständnis...

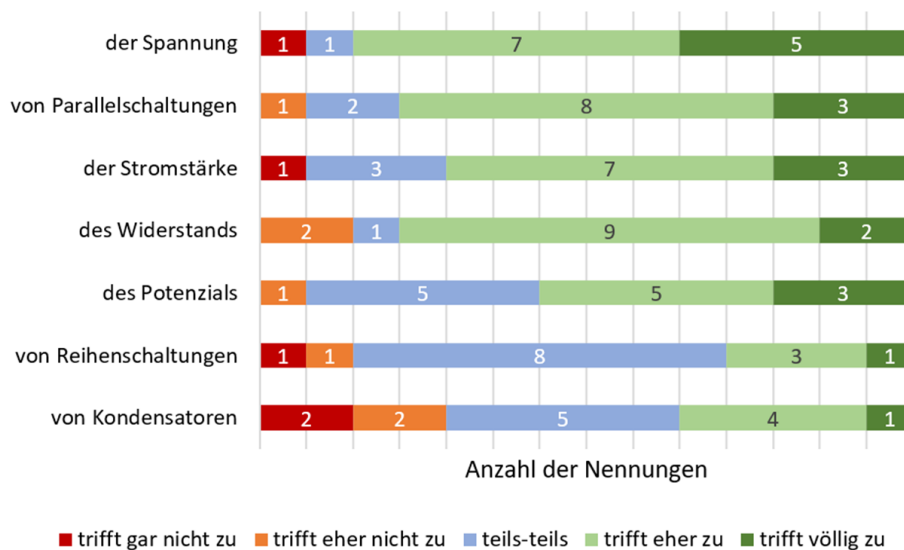


Abb. 1: Bewertung der Lernförderlichkeit des Unterrichtskonzepts in Hinblick auf grundlegende Konzepte in der Elektrizitätslehre durch die Lehrkräfte

5.1. Bewertung der Lernförderlichkeit

Die Bewertung der Lernförderlichkeit diverser grundlegender Konzepte stellte den ersten Teil der geschlossenen Fragen dar, die von den Lehrkräften mit Hilfe einer Likert-Skala mit den Kategorien „trifft gar nicht zu“, „trifft eher nicht zu“, „teils-teils“, „trifft eher zu“ und „trifft völlig zu“ beantwortet werden sollten. Das Ziel bestand darin, von den Lehrkräften eine Gesamteinschätzung darüber zu erhalten, inwiefern das Unterrichtskonzept zu einem guten konzeptionellen Verständnis von verschiedenen grundlegenden Konzepten in der Elektrizitätslehre führt. Wie Abbildung 1 zu entnehmen ist, gibt es kaum Konzepte, bei denen das Unterrichtskonzept aus Sicht von mehr als einer Lehrkraft gar nicht oder eher nicht zu einem guten Verständnis bei den Lernenden führt. Eine Mehrheit bescheinigt dem Unterrichtskonzept, zu einem guten konzeptionellen Verständnis der elektrischen Spannung, der Stromstärke, des Widerstands, des Potenzials und von Parallelschaltungen zu führen. Etwas unschlüssig sind sich die Lehrkräfte hingegen bzgl. der Frage, ob das Unterrichtskonzept zu einem guten konzeptionellen Verständnis von Kondensatoren und Reihenschaltungen führt.

Da das Unterrichtskonzept vor dem Hintergrund entwickelt wurde, den Lernenden ein gutes konzeptionelles Verständnis der elektrischen Spannung zu vermitteln, weil dies in der Regel im traditionellen Physikunterricht nicht gelingt, ist es sehr erfreulich, dass die Lehrkräfte dem Unterrichtskonzept bzgl. der elektrischen Spannung die höchste Lernförder-

lichkeit bescheinigen. Der Umstand, dass das Unterrichtskonzept nach Ansicht einer großen Mehrheit der Lehrkräfte ebenfalls zu einem guten konzeptionellen Verständnis von Parallelschaltungen, der Stromstärke, des Widerstands und des elektrischen Potenzials führt, deutet darauf hin, dass diese vergleichsweise hohe Lernförderlichkeit der elektrischen Spannung nicht auf Kosten des übrigen Konzeptverständnisses zu gehen scheint. Die von den Lehrkräften etwas geringer bewertete Lernförderlichkeit in Bezug auf Kondensatoren ist wenig überraschend, da Lade- und Entladevorgänge von Kondensatoren lediglich zur Hinführung zu Reihenschaltungen dienen. Auf die Gründe für die vergleichsweise geringe Lernförderlichkeit von Reihenschaltungen wird in Abschnitt 5.5 mit Hilfe offener Fragen noch einmal genauer eingegangen.

5.2. Bewertung didaktischer Aspekte

In dem zweiten Abschnitt mit geschlossenen Fragen wurden die Lehrkräfte gebeten, eine didaktische Einschätzung zu diversen Aspekten des Unterrichtskonzepts vorzunehmen. Wie in Abbildung 2 zu sehen, sind die Lehrkräfte allgemein der Auffassung, dass das Unterrichtskonzept die abgefragten didaktischen Kriterien im Großen und Ganzen erfüllt. Während keine Lehrkraft die Auffassung vertrat, dass eines der didaktischen Kriterien von dem Unterrichtskonzept überhaupt nicht erfüllt würde, war immer die gleiche Lehrkraft der Meinung, dass das Unterrichtskonzept die didaktischen Aspekte „eher nicht“ erfülle.

Das Unterrichtskonzept...

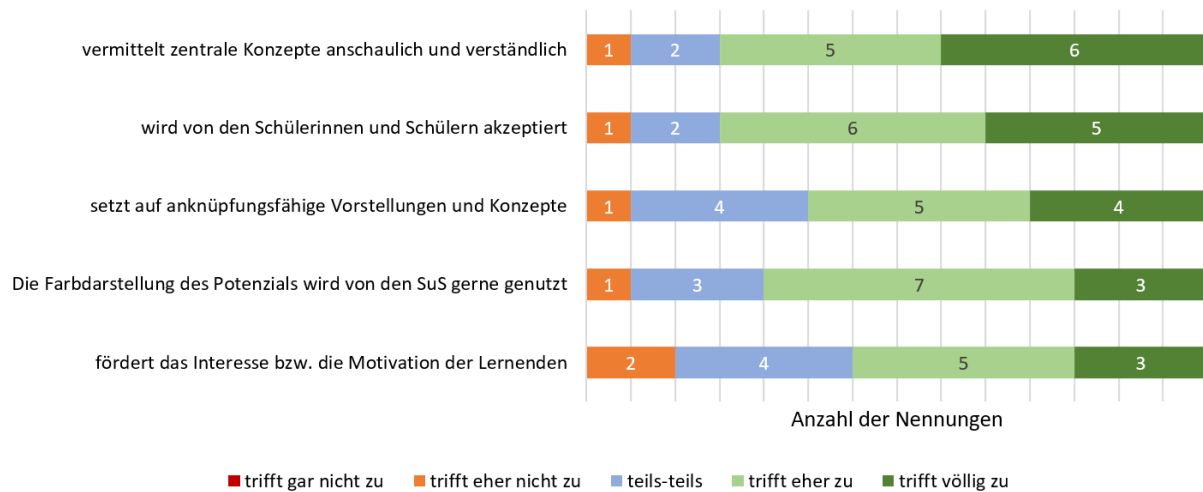


Abb. 2: Bewertung unterschiedlicher didaktischer Aspekte des Unterrichtskonzepts durch die Lehrkräfte

5.3. Bewertung grundlegender Ideen

Alle Lehrkräfte waren der grundsätzlichen Auffassung, dass es sich im Unterricht als fruchtbar erwiesen hat, die elementare Elektrizitätslehre mit Hilfe des elektrischen Potenzials zu erklären. Auf die offene Frage, ob die Schülerinnen und Schüler ein für das Unterrichtskonzept ausreichendes intuitives Luftdruckverständnis im Sinne von „komprimierte Luft steht unter Druck, drückt gegen die Wände und hat das Bestreben sich auszudehnen“ besitzen, gaben neun Lehrkräfte an, dies sei definitiv der Fall, wohingegen vier Lehrkräfte der Meinung waren, die Schülerinnen und Schüler hätten zu Beginn der Unterrichtsreihe kaum über ein solches Luftdruckkonzept verfügt, dies habe sich aber mit Hilfe des Unterrichtskonzepts schnell aufbauen lassen („Die Schüler tun sich sehr schwer mit dem Modell eines Druckes. Durch die Einführung dieses Konzeptes mit Hilfe der Spritzen, ließ sich dieses Konzept jedoch für die Schülerinnen und Schüler recht anschaulich einführen“; „Verständnis ist vorhanden bzw. kann mit dem Konzept sehr schnell hergestellt werden, auch ohne, dass Druck als phys. Größe vorher bekannt ist“). Eine Lehrkraft gab jedoch an, die Lernenden würden nicht über ein ausreichendes intuitives Luftdruckverständnis für das Unterrichtskonzept verfügen.

5.4. Stärken und Schwächen des Konzepts

Hinsichtlich der Stärken des Unterrichtskonzepts bestand zwischen den Lehrkräften vergleichsweise große Einigkeit. Der größte Vorteil des Konzepts wurde darin gesehen, dass die Luftdruckanalogie in Kombination mit der vorgeschlagenen Farbkodierung zu einem besseren konzeptionellen Verständnis der Grundgrößen elektrischer Stromkreise führt („eine Vorstellung von Spannung, Stromstärke und Widerstand fällt einem fast in den Schoß“; „die

Schülerinnen und Schüler können sehr schnell und auf einfache Weise komplexe Stromkreise analysieren und korrekt bestimmen, welche Lampe leuchtet, wie sich die Spannungen verteilen und welche Lampen parallel geschaltet sind“). Darüber hinaus wurde positiv hervorgehoben, dass insbesondere der Unterschied zwischen Spannung und Stromstärke im Konzept klar herausgearbeitet wird und die Ursache-Wirkungs-Beziehung zwischen Spannung und Strom deutlich wird. Neben der Tatsache, dass das Unterrichtskonzept gutes und reichliches Übungsmaterial enthält („Die SuS waren sehr begeistert von dem liebevoll gestalteten Info-Material und fanden das Übungsheft prima“; „Hervorragend zusammengestelltes Material, tolle inhaltliche Durchdringung des Themas, gute Strukturierung“), wurde von den Lehrkräften vor allem gelobt, dass die Schülerinnen und Schüler durch das Unterrichtskonzept auch eine mikroskopische Modellvorstellung der Vorgänge in elektrischen Stromkreisen bekommen.

Während hinsichtlich der Vorteile des Unterrichtskonzepts weitgehende Einigkeit bei den Lehrkräften bestand, zeigte sich bzgl. der Schwächen des Unterrichtskonzeptes kein klares Bild. Sieht man von Punkten ab, die nur von einzelnen Lehrkräften kritisiert wurden, bestand die Hauptkritik darin, dass die gewählte Farbkodierung (rot für den elektrischen Überdruck am Minuspol bzw. blau für den elektrischen Unterdruck am Pluspol) der in der Physik gängigen Konvention widerspricht, wonach der Pluspol rot und der Minuspol blau dargestellt werden. Kritisiert wurde ferner, dass die Erklärungen zu den Reihenschaltungen mit Hilfe der Übergangszustände zu abstrakt bzw. theoretisch für den Anfangsunterricht seien und insgesamt zu wenige Vorschläge für den Einsatz von Experimenten gemacht würden. Auch wurde von einigen Lehrkräften angemerkt, dass das Unterrichtskonzept mit allen Mate-

rialien in der Umsetzung teils mehr Zeit in Anspruch genommen hätte als veranschlagt. Auch wenn die unkonventionelle Farbwahl von den Lehrkräften kritisiert wurde, gab eine große Mehrheit von 11 Lehrkräften an, dass die Schülerinnen und Schüler selber mit der im Unterrichtskonzept genutzten Farbkodierung keine Probleme gehabt hätten und diese auch nicht zu Verständnisschwierigkeiten geführt habe. Vielmehr scheint es so zu sein, dass sich manche Lehrkräfte mit der unkonventionellen Farbkodierung schwergetan haben, wie die beiden folgenden Zitate aus dem Fragebogen illustrieren: „die Schülerinnen und Schüler haben die Farbwahl so verinnerlicht, dass sie diese in der Lernkontrolle überwiegend korrekt angewendet haben, obwohl mir in der Aufgabenstellung ein Fehler (Farbvertauschung) unterlaufen ist“; „Die SuS kamen damit ganz gut zurecht. Ich musste mich konzentrieren um es nicht falsch zu machen“. Weitere drei Lehrkräfte gaben an, dass es in ihrem Unterricht in Folge der Farbkodierung zu Verständnisschwierigkeiten bei den Schülerinnen und Schülern gekommen sei.

5.5. Erklärung von Reihenschaltungen

Um den Schülerinnen und Schülern die Entwicklung einer dynamischen Modellvorstellung mit Übergangszuständen zur Analyse von Reihenschaltungen zu erleichtern, wurden im Unterrichtskonzept zunächst Lade- und Entladevorgänge von Kondensatoren betrachtet [7], obwohl Kondensatoren in der Mittelstufe normalerweise nicht Unterrichtsgegenstand sind. Bei der Frage, ob dieses Vorgehen sinnvoll sei oder nicht, zeigten sich die Lehrkräfte gespalten. Auf der einen Seite waren vier Lehrkräfte der Ansicht, dass dieses Vorgehen prinzipiell sinnvoll sei, aber dass Kondensatoren aus Zeitgründen aus dem Unterrichtskonzept gestrichen werden sollten. Weitere zwei Lehrkräfte waren der Meinung, die Behandlung des Themas Kondensatoren sei schlicht unnötig. Auf der anderen Seite vertraten vier Lehrkräfte die Ansicht, die Analyse von Lade- und Entladevorgängen bei Kondensatoren sei wichtig für das Verständnis von Übergangszuständen bzw. Reihenschaltungen.

Eindeutig fiel hingegen das Urteil der Lehrkräfte bzgl. der Frage aus, ob die Schülerinnen und Schüler Reihenschaltungen auch alleine mit Hilfe von Übergangszuständen und ohne die Fahrradkettenanalogie analysieren könnten. Die Mehrheit von acht Lehrkräften war hier der Meinung, eine solche Analyse rein mit Hilfe von Übergangszuständen würde den meisten Schülerinnen und Schülern sehr schwer fallen, während weitere zwei Lehrkräfte angaben, nur leistungsstärkere Schülerinnen und Schüler kämen auch alleine mit den Übergangszuständen zurecht. Somit scheinen sich die Lehrkräfte darin einig, dass Reihenschaltungen im Anfangsunterricht von den meisten Schülerinnen und Schülern nicht alleine mit Übergangszuständen, d.h. ohne die Zuhilfenahme anderer Erklärungen bzw. Modelle, analysiert werden können.

Bei der Frage, ob die parallele Verwendung der Fahrradkettenanalogie zur Erklärung von Reihenschaltungen neben der Betrachtung der Übergangszustände sinnvoll sei oder nicht, zeigten sich die Lehrkräfte gespalten. Die eine Hälfte der Lehrkräfte gab an, dass die Fahrradkettenanalogie hier eine klare Hilfe für die Schülerinnen und Schüler gewesen sei – insbesondere in Bezug auf die Addition von Widerständen und die Konstanz der Stromstärke bei Reihenschaltungen. Die andere Hälfte teilte sich auf drei Lehrkräfte auf, die der Meinung waren, die Fahrradkettenanalogie sei für ein Verständnis von Reihenschaltungen nicht notwendig und würde von den Schülerinnen und Schülern sogar abgelehnt bzw. nicht verstanden, während weitere zwei Lehrkräfte die Auffassung vertraten, dass im Unterrichtskonzept neben dem Elektronengasmodell keine weiteren Modelle verwendet werden sollten.

5.6. Zukünftiger Unterricht

Alles in allem scheinen die Lehrkräfte mit dem Unterrichtskonzept sehr zufrieden zu sein, da 12 der 14 Lehrkräfte angaben, die Elektrizitätslehre auch in Zukunft auf Grundlage des hier vorgeschlagenen Elektronengasmodells unterrichten zu wollen („[...] weil ich es für sehr anschaulich und gut durchdacht halte. Zudem bietet es schwächeren Schülern die Möglichkeit einen Zugang zu diesem doch sehr anspruchsvollen Themenbereich zu erlangen“). Eine weitere Lehrkraft war sich noch nicht ganz sicher und eine Lehrkraft lehnte es ab, ihren Elektrizitätslehreunterricht in Zukunft auf dem Elektronengasmodell aufzubauen („Falls ich sehr intelligente Schüler haben werde, könnte ich mir vorstellen, ihnen das als Differenzierung reinzugeben, aber als Unterrichtsmodell nicht mehr“). Auf die Frage, was sie am Unterrichtskonzept ändern würden, sofern sie in Zukunft wieder danach unterrichten, wurde von den Lehrkräften am häufigsten geantwortet, dass sie das Konzept durch das Streichen von Texten und Aufgaben zeitlich straffen würden.

Entsprechend der großen persönlichen Zustimmung zu dem Unterrichtskonzept gaben 11 der 14 Lehrkräfte an, das Unterrichtskonzept auch an Kolleginnen und Kollegen weiterempfehlen zu wollen oder dies bereits getan zu haben („Ja, weil ich die Erfahrungen damit als sehr positiv empfinde und weil ich glaube, dass ein besseres konzeptionelles Verständnis vermittelt wird als bei einem konventionellen Unterrichtsgang.“; „Das Konzept ist durchdacht und gefällt mir wesentlich besser als das Wassermmodell“; „Ich habe den Eindruck, dass die SuS dieses abstrakt erscheinende Thema besser verstehen“). Bei zwei weiteren Lehrkräften war das Unterrichtskonzept den Kolleginnen bzw. Kollegen schon bekannt, z.B. weil diese auch an der Studie teilgenommen haben, und eine Lehrkraft plant nicht, das Unterrichtskonzept weiterzuempfehlen („Ich präferiere trotz meiner jetzigen Erfahrung mit dem Elektronengasmodell das Wasserkreislaufmodell. [...] Mein persönlicher Eindruck ist, dass ich mit dem

Wassermodell im Unterricht mehr Physik transportieren kann als mit dem Elektronengasmodell“).

6. Ausblick

Entsprechend des Design-Based-Research-Ansatzes mit seinen Zyklen aus Design, Erprobung und Re-Design kann das Unterrichtskonzept trotz seiner bereits hohen Lernförderlichkeit nicht als ein abgeschlossenes Produkt betrachtet werden. Die Idee besteht vielmehr darin, das Unterrichtskonzept in einem weiteren Entwicklungszyklus auf Basis der in dieser Studie gesammelten Erfahrungen weiter zu optimieren und Lösungen für die noch bestehenden Schwächen und Unzulänglichkeiten zu finden. Dahinter steht die Überzeugung der DBR-Community, dass sich eine wirkliche Verbesserung der Schulpraxis nur auf evolutionärem Wege erreichen lässt und es Didaktiker braucht, die sich dem Ziel einer nachhaltigen didaktischen Innovation in ähnlichem Maße verschreiben wie die Ingenieure beim Automobil, das trotz seiner anfänglichen Unzuverlässigkeit und hohen Lautstärke durch stetige Verbesserungen zu einem großen Erfolg wurde [9, S.56; 15, S.321f). Auf Basis der schulpraktischen Erfahrungen mit dem Unterrichtskonzept sollen deshalb im Folgenden exemplarisch einige Aspekte angesprochen werden, die im Rahmen eines weiteren Entwicklungszyklus von besonderem Interesse sind.

In der Physikdidaktik ist heute unumstritten, dass eine geeignete Kontextorientierung ein wesentliches Merkmal guten Physikunterrichts darstellt, da die Einbettung von physikalischen Themen in Alltagskontexte es den Schülerinnen und Schülern erlaubt, die Physik als sinnvoll und für ihr Leben relevant wahrzunehmen [16]. Insbesondere haben zahlreiche Studien zeigen können, dass sich ein an für Mädchen interessanten Kontexten orientierter Physikunterricht positiv auf das Sachinteresse und das Selbstkonzept von Mädchen auswirkt [17, 18, 19]. Unklar hingegen ist, inwiefern eine stärkere Kontextorientierung im Unterricht auch einen positiven Einfluss auf die Lernwirksamkeit des Physikunterrichts hat. Im Rahmen der internationalen Design-Based-Research-Nachfolgestudie „EPO-EKO“ eines Konsortiums der vier Universitäten Wien, Graz, Darmstadt und Frankfurt sollen daher die Effekte des Elektronengasmodells einerseits und einer Kontextorientierung andererseits mit Hilfe eines 2x2-Designs genauer untersucht werden [20].

Auf Grundlage des Feedbacks der Lehrkräfte ist auch eine Überarbeitung diverser Aspekte des bisherigen Unterrichtskonzepts geplant, z.B. in Hinblick auf den Umgang mit Reihenschaltungen und der Farbkodierung. In der Physik wird der elektrische Pluspol üblicherweise rot und der elektrische Minuspol blau eingefärbt, während dies im Unterrichtskonzept entsprechend der gewählten Farbkodierung genau andersherum ist. Ein Anpassen der Farbkodierung aufgrund des Feedbacks der Lehrkräfte an die übliche Konvention wäre leicht umzu-

setzen, hätte aber einen entscheidenden Nachteil: Die Farbe Blau stünde dann für einen hohen elektrischen Druck, was der Alltagserfahrung widerspricht, dass hohe Werte, z.B. bei Druck oder Temperatur, in der Regel in Rot dargestellt werden. Vor dem Hintergrund, dass die Lernenden mit der bisherigen Farbkodierung kein Problem hatten, erscheint es daher hilfreicher, den Widerspruch im Unterrichtskonzept proaktiv aufzugreifen und im Rahmen einer Diskussion von technischer vs. physikalischer Stromrichtung zu thematisieren. Überträgt man nämlich die Erklärung, wie es in Folge von elektrischen Druckunterschieden zum Strom kommt, auf die technische Stromrichtung, kann die konventionelle Farbkodierung von Plus- und Minuspol so interpretiert werden, dass früher am Pluspol ein elektrischer Überdruck und am Minuspol ein elektrischer Unterdruck von positiven Ladungsteilchen angenommen wurde.

Viele Lehrkräfte vertraten die Ansicht, dass eine Analyse von Reihenschaltungen alleine mit Hilfe von Übergangszuständen die meisten Schülerinnen und Schüler im Anfangsunterricht überfordert. Es ist deshalb zu überlegen, ob nicht zunächst ausgehend von einfachen Spannungsmessungen an einer Reihenschaltung von unterschiedlichen Widerständen erarbeitet werden sollte, dass an größeren Widerständen auch eine größere Spannung abfällt. Darauf aufbauend könnte dann gemeinsam überlegt werden, wie dies innerhalb des Elektronengasmodells zu erklären ist. Im Rahmen einer Binnendifferenzierung könnte hier angestrebt werden, dass die meisten Lernenden diese Erklärung zwar nachvollziehen, jedoch nur leistungsstärkere Schülerinnen und Schüler die Argumentation mit Übergangszuständen auch auf unbekannte Schaltungen anwenden können sollen. Zudem ist zu überlegen, den Schülerinnen und Schülern ein Verständnis für die Übergangsprozesse durch den Einsatz von passenden Animationen zu erleichtern. Ein weiterer Kritikpunkt einiger Lehrkräfte bestand darin, dass das Unterrichtskonzept mit allen Materialien in der Umsetzung teils mehr Zeit in Anspruch genommen hätte als veranschlagt. Es wird deshalb angestrebt, das Unterrichtskonzept zu straffen, indem bestimmte Texte gekürzt und Aufgaben gestrichen werden. Sofern in einem überarbeiteten Unterrichtskonzept der Analyse von Reihenschaltungen mit Hilfe von Übergangszuständen eine geringere Bedeutung zukommt, könnte zur Erreichung dieses Ziels auch auf eine Thematisierung von Lade- und Entladevorgängen von Kondensatoren verzichtet werden.

7. Literatur

- [1] Rhöneck, C. v. (1986): Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis und zu den Begriffen Strom, Spannung und Widerstand. In: *Naturwissenschaften im Unterricht - Physik 34* (13), S. 10–14.

- [2] Maichle, U. (1982): Schülervorstellungen zu Stromstärke und Spannung. In: *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik/Chemie* 30 (11), S. 383–387.
- [3] Cohen, R.; Eylon, B.; Ganiel, M. (1983): Potential difference and current in simple electric circuits: A study of students' concepts. In: *American Journal of Physics* 51 (5), S. 407–412.
- [4] Steinberg, M. S.; Wainwright, C. L. (1993): Using Models to Teach Electricity – The CASTLE Project. In: *The Physics Teacher* 31 (6), S. 353–357.
- [5] Burde, J.-P.; Wilhelm, T.; Wiesner, H. (2014): Das Elektronengasmodell in der Sekundarstufe I. Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Frankfurt 2014. In: *PhyDid-B*. Online verfügbar unter <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/505/652>
- [6] Burde, J.-P.; Wilhelm, T. (2015): Akzeptanzbefragung zum Elektronengasmodell. Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Wuppertal 2015. In: *PhyDid B*. Online verfügbar unter <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/602/734>
- [7] Burde, J.-P.; Wilhelm, T. (2017): Die Elektrizitätslehre mit dem Elektronengasmodell. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*.
- [8] Burde, J.-P.; Wilhelm, T. (2018): Empirische Befunde zur Lernförderlichkeit des Elektronengasmodells. In: C. Maurer (Hrsg.): *Qualitätsvoller Chemie- und Physikunterricht – normative und empirische Dimensionen*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Regensburg 2017, Band 38, 2018, S. 122 – 125.
- [9] Reinmann, G. (2005): Innovation ohne Forschung? Ein Plädoyer für den Design-Based Research Ansatz. In: *Unterrichtswissenschaft* 33 (1), S. 52–69.
- [10] Burde, J.-P.; Wilhelm, T. (2018): Hilft die Wasserkreislaufanalogie? In: Wilhelm, T. (Hrsg.): *Stolpersteine überwinden im Physikunterricht. Anregungen für fachgerechte Elementarisierungen*, Aulis/Friedrich, Seelze, S.100-104.
- [11] Schwedes, H.; Dudeck, W.-G.; Seibel, C. (1995): Elektrizitätslehre mit Wassermodellen. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 44 (2), S. 28–36.
- [12] Gleixner, C. (1998): *Einleuchtende Elektrizitätslehre mit Potenzial*. Dissertation. LMU München.
- [13] Härtel, H. (2012): Der alles andere als einfache elektrische Stromkreis. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 61 (5), S. 17–24.
- [14] Wilhelm, T. (2018): Elektronen als Energieträger? In: Wilhelm, T. (Hrsg.): *Stolpersteine überwinden im Physikunterricht. Anregungen für fachgerechte Elementarisierungen*, Aulis/Friedrich, Seelze, S.96-99.
- [15] Bereiter, C. (2002): Design Research for Sustained Innovation. In: *Cognitive Studies* 9 (3), S. 321–327.
- [16] Labudde, P. (2001): Chancen für den Physikunterricht in der heutigen Zeit. Zehn Thesen zur physikalischen Bildung. In: *PLUS LUCIS* (2), S. 2–6.
- [17] Häußler, P.; Hoffmann, L. (1995): Physikunterricht – an den Interessen von Mädchen und Jungen orientiert. In: *Unterrichtswissenschaft* 23 (2), S. 107–126.
- [18] Berger, R. (2002): Einfluss kontextorientierten Physikunterrichts auf Interesse und Leistung in der Sekundarstufe II. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* (8), S. 119–132.
- [19] Lubben, F.; Bennett, J.; Hogarth, S.; Robinson, A. (2005): A systematic review of the effects of context-based and Science-Technology-Society (STS) approaches in the teaching of secondary science on boys and girls, and on lower-ability pupils. Review. University of London, London. Institute of Education.
- [20] Wilhelm, T.; Burde, J.-P.; Spatz, V.; Haagen-Schützenhöfer, C.; Hopf, M. (2018): Elektronengasmodell und Kontextorientierung - ein nationales Projekt. In: C. Maurer (Hrsg.): *Qualitätsvoller Chemie- und Physikunterricht - normative und empirische Dimensionen*, Bd. 38. Jahrestagung in Regensburg 2017. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Münster: Lit-Verlag.

Der Feldbegriff im Physikunterricht

- Ein Analogieversuch: Magnetisches Feld als Energiespeicher und Wechselwirkungspartner -

Erwin Fütterer, Olaf Krey, Thorid Rabe

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Didaktik der Physik, Hoher Weg 8, 06120 Halle
erwin.fuetterer@student.uni-halle.de, olaf.krey@physik.uni-halle.de, thorid.rabe@physik.uni-halle.de

Kurzfassung

Der Feldbegriff ist einer der fundamentalen Begriffe der Physik und auch im Physikunterricht wird er zur Beschreibung physikalischer Zusammenhänge an verschiedenen Stellen verwendet. Einerseits ist der Feldbegriff damit grundsätzlich geeignet, um verschiedene Unterrichtsinhalte miteinander zu vernetzen (kumulatives Lernen, potentiell Basiskonzept) und die Lernenden mit einer Grundidee der Physik (Stoff- und Feldstruktur der Materie) exemplarisch bekannt zu machen. Andererseits bleibt der Feldbegriff für die meisten Lernenden unverstanden und wird nur selten als nützlich erlebt. Im Mittelpunkt des Beitrags steht die Konzeption eines Versuchs, der die Existenz des magnetischen Feldes nahelegt und somit das Feld als *realen* Interaktionspartner zugänglich macht. Inwiefern diese Bemühungen tatsächlich lernförderlich sind und wie sie sich z.B. auf das Verstehen des Feldlinienkonzeptes auswirken, bleibt empirisch zu prüfen.

1. Überblick

Das elektromagnetische Feld und damit auch der physikalische Feldbegriff wurde mit den Arbeiten von Maxwell [1], die M. Faradays Ideen mathematisierten, zum festen Bestandteil in der physikalischen Modellbildung. Dabei wird es, wie etwa "Körper und Teilchen" ([2], S. 852), in analoger Weise unter den Systembegriff subsummiert.

Der Feldbegriff nimmt damit eine prominente Position unter den physikalischen Basisbegriffen ein: Im System Körper-Feld ist das elektromagnetische Feld als quasi körperhaft-materielles Teilsystem selbstverständlicher Wechselwirkungspartner beim Energie- und (Dreh-) Impulsaustausch [3].

So werden im Physikunterricht, z.B. auch in Sachsen-Anhalt, das magneto- und das elektrostatische Feld bereits in der Sekundarstufe 1 berücksichtigt. In der Sekundarstufe 2 wird auf der Grundlage der betrachteten elektro- bzw. magnetostatischen Phänomene beim Übergang zur Elektrodynamik das elektromagnetische Feld eingeführt. Im Bereich Mechanik wird außerdem das Gravitationsfeld thematisiert [4]. Im Sinne eines kumulativen Lernens sind damit für die gesamte Schulzeit tragfähige Anfangsvorstellungen wünschenswert, an die immer wieder angeknüpft werden kann und die den Weg für ein Feldverständnis im fachwissenschaftlichen Sinne befördern.

Wie sich im nächsten Abschnitt zeigen wird, scheint der Physikunterricht gerade dieser Intention noch nicht immer gerecht werden zu können.

2. Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten

Die Schwierigkeiten, mit denen die Lernenden rund um den physikalischen Feldbegriff konfrontiert

werden, sind erheblich, wie Girwidz & Storck [5] bei der Vorstellung der Befunde aus betreffenden Studien in anderen Ländern herausgearbeitet haben. Aber auch in Deutschland sind Fehlvorstellungen bei Schülerinnen und Schülern dokumentierbar, wie schon eine kleine Stichprobe (Gymnasium: 4; Gesamtschule: 1) im Rahmen einer Staatsexamensarbeit zeigen konnte [6]: In Anlehnung an White & Gunstone [7] bzw. Borges et al. [8] wurden dabei im Juni 2017 auf Basis der POE-Methode (Preception-Observation-Explanation) Interviews mit Schülerinnen und Schülern am Ende der Jahrgangsstufe 10 in Sachsen-Anhalt durchgeführt, also nach Behandlung der beiden Feldtypen im Physikunterricht. Während die Schülerinnen und Schüler Phänomene aus der Magneto- und Elektrostatik erklärten, zeigten sich neben wenigen fachadäquaten Argumentationen vor allem die Aktualität und Bandbreite von Problemen, die auf verfestigte Schülervorstellungen schließen lassen, die ihre besondere Bedeutung gerade dadurch gewinnen, dass sie im Widerspruch zu fachlich adäquaten Vorstellungen stehen. Dabei lassen sich drei zentrale Problemkategorien identifizieren:

(i) Feldlinienkonzeption bleibt unverstanden

Im Zusammenhang mit den Feldlinienbildern zeigen sich durchgängig inadäquate Argumentationen. (Gebogene) Feldlinien können als Bahnen oder Zielmarkierungen für Eisenspäne auftauchen (vgl. [9]), als Bänder einer gewissen Anzahl, die Magnetpole entsprechend stark aufeinander zuziehen, als Pfeile, die irgendwo hinzielen oder als einwirkende Strahlen, die auf ein Objekt treffen, an ihm ziehen oder darauf stoßen (vgl. [10,11,12]). Pfeillängen und -dicken können dabei etwas über die (Feld-)Stärke aussagen.

(ii) fernwirkungstheoretische Erklärungen dominieren

Zunächst ist die Verwendung von Begrifflichkeiten wie „magnetisches Feld“ und „elektrisches Feld“ bei den Erklärungen der Lernenden keine Selbstverständlichkeit. Der Begriff „elektrisches Feld“ wird teilweise sogar zurückgewiesen.

Wenn die Befragten auf den Feldbegriff verzichten, wird der Fokus oft auf die (scheinbar) sichtbaren Objekt(teile) wie Magnetpole oder elektrisch geladene Objekte gelegt, die wechselseitig aufeinander einwirken (z.B. sich anziehen oder abstoßen) (vgl. [9, 10, 13]). Aber auch Fokussierungen auf das kleinere, bewegliche Objekt sind feststellbar in Form der Passivkonstruktion „wird angezogen“. Hier wird dann zum einen mit fernwirkungstheoretischen Argumentationen begründet, zum anderen aber dem Wechselwirkungsprinzip nicht konsequent Rechnung getragen. Aber auch außergewöhnliche Erklärungsfiguren können dokumentiert werden: Zwei Schülerinnen führten die Anziehung zwischen zwei verschiedenen Magnetpolen oder zweier ungleicher elektrischer Ladungen auf ein postuliertes Ausgleichs- bzw. Neutralisationsbestreben zurück, was bereits auf Vorstellungen der Kategorie (iii) verweist.

(iii) Elektrizität und Magnetismus werden vermischt

Das elektrostatische Feld wird erst gar nicht vom magnetostatischen Feld unterschieden, wobei neben elektrisch geladenen Teilchen auch zwei Sorten beweglicher magnetischer Teilchen Einzug in die Argumentationen halten. Eine ungleiche Teilchenverteilung ist dann verantwortlich für die Ausbildung der als Plus- und Minuseiten bezeichneten Pole eines Stabmagneten (vgl. [8]).

Allen drei Kategorien sind also auch nach dem Physikunterricht Erklärungsfiguren zuordenbar, die auf entsprechende Fehlvorstellungen schließen lassen. Dies ist z.T. aus der Literatur seit langem bekannt. Allerdings liegen die letzten Erhebungen im deutschsprachigen Raum wohl über 30 Jahre zurück und über das Ausmaß der Übertragbarkeit von Befunden aus anderen Ländern gibt es wenig gesicherte Erkenntnis. Eigene Arbeiten zeigen jedoch eindrücklich die vorliegende Aktualität der Verständnisschwierigkeiten (vgl. [6]).

3. Bearbeitung der Lernschwierigkeiten

Zur Bearbeitung der Problematik sind auf der Grundlage der Studienergebnisse schon verschiedene Empfehlungen ausgesprochen worden, von denen exemplarisch hier einige genannt seien: Galili [9] schlägt eine Betonung der elektrischen Feldstärke E bei der Einführung des elektrischen Feldes vor, aus der dann erst Kräfte berechnet werden und nicht umgekehrt. Außerdem spricht er sich für eine analoge Behandlung im Zusammenhang mit der Gravitation aus.

Zur Bearbeitung der Feldlinienproblematik empfehlen Pocić & Finley [10] den geometrischen Charakter der Feldlinien zu betonen und Törnkvist et al. [11]

schlagen vor, Vektor- und Feldliniendarstellungen gleichrangig und kontrastiv zu nutzen. Pocić [12] verweist auf positive Effekte bei der intensiven Auseinandersetzung mit historischem Material und den Vorstellungen Faradays bei der Entwicklung des Feldbegriffs im Physikunterricht.

4. Mögliche Quellen von Lernschwierigkeiten

Gerade vor dem Hintergrund der Empfehlungen aus den anderen Studien geben die in Abschnitt 2 exemplarisch vorgestellten Ergebnisse Anlass für Überlegungen zu Ursachen und Einflussfaktoren der Ausbildung solcher Schülervorstellungen. Ursachen für Befunde, wie die Dominanz von Fernwirkungsvorstellungen und das Fehlen des Feldbegriffs, Fehlvorstellungen im Zusammenhang mit Feldlinien und Mischvorstellungen im Bereich von Elektrizität und Magnetismus lassen sich zum einen in einer noch mangelhaften Umsetzung der Empfehlungen aus den anfangs angeführten Studien vermuten. Andererseits sind aber die Bereiche Magneto- und Elektrostatik schon aufgrund der strukturellen Ähnlichkeit, die sich auch in ihren analogen Gleichungen (vgl. [14], S. 78) widerspiegelt, für Verwechslungen und Hybridvorstellungen anfällig.

Im Folgenden sollen mögliche Quellen oder begünstigende Faktoren für die Ausbildung einiger Schülervorstellungen exemplarisch benannt werden. Eine Überprüfung der angedeuteten Vermutungen wäre wünschenswert.

Zunächst stehen gleiche Farbgebungen bei Magnetpolen und elektrischen Ladungen in Schulbüchern (vgl. [15] S. 167 u. 223) zumindest im Verdacht, Verwechslungen oder Hybridvorstellungen weiter befördern zu können, wie auch der Begriff des *elektromagnetischen* Feldes zu einer Interpretation in diesem Sinne geradezu einlädt.

Formulierungen wie „ziehen sich an“ blenden das Feld aus und dürften eher kontraproduktiv für Nahwirkungsvorstellungen und für die Einsicht in die Notwendigkeit eines Feldbegriffs sein, worauf bereits Herrmann [16] hingewiesen hat, während die Formulierungen „wird angezogen/abgestoßen“ zusätzlich sogar das Wechselwirkungsprinzip auf sprachlicher Ebene nicht fachadäquat abbilden, was einmal mehr die sprachlichen Herausforderungen unterstreicht, vor denen der Physikunterricht steht.

Die Annahme eines Neutralisationsbestrebens verschieden geladener Teilchen kann als Zwischenstufe klassifiziert werden, verstellt aber die fachadäquate Beschreibung auf der Grundlage des Kraft- und Feldbegriffs.

Die größten Probleme bezüglich fachlich inadäquater Schülervorstellungen, sind beim Umgang mit Feldlinien zu erwarten, wenn Lernende im Bemühen um sinnstiftendes Verständnis versuchen, das Modell in ihr kognitives System zu integrieren (vgl. [17]).

Zunächst ist der Begriff „Feldlinie“ im Kontrast zu „Kraftlinie“ völlig sinnentleert, denn es gibt keine aus

der Bezeichnung ableitbare Anhaltspunkte für eine mögliche Interpretation. Der Begriff der Feldlinie basiert weiterhin im Physikunterricht nur indirekt auf der fachwissenschaftlichen Grundlage: Wenn im Unterricht vorgegeben wird, ihren Verlauf aus Eisenspanbildern durch Ablesen oder Nachzeichnen gewinnen zu können (vgl. [15], S. 223), entspricht dies nicht der fachlichen Sichtweise. Eisenspanbilder sind das Ergebnis eines recht komplexen Vorgangs, bei dem neben dem Magnetfeld Faktoren wie z. B. Eisenmagnetisierung und Reibung eine Konstellation verursachen, aus der keine einzige Feldlinie konstruierbar ist. Die tatsächlichen Konstruktionsprinzipien, die die Feldlinien-darstellungen erzeugen, bleiben völlig verborgen – lediglich die postulierte Feldlinienrichtung wird z.B. anhand der Magnetnadelausrichtung für die Schülerinnen und Schüler noch nachvollziehbar.

Sieht man von gerichteten Winkelkreisbögen ab, die längst nicht mehr in jedem Mathematikunterricht eingeführt werden, bleibt die gebogene Kurve mit Pfeil am Ende ein vernetzungsarmes Konzept, da im Mathematikunterricht parametrisierte Kurven eher nicht behandelt werden, schon gar nicht in der Sekundarstufe 1 – die einzigen geometrischen Gebilde mit Richtungsinformation sind damit besondere Geraden (Zahlenstrahl bzw. Koordinatenachsen) und Verschiebungspfeile. Die Richtung der Kraft auf einen Magnetnadelpol ist aus den Feldlinienbildern nicht in trivialer Weise rekonstruierbar, was ebenfalls zu Verwirrung und in der Folge zu fachlich inadäquaten, aber subjektiv als hilfreich empfundenen Schülervorstellungen führen kann. Die tatsächliche Richtungsinformation trägt die Feldlinie bekanntlich auf der Grundlage der Tangente im jeweiligen Kurvenpunkt der Feldlinie ([14], S. 45 u. 77), für die Schülerinnen und Schüler also versteckt. Wenn dann beim Einzeichnen von zu kurzen Kraftpfeilen an elektrisch geladenen Teilchen die Feldlinien linearisiert werden, kann es nicht verwundern, dass die Feldlinie als Bahnkurve missinterpretiert wird. In diesem Zusammenhang ist auch das begrenzte mathematische Vorwissen der Schülerinnen und Schüler relevant. So werden beispielsweise im Mathematikunterricht Sachsen-Anhalts lediglich Tangenten an Kreislinien ([18], S. 42) und Vektoren nur in Form von Verschiebungspfeilen thematisiert (S. 31). Wird in einem Bereich die Feldstärke von Lernenden mit besonders dicken Pfeilen wiedergegeben, ist das auf der Grundlage anderer Darstellungen im Physikunterricht durchaus konsistent: In Energieflussdiagrammen z.B. hat die Dicke von Pfeilen tatsächlich eine Stärkebedeutung (vgl. [15], S. 15). Aufgrund ihrer Komplexität und dem notwendigen Rückgriff auf mathematische Vorstellungen (qualitative Grundideen, nicht etwa Kalküle) stellt sich damit das Feldlinienmodell als eines der anspruchsvollsten Konstrukte des Physikunterrichts in der Sekundarstufe 1 dar. Im Zusammenhang mit der Ableitung von Feldstärken kann es darüber hinaus zu Inkonsistenzen bzw. weiteren

Fehlschlüssen kommen: Wenn unendlich viele Punkte auf einem beliebigen reellen, ja sogar auch nur rationalen Intervall liegen, ist es einsichtig, dass auch unendlich viele Feldlinien durch jede Strecke in der Zeichenebene verlaufen, die in einem von Null verschiedenen Winkel zu einer Feldlinie steht. Wird nun im Sinne einer Feldliniendichte argumentiert (vgl. [15], S. 167), so erscheint dieser Begriff auf der Grundlage dieser Anzahl zum einen gar nicht wohldefiniert. Zum anderen implizieren postulierte Unterschiede in der Feldliniendichte (und aus den davon abgeleiteten Feldstärkeunterschieden) Bereiche, in denen gar kein Feld existiert. Diese Vorstellung, beschrieben von Pociví & Finley [10], könnte aus solchen Überlegungen zusätzliche Nahrung bekommen. Keineswegs handelt es sich also nur um ein Problem oberflächlicher Auseinandersetzung mit dem Feldlinienkonzept, sondern gerade die vertiefte Auseinandersetzung offenbart dem Konzept inhärente Lernschwierigkeiten.

Nach Duit [19], einer konstruktivistischen Sichtweise auf das Lernen folgend, muss nun eine schwer zugängliche, unverstandene Inselkonzeption ihrerseits zu sinnstiftenden Eigenkonstruktionen der Lernenden geradezu einladend wirken. Hierbei wird dann das Bestreben der Schülerinnen und Schüler akut, den Feldlinien als mathematische Entitäten materielle Eigenschaften in Form von Strahlen, Bändern etc. (s.o.) zuzuordnen zu wollen, worauf unter anderem bereits Pociví & Finley [10] hingewiesen haben.

Dies geschieht dann nach Chi et al. [20] auch nicht zufällig, sondern hat die Ursache in der Ausbildung grundlegender ontologischer Kategorien, in die Menschen die Wesenheiten der Welt einteilen. In diesem Fall werden Feldlinien fälschlicherweise der Kategorie „Matter“ (S. 28) zugeordnet und enge Zusammenhänge mit Konzeptionen, die auf dem „Substanzschema“ beruhen (vgl. [21]) zementiert. Von diesem Substanzschema wird angenommen, dass es sich bereits bei Kleinkindern herausbildet und nützliches verallgemeinertes Wissen über Eigenschaften und Verhalten materieller Objekte und Substanzen abbildet.

Andererseits lassen sich gerade in der Genese des Feldbegriffes in den Arbeiten der beteiligten Physiker materielle Vorstellungen des Feldes finden: Bei Faraday können auch in Bezug auf *Feldlinien* in gewissen Phasen materielle Auffassungen nachgewiesen werden, worauf Pociví & Finley [10] hinweisen.

Maxwell [22] veranschaulichte die mathematischen Zusammenhänge zur Beschreibung des elektromagnetischen Feldes durch Rückgriff auf die Hydrodynamik und nutzte Analogien, die fließende Substanzen implizieren, wie auch für Einstein & Infeld [23] entsprechende Vorstellungen leitend waren. Dort werden kategoriale Unterscheidungen sogar zweitrangig: „[...] doch muß auch die Unterscheidung zwischen Materie und Feld in dem Moment, wo man sich über die Äquivalenz von Masse und Energie klargeworden

ist, als etwas Unnatürliches und unklar definiertes erscheinen. [...] Wir könnten den Materiekörper auch als Regionen im Raum betrachten, in denen das Feld außerordentlich stark ist.“ (S. 286-287)

Es darf angenommen werden, dass diese materiellen Vorstellungen im Zusammenhang mit dem Feldbegriff fruchtbar waren und auch heute noch großes Potential haben, wenn etwa Herrmann [24] für den Physikunterricht herausstellt: „Ein Feld ist ein physikalisches System, das sich nicht wesentlich von anderen Systemen [...] unterscheidet. [...] Es ist deshalb berechtigt, sich von einem Feld eine ebenso konkrete Anschauung zu bilden wie von einem materiellen Stoff [...].“ (S. 1)

Vor diesem Hintergrund bleibt zu diskutieren, wie und vor allem wann der unbestreitbare Fakt, dass es sich bei Feldlinien um konstruierte Objekte, eben Modellvorstellungen, handelt, Eingang in das Wissen der Schülerinnen und Schüler finden sollte. Unserer Ansicht nach ist es essentiell, dass dies erst dann geschieht, wenn das Feld an sich als scheinbar real existierende Entität, eben als Energiespeicher und Wechselwirkungspartner, akzeptiert wurde. An der Diskussion, über den ontologischen Status eines Feldes selbst, wollen wir uns dabei an dieser Stelle nicht beteiligen. Uns genügt es zu betonen, dass die Akzeptanz des Feldes als Energiespeicher und Wechselwirkungspartner als wichtige Voraussetzung für das weitere Lernen angesehen werden kann. Auf dieser Grundlage können sich weitere Lernprozesse über und mit dem Feldbegriff (z.B. zu dessen physikalischer Bedeutung und seinen Repräsentationsformen und – wenn gewünscht – seinem ontologischen Status) anschließen. Vor diesem Hintergrund setzt der folgende Analogieversuch an.

5. Vorschlag für einen Analogieversuch

Der Analogieversuch legt Schülerinnen und Schülern das Magnetfeld als real existierende Entität nahe, ohne zunächst eine Verbindung zu der schwierigen Feldlinienkonzeption herstellen zu müssen. Dazu soll das magnetische Feld als wirkende Entität im Sinne einer Nahwirkungsvorstellung als Wechselwirkungspartner und als Energiespeicher sinnlich erfahrbar werden in der Hoffnung, das Feld für physikalische Beschreibungen und Argumentationen für die Schülerinnen und Schüler verfügbar zu machen.

Der Versuchsaufbau ist Abb. 1 zu entnehmen. Die Ringmagnete auf der rechten Seite stehen sich mit gleichnamigen Polen gegenüber, so dass der obere Magnet im Zentrifugenröhrchen schwebt. Die Röhrchen selbst finden in ausgefrästen Vertiefungen mit Durchbohrungen für die Fäden in einer Holzleiste Halt. Die oberen Fadenenden sind an Knöpfen über der Feder bzw. dem oberen Ringmagnetpaar befestigt. Alumünzen passenden Durchmessers mit Bohrlochern finden sich am Röhrchenboden bzw. zwischen Knopf und oberem Federende.

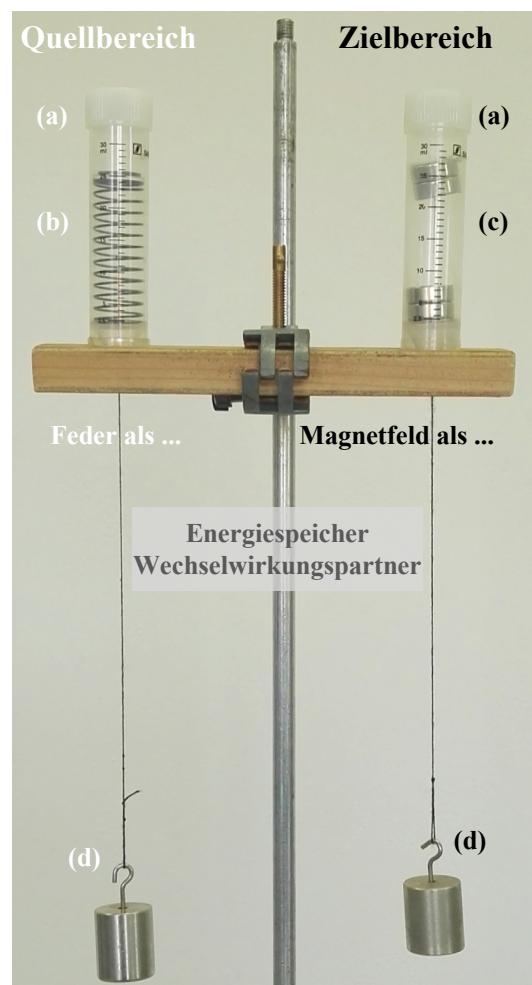


Abb.1: Aufbau des Analogieversuchs.

(a) Zentrifugenröhrchen (mit äquidistanter Skalenteilung und Bodenlochbohrung), (b) Stahldruckfeder im Raumbereich zwischen den Federenden, (c) Magnetfeld im Raumbereich zwischen zwei Ringmagneten, (d) Massestücke an Fäden

Wenn Schülerinnen und Schüler direkten Zugang zum Versuch haben, muss das Röhrchen mit den relativ starken Magneten sicher verschlossen sein.

Der Abstand zwischen den Federenden auf der linken Seite wird bei Zugbelastung entsprechend dem Hookeschen Gesetz verkürzt und der Abstand zwischen den Magneten, die sich mit gleichen Polen gegenüberstehen, verkürzt sich, wenn die Zugkraft größer als die abstoßenden Kräfte aufgrund des Magnetfeldes ist (Vernachlässigung der Reibungskräfte etc.). In Abhängigkeit der angehängten Massestücke und damit der Gewichtskraft erlaubt die Skala auf den Zentrifugenröhrchen eine Bestimmung des zurückgelegten Weges des oberen Federendes bzw. des oberen Magneten.

5.1. Lernen über Magnetfelder mithilfe des Versuches

Aufgrund der Bauteilgleichheiten im Versuchsaufbau (s. o.) haben beide Teilbereiche eine große Übereinstimmung in den Oberflächeneigenschaften.

Außerdem bestehen zwischen der Feder (Quellbereich der Analogie) und dem zu akzeptierenden Magnetfeld (Zielbereich der Analogie) zahlreiche Relationen (~):

- (1) (Abstand zwischen den Federenden) ~ (Abstand zwischen den Magneten)
- (2) (Zug am Faden → Widerstand) ~ (Zug am Faden → Widerstand)
- (3) (Zug am Faden → Verkürzung des Abstandes zwischen den Federenden) ~ (Zug am Faden → Verkürzung des Abstandes zwischen den Magneten)
- (4) (Loslassen des Fadens → Federende schnell hoch) ~ (Loslassen des Fadens → Magnet schnell hoch)

Bereits der visuelle Eindruck liefert Relation (1), die durch den „schwebenden“ oberen Magneten ins Auge fällt. Sie gibt einen ersten Anlass, Feder und Magnetfeld (bzw. zunächst „etwas“ zwischen den Magneten) miteinander in Beziehung zu setzen. Die weiteren Relationen verstärken diese Vorstellung durch die sensorische Zugänglichkeit von Kraftwirkungen und die Erfahrung von vorhersagbaren Kausalzusammenhängen. Wenn die Feder damit als Wechselwirkungspartner wahrgenommen und ihr die Eigenschaft Energie speichern zu können zugeschrieben wird, liegt die Übertragung dieser Eigenschaften auf das Magnetfeld nahe und darf im Rahmen des Analogieschlusses als plausibel gelten.

Für die Akzeptanz der Analogie durch die Schülerinnen und Schüler sprechen die folgenden Gründe:

- (i) Der Aufbau der beiden Versuche ist sehr ähnlich, Bauteile und deren Verknüpfungen im Quellbereich lassen sich auf entsprechende Bauteile und deren Verknüpfungen im Zielbereich abbilden.
- (ii) Für die oberflächliche Funktion und viele bestimmbare Eigenschaften der Versuchskonzeption im Quellbereich lassen sich Entsprechungen im Zielbereich finden.
- (iii) Die Lernenden sind mit Spiralfedern, dem Kernelement des Quellbereiches, gut vertraut.
- (iv) Der Versuch ermöglicht einen unmittelbaren, sensorischen (visuellen und haptischen) Zugang zum Phänomen. Die Erfahrungen und Empfindungen beim Umgang mit der Feder-Anordnung (Quellbereich) stimmen dabei wiederum mit denen der Magnet-Anordnung (Zielbereich) überein.

Vergleichbare Struktur und Eigenschaften, die Vertrautheit mit dem Quellbereich und die unmittelbare sensorische Zugänglichkeit lassen eine hohe Akzeptanz der Feder-Magnetfeld-Analogie bei den Lernenden erwarten (vgl. die Arbeiten von Gentner [25]).

Der Versuch ermöglicht es damit, das zu Lernende nicht nur mit Hilfe von ikonischen und symbolischen Repräsentationen darzustellen, die im Laufe der Behandlung nahezu unvermeidbar sind, sondern bedient

auch die enaktive Repräsentationsform (vgl. [26]). Übersetzungsprozesse zwischen diesen Ebenen lassen eine starke kognitive Aktivierung erwarten. Dies sollte dem Ziel, das Feld als wirkende, quasi körperhaft-materielle Entität bei den Schülerinnen und Schülern nachhaltig zu etablieren, zuträglich sein. Der Versuch ermöglicht es Schülerinnen und Schülern eigene Erfahrungen zu machen und ist in diesem Sinne als Schülerversuch gedacht. Im Zuge der weiteren Erarbeitung sind aber stark durch die Lehrperson vorstrukturierte oder direkt gelenkte Gedankengänge zu entwickeln oder nachzuvollziehen. In dieser Phase mag eine erneute Demonstration im Plenum durchaus hilfreich(er) sein.

Notwendig sind Vorerfahrungen beim Umgang mit Federn. Wünschenswert ist eine bereits erfolgte erste Annäherung an magnetische Felder, z.B. durch das Erkunden des Feldes eines Stabmagneten mit Hilfe einer Magnetnadel. Ist der Energiebegriff schon verfügbar, können auch energetische Aspekte diskutiert werden.

5.2. Mögliche Erweiterungen des qualitativen Zugangs

Neben den oben angedeuteten Szenarien, die einer qualitativen Erarbeitung des Magnetfeldes als Energiespeicher und Wechselwirkungspartner dienen, kann auch eine (zusätzliche) quantitative Auseinandersetzung erfolgen. Grundlage dafür bilden Messreihen, wie sie in den Diagrammen in Abb. 2 und 3 dargestellt sind. Die Schülerinnen und Schüler brauchen dafür Kenntnisse, die auch in der Sekundarstufe I verfügbar sind.

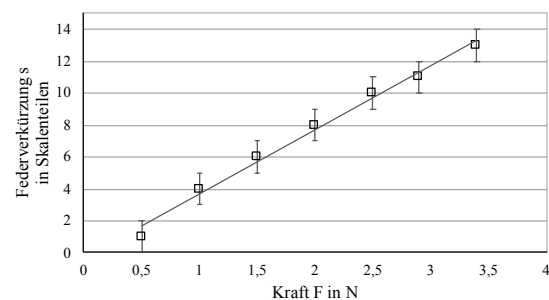


Abb.2: s - F -Zusammenhang im Quellbereich (Feder)

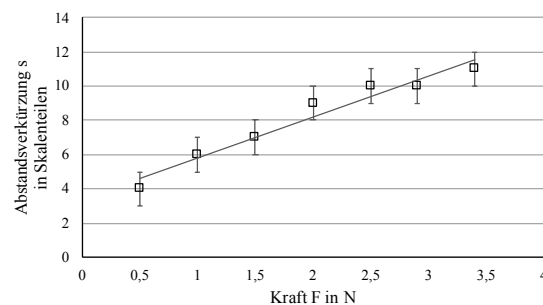


Abb.3: s - F -Zusammenhang im Zielbereich (Magnetfeld zwischen zwei Magneten)

Die Messunsicherheit beträgt für die Differenzmessung der Wegstrecke s (mindestens) eine Skaleneinheit, wobei die Unsicherheit für die Kraft F auf die Massenstücke als vernachlässigbar angesehen wird. Eine lineare Regression mit LibreOffice Calc liefert die in Tabelle 1 dargestellten Ergebnisse.

	Quellbereich	Zielbereich
Geradensteigung in Skt/N	$4,0 \pm 0,2$	$2,4 \pm 0,2$
s -Achsenabschnitt in Skt	$-0,3 \pm 0,4$	$3,4 \pm 0,5$
Bestimmtheitsmaß R^2	0,99	0,95

Tab.1: Ergebnisse der linearen Regressionen

Die hohen Werte für das verwendete Bestimmtheitsmaß liefern hier Argumente, um mit einem linearen Modell zu arbeiten. Eine vertiefende Diskussion der Messwerte und der veranschlagten Messunsicherheiten (leichte Schrägstellung des oberen Magneten etc.) sowie des Gültigkeitsbereichs und der Grenzen des linearen Modells birgt zusätzliches Lernpotenzial. Weiterhin kann die in der Feder und im Magnetfeld gespeicherte Energie in vertiefenden Auswertungsprozessen abgeschätzt oder näherungsweise bestimmt werden.

6. Fazit und Ausblick

Zahlreiche Fehlvorstellungen bei Lernenden geben Anlass, das Potenzial, das die inhaltliche und methodische Ausgestaltung des Physikunterrichts in sich birgt, in Bezug auf den Feldbegriff voll auszuschöpfen, um Lernschwierigkeiten aktiv zu bearbeiten und dem physikalischen Feld zur gewünschten mentalen Repräsentation zu verhelfen: Mit dem ontologischen Status „real existierend“ wird es als wechselwirkendes, quasi körperhaft-materielles Teilsystem begriffen, mit der Fähigkeit Energie speichern bzw. austauschen zu können.

Auf der Grundlage der vorangegangenen theoretischen Überlegungen erscheint es lohnenswert, den vorgestellten Analogieversuch hinsichtlich seiner Praxistauglichkeit und seiner Zielsetzung im Physikunterricht zu untersuchen. Aus physikdidaktischer Hinsicht wäre dabei neben dem Ausmaß der Akzeptanz und Realisierung der Zielsetzung vor allem zu überprüfen, welchen Einfluss der Versuch auf die Fehlvorstellungen bzgl. der Feldlinien bzw. ihren ontologischen Status hat.

Als Versuchserweiterung ist darüber hinaus ein elektrostatisches Analogon wünschenswert. Die Realisierung scheitert aber bislang noch an der notwendigerweise relativ hohen elektrischen Feldstärke bzw. der dazu erforderlichen Spannung.

7. Literatur

[1] Maxwell, J. C. (1873). A treatise on electricity and magnetism, Volume 1. Oxford: Clarendon Press

- [2] Schmutzer, E. (1989). Grundlagen der theoretischen Physik: mit einem Grundriß der Mathematik für Physiker; in 2 Teilen. Berlin: Dt. Verl. d. Wiss.
- [3] Römer, H.; Forger, M. (1993). Elementare Feldtheorie: Elektrodynamik, Hydrodynamik, spezielle Relativitätstheorie. Konzepte der theoretischen Physik. Weinheim: VCH.
- [4] Kultusministerium Sachsen-Anhalt (2016). Fachlehrplan Gymnasium. Physik. Stand 20.6.2016. Verfügbar unter https://www.bildung-lsa.de/pool/RRL_Lehrplaene/Erprobung/Gymnasium/FLP_Gym_Physik_LTn.pdf?rl=105 (27.4.2018)
- [5] Girwidz, R.; Storck, T. (2013). Felder. In: Unterricht Physik, 138, S. 4–10.
- [6] Fütterer, E. (2017). Begründung eines Unterrichtskonzepts zum Feldbegriff für die gymnasiale Oberstufe. Wissenschaftliche Hausarbeit zur ersten Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Halle (Saale). Unveröffentlicht.
- [7] White, R. T.; R. Gunstone (1993). Probing understanding. 1. publ., repr. Edition. London: Falmer Press.
- [8] Borges, A. T.; Tecnico, C.; Gilbert, J. K. (1998). Models of magnetism. In: International Journal of Science Education, 20 (3), S. 361–378.
- [9] Galili, I. (1995). Mechanics background influences students' conceptions in electromagnetism. In: International Journal of Science Education, 17, S. 371–387.
- [10] Pocoví, M. C.; Finley, F. (2002). Lines of force: Faraday's and students' views. In: Science & Education, 11 (5), S. 459–474.
- [11] Törnkvist, S.; Pettersson, K.; Tranströmer, G. (1993). Confusion by representation: On student's comprehension of the electric field concept. In: American Journal of Physics, 61 (4), S. 335–338.
- [12] Pocoví, M. C. (2007). The effects of a history-based instructional material on the students' understanding of field lines. In: Journal of Research in Science Teaching, 44 (1), S. 107–132.
- [13] Furió, C.; Guisasola, J. (1998). Difficulties in Learning the Concept of Electric Field. In: Science Education, 82 (4), S. 511–526.
- [14] Macke, W. (1965). Ein Lehrbuch der theoretischen Physik, Bd. 4: Elektromagnetische Felder. 3. Auflage. Leipzig: Geest&Portig.
- [15] Gau, B.; Meyer, L.; Schmidt, G.-D. (2005). Physik 7/8. Sachsen-Anhalt. Gymnasium. Berlin: Duden Paetec GmbH.
- [16] Herrmann, F. (1991). Felder als physikalische Systeme. In: MNU, 43 (2), S. 114–116.
- [17] Kircher, E. (2015). Modellbegriff und Modellbildung in der Physikdidaktik. In: Kircher, E.; Girwidz, R.; Häußler, P. (Hrsg.).

- Physikdidaktik. Theorie und Praxis. 3. Auflage. Berlin: Springer Spektrum. S. 783–842.
- [18] Kultusministerium Sachsen-Anhalt (2015). Fachlehrplan Gymnasium/Fachgymnasium Mathematik. Stand: 9.2.2015. Verfügbar unter https://www.bildung-lsa.de/pool/RRL-Lehrplaene/Erprobung/Gymnasium/FLP_Mathematik_Gym_LT.pdf?rl=105 (27.4.2018)
- [19] Duit, R. (2015). Alltagsvorstellungen und Physiklernen. In: Kircher, E.; Girwidz, R.; Häußler, P. (Hrsg.). Physikdidaktik. Theorie und Praxis. 3. Auflage. Berlin: Springer Spektrum, S. 597–680.
- [20] Chi, M. T. H.; Slotta, J. D.; de Leeuw, N. (1994). From things to process: A theory of conceptual change for learning science concepts. In: Learning and Instruction, 4, S. 27–43.
- [21] Chi, M. T. H.; Slotta, J. D.; de Leeuw, N. (2000). Naive Physics Reasoning: A Commitment to Substance-Based Conceptions. In: Cognition and Instruction, 18 (1), S. 1–34.
- [22] Maxwell, J. C. (1895). Ueber Faradays Kraftlinien. (Boltzmann, L.; Hrsg.). Leipzig: Engelmann.
- [23] Einstein, A.; Infeld, L. (1950). Die Evolution der Physik. Wien: Zsolnay.
- [24] Herrmann, F. (o. J.). Feld als Raumbereich mit Eigenschaften. Verfügbar unter <http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/altlast/14.pdf> (27.4.2018).
- [25] Gentner, D. (1989). The mechanism of analogical learning. In: Vosniadou, S.; Ortony, A. (Hrsg.). Similarity and Analogical Reasoning. Cambridge: Cambridge University Press, S. 199–244.
- [26] Brunner, J. S. (1970). Gedanken zu einer Theorie des Unterrichts. In: Dohmen, G.; Maurer, F.; Popp, W. (Hrsg.). Unterrichtsforschung und didaktische Theorie. München: Piper, S. 188–218.

Entwurf einer phänomenbasierten Modellmethode

Sascha Grusche*

*Didaktik der Physik, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden
sascha.grusche@tu-dresden.de

Kurzfassung

Im Physikunterricht sollen die Lernenden von ihrer alltäglichen Phänomenwelt zur wissenschaftlichen Modellwelt übergehen. Hierbei steht die Lehrperson vor der Entscheidung, ob sie einen phänomenbasierten Unterricht oder einen modellorientierten Unterricht durchführt. Beim phänomenbasierten Unterricht stehen die Phänomene im Mittelpunkt; auf erklärende Modelle wird verzichtet. Beim modellorientierten Unterricht stehen erklärende Modelle im Mittelpunkt; die Phänomene werden kaum erkundet. Wie können Lernende die Phänomenwelt und Modellwelt gleichermaßen kennenlernen und von ersterer zu letzterer übergehen? Die Lehrperson kann die phänomenologische Methode und die Modellmethode zu einer phänomenbasierten Modellmethode vereinen. Am Beispiel der Linsenabbildung und Spektroskopie wird gezeigt, wie die phänomenbasierte Modellmethode angewandt werden kann.

1. Einleitung

Damit Physiklernende Schritt für Schritt von der Phänomenwelt zur Modellwelt übergehen können, werden wir eine **phänomenbasierte Modellmethode** entwickeln. Hierfür vereinen wir die phänomenologische [1] und die Modellmethode [2].

Diese Vereinigung wurde bisher verhindert, weil in der Physikdidaktik zwischen zwei Unterrichtsformen unterschieden wird: zwischen phänomenbasiertem [3] und modellorientiertem Physikunterricht [4].

Im phänomenbasierten Physikunterricht vermittelt die Lehrperson die phänomenologische Methode und verzichtet weitestgehend auf die Modellmethode, denn die Lernenden sollen die Erscheinungen *anhand der beobachtbaren Entstehungsbedingungen* begreifen und möglichst nicht auf unbeobachtbare Ursachen zurückführen.

Im modellorientierten Physikunterricht hingegen vermittelt die Lehrperson die Modellmethode und vernachlässigt dabei die phänomenologische Methode, denn es geht ihr vielmehr um die zielgerichtete *Entwicklung und Anwendung von (beschreibenden und erklärenden) Modellen* als um eine umfangreiche Erkundung von Phänomenen.

Physik als Wissenschaft beruht jedoch auf einem Wechselspiel zwischen der phänomenologischen und der Modellmethode, vgl. [5]. Wenn Physikunterricht ein angemessenes Bild von physikalischer Erkenntnisgewinnung vermitteln soll, dann muss er also phänomenbasiert und modellorientiert zugleich sein.

Deshalb möchten wir die phänomenologische Methode und die Modellmethode im Physikunterricht zusammenführen.

Zunächst werden wir klären, welche Schrittfolgen für phänomenbasierten Physikunterricht (Kapitel 2) beziehungsweise modellorientierten Physikunterricht (Kapitel 3) vorgesehen sind. Dann werden wir diese beiden Schrittfolgen didaktisch zusammenführen (Kapitel 4). Anschließend werden wir an zwei Beispielen aus der Optik zeigen, wie die phänomenbasierte Modellmethode umgesetzt werden kann (Kapitel 5). Zum Abschluss (Kapitel 6) werden wir die Vorzüge der entworfenen Methode zusammenfassen.

2. Die allgemeine Schrittfolge im phänomenbasierten Physikunterricht

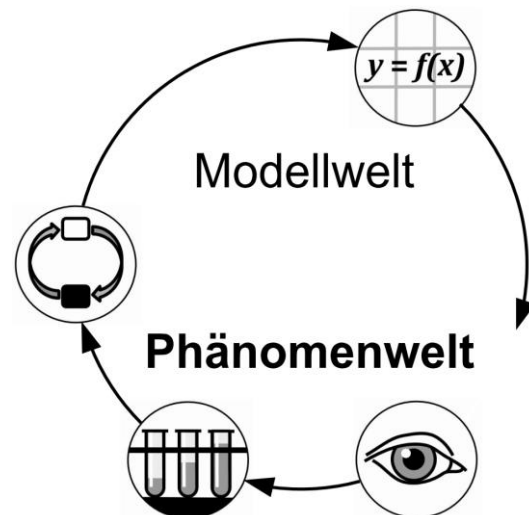


Abb. 1: Die phänomenologische Methode als Vierschritt [1]: (1) Phänomen beschreiben, (2) Erscheinungen abwandeln, (3) Erscheinungsweisen darstellen, (4) Zusammenhänge abstrahieren. Der Schwerpunkt des phänomenbasierten Vierschritts liegt in der Phänomenwelt.

Im phänomenbasierten Unterricht folgt man der phänomenologischen Methode. Diese Methode lässt sich als Vierschritt auffassen [1] (Abb. 1):

2.1. Phänomen beschreiben

Im ersten Schritt beschreibt man, auf welche Art und Weise ein bestimmtes Phänomen im Alltag erscheint. Hierfür betrachtet man das Phänomen in seinem natürlichen und kulturellen Kontext: Man lernt die Erscheinungsweisen des Phänomens mit dem zugehörigen Gebrauch von Sprache, Sozialformen und Techniken kennen. Hierbei erfährt man, wie das Phänomen in das eigene Leben eingebettet ist. Man wird vertraut mit dem Phänomen.

2.2. Erscheinungen abwandeln

Im zweiten Schritt wandelt man die Erscheinungen in explorativen Experimenten ab, um Zusammenhänge zwischen den Erscheinungen zu erkunden. Hierfür vereinfacht, vervielfacht, steigert und überbrückt man die Erscheinungen experimentell. Dieses experimentelle Erkunden führt dazu, dass man sich in der Phänomenwelt auskennt und zurechtfindet.

2.3. Erscheinungsweisen darstellen

Im dritten Schritt stellt man die Gesamtheit aller untersuchten Erscheinungsweisen übersichtlich dar, um die vielfältigen Zusammenhänge zwischen den Erscheinungen zu verdeutlichen. Man beschreibt nur die tatsächlich beobachtbaren Gegebenheiten. Dadurch kann man verstehen, unter welchen Bedingungen diese oder jene Erscheinung eintritt. Hat man die Erscheinungen und ihre Entstehungsbedingungen systematisch erfasst, kann man Handlungsmöglichkeiten erkennen und physikalische Vorhersagen treffen.

2.4. Zusammenhänge abstrahieren

Im vierten Schritt löst man das Phänomen weitestgehend von seinem sprachlichen, sozialen und technischen Kontext und stellt ausgewählte Zusammenhänge in einem Modell dar. Durch die Abstrahierung, Modellierung und Mathematisierung kann man die Diskussion von physikalischen Sachverhalten vereinfachen, Naturgesetze beschreiben und die Vorhersage von Phänomenen erleichtern.

2.5. Didaktische Anmerkungen zum phänomenologischen Vierschritt

Gemäß empirischer Studien [6] nutzen Schüler*innen vier Arten von Tätigkeiten zur Phänomen-Erkundung:

1. Die Schüler/innen wollen spielerisch ausprobieren, *was* sie mit Material aus ihrer Umgebung anstellen können.
2. Sie wollen herausfinden, *wie* sie das Phänomen immer wieder selbst hervorbringen können.
3. Sie wollen erfahren, *wann* das Phänomen entsteht und *wann nicht*.
4. Sie wollen verstehen, *warum* das Phänomen entsteht.

Der phänomenologische Vierschritt [1] erscheint also nicht nur fachgemäß, sondern auch schülergemäß.

Neben dem phänomenologischen Vierschritt aus der deutschen Physikdidaktik ist aus der skandinavischen Physikdidaktik auch ein *Vierphasen-Zyklus* [7] bekannt, wobei jedoch die Schritte anders zwischen Phänomen- und Modellwelt verteilt sind: 1.) Die Lehrperson lässt die Lernenden ein Phänomen in vielfältigen Erscheinungsformen erleben und beschreiben. 2.) Die Lehrperson wählt jene Schülervorstellungen aus, die sich in wissenschaftliche Vorstellungen übersetzen lassen. 3.) Die Lehrperson führt wissenschaftliche Vorstellungen beziehungsweise Modelle ein, indem sie an die ausgewählten Schülervorstellungen anknüpft. 4.) Die Lehrperson ermöglicht es den Lernenden, die wissenschaftlichen Vorstellungen beziehungsweise Modelle für ein tieferes Phänomenverständnis zu nutzen [7].

In jedem Fall werden wissenschaftliche Vorstellungen durch *exploratives* Experimentieren gewonnen.

3. Die allgemeine Schrittfolge im modellorientierten Physikunterricht

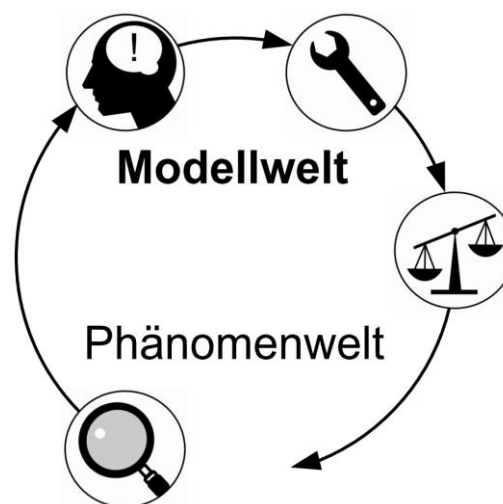


Abb. 2: Die Modellmethode als Vierschritt [2]: (1) Phänomen untersuchen, (2) Modell entwickeln, (3) Modell anwenden, (4) Modell bewerten. Der Schwerpunkt des modellorientierten Vierschritts liegt in der Modellwelt.

Im modellorientierten Unterricht folgt man der Modellmethode. Auch die Modellmethode lässt sich als Vierschritt auffassen [2] (Abb. 2):

3.1. Phänomen untersuchen

Im ersten Schritt beobachtet man ein Phänomen, um damit vertraut zu werden. Bald erkennt man jedoch, dass man durch direkte Untersuchung der Erscheinungen nur zu einer Beschreibung gelangen kann, aber nicht zu einer Erklärung: Man kann sagen, wie das Phänomen entsteht, aber nicht, warum. An dieser Stelle formuliert man Fragen zum Phänomen.

3.2. Modell entwickeln

Im zweiten Schritt entwickelt man ein Modell, indem man sich auf ausgewählte Merkmale des Originals konzentriert. Das Original kann ein Gegenstand, ein System, oder ein Ablauf aus der Phänomenwelt sein. In Gedanken vereinfacht und idealisiert man das Original und erhält somit ein Denkmodell. Dieses Denkmodell stellt man mithilfe eines Anschauungsmodells dar. Das Anschauungsmodell kann gegenständlich, bildhaft oder mathematisch sein.

3.3. Modell anwenden

Im dritten Schritt wendet man das Modell an. Das Modell dient der Vereinfachung, Veranschaulichung, Vorhersage und Erklärung. Somit hilft das Modell dabei, Fragen zum Phänomen zu beantworten. Mithilfe des Modells kann man Hypothesen bilden, die sich im Experiment überprüfen lassen.

3.4. Modell bewerten

Im vierten Schritt bewertet man das Modell hinsichtlich seiner Nützlichkeit. Man prüft, ob das Modell einfach, zweckmäßig und fruchtbar ist. Man hinterfragt, welche Merkmale des Originals im Modell dargestellt werden und welche nicht. Umgekehrt macht man sich bewusst, welche Merkmale des Modells beim Original vorzufinden sind und welche nicht. Man grenzt den Phänomenbereich ab, der mit dem Modell erklärt werden kann. Zudem schaut man kritisch auf die vorigen drei Schritte zurück.

3.5. Didaktische Anmerkungen zur verallgemeinerten Modellmethode

Neben der verallgemeinerten Modellmethode [2] aus der deutschen Physikdidaktik sind aus der internationalen Naturwissenschaftsdidaktik viele weitere Schrittfolgen bekannt:

- der **Modellierungs-Zyklus** [8]: Modellentwicklung – Modellanwendung
- der **GEM-Zyklus** [9]: Modellkonstruktion (*Generate*) – Modellbewertung (*Evaluate*) – Modellanwendung (*Model*)
- das **Modell modellbasierten Lernens** [10]: Modellbildung – Modellnutzung – Modellbestätigung/Revision/Ablehnung
- die **EIMA-Methode** [11]: Einführung ins Thema und Erfassung von Schilervorstellungen (*Engage*) – Untersuchung (*Investigate*) – Modellbildung (*Model*) – Modellanwendung (*Apply*)
- **Schematische Modellierung** [12]: Modellauswahl – Modellkonstruktion – Modellprüfung – Modellanwendung
- eine **Strategie zur Entwicklung mentaler Modelle** [13]: Vorbereitung – Konzentration auf mentale Modelle – Konstruktion und Kritik mentaler Modelle – Anwendung der mentalen Modelle – Reflektion

- der **Modellierungs-Lernzyklus** [14]: Exploration – Modelladduktion – Modellformulierung – Modellanwendung – Paradigmatische Synthese
- der **Untersuchungs-Zyklus** [15]: Fragen – vorhersagen – experimentieren – Modell bilden – Modell anwenden
- der **METT-Zyklus** [16]: Fragen – Hypothesen bilden – Untersuchen – Analysieren – Modellieren – Bewerten
- der **standardmäßige Modellierungs-Lehrzyklus** [17]: Einführung und Darstellung – Koordination von Darstellungsformen – Anwendung – Abstraktion & Verallgemeinerung – Weiterentwicklung
- eine **unterrichtliche Modellierungs-Sequenz** [18]: ‚Ankerphänomene‘ beobachten – Modell konstruieren – Modell empirisch testen – Modell bewerten – Modell mit anderen Ideen abgleichen – Modell überprüfen – Modell anwenden

Diese Unterrichtsmethoden sind mehr oder weniger feinschrittig, stimmen aber im Wesentlichen mit der verallgemeinerten Modellmethode überein.

In jedem Fall werden die Modelle anhand *hypothesegeleiteter* Experimente geprüft.

4. Vereinigung beider Vierschritte

Damit im Unterricht weder die Phänomene noch die Modelle zu kurz kommen, wollen wir die phänomenologische und die Modellmethode zusammenführen.

Zunächst erkennen wir, dass die ersten drei Schritte der phänomenologischen Methode [1] dem ersten Schritt der verallgemeinerten Modellmethode [2] entsprechen:

- Phänomen untersuchen [2]
 - Phänomen beschreiben [1]
 - Erscheinungen abwandeln [1]
 - Erscheinungsweisen darstellen [1]

Ebenso sehen wir, dass die letzten drei Schritte der verallgemeinerten Modellmethode dem letzten Schritt der phänomenologischen Methode entsprechen:

- Zusammenhänge abstrahieren [1]
 - Modell entwickeln [2]
 - Modell anwenden [2]
 - Modell bewerten [2]

Wir können also die ersten drei Schritte der phänomenologischen Methode [1] und die letzten drei Schritte der verallgemeinerten Modellmethode [2] hintereinander setzen.

Die dabei entstehende Methode (Abb. 3) nennen wir **phänomenbasierte Modellmethode**.

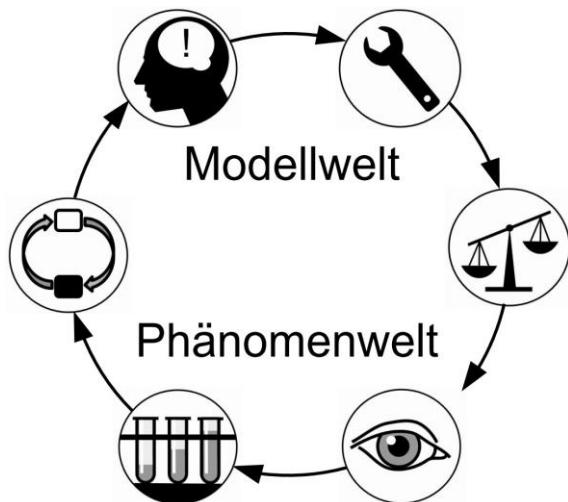


Abb. 3: Die phänomenbasierte Modellmethode als Sechsschritt: (1) Alltagsnahe Erscheinungen beschreiben, (2) Erscheinungen experimentell erkunden, (3) Erscheinungsweisen übersichtlich darstellen, (4) Modell entwickeln, (5) Modell anwenden, (6) Modell bewerten. Diese Methode erlaubt einen schrittweisen Übergang zwischen Phänomenwelt und Modellwelt.

5. Umsetzungsbeispiele

Die Anwendung der phänomenbasierten Modellmethode äußert sich bei den Themen der Linsenabbildung [19] und Spektroskopie [20] in den folgenden Schritten:

1. Alltagsnahe Phänomene der Linsenabbildung / Spektroskopie beschreiben.
2. Innerhalb des Linsenabbildes / Spektrums verschiedene Einzelbilder offenbaren (durch eine Löcherblende an der Linse / durch Farbfilter oder spektral diskrete Lichtquellen).
3. Linsenabbildung / Spektroskopie als Überlagerung von Einzelbildern betrachten.
4. Die räumliche Verteilung der Einzelbilder anhand von Verbindungslinien darstellen.
5. Verbindungslinien nutzen, um die Überlagerung der Einzelbilder zum Gesamtbild vorherzusagen.
6. Den Modellcharakter der so genannten Strahlen reflektieren.

Diese Schritte stellen wir nun ausführlicher dar.

5.1. Erstes Beispiel: Linsenabbildung

5.1.1. Scharfes und unscharfes Sehen beschreiben

Im ersten Schritt knüpft die Lehrperson an die alltäglichen Seh-Erfahrungen der Lernenden an. Sie sollen versuchen, einen Gegenstand und dessen Hintergrund gleichzeitig scharf zu sehen. Schnell wird den Lernenden bewusst, dass dies unmöglich ist [19] (Abb. 4(a)-(c)).

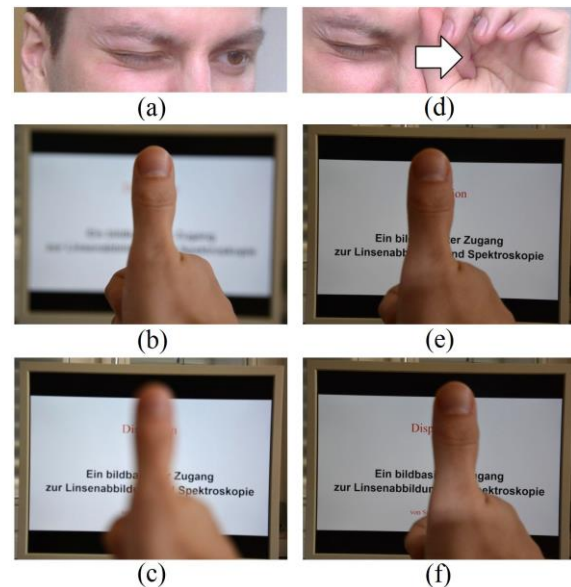


Abb. 4: Unscharfes und scharfes Sehen. (a) Wenn man mit bloßem Auge schaut, dann sieht man (b) entweder nur den Hintergrund oder (c) nur den Vordergrund scharf, den Rest unscharf. (d) Wenn man eine Lochblende vor dem Auge von rechts nach links schiebt, dann verschiebt sich scheinbar der Vordergrund von (e) links nach (f) rechts.

Dann vermittelt die Lehrperson einen alltagsrelevanten Trick, mit dem man alles scharf sehen kann; sogar, wenn man kurz- oder weitsichtig ist: Man hält eine kleine Lochblende vor das Auge [19] (Abb. 4(d)). Die Lernenden stellen fest:

- Wenn man durch eine Lochblende schaut, dann sieht man Vordergrund und Hintergrund *gleichzeitig* scharf (Abb. 4(e)).

Nun fordert die Lehrperson die Lernenden dazu auf, die Lochblende vor dem Auge hin und her zu schieben [19]. Die Lernenden merken:

- Wenn man die Lochblende auf seinem Auge hin und her bewegt, dann sieht man Ähnliches, wie wenn man seinen Kopf hin und her bewegt (Abb. 4(e)-(f)).

5.1.2. Ein technisches Auge bauen und abwandeln

Im zweiten Schritt verwenden die Lernenden anstelle des menschlichen Auges (Abb. 5) ein einfaches technisches Auge, bestehend aus **Glaslinse und Projektionsschirm** [19]. Hierbei dient die Glaslinse dazu, die bilderzeugende Wirkung der Augenlinse (zusammen mit der Hornhaut, dem vorderen Kammerwasser und dem Glaskörper des menschlichen Auges) nachzuahmen; der Projektionsschirm steht stellvertretend für die Netzhaut.

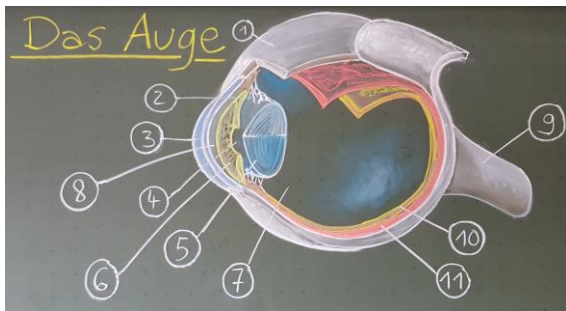


Abb. 5: Tafelbild zum Aufbau des menschlichen Auges. Hornhaut (3), vorderes Kammerwasser (8), Augenlinse (5) und Glaskörper (7) bilden ein bilderzeugendes System, dessen optische Funktionsweise man vereinfacht durch eine Glaslinse nachahmen kann; die Netzhaut (10) kann man physikalisch als Projektionsschirm auffassen.

Mit diesem strukturell vereinfachten Funktionsmodell des menschlichen Auges können die Lernenden ihre subjektiven Beobachtungen mit einem objektiven Versuch abgleichen [19]:

- Wenn man mit der Linse den *vorderen* Gegenstand *scharf* auf dem Projektionsschirm abbildet, dann entsteht ein *unscharfes* Bild des *hinteren* Gegenstandes, und umgekehrt.
- Wenn man eine Lochblende vor die Linse hält, dann entsteht auf dem Projektionsschirm ein *vollständig* scharfes Bild von Vordergrund und Hintergrund.
- Wenn man die Lochblende auf der Linse seitlich hin und her bewegt, dann bewegt sich das Bild eines Gegenstands umso mehr, je unschärfer er ohne Lochblende abgebildet wird.

Anschließend verwenden die Lernenden anstelle der bewegten Lochblende eine unbewegte Löcherblende:

- Wenn man die Linse mit einer Löcherblende abdeckt, dann entsteht eine Überlagerung von mehreren Einzelbildern [19].

Um diese Überlagerung der Einzelbilder zu erkunden, sollen die Lernenden nun etwas tun, was man mit dem Auge nicht tun kann: den Projektionsschirm vor- und zurückschieben [19]:

- Wenn der Schirm nah hinter der Linse steht, dann liegen die Einzelbilder *nebeneinander*.
- Wenn der Schirm in einer bestimmten, größeren Entfernung von der Linse steht, dann liegen die Einzelbilder für den hinteren Gegenstand *aufeinander*, aber nicht für den vorderen.
- Wenn der Schirm in einer bestimmten, noch größeren Entfernung von der Linse steht, dann liegen die Einzelbilder für den vorderen Gegenstand *aufeinander*, aber nicht für den hinteren.

Ebenso erkunden die Lernenden den Zusammenhang zwischen den Einzelbildern und dem Gesamtbild:

- Wenn die Einzelbilder gegeneinander *versetzt* sind und man die Löcherblende von der Linse wegnimmt, dann entsteht ein *unscharfes* Gesamtbild [19].
- Wenn sich die Einzelbilder *decken* und man die Löcherblende von der Linse wegnimmt, dann entsteht ein *scharfes* Gesamtbild [19].

Die Lehrperson fragt dann, warum sich die Einzelbilder nicht für die vorderen und hinteren Gegenstände gleichzeitig in Deckung bringen lassen:

- Die Einzelbilder sind nicht deckungsgleich, denn sie unterscheiden sich in der Bildkomposition beziehungsweise Perspektive [19].
- Die Perspektive entspricht jener, die man vom zugehörigen Loch aus hat: Wenn man nacheinander von den verschiedenen Löchern aus durch die Linse schaut, dann sieht man die Gegenstände ebenso aus unterschiedlichen Perspektiven [19].

5.1.3. Linsenabbildung als Überlagerung von Einzelbildern verstehen

Im dritten Schritt tragen die Lernenden ihre Beobachtungen aus den ersten beiden Schritten zusammen und bringen sie folgendermaßen auf den Punkt:

- Linsenabbildung beruht auf einer Überlagerung von scharfen Einzelbildern unterschiedlicher Perspektive [19].

Die Lehrperson kann dieses Verständnis durch Simulationsversuche unterstützen, festigen und auf Alltagsanwendungen zurückbeziehen:

- *Demonstrationsversuch:* Wenn man ein Stillleben von unterschiedlichen Punkten aus fotografiert und die Fotos mit mehreren Beamern aufeinander projiziert, dann erscheint je nach Schirmabstand entweder der Hintergrund oder der Vordergrund deutlich. Bei Smartphone-Apps wie *Google LensBlur* wird eine digital-virtuelle Version dieses Verfahrens genutzt, um aus scharfen Handyfotos ein Gesamtbild mit den gewünschten Unschärfebereichen zu berechnen [19].
- *Schülerversuch:* Wenn man ein Stillleben von unterschiedlichen Punkten aus auf unterschiedliche Folien zeichnet und die Folien übereinander schiebt, erscheint je nach Folierversatz entweder der Hintergrund oder der Vordergrund deutlich [19]. Etwas Ähnliches passiert auf unserer Netzhaut, wenn wir die Krümmung unserer Augenlinse anpassen.

5.1.4. Einzelbilder verbinden

Im vierten Schritt gewinnen die Lernenden eine Übersicht über die räumliche Anordnung der Einzelbilder, indem sie ausgewählte Einzelbilder miteinander verbinden. Hierfür bekommen sie folgende Aufgaben:

1. Zeichne die **Einzelbilder vor der Linse** (wie du sie von der jeweiligen Lochblende aus siehst) auf einer *durchsichtigen Glasplatte* nach (oder vermesse sie dort), und zwar bei verschiedenen Abständen zwischen Glasplatte und Linse.
2. Zeichne die **Einzelbilder hinter der Linse** auf einem *weißen Projektionsschirm* nach (oder vermesse sie dort), und zwar bei verschiedenen Schirmabständen [19].
3. Übertrage die Einzelbilder und den Versuchsaufbau in eine **maßstabsgerechte Seitenansicht** [19].
4. **Verbinde** in der Seitenansicht zusammengehörige Einzelbilder miteinander [19].

Dabei erkennen die Lernenden, dass die Verbindungslinien Pyramiden bilden (Abb. 6). Die Pyramidenspitze liegt jeweils an einem unbedeckten Linsenpunkt, die Pyramidengrundfläche liegt auf dem Gegenstand beziehungsweise dessen scharfem Gesamtbild.

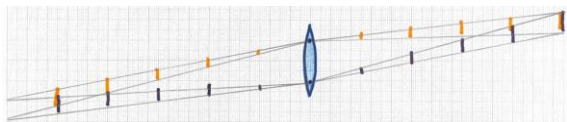


Abb. 6: Maßstabsgetreue Seitenansicht von Einzelbildern vor und hinter einer Glaslinse mit Löcherblende. Die Einzelbilder lassen sich geradlinig miteinander verbinden.

5.1.5. Bildeigenschaften vorhersagen

Im fünften Schritt konstruieren die Lernenden das Gesamtbild anhand von Einzelbilder-Pyramiden. Diese Konstruktionsmethode kann man aus den vorhergehenden Beobachtungen herleiten [19].

Nutzt man darüber hinaus statt Längenmessungen (in der vorderen und hinteren Brennebene) geschickte Parallelverschiebungen, kann man die Konstruktion wesentlich abkürzen (Abb. 7):

1. Zeichne Verbindungslinien zwischen einem ausgewählten Linsenpunkt und den äußeren Punkten des Gegenstands.
2. Führe eine Parallelverschiebung bis zum Linsenmittelpunkt durch und markiere die Schnittpunkte mit der hinteren Brennebene.
3. Zeichne Verbindungslinien vom ausgewählten Linsenpunkt durch die markierten Punkte.
4. Wiederhole die ersten drei Schritte für einen weiteren Linsenpunkt und zeichne das scharfe Gesamtbild dort, wo sich die Verbindungslinien schneiden.

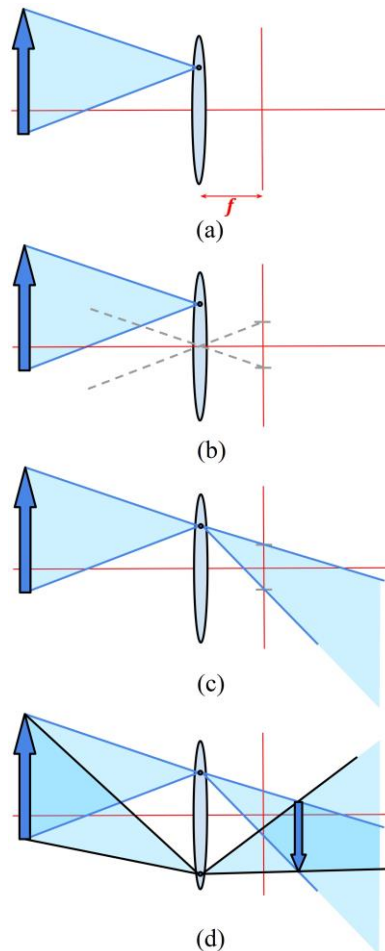


Abb. 7: Konstruktion des Gesamtbildes anhand von Einzelbilder-Pyramiden. (a) Einzelbilder-Pyramide vor der Linse (mit Brennweite f). (b) Einzelbild in der hinteren Brennebene. (c) Einzelbilder-Pyramide hinter der Linse. (d) Überlagerte Einzelbilder-Pyramiden.

5.1.6. Sich gemeinsam über die Bedeutung der Verbindungslinien verständigen

Im sechsten Schritt erst bezeichnet die Lehrperson die Verbindungslinien als Strahlen und deutet sie gemeinsam mit den Lernenden als Lichtwege um [19]. Der Zweck des Strahlenmodells besteht also darin, die Anordnung der Einzelbilder *darzustellen* und sich die Ausbreitung des Lichts *vorzustellen*.

Wenn die Lernenden ihre Aufmerksamkeit von einzelnen Linsenpunkten auf einzelne Gegenstands- sowie Bildpunkte richten und die Linse als Ganzes betrachten, erkennen sie anstelle von Einzelbilder-Pyramiden plötzlich Lichtkegel. Dieser *Gestaltwechsel* ermöglicht einen *Konzeptwechsel* von der holistischen Denkfigur der Lernenden zur analytischen Denkfigur der Forschenden [19].

5.2. Zweites Beispiel: Spektroskopie

5.2.1. Gitterspektren aus dem Alltag beschreiben



Abb. 8: Gitterspektren im Alltag. (a) Spiegelbild der Sonne im Flachbildschirm, umgeben von einem regenbogenfarbigen Lichtkreuz. (b) Bunt spiegelnde Bastelfolie. (c) Bunte Spiegelbilder der Deckenlampe in einer DVD-Hülle. (d) Farbige funkelnde Frisbee. (e) „Holo trend“ bei Kosmetik-Produkten. (f) Dartpfeile, farbig schimmernd verpackt.

Im ersten Schritt entdecken die Lernenden Gitterspektren im Alltag.

Dies ist schon ohne jegliche Hilfsmittel möglich: Wenn sie sich die Glanzpunkte auf sonnenbeschiene- nen Autos blinzelnd anschauen, so dass die Wimpern vor der Pupille hängen, dann sehen sie winzige bunte Spektren, vor allem horizontal.

Wenn sie auf ein ausgeschaltetes LCD-Pixeldisplay schauen, dann sehen sie um das Spiegelbild einer kleinen Lichtquelle herum vielfache Spektren (Abb. 8(a)).

Noch breitere Spektren finden die Jungen und Mädchen bei vielen modernen Verpackungen und Produkten mit „Hologrammfolie,“ vor allem in Kosmetik-, Mode-, Medien-, Bastel-, Spielzeug- und Sportgeschäften (Abb. 8(b)-(f)).

Die vielfachen Spektren entstehen in diesen Fällen nicht etwa durch Prismen, sondern durch feine Gitterstrukturen wie Wimpern [21], Pixelzeilen und -Spalten oder mikroskopisch kleine Folienrillen.

5.2.2. Den spektralen Gitter-Raum erkunden

Im zweiten Schritt erkunden die Lernenden die Erscheinungen an einer durchsichtigen Spektralfolie (Transmissionsgitter), indem sie

- spektral verschiedene Lichtquellen verwenden (Halogenlampe, Energiesparlampe, Leuchtdiode) [20],
- den betrachteten Gegenstand beziehungsweise sich selbst bewegen [20,22] und
- versuchen, die verschiedenfarbigen Einzelbilder des Gegenstandes durch gleichartige Gegenstände nachzustellen [20,22] (Abb. 9).

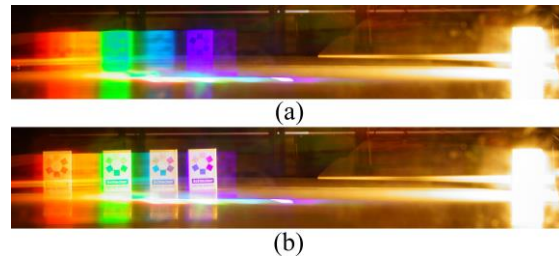


Abb. 9: Versuch, verschiedenfarbige Einzelbilder nachzustellen. (a) Betrachtet man durch Spektralfolie einen Gegenstand, der mit einer Energiesparlampe beleuchtet ist, dann sieht man daneben verschiedenfarbige Einzelbilder. (b) Diese Einzelbilder kann man mit gleichartigen Gegenständen nachstellen; dies funktioniert aber nur bei einer bestimmten Blickrichtung, denn andernfalls sind die Einzelbilder verzerrt [20].

Zudem soll jeweils ein Partner zum betrachteten Gegenstand gehen, um durch das Gitter hindurch den *Betrachter und dessen Spektrum* zu beobachten [20], vgl. [23].

5.2.3. Gitterspektren als Überlagerung von verschiedenfarbigen Einzelbildern verstehen

Im dritten Schritt fassen die Lernenden ihre Beobachtungen zusammen [20], vgl. [24]:

- Beim Blick durch ein optisches Gitter sieht man neben dem Gegenstand eine Reihe von Spektren.
- Jedes Spektrum ist eine Überlagerung von verschiedenfarbigen Einzelbildern des Gegenstandes. Der Abstand zwischen den Einzelbildern ist umso größer, je weiter das Gitter vom Gegenstand entfernt ist.
- Die verschiedenfarbigen Einzelbilder unterscheiden sich in der Perspektive. Die Perspektiven sind umso unterschiedlicher, je weiter das Gitter vom Auge entfernt ist.

Anhand der beobachtbaren Einzelbilder sind sogar schon quantitative Betrachtungen möglich [20]: Nur bei einer bestimmten Blickrichtung erscheint das Einzelbild einer gegebenen Spektralfarbe verzerrungsfrei. Es hat dann dieselbe Entfernung vom Gitter wie der Gegenstand [20]. Es liegt dann gemeinsam mit den anderen Einzelbildern des Spektrums ungefähr auf einem Kreisbogen. Dessen Bogenwinkel („Dispersionswinkel“) ist sogar unabhängig von der Gegenstands- und Betrachterweite [20], vgl. [23].

5.2.4. Verbindungslinien einzeichnen

Im vierten Schritt erfassen die Lernenden geometrische Zusammenhänge zwischen Betrachter, Gegenstand und Einzelbildern [20] (Abb. 10): Um zu beschreiben, durch welchen Gitterbereich ein bestimmtes Einzelbild zu sehen ist, zeichnen sie gerade Verbindungslinien zwischen Augpunkt und Einzelbild (Abb. 10(a)) [20], vgl. [22]. Um zu beschreiben, aus

welcher Perspektive der Gegenstand je nach Farbe betrachtet wird, zeichnen sie gerade Verbindungslinien zwischen virtuellem Augpunkt und Gegenstand (Abb. 10(b)) [20].

Der Einfachheit und Nützlichkeit halber beschränkt man die weitere Modellierung auf jene Blickrichtung, aus der das *mittlere* Einzelbild unverzerrt erscheint. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass die zwei Verbindungslinien Augpunkt-Einzelbildpunkt und virtueller Augpunkt-Gegenstandspunkt im gleichen Winkel zum Gitterlot verlaufen, dem Winkel der *minimalen Ablenkung* [20], vgl. Abb. 10.

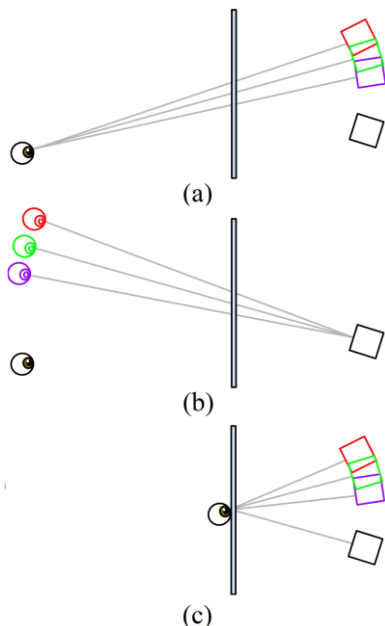


Abb. 10: Verbindungslinien am Gitter einführen. (a) Verbindungslinien zwischen Auge und Einzelbildern kennzeichnen die durchblickten Gitterstellen. (b) Verbindungslinien zwischen Einzelbildern des Auges und Gegenstand verdeutlichen die unterschiedlichen Perspektiven. (c) Verbindungslinien zwischen gitterberührendem Auge und Gegenstand sowie dessen Einzelbildern sind gleich lang, wenn die Einzelbilder verzerrungsfrei sind.

5.2.5. Spektren-Eigenschaften vorhersagen

Im fünften Schritt nutzen die Lernenden ihre bildbasierten Erkenntnisse zusammen mit Verbindungslinien, um zum Beispiel die Abbildungseigenschaften eines einfachen Spektroskops [25] (bei Einhaltung der minimalen Ablenkung) vorherzusagen (Abb. 11(a)):

Die (winkelmäßige) *Breite des Spaltspektrums* können sie vorhersagen, indem sie Verbindungslinien zwischen Augpunkt und den (kreisbogenförmig angeordneten) Einzelbildern des Spaltes zeichnen.

Den *abgebildeten Gegenstandsbereich* können sie vorhersagen, indem sie Verbindungslinien von den (kreisbogenförmig angeordneten) virtuellen Augpunkten durch den Spalt hindurch bis zum Gegenstand zeichnen.

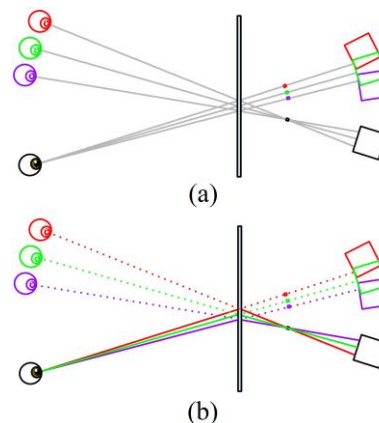


Abb. 11: Verbindungslinien (a) zur Vorhersage der Abbildungsgeometrie eines einfachen Spektroskops nutzen und (b) als Wege farbigen Lichts deuten.

5.2.6. Von Strahlen zu Wellen übergehen

Im sechsten Schritt bezeichnet die Lehrperson die Verbindungslinien als Strahlen und diskutiert mit den Lernenden den Zweck und die Grenzen des Strahlenmodells.

Der *Zweck* der Verbindungslinien (Strahlen) besteht darin, Sichtbeziehungen darzustellen und sich Lichtwege vorzustellen. Hierbei ist zu beachten, dass gewisse Abschnitte der Verbindungslinien keine Lichtwege sind: Die Verbindungslinien können zwischen Gitter und hindurch gesehene Spektrum verstellt werden, ohne dass das Spektrum verschwindet [26] (vgl. Abb. 11(a) und (b)).

Die *Grenzen* des Strahlenmodells bestehen darin, dass man die Richtungen der Lichtwege zwar beschreiben, aber nicht mathematisch herleiten oder physikalisch begründen kann. Hierfür müsste man das Strahlenmodell durch ein Wellenmodell erweitern, indem man sich Gitterspektren als Ergebnis einer Wellenüberlagerung vorstellt und die Richtungen der vorgestellten Wellenausbreitung anhand von Strahlen darstellt. Gemäß der farbspezifischen Strahlgeometrie kann man dann jeder Spektralfarbe eine Wellenlänge zuordnen [26,27]. Die Lichtwellen sind aber unbeobachtbar: Sie sind hinzugedacht.

6. Fazit

Wir haben die phänomenologische Methode und die Modellmethode zu einer phänomenbasierten Modellmethode zusammengeführt. Dadurch haben wir physikalische Erkenntnisgewinnung als Wechselspiel zwischen Phänomen-Erkundung und Modellierung didaktisch rekonstruiert.

Hiermit können die Lernenden schrittweise vom konkreten Alltagserleben zum abstrakten Physikwissen, vom Exemplarischen zum Allgemeinen, vom Subjektiven zum Objektiven, vom Emotionalen zum Rationalen, also von der Phänomen- zur Modellwelt übergehen – und wieder zurück.

7. Literatur

- [1] Müller, M. (2017): *Grammatik der Natur: Von Wittgenstein Naturphänomene verstehen lernen*. Berlin: Logos. URL: <https://zenodo.org/record/343889#.WxThZyBCR9M> (Stand 6/2018)
- [2] Leisner-Bodenthin, A. (2006). Zur Entwicklung von Modellkompetenz im Physikunterricht. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 12, 91-109. URL: http://www.archiv.ipn.uni-kiel.de/zfdn/pdf/006_12.pdf (Stand 6/2018)
- [3] Westphal, N., Schön, L.-H., & Grebe-Ellis, J. (2011). Die Merkmale phänomenbasierten Physikunterrichts. *PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur Frühjahrstagung, 2011*, DD 23.02. URL: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/viewFile/282/336> (Stand 6/2018)
- [4] Windschitl, M., Thompson, J., & Braaten, M. (2008). Beyond the scientific method: Model-based inquiry as a new paradigm of preference for school science investigations. *Science Education*, 92, 941-967. URL: <https://doi.org/10.1002/sce.20259> (Stand 6/2018)
- [5] Heine, A. (2017). *Was ist Theoretische Physik?* (Dissertation). Technische Universität Dresden, Dresden.
- [6] Murmann, L. (2008, Mai). Exploring natural phenomena. *EARLI-SIG*, Kristianstad. URL: <http://www.distans.hkr.se/sig9/download/download-filer/Full%20paper%20L.%20Murmann.pdf> (Stand 6/2018)
- [7] Østergaard, E., Hugo, A., & Dahlin, B. (2007). From phenomenon to concept: Designing phenomenological science education. *6th IOESTE Symposium for Central and Eastern Europe*, 123-129. URL: <http://www.umb.no/statisk/lare-utdanning/from-phenomenon-to-concept.pdf> (Stand 6/2018)
- [8] Jackson, J., Dukerich, L., & Hestenes, D. (2008). Modeling Instruction: An effective model for science education. *Science Educator*, 17(1), 10-17. URL: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ851867.pdf> (Stand 6/2018)
- [9] Khan, S. (2007). Model-based inquiries in chemistry. *Science Education*, 91, 877-905. URL: <https://doi.org/10.1002/sce.20226> (Stand 6/2018)
- [10] Buckley, B. (2000). Interactive multimedia and model-based learning in biology. *International Journal of Science Education*, 22, 895-935. URL: <https://doi.org/10.1080/095006900416848> (Stand 6/2018)
- [11] Schwarz, C. V., & Gwekwerere, Y. N. (2007). Using a guided inquiry and modeling instructional framework (EIMA) to support preservice K-8 science teaching. *Science Education*, 91, 158-186. URL: <https://doi.org/10.1002/sce.20177> (Stand 6/2018)
- [12] Halloun, I. (1996). Schematic modeling for meaningful learning of physics. *Journal of Research in Science Teaching*, 33, 1019-1041. URL: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2736\(199611\)33:9%3C1019::AID-TEA4%3E3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(199611)33:9%3C1019::AID-TEA4%3E3.0.CO;2-I) (Stand 6/2018)
- [13] Taylor, I., Barker, M., & Jones, A. (2003). Promoting mental model building in astronomy education. *International Journal of Science Education*, 25, 1020-1025. URL: <https://doi.org/10.1080/0950069022000017270> (Stand 6/2018)
- [14] Halloun, I. A. (2007). Mediated modeling in science education. *Science & Education*, 16, 653-697. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11191-006-9004-3> (Stand 6/2018)
- [15] White, B. Y., & Frederiksen, J. R. (1998). Inquiry, modeling, and metacognition: Making science accessible to all students. *Cognition and Instruction*, 16(1), 3-118. URL: https://doi.org/10.1207/s1532690xci1601_2 (Stand 6/2018)
- [16] Schwarz, C. V., & White, B. Y. (2005). Meta-modeling knowledge: Developing students' understanding of scientific modeling. *Cognition and Instruction*, 23(2), 165-205. URL: https://doi.org/10.1207/s1532690xci2302_1 (Stand 6/2018)
- [17] Brewster, E. (2008). Modeling theory applied: Modeling Instruction in introductory physics. *American Journal of Physics*, 76, 1155-1160. URL: <https://doi.org/10.1119/1.2983148> (Stand 6/2018)
- [18] Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Achér, A., Fortus, D., Schwartz, Y., Hug, B., & Krajcik, J. (2009). Developing a learning progression for scientific modeling: Making scientific modeling accessible and meaningful for learners. *Journal of Research in Science Teaching*, 46, 632-654. URL: <https://doi.org/10.1002/tea.20311> (Stand 6/2018)
- [19] Grusche, S. (2016). Seeing lens imaging as a superposition of multiple views. *Physics Education*, 51, 015006. URL: <http://iop-science.iop.org/article/10.1088/0031-9120/51/1/015006?pageTitle=IOPscience> (Stand 6/2018)
- [20] Grusche, S. (2015). Ein bildbasierter Zugang zu spektroskopischen Versuchen. *PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur Frühjahrstagung, 2015*, DD 10.02. URL: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/633/764> (Stand 6/2018)
- [21] Croft, W. B. (1894). Some observations on diffraction. *The London, Edinburgh, and Dublin*

- Philosophical Magazine and Journal of Science*, 38(230), 70-81. URL: <https://doi.org/10.1080/14786449408620602> (Stand 6/2018)
- [22] Müller, M., & Schön, L. H. (2011). Virtuelle Beugungsbilder am Gitter. *PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur Frühjahrstagung, 2011*, DD 13.02. URL: <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/download/288/348> (Stand 6/2018)
- [23] Rang, M. (2015). *Phänomenologie komplementärer Spektren*. Berlin: Logos.
- [24] Lunazzi, J. J. (1990). Holophotography with a diffraction grating. *Optical Engineering*, 29(1), 15-18. URL: <https://doi.org/10.1117/12.55567> (Stand 6/2018)
- [25] Grusche, S. (2014). Basic slit spectroscopy reveals three-dimensional scenes through diagonal slices of hyperspectral cubes. *Applied Optics*, 53, 4594-4603. URL: <https://doi.org/10.1364/AO.53.004594> (Stand 6/2018)
- [26] Grusche, S. (2016). Spielfilm auf Spaghetti: Spektrale Bildprojektion. *Physik in unserer Zeit*, 47(4), 180-184. URL: <https://doi.org/10.1002/piuz.201601430> (Stand 6/2018)
- [27] Sommer, W., Grebe-Ellis, J., Vogt, J. (2004). Zur Beugung: Von einfachen Freihandversuchen über die Laue-Kugel zum reziproken Gitter und zur Ewald-Kugel. *PhyDid A – Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 3(2), 67-86. URL: <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid/article/view/24/24> (Stand 6/2018)

Wie wird die Ansicht durch eine Kugellinse verformt?

- Entwicklung einer Phänomenreihe -

Sascha Grusche¹, Matthias Rang², Marc Müller³

¹Didaktik der Physik, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden, ²Naturwissenschaftliche Sektion, Forschungsinstitut am Goetheanum, Hügelweg 59, 4143 Dornach (Schweiz), ³Physik und ihre Didaktik, Bergische Universität Wuppertal, Gauß-Straße 20, 42119 Wuppertal
sascha.grusche@tu-dresden.de, matthias.rang@goetheanum.ch, m.mueller@uni-wuppertal.de

Kurzfassung

Ob als Goldfisch-Aquarium, Weinglas oder Tautropfen - Kugellinsen sind im Alltag häufig zu finden. Beim Blick durch sie hindurch sind erstaunliche Verzerrungen und Vervielfachungen zu entdecken. Wie können diese Verformungen der Ansicht systematisch beschrieben und vorhergesagt werden? Für eine Erkundung der Erscheinungen eignet sich in methodischer Hinsicht ein phänomenologischer Vierschritt. Inhaltlich zeigt sich, dass die unverzerrten Ansichten ohne Kugel und die verzerrten Ansichten unter Verwendung der Kugel aufeinander bezogen werden müssen. Besonders aussagekräftig ist ein Vergleich der Inspektion des Gegenstandes durch die Kugel mit der Projektion eines Bildes durch die Kugel. Sind die Erscheinungen an der Kugellinse auf diese Weise nachvollzogen, können jene an der dünnen Linse als Spezialfall angesehen werden.

1. Einführung

Kugellinsen können wir bei vielen Gelegenheiten im Alltag finden. Sie begegnen uns als Goldfisch-Aquarium, kugeliger Wasserflaschenhals, gefülltes Weinglas, kleine Glasmurmeln und winziger Tautropfen. Wenn wir durch sie hindurchblicken, sehen wir die dahinterliegende Welt seltsam verformt (Abb. 1-5).

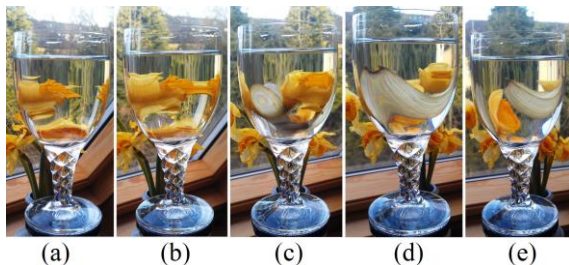


Abb. 1: Blick durch ein Wasserglas auf einen Strauß Osterglocken. Die Fotos (a)-(e) dokumentieren etwa ein Achtel eines Rundgangs um das Glas und halten dabei eine Reihe auffälliger Bildverwandlungen fest.

Diese wundersamen Ansichten werfen eine Reihe von Fragen auf:

- Wann ist das Bild seitenrichtig, wann seitenverkehrt? [1]
- Wieso ist der Gegenstand manchmal dreifach zu sehen? [2,3]
- Wo befindet sich das Bild in räumlicher Hinsicht: vor der Kugellinse, darauf, darin, oder dahinter? [1]
- Unter welchen Bedingungen ist das Bild scharf, unter welchen unscharf? [1]
- Wie kann das Bild einer Punktlichtquelle simuliert werden? [4]

Solche und weitere Fragen zur Ausrichtung, Anzahl, Position und Schärfe der Kugellinsen-Bilder sind allesamt behandelt worden. Die Antworten sind jeweils mit Hilfe der Geometrie gebrochener Strahlen entwickelt worden. Sie beziehen sich somit stets auf die Abbildung einzelner Gegenstandspunkte. Bei bisherigen Untersuchungen blieb jedoch eine Frage offen:

1.1. Die Frage nach der Bildform

- Welche Form hat die verzerrte Ansicht?

Es liegt nahe, auch diese Frage auf Grundlage gebrochener Strahlen zu beantworten. Dazu könnte das Brechungsgesetz auf Vorder- und Rückseite der Kugellinse angewandt werden, wie es beispielsweise zur Behandlung des Regenbogens üblich ist [5]. Mit Hilfe der Lösung des daraus entwickelten Gleichungssystems, das den Zusammenhang zwischen Augpunkt, Gegenstandspunkten und Bildpunkten beschreibt, lässt sich die verformte Ansicht punktweise zusammensetzen. Allerdings ist dieses Gleichungssystem so komplex, dass eine Lösung bisher nicht angegeben wurde [6]. Insofern ist ein strahlenbasiertes Vorgehen nicht zufriedenstellend.

Deshalb schlagen wir eine bildbasierte Behandlung vor: Die mathematische Beschreibung soll aus den beobachtbaren Bildern entwickelt werden. Dabei folgen wir dem methodischen "Rezept" des phänomenologischen Vierschritts [7].

Im ersten Schritt (Abschnitt 1.2) werden alltägliche Erscheinungen im Zusammenhang mit Kugellinsen beschrieben, um mit den Ansichtsverformungen vertraut zu werden.

Im zweiten Schritt (Kapitel 2) wird eine Experimentierreihe entwickelt, die es erlaubt, die einzelnen Parameter systematisch zu variieren.

Der dritte Schritt (Kapitel 3) dient dem Ordnen der dokumentierten Erscheinungen, sodass auf Grundlage der Erscheinungsbedingungen empirische Regeln der Ansichtsverformung aufgestellt werden können.

Im vierten Schritt (Kapitel 4) kann der Zusammenhang zwischen ursprünglicher und verformter Ansicht mathematisch formuliert werden.

1.2. Der erste Schritt: Ansichtsverformungen bei Kugellinsen aus dem Alltag beschreiben



(a)



(b)



(c)

Abb. 2: Blick durch eine Glaskugel auf einen Strauß Osterglocken. Von (a) bis (c) wird die Kugel vom Auge (der Kamera) zu den Blumen hin verschoben.

Gegenstände hinter Wassergläsern sehen verzerrt und teilweise sogar vervielfacht aus. Abbildung 1 zeigt beispielhaft ein halbkugelförmiges Wasserglas, hinter dem ein Strauß Osterglocken steht. Beim Rundgang um das Glas zeigen sich zunächst zwei Bilder eines Blütenblatts (Abb. 1(a)), die plötzlich miteinander verschmelzen (Abb. 1(b)), und später ein neu auftauchendes Bild eines Kelchblatts (Abb. 1(c)), das

sich in seiner Verformung (Abb. 1(d)) schließlich in zwei Bilder zertrennt (Abb. 1(e)).

An Glasmurmeln oder Kristallkugeln erscheinen die Bildverzerrungen bereits regelartiger als bei Trinkgläsern, wenn auch nicht minder rätselhaft. Wird eine solche Kugel vom Auge (bzw. der Kamera) weg und zu den Osterglocken hingeführt, verhält sie sich noch ähnlich wie eine Blende, die vom Auge weggeführt wird: Schritt für Schritt ist immer weniger der dahinterliegenden Umgebung sichtbar (vgl. Abb. 2).



(a)

(b)

(c)

Abb. 3: Blick durch eine Glaskugel auf einen Strauß Osterglocken. Von (a) über (b) nach (c) wird das Auge (die Kamera) zur Kugel nachgeführt (vgl. Abb. 2).

Wird das Auge (bzw. die Kamera) dann nachgeführt, stellen sich die Veränderungen aber ganz anders als beim Blick durch eine Blende dar: Weiterhin schwindet Schritt für Schritt Sichtinhalt, im gleichen Maße werden die Bildverzerrungen jedoch immer stärker (Abb. 3).



(a)

(b)

(c)

Abb. 4: Blick durch eine Glaskugel auf direkt dahinter liegendes.

Objekte, die sich wie das gemaserte Holz direkt hinter der Kugel befinden, sehen im Bereich der Kugelmittle stark aufgebläht aus (Abb. 4). Zudem erscheinen die Objekte in allen dokumentierten Ansichten seitenverkehrt und kopfstehend.

An größeren klaren Kugeln lassen sich die Verzerrungen noch genauer studieren. Dort fällt schnell auf, dass mehrfache, sich überlagernde und charakteristisch verzerrte Ansichten der Umgebung sichtbar werden (Abb. 5, vgl. [7]). Zum einen wirkt die den Beobachtern zugewandte Oberfläche als Wölbspiegel (Konvexspiegel), zum anderen wirkt die den Beobachtern abgewandte Oberfläche, also die Kugelmittle, als Hohlspiegel (Konkavspiegel). Daher rühren in Abbildung 5 die aufrechten Bilder der beiden Fenster im linken Bereich der Kugel und das große, kopfstehende Bild des Fensters im rechten Bereich der Kugel. Zudem erlaubt die Kugel, wie Murmel und Wasserglas auch, Durchblick auf Dahinter-

liegendes. Das zugehörige Bild erscheint typischerweise seitenverkehrt kopfstehend und rundlich verformt.

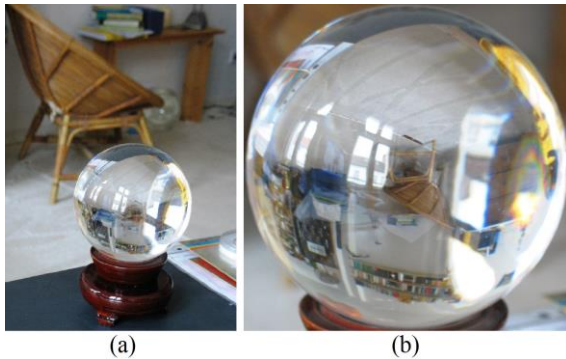


Abb. 5: Kristallkugel im Zimmer. (a) Überblicksfoto, (b) Blick durch die Kugel (Durchmesser ca. 11 cm), vgl. [8].

In Abbildung 5 lässt sich das beispielsweise an dem zentralen Korbstuhl und dem schmalen Bücherregal nachvollziehen. Die äußeren Bildbereiche schmiegen sich dabei dem Kugelrand an.

In all diesen Fällen wird die ursprüngliche Ansicht (der Osterglocken, der Maserung des Tisches, des Korbstuhls usw.) beim Blick durch das kugelförmige Medium verzerrt.

Um die Charakteristik dieser Verzerrungen genauer nachvollziehen zu können, werden wir für unsere weiteren Erkundungen anstelle der Alltagsgegenstände ein regelmäßiges Muster verwenden.

2. Der zweite Schritt: Die Bildverformungen im Experiment erkunden

2.1. Ansichten regelmäßiger Muster beim Blick durch die Kugellinse

Regelmäßige Muster wie Geraden oder Karoraster machen auf eine weitere Besonderheit der Bildverzerrungen an Kugellinsen aufmerksam: Es gibt nicht nur aufgeblähte und gestauchte Bildbereiche, sondern unter Umständen auch Schlaufen (vgl. Abb. 6).

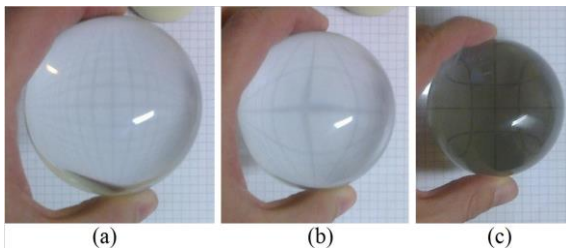


Abb. 6: Kugellinse über Karopapier. Führt man eine Kugellinse an ein Blatt kariertes Papier heran, sieht man (a) zunächst ein konvexes Raster, das sich (b) immer mehr aufbläht und (c) schließlich innen konkav wird und außen überraschende Schlaufen bekommt, während der Bildinhalt immer dunkler wird.

Diese Schlaufen erinnern an Bildverzerrungen bei gekrümmten Spiegeln. Abbildung 7 zeigt so ein Spiegelbild in einer Kaffeetasse, wo sich der Rand des Kaffeespiegels adhäsionsbedingt nach oben biegt. Auch dort zeigen sich am Rand des Spiegelbildes der

rasterartigen Bahnhofsdecke charakteristische Schlaufen. Interessanterweise ist das sich spiegelnde Muster der gebogenen Bahnhofsdecke im Zentrum seines Spiegelbildes allerdings gerade entzerrt.



Abb. 7: Schlaufenförmiges Muster im Kaffee. (a) Bestellt man im Bahnhof Dresden-Neustadt einen Kaffee, bekommt man ihn stets mit einer wunderschönen Verzierung serviert. (b) Hebt man den Blick von der Kaffeetasse nach oben, entpuppt sich das schlaufenförmige Muster als verformtes Spiegelbild des fast quadratischen Dachfensters.

Diese Beobachtung rückt das gesamte Wechselspiel von Ver- und Entzerrung in die Nähe von Zerrbildern, wie sie seit Jahrhunderten als Anamorphosen bekannt sind. Damit steht die Idee im Raum, mit Hilfe der Kugellinse bereits vorverzerrte Ansichten wieder zu entzerren.

2.2. Den Verformungen vorbeugen: Anamorphosen als Zugang zur Kugellinse

Anamorphosen sind seit dem Mittelalter bekannt. Dabei werden Bilder unverzerrter Objekte derartig verzerrt gezeichnet, dass sie von einem bestimmten Beobachtungspunkt aus entzerrt gesehen werden [10-13].

Perspektivische Anamorphosen sind den meisten von uns aus dem Alltag bekannt: in die Länge gezerrte Buchstaben auf der Straße, die aus dem Auto heraus betrachtet als gut lesbares STOP erscheinen; auf dem Stadionrasen ausgebreitete Banner mit verzerrter Aufschrift, die auf dem Fernsehbildschirm eine klare Werbebotschaft zeigen; oder riesige Kreidezeichnungen von Straßenkünstlern, die räumlich aus dem Boden zu wachsen oder gar tief in ihn hinein zu reichen scheinen.



Abb. 8: Ansichtsverzerrung in einer spiegelnden Kaffeekanne.

Starke Ansichtsverformungen finden sich auch an zylindrischen, spiegelnden Gegenständen, wie einer Kaffeekanne (Abb. 8). Solche Erscheinungen haben schon vor vielen Jahrhunderten zur speziellen Idee der Zylinderspiegel-Anamorphose geführt [10,12,13]: Um einen Zylinderspiegel herum kann ein Zerrbild so gezeichnet werden, dass es im Zylinderspiegel gerade verzerrungsfrei erscheint.

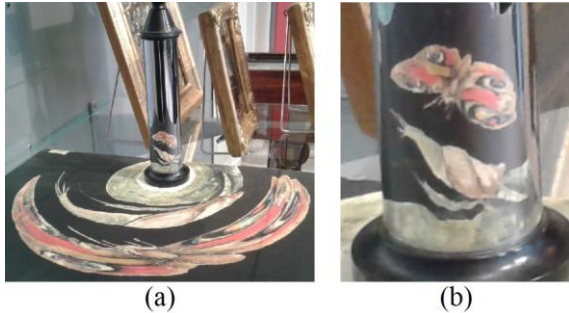


Abb. 9: Zylinderspiegel-Anamorphose (zu sehen im Mathematisch-Physikalischen Salon Dresden). (a) Um einen Spiegelzylinder herum sind rätselhafte Zerrbilder auf die Unterlage gemalt. (b) Im Spiegelzylinder erkennt man einen Schmetterling und eine Schnecke.

Solch eine *Zylinderspiegel-Anamorphose* ist zum Beispiel im Mathematisch-Physikalischen Salon in Dresden ausgestellt: Auf eine Unterlage ist ein bis zur Unkenntlichkeit verzerrtes Bild gemalt; dessen Spiegelbild im Zylinderspiegel lässt jedoch einen Schmetterling und eine Schnecke erkennen. Hier wird also die Verzerrung durch den Zylinderspiegel genutzt, um das gemalte Zerrbild zu entzerren.

Aber wie gelingt überhaupt die Erzeugung eines passenden Zerrbildes? Hierfür kommen geometrische, mechanische oder optische Verfahren in Frage [10,12,13].

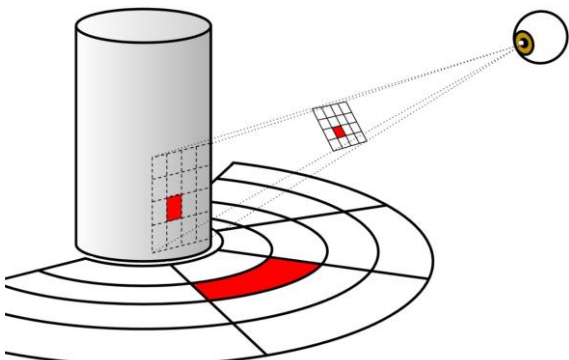


Abb. 10: Das Prinzip einer Zylinderspiegel-Anamorphose: Man zeichnet um den Zylinder herum ein verzerrtes Raster, wie es bei der Projektion eines Quadratrasters vom Betrachterstandpunkt aus entsteht. Die verschiedenen Teile eines unverzerrten Bildes überträgt man vom Quadratraster in das verzerrte Raster und erhält so das Zerrbild.

Das optische Verfahren besteht darin, das unverzerrte Motiv vom vorgesehenen Betrachterstandort aus zu projizieren (entlang der angedachten Blickrichtung)

und das entstehende Zerrbild nachzuzeichnen (Abb. 10).

So, wie ein Zylinderspiegel zur Enträtselung von katoptrischen Anamorphosen genutzt werden kann, kann die Kugellinse als ein Werkzeug zur Entschlüsselung dioptrischer Anamorphosen aufgefasst werden. In diesem Sinne wollen wir die Kugellinse zur Erschließung der Ansichtsverformungen nutzen. Dementsprechend kehrt sich unsere ursprüngliche Frage um:

- Auf welche Weise muss ein Motiv **vorverzerrt** werden, damit es beim Blick durch die Kugellinse unverzerrt aussieht?

Um diese Frage zu beantworten, wollen wir das optische Verfahren zur Erzeugung eines anamorphotischen Zerrbildes auf die Kugellinse anwenden. Wir fragen also:

- Auf welche Weise wird ein Motiv verzerrt, wenn man es durch eine Kugellinse **projiziert**?

Wenn wir diese Frage beantwortet haben, können wir im Umkehrschluss auch unsere ursprüngliche Frage beantworten:

- Auf welche Weise wird ein Motiv verzerrt, wenn man es durch eine Kugellinse **inspiziert**?

2.3. Der experimentelle Aufbau

Um die Bildverformungen, die infolge der Projektion eines Bildes durch die Kugel entstehen, und diejenigen, die infolge der Inspektion eines Bildes (also beim Blick durch die Kugel) entstehen, gleichzeitig und trotzdem möglichst unabhängig voneinander verfolgen zu können, nutzen wir einen symmetrisierten Versuchsaufbau, in dessen Mitte ein transluzenter Schirm steht (Abb. 11).

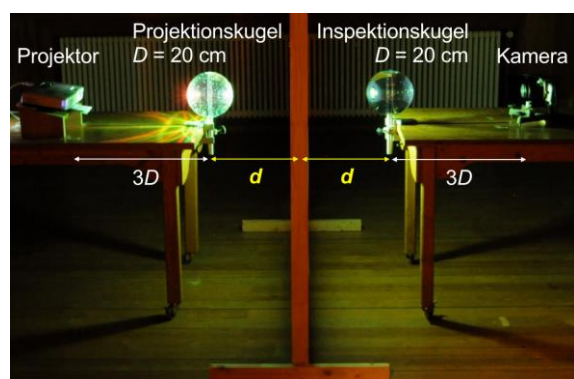


Abb. 11: Symmetrisierter Aufbau zur Erkundung der Inspektion und Projektion durch eine Kugellinse. Die Kamera steht stellvertretend für das Beobachterauge.

Mithilfe eines Beamers wird ein am Rechner erstelltes Muster auf den transluzenten Schirm projiziert (linke Seite des Aufbaus). Dieses **Urbild** ist jetzt auch auf der Rückseite des Schirms zu sehen (rechte Seite des Aufbaus).

Wird vor das Beobachteraue eine Kugellinse (*Inspektionskugel*) gesetzt, sieht die beobachtende Person ein **Inspektionsbild** des Urbildes.

Wird hingegen vor den Projektor eine Kugellinse (*Projektionskugel*) gesetzt, dann erscheint auf dem Schirm ein anamorphotisch verzerrtes **Projektionsbild** des Urbildes. Gemäß der Anamorphose-Idee sollte der Abstand zwischen Projektionskugel und Schirm jeweils genauso groß sein wie der Abstand zwischen Inspektionskugel und Schirm.

Wird das Projektionsbild dann (auf der rechten Seite) durch die Inspektionskugel hindurch betrachtet, erscheint ein **Inspektionsbild des Projektionsbildes**.

Insgesamt können mit dem Aufbau also alle vier Permutationen für die Anwesenheit und Abwesenheit der zwei Kugellinsen durchgeführt werden. Dies entspricht vier verschiedenen Ansichten mit jeweils unterschiedlichen Bildformen.

Als Kugellinsen werden zwei mit Wasser gefüllte Hohlkugeln aus transparentem Kunststoff (Durchmesser $D = 20$ cm) verwendet.

Für die Erkundungen wird zunächst nur die **Schirmweite d** , also der Abstand zwischen Schirm und der Mittelebene der Kugellinse verändert, so dass $0,5D \leq d \leq 3D$. Der Abstand zwischen Kugellinse und Auge beziehungsweise Projektor wird dabei konstant bei $3D$ gehalten. Für die Dokumentation wird anstelle des menschlichen Auges ein technisches Auge in Form einer Digitalkamera gesetzt.

Als Urbild wird im Folgenden ein regelmäßiges Quadratraster mit konzentrischen Kreisen gewählt.

3. Der dritte Schritt: Die Verformungsweisen übersichtlich darstellen

3.1. Eine Abfolge von Bildverformungen

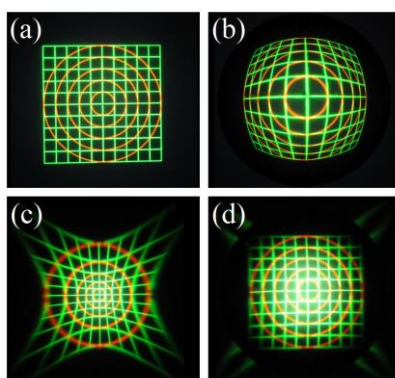


Abb. 12: $d = 3D$. (a) Urbild. (b) Inspektionsbild (vom Urbild). (c) Projektionsbild (vom Urbild). (e) Inspektionsbild vom Projektionsbild.

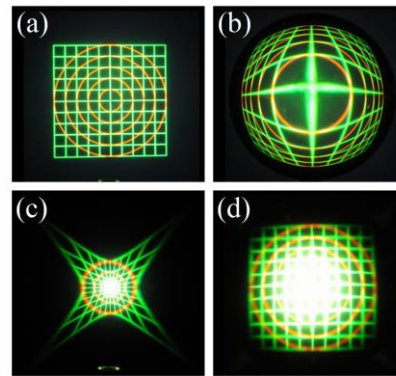


Abb. 13: $d = 2D$. (a)-(d) analog zu Abb. 12.

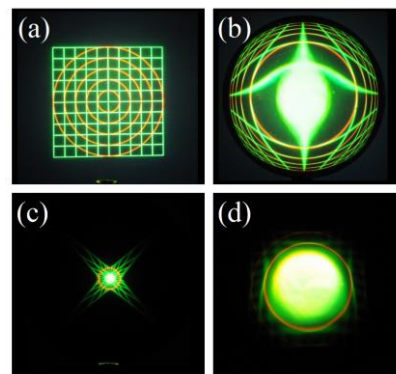


Abb. 14: $d = 1,5D$. (a)-(d) analog zu Abb. 12.

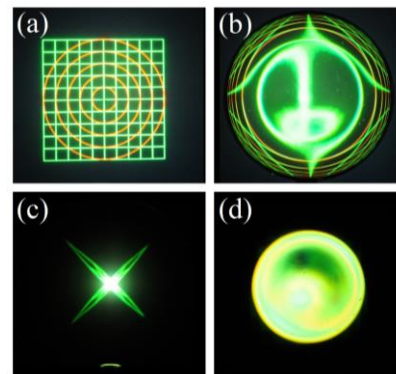


Abb. 15: $d = 1,25D$. (a)-(d) analog zu Abb. 12.

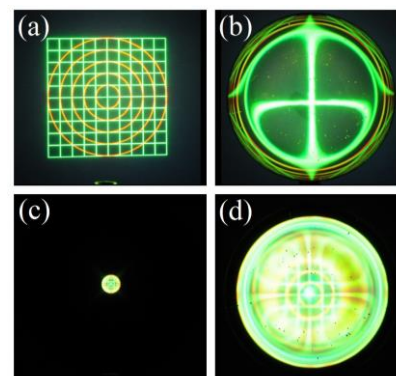


Abb. 16: $d = 1D$. (a)-(d) analog zu Abb. 12.

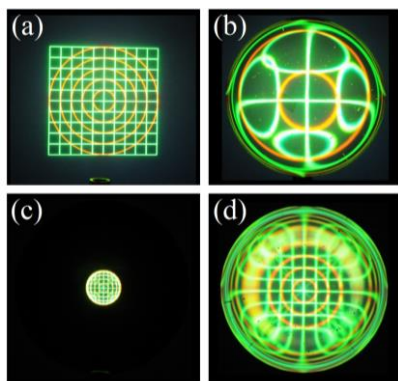


Abb. 17: $d = 0,75D$. (a)-(d) analog zu Abb. 12.

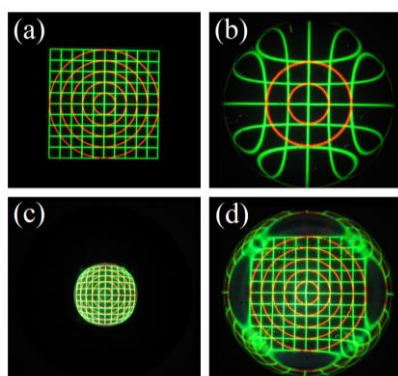


Abb. 18: $d = 0,5D$. (a)-(d) analog zu Abb. 12.

3.1.1. Überblick

Zunächst ist erkennbar, dass das Urbild stets dieselbe scheinbare Größe hat (Abb. 12(a)-18(a)), da sich das Auge jeweils in derselben Entfernung vom Schirm befindet wie der Projektor.

Zudem sind die Verformungen des Inspektionsbildes (Abb. 12(b)-18(b)) und des Projektionsbildes (Abb. 12(c)-18(c)) grundsätzlich einander entgegengesetzt.

Dementsprechend ist die Anamorphose-Idee mit der Kugellinse größtenteils umsetzbar (Abb. 12(d)-18(d)). Bei Unterschreitung eines kritischen Abstandes jedoch gehen einerseits gewisse Bildinformationen verloren und andererseits entstehen zusätzliche Strukturen (Abb. 15(d)-18(d)). Dies ist darauf zurückzuführen, dass dann das Inspektionsbild Ansichtsvervielfachungen (Abb. 15(b)-18(b)) und das Projektionsbild Bildüberlagerungen (Abb. 15(c)-18(c)) aufweist.

3.1.2. Beschreibung der Inspektionsbilder

Für eine nähere Beschreibung greifen wir uns die sieben Inspektionsbilder (Abb. 12(b)-18(b)) heraus:

Bei einem Kugelabstand $d = 3D$ (größte im vorliegenden Aufbau dokumentierte Entfernung) ist das Projektionsbild seiner Struktur nach noch sehr ähnlich dem Urbild. Es ist zwar leicht aufgebläht, so als wäre es auf die Oberfläche einer großen Kugel gezogen, das Muster ist aber gut erkennbar (Abb. 12(b)). Allerdings ist diese **erste Ansicht** des Urbildes im Vergleich zum Urbild kopfstehend und seitenverkehrt orientiert. Zum Abstand von $d = 2D$ hin nehmen die

konvexen Verformungen zu. Die Mitte der Ansicht bläht sich so weit auf, dass der zentrale Bereich bereits das gesamte Inspektionsbild dominiert und die übrigen Bereiche an den Rand verdrängt (Abb. 13(b)).

Bei weiterem Heranführen der Kugel an den Schirm steigert sich die Dominanz des Urbildzentrums derartig, dass sich der mittige, ursprünglich punkthafte Bildbereich über fast die Hälfte des Inspektionsbildes ausbreitet (Stadium in Abb. 14(b)), um dann jedoch im Zentrum der entstehenden hellen Kreisfläche aufzubrechen (Abb. 15(b)).

In diesem sehr engen Abstandsbereich geschieht optisch sehr viel. Zuerst, im Abstand der „Verschwimmweite“ [14], verschmiert ein sehr kleiner Teil Bildinhalt auf eine sehr große Fläche und drängt den restlichen Bildinhalt an den Kugelrand (Abb. 14(b)). Dann jedoch bricht das Innere dieser hellen Fläche auf und erlaubt Durchsicht auf eine zweite, sehr stark vergrößerte und konkav verformte Ansicht des Urbildes. Diese **zweite Ansicht** des Urbildes ist wie das Urbild orientiert, d. h. aufrecht und seitenrichtig. In Abbildung 15(b) ist die aufgeplatzte Fläche nach außen zu einem Kreis aufgeweitet, der die erste Ansicht zur Kugelmittigkeit hin begrenzt. Im Kreisring zwischen diesem Kreis und dem Kugelrand sehen wir die erste Ansicht (vgl. Abb. 19). Das im Zentrum der Ansicht stehende zweite Bild wird schließlich kleiner und klarer; es zieht sich gewissermaßen zusammen bzw. seine Vergrößerung, verglichen mit dem Urbild, nimmt ab (Abb. 16(b) und 17(b)). Seine Verformungen bleiben dabei konkav.

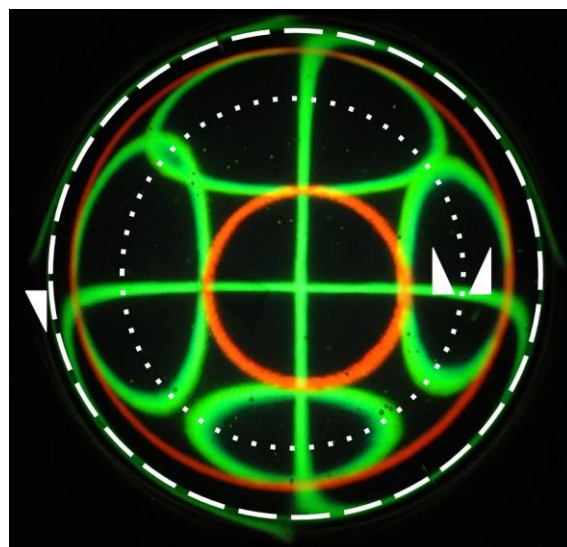


Abb. 19: Vergrößertes Inspektionsbild aus Abb. 17. Die Grenze zwischen erster und dritter Ansicht ist gestrichelt dargestellt, die Grenze zwischen zweiter und dritter Ansicht ist gepunktet dargestellt. Die weißen Dreiecke deuten die Orientierungen der Ansichten im Vergleich zum Urbild an.

Die letzten Stadien (Abb. 17(b) und 18(b)) machen auf eine weitere Besonderheit aufmerksam, die leicht zu übersehen ist und die sich bereits in den vorangegangenen Stadien finden lässt, vgl. [8] und Abb. 20: Die sich ausbildenden Schlaufen gehen auf das Auftauchen einer **dritten Ansicht** des Urbildes zurück (Abb. 15(b)). Sie befindet sich auf einem schmalen Kreisring zwischen der ersten und zweiten Ansicht (vgl. den vergrößerten Ausschnitt von Abb. 17 in Abb. 19). Man kann sich den Bildinhalt der dritten Ansicht geometrisch entstanden denken aus einer gestauchten Spiegelung der zweiten Ansicht an einer zweiten kreisförmigen Bildgrenze (die gemeinsam mit der ersten Bildgrenze aufgetaucht ist). Diese hinzugedachte Bildgrenze stellt die äußere Grenze der zweiten Ansicht dar und wandert ebenfalls, wenn auch langsamer als die innere Bildgrenze der ersten Ansicht, nach außen. An ihr schließen sich korrespondierende Bildinhalte der zweiten und dritten Ansicht zu den auffälligen Schlaufen zusammen.

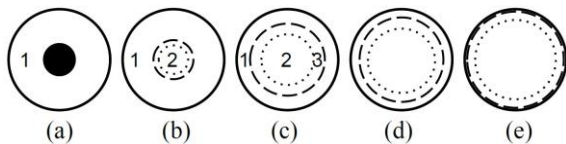


Abb. 20: Schematische Darstellung der Entstehung der Mehrfachansichten bei Unterschreitung des kritischen Abstands zwischen Inspektionskugel und Urbild, vgl. Abb. 14(b)-18(b). Die durchgängige Linie stellt den Kugelumfang dar, die gestrichelte Linie den beobachtbaren Rand der aufgeplatzten Bildmitte, die gepunktete Linie eine hinzugedachte Hilfslinie, an der eine verzerrte geometrische Spiegelung stattfindet, vgl. Abb. 19. Nummeriert sind die Zonen, in denen sich die erste, zweite beziehungsweise dritte Ansicht befinden.

3.2. Empirische Regeln der Bildverformungen

In der Abfolge der Bildverformungen lassen sich einige Regeln finden:

3.2.1. Steigerung einer vorliegenden Verformungsart

- Inspektion: Die Konvexität konvexer Ansichten nimmt mit abnehmender Schirmweite zu. Die Konkavität konkaver Ansichten nimmt mit abnehmender Schirmweite ab.
- Projektion: Die Konkavität konkaver Projektionsbereiche nimmt mit abnehmender Schirmweite zu. Die Konvexität konvexer Projektionsbereiche nimmt mit abnehmender Schirmweite ab.

3.2.2. Vermehrung der Abbildungen des Urbildes

- Inspektion: Bei Unterschreitung einer kritischen Schirmweite eröffnet sich innerhalb der konvexen Ansicht eine konkave und eine zusätzliche konvexe.

- Projektion: Bei Unterschreitung einer kritischen Schirmweite breitet sich auf dem konkaven Projektionsbereich ein konvexer und ein zusätzlicher konkaver aus.

3.2.3. Invariante Bildstrukturen

- Inspektion: Kreise im Urbild bleiben Kreise im Inspektionsbild, wenn ihr Zentrum durch das Zentrum der Kugel gesehen wird. Radien solcher Kreise bleiben krümmungsfrei.
- Projektion: Kreise im Urbild bleiben Kreise im Projektionsbild, wenn ihr Zentrum durch das Zentrum der Kugel projiziert wird. Radien solcher Kreise bleiben krümmungsfrei.

Aus der Erhaltung kreisförmiger und radialer Bildstrukturen um die Bildmitte können wir schlussfolgern, dass die Kugellinse lediglich **radiale Verformungen** erzeugt. Diese Erkenntnis wird der Schlüssel für unsere formale Beschreibung sein.

4. Der vierte Schritt: Den formalen Zusammenhang zwischen unverzerrtem und verzerrtem Bild beschreiben

4.1. Grafische Darstellung der Bildverformungen

Ziel unserer phänomenologischen Untersuchung ist es, die Verzerrung des Urbildes zum Bild durch die Kugellinse formal zu beschreiben; zunächst grafisch, später algebraisch. Da alle Verformungen entlang der Radien der Kugelansicht stattfinden (vgl. 3.2.3), reicht es, den formalen Zusammenhang zwischen der radialen Urbildkoordinate r und der radialen Inspektions- bzw. Projektionsbildkoordinate r_I bzw. r_P anzugeben. Die grafische Darstellung der zu ermittelnden Zuordnung $r \rightarrow r_I$ bzw. $r \rightarrow r_P$ kann bereits auf Grundlage der Fotos von Urbild und Inspektions- bzw. Projektionsbild erfolgen, wenn nach folgenden Schritten vorgegangen wird:

- r als ursprünglichen Kreisradius im Urbild-Foto ablesen (Abb. 12-18, (a)),
- r_I bzw. r_P als neuen Kreisradius im Foto vom Inspektions- bzw. Projektionsbild ablesen (Abb. 12-18, (b) bzw. (c)),
- r und r_I bzw. r_P in eine Wertetabelle eintragen,
- Wertepaare als Punkte in einem kartesischen Koordinatensystem darstellen und miteinander verbinden.

Als nützlich erwies sich dabei folgende Konvention: Ein seitenverkehrter (bzw. kopfstehender) Bildbereich wird mit dem umgekehrten Vorzeichen wie das Urbild bezeichnet; ein seitenrichtiger (bzw. aufrechter) Bildbereich mit dem gleichen Vorzeichen.

Die Schritte eins bis vier lassen sich abkürzen, falls das Raster Quadrate enthält, die über die Kugel beziehungsweise ihren Schatten hinausragen. In diesen Fällen erübrigt sich das Urbild-Foto; man kann dann die Wertepaare unmittelbar aus dem Inspektions-

bzw. Projektionsbild-Foto ablesen und direkt in das Foto als Punkte einzeichnen, denn r ist dann im Außenbereich der Kugel (oder ihres Schattens) in horizontaler Richtung ablesbar; und r_I bzw. r_P ist im Innenbereich entlang des vertikalen Durchmessers ablesbar.

Bemerkenswerterweise sind jene Fälle, die für die Inspektion schwierig zu vermessen sind, für die Projektion wiederum einfach zu vermessen, und umgekehrt. Dies wird aus der Tatsache verständlich, dass sich die verzerrte Projektion mittels entsprechender Inspektion entzerren lässt. Bereiche, die etwa in der Inspektion extrem gestaucht erscheinen, werden in Projektion gestreckt (und umgekehrt). Somit kann man eine vollständige Vorstellung über die Bildverformung gewinnen, wenn man die messtechnisch kaum erfassbaren Grafen für die Inspektion durch eine 90° -Drehung der Grafen (bzw. eine Vertauschung der Koordinaten) für die Projektion ergänzt, und umgekehrt. Die Übergangssituation zwischen Einfach- und Mehrfachabbildungen ist trotzdem kaum zu vermessen; sie kann aber gedanklich in den Diagrammen erschlossen werden.

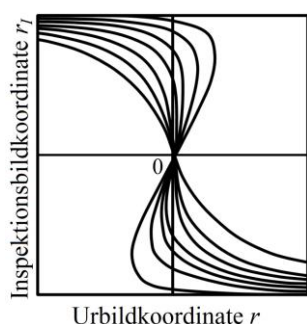


Abb. 21: Kurvenschar für den Zusammenhang zwischen ursprünglicher und verzerrter Ansicht beim Blick durch die Kugellinse (*Inspektion*). Abfolge der Kurven im Uhrzeigersinn: $d = 3D; 2D; 1,5D; 1D; 0,75D$ und $0,5D$. Der mittlere Bereich der Kugellinse (kleine r_I -Werte) verhält sich bildoptisch wie eine dünne Linse (nahezu geradliniger Graf). Die entsprechende Kurvenschar für die *Projektion* durch die Kugellinse erhält man durch Rotation des Diagramms um 90° .

4.2. Eine Klassifizierung der Ansichten mit Hilfe der grafischen Darstellung

Die Diagramme erleichtern die Erfassung der Erscheinungsbedingungen. Sie helfen beispielsweise zu erkennen, in welchen Fällen dreifache Bildüberlagerungen (bei der Projektion) beziehungsweise dreifache Ansichten (bei der Inspektion) entstehen. So kann man ihnen unmittelbar entnehmen, wie ein Bildpunkt des Urbildes abgebildet wird: eine zur Bildkoordinatenachse parallele Gerade durch die Urbildkoordinate schneidet den Grafen an den Orten der zugehörigen Bildkoordinate.

Für große Schirmweiten ist dies immer eindeutig und entspricht einer Einfachabbildung in Projektion und

Inspektion (Abb. 21, $d \geq 2D$). Dabei kann die Steigung des Grafen als Abbildungsmaßstab der Abbildung interpretiert werden. Eine abnehmende Steigung des Grafen bei Entfernung vom Ursprung entspricht einer Bildstauchung zu den Bildrändern, die für die konvexe Bildverformung charakteristisch ist. In diesen Fällen verlaufen die Grafen ausschließlich im zweiten und vierten Quadranten. Die ungleichnamige Bild- und Urbildkoordinate zeigt die seitenverkehrte und kopfstehende Ansicht an.

Für kleine Schirmweiten, in denen Dreifachabbildungen vorliegen, ist die Zuordnung zwischen Urbildkoordinaten und Inspektions- bzw. Projektionsbildkoordinaten nicht mehr eindeutig. In diesen Fällen durchläuft der Graf alle vier Quadranten und erlaubt eine detaillierte Interpretation der Bildbereiche (Abb. 22). Eine zur Bildkoordinatenachse parallele und nahe, vertikale Hilfslinie schneidet den Grafen in drei Punkten, an denen die zugehörigen Bildkoordinaten ablesbar sind. Diese entsprechen Dreifachabbildungen, die sich durch den Grafen jetzt genauer charakterisieren lassen.

- ungleichnamige Koordinaten (2. und 4. Quadrant), monoton fallende negative Steigung: konvexe, seitenverkehrte und kopfstehende 1. Ansicht des Urbildes;
- gleichnamige Koordinaten (1. und 3. Quadrant), monoton wachsende positive Steigung: konkave, seitenrichtige und aufrecht stehende 2. Ansicht des Urbildes;
- gleichnamige Koordinaten (1. und 3. Quadrant), monoton fallende negative Steigung: konvexe, am Kreis „gespiegelte“ 3. Ansicht des Urbildes. Diese Ansicht ist seitenrichtig, aber kopfstehend (bzw. aufrecht, aber seitenverkehrt)!

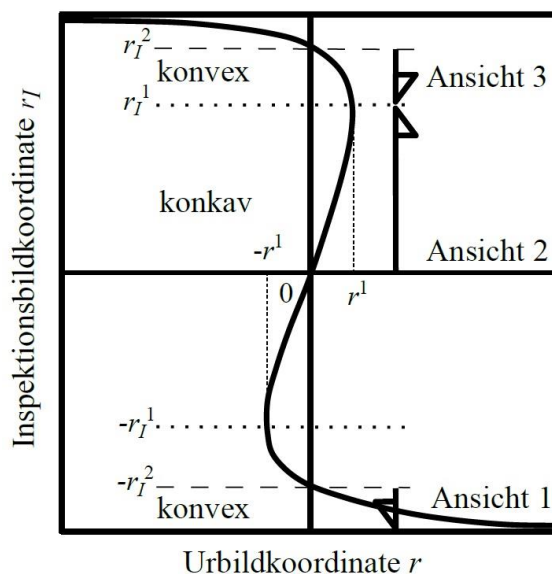


Abb. 22: Charakteristische Kurveneigenschaften im Bezug zu Bildeigenschaften am Beispiel des Inspektionsbildes beim Abstand $d = 0,75D$, vgl. Abb. 19.

Auch gestattet der Graf eine quantitative Angabe der Bildgrenzen der Mehrfachabbildungen bzw. vervielfachten Ansichten: die Schnittpunkte des Grafen mit der Bildkoordinatenachse (Abb. 22, gestrichelte horizontale Linien) geben den Radius r_l^2 an, in dem im Inspektionsbild der begrenzende Kreis der aufgesetzten Bildmitte (und damit die Grenze zwischen erster und dritter Ansicht) gesehen wird. Die zur Bildkoordinatenachse parallelen Tangenten an die s-förmige Kurve schneiden die Urbildachse in den Koordinaten r^l bzw. $-r^l$, die als Bereich des Urbildes interpretiert werden können, der aufrecht und seitenrichtig gesehen werden kann. Die ihnen entsprechenden Bildkoordinaten r_l^l bzw. $-r_l^l$ geben dann die Grenze zwischen zweiter und dritter Ansicht an und damit auch den Kreisradius der gedachten Kreislinie, an der das aufrechte und seitenrichtige Bild einmal „gespiegelt“ wird.

Die formale Beschreibung mit dem s-förmigen Verlauf der Grafen gestattet damit nicht nur die quantitative Angabe dieser die Abbildung konstituierenden Elemente (die aufgrund von Unschärfen nicht unbedingt den Fotos direkt entnommen werden können), sondern begründet auch die empirisch aufgestellten Regeln. So folgt aus dem s-förmigen Kurvenverlauf rein formal, dass im Inspektionsbild entweder nur die erste Ansicht erscheint oder alle drei Ansichten zugleich erscheinen. In letzterem Fall ist die Zuordnung nicht eindeutig und daher existiert auch keine Umkehrfunktion. Dies entspricht der Erfahrung, dass in diesen Bildbereichen eine Projektion mit anschließender Inspektion das Urbild nicht rekonstruieren kann. Diese Besonderheit der Kugelabbildung beschränkt die Anwendbarkeit der Anamorphose-Idee.

5. Diskussion

Anhand unserer Phänomenreihe zum Blick durch die Kugellinse haben wir eine formale Beschreibung für die Ansichtsverformung gefunden. Damit lässt sich die verformte Ansicht durch die Kugellinse nicht nur beschreiben, sondern auch vorhersagen. Unsere formale Beschreibung ist bisher nur grafisch; eine algebraische Behandlung steht noch aus.

Die bisherige Phänomenreihe ist freilich noch unvollständig. Es fehlen insbesondere eine systematische Variation des Abstands zwischen Kugel und Betrachter (bzw. Projektor) und eine systematische Variation der Blickrichtung (bzw. Projektionsrichtung).

Zur Beantwortung unserer Frage zur Ansichtsverformung brauchten wir keine Strahlen, Kaustik oder sonstige Werkzeuge für abgelöste Versuche. Wir konnten eingebunden mit Blick auf die Bildebene bleiben und alle relevanten Zusammenhänge zwischen ursprünglichem und verformtem Bild von dort aus erfassen.

Nichtsdestotrotz ist ein Bezug zur Kaustik [6] und zum Strahlenmodell möglich und bereichernd. Ordnet man die projizierten Bilder von verschiedenen

Schirmweiten gedanklich hintereinander an, erhält man als Gesamtheit die bekannte Kaustik der Kugellinse. Im Umkehrschluss stellen die projizierten Bilder Querschnitte durch diese Kaustik dar. Dreht man den Projektionsschirm so, dass er nicht mehr quer zur optischen Achse steht, sondern entlang der optischen Achse liegt, so erhält man den bekannten Längsschnitt durch die Kaustik. Die streifend projizierten Rasterlinien veranschaulichen dann die Strahlengeometrie.

Die Stärke dieses Ansatzes liegt nicht nur in der Vermeidung eines strahlenbasierten Zugangs, sondern auch in der Wahl eines aus den empirischen Befunden abgeleiteten Koordinatensystems. Anstatt kartesischer Koordinaten zur Beschreibung des Urbildes und des Inspektionsbildes haben wir Polarkoordinaten gewählt. Es ist zu erwarten, dass sich dadurch auch das Gleichungssystem für die Bildkurve [6] einfacher lösen lässt.

Ein Verständnis der Kugellinse ist bedeutsam, da reale Linsen nicht dem Ideal einer dünnen Linse entsprechen. Bei einer idealen Linse würde man anstelle der s-förmigen Grafen aus Abbildung 21 geradlinige Grafen erwarten. Reale Linsen sind eine Zwischenform zwischen der extrem dünnen (idealen) Linse und der extrem dicken Linse (Kugellinse), so dass man hierfür leicht gekrümmte Grafen zeichnen müsste.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von alltäglichen und experimentellen Beobachtungen haben wir empirische Regeln zur Ansichtsverformung durch eine Kugellinse formuliert. Um den Zugang zu erleichtern, haben wir das Prinzip einer Anamorphose auf die Kugellinse übertragen und hierfür das Auge zwischenzeitlich durch einen Projektor ersetzt. Durch einen Vergleich zwischen der unmittelbaren und der verformten Ansicht haben wir eine halbquantitative Beschreibung der scheinbaren Verformung in Abhängigkeit von der Gegenstandsweite gefunden, selbst ohne Strahlenoptik. Um jedoch zu einer umfassenderen und genaueren Beschreibung zu gelangen, sind die bildbasierten Untersuchungen fortzusetzen.

7. Literatur

- [1] Kepler, J. (2000): *Optics. Paralipomena to Witelo and the Optical Part of Astronomy* (William H. Donahue, Übers.). Santa Fe: Green Lion Press.
- [2] Beißwenger, J. (2006): Linsenphänomene des Alltags. Oder: Das Phänomen der drei Bilder im Glas. In: H. Grötzebauch, V. Nordmeier (Hrsg.), *Didaktik der Physik-Kassel*.
- [3] Schlichting, H.-J. (2009): Gekrümmte Ansichten. In: *Physik in unserer Zeit* 40(6), 314. URL: <https://online-library.wiley.com/doi/full/10.1002/piuz.200990113> (Stand 9/2018)

- [4] Backhaus, Udo & Braun, T. (2007): Der Blick ins Wasserglas. Ein Anlass zu Offenem Experimentieren. In: H. Grötzebach, V. Nordmeier (Hrsg.), *Didaktik der Physik–Regensburg*.
- [5] Pernter, J. M. & Exner, F. M. (1910): *Meteorologische Optik*. Wien, Leipzig: Braumüller.
- [6] Quick, Thomas (2015): *Phänomenologie der optischen Hebung*. Berlin: Logos.
- [7] Müller, M. (2017): *Grammatik der Natur. Von Wittgenstein Naturphänomene verstehen lernen*. Berlin: Logos. URL: <https://zenodo.org/record/343889/files/978-3-8325-4424-9.pdf> (Stand 6/2018)
- [8] Müller, M. & Grebe-Ellis, J. (2007): Spiegelbilder der Sonne im Tropfen – Zur Phänomenologie des Regenbogens. In: H. Grötzebach, V. Nordmeier (Hrsg.), *Didaktik der Physik–Regensburg*.
- [9] Müller, M. (2006): *Zur Phänomenologie des Regenbogens* (Examensarbeit). Humboldt-Universität zu Berlin.
- [10] Füsslin, G. & Hentze, E. (1999): *Anamorphosen. Geheime Bilderwelten*. Stuttgart: Füsslin.
- [11] Hunt, J. L., Nickel, B. G. & Gigault, C. (2000): Anamorphic images. *Am. J. Phys.* 68(3), 232-237. URL: <https://doi.org/10.1119/1.19406> (Stand 6/2018)
- [12] Eser, T. (2001): Augsburger Anamorphosen des 18. Jahrhunderts. In: J. R. Paas (Hrsg.), *Augsburg, die Bilderfabrik Europas: Essays zur Augsburger Druckgraphik der Frühen Neuzeit* (S. 173-188). Augsburg: Wißner.
- [13] Heeke, M. (2003): *Anamorphosen und Luftspiegelungen aus dem Blickwinkel des Physikunterrichts* (Schriftliche Hausarbeit im Rahmen der Ersten Staatsprüfung für das Lehramt für die Sekundarstufe I und II). Staatliches Prüfungsamt für Lehrämter an Schulen, Münster. URL: <http://didaktik.physik.fu-berlin.de/~nordmei/PhysikKunstMusik/Software/Anamorphosen.pdf> (Stand 6/2018)
- [14] Mackensen, M. v. & Ohlendorf, H. C. (1998): *Modellfreie Optik*. Kassel: Pädagogische Forschungsstelle.

Danksagung

Dr. Steffen Danzenbächer trug zur Erkundung der Ansichtsverzerrungen bei, indem er strahlenbasierte Simulationen mit *POV-Ray* anfertigte und eine Analyse der Blickwinkel vorschlug.

Interaktive Bildschirmexperimente als Systemkomponente der webbasierten Lernplattform tet.folio

Sebastian Haase, Marcus Pfaff, Dorothee Ermel, Jürgen Kirstein, Volkhard Nordmeier

Freie Universität Berlin, Didaktik der Physik

sebastian.haase@fu-berlin.de, juergen.kirstein@fu-berlin.de, volkhard.nordmeier@fu-Berlin.de

Kurzfassung

Interaktive Bildschirmexperimente (IBE) früherer Generationen waren in der Regel in sich abgeschlossene digitale Medienelemente, zum Beispiel im technischen Format sogenannter Flash-Movies. Diese Medienelemente ließen sich u.a. in digitale Lehr-Lernmaterialien einbetten, konnten dabei allerdings nicht mit anderen digitalen Medienelementen oder etwa auch der Umwelt interagieren. Dies wurde erst mit der vollständigen Integration des IBE-Formats in die webbasierte Lernplattform „tet.folio“ möglich. Beispielsweise ist nun der Ablauf eines IBE durch zeitbasierte Medienelemente steuerbar. IBE können über externe Sensoren als Systemkomponenten Messdaten synchron darstellen, über Aktoren aktiv in reale Prozesse eingreifen oder lassen sich sogar über Sprache steuern. Das damit verbundene didaktische Potenzial für digital angereicherte, adaptive Lernumgebungen mit IBE wird an Beispielen diskutiert.

1. Motivation und Hintergrund

Nachdem Interaktive Bildschirm Experimente (IBE) bisher zur individuellen Durchführung als Ergänzung oder Ersatz von Realexperimenten, besonders auch zur Vor- und Nachbereitung von Laborpraktika eingesetzt wurden und werden [1,2], haben sich durch das Projekt „Erfahrungsbasiertes Lernen durch interaktives Experimentieren in erweiterten Realumgebungen“ (ELIXIER) neue Möglichkeiten für den realitätsnahen, interaktiven und kontextbasierten Wissenserwerb in der Aus- und Weiterbildung eröffnet [3]. Im Zentrum dieses Vorhabens stehen didaktisch-technologische Innovationen für das Lernen und Lehren in realen und realitätsnahen (IBE) Laborumgebungen. Beim Aufbau und der Durchführung von Versuchen erhalten Studierende wie auch Lehrpersonal eine kontextbasierte, tutorielle Assistenz. Eine webbasierte Infrastrukturlösung ermöglicht die nahtlose Vernetzung von Laborexperimenten mit virtuellen Komponenten der Lernumgebung („Seamless Learning“) und deren vom Endgerät unabhängige Nutzbarkeit. Auf diese Weise können Wissen und Fertigkeiten aus Laborpraktika jederzeit und an jedem Ort abgerufen werden, wenn sie in der Praxis benötigt werden. In einem Erfahrungsportfolio können interaktive Versionen selbst durchgeführter Experimente außerhalb der Laborumgebung als „individuelles“ IBE abgerufen werden.

Wir haben an verschiedenen Beispielen dieses didaktisch-technologischen Konzepts über die Lernplatt-

form tet.folio [4,5,6] demonstrieren können. Elemente der tutoriellen Assistenz sind neben den rein virtuellen Angeboten eines „Experimentierzyklus“ aus den Phasen Orientierung, Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung insbesondere auch die multimodale Darstellung von Elementen der adaptiven Lernprozessbegleitung während der Durchführungsphase mit dem Realexperiment. Hier werden beispielsweise Hinweise zum Aufbau und zur Durchführung des Experiments direkt am Versuchsplatz durch Aufprojektion gegeben (Augmentierung). Sprachaus- und -eingabe sind weitere Elemente der Experimentierumgebung.

Im Weiteren werden die im Experiment durchgeführten Aktionen sowie die individuellen Messergebnisse automatisch aufgenommen und sind im Rahmen einer Nachbereitungsphase abrufbar. Die Reproduktion der Messdaten und des Versuchsablaufs erfolgt hierbei über ein IBE. In Vorarbeiten wurde dieser Ansatz bereits demonstriert [7].

2. Erweiterung des IBE-Konzepts

Damit ein IBE technisch in der Lage ist, aufgezeichnete Messwerte zeitgesteuert zu reproduzieren, wurden im Projekt ELIXIER die bisher etablierten Herstellungskonzepte [6] weiterentwickelt. Dabei wird das IBE nicht mehr als monolithische Einheit, sondern als System von zum Teil unabhängigen Komponenten aufgefasst.

V21-1 Strahlenarten mit Info

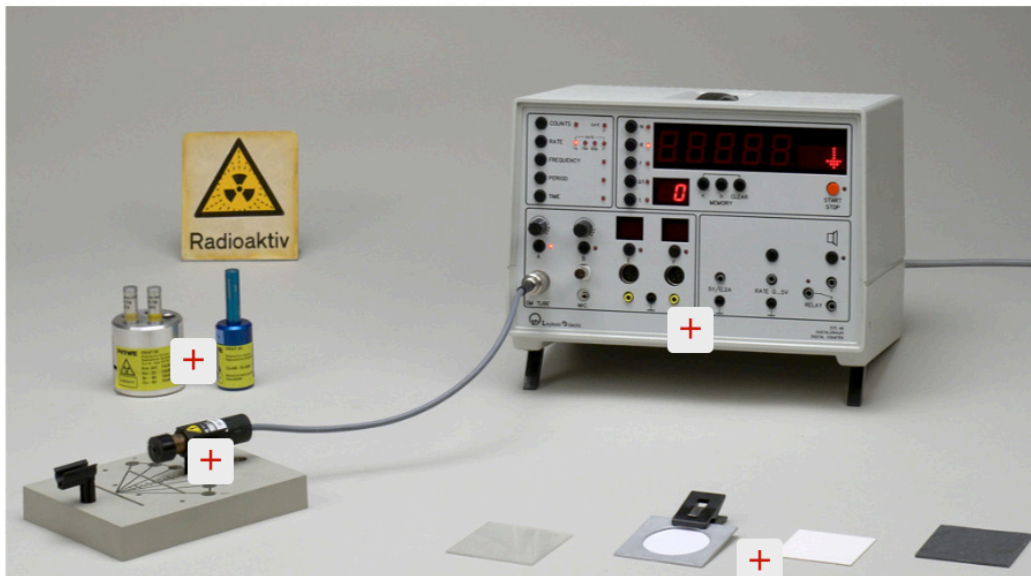


Abb. 1: Das Geiger-Müller-Zählrohr (links) ist an den digitalen Zähler angeschlossen. Das Frontpanel des Zählers wurde weitestgehend mit den verschiedenen Funktions-Modi des realen Geräts als IBE umgesetzt. Die Experimentieraufgabe besteht darin, drei verschiedene Strahler mit unterschiedlichen Absorbern (Plexiglas, Papier, Pappe und Blei) zu kombinieren und die Zählraten zu bestimmen. Über die hier dargestellten Buttons lassen sich wahlweise Zusatzinformationen einblenden. Sie sind kein Bestandteil des eigentlichen IBE.

Erstmalig wurde das Konzept modularisierter IBE am Beispiel eines Experiments zur Unterscheidung radioaktiver Strahlungsarten demonstriert (Abb. 1). Ein Geiger-Müller-Zählrohr ist hier zum Nachweis der Strahlung an einen digitalen Zähler angeschlossen. Im IBE stehen für die Untersuchung drei verschiedene Strahlungsquellen und vier Absorber (Papier, Pappe, Plexiglas und Blei) zur Verfügung, die beliebig kombinierbar sind.

Zur Bedienung des Digital-Zählers wurden die verschiedenen Funktions-Modi des realen Geräts im IBE weitestgehend umgesetzt. Die Anzeige der Impulsanzahl oder wahlweise der Impulsrate erfolgt digital. Alle diese Ein- oder Ausgabeobjekte des IBE wurden als diskrete „tet.boxes“ über dem Hintergrundfoto in tet.folio platziert (Abb. 2), wobei die Bedienung des Zählers hier nur in der Detailansicht realisiert wurde. Die Umsetzung erfolgt in Form von

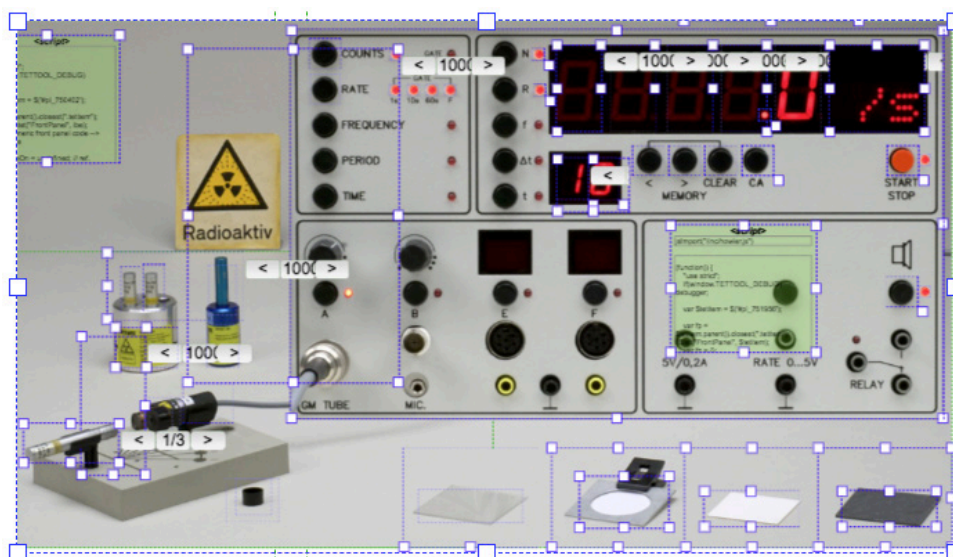


Abb. 2: Der neue IBE Ansatz realisiert IBE nicht mehr als monolithische Einheit, sondern vielmehr als aus zum Teil unabhängigen Modulen. Diese werden in tet.folio als tet.boxes realisiert. Im Layout-Modus sind sie jeweils einzeln blau gestrichelt umrandet.

```

242     var lambda;
243     function setLambda(l) {
244         lambda = l;
245         clearTimeout(ticksTimer);
246         ticksTimer=null;
247         //note: ticksCount should be untouched when changing probe
248         //ticksCount=undefined;
249         if(l>0) tick();
250         //note: ticksTimer is "always" running ... --- as long as lambda > 0
251     //     $(".header_navigation_center").html(String(Int(l,2)).replace(".", ""))
252     }
253
254     function drawNormal(mu, sigma, nsamples){
255         if(!nsamples) nsamples = 6
256         if(!sigma) sigma = 1
257         if(!mu) mu=0
258
259         var run_total = 0
260         for(var i=0 ; i<nsamples ; i++){
261             run_total += Math.random()
262         }
263
264         return sigma*(run_total - nsamples/2)/(nsamples/2) + mu
265     }
266     function drawPoisson(mean) {
267         if(mean>30) return drawNormal(mean, Math.sqrt(mean)); // seb: mean > 700 results in Math.exp(-mean)===0
268         // https://stackoverflow.com/questions/1241555/algorithm-to-generate-poisson-and-binomial-random-numbers
    
```

Abb. 3: Eine „Logik-box“ enthält komplexe Abhängigkeiten, wie z.B. die Berechnung der radioaktiven Zufallsereignisse nach Normal- und Poisson-Verteilung.

Bildsequenzen, die in „Diashows“ der einzelnen Objekte einer Experimentanordnung importiert werden. Im Beispiel sind dies alles Objekte, mit denen der Nutzer Interaktionen ausführen kann oder z.B. auch die Digits des Displays, über die im IBE auf Messdaten bezogene Ausgaben erfolgen. Zeigt eine Diashow zum Beispiel die zwei Stellungen eines Schalters, löst ein Klick auf dieses Objekt den Wechsel zwischen beiden Bildern aus und erzeugt so den Eindruck der Bedienbarkeit des Schalters. Weitere einfache Interaktionen mit Diashow-Objekten lassen sich in den Objekteigenschaften als „Hyperlink“ erzeugen. Zur Gestaltung von Handlungsangeboten kann dabei auf eine Vielzahl von Kommandos zurückgegriffen werden, dazu gehören u.a.:

- tet:
- dia:
- presi:
- say:
- play:
- show:
- hide:
- toggle:
- move:
- rotate:

Hinter dem Doppelpunkt sind Parameter wie zum Beispiel die Nummer einer Seite (tet.page), der Titel einer Diashow, ein zu sprechender Text („say“ erzeugt aus einem beliebigen Text eine synthetische Sprachausgabe) oder für animierte Objekte im IBE ein Winkel („rotate“) oder die Zielposition für ein linear bewegtes Objekt („move“) einzutragen.

Das Konzept der Modularisierung erlaubt damit eine flexible, adaptive Gestaltung des IBE als Komponente einer Lernumgebung, die neben rein virtuellen Angeboten auch Handlungen mit realen Objekten

umfassen kann, die wiederum auf den digitalen Teil der Lernumgebung zurückwirken können. Im Projekt ELIXIER konnten wir mit diesem Ansatz demonstrieren, wie sich reale Erfahrung im Experiment mit der Möglichkeit der virtuellen Reproduzierbarkeit über ein personalisiertes IBE verbinden lässt. Damit bleibt das IBE nicht mehr länger ein „vorproduziertes“ virtuelles Experiment, das jedem Lernenden im Extremfall immer wieder dieselben Daten präsentiert, sondern wird zum Wissensbaustein individueller Erfahrung. Die Vision für künftige Entwicklungsschritte ist ein IBE, das neben den individuellen Messdaten auch den Aufbau des eigenen Experiments darstellt. Dazu erfassen Sensoren die Art und Position der Experimentiergeräte in einem realen (modularisierten) Aufbau. Diese Daten dienen dann zur Konfiguration des individuellen IBE.

Falls die einfachen „Hyperlink“-gesteuerten Interaktivitäten zur Gestaltung des IBE nicht ausreichen, etwa weil die logischen Abhängigkeiten mehrerer Interaktionsobjekte zu komplex werden, kann zusätzlich weiterer Javascript-Code programmiert werden. Ein Beispiel des Logik-Skripts aus einem IBE ist in Abb. 3 dargestellt. Hier wird u.a. auf eine Open-Source Bibliothek zum Abspielen von Sound-Daten zurückgegriffen („howler.js“). Das sind relevante Original-Töne, die während der Durchführung des realen Experiments erfasst werden oder auch synthetisch generierte Tonereignisse wie der „Klick“ beim Zählereignis im Radioaktivitätsexperiment. Die Komponente Audio ist dabei Bestandteil der Oberfläche multimodaler IBE und bietet weitergehende Gestaltungsmöglichkeiten experimentierbezogener Lernaufgaben.

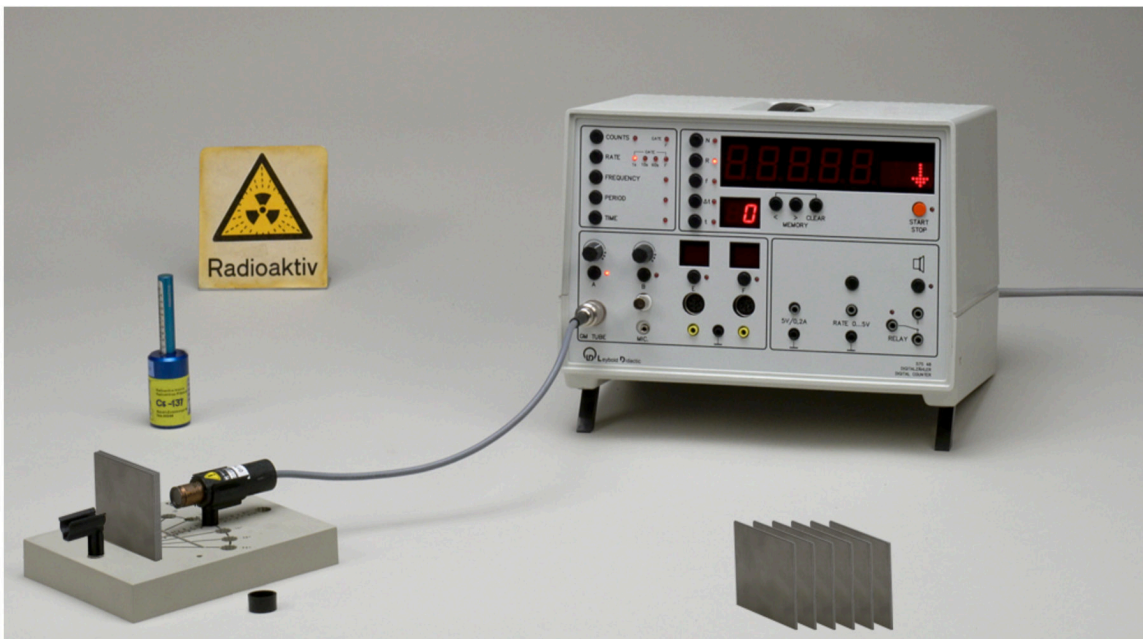


Abb. 4: IBE zur Lernaufgabe „Absorptionsgesetz für Gamma-Strahlung“.

3. Individualisiertes Lernen mit IBE in tet.folio

Die webbasierte Plattform tet.folio stellt damit zunächst eine flexible Autorenumgebung für die Herstellung und Verteilung von IBE zur Verfügung. Abb. 4 zeigt einen zum zuvor gezeigten IBE sehr ähnlichen Aufbau. Die Lernaufgabe „Absorptions-

gesetz für Gamma-Strahlung“ konnte größtenteils die gleichen Komponenten einsetzen. Das (modularisierte) IBE in tet.folio ist darüber hinaus aber auch Komponenten eines Systems real-digitaler Lernumgebungen, die mit anderen in Wechselwirkung treten können. Beispielsweise wäre es möglich,

1.

Tragt die Messwerte in die Tabelle ein.
(Bitte als Trennzeichen "." verwenden)

	d in mm	R in 1/s
1	0	4.1
2	2	3.3
3	4	2.6
4	6	2.0
5	8	1.6
6	10	1.3
7	12	1.0
8	14	0.8
9	16	0.7
10	18	0.5

Graph

2.

Bestimmt die Halbwertsdicke *hwd* durch Anpassen des Funktionsgraphen.
(*R₀*: Rate ohne Absorber, *R_{bkg}*: Nullrate)

$$y = (R_0 - R_{bkg}) * \exp(-\log(2) * x / hwd) + R_{bkg}$$

R₀ = 4.207 3.7 5
R_{bkg} = 0.1 0.1 1
hwd = 5.6 0 10

Abb. 5: Zugehörige Tabelle zur Auswertung einer Messung mit dem IBE zum Absorptionsgesetz.

über die Ergebnisse der Bearbeitung einer Lernaufgabe die Darstellung eines Experiments im IBE dem Lernniveau anzupassen (Gestaltung der Oberfläche und der Handlungsmöglichkeiten). Abb. 5 zeigt eine Variante, in der die Halbwertsdicke durch Anpassen einer vorgegebenen mathematischen Modellfunktion bestimmt werden soll. Auch umgekehrt können Handlungen mit dem IBE etwa den Umfang oder die Qualität von ergänzenden Lernangeboten (Aufgaben, Informationstexte oder den Grad der Elaboration von Anleitungen und Hilfen) verändern.

Nicht zuletzt bietet die Integration von IBE in den „Experimentierzyklus“ neue didaktisch-methodische Gestaltungsmöglichkeiten:

- In die Orientierungsphase integrierte Assessment-Komponenten mit IBE erlauben eine experimentbezogene, handlungsorientierte Diagnose der Lernausgangslage.
- Der Aufbau des Experiments kann in der Phase der Vorbereitung bereits virtuell erfolgen – mit modularisierten IBE auch interaktiv. Damit wird die (hypothesegeleitete) Planung eines Experiments bereits sehr nahe an der Anwendungssituation und ohne jedes Risiko (Gefahren, Fehlbedienung) ermöglicht.
- Die Durchführung des realen Experiments generiert Messdaten und Metadaten (Position und Art der verwendeten Geräte), mit denen im Hintergrund ein personalisiertes IBE in tet.folio erzeugt wird.
- Dieses IBE steht dann im Rahmen der Auswertung für die Reflexion des individuellen Lernprozesses mit dem Experiment zur Verfügung. Möglich dabei ist einmal der „Replay“-Modus, eine zeitbasierte Repräsentation des Experimentablaufs, oder auch die interaktive Darstellung als IBE. Für den Fall eines missglückten Experiments besteht damit auch die Möglichkeit des virtuellen Nachvollzugs eines idealtypischen Experiments.

4. Literatur

- [1] Kirstein, J. & Nordmeier, V. (2007): Multimedia representation of experiments in physics. In: IOP, Eur. J. Phys. 28, 115-126.
- [2] Kirstein, J., Nordmeier, V. (2014): tet.folio: Physik lehren und lernen mit einem digitalen Portfolio. In: Praxis der Naturwissenschaften PHYSIK in der Schule 63 (3 / 63), S. 19–27.
- [3] Ermel D., Kirstein, J. Haase, S., Nordmeier, V. (2016): ELIXIER: Didaktische Konzeption einer kompetenzorientierten Mixed-Reality-Experimentierumgebung. In Phyd B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung 2016, Berlin.
- [4] Kirstein, J. & Nordmeier, V. (2011). Technology Enhanced Textbook - Ein fachdidaktisches Forschungsprojekt. In V. Nordmeier; H. Grötzebach (Hrsg.), Phyd B –Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung 2011, Berlin.
<http://www.phyd.de/index.php/phydid-b/article/viewArticle/312>.
- [5] Neuhaus, W., Kirstein, J. & Nordmeier, V. (2013): Technology Enhanced Textbook - Provoking active ways of learning. In: PLE 2013 Conference proceedings. Aveiro: University of Aveiro.
- [6] Haase, S., Kirstein, J., Nordmeier, V. (2016): tet.folio: Neue Ansätze zur digitalen Unterstützung individualisierten Lernens. In Phyd B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung 2016, Berlin.
- [7] Gutzler, T., Kastl, R., Nordmeier, V. (2013): Entwicklung eines Low-Cost-USB-Datenloggers zur Nachbereitung naturwissenschaftlicher Praktika. . In Phyd B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung 2013, Berlin.

Alles Reibung oder was?

- Welchen Effekt oft genannte Einflüsse tatsächlich auf Messergebnisse haben -

Christoph Holz*, **Susanne Heinicke***

*WWU Münster, Institut für Didaktik der Physik, Wilhelm-Klemm-Straße 10, 48149 Münster
christoph.holz@uni-muenster.de, susanne.heinicke@uni-muenster.de

Kurzfassung

Eine typische Situation aus dem Physikunterricht: Die Ergebnisse einer Experimentierphase werden an die Tafel geschrieben und weichen deutlich von den theoretischen Erwartungen ab. Die Erklärung der Diskrepanz erfolgt mit den üblichen Verdächtigen: Reibung, Reaktionszeit, Luftfeuchtigkeit, ungenaue Messgeräte ... aber wie groß ist der Einfluss solcher Größen auf das Ergebnis tatsächlich? Wir halten ein adäquates Verständnis von physikalischen Messwerten, deren (Un-)Genauigkeit und Aussagekraft für die Ausbildung werdender Physiklehrkräfte für grundlegend wichtig. Insbesondere wird dies für ein sinnvolles Einbringen und Vorleben von Fehlerkultur und dem fachlich angemessenen Umgang mit Messunsicherheiten im Unterricht benötigt.

Die dazu konzipierte Lernumgebung beinhaltet daher im Wesentlichen drei Aspekte:

- Die Berücksichtigung der Vorstellungen der Studierenden
- Eine moderne fachliche Modellierung von Messwerten durch Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen, wie durch den ISO-Standard GUM vorgeschlagen
- Zwei hierzu erstellte Apps, die es ermöglichen
 - a) Messdaten nach GUM zu verrechnen und darzustellen und
 - b) die auf ein konkretes Experiment einflussnehmenden Faktoren zu variieren und deren Auswirkungen zu beobachten.

Im Rahmen des Vortrages wurden insbesondere die letzteren Applikationen vorgestellt.

1. Einleitung

„Bestimmen Sie den Ortsfaktor g experimentell.“ Eine Arbeitsanweisung, wie sie beispielsweise in einer Einführungsveranstaltung zu einem Grundpraktikum gegeben werden kann. Diese Aufgabe allein genügt in der Regel um – nach Zusammenführung der Ergebnisse verschiedener Teams – eine hitzige Debatte über die Aussagekraft und Qualität von empirisch gewonnenen Daten auszulösen. Sei es auf Grund von Verwunderung über stark abweichende Ergebnisse oder auf Grund von Unglaubwürdigkeit über die Ehrlichkeit der Gruppe, die ein Ergebnis minimaler Abweichung vom Literaturwert zu berichten hat. In unserer Studie verwenden wir hierzu ein einfaches Fallexperiment. Dieses kann mit einfachen Mitteln (Stoppuhr, Maßband und Tennisball) durchgeführt werden, birgt aber auch viele Unsicherheitsquellen in sich. Auch auf schulische Physikexperimente ist eine solche Situation leicht übertragbar: Die Lehrkraft benötigt hier das notwendige Wissen über und Verständnis vom Umgang mit Messdaten, um die Situation fachgerecht, aber auch für die Schülerinnen und Schüler zufriedenstellend anzuleiten.

Wo haben die Studierenden die Möglichkeit den Umgang mit empirischen Daten zu lernen? Meist findet dies in Formaten wie einem Grundpraktikum statt.

Ein näherer Blick in die Forschung rund um das Verständnis von Messdaten – häufig verbunden mit der Beforschung solcher Praktika – zeigt jedoch ein recht unzufriedenstellendes Bild: Sêrê et al. forderten bereits 1993: „*We must avoid what would be only calculating routines in favour of what promotes understanding*“ ([1], S. 438). Eine Erkenntnis die in vielen weiteren Studien erneut aufzufinden: Die mathematischen Routinen werden auswendig gelernt und abgespult, aber das Verstehen scheint oftmals auszubleiben [2], [3], [4]. Dies macht sich in verschiedenen Facetten wie bspw. Begriffsverwechslungen [1], [5], [3], beim Vergleich von Argumentationen über experimentelle Handlungen mit Argumentationen während der tatsächlichen Handlungen [6] oder geführten Diskussionen an Praktikumstagen sowie in Protokollen bemerkbar.

Für eine Vermittlung des Umgangs mit Messdaten sollten Methodik und Rechenroutinen selbstverständlich nicht außer Acht gelassen werden, vielmehr fordern wir sowohl die Vermittlung der Methodik, als auch die Vermittlung tieferen Verständnisses über letztere. (Warum werden spezielle Methoden eingesetzt? Wann ist der Einsatz sinnvoll? ...) Bei der Gestaltung einer Lernumgebung für Studierende, die

auch den Aspekt des tieferen Verständnisses zu fördern sucht, stößt man unter anderem auf zwei große Probleme. Der Vortrag stellt für beide Problemstellen jeweils eine mögliche Lösung, sowie eine Applikation, die die Umsetzung erleichtert, vor:

1. Die klassische Fehlerrechnung erscheint vielen Studierenden oft wenig zugänglich.

Die klassische Fehlerrechnung beinhaltet viele Faustregeln und Blackboxes, die teilweise sogar mathematisch nicht adäquat sind. Die Darstellung der Unsicherheit von Einzelmessungen verbirgt beispielsweise deren zufallsbehafteten Charakter und findet nicht mathematisch parallel zur Darstellung statistischer Größen statt.

Eine Lösung bietet die Unsicherheitsbetrachtung nach dem internationalen *Guide to the expression of Uncertainty in Measurement* (GUM). Mit Hilfe der vorgestellten Applikation können Messunsicherheiten nach diesem ISO-Standard (ISO 98-3:2008, [7]) berechnet werden. Des Weiteren kann die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (im Folgenden WDF) der Ergebnisgröße betrachtet werden, was tieferes Verständnis fördern kann.

2. Die Verbindung von Ursache und Wirkung verschiedener Einflussgrößen wird nicht (konkret) thematisiert.

Woher kommt eigentlich das, was wir „Messfehler“ nennen? Bei unserer Befragung von Studierenden zu Studienbeginn und bei Durchsicht von Protokollen werden vor allem die folgenden genannt: Reibung, Luftzug im Labor, Reaktionszeit, Luftwiderstand, Luftfeuchtigkeit. Welche der Größen beeinflusst denn nun mein Ergebnis und vor allem inwiefern tut sie das? Diese Verbindungen werden häufig nicht explizit betrachtet, sondern von theoretischer Perspektive aus als gegeben vorausgesetzt. Um ein tiefes Verständnis zu vermitteln scheint dies aber nicht auszureichen. Eine Lösung kann die systematische Betrachtung möglicher Einflussgrößen eines konkreten Experiments bieten.

Die vorgestellte Applikation ermöglicht eben diese systematische Auseinandersetzung: Ein konkretes Experiment (g -Bestimmung beim freien Fall) wird realitätsnah simuliert und die einzelnen Einflussfaktoren können systematisch variiert werden.

Beide Applikationen und deren Anwendung beziehen sich auf die Anwendung des internationalen Leitfadens GUM, daher wird dieser im folgenden Abschnitt näher beschrieben und erläutert, bevor auf die spezifischen Applikationen eingegangen wird.

2. Messunsicherheitsbetrachtung nach GUM

Bei dem *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM) handelt sich um einen festgelegten Standard bezüglich des Umgangs mit Messdaten und deren Unsicherheiten, der eine fachlich moderne Modellierung von Messunsicherheit ermöglicht. In Reaktion auf zunehmende Kritik an der herkömmlichen Fehlerrechnung und deren Schwächen in Wissenschaft und Wirtschaft wurde ein internationales Komitee, das *Joint Committee for Guides in Metrology* (JCGM) seitens des *internationalen Büros für Maß und Gewicht* (BIPM) gegründet, um diesen Leitfaden zu entwickeln. Unter anderem trug dazu von deutscher Seite auch die *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB) bei [7], [8]. Trotz internationalem Standard ist die Unsicherheitsbetrachtung nach GUM in vielen Lehrwerken und damit auch Universitäten noch nicht angekommen [4] [9].

Verbesserungen, die von GUM vorgeschlagen werden betreffen hauptsächlich, aber nicht ausschließlich...

- die Schaffung klarer Begrifflichkeiten (bspw. Abweichung und Unsicherheit),
- eine höhere Anschaulichkeit verwendeter Modellierungen und
- das Ausbessern von Schwachstellen des traditionellen Ansatzes der Fehlerrechnung.

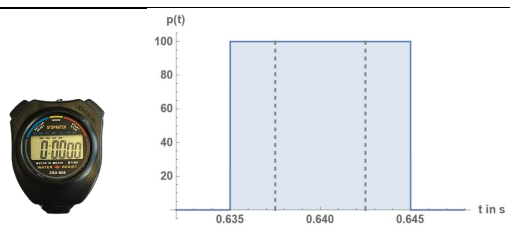
Bezüglich des letzten Punktes ist insbesondere die Verrechnung von statistischen mit nicht-statistischen Einflussgrößen zu nennen. Diese Unterteilung definiert bereits die Aufteilung, die GUM für Einflussgrößen vorschlägt:

Typ A: Solche Größen, die statistischer Natur sind und hinreichend durch die Normalverteilung modelliert werden können.

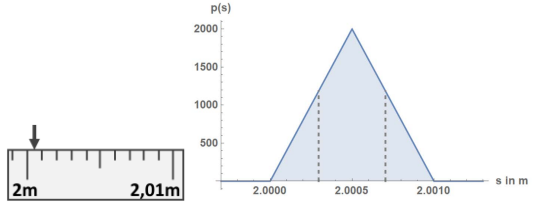
Typ B: Größen, bei denen dies nicht der Fall ist (beispielsweise Einzelmessungen, Geräteungenauigkeiten, usw.).

In der herkömmlichen Fehlerrechnung werden diese beiden Typen nicht analog modelliert: Im Falle von Typ A wird eine WDF in Form einer Normalverteilung mit einem festgelegten Vertrauensintervall betrachtet, das einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von z.B. 68% oder 95% beschreibt. Im Fall von Typ B werden („herkömmlich“) schlichte Intervalle betrachtet ohne weitere Informationen über die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messwerte innerhalb des Intervalls einfließen zu lassen. Es kann daher bspw. kein Vertrauensintervall für Typ B gebildet werden.

Die Neuerung von GUM ist nun folgende: Auch Typ B wird in Form von WDFs, wie zum Beispiel Rechteck- oder Dreieckfunktionen modelliert (s. Bsp. 1 und 2 für beispielhafte Darstellung der Anzeigeunsicherheiten – die Unsicherheit durch die begrenzte Auflösung der Skala der Anzeige - des Eingangsbeispiels). Es wird also nicht nur das Intervall der Einflussgröße, sondern auch (auf der y-Achse aufgetragen) die jeweilige Wahrscheinlichkeit der Werte innerhalb des Intervalls betrachtet. Somit werden mehr Informationen der Einflussgröße in die Berechnung mit einbezogen und es resultiert eine mathematisch analoge Beschreibung zu Typ A. Es können nun ebenso Vertrauensintervalle gebildet werden und das Vertrauensniveau der Ergebnisgröße ist nach Verrechnung bekannt. Eine große Problemstelle dieses Ansatzes liegt darin, dass nach der Betrachtung aller Eingangsgrößen in Form von WDFs, die Berechnung und damit Angabe der Ergebnisgröße wiederum in Form eines Intervalls erfolgt. Dies ist zweckmäßig, da eine Berechnung der Ergebnis-WDF mathematisch sehr kompliziert wird (eine Faltung der jeweiligen Funktionen unter Berücksichtigung des jeweiligen physikalischen Zusammenhangs wäre erforderlich). Jedoch gehen viele der Informationen, die in die Eingangsgröße einbezogen wurden durch diese Reduktion verloren. Ein konkretes Beispiel hierzu wird weiter unten genannt.

Art der Anzeige: Digital
Intervall: 0,635 s bis (ausschließend) 0,645 s

Erklärung: Die Stoppuhr hat eine Digitalanzeige, Sekunden können daher bis auf zwei Nachkommastellen angegeben werden. Ein angegebener Wert von bspw. 0,64 s beschreibt also ein Intervall von 0,635s bis ausschließend 0,645s. Die Wahrscheinlichkeit, der einzelnen Werte in diesem Intervall ist in jedem Fall gleich: Die Einflussgröße kann daher sinnvoll durch eine Rechteckverteilung beschrieben werden.
WDF: Rechteckfunktion mit Breite $a = 0,01s$
Vertrauensintervall: $u = \frac{a}{2\sqrt{3}}$

Bsp. 1: Anzeigeunsicherheit der Stoppuhr

Art der Anzeige: Analog
Intervall: 2,000 m bis 2,001 m

Erklärung: Hier kann mehr über die Verteilung der Werte im Intervall ausgesagt werden. Die Randwerte sind unwahrscheinlicher als die mittig liegenden. Eine Modellierung kann dementsprechend durch eine Dreiecksfunktion erfolgen (auch andere Funktionen wie eine Trapezfunktion sind denkbar).
WDF: Dreieckfunktion mit Breite $a = 1mm$
Vertrauensintervall: $u = \frac{a}{2\sqrt{6}}$

Bsp. 2: Anzeigeunsicherheit des Maßbandes

3. Zur ersten Applikation

Die von uns entwickelte App hingegen bezieht alle Informationen der Eingangs-WDFs mit ein. Die Webapp erlaubt die Eingabe der Eingangsgrößen des Typs B durch WDFs, sowie Mehrfachmessungen nach Typ A, berechnet die Unsicherheitsanalyse nach GUM und bestimmt in einem letzten Schritt die WDF der Ergebnisgröße mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation (s. Abbildung 1 für Beispiel der Benutzeroberfläche). Somit wird nicht nur die Berechnung der resultierenden Messunsicherheit nach GUM erleichtert, es werden zusätzlich die bei der Reduktion auf Intervalle verlorenen Informationen sichtbar gemacht. Die folgende Beispielanalyse des Eingangsbeispiels demonstriert diesen Sachverhalt.

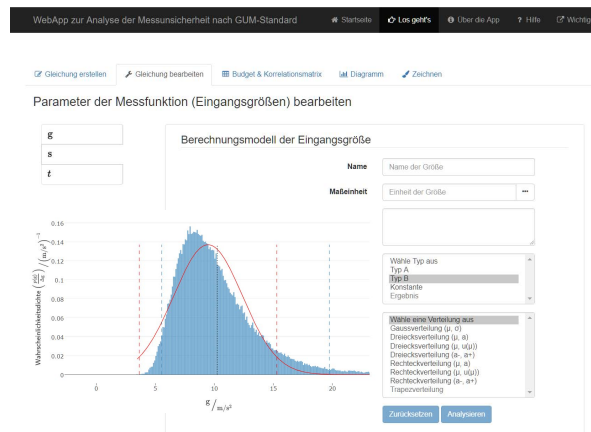


Abb. 1: Beispielhafte Darstellung der Benutzeroberfläche der ersten Applikation

4. Eine Beispielanalyse

Als Beispiel wird dieser Vorgang nun anhand des Eingangsexperimentes durchgeführt. Der Einfachheit halber werden dabei nur zwei Einflüsse bedacht: Die Anzeigeunsicherheit des Maßbandes (Dreieckverteilung wie in Bsp. 2) und die Reaktionszeit (approximiert durch eine Normalverteilung mit konservativ geschätzter Breite von $\sigma = 0,1s$). Werden beide WDFs in die Webapp eingetragen, so ergibt sich die in Abbildung 2 gezeigte Ergebnis-WDF.

Die Betrachtung dieses Beispiel zeigt bereits sehr deutlich, inwiefern die Betrachtung der Ergebnis-WDF mehr Informationen erschließt als die reine Betrachtung der berechneten Intervalle. Bei einer reinen Betrachtung der Intervalle wäre an dieser Stelle von einem symmetrischen, normalverteilten Ergebnis ausgegangen worden (in der Abbildung rot). Unter anderem wird hier aber sichtbar, dass trotz überwiegender normalverteilter Eingangsgröße (die Längenunsicherheit spielt auf Grund der geringen Größe so gut wie keine Rolle) eine deutlich nicht-normalverteilte Ergebnisverteilung entsteht. Auch die Wirksamkeit des Mittelwertes als Bestwert des Ergebnisses kann hier somit in Frage gestellt und diskutiert werden. Es wird ein kritisches aber sinnvolles Hinterfragen der herkömmlich für gegeben angenommenen Methoden ermöglicht, das Raum für die Förderung tieferen Verständnisses schafft.

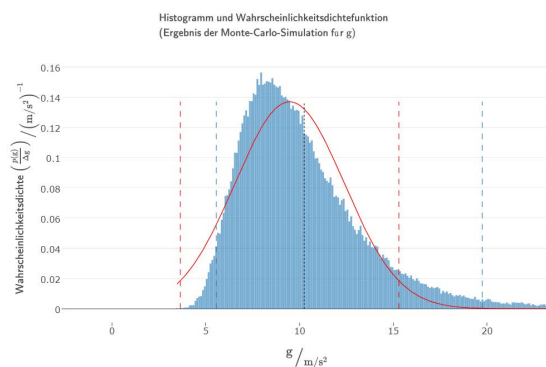


Abb. 2: Ergebnis-WDF des Ortsfaktors g (blau) mit nach Fehlerfortpflanzung bestimmter Normalverteilung (rot)

5. Vom Konkreten zum Allgemeinen

Während die Wirkung spezifischer Einflussfaktoren und gerade der statistische Charakter der Einflüsse von vielen Studierenden nicht ausreichend verstanden wird, scheint es vielen recht einfach zu fallen mögliche Einflussgrößen auf konkrete Experimente zu nennen. Ein tieferes Eingehen auf die konkrete Einflussnahme der einzelnen Faktoren bleibt aber in der Regel aus. Wir plädieren daher für eine tiefgehende, systematische Auseinandersetzung mit

exemplarischen Experimenten und dessen konkreten Einflussgrößen.

Gerade für die Lehramtsausbildung bietet sich dies an, da sich Störeinflüsse in typischen Schulexperimenten je nach Inhaltfeld oft wiederholen. Beispielsweise ziehen sich Störeinflüsse wie Reibung, Reaktionszeit, Luftwiderstand, Unsicherheit von Zeit-/ Längenmessungen und andere durch große Teile der Mechanik. Die tatsächliche Auswirkung dieser Einflüsse auf das Messergebnis abzuschätzen, fällt den Studierenden allerdings nicht leicht.

Gefordert ist also die systematische Variation zum Ziel der näheren Untersuchung einzelner Einflussfaktoren auf ein spezifisches Experiment. Dabei ergeben sich allerdings zwei große Probleme:

1. Die systematische Variation der Einflüsse kann zu sehr komplexen Aufbauten führen und sogar unmöglich sein.
2. Um die tatsächliche Auswirkung auf das Ergebnis zu finden müssen für statistische Einflüsse pro Variation sehr viele Messungen durchgeführt werden.

Dies ist somit als Realexperiment nicht denkbar, kann allerdings durch eine realitätsnahe Simulation ermöglicht werden. Hier knüpft die zweite erstellte Applikation an.

5.1. Zur zweiten Applikation

Die Applikation simuliert ein konkretes Experiment (das Eingangsexperiment) möglichst realitätsnah und ermöglicht eine direkte Ausgabe des Ergebnisses in Form einer WDF (s. Abbildung 1). Was bedeutet in diesem Fall „realitätsnah“? Der freie Fall wird reibungsbehaftet simuliert und sämtliche einstellbaren Eingangsgrößen (Anzeigeunsicherheiten, Reaktionszeit, Geräteunsicherheiten, Masse, Volumen, ...) werden durch WDFs im Programm simuliert, dass anhand dieser WDFs zu jeder erneuten Messung zufallsbasiert „misst“. Werden viele tausend Messungen (im Beispiel 10^5) auf einmal ausgeführt, so erhält man die Ergebnis-WDF (vgl. Monte-Carlo-Simulation). In Abbildung 1 ist der bereits beispielhaft diskutierte Fall eingestellt. Die einstellbaren Größen können durch den jeweiligen Slider (auf Abbildung 1 rechts) systematisch variiert werden. Ebenso können auch hier Standardunsicherheit und Normalverteilung über die Ergebnisfunktion gelegt werden.

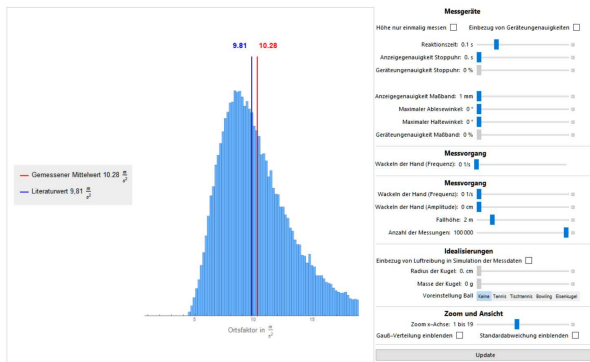


Abb. 3: Benutzeroberfläche der zweiten Applikation und ausgegebene WDF des oben beschriebenen Beispiels

5.2. Feedback der Studierenden

Diese Applikation wurde bereits von 24 Lehramtsstudierenden des Grundpraktikums der WWU Münster getestet. Dabei fiel das Feedback positiv aus, insbesondere das spielerische Ausprobieren verschiedener Einstellungen wurde dahingehend genannt. Desweiteren wurde der Wunsch nach weiteren Einstellungsmöglichkeiten geäußert (bspw. Luftzug im Raum), was der eingegangenen Befürchtung der Überforderung durch zu viele Einstellungsmöglichkeiten entgegenpricht. Es wurde in vielen Fällen angegeben, dass Einflüsse stark unter-/ überschätzt wurden, sowie dass oftmals systematische Effekte erwartet, aber die nicht bestätigt wurden.

Die Applikation bietet somit eine Möglichkeit für die tiefgehende Auseinandersetzung mit der jeweiligen Wirkung der Einflussfaktoren auf dieses konkrete Experiment. Durch Überraschungen, Erwartungsverletzungen, Extremfälle und die systematische Untersuchung werden Lerngelegenheiten und Raum für Diskussion geschaffen.

6. Zusammenfassung

Für die Förderung des tieferen Verstehens des Umgangs mit Messunsicherheit wurden zwei große Problemstellen identifiziert:

1. Die klassische Fehlerrechnung erscheint vielen Studierenden oft wenig zugänglich. Der Zusammenhang zwischen der Unsicherheit der Eingangsgrößen und der zu ermittelnden Unsicherheit des Ergebniswertes wird nicht klar.
2. Die Verbindung von Ursache und Wirkung verschiedener Einflussgrößen wird nicht (konkret) thematisiert.

Zu beiden Problemen wurde ein Lösungsvorschlag und eine dazugehörige Applikation vorgestellt, die die Umsetzung des Vorschlages vereinfacht bzw. ermöglicht.

Die erste Applikation ist dazu in der Lage Messunsicherheitsanalysen nach dem internationalen Leitfaden GUM durchzuführen und ebenso die WDF der Ergebnisgröße darzustellen. Dies ermöglicht eine anschaulichere und vollständigere Betrachtung von Messunsicherheit. Ebenso bietet diese Betrachtung weitere Verstehens- und Diskussionsanlässe wie die in der Beispielanalyse gezeigte kritische Diskussion des Mittelwertes.

Die zweite Applikation ermöglicht die systematische Variation einzelner Einflussfaktoren auf das Experiment „g-Bestimmung beim freien Fall“, indem sie es möglichst realitätsnah simuliert und die Eingangsgrößen nach WDFs zufallsbasiert einspeist. Die Größen können per Slider systematisch variiert und damit auf deren Wirkung untersucht werden. Damit wird eine systematische Untersuchung möglich, die im Realexperiment in dieser Form nicht umsetzbar ist. Es werden somit Lerngelegenheiten bzgl. der konkreten Auseinandersetzung mit den Auswirkungen spezieller Einflussfaktoren auf das Experiment geschaffen

7. Ausblick

In weiterer Planung sind die Ausbreitung der Funktionalitäten der ersten Applikation um auch die zeichnerische Eingabe beliebiger WDFs zu ermöglichen, sowie die Ausweitung der abgedeckten Themenbereiche durch die zweite Applikation, indem ein ähnliches exemplarisches Experiment für Wärme- oder Elektrizitätslehre konzipiert wird.

Beide vorgestellten Applikationen können kostenlos unter <http://physikkommunizieren.de/umgang-mit-messunsicherheit/> abgerufen werden.

8. Literatur

- [1] Séré, Marie-Geneviève; Journeaux, Roger; Larcher, Claudine (1993): Learning the statistical analysis of measurement errors. In: International Journal of Science Education 15 (4), S. 427–438.
- [2] Buffler, Andy; Allie, Saalih; Lubben, Fred (2001): The development of first year physics students' ideas about measurement in terms of point and set paradigms. In: International Journal of Science Education 23 (11), S. 1137–1156.
- [3] Heinicke, S.; Riess, F. (2009): How to cope with Gauss's errors. In: G. Cakmakci & F. Tasar (Hg.): Contemporary Science Education Research: Learning and Assessment, S. 23–32.
- [4] Heinicke, Susanne (2012): Aus Fehlern wird man klug. Eine genetisch-didaktische Rekonstruktion des "Messfehlers". Logos Verlag, Berlin
- [5] Allie, Saalih; Buffler, Andy; Campbell, Bob; Lubben, Fred (2007): First-year physics stu-

- dents' perceptions of the quality of experimental measurements. In: *International Journal of Science Education* 20 (4), S. 447–459.
- [6] Heinicke, S.; Riess, F. (2012): Missing Links in the Experimental Work. Student's Actions and Reasoning on Measurement and Uncertainty. In: L. Maurines & A. Redfors (Hg.): *ESERA 2011 Proceedings. Nature of Science, History, Philosophy, Sociology of Science, Part 5*, S.52-56
- [7] Internationale Organisation für Normung, *ISO/IEC Guide 98-3:2008 (2008): Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement*. ISO, Genf.
- [8] Deutsches Institut für Normung (1995): *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*. Beuth Verlag, Berlin.
- [9] Heinicke, Susanne; Glomski, Julia; Priemer, Burkhard; Rieß, Falk (2010): Aus Fehlern wird man klug - Über die Relevanz eines adäquaten Verständnisses von "Messfehlern" im Physikunterricht. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule* 59 (5), S. 26–33.

Dieses Projekt wird im Rahmen der gemeinsamen „Qualitätsoffensive Lehrerbildung“ von Bund und Ländern aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert.

Verallgemeinerte Matrizeninverse und Moore-Penrose-Matrizeninverse aus physikdidaktischer Sicht

Martin Erik Horn

HWR – Hochschule für Wirtschaft und Recht Berlin / Berlin School of Economics and Law
FB 1 – Wirtschaftswissenschaften, Facheinheit Quantitative Methoden
Badensche Str. 52 (Fach Nr. 63), D – 10825 Berlin
e_hornm@doz.hwr-berlin.de*

Kurzfassung

Die Geometrie verknüpft Hestenes zufolge die Algebra mit der physikalischen Welt. Dies ist die Sicht eines Physikers und Physikdidaktikers und so auch meine Sicht.

Dennoch ist klar, dass Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler anderer Fachgebiete diese Verknüpfungsbeziehung unter einem anderen Blickwinkel betrachten werden. So ist es aus wirtschaftsmathematischer Perspektive nicht nur legitim, sondern auch didaktisch gerechtfertigt, die Verknüpfungsrichtung umzudeuten und zu sagen: Die Physik verknüpft die Algebra mit der Geometrie.

Am Beispiel verallgemeinerter Matrizeninverse wird dies aufgezeigt und hinterfragt: Moore-Penrose-Matrizeninverse werden derzeit in einführenden Wirtschaftsmathematik-Lehrbüchern hauptsächlich algebraisch unter Bezug auf die vier Moore-Penrose-Bedingungen motiviert und diskutiert. Durch Rückgriff auf physikalische und physikdidaktische Argumentationsmuster der Pauli-Algebra können Moore-Penrose-Matrizeninverse jedoch geometrisch fundiert und so über die Algebra weit hinausgehend erörtert werden.

Bei dieser Sichtweise wird die Mathematik somit nicht als ein Werkzeug der Physik, sondern die Physik – oder zumindest ein originär aus der Physik stammendes Konstrukt – als ein didaktisches Werkzeug der Mathematik betrachtet.

1. Verknüpfungsbeziehungen zwischen Physik, Mathematik und anderen Disziplinen

David Hestenes zufolge verknüpft Geometrie die Algebra mit der physikalischen Welt: „The power of GA (Geometric Algebra) derives from (...) the way geometry links the algebra to the physical world“ [1, S. 107].

Diese Verknüpfungen können gänzlich unterschiedlich gedacht und interpretiert werden – bis hin zu der radikalen Sichtweise Einsteins, dass die Geometrie selbst als ein Teil der Physik angesehen werden muss: „Um derartige (...physikalische...) Aussagen liefern zu können, muss die Geometrie dadurch ihres logisch-formalen Charakters entkleidet werden, dass den leeren Begriffsschemen der axiomatischen Geometrie erlebbare Gegenstände der Wirklichkeit (Erlebnisse) zugeordnet werden. (...) Die so ergänzte Geometrie ist offenbar eine Naturwissenschaft; wir können sie geradezu als den ältesten Zweig der Physik betrachten“ [2, S. 5/6].

Dies alles jedoch sind Sichtweisen von Physikerinnen und Physikern, von Physikdidaktikerinnen und

Physikdidaktikern, also von Protagonisten, die in der Regel sehr ähnliche wissenschaftstheoretische Prägnungen aufweisen. Und es sollte zu vermuten sein, dass Forscherinnen und Forscher anderer Wissenschaftsdisziplinen, die eine unter Umständen dramatisch andere wissenschaftstheoretische Prägung erfahren haben, auch andere Verknüpfungsbeziehungen zwischen den Disziplinen denken und herstellen.

So ist es aus wirtschaftsmathematischer und wirtschaftswissenschaftlicher Perspektive nicht nur legitim, sondern auch didaktisch gerechtfertigt, die Verknüpfungsrichtung umzudeuten und zu sagen: Die Physik verknüpft die Algebra mit der Geometrie.

Von dieser wirtschaftsmathematisch und wirtschaftswissenschaftlich basierten Perspektive ausgehend wird die Algebra nicht als ein Werkzeug der Physik, sondern vielmehr als ein Werkzeug der eigenen Disziplin eingeordnet. Der Physik kommt in dieser wirtschaftsmathematisch zentrierten Welt dann die Funktion eines Katalysators oder einer Brücke zu, die zwischen der Algebra und den Wirtschaftswissenschaften vermittelt.

Sehr konkret kann dies am Beispiel der Geometrischen Algebra bzw. der Pauli-Algebra als einer dreidimensional, Euklidisch reduzierten Geometrischen Algebra nachvollzogen werden.

* Aufgrund eines geplanten Hochschulwechsels ist diese Email-Adresse nur noch übergangsweise nutzbar. Zukünftig ist der Autor an der HTW Berlin unter hornmar@htw-berlin.de oder unter mail@martinerikhorn.de erreichbar.

Gemäß Einstein [2] werden den logisch-formalen Pauli-Matrizen, die als algebraische Entitäten zuerst rein formal gedacht werden, Basis-Schritte in die drei Raumrichtungen (als Gegenstände der Wirklichkeit) zugeordnet und so mit Hilfe der Physik eine Verknüpfung zur Geometrie geschaffen. Die so ergänzte Geometrie der nun naturwissenschaftlich-physikalisch fundierten Basisvektoren dient dann als Ausgangspunkt wirtschaftswissenschaftlicher Modellierungen.

Mit Hilfe der Physik kann hier also die Algebra mit der Geometrie kognitiv verknüpft werden.

Darüber hinaus kann diese Verknüpfung auch didaktisch gewertet und didaktisch genutzt werden, denn die oben von Einstein [2] geforderte Zuordnung von Erlebnissen als erlebbare Gegenstände der Wirklichkeit ist ein zutiefst phänomen-bezogener, didaktischer Prozess.

In den folgenden Abschnitten wird dieser Prozess am Beispiel der Konstruktion verallgemeinerter Matrizeninverse und Moore-Penrose-Matrizeninverse aufgezeigt und hinterfragt.

2. Geometrische Algebra

Die von Pauli [3], [4, S. 51], [5, S. 289/290] rein algebraisch formulierten Beziehungen der Pauli-Algebra

$$\begin{aligned} \sigma_x \sigma_y &= -\sigma_y \sigma_x & \sigma_y \sigma_z &= -\sigma_z \sigma_y & \sigma_z \sigma_x &= -\sigma_x \sigma_z \\ \sigma_x^2 &= \sigma_y^2 = \sigma_z^2 = 1 \end{aligned} \quad \{1\}$$

werden durch die folgenden Zuordnungen von tatsächlich gangbaren Fußschritten in Einheitslänge als erlebbare Gegenstände der Wirklichkeit

$$\begin{aligned} \sigma_x &\rightarrow \text{Schritt in x-Richtung} \\ &\rightarrow \text{Basisvektor in x-Richtung} \\ \sigma_y &\rightarrow \text{Schritt in y-Richtung} \\ &\rightarrow \text{Basisvektor in y-Richtung} \\ \sigma_z &\rightarrow \text{Schritt in z-Richtung} \\ &\rightarrow \text{Basisvektor in z-Richtung} \end{aligned} \quad \{2\}$$

in die von Einstein geforderte erweiterte Geometrie überführt. Pauli-Matrizen repräsentieren Basisvektoren („a right-handed set of base vectors σ_i “ [6, S. 801]), eine Zuordnung, die übrigens bereits Grassmann (selbstredend ohne Bezug auf quantenmechanische Phänomene) in [7] formulierte.

Unter Nutzung dieser Konzeptualisierung wurde ebenfalls bereits von Grassmann die Lösung Linearer Gleichungssysteme beliebig vieler Gleichungen in [8, § 45, S. 70-72] begründet und diskutiert.

Dabei wird im zweidimensionalen Fall bei einem eindeutig lösbar System aus zwei algebraischen Linearen Gleichungen mit zwei Unbekannten x, y

$$\begin{aligned} a_x x + b_x y &= r_x \\ a_y x + b_y y &= r_y \end{aligned} \quad \{3\}$$

dieses System mit Hilfe der Beziehungen {2} räumlich-geometrisch in eine zweidimensionale Ebene eingebettet.

$$\begin{aligned} a_x x + b_x y &= r_x \\ a_y x + b_y y &= r_y \end{aligned} \quad \{4\}$$

so dass mit Hilfe der beiden Koeffizientenvektoren

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= a_x \sigma_x + a_y \sigma_y \\ \mathbf{b} &= b_x \sigma_x + b_y \sigma_y \end{aligned} \quad \{5\}$$

und des konstanten Ergebnisvektors

$$\mathbf{r} = r_x \sigma_x + r_y \sigma_y \quad \{6\}$$

Gl. {4} als geometrisch-algebraische Gleichung

$$\mathbf{a} x + \mathbf{b} y = \mathbf{r} \quad \{7\}$$

formuliert werden kann. Diese Gleichung kann graphisch als einfache Addition der beiden Vektoren $\mathbf{a} x$ und $\mathbf{b} y$ zu einem resultierenden Vektor \mathbf{r} dargestellt werden (siehe Abb. 1).

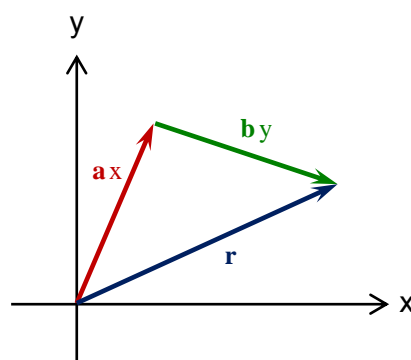


Abb.1: Graphische Darstellung des Linearen Gleichungssystems $\mathbf{a} x + \mathbf{b} y = \mathbf{r}$ {7} mit zwei Unbekannten.

Dabei ist zu beachten, dass die rot und grün eingefärbten Skalare x und y (in Abb. 1 auch durch die Schriftart *Times New Roman* gekennzeichnet) die beiden Variablen des Linearen Gleichungssystems bezeichnen, während die schwarz eingefärbten Buchstabensymbole x und y (in Abb. 1 durch die Schriftart *Arial* gekennzeichnet) die Richtungsbezeichnungen der Ebene darstellen.

Diese wichtige Differenzierung sollte mit Lernenden ausführlicher besprochen werden, damit es hier nicht zu Verwechslungen kommt.

Graphisch kann die Lösung des Linearen Gleichungssystems {7} durch Ermittlung des Schnittpunktes einer Geraden in Richtung des ersten Koeffizientenvektors \mathbf{a} , die durch den Fußpunkt des Ergebnisvektors \mathbf{r} verläuft, und einer zweiten Geraden in Richtung des zweiten Koeffizientenvektors \mathbf{b} , die durch den Endpunkt des Ergebnisvektors \mathbf{r} verläuft, recht einfach aufgefunden werden.

Rechnerisch algebraisch zeigte bereits Grassmann – wie bereits erwähnt – sehr ausführlich in [8, § 45], dass das Lineare Gleichungssystem {7} durch äußere Multiplikation mit den beiden Koeffizientenvektoren gelöst werden kann.

Die dabei zu bildenden äußeren Produkte

$$\begin{aligned} \mathbf{a} \wedge \mathbf{b} &= a_x b_y - a_y b_x \\ \mathbf{r} \wedge \mathbf{b} &= r_x b_y - r_y b_x \end{aligned} \quad \{8\}$$

$$\mathbf{a} \wedge \mathbf{r} = a_x r_y - a_y r_x$$

mit der Eigenschaft

$$\mathbf{a} \wedge \mathbf{a} = \mathbf{b} \wedge \mathbf{b} = 0 \quad \{9\}$$

zeigen eindrücklich, wie ein zuvor rein algebraisch zugängliches Konstrukt nun geometrisch gedeutet und verstanden werden kann. Die Gleichungen {8} beschreiben aus geometrischer Perspektive nichts anderes als eine simple Ermittlung des orientierten Flächeninhalts der von den Koeffizientenvektoren bzw. dem Ergebnisvektor aufgespannten Parallelogramme.

Liegen die beiden Vektoren parallel zueinander (siehe Gl. {9}), ist keine Bildung eines Parallelogramms möglich, so dass der Flächeninhalt dieser nicht existierenden Parallelogramme naturgemäß zu Null wird.

Die rechtsseitig mit dem Koeffizientenvektor \mathbf{b} bzw. linksseitig mit dem Koeffizientenvektor \mathbf{a} vorgenommene äußere Multiplikation von {7}

$$\begin{aligned} (\mathbf{a}x + \mathbf{b}y) \wedge \mathbf{b} &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})x + 0y = \mathbf{r} \wedge \mathbf{b} \\ \mathbf{a} \wedge (\mathbf{a}x + \mathbf{b}y) &= 0x + (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})y = \mathbf{a} \wedge \mathbf{r} \end{aligned} \quad \{10\}$$

führt somit direkt auf die beiden Lösungsformeln

$$\begin{aligned} x &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{r} \wedge \mathbf{b}) \\ y &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{a} \wedge \mathbf{r}) \end{aligned} \quad \{11\}$$

Diese Lösungsformeln bilden das geometrisch-algebraische Analogon zur Cramerschen Regel und verknüpfen algebraisch jeweils zwei äußere Produkte durch Division sowie geometrisch zwei orientierte Flächenelemente durch einen Flächeninhaltsvergleich.

Da alle Flächenelemente parallel zueinander liegen und somit eine identische Richtungsbeschreibung durch sich entsprechende Bivektoren aufweisen (die sich bei der Division immer vollständig gegenseitig aufheben werden), können die beiden Lösungsformeln {11} auch alternativ als

$$\begin{aligned} x &= (\mathbf{r} \wedge \mathbf{b}) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} \\ y &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{r}) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} \end{aligned} \quad \{12\}$$

geschrieben werden.

Bei der Ermittlung von Lösungswerten Linearer Gleichungssysteme, deren Anzahl an Unbekannten der Anzahl gegebener Gleichungen entspricht, spielt es somit keine Rolle, ob eine linksseitige Prä-Division nach {11} oder aber eine rechtsseitige Post-Division nach {12} vorgenommen wird. Das skalare Ergebnis x bzw. y ist immer gleich.

Darüber hinaus ist sofort einsichtig, dass diese geometrisch gedeuteten Beziehungen sich nicht ändern werden, wenn die in Abb. 1 in eine Fläche eingebetteten Vektoren nun stattdessen in einem höherdimensionalen Raum eingebettet werden, da die orientierten Flächeninhalte dabei konstant bleiben. Diese Eigenschaft wird später bei Konstruktion von verallgemeinerten Matrizeninversen ein wesentliches Motivationselement darstellen.

3. Inverse quadratischer Matrizen

Die Lösungsformeln {11} bzw. {12} des zweidimensionalen Falls sowie allgemein die von Grassmann in [8, S. 72] gegebenen mit beliebig vielen Unbekannten können aufgrund der linearen Struktur des Ergebnisvektors {6} immer auch linear zerlegt werden.

Die Zerlegung von {11} führt auf

$$\begin{aligned} x &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} ((r_x \sigma_x + r_y \sigma_y) \wedge \mathbf{b}) \\ &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\sigma_x \wedge \mathbf{b}) r_x + (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\sigma_y \wedge \mathbf{b}) r_y \\ y &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{a} \wedge (r_x \sigma_x + r_y \sigma_y)) \quad \{13\} \\ &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{a} \wedge \sigma_x) r_x + (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{a} \wedge \sigma_y) r_y \end{aligned}$$

während die Zerlegung von {12} auf

$$\begin{aligned} x &= ((r_x \sigma_x + r_y \sigma_y) \wedge \mathbf{b}) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} \\ &= (\sigma_x \wedge \mathbf{b}) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} r_x + (\sigma_y \wedge \mathbf{b}) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} r_y \\ y &= (\mathbf{a} \wedge (r_x \sigma_x + r_y \sigma_y)) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} \quad \{14\} \\ &= (\mathbf{a} \wedge \sigma_x) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} r_x + (\mathbf{a} \wedge \sigma_y) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} r_y \end{aligned}$$

führt. Diese Zerlegungen können mit Hilfe des Falkschen Schemas [24, S. 9-11] didaktisch einsichtig als Matrizenmultiplikationen formuliert werden.

Die linksseitigen Werte werden dabei wie erwartet die Inverse der aus den beiden Koeffizientenvektoren \mathbf{a} und \mathbf{b} gebildeten Koeffizientenmatrix

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{a} & \mathbf{b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & b_x \\ a_y & b_y \end{bmatrix} \quad \{15\}$$

ergeben, wobei die durch Prä- und Post-Division ermittelten Matrizenelemente wieder identisch sein werden:

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 \\ y_1 & y_2 \end{pmatrix} = \underline{\underline{\mathbf{A}}}^{-1} = \begin{pmatrix} \underline{x}_1 & \underline{x}_2 \\ \underline{y}_1 & \underline{y}_2 \end{pmatrix} \quad \{16\}$$

mit

$$\begin{aligned} x_1 &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\sigma_x \wedge \mathbf{b}) = \underline{x}_1 = (\sigma_x \wedge \mathbf{b}) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} \\ y_1 &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{a} \wedge \sigma_x) = \underline{y}_1 = (\mathbf{a} \wedge \sigma_x) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} \\ x_2 &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\sigma_y \wedge \mathbf{b}) = \underline{x}_2 = (\sigma_y \wedge \mathbf{b}) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} \\ y_2 &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{a} \wedge \sigma_y) = \underline{y}_2 = (\mathbf{a} \wedge \sigma_y) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} \end{aligned} \quad \{17\}$$

Hierbei wurden somit die beiden Linearen Gleichungssysteme

$$\mathbf{a}x + \mathbf{b}y = \mathbf{r}_1 \quad \text{und} \quad \mathbf{a}x + \mathbf{b}y = \mathbf{r}_2 \quad \{18\}$$

mit den jeweiligen Einheitsvektoren σ_x und σ_y als den zwei unterschiedlichen Ergebnisvektoren

$$\mathbf{r}_1 = \sigma_x \quad \text{und} \quad \mathbf{r}_2 = \sigma_y \quad \{19\}$$

gelöst.

Da bei den beiden Linearen Gleichungssystemen {18} die Anzahl an Unbekannten der Anzahl gegebener Gleichungen entspricht, ergeben sich für die beiden Inversen rein skalare Elemente.

Deshalb stimmt die durch Prä-Division ermittelte erste Inverse \mathbf{A}^{-1} mit der durch Post-Division ermittelten zweiten Inverse $\underline{\underline{\mathbf{A}}}^{-1}$ vollständig überein.

4. Wirtschaftsmathematischer Ausgangspunkt

Immer mehr einführende Wirtschaftsmathematik-Lehrbücher erörtern verallgemeinerte Matrizeninverse und Moore-Penrose-Inverse als einen elementaren Bestandteil wirtschaftsmathematischer Grundbildung (siehe z.B. [9, Kap. 7]).

Auch hochschulische Kursveranstaltungen zu den Grundlagen der Wirtschaftsmathematik (wie z.B. an der FH Schmalkalden, der TU Dortmund und der Leibniz-Universität Hannover [10]) greifen den Themenbereich der verallgemeinerten Matrizeninversen immer öfter auf.

Dabei wird darauf verwiesen, dass „der vermittelte Stoff aktuell und modern sein (soll). Deshalb bedienen wir uns der in letzter Zeit immer populärer gewordenen Hilfsmittel wie verallgemeinerte Inversen und Moore-Penrose-Inverse von Matrizen und ihrer Anwendung zur Lösung linearer Gleichungssysteme“ [10, S. V].

Allerdings werden Moore-Penrose-Matrizeninverse derzeit in einführenden Wirtschaftsmathematik-Lehrbüchern hauptsächlich algebraisch unter Bezug auf die vier Moore-Penrose-Bedingungen

$$\mathbf{A} \mathbf{A}^+ \mathbf{A} = \mathbf{A} \quad \{20a\}$$

$$\mathbf{A}^+ \mathbf{A} \mathbf{A}^+ = \mathbf{A}^+ \quad \{20b\}$$

$$(\mathbf{A}^+ \mathbf{A})^T = \mathbf{A}^+ \mathbf{A} \quad \{20c\}$$

$$(\mathbf{A} \mathbf{A}^+)^T = \mathbf{A} \mathbf{A}^+ \quad \{20d\}$$

motiviert und diskutiert [11, Gl. (2.2), S. 12 & Th. 4, S. 18], [12, S. 40], [13, Kap. 6, S. 363], [9, Gl. 7.13, S. 147], [10, Abs. 6.1, S. 125] wobei das hochgestellte T die konjugierte Transposition bezeichnet.

Die Beschränkung auf rein algebraische Zugänge stellt eine erhebliche didaktische Einschränkung und ein gravierendes Defizit der bisherigen Herangehensweise dar.

Eine geometrisch-physikalisch motivierte und fundierte Erörterung bietet zusätzliche didaktische Wege und eröffnet neue konzeptuelle Freiräume, die sowohl didaktisch wie auch fachlich alternative, den Blickwinkel öffnende Perspektiven zulassen.

Durch Rückgriff auf physikalische und physikdidaktische Argumentationsmuster der Pauli-Algebra im dreidimensionalen Fall bzw. der Geometrischen Algebra im allgemeinen Fall können Moore-Penrose-Matrizeninverse sehr einsichtig und leicht nachvollziehbar geometrisch fundiert und so über die Algebra weit hinausgehend erörtert werden.

5. Überdeterminierte Gleichungssysteme

Die das Lineare Gleichungssystem {7} determinierenden Vektoren $\mathbf{a}x$, $\mathbf{b}y$ und \mathbf{r} werden nun in relative zueinander gleicher Anordnung schräg in ein räumlich dreidimensionales Koordinatensystem eingebettet (siehe Abb. 2).

Da die Vektoren zueinander die gleichen, unveränderten Lagebeziehungen aufweisen, werden auch die

von Ihnen aufgespannten Parallelelogramme bzw. deren orientierte Volumina unverändert bleiben.

Die mit Hilfe der Grassmannschen Gleichungen {11} und {12} formulierten Beziehungen

$$x = (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{r} \wedge \mathbf{b}) = (\mathbf{r} \wedge \mathbf{b}) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1}$$

$$y = (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{a} \wedge \mathbf{r}) = (\mathbf{a} \wedge \mathbf{r}) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} \quad \{21\}$$

führen somit wieder direkt zu den beiden Lösungswerten x und y .

Da alle Flächenelemente unverändert parallel zueinander liegen und somit eine identische Richtungsbeschreibung durch sich entsprechende Linearkombinationen an Bivektoren aufweisen werden, heben sich diese bei Division wie zuvor gegenseitig vollständig weg.

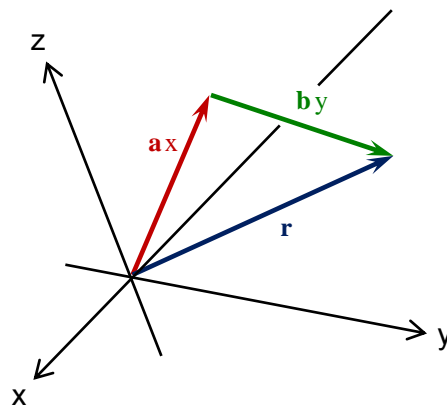


Abb.2: Graphische Darstellung des Linearen Gleichungssystems $\mathbf{a}x + \mathbf{b}y = \mathbf{r}$ {7} mit zwei Unbekannten.

Obleich die geometrische Situation und die charakteristischen geometrischen Größen unverändert bleiben, so ändert sich doch die algebraische Schreibung dieser Größen.

Eine Änderung des Koordinatensystems wird die algebraische Beschreibung der Vektoren beeinflussen, die nun – da in einen dreidimensionalen Raum eingebettet – auch drei (anstelle von nur zwei) Komponenten aufweisen werden. Die beiden Koeffizientenvektoren

$$\mathbf{a} = a_x \sigma_x + a_y \sigma_y + a_z \sigma_z$$

$$\mathbf{b} = b_x \sigma_x + b_y \sigma_y + b_z \sigma_z \quad \{22\}$$

und der konstante Ergebnisvektor

$$\mathbf{r} = r_x \sigma_x + r_y \sigma_y + r_z \sigma_z \quad \{23\}$$

bilden erneut das eindeutig lösbare Lineare Gleichungssystem

$$\mathbf{a}x + \mathbf{b}y = \mathbf{r} \quad \{24\}$$

Dieses Gleichungssystem weist jedoch nun drei (anstelle von zuvor zwei) Linearen Gleichungen auf:

$$a_x x \sigma_x + b_x y \sigma_x = r_x \sigma_x \rightarrow a_x x + b_x y = r_x$$

$$a_y x \sigma_y + b_y y \sigma_y = r_y \sigma_y \rightarrow a_y x + b_y y = r_y \quad \{25\}$$

$$a_z x \sigma_z + b_z y \sigma_z = r_z \sigma_z \rightarrow a_z x + b_z y = r_z$$

Da dieses Lineare Gleichungssystem weiterhin eine einzige und somit eindeutige Lösung besitzt, ist es

zwar überdeterminiert, aber dennoch konsistent. Allerdings ist die Koeffizientenmatrix nun nicht mehr quadratisch, sondern rechteckig.

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}; \mathbf{b}] = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_x & \mathbf{b}_x \\ \mathbf{a}_y & \mathbf{b}_y \\ \mathbf{a}_z & \mathbf{b}_z \end{pmatrix} \quad \{26\}$$

6. Inverse nicht-quadratischer Matrizen

Da der Ergebnisvektor {23} weiterhin eine lineare Struktur besitzt, kann erneut eine lineare Zerlegung der Lösungsformeln {21} vorgenommen werden, die sich mit Hilfe des Falkschen Schemas [24, S. 23-28] didaktisch einsichtig darstellen lassen

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} ((r_x \sigma_x + r_y \sigma_y + r_z \sigma_z) \wedge \mathbf{b}) \\ &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\sigma_x \wedge \mathbf{b}) r_x \\ &\quad + (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\sigma_y \wedge \mathbf{b}) r_y \\ &\quad + (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\sigma_z \wedge \mathbf{b}) r_z \\ \Rightarrow x_1 &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\sigma_x \wedge \mathbf{b}) \quad \{27\} \\ x_2 &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\sigma_y \wedge \mathbf{b}) \\ x_3 &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\sigma_z \wedge \mathbf{b}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{a} \wedge (r_x \sigma_x + r_y \sigma_y + r_z \sigma_z)) \\ &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{a} \wedge \sigma_x) r_x \\ &\quad + (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{a} \wedge \sigma_y) r_y \\ &\quad + (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{a} \wedge \sigma_z) r_z \\ \Rightarrow y_1 &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{a} \wedge \sigma_x) \quad \{28\} \\ y_2 &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{a} \wedge \sigma_y) \\ y_3 &= (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{a} \wedge \sigma_z) \end{aligned}$$

und die nun auf jeweils drei Terme führt. Allerdings sind diese Terme jetzt nicht mehr rein skalarwertig, sondern weisen zusätzliche bivektorielle Anteile auf.

Während sich die skalarwertigen Anteile bei Prä- und Post-Division nicht unterscheiden, erfahren die bivektoriellen Anteile eine Orientierungsumkehr, was einen Vorzeichenwechsel bewirkt.

Die Zerlegung der durch eine Post-Division generierten Lösungsformeln lautet somit

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= ((r_x \sigma_x + r_y \sigma_y + r_z \sigma_z) \wedge \mathbf{b}) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} \\ &= (\sigma_x \wedge \mathbf{b}) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} r_x \\ &\quad + (\sigma_y \wedge \mathbf{b}) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} r_y \\ &\quad + (\sigma_z \wedge \mathbf{b}) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} r_z \\ \Rightarrow \underline{x}_1 &= (\sigma_x \wedge \mathbf{b}) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} \quad \{29\} \\ \underline{x}_2 &= (\sigma_y \wedge \mathbf{b}) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} \\ \underline{x}_3 &= (\sigma_z \wedge \mathbf{b}) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= (\mathbf{a} \wedge (r_x \sigma_x + r_y \sigma_y + r_z \sigma_z)) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} \\ &= (\mathbf{a} \wedge \sigma_x) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} r_x \\ &\quad + (\mathbf{a} \wedge \sigma_y) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} r_y \\ &\quad + (\mathbf{a} \wedge \sigma_z) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} r_z \\ \Rightarrow \underline{y}_1 &= (\mathbf{a} \wedge \sigma_x) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} \quad \{30\} \\ \underline{y}_2 &= (\mathbf{a} \wedge \sigma_y) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} \\ \underline{y}_3 &= (\mathbf{a} \wedge \sigma_z) (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} \end{aligned}$$

so dass zwei unterschiedliche Matrizeninverse \mathbf{A}^{-1} der Prä-Division und $\underline{\mathbf{A}}^{-1}$ der Post-Division

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \end{pmatrix} \neq \underline{\mathbf{A}}^{-1} = \begin{pmatrix} \underline{x}_1 & \underline{x}_2 & \underline{x}_3 \\ \underline{y}_1 & \underline{y}_2 & \underline{y}_3 \end{pmatrix} \quad \{31\}$$

gebildet werden können.

Da zur Konstruktion dieser verallgemeinerten Matrizeninversen die Pauli-Algebra herangezogen wird, können diese nicht-quadratischen Inversen als Verallgemeinerte Pauli-Algebra-Matrizeninverse [14] – [18] bezeichnet werden.

Auch zeigen Gl. {27} bis {30}, dass diese Verallgemeinerten Pauli-Algebra-Matrizeninverse linksseitige Inverse darstellen,

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{A} &= \mathbf{E}_{2 \times 2} & \mathbf{A} \mathbf{A}^{-1} &\neq \mathbf{E}_{3 \times 3} \\ \underline{\mathbf{A}}^{-1} \mathbf{A} &= \mathbf{E}_{2 \times 2} & \mathbf{A} \underline{\mathbf{A}}^{-1} &\neq \mathbf{E}_{3 \times 3} \end{aligned} \quad \{32\}$$

wobei die Einheitsmatrizen mit

$$\mathbf{E}_{2 \times 2} = [\sigma_x; \sigma_y] \quad \mathbf{E}_{3 \times 3} = [\sigma_x; \sigma_y; \sigma_z] \quad \{33\}$$

unterschiedliche Dimensionen besitzen.

Sollte zur Lösung eines Linearen Gleichungssystems eine Verallgemeinerte Pauli-Algebra-Matrizeninverse von rechts an die ursprüngliche Matrix \mathbf{A} anmultipliziert werden, ergibt sich in der Regel keine sinnvolle Lösung, da die Ungleichungen {32, rechts} gelten, wie eine einfache Überprüfung und Diskussion in den Folien des für die Studierenden angefertigten Skripts [24, S. 30] zeigt.

In vollkommen analoger Art und Weise, die dem hier auf Grundlage einer nicht-quadratischen (3×2) -Matrix gezeigten Verfahren entspricht, können für höherdimensionale $(j \times k)$ -Matrizen mit beliebigem $j \geq k$ die entsprechenden Verallgemeinerten Pauli-Algebra-Matrizeninverse berechnet werden.

7. Moore-Penrose Matrizeninverse

Aufgrund von Gl. {32, links} erfüllen Verallgemeinerte Pauli-Algebra-Matrizeninverse die ersten drei Moore-Penrose-Bedingungen {20a, b, c}. Die vierte Bedingung {20d} wird dann erfüllt, wenn der bivektorielle Anteil von \mathbf{A}^{-1} bzw. $\underline{\mathbf{A}}^{-1}$ in {31} wegfällt. Eine solche Matrizeninverse kann durch Aufaddition der prä- und post-divisionalen Matrizeninversen

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^+ &= \frac{1}{2} (\mathbf{A}^{-1} + \underline{\mathbf{A}}^{-1}) \quad \{34\} \\ &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} x_1 + \underline{x}_1 & x_2 + \underline{x}_2 & x_3 + \underline{x}_3 \\ y_1 + \underline{y}_1 & y_2 + \underline{y}_2 & y_3 + \underline{y}_3 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

erzeugt werden. Die so gebildete verallgemeinerte Matrizeninverse \mathbf{A}^+ entspricht der Moore-Penrose-Matrizeninversen.

Durch Differenzbildung entsteht darüber hinaus eine Matrix \mathbf{A}^- , die rein bivektorielle Elemente besitzt.

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^- &= \frac{1}{2} (\mathbf{A}^{-1} - \underline{\mathbf{A}}^{-1}) \quad \{35\} \\ &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} x_1 - \underline{x}_1 & x_2 - \underline{x}_2 & x_3 - \underline{x}_3 \\ y_1 - \underline{y}_1 & y_2 - \underline{y}_2 & y_3 - \underline{y}_3 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Moore-Penrose-Matrizeninverse sind somit lediglich der skalarwertige Teil einer natürlicheren, geometrisch fundierten Verallgemeinerten Pauli-Algebra-Matrizeninversen – eine Sichtweise, die übrigens auch in logisch umgekehrter Argumentationsrichtung gedeutet und diskutiert werden könnte.

Durch direkten Vergleich mit

$$\mathbf{A}^+ = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \quad \{36\}$$

[9, Gl. 7.14, S. 147] lässt sich leicht zeigen, dass die in {34} konstruierte Matrix tatsächlich der Moore-Penrose-Matrizeninversen entspricht. Mit

$$\mathbf{A}^T = \begin{pmatrix} a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{pmatrix} \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_x & b_x \\ a_y & b_y \\ a_z & b_z \end{pmatrix} \quad \{37\}$$

ergeben sich

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \bullet \mathbf{b} \\ \mathbf{a} \bullet \mathbf{b} & \mathbf{b}^2 \end{pmatrix} \quad \{38\}$$

$$\begin{aligned} \det(\mathbf{A}^T \mathbf{A}) &= \mathbf{a}^2 \mathbf{b}^2 - (\mathbf{a} \bullet \mathbf{b})^2 \\ &= \mathbf{a}^2 \mathbf{b}^2 - \mathbf{a}^2 \mathbf{b}^2 \cos^2 \alpha \\ &= \mathbf{a}^2 \mathbf{b}^2 \sin^2 \alpha = -(\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^2 \end{aligned} \quad \{39\}$$

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} = -\frac{1}{(\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^2} \begin{pmatrix} \mathbf{b}^2 & -\mathbf{a} \bullet \mathbf{b} \\ -\mathbf{a} \bullet \mathbf{b} & \mathbf{a}^2 \end{pmatrix} \quad \{40\}$$

$$\mathbf{A}^+ = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \quad \{41\}$$

$$= \begin{pmatrix} \frac{b_x \mathbf{a} \bullet \mathbf{b} - a_x \mathbf{b}^2}{(\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^2} & \frac{b_y \mathbf{a} \bullet \mathbf{b} - a_y \mathbf{b}^2}{(\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^2} & \frac{b_z \mathbf{a} \bullet \mathbf{b} - a_z \mathbf{b}^2}{(\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^2} \\ \frac{a_x \mathbf{a} \bullet \mathbf{b} - b_x \mathbf{a}^2}{(\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^2} & \frac{a_y \mathbf{a} \bullet \mathbf{b} - b_y \mathbf{a}^2}{(\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^2} & \frac{a_z \mathbf{a} \bullet \mathbf{b} - b_z \mathbf{a}^2}{(\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^2} \end{pmatrix}$$

Dies entspricht dem Skalaranteil von {42}

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{(\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})(\sigma_x \wedge \mathbf{b})}{(\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^2} & \frac{(\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})(\sigma_y \wedge \mathbf{b})}{(\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^2} & \frac{(\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})(\sigma_z \wedge \mathbf{b})}{(\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^2} \\ \frac{(\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})(\mathbf{a} \wedge \sigma_x)}{(\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^2} & \frac{(\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})(\mathbf{a} \wedge \sigma_y)}{(\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^2} & \frac{(\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})(\mathbf{a} \wedge \sigma_z)}{(\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^2} \end{pmatrix}$$

da sich die Skalaranteile der Nenner aller Elemente entsprechen. Beispielsweise sind für den jeweils ersten Term

$$\begin{aligned} b_x \mathbf{a} \bullet \mathbf{b} - a_x \mathbf{b}^2 \\ = a_y b_x b_y + a_z b_x b_z - a_x b_y^2 - a_x b_z^2 \end{aligned} \quad \{43\}$$

und

$$\begin{aligned} (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})(\sigma_x \wedge \mathbf{b}) \\ = ((a_x b_y - a_y b_x) \sigma_x \sigma_y + (a_y b_z - a_z b_y) \sigma_y \sigma_z \\ + (a_z b_x - a_x b_z) \sigma_z \sigma_x) (b_y \sigma_x \sigma_y - b_z \sigma_z \sigma_x) \\ = a_y b_x b_y + a_z b_x b_z - a_x b_y^2 - a_x b_z^2 \\ + (a_y b_z - a_z b_y) \mathbf{b} \sigma_x \sigma_y \sigma_z \end{aligned} \quad \{44\}$$

die Skalaranteile wie erwartet identisch.

In ähnlicher Art und Weise sollte sich auch für Matrizeninverse mit einer höheren Anzahl an Zeilen und Spalten die Gleichheit der Skalaranteile von Verallgemeinerter Pauli-Algebra-Matrizeninversen und Moore-Penrose-Matrizeninversen zeigen lassen.

8. Kursdurchführung

Im Rahmen der sukzessiven Erprobung einer modernen Darstellung der Linearen Algebra auf Grundlage der Geometrischen Algebra in englischsprachigen Wirtschaftsmathematik-Kursen „Mathematics for Business and Economics“ (LV-Nr. 200 691.01) [20] wurden in den vergangenen Jahren an der HWR Berlin unterschiedliche Aspekte der Geometrischen Algebra didaktisch aufbearbeitet und die dazu entwickelten Materialien [19] eingesetzt.

Im Wintersemester 2017/2018 wurden für diesen wirtschaftsmathematischen Crash-Kurs zur Geometrischen Algebra Arbeitsblätter zu verallgemeinerten Matrizeninversen [24] entwickelt.

Auf Grundlage der bereits den Studierenden bekannten Ermittlung von Inversen quadratischer Matrizen wurde die Berechnung linksseitiger Inversen nicht-quadratischer Matrizen mit Hilfe der Geometrischen Algebra thematisiert und an Beispielen (siehe auch folgender Abschnitt 9) erörtert.

Da die Studierenden dieses Kurses zuvor bereits ausführlich Erfahrungen mit der Geometrischen Algebra im Rahmen einer Einführung und Nutzung des Programm-Tools GAALOP [21], [22] machen konnten, waren sehr breite Grundkenntnisse zur Geometrischen Algebra vorhanden.

Somit konnte auf soliden Kenntnissen zur Geometrischen Algebra aufgebaut werden, so dass der zur Verfügung stehende zeitliche Rahmen von 90 Minuten (was lediglich zwei Lehrveranstaltungsstunden entspricht) zur Erarbeitung Verallgemeinerter Pauli-Algebra-Matrizeninversen [24, S. 21-46] und die sich anschließende Reduktion auf Moore-Penrose-Matrizeninverse [24, S. 47-56] zur Behandlung dieses Themengebietes ausreichend war.

Längere Erläuterungsphasen waren allerdings an den Stellen notwendig, in denen die Berechnung nicht-quadratischer Matrizeninverser deutlich von der Berechnung quadratischer Inversen abweicht. Dies war insbesondere bei den Folien [24, S. 36 und folgende] der Fall.

Während bei Berechnung von quadratischen Inversen die bivectorielle Richtungsinformationen in Zähler und Nenner der Gleichungen {16} und {17} immer identisch sind und somit intuitiv gekürzt werden können, sind bei den Gleichungen {27} bis {31} etwas längere Umrechnungen notwendig.

Nach ausführlicher Besprechung eines Beispiels [24, S. 38, Berechnung von x_1] wurden den Studierenden die in gleicher Art und Weise durchzuführenden Berechnungen weiterer Matrizenelemente [24, S. 39-43, Berechnung von x_2, x_3, y_1, y_2, y_3] zur häuslichen Nachbearbeitung aufgetragen.

Aus Zeitgründen wurde auch nicht auf den Unterschied zwischen Prä- und Post-Division eingegangen. Stattdessen wurde die Division durch äußere Produkte (und damit hier durch Bivektoren) immer als Prä-Division dargestellt.

Aus den Diskussionsbeiträgen und Rückfragen der Studierenden während der Kursdurchführung kann geschlossen werden, dass die Inhalte von ihnen größtenteils gut nachvollzogen werden können und verstanden werden. Der zentrale Ansatz einer Aufspaltung der Matrizenmultiplikation zur Ermittlung von Matrizeninversen ist den Studierenden nach ausführlicher Besprechung des Falksches Schemas klar und einsichtig.

Es kann somit geschlossen werden, dass der hier in diesem Beitrag vorgestellte Ansatz tragfähig und gut durchführbar ist und in weiteren Kursen auf diese Art und Weise behandelt werden kann.

9. Kurze Erläuterung der Beispielaufgabe

Ausgehend von einer Beispielaufgabe zur Materialverflechtung (siehe Abb. 3), die auf das Lineare Gleichungssystem

$$\mathbf{p} = \mathbf{D}_{\text{qua}}^{-1} \mathbf{r} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 4 & -2 \\ -5 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 120 \\ 220 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 20 \\ 30 \end{pmatrix} \quad \{49\}$$

Es werden somit 20 Mengeneinheiten des ersten Endproduktes P_1 und 30 Mengeneinheiten des zweiten Endproduktes P_2 hergestellt.

Dieses einfache Beispiel wird nun durch Einbezug eines dritten Rohstoffes R_3 erweitert (siehe Abb. 4), so dass das zugrunde liegende Lineare Gleichungssystem

$$\begin{aligned} 3x + 2y &= 120 \\ 5x + 4y &= 220 \\ 4x + 8y &= 320 \end{aligned} \quad \{50\}$$

mit drei Gleichungen bei nur zwei Unbekannten überdeterminiert ist. Da jedoch eine einzige eindeu-

Erstes Beispiel: Aufgabenstellung

In einer Fabrik werden zwei verschiedene Endprodukte P_1 und P_2 hergestellt. Zur Herstellung dieser beiden Endprodukte werden die folgenden Mengen zweier verschiedener Rohstoffe R_1 und R_2 benötigt:

- 3 Mengeneinheiten (ME) von R_1 und 5 ME von R_2 zur Herstellung einer ME von P_1
- 2 ME von R_1 und 4 ME von R_2 zur Herstellung einer ME von P_2

Berechnen Sie die Mengen der Endprodukte P_1 und P_2 , die hergestellt werden, wenn genau 120 ME des ersten Rohstoffes R_1 und 220 ME des zweiten Rohstoffes R_2 während des Produktionsprozesses verbraucht werden.

Abb.3: Übersetzung der englischsprachigen Beispielaufgabe des Skripts [24, S. 16] ins Deutsche.

chungssystem

$$\begin{aligned} 3x + 2y &= 120 \\ 5x + 4y &= 220 \end{aligned} \quad \{45\}$$

führt und deshalb mit Hilfe der konventionellen, quadratischen Bedarfsmatrix

$$\mathbf{D}_{\text{qua}} = \begin{pmatrix} 3 & 2 \\ 5 & 4 \end{pmatrix} \quad \{46\}$$

gelöst werden kann, wird der Grassmannsche Ansatz zur Berechnung inverser Matrizen wiederholt. Die Berechnung der äußeren Produkte der Pauli-Vektoren

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= 3 \sigma_x + 5 \sigma_y \\ \mathbf{b} &= 2 \sigma_x + 4 \sigma_y \\ \mathbf{r}_1 &= \sigma_x \quad \mathbf{r}_2 = \sigma_y \end{aligned} \quad \{47\}$$

liefert die folgende (2×2) -Matrizeninverse

$$\mathbf{D}_{\text{qua}}^{-1} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 4 & -2 \\ -5 & 3 \end{pmatrix} \quad \{48\}$$

Damit berechnet sich der Produktionsvektor, der die Herstellungsmengen der beiden Endprodukte angibt, zu:

Zweites Beispiel: Aufgabenstellung

In einer Fabrik werden zwei verschiedene Endprodukte P_1 und P_2 hergestellt. Zur Herstellung dieser beiden Endprodukte werden die folgenden Mengen dreier verschiedener Rohstoffe R_1 , R_2 und R_3 benötigt:

- 3 ME von R_1 , 5 ME von R_2 und 4 ME von R_3 zur Herstellung einer ME von P_1
- 2 ME von R_1 , 4 ME von R_2 und 8 ME von R_3 zur Herstellung einer ME von P_2

Berechnen Sie die Mengen der Endprodukte P_1 und P_2 , die hergestellt werden, wenn genau 120 ME des ersten Rohstoffes R_1 , 220 ME des zweiten Rohstoffes R_2 und 320 ME des dritten Rohstoffes R_3 während des Produktionsprozesses verbraucht werden.

Abb.4: Übersetzung der zweiten englischsprachigen Beispielaufgabe des Skripts [24, S. 33] ins Deutsche.

tige Lösung existiert, ist es weiterhin konsistent. Die Bedarfsmatrix

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} 3 & 2 \\ 5 & 4 \\ 4 & 8 \end{pmatrix} \quad \{51\}$$

ist nunmehr rechteckig und die Pauli-Vektoren weisen mit

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= 3 \sigma_x + 5 \sigma_y + 4 \sigma_z \\ \mathbf{b} &= 2 \sigma_x + 4 \sigma_y + 8 \sigma_z \\ \mathbf{r}_1 &= \sigma_x \quad \mathbf{r}_2 = \sigma_y \quad \mathbf{r}_3 = \sigma_z \end{aligned} \quad \{52\}$$

jeweils drei unterschiedliche Komponenten auf. Mit Hilfe von

$$(\mathbf{a} \wedge \mathbf{b})^{-1} = -\frac{1}{418} (\sigma_x \sigma_y + 12 \sigma_y \sigma_z - 8 \sigma_z \sigma_x) \quad \{53\}$$

und den beiden Dualen der Koeffizientenvektoren

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \mathbf{b} \sigma_x \sigma_y \sigma_z = 8 \sigma_x \sigma_y + 2 \sigma_y \sigma_z + 4 \sigma_z \sigma_x \\ \mathbf{N} &= \mathbf{a} \sigma_x \sigma_y \sigma_z = 4 \sigma_x \sigma_y + 3 \sigma_y \sigma_z + 5 \sigma_z \sigma_x \end{aligned} \quad \{54\}$$

kann nun die Verallgemeinerte Pauli-Algebra-Matrizeninverse $\{42\}$

$$\mathbf{D}^{-1} = \frac{1}{418} \begin{pmatrix} 68-12M & 94+8M & -64-M \\ -37+12N & -45-8N & 84+N \end{pmatrix} \quad \{55\}$$

berechnet werden.

Damit ergibt sich der Produktionsvektor der Herstellungsmengen der beiden Endprodukte erneut zu

$$\begin{aligned} \mathbf{p} &= \mathbf{D}^{-1} \mathbf{r} \\ &= \frac{1}{418} \begin{pmatrix} 68-12M & 94+8M & -64-M \\ -37+12N & -45-8N & 84+N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 120 \\ 220 \\ 320 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 20 \\ 30 \end{pmatrix} \quad \{56\} \end{aligned}$$

so dass wie gehabt 20 ME des ersten Endproduktes P_1 und 30 ME des zweiten Endproduktes P_2 hergestellt werden.

Da sich die bivectoriellen Anteile nach Gl. {35}

$$\mathbf{D}^- = \frac{1}{418} \begin{pmatrix} -12M & 8M & -M \\ 12N & -8N & N \end{pmatrix} \quad \{57\}$$

bei Multiplikation mit dem Ergebnisvektor des konsistenten Linearen Gleichungssystems {58}

$$\mathbf{D}^- \mathbf{r} = \frac{1}{418} \begin{pmatrix} -12M & 8M & -M \\ 12N & -8N & N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 120 \\ 220 \\ 320 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

gegenseitig kompensieren und so nichts zum Gesamtergebnis beitragen, entspricht das Ergebnis einer Multiplikation mit der Moore-Penrose-Matrizeninversen {34}, {36}

$$\mathbf{D}^+ = \frac{1}{418} \begin{pmatrix} 68 & 94 & -64 \\ -37 & -45 & 84 \end{pmatrix} \quad \{59\}$$

genau dem Ergebnis {56}: {60}

$$\mathbf{p} = \mathbf{D}^+ \mathbf{r} = \frac{1}{418} \begin{pmatrix} 68 & 94 & -64 \\ -37 & -45 & 84 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 120 \\ 220 \\ 320 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 20 \\ 30 \end{pmatrix}$$

Wie zu erwarten, erfüllt \mathbf{D}^+ alle vier Moore-Penrose-Bedingungen {20} [24, S. 53-56]:

$$\mathbf{D} \mathbf{D}^+ \mathbf{D} = \mathbf{D} = \begin{pmatrix} 3 & 2 \\ 5 & 4 \\ 4 & 8 \end{pmatrix} \quad \{61\}$$

$$\mathbf{D}^+ \mathbf{D} \mathbf{D}^+ = \mathbf{D}^+ = \frac{1}{418} \begin{pmatrix} 68 & 94 & -64 \\ -37 & -45 & 84 \end{pmatrix} \quad \{62\}$$

$$(\mathbf{D}^+ \mathbf{D})^T = \mathbf{D}^+ \mathbf{D} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \{63\}$$

$$(\mathbf{D} \mathbf{D}^+)^T = \mathbf{D} \mathbf{D}^+ = \frac{1}{418} \begin{pmatrix} 130 & 192 & -24 \\ 192 & 290 & 16 \\ -24 & 16 & 416 \end{pmatrix} \quad \{64\}$$

Und wie zu erwarten, erfüllt \mathbf{D}^- drei der vier Moore-Penrose-Bedingungen {20a,b,d} nicht:

$$\mathbf{D} \mathbf{D}^- \mathbf{D} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \neq \mathbf{D} \quad \{65\}$$

$$\mathbf{D}^- \mathbf{D} \mathbf{D}^- = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \neq \mathbf{D}^- \quad \{66\}$$

$$(\mathbf{D}^- \mathbf{D})^T = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = \mathbf{D}^- \mathbf{D} \quad \{67\}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{D} \mathbf{D}^- &= \frac{1}{418} \begin{pmatrix} -36M+24N & 24M-16N & -3M+2N \\ -60M+48N & 40M-32N & -5M+4N \\ -48M+96N & 32M-64N & -4M+8N \end{pmatrix} \\ &\neq (\mathbf{D} \mathbf{D}^-)^T \quad \{68\} \end{aligned}$$

Es ist jedoch noch eine offene Forschungsfrage, ob Verallgemeinerte Pauli-Algebra-Matrizeninverse \mathbf{D}^{-1} nicht vielleicht doch die vierte Moore-Penrose-Bedingung zu erfüllen in der Lage sind, falls eine Modifikation des Begriffs der konjugierten Transposition erfolgt. Letztendlich existieren in der Geometrischen Algebra sehr unterschiedliche komplexe Größen, die je nach Dimension unterschiedlich komplex zu konjugieren sind.

Didaktisch interessant ist aber auch ein weiterer Aspekt, der die Verallgemeinerte Pauli-Matrizeninverse \mathbf{D}^{-1} betrifft. Die Elemente dieser Inversen {55}

$$\begin{aligned} 68 - 12M &= 68 - 96 \sigma_x \sigma_y - 24 \sigma_y \sigma_z - 48 \sigma_z \sigma_x \\ &= 68 - 96i - 24j + 48k \\ 94 + 8M &= 94 + 64 \sigma_x \sigma_y + 16 \sigma_y \sigma_z + 32 \sigma_z \sigma_x \\ &= 94 + 64i + 16j - 32k \\ -64 - M &= -64 - 8 \sigma_x \sigma_y - 2 \sigma_y \sigma_z - 4 \sigma_z \sigma_x \\ &= -64 - 8i - 2j + 4k \quad \{69\} \\ -37 + 12N &= -37 + 48 \sigma_x \sigma_y + 36 \sigma_y \sigma_z + 60 \sigma_z \sigma_x \\ &= -37 + 48i + 36j - 60k \\ -45 - 8N &= -45 - 32 \sigma_x \sigma_y - 24 \sigma_y \sigma_z - 40 \sigma_z \sigma_x \\ &= -45 - 32i - 24j + 40k \\ 84 + N &= 84 + 4 \sigma_x \sigma_y + 3 \sigma_y \sigma_z + 5 \sigma_z \sigma_x \\ &= 84 + 4i + 3j - 5k \end{aligned}$$

können als Quaternionen mit den quaternionischen Basiseinheiten

$$i = \sigma_x \sigma_y \quad j = \sigma_y \sigma_z \quad k = -\sigma_z \sigma_x \quad \{70\}$$

gedeutet werden, so dass über diesen Zugang auch eine Motivation zur Diskussion quaternionischer Strukturen geschaffen werden kann.

Und auf jeden Fall geben Verallgemeinerte Matrizeninverse schon per se Anlass genug, über Möglichkeiten, über Grenzen und vor allem auch über noch nicht erschlossene Erweiterungen der Matrizenrechnung nachzudenken.

Sie können und sie sollten aber auch ein Anlass dafür sein, über Möglichkeiten, über Grenzen und über noch nicht erschlossene Erweiterungen unserer eigenen Themenfelder – der Physikdidaktik und der Fachphysik – in Bezug auf andere, physikferne Fachgebiete nachzudenken.

10. Literatur

- [1] Hestenes, David (2003): Oersted Medal Lecture 2002 – Reforming the Mathematical Language of Physics. In: American Journal of Physics, Vol. 71, No. 2, S. 104-121.
- [2] Einstein, Albert (1921): Geometrie und Erfahrung. Erweiterte Fassung des Festvortrages gehalten an der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin am 27. Jan. 1921. Verlag von Julius Springer, Berlin.
- [3] Pauli, Wolfgang (1927): Zur Quantenmechanik des magnetischen Elektrons. In: Zeitschrift für Physik, Vol.43, No. 9/10, S. 601-623.
- [4] Tomonaga, Sin-Itiro (1997): The Story of Spin. The University of Chicago Press, Chicago, London.
- [5] Pais, Abraham (2002): Inward Bound. Of Matter and Forces in the Physical World. Reprint of the paperback edition with corrections. Clarendon Press, Oxford & Oxford University Press, New York.
- [6] Hestenes, David (1967): Real Spinor Fields. In: Journal of Mathematical Physics, Vol. 8, No. 4, S. 798-808.
- [7] Grassmann, Hermann (1877): Der Ort der Hamilton'schen Quaternionen in der Ausdehnungslehre. In: Mathematische Annalen, Vol. 12, S. 375-386.
- [8] Grassmann, Hermann (1844): Die Wissenschaft der extensiven Grösse oder die Ausdehnungslehre, eine neue mathematische Disciplin. Erster Theil, die lineale Ausdehnungslehre enthaltend. Verlag von Otto Wigand, Leipzig.
- [9] Dadkhah, Kamran (2011): Foundations of Mathematical and Computational Economics. 2. Auflage, Springer Heidelberg, Dordrecht, London.
- [10] Schmidt, Karsten; Trenkler, Götz (2015): Einführung in die Moderne Matrix-Algebra. Mit Anwendungen in der Statistik. 3. Auflage, Springer Gabler, Berlin, Heidelberg.
- [11] Cline, Randall E. (1979): Elements of the Theory of Generalized Inverses for Matrices. UMAP Expository Monograph Series. Education Development Center, Newton, Massachusetts.
- [12] Ben-Israel, Adi; Greville, Thomas (2003): Generalized Inverses. Theory and Applications. CMS Books in Mathematics. 2. Auflage, Springer-Verlag, New York, Berlin.
- [13] Bernstein, Dennis S. (2009): Matrix Mathematics. Theory, Facts, and Formulas. Princeton University Press, Princeton, Oxford.
- [14] Horn, Martin Erik (2016): Inverse von Rechteck-Matrizen. In: Institut für Mathematik und Informatik der Pädagogischen Hochschule Heidelberg (Hrsg.): BzMU – Beiträge zum Mathematikunterricht 2016. Band 1, S. 457-460, WTM-Verlag, Münster.
- [15] Horn, Martin Erik (2016): More Examples of Non-Square Matrix Inverses. Übersetzte und ergänzte Fassung des Beitrags [14]. Elektronisch veröffentlicht als Anhang von [16], Url: www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/723/868 (17.12.2016).
- [16] Horn, Martin Erik (2016): Die Geometrische Algebra im Schnelldurchgang. In: PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung in Hannover 2016, Url: www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/723 (17.12.2016).
- [17] Horn, Martin Erik (2016): Moderne Lineare Algebra im wirtschaftsmathematischen Kontext. In: Walther Paravicini, Jörn Schnieder (Hrsg.): Hanse-Kolloquium zur Hochschuldidaktik der Mathematik 2015. Beiträge zum gleichnamigen Kolloquium an der Universität Lübeck, S. 103-129. WTM-Verlag, Münster.
- [18] Horn, Martin Erik (2018): Sind verallgemeinerte Moore-Penrose-Matrizeninverse vollständig? Eingereicht bei: BzMU – Beiträge zum Mathematikunterricht 2018. Beiträge zur GDM-Jahrstagung in Paderborn, WTM-Verlag, Münster.
- [19] Horn, Martin Erik (2014–2017): Modern Linear Algebra. A Geometric Algebra Crash Course. OHP-Folien der Kurse „Mathematics for Business and Economics“, LV-Nr. 200 691.01, Hochschule für Wirtschaft und Recht Berlin / Berlin School of Economics and Law. Part I: Basics & Introduction. Url: www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/626/794 (17.12.2015), Part II: Solving Systems of Linear Equations. Url: www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/626/795 (17.12.2015), Part III: The Direct Product & Solving Higher-Dimensional Systems of Linear Equations. Url: www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/626/796 (17.12.2015), Part IV: Transformation of Coordinates & Gaussian Method of Solving a System of Linear Equations. Url: www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/727/892 (17.12.2016), Part V: Eigenvalues and Eigenvectors. Url: www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/782/954 (22.12.2017), Part VI: Solving Systems of Linear Equations with Sandwich Products. Url: www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/801/956 (22.12.2017).
- [20] HWR Berlin (2017): Elektronisches Vorlesungsverzeichnis der Hochschule für Wirtschaft und Recht Berlin, Wintersemester 2017/2018. Url: www.hwr-berlin.de (30.10. 2017). Über die Link-Kette → *Studierendenportal* → *Campus4U* → *Module* → *Suche nach Modulen* und Eingabe der Modulnummer 200691 kann ohne Passworteingabe auf die frei zugänglichen Modulbeschreibungen zugegriffen werden.

- [21] Horn, Martin Erik (2018): Die Geometrische Algebra mit GAALOP im Schnelldurchgang. Beitrag DD 02.03 zur Frühjahrstagung 2018 des Fachverbands ‚Didaktik der Physik‘ der Deutschen Physikalischen Gesellschaft an der Universität Würzburg. Zur Veröffentlichung eingereicht bei PhyDid B.
- [22] Horn, Martin Erik (2018): Moderne Lineare Algebra: Geometrische Algebra mit GAALOP. Übungsblätter des Moduls „Wirtschaftsmathematik“ der Bachelor-Poolveranstaltungen an der HWR Berlin, LV-Nr. 200 601.07, überarbeitete und ergänzte Fassung vom 30. April 2018. Englische Fassung: Modern Linear Algebra: Geometric Algebra with GAALOP. Worksheets of the module „Mathematics for Business and Economics“ of joint first-year bachelor lessons at Berlin School of Economics and Law/Hochschule für Wirtschaft und Recht Berlin, LV-Nr. 200 691.01 & 400 691.01, Stand: 07. Jan. 2018, eingereicht als Anhang von Beitrag [21].
- [23] Horn, Martin Erik (2018, Zusatzdatei): Poster DD 02.35, „Verallgemeinerte Matrizeninverse und Moore-Penrose-Matrizeninverse aus physikdidaktischer Sicht“ vom 19. März 2018, siehe auch Url: www.dpg-verhandlungen.de/year/2018/conference/wuerzburg/part/dd/session/2/contribution/35 (01.03. 2018).
- [24] Horn, Martin Erik (2017, Zusatzdatei): Modern Linear Algebra. A Geometric Algebra Crash Course. Part VII: Generalized Matrix Inverses. OHP-Folien des Kurses „Mathematics for Business and Economics“ (Stand: 19. Dez. 2017), LV-Nr. 200 691.01, Wintersemester 2017/2018. Hochschule für Wirtschaft und Recht Berlin / Berlin School of Economics and Law.
- [25] Horn, Martin Erik (2018, Zusatzdatei): Poster SOE 7.02, „The Geometry of Moore-Penrose Generalized Matrix Inverses“ vom 12. März 2018, siehe auch Url: www.dpg-verhandlungen.de/year/2018/conference/berlin/part/soe/session/7/contribution/2 (01.03. 2018).
- [26] Horn, Martin Erik (2018, Zusatzdatei): Pauli Algebras in Economics: Econo-mathematics from Geometry to Didactics and back – The Geometry of Moore-Penrose Generalized Matrix Inverses. Short talk SOE 9.2 and poster presentation SOE 7.2 at the DPG Spring Meeting of the German Physical Society in Berlin 2018, Physics of Socio-Economic Systems Division.

Die Vermittlung von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie mittels Sektormodellen: Die Konstruktion von Geodäten

Sarah-Carina Keuchel, Ute Kraus, Corvin Zahn

Universität Hildesheim, Institut für Physik,
Universitätsplatz 1, 31141 Hildesheim,
keuche@uni-hildesheim.de, ute.kraus@uni-hildesheim.de, corvin.zahn@uni-hildesheim.de

Kurzfassung

Sektormodelle sind Werkzeuge, die es ermöglichen Schüler/innen in Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie einzuführen. Mittels Videoanalyse untersuchen wir, wie Schüler/innen die Konstruktion von Geodäten auf Sektormodellen erlernen, bis sie in der Lage sind, die Konstruktion selbstständig durchzuführen. Anhand von Sektormodellen gekrümmter Flächen werden die Akzeptanz des Unterrichtsmaterials, seine Handhabung sowie das Verständnis der Schüler/innen für die Methode untersucht.

Abstract

Teaching Einstein's General Relativity with Sector Models: The Construction of Geodesics

Sector models are tools that make it possible to introduce students to Einstein's general relativity. Using video analysis we study how students acquire knowledge about constructing geodesics on sector models until they are able to perform the construction on their own. Using sector models of curved surfaces, the acceptance of the materials and their handling as well as the students' understanding of the method are investigated.

1. Einleitung

Für die Vermittlung der Allgemeinen Relativitätstheorie in der Schule wird ein Zugang benötigt, für den Schulmathematik ausreichend ist. Im Hinblick auf dieses Ziel haben wir Sektormodelle als Anschauungsmodelle für gekrümmte Flächen, Räume und Raumzeiten entwickelt sowie Lerneinheiten für den Einsatz von Sektormodellen in Schule und Studium erstellt (Zahn und Kraus (2014, 2018); Kraus und Zahn (2018)). Im Rahmen einer Masterarbeit (Keuchel (2017)) wurde eine Unterrichtseinheit zum Thema gravitative Lichtablenkung in unterschiedlichen Klassenstufen eines Gymnasiums durchgeführt und evaluiert. In dieser Unterrichtseinheit werden die Schüler/innen mit Hilfe von Sektormodellen schrittweise an die Thematik der Geometrie gekrümmter Flächen und schließlich gekrümmter Räume herangeführt. Zur Evaluation werden Videoaufnahmen, Arbeitsblätter und schriftliche Lernzielkontrollen ausgewertet. In zwei Unterrichtssequenzen dieser Einheit wird die graphische Bestimmung von Geodäten auf Sektormodellen behandelt. Wir berichten über die Ergebnisse der Evaluation dieser Unterrichtssequenzen. Drei Aspekte werden untersucht: Erstens wie es den Schüler/innen ge-

lingt eine beschriebene Vorgehensweise zum Einzeichnen von Geodäten zu übernehmen, zweitens die Möglichkeit eines eigenständigen Erschließens der Konstruktionsvorschrift und drittens die Akzeptanz der Materialien und ihrer Nutzung. Diese Arbeit ist ein Teil eines längerfristigen Design-Research-Projekts zur Didaktik der Allgemeinen Relativitätstheorie (Design-Based Research Collective (2003)).

2. Fragestellung

Den hier betrachteten Unterrichtssequenzen ist eine Sequenz vorangestellt, in der zunächst die Begriffe Krümmung (qualitative Unterscheidung von positiver, negativer und verschwindender Krümmung) und Geodäte besprochen und definiert wurden.

Unter einer Geodäte verstehen die Schüler/innen zum Zeitpunkt der Bearbeitung eine lokal gerade verlaufende Linie, welche in einer Fläche verläuft und weder nach links noch nach rechts abbiegt. Mit Hilfe von biegsamen Linealen haben die Schüler/innen Geodäten auf die Oberfläche eines Globus eingezeichnet (Abb. 1) und den Unterschied zwischen den Längen- und Breitenkreisen diskutiert. Die Schüler/innen haben gesehen, dass sich auf dem Globus zwei parallel startende Geodäten annähern.



Abb. 1: Zwei anfänglich parallel startende Geodäten auf der Oberfläche eines Globus.

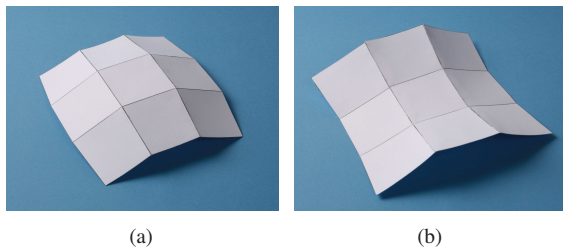


Abb. 2: Durch Flächenstücke angenäherte Kugelkalotte (a), Sattelfläche (b) (Zahn und Kraus (2014)).

Die Schüler/innen haben außerdem das Konzept des Sektormodells einer gekrümmten Fläche kennengelernt (Abb. 2 und 3): Eine Fläche wird durch kleine, ebene Flächenstücke angenähert; diese sind die Sektoren und werden in der Ebene zum Sektormodell ausgelegt.

In den hier betrachteten Unterrichtssequenzen arbeiten die Schüler/innen mit Sektormodellen einer Kugelkalotte, einer Sattelfläche und eines Torus. In der ersten Unterrichtssequenz sollen die Schüler/innen auf den in Abb. 3 gezeigten Sektormodellen einer Kugelkalotte und einer Sattelfläche Geodäten einzeichnen, deren Beginn durch Geradenstücke in einem Sektor des Modells vorgegeben ist. Abb. 4 zeigt die Lösung dieser Aufgabe.

Das richtige Einzeichnen einer Geodäte in ein Sektormodell erfordert hierbei 3 Aspekte, die beachtet werden müssen.

1. Innerhalb eines Sektors muss die Linie (Geodäte) geradlinig fortgesetzt werden.
2. Zum Weiterzeichnen in den Nachbarsektor muss dieser präzise an der gemeinsamen Kante angelegt werden.
3. Die lokal geraden Linien werden geradlinig über die Kante zum Nachbarsektor fortgesetzt.

Bei den Punkten 1 und 3 konnten bei den Schüler/innen keine Schwierigkeiten beobachtet werden, der Schwerpunkt der Untersuchung liegt deshalb auf Punkt 2. Insbesondere beim Übergang der Geodäte auf einen anderen Streifen muss der richtige Sektor

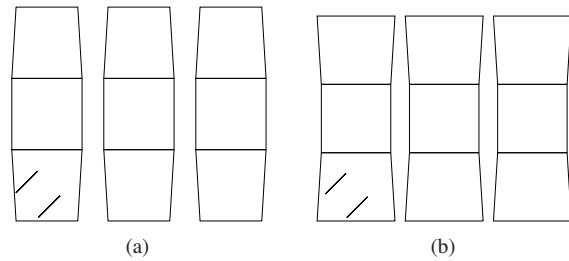


Abb. 3: Sektormodelle der Kugelkalotte (a) und der Sattelfläche (b) mit Startstrichen für Geodäten.

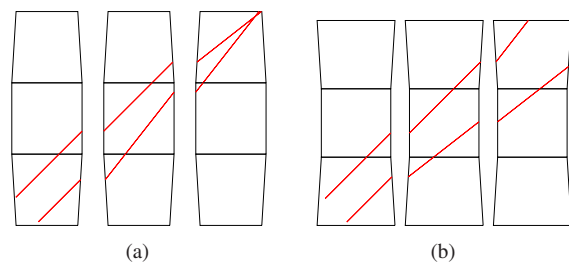


Abb. 4: Sektormodelle der Kugelkalotte (a) und der Sattelfläche (b) mit vervollständigten Geodäten.

des Nachbarstreifens an der Kante, an der die Geodäte einen Sektor verlässt, präzise angelegt werden, ungeachtet entstehender Lücken und Überlappungen bei den übrigen Kanten.

Nachdem in der ersten Unterrichtssequenz die Konstruktion von Geodäten erarbeitet und geübt wurde, soll dies in der zweiten Unterrichtssequenz an einem weiteren Beispiel, dem Sektormodell des Torus, selbstständig durchgeführt werden (Abb. 5).

Während in der ersten Unterrichtssequenz vorwiegend die Wissensaneignung im Vordergrund steht, soll bei der Aufgabe mit dem Sektormodell des Torus eine Aussage darüber erhalten werden, wie es den Schüler/innen gelingt mit den Werkzeugen umzugehen, welche Qualität die bei den vorherigen Modellen stattgefundenene Wissensaneignung hat und ob diese einen Transfer auf andere Sektormodelle zulässt. Eine besondere Herausforderung beim Torus besteht darin, dass die Fläche teilweise positiv und teilweise negativ gekrümmt ist, wodurch es bei dem Einzeichnen der Geodäten und korrekten Aneinanderlegen der Kanten bei den übrigen Sektoren je nach betrachtetem Bereich zu Lücken oder Überlappungen kommen kann.

In der Unterrichtseinheit wird die Konstruktion von Geodäten dazu benutzt, aus dem Verlauf parallel startender Geodäten die Krümmung einer Fläche zu bestimmen. Aus diesem Grund werden in den hier beschriebenen Aufgaben jeweils zwei parallel startende Geodäten konstruiert.

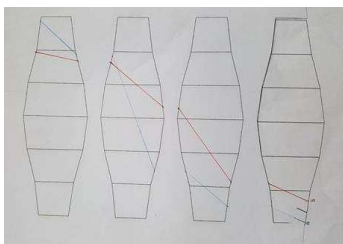


Abb. 5: Sektormodell des Torus mit eingezeichneten Geodäten.



Abb. 6: Zur Facettenfläche zusammengebasteltes Sektormodell eines Globus.

3. Ablauf

3.1. Unterrichtsablauf

Die gesamte Unterrichtseinheit wurden in fünf unterschiedlichen Kursen der Klassenstufen 6, 10, 11 (Seminarfach), 11 (Physikleistungskurs, nur 1. Unterrichtssequenz) und 12 durchgeführt. Die erste Unterrichtssequenz (Kugelkalotte und Sattelfläche) wurde von insgesamt 47 Schüler/innen, die zweite (Torus) von 54 Schüler/innen bearbeitet. Die Bearbeitung fand in Kleingruppen von 2-4 Schüler/innen statt. Im Kurs der Klassenstufe 10 wurden fünf Kleingruppen gebildet, in den anderen Kursen je drei. Aufgrund von Krankheitsfällen war ein Teil der Schüler/innen nur bei einer der beiden Sequenzen anwesend. Jede der beiden Unterrichtssequenzen wurde, je nach Klassenstufe, in ein bis zwei Unterrichtsstunden behandelt.

3.2. Datenerhebung

Für die schrittweise Rekonstruktion der einzelnen Arbeitsschritte der Schüler/innen dienen Videoaufnahmen sowie die bearbeiteten Sektormodelle der Schüler/innen. Da nicht von allen Gruppen Videodateien zur Auswertung herangezogen werden konnten, wurde im Fall fehlender Videoaufnahmen versucht, anhand der vervollständigten Modelle die Vorgehensweise der einzelnen Gruppen nachzuvollziehen. Die Videodateien umfassen bei der ersten Unterrichtssequenz 44 und bei der zweiten Unterrichtssequenz 29 Videoausschnitte. Diese wurden teils mit einem Camcorder, teils von den Schüler/innen selbstständig per Handy aufgenommen, was zugleich motivierende Aspekte beinhaltet hat.

4. Erste Unterrichtssequenz: Durchführung

4.1. Allgemeines

Nachdem mit den Schülerinnen im Vorfeld die Krümmung von Flächen besprochen wurde, werden nun gemeinsam Ideen für den Nachbau einer Kugeloberfläche (Globus) gesammelt. Die Schüler/innen werden hierbei auf die Unterteilungen des Globus durch ein Gradnetz, bestehend aus den Längen- und Breitengraden hingewiesen und es wird ihnen vor Augen geführt, dass die durch diese Unterteilung entstehenden Sektoren eine leichte Krümmung aufweisen. Durch das Prinzip der Näherung, in der alle Sektoren der Kugeloberfläche durch ebene Flächenstücke ersetzt wer-

den, wird den Schüler/innen ein nachgebautes Modell eines Globus (vgl. Abb. 6), einer Kugeloberfläche und einer Sattelfläche (Abb. 2) präsentiert. Es werden Vermutungen darüber formuliert, wie man Geodäten auf die Modelle einzeichnen könnte, ohne diese zu beschädigen.

Die Schüler/innen werden Schritt für Schritt dahin geführt, dass die Geodäten vor dem Zusammenbasteln auf die Sektormodelle gezeichnet werden müssen. Die hierbei zu wählende Vorgehensweise wird in den Kursen mit einer unterschiedlichen Ausführlichkeit behandelt. Während in der 6. Klasse eine sehr ausführliche Anleitung durchgeführt wird und die Kurse 11 (Seminarfach) und 12 ihr Vorgehen im Plenum diskutieren, wird den Kursen 10 und 11 (Leistungskurs) nur ein sehr geringer Input gegeben. Die erst genannten Kurse ermöglichen also eine Betrachtung dessen, wie es den Schüler/innen gelingt ein im Vorfeld besprochenes Verfahren zu übernehmen, während bei den letztgenannten Kursen ein eigenständiges Erschließen im Vordergrund steht.

Nach der Gruppenarbeitsphase erfolgt in allen Kursen eine knappe Ergebnissicherung am Overheadprojektor.

4.2. Methode der Auswertung

Für die Auswertung der Gruppenarbeit wurden zunächst die von den Schüler/innen und mit dem Camcorder aufgenommenen Videos betrachtet und die einzelnen Handlungsabläufe und Diskussionen dokumentiert. Auf ein detailliertes Transkribieren der Gespräche wurde verzichtet, da die Qualität der Dateien nur eine eingeschränkte auditive Dokumentation zuließ und eine Beschreibung der zu beobachtenden Handlungen sinnvoller erschien.

Zusätzlich zur Analyse der Videodateien wurden die bearbeiteten Sektormodelle der einzelnen Gruppen genutzt, um das auf dem Video gezeigte Vorgehen nachzuvollziehen und weitere Rückschlüsse auf das Vorgehen der Schüler/innen zu ziehen. Hilfreich waren die bearbeiteten Sektormodelle vor allem bei den Gruppen, für die keine Videodateien zu einer Gruppe vorlagen. Für den Kurs der Klassenstufe 10 liegen die

Videos nur für eine Gruppe komplett vor, während sie für zwei Gruppen ganz fehlen.

Für eine objektive Bewertung der einzelnen Vorgehensweisen der Gruppen wurden im Vorfeld kleinschrittige Kriterien formuliert. Diese Überprüfungs-kriterien wurden so formuliert, dass sie sowohl auf die Kurse anwendbar sind, bei denen das Übernehmen des Algorithmus in Vordergrund stand, als auch auf die, bei denen das eigenständige Erarbeiten ausschlaggebend war. Dieses ermöglichte im weiteren Vorgehen eine bessere Vergleichbarkeit.

Neben dem korrekten Anlegen der einzelnen Sektoren sollte zudem geprüft werden, ob die Schüler/innen die Geodäten linear über die Sektorunterteilungen eines Sektorstreifens hinweg zeichnen oder aber mit dem Ende eines Sektors auch die Geodäte beendet wird und ob sie die einzelnen Sektorstreifen unterschiedlich bearbeiten. Die Kriterien wurden hierbei so formuliert, dass sie die einzelnen Handlungsschritte des Algorithmus genau widerspiegeln. Es wird genau darauf Bezug genommen, welcher Sektor eines Sektorstreifens an den zugehörigen Sektor des nachfolgenden Sektorstreifens angelegt werden muss oder aber welche Sektoren eine Geodäte auf einem Sektorstreifen passiert und verlässt.

Um eine Vergleichsmöglichkeit hinsichtlich der eigenständigen Bearbeitung und dem Anteil der Lehrperson an der Ergebnisfindung zu erhalten, fand zusätzlich eine Einteilung der Gruppen in Niveaustufen statt. Dieses ermöglichte unter anderem einen Vergleich in den Gruppen, bei denen es ausschließlich um die Übernahme des Algorithmus ging. Es wurden folgende Niveaustufen gewählt:

Niveau 0: Keine Bearbeitung.

Niveau 1: Den Schüler/innen gelingt es nicht eigenständig Vermutungen aufzustellen wie die Geodäten in die Sektormodelle eingezeichnet werden können. Unter Anleitung der Lehrperson können sie Schritt für Schritt die Geodäten in die jeweiligen Sektormodelle einzeichnen.

Niveau 2: Die Schüler/innen entwickeln selbstständig Vermutungen, wie man zwei anfänglich parallele Geodäten in das Sektormodell einzeichnen kann; diese sind jedoch nicht zielführend. Den Schüler/innen gelingt es gemeinsam mit der Lehrperson, die Geodäten in die Sektormodelle einzuzeichnen.

Niveau 3: Die Schüler/innen erkennen, dass es nicht richtig wäre, die Sektormodelle für das Einzeichnen symmetrisch zu positionieren und mit dem Lineal in einem Zug eine Gerade über alle Sektorstreifen zu ziehen. Mit einer kurzen Hilfestellung der Lehrperson gelingt es den Schüler/innen, die Geodäten in das Sektormodell einzuzeichnen.

Niveau 4: Die Schüler/innen erkennen, dass beim Einzeichnen von Geodäten in Sektormodelle die Sektoren mit ihren Kanten genau aneinandergelagt werden müssen. Sie können dieses jedoch nicht ganz fehlerfrei auf beide Sektormodelle selbstständig übertragen.

Niveau 5: Die Schüler/innen können die beiden anfänglich parallelen Geodäten in beide Sektormodelle richtig einzeichnen. Sie legen hierzu entweder die Sektoren mit ihren Kanten genau aneinander oder verwenden alternative zielführende Ideen.

5. Erste Unterrichtssequenz: Ergebnisse

5.1. Fall 1: Übernahme des Algorithmus (Kurse der Klassenstufen 6, 11 (Seminarfach), 12)

In den Kursen der 6. und der 12. Klasse sind die Schüler/innen in der Lage das Verfahren zum Einzeichnen von Geodäten in Sektormodelle richtig zu übernehmen. Das Sektormodell der Sattelfläche wurde in der 6. Klasse nicht von allen Kleingruppen bearbeitet. In der 12. Klasse zeigten sich häufigere Diskussionen als beim Sektormodell der Kugelkalotte. Einzelnen Schüler/innen gelingt es nicht auf Anhieb, die Geodäten richtig in die Modelle einzuzeichnen. Bei einer Gruppe ist zu beobachten, wie die Schüler/innen durch gegenseitige Erklärungen und Unterstützung selbstständig in der Lage sind sich zu korrigieren und richtige Ergebnisse zu erreichen.

In dem Kurs der 11. Klasse (Seminarfach) gelingt es zwei der drei Gruppen, beide Sektormodelle vollständig zu bearbeiten. Einer Gruppe gelingt es, auf der Sattelfläche eine Geodäte mit der richtigen Sektoranordnung zu konstruieren. Für die zweite Geodäte wird von ihnen fälschlicherweise die gleiche Anordnung eingesetzt. Eine der drei Gruppen nimmt den bereitgestellten Globus zu Hilfe, auf den modellhaft Sektoren sowie eine Geodäte durch die Lehrperson aufgezeichnet werden. Diese Darstellung ermöglicht den Schüler/innen den Transfer auf das Sektormodell.

Deutlich wird, dass es sowohl den Schüler/innen der höheren Klassenstufen, als auch den Schüler/innen der Klassenstufe 6 gelingt, die Geodäten in das Modell einzuzeichnen. Es gelingt ihnen einen zuvor im Plenum erarbeiteten Algorithmus für das Einzeichnen einer Geodäte sowohl in das Sektormodell einer Kugeloberfläche zu übernehmen, als auch auf das Modell der Sattelfläche zu transferieren.

Hinsichtlich der Niveaustufen erreichen alle Gruppen der 12. Klasse die 5. Stufe, ebenso je eine Gruppe der Klassenstufen 6 und 11. Die beiden anderen Gruppen der 6. Klassenstufe werden, da sie die Sattelfläche nicht als Aufgabe bearbeitet haben, der Niveaustufe 4 zugeordnet. Eine Gruppe der 11. Klasse hat ebenfalls Niveaustufe 4; dieser gelingt keine vollständige Bearbeitung der Sattelfläche. Die Gruppe der 11. Klasse, die den Globus zu Hilfe nahm, wird der 3. Niveaustufe zugeordnet. Die Gruppenmitglieder zeigen

zu Beginn leichte Verständnisschwierigkeiten in Bezug auf das Vorgehen beim Einzeichnen der beiden Geodäten. Dieses bedeutet jedoch nicht zwangsweise, dass die Schüler/innen schlechter abschneiden, als Schüler/innen einer anderen Gruppe. Dadurch, dass die Herleitung eines möglichen Vorgehens jeweils im Plenum stattfand und die Schüler/innen den präsentierten Algorithmus nun anwenden und übernehmen sollen, kann nicht automatisch auf das Durchdringen des Inhalts durch die Schüler/innen geschlossen werden und darauf, dass sie genau verstanden haben, wieso man so vorgeht wie es mittels Overheadprojektor gezeigt wurde. Das Nachfragen und die Diskussionsbereitschaft der Schüler/innen zeigen, dass sie verstehen wollen, wieso man das gewählte Vorgehen verwendet.

5.2. Fall 2: Selbstständiges Erarbeiten des Algorithmus (Klassen 10, 11(Leistungskurs))

Große Unterschiede zeigen sich zwischen der 10. Klasse und dem Leistungskurs. In der 10. Klasse gelingt es nur zwei von fünf Gruppen die Geodäten in das Sektormodell der Kugeloberfläche einzuzeichnen und von diesen nur einer, den Algorithmus richtig auf die Sattelfläche anzuwenden. Bei dem Leistungskurs hingegen können alle Gruppen die Geodäten richtig in beide Sektormodelle einzeichnen. Lediglich eine Gruppe weist Fehler bei dem Einzeichnen in die Sattelfläche auf. Es werden an dieser Stelle die Sektoren für das Einzeichnen der zweiten Geodäte nicht erneut ausgerichtet.

Auffallend ist, dass bei allen Gruppen des Leistungskurses der Globus selbstständig als Hilfsmittel herangezogen wird. Auch ein Anheben der Sektorstreifen und anfängliches Nachbauen des zusammengebastelten Modells wird von den Schüler/innen zur Lösungsfindung in einer Gruppe eingesetzt.

Bei der 10. Klasse zeigt sich bei der Gruppe, der es gelingt in beiden Modellen die Geodäten zu vervollständigen, ein zunächst freihändiges skizzenhaftes Einzeichnen. Sie heben ähnlich wie die Gruppe des Leistungskurses zunächst die Sektorstreifen an und legen sie annähernd so aneinander, wie sie bei dem zusammengebastelten Modell aneinandergrenzen würden und zeichnen die Geodätenverläufe ein. Ihr Vorgehen erweist sich als zielführend. Eine andere Gruppe kann auf keinem der Sektormodelle die Geodäten vervollständigen. Auffällig ist, dass auch nach einem Verweis auf den Globus und seiner Zuhilfenahme die Schüler/innen nicht in der Lage sind, die Sektormodelle korrekt zu bearbeiten. Trotz ihres Wissens darüber, dass eine symmetrische Anordnung der Sektorstreifen mit dem Aneinanderlegen der mittleren Sektoren und ein Verlängern der Geodäten mit dieser Anordnung nicht zielführend ist, werden die Geodäten auf diese Weise ergänzt, da die Gruppe keine anderen Lösungswege findet.

Einer weiteren Gruppe gelingt es nach einem an-

fänglichen Input der Lehrperson, die Geodäten richtig auf die Kugeloberfläche einzuzeichnen. Sie ist jedoch nicht in der Lage, das Vorgehen vollständig auf die Sattelfläche zu übertragen. Es gelingt den Schüler/innen dieser Gruppe die erste Geodäte richtig in die beiden ersten Sektorstreifen einzuzeichnen, jedoch missachten sie die benötigte Neuausrichtung der Sektoren für das Einzeichnen der zweiten Geodäte und behalten die für die erste Geodäte gewählte Ausrichtung bei. Bei einer weiteren Gruppe werden auf der Sattelfläche die Geodäten jeweils mit der Anordnung der Sektoren gezeichnet, die für die andere Geodäte richtig wäre; für die Bearbeitung der Kugeloberfläche liegen für diese Gruppe keine Daten vor. Das von der letzten Gruppe bearbeitete Sektormodell der Kugeloberfläche weist mehrere Versuche eines möglichen Einzeichnens auf. Es liegen für diese Gruppe leider keine Videodateien zur Verfügung, weshalb versucht wurde, anhand des fertig bearbeiteten Sektormodells Rückschlüsse auf das Vorgehen zu ziehen. Von den Schüler/innen wurden insgesamt vier Geodäten eingezeichnet, zwei in grün und zwei mit Bleistift. Die Schüler/innen haben offensichtlich die Sektorstreifen auf zwei verschiedene Weisen zusammengelegt (einmal an den mittleren Sektoren, einmal an den unteren Sektoren) und mit jeder Anordnung zwei Geodäten gezeichnet.

Zwei Gruppen des Leistungskurses erreichen die 5. Niveaustufe und eine die vierte. Von den Gruppen der 10. Klasse erreicht eine die 5. Niveaustufe und eine weitere, bei der eine Einleitung durch die Lehrperson nötig war, das weitere Vorgehen bei der Kugeloberfläche jedoch selbstständig erarbeitet werden konnte, die 1. Niveaustufe.

5.3. Zusammenfassung der Ergebnisse

Bei allen betrachteten Kursen lassen sich Gruppen finden, denen es gelingt die Geodäten korrekt in dem jeweiligen Sektormodell zu ergänzen. Eine sehr positive Resonanz zeigt sich bei der Übernahme des im Vorfeld präsentierten Algorithmus, ein überraschendes Ergebnis liefert hierbei die positive Resonanz der 6. Klasse. Des Weiteren beweist das Ergebnis des Leistungskurses, dass Schüler/innen durchaus in der Lage sind, sich die Vorgehensweise selbstständig anzueignen. Unterschiede bestehen jedoch je nach Klassenstufe. Anhand einer Gruppe der 10. Klasse wird deutlich, dass es einigen Schüler/innen zwar gelingt eine Geodäte durch richtige Ausrichtung der einzelnen Sektoren in das Sektormodell einzuzeichnen, dass ihnen aber nicht klar ist, dass mit dem Einzeichnen einer weiteren Geodäte eine neue Ausrichtung der Sektoren nötig ist. Neben dem anfänglichen Nachbauen der Flächen zeigt sich auch ein kleinschrittiges Anleiten durch die Lehrperson als hilfreich. Angeleitete Fragestellungen wie z. B., in welchen Sektoren die Geodäten weiterlaufen würden, wenn sie einen Sektor verlassen würden, helfen den Schüler/innen beim

Diskutieren und beim Finden von Lösungen. Von den Schüler/innen wurden eigenständig zielführende Vorgehensweisen angewandt, etwa die Sektorstreifen der Kugelkalotte auf den Globus oder auf das zusammengebastelte Sektormodell zu legen, um den potenziellen Verlauf der Geodäte nachvollziehen zu können. Trotz Hilfestellung durch die Lehrperson gelingt es nicht allen Schüler/innen der 10. Klasse, die Geodäten zu vervollständigen.

Der prozentual am stärksten vertretene Fehler war ungenaues Zeichnen, welches auf eine teils schwierige Handhabung der Sektorausschnitte zurückzuführen ist. Neben diesem lassen sich weitere Fehler beobachten, wie zum Beispiel das Ausmitteln von aneinandergrenzenden Sektorstreifen. In diesem Fall werden die Kanten der für die Konstruktion benötigten Sektoren von den Schüler/innen nicht genau aneinander gelegt, sondern die betroffenen Sektorstreifen werden in etwa passend aneinander geschoben und dadurch entstehende Ungenauigkeiten akzeptiert. Ein Ausmitteln ist bei diesem Durchgang jedoch nur kurzzeitig bei einer Gruppe der 12. Klasse zu finden. Häufiger zu beobachten ist, dass die Sektorstreifen mit den jeweils untersten Sektoren aneinander gelegt werden oder aber eine richtige Ausrichtung der betroffenen Sektoren für eine Geodäte stattfindet, jedoch fälschlicherweise eine andere Geodäte konstruiert wird, für die eine andere Ausrichtung nötig wäre. Beide Fehler lassen sich nur bei den Kursen 10 und 11 beobachten. Auffallend ist, dass sich bei der Konstruktion vorwiegend Fehler bei dem korrekten Anlegen der Sektoren, nicht aber bei dem gradlinigen Einzeichnen der Sektoren auf den Sektorstreifen ergeben. Aus diesem Grund wird für die Analyse der Aufgabe zum Sektormodell des Torus in der zweiten Unterrichtssequenz ein stärkeres Gewicht auf das Aneinanderlegen der Sektoren gelegt.

6. Zweite Unterrichtssequenz

6.1. Allgemeines

Das Sektormodell des Torus wurde von den Schüler/innen der verschiedenen Kurse jeweils eine Woche nach den Sektormodellen der Kugeloberfläche und der Sattelfläche bearbeitet. Die Bearbeitung des Sektormodells fand zu Beginn der Stunde statt und es wurde keine Wiederholung des Inhalts vorangestellt.

6.2. Methode der Auswertung

Beim Einzeichnen von Geodäten auf dem Sektormodell des Torus wurde eine ähnliche Auswertung gewählt, wie bei den vorherigen gekrümmten Flächen. Die einzelnen Videoausschnitte wurden auch hier zunächst betrachtet, die zu beobachtenden Handlungsschritte und Gespräche dokumentiert und die bearbeiteten Sektormodelle für eine genauere Analyse herangezogen.

Da im Zusammenhang mit dem Sektormodell des Torus vorwiegend getestet werden sollte, ob die Schü-

ler/innen mit dem Werkzeug umgehen können, wurden bei der Auswertung die folgenden beiden Aspekte betrachtet. Zum einen, ob die Schüler/innen verstanden haben, wie man die einzelnen Sektoren der positiv und negativ gekrümmten Fläche aneinander legt und zum anderen, ob sie jeweils die Geodäten verlängern können. Um eine objektive Entscheidung zu treffen, fand auch hier eine Beurteilung anhand unterschiedlicher im Vorfeld formulierter kleinschrittiger Kriterien statt. Diese beziehen sich auf eine detaillierte Beschreibung, welche Kanten von welchen Sektoren eines jeweiligen Sektorstreifen genau aneinander gelegt werden müssen, um eine richtige Konstruktion zu ermöglichen oder aber nehmen Bezug auf die Sektoren eines jeweiligen Sektorstreifens, in denen die beiden Geodäten verlängert werden müssen. Da bereits bei der Gruppenarbeitsphase zu der Kugeloberfläche und Sattelfläche das Verlängern der Geodäten auf den einzelnen Sektorstreifen keine weiteren Schwierigkeiten zeigte und es auch bei diesem Sektormodell ersichtlich wird, dass die Schüler/innen in der Lage sind, die Geodäten gradlinig zu zeichnen, rückten bei der weiteren Auswertung die Kriterien in den Fokus, die sich darauf beziehen, welche Sektorkanten aneinander gelegt werden müssen.

Um den Grad der selbstständigen Bearbeitung des Modells bei den Schüler/innen zu messen, fand zudem eine Betrachtung des Lehrereinsatzes und somit eine Bestimmung des Anteils der Lehrperson am Arbeitsweg statt. Für dieses wurde eine Einteilung in die folgenden Niveaustufen genutzt:

Niveau 1: Den Schüler/innen gelingt es durch eine Hilfestellung der Lehrperson, die Geodäten in das Sektormodell richtig einzuzeichnen.

Niveau 2: Die Schüler/innen erkennen, dass die Sektoren beim Einzeichnen von Geodäten mit den passenden Kanten genau aneinandergelegt werden müssen. Sie können die Geodäte jedoch nur in die Abschnitte richtig einzeichnen, in denen eine positive Krümmung der Fläche vorliegt. Für die übrigen benötigen sie Hilfe durch die Lehrperson.

Niveau 3: Die Schüler/innen können die Geodäten fast fehlerfrei in das Sektormodell einzeichnen und benötigen für die Korrektur eine kleine Hilfestellung durch die Lehrperson.

Niveau 4: Die Schüler/innen können beide Geodäten richtig in die Sektormodelle einzeichnen und legen hierzu die Sektoren mit ihren Kanten genau aneinander.

6.3. Ergebnis aller Kurse

Bei der Bearbeitung des Sektormodells des Torus gelingt es allen Schüler/innen der 11. und 12. Klasse die Geodäten selbstständig in das Sektormodell einzuzeichnen. Es sind hierbei keine Hilfestellungen durch

die Lehrperson nötig. Die Schüler/innen sind in der Lage den Algorithmus auf andere Anwendungsbeispiele zu transferieren. Gleiches gilt für die 6. Klasse. In jedem der drei Kurse lässt sich eine Gruppe finden, in der Schüler/innen versuchen, sich das zu untersuchende Modell durch ein Anheben der Sektorstreifen, durch Falten und Aneinanderlegen zu veranschaulichen. Auch bei der 10. Klasse sind im Vergleich zu den Sektormodellen der Kugeloberfläche und Sattelfläche deutliche Verbesserungen zu erkennen. Anhand der vorliegenden Datensammlung der einzelnen Gruppen zeigt sich, dass es allen Gruppen gelingt mindestens eine Geodäte richtig in das Sektormodell einzuzichnen. Lediglich von einer Gruppe der 10. Klasse, der es gelingt sowohl das Modell der Kugeloberfläche als auch der Sattelfläche zu vervollständigen, stehen keine Videodateien zum Sektormodell des Torus zur Verfügung. Betrachtet man die Bearbeitung des Sektormodells des Torus in den einzelnen Gruppen der 10. Klasse, wird bei einer der Gruppen deutlich, dass die Schüler/innen zunächst versuchen die Geodäten durch eine Ausmittlung der Sektorstreifen im negativ gekrümmten Teil der Fläche einzuzichnen. Sie vernachlässigen hierbei die benötigte Neuausrichtung der Sektorstreifen, um die beiden Geodäten von dem ersten auf den zweiten Sektorstreifen fortzuführen. Bei den nachfolgenden Übergängen ist jedoch eine richtige Ausrichtung und Konstruktion zu beobachten. Durch einen Hinweis der Lehrperson auf ihren Konstruktionsfehler gelingt ihnen die Korrektur einer der beiden Geodäten, während die zweite unbeachtet bleibt.

Bei zwei weiteren Gruppen ist auffallend, dass die Schüler/innen sich gegenseitig korrigieren und bei dem Zeichnen der Geodäten unterstützen. Während sich hier bei einzelnen Gruppenmitgliedern eine falsche Ausrichtung der Sektorstreifen zeigt, indem diese beispielsweise alle an den unteren Sektoren aneinander gelegt werden, sind die übrigen Gruppenmitglieder in der Lage diese Fehler zu korrigieren und die Geodäten richtig einzuzichnen. Größere Schwierigkeiten zeigen sich lediglich bei einer der Gruppen, der es bereits bei den vorherigen Sektormodellen schwer fiel, diese zu bearbeiten und ein Ergebnis zu erhalten. Ein Unterrichtsgespräch mit der Lehrperson macht deutlich, dass den Schüler/innen bekannt ist, dass das Aneinanderlegen von zwei Sektorkanten bei den übrigen Sektorkanten zu Überlappungen und Lücken führt. Sie verneinen eine Ausmittlung der Sektorstreifen und wissen, dass für das Zeichnen beider Geodäten unterschiedliche Sektorausrichtungen nötig sind. Hilfreich zeigt sich bei dieser Gruppe der Rat der Lehrperson, schrittweise vorzugehen und sich zu fragen in welchem Sektor die Geodäte münden würde, wenn sie einen angrenzenden Sektor verlässt. Unter der Zuhilfenahme des Globus gelingt den Schüler/innen die weitere Bearbeitung des Sektormodells selbstständig.

Auffallend ist bei den Gruppen der 10. Klasse, dass während der Bearbeitung die einzelnen Sektorstreifen immer wieder symmetrisch angeordnet werden. Alle Gruppen der Kurse 12, 11 und 6 erreichen die 4. Niveaustufe. Diese kann auch zwei Gruppen der 10. Klasse zugeordnet werden. In beiden Gruppen können die Schüler/innen durch gemeinsames Erarbeiten das richtige Ergebnis erzielen. Eine Gruppe wird der 1. Niveaustufe zugeordnet. Es gelingt ihnen durch eine schrittweise Anleitung durch die Lehrperson ein korrektes Einzeichnen der Geodäten.

Zwar können die Kurse 12, 11 und 6 das Sektormodell selbstständig bearbeiten, jedoch zeigen sich bei der 10. Klasse noch Schüler/innen, denen der Algorithmus nicht vollständig präsent ist. Die Arbeit in Gruppen ermöglicht jedoch einen Wissensaustausch wie auch eine gegenseitige Hilfestellung.

7. Fazit

Die Kurse, in denen der Algorithmus gemeinsam im Plenum erarbeitet und im Vorfeld besprochen wurde, erzielten deutlich bessere Ergebnisse als die Kurse, in denen eine eigenständige Erarbeitung stattfand. Bis auf einer Gruppe gelang es allen ihre zugeteilten Modelle vollständig zu ergänzen. Auch bei dem Leistungskurs, bei dem eine eigenständige Erarbeitung im Vordergrund stand, konnten in allen Gruppen gute Ergebnisse erzielt werden. Schwierigkeiten bereitete das eigenständige Erarbeiten der 10. Klasse. Es scheiterte hier nicht an dem gradlinigen Fortführen der Geodäten auf den Sektorstreifen, sondern an der Ausrichtung der einzelnen Sektoren. Die Sektorstreifen wurden bei der Konstruktion der Geodäten teils mit den unteren Sektoren aneinander gelegt oder aber eine passende Ausrichtung der Sektoren für eine Geodäte für weitere übernommen. Bei etwa 2-3 Gruppen kann bei den Schüler/innen von einem erarbeiteten Teilverständnis ausgegangen werden, eine vollständige Umsetzung war jedoch noch nicht möglich. Es scheint als gelinge es ihnen noch nicht, einen Zusammenhang zwischen dem zusammengebastelten Modell und den einzelnen Sektoren zu erstellen und von diesem auf die korrekte Ausrichtung der Sektoren zu transferieren. Ein ähnliches Beispiel lässt sich sehr gut an einer Gruppe des Leistungskurses beobachten. Es gelingt ihnen, die erste Geodäte fehlerfrei in das Modell einzuzichnen, es findet jedoch für die zweite Geodäte keine Neuausrichtung der Sektoren statt. Wir folgern aus den Ergebnissen, dass eine selbstständige Aneignung des Algorithmus durchaus möglich ist. Beachtet werden muss, dass den Schüler/innen genügend Zeit zur Verfügung gestellt wird. Auch wenn es einem Teil der Schüler/innen gelang, sich mit dem gestellten Material das Vorgehen eigenständig anzueignen, ist eine Überarbeitung der Materialien anhand der Evaluationsergebnisse in Planung. Die Gruppen der 10. Klasse hatten bei den Sektormodellen der Kugeloberfläche und der Sattelfläche Schwierigkeiten, zeigen aber

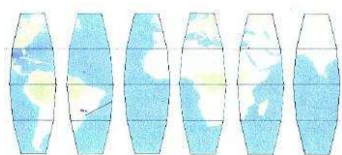


Abb. 7: Sektormodell einer Kugeloberfläche mit der Textur der Weltkugel.

beim Sektormodell des Torus wesentlich bessere Ergebnisse. Zwar liegen sie auch hier noch unter denen der übrigen Kurse, jedoch gelingt es allen Gruppen die Geodäten in das Sektormodell einzuzeichnen, was für die Ergebnissicherung nach der ersten Unterrichtssequenz spricht. Hinsichtlich der erhobenen Untersuchungen erscheint der Einsatz der Sektormodelle in der Schule für möglich und sinnvoll. Die Materialien ermöglichen den Schüler/innen neue Einblicke in die Physik, wie sie sonst in der Schule nicht so häufig zu finden sind.

Zusammenfassend stellen wir fest, dass das eigenständige Erarbeiten der Konstruktionsvorschrift, das wir als Merkmal für das Verständnis der Methode heranziehen, vier von acht Kleingruppen gelang (darunter alle drei Gruppen des Leistungskurses der 11. Klasse). Das Verständnis ist anspruchsvoll, aber für leistungsstärkere/ältere Schüler/innen erreichbar.

Das selbstständige, korrekte Anwenden gelang in der zweiten Unterrichtssequenz (Sektormodell des Torus) 12 von insgesamt 14 Kleingruppen; das Ziel ist somit in allen Klassenstufen erreichbar.

8. Ausblick

Die vorgestellte Evaluation der Unterrichtssequenzen zur Konstruktion von Geodäten auf Sektormodellen hat Hinweise für die Weiterentwicklung der Materialien und der Unterrichtseinheit geliefert.

Um Verständnisschwierigkeiten vorzubeugen und um das selbstständige Lernen der Schüler/innen zu unterstützen, könnten Sektormodelle einer Kugeloberfläche verwendet werden, auf denen das Abbild der Weltkarte aufgedruckt ist (Abb. 7). Die Grafik der Weltkugel soll den Schüler/innen helfen, besser zu verstehen, wieso die Kanten der einzelnen Sektoren genau aneinandergelegt werden müssen, um eine Geodäte auf diese einzuzeichnen. Wird zum Beispiel ein Land durch zwei Sektoren aufgeteilt, muss beachtet werden, dass eine Geodäte, die einen Sektorstreifen innerhalb eines Landes verlässt, im benachbarten Sektorstreifen wieder in diesem Land weiterläuft.

Eine weitere Möglichkeit wäre es, in ein Sektormodell eine Geodäte einzuzeichnen und den Schüler/innen das zusammengebastelte Modell zu präsentieren. Häufig zeigte sich während der Gruppenarbeit ein hohes Engagement der Schüler/innen darin, die Modelle zusammenbasteln zu wollen. Es ist empfehlenswert, sie das tun zu lassen. Die Schüler/innen kön-

nen so den Verlauf der Geodäten auf dem Modell erkennen und die Aufgabe würde an Abstraktion verlieren und Anschaulichkeit gewinnen.

Die Bearbeitung des Sektormodells des Torus stellt eine gute Festigung des Inhalts dar, da durch ihn sowohl positiv als auch negativ gekrümmte Flächen in einem Modell dargeboten werden und von den Schüler/innen das erworbene Wissen auf ein neues Sektormodell transferiert werden muss.

9. Literatur

Design-Based Research Collective 2003 Design-based research: an emerging paradigm for educational inquiry *Educ. Res.* **32** 5–8

Keuchel S 2017 Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie mit Sektormodellen – Durchführung einer Unterrichtseinheit und Evaluation der dort verwendeten Materialien in den Klassenstufen 6, 8, 10, 11 und 12 eines Gymnasiums, Masterarbeit, Universität Hildesheim.

Kraus U und Zahn C 2018 Sector models—A toolkit for teaching general relativity: III. Spacetime geodesics, submitted
Online version with supplementary material: www.spacetimetravel.org/sectormodels3

Zahn C und Kraus U 2014 Sector models—A toolkit for teaching general relativity: I. Curved spaces and spacetimes *Eur. J. Phys.* **35** (5) 055020
Online version with supplementary material: www.spacetimetravel.org/sectormodels1

Zahn C und Kraus U 2018 Sector models—A toolkit for teaching general relativity: II. Geodesics, submitted
Online version with supplementary material: www.spacetimetravel.org/sectormodels2

Die Beobachtung im Gefüge des Erkenntnisprozesses der Physik

Simon F. Kraus

Universität Siegen, Adolf-Reichwein-Straße 2, 57068 Siegen
kraus@physik.uni-siegen.de

Kurzfassung

Ein Blick in die geschichtliche Entwicklung der Physik zeigt, dass die systematische Naturbeobachtung lange Zeit eine herausragende Rolle für die Erkenntnisgewinnung spielte. In der heutigen Fachdidaktik sowie in den Lehrplänen ist die Bedeutung der Beobachtung, als eine Erkenntnismethode der Physik, jedoch auf ein bescheidenes Maß reduziert.

Im Beitrag wird aufgezeigt, an welchen Stellen und in welcher Form innerhalb des Erkenntnisprozesses der Physik sich Beobachtungen verorten lassen. Dazu wird der EJASE-Prozess nach Einstein, als eine Darstellung der naturwissenschaftlichen Arbeitsweise, herangezogen. Anhand ausgewählter historischer Beispiele wird dabei gezeigt, welche Besonderheiten (z.B. persönliche Einflüsse und Überzeugungen oder theoretische Annahmen) bei Beobachtungen zu berücksichtigen sind.

Die vielfältigen Beispiele, anhand derer die Bedeutung der Beobachtung deutlich wird, erfordern eine verstärkte implizite Berücksichtigung von Beobachtungsdaten im Schulunterricht sowie explizite Übungen im Beobachten. Damit wird eine wesentliche Erkenntnismethode der Naturwissenschaften nicht nur theoretisch zu vermitteln, sondern auch als methodisches Werkzeug zum Erkunden von Natur und Lebenswelt etabliert.

1. Motivation

Lässt man seinen Blick über die Entwicklung der Naturwissenschaften schweifen, so zeigt sich – neben dem Wechsel der inhaltlichen Schwerpunkte – ein Wechsel in den Methoden. Schon lange vor der Etablierung des Experiments als identitätsstiftendes Merkmal der Physik findet sich, als zentrales Instrument von Naturphilosophie und Astronomie, die Methode der Beobachtung. Mit der Einführung der experimentellen Methode, die zuvorderst durch Galileo Galilei (1564-1641) geleistet wurde, verschwindet jedoch die Beobachtung nicht etwa aus dem Repertoire der Physik. Vielmehr ist sie weiterhin ein essentieller Bestandteil der Forschungspraxis und stellenweise (man denke hier insbesondere auch an die Astrophysik) in Teilgebieten weiterhin das dominierende Instrument der Erkenntnisgewinnung.

Der Beitrag soll im Folgenden der Frage nachgehen, ob der aktuelle Stand von Lehre und Forschung an Schulen und Hochschulen der Bedeutung der Beobachtung als historische und moderne Form der Naturerkenntnis gerecht wird. Hierzu wird zunächst ein exemplarischer Blick auf derzeit gültige Lehrpläne geworfen. Es folgt die Darstellung eines Modells der Erkenntnisgewinnung der Physik, an dem sich die unterschiedlichen Ausprägungen und Zielsetzungen der Beobachtung aufzeigen lassen. Der Beitrag präsentiert weiterhin an drei historischen Beispielen, wie leicht sich einerseits Belege für die Praktikabilität des Modells finden lassen und wie andererseits das Verständnis von historischen Entwicklungen vereinfacht wird.

Abschließend werden kurze Denkanstöße gegeben, wie der Bedeutung der Beobachtung zukünftig angemessener Rechnung getragen werden kann.

2. Ein Blick in die Lehrpläne

Der Einblick in den gegenwärtigen Stand der Berücksichtigung auf schulischer Seite soll an dieser Stelle lediglich exemplarisch für das Land NRW erfolgen. Der beschränkten Aussagekraft von Lehrplänen für die tatsächliche Unterrichtspraxis ist sich der Autor wohl bewusst. Eine ausführliche Analyse steht bislang noch aus, jedoch ist eine deutliche Änderung des hier dargestellten Bildes nach einem ersten groben Überblick kaum zu erwarten.

Der Lehrplan Physik für die Sekundarstufe I führt als Kompetenzerwartung auf, dass Schülerinnen und Schüler physikalische Phänomene und Vorgänge beobachten und beschreiben und dabei Beobachtung und Erklärung unterscheiden können. [1, S. 17] In den einzelnen Inhaltsfeldern findet sich die Beobachtung dann noch einmal explizit, wenn es darum geht, mit Hilfe des Energiekonzepts Beobachtungen zu erklären. [1, S. 27]

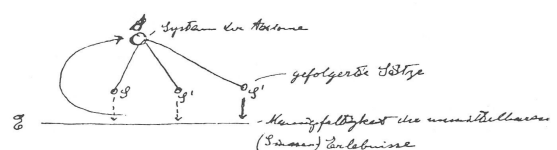


Abb. 1 Originalskizze des EJASE-Prozesses nach Einstein (Quelle: [3])

Für die Sekundarstufe II ergibt sich ein sehr ähnliches Bild: Mit der Kompetenz (E2) wird ein „kriteriengeleitetes [B]eobachten und [M]essen“ erwartet. [2, S. 22] Im Bereich der Inhaltsfelder sollen dann „Beobachtungen an der Elektronenbeugungsröhre“ interpretiert werden. [2, S. 46]

Auffällig ist hierbei, dass im Bereich der Inhaltsfelder die Beobachtung nur äußerst selten und darüber hinaus lediglich in indirekter Form auftritt. Ziel ist keineswegs die Sammlung von Beobachtungsdaten sondern ausschließlich ihre Deutung. Die Herkunft der Daten bleibt somit völlig im Dunkeln.

Es stellt sich nun die Frage, ob eine solche Herangehensweise der historischen und modernen Bedeutung dieser Beobachtungsmethode gerecht wird.

3. Ein Modell des Erkenntnisprozesses der Physik

Um die Bedeutung und die Vielfältigkeit von Erkenntnismethoden im Allgemeinen darstellen zu können, ist zunächst ein geeignetes Modell notwendig, das den Prozess der Erkenntnisgewinnung der Physik (oder der Naturwissenschaften im Allgemeinen) in einer zugänglichen Form darstellt.

Für den vorliegenden Beitrag soll der sog. EJASE-Prozess nach Albert Einstein (1879-1955) Verwendung finden, den dieser im Jahre 1952 in einem Brief an Maurice Solovine (1875-1958) niederschrieb. Zentrales Element des kurzen Briefes ist die in Abb. 1 wiedergegebene Skizze, mit ihren vier Hauptelementen:

- a) Der Ebene (E), die die „Mannigfaltigkeit der unterschiedlichen (Sinnes-) Erlebnisse“ darstellt,
- b) einer geschwungenen Kurve (im Weiteren als Jump (J) bezeichnet),
- c) dem System der Axiome (A) und
- d) den gefolgerten Sätzen (S, S', S'').

Auf diese Elemente soll nun im Einzelnen eingegangen werden. Die Ausführungen folgen dabei dem Wissenschaftshistoriker Gerald Holton, dem die Aufarbeitung und Erweiterung des Modells zu verdanken ist. [3] Ein erster Versuch, das Modell auch für die Didaktik nutzbar zu machen, geht auf Wilfried Kuhn zurück. [4]

Es sei vorab noch angemerkt, dass der gesamte Zyklus i. d. R. nicht von einem Wissenschaftler allein durchlaufen wird. Es handelt sich vielmehr um eine Reihe von Iterationen, die stückweise zum Aufstellen und zur Weiterentwicklung von Theorien sowie zu deren Prüfung von verschiedenen Personen oder Personengruppe über unterschiedlich lange Zeiträume hinweg durchlaufen wird.

3.1. Die Ebene der Sinneserlebnisse

Einstein bemerkt zu den Sinneserlebnissen schlicht, dass uns diese gegeben seien. Man muss sich (E) als

unendlich ausgedehnte Linie vorstellen, auf der sich die Gesamtheit aller möglichen Erfahrungstatsachen und Beobachtungen findet. Dabei muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass Einstein den Begriff der Sinneserfahrungen sehr weit fasst: Für ihn waren etwa die Unmöglichkeit des perpetuum mobile, die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit oder auch die Äquivalenz von träger und schwerer Masse Sinneserfahrungen. Ob man sich einem derart ausgedehnten Begriff der Erfahrung anschließen möchte, soll an dieser Stelle dem Leser überlassen bleiben.

Einstein liefert an anderer Stelle seine Vorstellung von der Aufgabe der Wissenschaft: „Wissenschaft ist der Versuch, die chaotische Vielfalt unserer Sinneserfahrungen in ein logisch einheitliches Gedankensystem einzubauen.“ [5]

Wie aber lässt sich Ordnung in das Chaos bringen?

3.2. Der Gedankensprung

Ein ganz wesentliches Element des Prozesses bleibt bei Einstein selbst ohne eigene Bezeichnung. Es handelt sich um den großen geschwungenen Pfeil, der die Ebene der Sinneserlebnisse mit dem System der Axiome verbindet. Holton bezeichnet ihn (aus dem englischen Original kommend) mit J. Bei diesem gedanklichen Sprung, den der Wissenschaftler auf seiner Suche nach neuen Impulsen für die Weiterentwicklung von Theorien machen muss, handelt es sich um teils wilde Spekulationen, Vermutungen, plötzliche Inspirationen, leise Ahnungen oder eine Art von Vorgefühl. Sie mögen durchaus auch einer verzweifelten Suche entspringen. Es handelt sich bei diesem Umschreiben allesamt um Begriffe, die klassischerweise sicherlich nicht mit einem naturwissenschaftlichen Vorgehen in Verbindung gebracht werden dürften.

Für Einstein ist es ein zentrales Anliegen darauf hinzuweisen, dass eben kein logischer Weg von den Erfahrungen (E) zu den Axiomen (A) führt. Ferner ist darauf hinzuweisen, dass Begriffe – die mit den Axiomen hier auf einer Ebene stehen und die Basis jeder Theorie bilden – nicht identisch mit den Sinnesempfindungen sind. Es handelt sich vielmehr um eine Art von Generalisierungen und Abstrahierungen, die zwar mit den „Observablen verbunden“ [3, S. 120] jedoch nicht direkt aus diesen ableitbar sind. Hierzu wiederum Einstein:

„Zu diesen elementaren Gesetzen führt kein logischer Weg, sondern nur die auf Einfühlung sich stützende Intuition.“ [6, S. 143]

3.3. Sätze und Vorhersagen

Aus den (neuen oder modifizierten) Axiomen und Begriffen werden rein deduktiv Sätze und damit schließlich Vorhersagen abgeleitet. Dabei handelt es sich um einen rein logischen Prozess, der der Domäne der theoretischen Physik entspricht. Hierzu bemerkt Einstein:

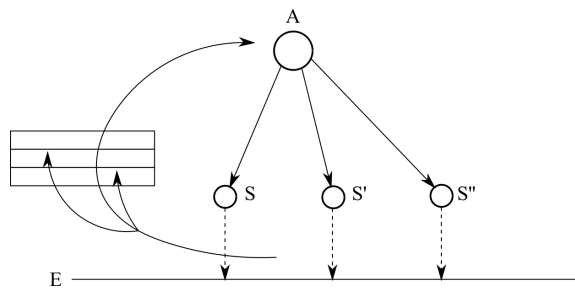


Abb. 2 EJASE-Prozess in der Modifikation nach Gerald Holton.

„Die Ratio gibt den Aufbau des Systems.“ [6, S. 151] Innerhalb des theoretischen Bereichs des EJASE-Prozesses ist naturgemäß kein Raum für Beobachtungen, weshalb er im Folgenden nicht weiter berücksichtigt und als „Theorieteil“ der experimentellen Methode bezeichnet wird.

3.4. Prüfung an der Erfahrung

Die Theorie liefert Vorhersagen, deren Prüfung an den Erfahrungstatsachen notwendig ist, um den Prozess vollenden zu können. Dabei ist eine Reihe von Unsicherheitsfaktoren zu berücksichtigen.

So ist es durchaus möglich, zu richtigen Vorhersagen zu kommen, die sich aus (aus der heutigen Perspektive) falsch gesetzten Axiomen ergeben. Man denke dabei etwa an die Phlogiston-Theorie.

Auch ist die erkenntnistheoretische Einschränkung zu berücksichtigen, nach der Theorien prinzipiell unbeweisbar sind und sich lediglich in der Anwendung als wiederholt nützlich und plausibel zeigen können.

Als dritte Einschränkung sei angeführt, dass experimentelle Ergebnisse und ebenso (instrumentengestützte) Beobachtungen grundsätzlich einer gewissen Unzuverlässigkeit unterliegen und damit häufig nur im Verbund als Testfall für Theorien infrage kommen.

3.5. Erweiterung des Modells

Um zu einem wirklich praktikablen Modell zu kommen, das u. a. auch die Besonderheiten von Beobachtungen adäquat abzubilden vermag, ist eine geringfügige Erweiterung des Modells erforderlich. Gerald Holton merkt zum EJASE-Prozess kritisch an, dass der Gedankensprung dem Wissenschaftler einerseits die Freiheit geben muss, einen solchen Sprung zu machen. Andererseits muss jedoch ebenso eine Beschränkung der Freiheit dafür sorgen, dass nicht jeder beliebige gedankliche Sprung vollführt wird. Wie sonst sollte schließlich in endlicher Zeit ein geeignetes Axiom oder ein neuer Begriff gefunden werden? Nach Holton sind dafür die von ihm so bezeichneten Filter notwendig (Abb. 2), die aufkeimende Ideen aussortieren und nur solche passieren lassen, die gewissen Kriterien genügen. Bei einem solchen Filter könnte es sich etwa um eine Grund-

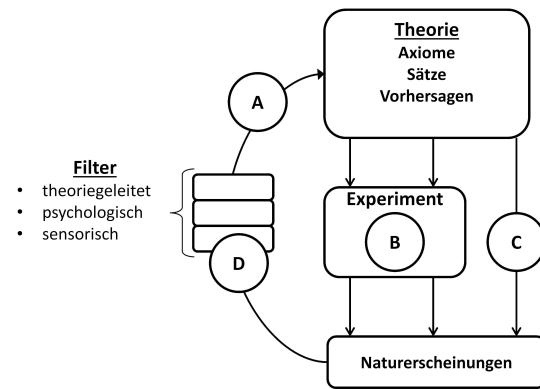


Abb. 3 Formen der Beobachtung innerhalb des EJASE-Prozesses.

überzeugung handeln, die sich etwa mit einem Paradigma nach Thomas Kuhn gleichsetzen ließe. [7] Als historisches Beispiel lässt sich Wolfgang Pauli anführen, dessen Festhalten an dem Prinzip (dem Paradigma) der Energieerhaltung ihn zur Postulierung des bis dahin unbekanntenen Neutrinos brachte.

Neben der persönlichen Überzeugung für die Gültigkeit bestimmter Prinzipien, kommen als mögliche Filter auch psychologische, physiologische (sensorische) oder auch theologische (man denke an Johannes Kepler) Einstellungen in Betracht. Die Aufzählung erhebt bei weitem nicht den Anspruch auf Vollständigkeit und kann zweifellos deutlich über die genannten Beispiele hinaus erweitert werden.

4. Zur Verortung der Beobachtung im EJASE-Prozess

Nach der theoretischen Vorbereitung soll nun im folgenden Abschnitt aufgezeigt werden, wo sich die Beobachtung als Methode im dargestellten Modell des Erkenntnisgefüges der Physik finden lässt (Abb. 3). Der Theorieteil des Modells (die Axiome und die daraus deduzierten Sätze) ist dabei in dieser Darstellung, wie bereits vorstehend angekündigt, unter dem Begriff Theorie subsumiert. Dazu gehören auch die aus den Sätzen gefolgerten Vorhersagen. Die Darstellung ist dafür um das Experiment, als eine (oder vielmehr: die zentrale) Methode des Abgleichs zwischen Theorie und Erfahrungsebene explizit erweitert.

Naturbeobachtung kann zunächst systematisch erfolgen, um Daten zur Weiterentwicklung von Theorien und Begriffen zu liefern (A). Auch ist die Beobachtung untrennbar mit dem Experiment verbunden und stets Teil experimenteller Untersuchungen (B). Eine Prüfung von Vorhersagen ist jedoch auch denkbar, ohne auf experimentelle Verfahren zurückgreifen zu müssen. Kommt die direkte Beobachtung zur Prüfung theoretischer Vorhersagen zum Einsatz, handelt es sich demnach um eine eigenständige Form der Beobachtung (C), die sich insbesondere in größtem Umfang in der Astrophysik und über lange Zeiträume hinweg auch in der Meteorologie finden



Abb. 4 Hurrikan Katrina über dem Golf von Mexiko. (Quelle: NOAA, gemeinfrei)

lässt. Insbesondere dort also, wo der Untersuchungsgegenstand prinzipiell unzugänglich bleibt bzw. nicht ohne Verlust von wesentlichen Eigenschaften skalierbar ist. Schließlich besteht als vierte Form die Möglichkeit, Beobachtungen speziell zur Schulung der Wahrnehmung, d.h. zur bewussten Modifikation der eigenen WahrnehmungsfILTER anzustellen (D).

5. Historische Beispiele

Anhand der nun folgenden historischen Beispiele sollen einzelne Aspekte der Beobachtung als Methode näher beleuchtet und mit dem vorgestellten EJASE-Prozess abgeglichen werden.

5.1. Beispiel 1: Atlantische Stürme

Bei dem Gedanken an Hurrikans mögen uns heute sofort die damit einhergehenden immensen Verwüstungen, die durch die Verfügbarkeit von entsprechendem Bildmaterial sehr eindringlich sind, vor dem inneren Auge erscheinen. Für viele wird auch die charakteristische Struktur eines solchen Sturms, als ein vertrautes Bild direkt im Gedächtnis aufblitzen (Abb. 4). Das Bild eines Hurrikans, als gegen den Uhrzeigersinn rotierendes und mit einem markanten Auge versehenes System, ist selbstredend im Wesentlichen ein Produkt der modernen Raumfahrt- bzw. Satellitentechnologie. Wie aber ging der Prozess der Erforschung derartiger Ereignisse vor sich, die aufgrund ihres erheblichen Bedrohungspotentials schon immer von gesteigertem Interesse waren und es noch immer sind?

5.1.1. Vorkenntnisse

Das Wissen um meteorologische Phänomene und Prozesse war lange Zeit sehr dürftig. Aufgrund des resultierenden leichten Zugangs zu Originalquellen, stellt dies aus heutiger Sicht jedoch einen willkommenen Vorteil dar.

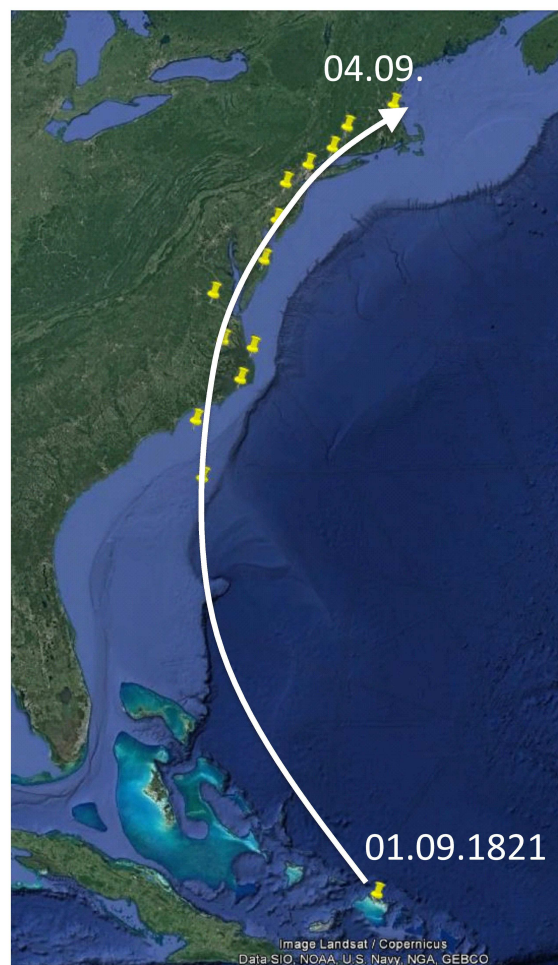


Abb. 5 Rekonstruktion der Route von 1821 aus den Daten von Redfield. (Quelle der Satellitenaufnahme: Google Earth)

Im Hinblick auf Stürme und Windsysteme sind die Passatwinde zwar seit langer Zeit bekannt, jedoch nur aus Sicht der praktischen Anwendung, da sie die Reise über den Atlantik erheblich verkürzen konnten. Stürme hingegen wurden lange Zeit als ein ortsfestes Phänomen aufgefasst. Erst Benjamin Franklin (1706-1790) wird zugeschrieben, erstmals die Zugrichtung eines Sturms nachträglich rekonstruiert zu haben. [8, S. 169] So war für ihn in Philadelphia eine Mondfinsternis, aufgrund eines Sturms und der damit einhergehenden geschlossenen Wolkendecke, unbeobachtbar, während die Finsternis in Boston noch beobachtet werden konnte, bevor der Sturm auch hier eintraf.

5.1.2. Weiterentwicklung durch W. Redfield

Eine deutliche Weiterentwicklung der Meteorologie gelang William C. Redfield (1789-1857) mit seiner Publikation von 1831. [9] Redfield war ausgebildeter Mechaniker und als Betreiber von Dampfschiffen auf dem Hudson-River tätig und hatte demnach keine klassische wissenschaftliche Laufbahn eingeschlagen. An dieser Stelle sei kurz auf Thomas Kuhn verwiesen, der die These aufstellt, dass fundamentale Weiterentwicklungen von Theorien meist solchen



Abb. 6 Elektrostatische Anziehung von Papierstücken durch eine Plexiglasscheibe.

Personen gelingen, die entweder sehr jung oder auf dem Gebiet der Forschung noch sehr neu sind. [7, S. 125]

Im Zuge des Hurrikans von 1821 (man beachte die lange Spanne zwischen dem eigentlichen Ereignis und der Publikation der Arbeit) bemerkte Redfield, dass in angrenzenden Bundesstaaten an der Ostküste der USA die Bäume an verschiedenen Orten in unterschiedliche Richtungen umgestürzt waren.

Er nahm diese Beobachtung zum Anlass, sich intensiver mit dem Sturm zu beschäftigen. Dabei zog er Parallelen zu Tornados, die er wohl völlig zurecht als „*common to most persons who are at all conversant with the subject of meteorology*“ bezeichnete. [9, S. 21] In seiner Publikation stellt er nun die Hypothese auf, dass das Phänomen einer rotierenden Luftmasse als ein skalierbares angenommen werden darf:

„*It is believed that no valid reason can be shown, why much larger masses of the atmosphere may not acquire, and develop, rotative movements [...]*“ [9, S. 22]

Ein rotierendes System allein konnte die Beobachtung jedoch nicht vollständig erklären, da die Bewegung des Systems als Ganzes noch unklar blieb. Redfield griff daher zusätzlich zu seinen eigenen Beobachtungen auf weiteres Material zurück, das ihm u. a. aus öffentlichen Quellen etwa in Form von Zeitungsberichten zur Verfügung stand. Damit war er in der Lage, die Zugrichtung des Sturms ausgehend von den Turks- und Caicosinseln, entlang der nördlichen Ostküste der USA zu rekonstruieren (Abb. 5). Dazu sammelte er insgesamt 39 Datensätze, aus denen jeweils hervorgeht, ob zu einer bestimmten Zeit im fraglichen Gebiet der Sturm spürbar war, aus welcher Richtung der Wind wehte und wie stark man ihn einschätzte.

Seine Annahme eines gewaltigen, rotierenden und sich langsam nach Norden bewegenden Sturmsystems schuf erstmals die Möglichkeit, die Beobachtungen (und nebenbei eine bekannte meteorologische Regel aus der Seefahrt) zwanglos zu erklären.

Es handelt sich bei Redfields Untersuchung um eine deutliche Demonstration, wie eine (direkte und indirekte) systematische Naturbeobachtung die Formulierung von neuen Axiomen und damit die Umformulierung einer Theorie erlaubt (entsprechend der Form A nach dem System in Abb. 3).

5.2. Beispiel 2: Elektrostatik

Ein Beispiel für eine vermeintlich einfache Beobachtung, die Teil jeder Unterrichtseinheit zur Elektrostatik sein dürfte, ist das Phänomen der elektrostatischen Abstoßung (Abb. 6). Führt man eine durch Reibung geladene Plexiglasscheibe an einige Papierschnipsel o. ä. heran, so zeigt sich, dass diese von dem Plexiglas angezogen werden. Einige Schnipsel bleiben an dieser kleben, viele „springen“ jedoch nach einem kurzen Kontakt mit nicht unerheblicher Geschwindigkeit zurück.

Die Erklärung des Phänomens durch die genannte Abstoßung gleichnamiger Ladungen ist mit den Mitteln der Physik der Sekundarstufe I problemlos möglich. Eine exakte Beobachtung des Vorgangs scheint uns die Erklärung geradezu aufzuzwingen.

Frühe Untersuchungen, etwa durch William Gilbert (1544-1603), legten jedoch einen anderen Schluss nahe. Für Gilbert und seine Zeitgenossen war unmittelbar klar, dass es sich beim Zurückprallen von Spreuteilchen von einem geladenen Stab um ein rein mechanisches Phänomen handelt. Die Elektrostatik erlaubte in Gilberts Augen lediglich eine anziehende Reaktion zwischen zwei Körpern. Das durchaus beobachtete Zurückprallen war demnach ein unbedeutender Randeffekt, der keinerlei Beachtung bedurfte.

Dieses knappe Beispiel veranschaulicht die oben erwähnte Schwierigkeit, dass aus einem fehlerhaften gesetzten Axiom („Es existiert lediglich eine anziehende Wirkung.“) eine scheinbar folgerichtige Beobachtung möglich wird (elektrostatische Anziehung gefolgt von gelegentlichem mechanischen Rückprall). Die historischen Beobachtungen dürfen uns aus moderner Sicht jedoch keineswegs Anlass zur Geringschätzung geben! Wiederum soll an dieser Stelle Thomas Kuhn angeführt werden:

„*Was ein Mensch sieht, hängt sowohl davon ab, worauf er blickt, wie davon, worauf zu sehen ihn seine visuell-begriffliche Erfahrung gelehrt hat.*“ [7, S. 153]

Gilbert *konnte* demnach gar nichts anderes beobachten, als das, was uns schließlich überliefert wurde.

5.3. Beispiel 3: Entdeckung der Röntgenstrahlen

Als letztes Beispiel für eine weitere Form der Beobachtung soll die Entdeckung der Röntgenstrahlen durch Wilhelm C. Röntgen (1845-1923) dienen. Bekanntermaßen widmete sich Röntgen, wie viele andere Physiker zeitgleich, der Untersuchung der Kathodenstrahlen. Im Rahmen seiner Experimente fiel ihm dabei das unerwartete Aufleuchten eines Schirms auf, der abseits des Strahlengangs der Kathodenstrahlen aufgestellt war. In der Folgezeit stellte er rasch Untersuchungen zu den Eigenschaften dieser neuen Strahlen an. Auch Philipp Lenard (und einigen anderen) wird zugeschrieben, das Aufleuchten eines Schirms im Rahmen eigener Experimente gesehen zu haben. [7, S. 86] Nähere Untersuchung durch ihn unterblieben jedoch. Allerdings beschuldigte Lenard später Röntgen des geistigen Diebstahls. [10, S. 380-381]

An diesem knappen Beispiel soll auf zwei Aspekte besonders hingewiesen werden. Innerhalb des EJASE-Prozesses handelt es sich um eine Beobachtung im Rahmen eines Experiments, auch wenn das neue Phänomen hier (im wortwörtlichen Sinne) abseits des experimentellen Aufbaus auftritt.

Wichtiger noch ist der zweite Aspekt: Das Aufleuchten eines Schirms zu sehen ist nicht gleichzusetzen mit einer wirklichen Beobachtung, die zu einer Entdeckung eines neuen Phänomens führt bzw. führen kann. Während auch Lenard etwas sah, so ließ es doch das vorherrschende Paradigma nicht zu, darin auch einen real existierenden Effekt bzw. ein über einen unerwünschten Randeffekt hinausgehendes Phänomen zu sehen.

Das Wirken der zugrundeliegenden Grundüberzeugung („Es kann keine weiteren Arten von Strahlen geben.“) lässt sich leicht in Form eines theoretischen Filters in unserem Modell abbilden. Das mögliche neue Axiom („Strahlen mit neuen Eigenschaften treten aus der Kathodenstrahlröhre aus.“) konnte in der Person Philipp Lenards die Barriere der Filter nicht durchdringen. Dies mag auch damit zusammenhängen, dass durch die Existenz einer neuen Art der Strahlung alle bisher durchgeführten Experimente und die daraus resultierenden Arbeiten nachträglich in Zweifel gezogen worden wären. [7, S. 87-88]

6. Folgerungen

In dem vorliegenden Beitrag konnte nur sehr oberflächlich auf die historische und an keiner Stelle auf die moderne Bedeutung der Erkenntnismethode der Beobachtung eingegangen werden. Bereits die hier sehr knapp präsentierten Beispiele mögen jedoch einen ersten Eindruck davon vermitteln, welche immense Bedeutung der wissenschaftlichen Beobachtung in der Vergangenheit zukam.

Der ebenfalls noch unsystematische und kurze Einblick in die Lehrpläne zeigt eine Lage, die der Be-

deutung der Methode kaum Rechnung tragen kann. Zwar erwartet der Lehrplan für Gymnasien des Landes NRW den Erwerb von Kompetenzen auf dem Gebiet der Beobachtung, in den Inhaltsfeldern lassen sich jedoch praktisch keine Beispiele finden, an denen ein solcher Kompetenzerwerb möglich würde. Stattdessen finden sich hier lediglich Aufforderungen, bereits vorhandenes Beobachtungsmaterial zu interpretieren. Die Herkunft der Daten und die Umstände ihres Entstehens bleiben unberücksichtigt. Eine systematische Analyse des Ist-Standes (unter Ausweitung auf Lehrbücher) steht freilich noch aus.

Es ist die Überzeugung des Autors, dass im Schulunterricht die Möglichkeit eröffnet werden muss, sich in systematischer und reflektierter Art mit der Methode der Beobachtung auseinander zu setzen. Dabei sollte im Vordergrund stehen, die Möglichkeiten, Grenzen und den individuellen Charakter jeder Beobachtung zu thematisieren. Auch der unvermeidliche Zusammenhang zwischen (explizit wie implizit vorhandenen) theoretischen Überzeugungen und geistigen Haltungen ist notwendigerweise zu thematisieren. Ohne dies bleiben viele historischen Errungenschaften kaum nachvollziehbar. Irrwege der Geschichte brennen sich leicht als schlichte Unkenntnis oder Unvermögen der beteiligten Akteure in das Gedächtnis ein, wenn nicht die oftmals vorhandene Zwangsläufigkeit der (nur aus der heutigen Perspektive fehlerbehafteten) Schlüsse explizit thematisiert wird.

Auch im Hinblick auf die Lehramtsausbildung bietet sich ein weites Feld möglicher Impulse. Dabei muss über die bloße Beschäftigung mit ausgewählten Beispielen (die äußerst begrüßenswert ist!) eine Einbettung in ein geeignetes Modell der Erkenntnisgewinnung des Faches erfolgen. Nur so wird ein systematischer Blick möglich, der auch die Entwicklung des Faches im Ganzen berücksichtigt, ohne dabei jedoch das Individuum aus dem Blick zu verlieren. Ein für diesen Zweck geeignetes Modell steht mit dem EJASE-Prozess Einsteins zur Verfügung, dessen Anwendungsmöglichkeiten selbstredend über die hier präsentierten weit hinausgehen (Beispiele hierzu finden sich in [11]).

Abschließend soll noch ein weiterer Anwendungsfall des Modells kurz benannt werden: Es erlaubt die zwanglose Erklärung von Präkonzepten. Dabei lassen sich häufig unmittelbare Parallelen in der Geschichte der Physik finden, wo teils sehr bedeutende Wissenschaftler sehr ähnliche Vorstellungen entwickelten und eben auch fast zwangsläufig entwickeln mussten. Das Beispiel der Elektrostatik zeigt, wie naheliegend etwa die Interpretation des Zurückprallens von Spreuteilchen für Gilbert gewesen sein muss. Die vorhandene Vertrautheit mit mechanischen Prozessen leitete Gilbert so, wie es wohl auch bei Lernenden heute der Fall sein kann. Ein entsprechendes Modell mit einer Unterfütterung durch historische Fallbeispiele hat hierbei das Potential, bei Schülern und Studierenden gleichermaßen

ein positives Verständnis von Präkonzepten zu erreichen, die i. d. R. auf (für den Betreffenden) begründeten Vorannahmen basieren und als Basis für ein erfolgreiches Weiterarbeiten angesehen werden sollten.

7. Literatur

- [1] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2008): Kernlehrplan für das Gymnasium - Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen - Physik.
- [2] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2013): Kernlehrplan für das Gymnasium - Sekundarstufe II in Nordrhein-Westfalen - Physik.
- [3] Holton, Gerald James (1979): Einsteins Methoden zur Theoriebildung. In: Peter C. Aichelburg, Roman Ulrich Sexl und Peter Gabriel Bergmann (Hg.): Albert Einstein. Sein Einfluss auf Physik, Philosophie und Politik. Braunschweig: Vieweg, S. 111–140.
- [4] Kuhn, Wilfried (1983): Das Wechselspiel von Theorie und Experiment im physikalischen Erkenntnisprozeß. In: Scharmann, Hofstaetter und Kuhn (Hg.): DPG-Didaktik-Tagungsband. Gießen, S. 416-138.
- [5] Einstein, Albert (1956): Ideas and opinions. Unter Mitarbeit von Sonja Bargmann. 3. print. London: Redman.
- [6] Einstein, Albert (2005): Mein Weltbild. Unter Mitarbeit von Carl Seelig. Zürich: Europa-Verl.
- [7] Kuhn, Thomas S. (1967): Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen. 1. - 4. Tsd. Frankfurt a.M.: Suhrkamp (Theorie, 2).
- [8] Moore, Peter (2016): Das Wetter-Experiment. Von Himmelsbeobachtern und den Pionieren der Meteorologie. Unter Mitarbeit von Michael Hein. 1. Auflage. Hamburg: mare.
- [9] Redfield, William C. (1831): Remarks on the Prevailing Storms of the Atlantic Coast, of the North American States. In: American journal of science and arts. XX. (1), S. 17–51.
- [10] Simonyi, Károly (2012): Kulturgeschichte der Physik. Von den Anfängen bis heute. 3. überarb. und erw. Aufl., [Nachdr.]. Frankfurt am Main: Deutsch.
- [11] Krause, Eduard (2017): Das EJASE-Modell als Ausgangspunkt physikdidaktischer Forschungsfragen. In: PhyDid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule (16), S. 57–66.

Physik des Skateboardings

- Materialabhängige Elastizitätseigenschaften des Skateboard Decks -

Manuel Kerk, Alexander Pusch, Wilfried Suhr & Daniel Laumann

Institut für Didaktik der Physik
Westfälische Wilhelms-Universität
Wilhelm-Klemm-Str. 10
48149 Münster

manuel.kerk@wwu.de, alexander.pusch@wwu.de, wilfried.suhr@wwu.de, daniel.laumann@wwu.de

Kurzfassung

Zum Zwecke der Kontextualisierung von Physikunterricht existieren zahlreiche Bezüge zu unterschiedlichen Sportarten. Ergänzend zu klassischen Beispielen, wie z.B. dem schiefen Wurf beim Basketball, besitzen insbesondere Sportarten mit einer gewissen Nähe zur Jugendkultur ein großes Potential, um die Auseinandersetzung mit physikalischen Inhalten zu motivieren. So basiert das Skateboarding auf grundlegenden Prinzipien der Mechanik und weist vielfach Bezüge zum Basis-konzept Energie auf. Als Grundlage für den Einbezug eines Sportkontextes in den Physikunterricht gilt es jedoch den physikalischen Hintergrund der jeweiligen Sportart zu klären.

Bislang existieren hinsichtlich grundlegender Prinzipien des Skateboardings im Gegensatz zu anderen Sportarten nur in geringem Umfang fachliche Untersuchungen. Auch Hersteller von Skateboards nutzen selten empirische Daten zur Entwicklung von Skateboards, sondern berücksichtigen vor allem praktisches Erfahrungswissen. Der Beitrag widmet sich dieser Forschungslücke durch die experimentelle Analyse zentraler Einflussfaktoren auf die Dynamik skateboardtypischer Bewegungen. Die Untersuchungen umfassen eine experimentelle Kraftanalyse des Kicks und Pops sowie die Messung des Einflusses der Materialzusammensetzung eines Skateboard Decks auf die für das Sprungverhalten grundlegenden Elastizitätseigenschaften eines Skateboards.

1. Einleitung

Die Ursprünge des Skateboardings als Sportart und Freizeitbeschäftigung gehen bei Berücksichtigung verwandter Vorläufer bis an den Beginn des 20. Jahrhunderts in Nordamerika zurück. Die heutige Art und Weise der Ausführung des Skateboardings sowie die grundlegende Gestaltung der zugehörigen Materialien gründete sich in den 1950er Jahren an der nordamerikanischen Ostküste in Kalifornien im Zuge einer Transformation der Sportart Wellenreiten, die das Ziel verfolgte eine ähnliche Aktivität auf der Straße ausüben zu können („Asphaltsurfing“) [1].

Seit dieser Zeit unterlag das Skateboarding in der Vergangenheit über viele Jahrzehnte immer wieder wellenförmigen Popularitätszuwüchsen mit nachfolgendem Rückgang des Interesses und der Bedeutung. Seit Anfang des 21. Jahrhunderts gilt Skateboarding jedoch als etablierte und im Mainstream fest verankerte Sportart [2]. Dies drückt sich u.a. dadurch aus, dass Skateboarding bei den Olympischen Spielen 2020 in Tokio (Japan) erstmalig als offizielle olympische Disziplin vertreten sein wird [3].

Die heutige Form des Skateboardings ist maßgeblich durch das namensgebende Sportgerät gekennzeichnet. Dieses besteht stets aus vier Rollen, die mit

Achsen an einem gekrümmten Brett, dem Deck, befestigt sind. Durch die lose Verbindung zwischen FahrerIn bzw. Fahrer und Skateboard ist die Anregung dynamischer Bewegungen oder die Ausführung von Sprüngen und spezifischen Fahrtechniken bzw. so genannten „Tricks“ möglich.

Sämtliche Bewegungen folgen dabei fundamentalen und für den Physikunterricht relevanten Prinzipien (Newton'sche Dynamik, Steiner'scher Satz etc.) und zentralen Größen der Mechanik (Masse, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Kraft, Drehmoment, Trägheitsmoment etc.). Berücksichtigt man weiterhin die starken Bezüge des Skateboardings zur Jugendkultur und die große Popularität der Sportart in dieser Altersklasse [4], [5], erscheint Skateboarding als Kontext für den Physikunterricht im Bereich der Mechanik grundsätzlich sehr geeignet. Entsprechende Unterrichtskonzepte zur Behandlung physikalischer Prinzipien im Kontext Sport existieren u.a. bereits für Elemente des Fußballs [6], [7] oder für Sportarten aus dem Bereich der Leichtathletik [8].

Um dem Ziel der didaktischen Strukturierung gemäß des Modells der didaktischen Rekonstruktion bei der Entwicklung von Lehr-Lernmaterialien nachgehen zu können, ist jedoch neben der Erfassung der

Schülerperspektive auch eine fachliche Klärung notwendig [9]. Diesbezüglich lässt sich jedoch für das Skateboarding im Gegensatz zu anderen Sportarten feststellen, dass bislang nur wenige fachliche Beschreibungen und Analysen der grundlegenden Vorgänge des Skateboardings existieren. Diese sind vorwiegend theoretischer Natur und beziehen sich auf das Fahren mit einem Skateboard [10], [11], [12]. Im Physikunterricht existieren Bezüge zum Skateboarding bisher meist nur durch sehr oberflächliche Kontexte, wie u.a. die Diskussion des Prinzips der Energieerhaltung am Beispiel der Halfpipe [13]. Dieser Aspekt wird allerdings durch fehlende Berücksichtigung von Reibung häufig stark idealisiert und bildet zudem nur eine kleine Facette des Skateboardings ab.

Doch nicht nur für die Entwicklung von Lehr-Lernmaterialien erscheinen grundlegende theoretische und experimentelle Analysen des Skateboardings notwendig. Die Skateboardindustrie gründet technologische Optimierungen, wie die Kombinationen „modernerer“ Materialien, Carbon und Glasfaserelemente in klassischen Holzdecks, bislang weitestgehend auf die subjektive Wahrnehmung und Intuition bei der Nutzung der Skateboards durch hinreichend erfahrene und kompetente Fahrerinnen und Fahrer.

2. Theoretischer Hintergrund

Für die nachfolgende Beschreibung der Durchführung spezifischer mechanischer Analysen zum Skateboarding erscheinen Kenntnisse zur Terminologie und die Beschreibung ausgewählter Phänomene hilfreich. Weiterhin gilt es diese Phänomene mithilfe einer zugänglichen physikalischen Modellierung zu beschreiben, um damit einen Rahmen für theoretische und experimentelle Untersuchungen zu schaffen.

2.1. Terminologie und Phänomenologie des Skateboardings (Auswahl)

Zunächst soll die Terminologie mit Blick auf den Aufbau eines Skateboards erläutert werden, siehe Abb. 1. Ein Skateboard besteht, wie bereits beschrieben, prinzipiell aus einem Deck, zwei Achsen sowie vier Rollen. Das Deck besteht aus mehreren verleimten Materialschichten (i.d.R. Ahornholz). Die Fahrerinnen oder der Fahrer kann das Skateboard z.B. durch Abstoßen mit einem Fuß vom Boden in eine Vorwärtsbewegung bringen. Auf dem Deck befindet sich zur Verstärkung der Haftreibung zwischen den Füßen und dem Deckmaterial das sogenannte Griptape, dessen Struktur und Eigenschaften Ähnlichkeiten zu grobem Schleifpapier aufweisen. Unter dem Deck ermöglichen zwei Achsen, die typischerweise aus Metall gefertigt sind, die kugelgelagerte Befestigung der Rollen. Die Achsen sind beweglich und so konstruiert, dass das Skateboard beim Fahren durch Gewichtsverlagerung gelenkt werden kann [10]. Die Decks unterschiedlicher Skateboards können sich einerseits durch die verwendeten Materialien, aber andererseits auch durch die jeweilige Form unterscheiden. Jedes Deck ist am vorderen Ende (Nose) und

hinteren Ende (Tail) leicht aufgebogen, wobei die Nose verglichen mit dem Tail in vielen Fällen länger erscheint. Ein Skateboard Deck ist zudem häufig entlang der Verbindungsachse von Nose und Tail gewölbt. Diese Wölbung wird als Concave bezeichnet. Eine Unterscheidung von Skateboard Decks ergibt sich durch die Stärke des Concave, durch den Shape, d.h. die Form der Grundfläche, oder auch durch unterschiedliche Größen des Decks (Länge, Breite).

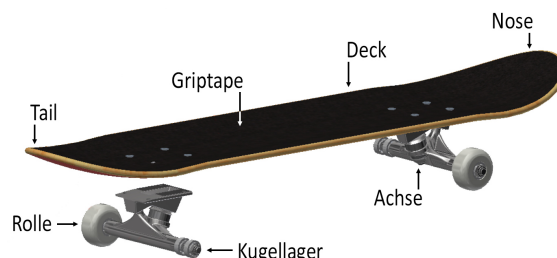


Abb.1: Darstellung des Aufbaus eines Skateboards und Angabe relevanter Bauteile.

Weitere Begrifflichkeiten ergeben sich bei Betrachtung unterschiedlicher Fahr- oder Sprungbewegungen. Im Gegensatz zu den bereits existierenden Analysen der Fahrt eines Skateboards [10], [11], [12], bezieht sich dieser Beitrag auf die Sprungbewegung, die als Ollie bezeichnet wird, siehe Abb. 2. Folgende phänomenologische Beschreibung fasst den Ollie anschaulich zusammen:

„Ein kurzer Tritt auf das Tail des Skateboards – Kick. Das Skateboard rotiert um die hintere Achse Richtung Boden und wird beim Aufprall des Tails in die Luft katapultiert – Pop. In der Luft führt der vordere Fuß das Skateboard im Bereich der Nose und drückt diese leicht nach unten. Schließlich erfolgt zum richtigen Zeitpunkt die Landung mit beiden Füßen auf dem Deck und der Ollie ist beendet.“

2.2. Physikalische Beschreibung und Modellierung mechanischer Prinzipien (Auswahl)

Der Ollie gilt als einer der einfachsten Skateboardtricks und ist Grundlage für die Ausführung nahezu sämtlicher komplexerer Sprünge. Die Fahrerinnen oder der Fahrer geht zunächst auf dem Skateboard stehend in die Hocke und bereitet damit den eigenen Sprung vor. Beim Absprung drückt der hintere Fuß auf das Tail (Kick), sodass ein Drehmoment auf das Deck wirkt und das Skateboard um die hintere Achse rotiert. Da die Rotationsachse nicht durch den Schwerpunkt verläuft, wird das Skateboard relativ zu diesem zusätzlich in Translation versetzt.

Durch die Rotation schlägt das Tail auf den Boden und biegt sich leicht, sodass ein Teil der vom Boden wirkenden Normalkraft die Durchbiegung des Decks sowie eine vertikale Beschleunigung verursacht und das Skateboard vom Boden hochspringt (Pop). Sowohl die Spannkraft der Biegung als auch die Normalkraft sind entgegengesetzt zum ursprünglichen Drehsinn der Rotation ausgerichtet, sodass ein entgegengesetztes Drehmoment wirkt.

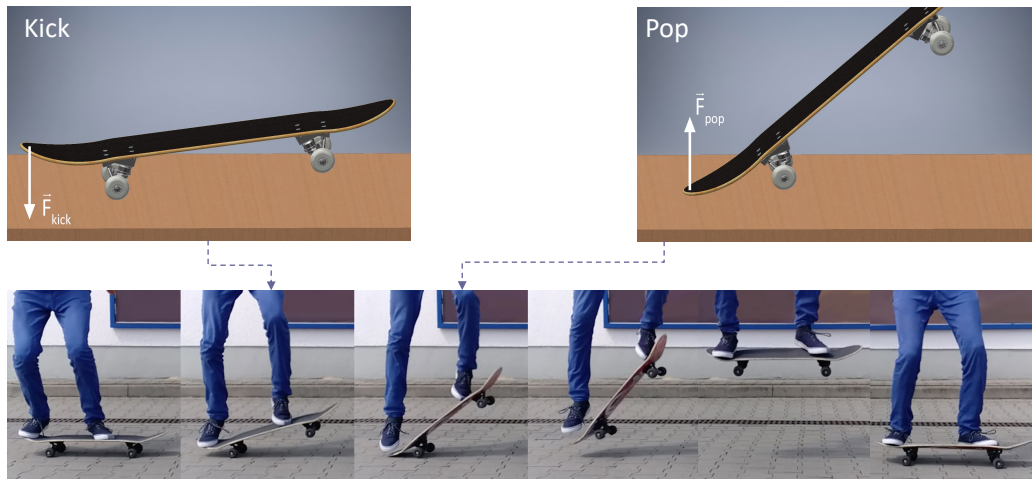


Abb.2: Darstellung des Bewegungsablaufs beim Ollie sowie Visualisierung der wirkenden Kräfte beim Kick und Pop.

Die Dynamik des Ollies ist somit insbesondere durch die ursprünglich von der Fahrerin oder vom Fahrer ausgeübte Kraft F_{kick} sowie die anteilmäßig beim Pop wirkende Kraft F_{pop} (Merkmal M1) in Abhängigkeit vom Trägheitsmoment J des Skateboards (Merkmal M2) bestimmt. Weiterhin werden im Rahmen des Pops die Elastizitätseigenschaften des Deckmaterials bei Durchbiegung (Merkmal M3) sowie die Abmessungen und Formparameter des Skateboards (Merkmal M4) wirksam, siehe Abschnitt 2.1.

Die weiteren Phasen des Ollies nach dem Pop sind für die vollständige Durchführung wichtig, aber aus physikalischer Perspektive im Rahmen dieses Beitrags nicht relevant.

3. Untersuchungsziel und Forschungsfragen

Die beschriebene physikalische Modellierung der Anfangsphase des Ollies ermöglicht die Durchführung theoretischer und insbesondere experimenteller Analysen. Folgt man der physikalischen Beschreibung und Modellierung, nehmen die vier Merkmale (M1) bis (M4) des Skateboards Einfluss auf dessen Sprungeigenschaften. Hinsichtlich der Materialparameter (M3) ist festzustellen, dass ein Deck typischerweise aus sieben dünnen Holzschichten, meist kanadisches Ahornholz, die mit Epoxidharz verbunden werden, hergestellt wird. Moderne Skateboard Decks bestehen jedoch häufig auch aus alternativen Materialien, wie Fiberglas oder Carbon, die einzelne Holzschichten ersetzen, siehe Abschnitt 4. Insbesondere stellt sich hier die Frage, inwiefern die häufig nur geringfügigen Materialvariationen die physikalischen Eigenschaften des Skateboard Decks beeinflussen.

Dieser Beitrag soll eine erste Annäherung an die Frage des Einflusses der Materialzusammensetzung auf den Ollie leisten, siehe Abschnitt 5, und erste Erkenntnisse hinsichtlich der Vertiefung spezifischer Messungen erbringen. Um Aussagen über den genannten Einfluss beim einfachsten Skateboard Sprung treffen zu können, d.h. im Sinne der

Phänomenologie den Einfluss des Deckmaterials auf Kick und Pop zu bestimmen, ist jedoch zunächst eine Abschätzung der wirkenden Kräfte F_{kick} und F_{pop} (M1) in Abhängigkeit vom Trägheitsmoment J (M2) notwendig, siehe Abschnitt 4.

Wir fokussieren aufgrund der vergleichsweise komplexen Modellierung und Klassifizierung der Formparameter auf die Analyse der Merkmale (M1) bis (M3) und vernachlässigen den Einfluss der Formparameter durch die Untersuchung (nahezu) identischer Deckgeometrien.

4. Kraftanalyse des Kicks und Pops

Zur Bestimmung der wirkenden Kräfte F_{kick} und F_{pop} wird vereinfacht davon ausgegangen, dass diese durch das Trägheitsmoment J , die Winkelbeschleunigung α sowie den Abstand r zwischen der wirkenden Kraft und der Rotationsachse gemäß

$$F = J \cdot \alpha / r \quad \{1\}$$

gegeben sind. Wie aus Beziehung {1} hervorgeht, ist für die Berechnung der wirkenden Kräfte die Kenntnis der Winkelbeschleunigungen α der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Rotationsbewegung beim Kick und Pop erforderlich. Zur experimentellen Bestimmung erfolgten zunächst Videoanalysen von realen Ollies. Diese wurden von Amateur- und Profiskatern ausgeführt, um den absoluten Einfluss der Kraft abschätzen zu können. Da die Kraftanalyse, wie in Abschnitt 3 beschrieben, als Grundlage zur Untersuchung der Elastizitätseigenschaften dient und sich diesbezüglich der experimentelle Aufbau durch eine statische Apparatur vereinfachen würde, soll die Durchführung von Analysen des Ollies aus der Fahrt und aus dem Stand erfolgen, um den zusätzlichen Einfluss der Translationsdynamik auf die wirkenden Kräfte abschätzen zu können.

Die Bestimmung des Trägheitsmomentes J erfolgte durch Messung der Schwingungsdauer mit

Periodendauer T bei Masse des Skateboards m an einer bifilaren Aufhängung gemäß einer gängigen Methode [14]. Tab. 1 zeigt die ermittelten Trägheitsmomente für die unterschiedlichen Deckmaterialien. Diese sind bei der Kraftanalyse in Abschnitt 5 zu berücksichtigen.

Material	Trägheitsmoment J in $[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$
Deck A	$0,1157 \pm 0,0007$
Deck B	$0,1272 \pm 0,0009$
Deck C	$0,1219 \pm 0,0007$

Tab.1: Trägheitsmomente J unterschiedlicher Deckmaterialien (Deck A: 7-Layer Ahornholz, Deck B: 7-Layer Ahornholz + Fiberglas-Schicht, Deck C: 7-Layer Ahornholz + Carbon CFRP Einlage).

Die Bestimmung der Trägheitsmomente J und die direkte Messung der Abstände r von der wirkenden Kraft zur Rotationsachse ermöglicht die Bestimmung der gesuchten Kräfte bei Kenntnis der Winkelbeschleunigung α .

4.1. Versuchsaufbau- und Durchführung

Die Durchführung der Videoanalyse der Ollies erfolgte mit einem Smartphone Typ *Samsung Galaxy S8+* aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung der Kamera (240 fps bei 1280x720 Pixeln). Für die Analyse der Bewegung und die Bestimmung der Winkelbeschleunigungen α wurde die Software *Tracker Video Analysis* eingesetzt. Die Durchführung der Sprünge erfolgte durch einen Amateurskater sowie zwei Profiskater in einer mit Markierungen zur Definition des Maßstabs vorgegebenen Umgebung. Es wurden Sprünge mit sämtlichen genannten Decks sowohl aus der Fahrt ($N_{\text{Fahrt}} = 28$) als auch aus dem Stand ($N_{\text{Stand}} = 25$) ausgeführt.

Aus den Beschleunigungsdaten im zeitlichen Verlauf lässt sich, wie in Abb. 3 exemplarisch dargestellt, jeweils die Winkelbeschleunigung beim Kick α_{kick} als Maximum und beim Pop α_{pop} als Minimum ermitteln (rote Markierungen).

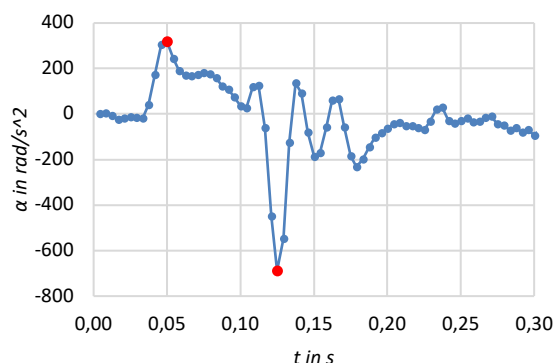


Abb.3: Winkelbeschleunigung α der Vorderachse (exemplarischer Befund Videoanalyse; rote Markierung Maximum: α_{kick} , Minimum: α_{pop}).

4.2. Ergebnisse und Diskussion

Die Bestimmung der Kräfte ergibt die Mittelwerte $F_{\text{kick,mean}} = 390 \pm 66 \text{ N}$ und $F_{\text{pop,mean}} = 260 \pm 24 \text{ N}$ bei Berechnung über alle Messungen nach Beziehung {1}, siehe Abb. 4. Es folgt somit als Erkenntnis aus den Untersuchungen, dass durchschnittlich etwa 2/3 der ursprünglich von der FahrerIn oder dem Fahrer aufgebracht Kraft beim Kick für die vertikal nach oben gerichtete Beschleunigung des Pops aufgewendet werden. Die durchschnittlich etwa 80 kg schweren Skater haben dabei maximal eine Kraft von 500 N für den Kick aufgebracht. Die Betrachtung der Highspeed-Aufnahmen lässt weiterhin eindeutig erkennen, dass die Skater den Kick erst ausführen, nachdem sie selbst eine gewisse vertikale Geschwindigkeit aufweisen.

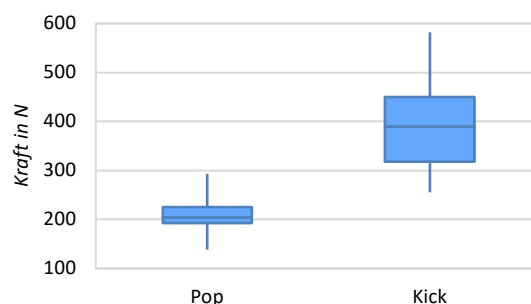


Abb.4: Boxplot-Darstellung der Verteilung der Kräfte bei Videoanalyse sämtlicher Ollies unterteilt in Pop und Kick.

Die Tatsache, dass die Kräfte beim Pop deutlich geringere Werte aufweisen als beim Kick, folgt maßgeblich durch eine Verschiebung der Rotationsachse. Während das Board beim Kick um die hintere Achse rotiert, erfolgt die Rotationsbewegung beim Pop aufgrund der freien Beweglichkeit um eine im Schwerpunkt befindliche Rotationsachse. Infolge dieser Verschiebung der Rotationsachse verändert sich das Trägheitsmoment, das beim Pop im Vergleich zum Kick deutlich geringer ist. Zu berücksichtigen ist an dieser Stelle, dass bei den Berechnungen der Anteil des Drehmoments, der durch die Gewichtskraft des Boards verursacht wird, aufgrund des geringen Einflusses, etwa 20 N, nicht extrahiert wurde und es sich somit stets um Angaben der Gesamtkraft handelt.

Wie ebenfalls in Abb. 4 zu erkennen ist, liegen vor allem die beim Pop auftretenden Kräfte in einem vergleichsweise schmalen Wertebereich. Die Kenntnis dieses Bereichs ist zur angemessenen Durchführung der Messungen im Rahmen der Bestimmung der Elastizitätseigenschaften notwendig, siehe Abschnitt 5.

Ob die Ollies während der Fahrt oder aus dem Stand ausgeführt werden, ließ sich anhand der dabei gemessenen Kräfte nicht unterscheiden, sodass für die nachfolgenden Messungen davon ausgegangen wird, dass beide Vorgänge hinsichtlich der vertikalen Sprungeigenschaften als äquivalent anzusehen sind.

Die durchgeführten Untersuchungen sind hinsichtlich des Merkmals (M2), d.h. der Betrachtung der Trägheitsmomente, umfassend. Es erscheint jedoch sinnvoll hinsichtlich des Merkmals (M1), d.h. der Kräfte des Kicks, die Anzahl der per Videoanalyse ausgewerteten Ollies zu vergrößern und diese von zusätzlichen Fahrerinnen und Fahrern sowie mit einer größeren Varianz ihrer Masse ausführen zu lassen.

5. Elastizitätseigenschaften des Skateboard Decks

Nach der Analyse der wirkenden Kräfte beim Kick und Pop unter Berücksichtigung der gegebenen Trägheitsmomente, d.h. der Merkmale (M1) und (M2) sollen weiterhin die Elastizitätseigenschaften von Skateboard Decks (M3) hinsichtlich ihrer Wirkung auf das Sprungverhalten des Skateboards beim Olli untersucht werden.

Wie in Abschnitt 2.2 bereits beschrieben, ergibt sich der Pop u.a. aufgrund der elastischen bzw. Federwirkung des Tails. In einem einfachen Modell, siehe Abb. 5, wird die Elastizität des Tails durch eine lineare Feder, d.h. einen proportionalen Zusammenhang von Kraft und Auslenkung, modelliert und folgt somit dem Hooke'schen Gesetz

$$F = k \cdot \Delta s \quad \{2\}$$

bei wirkender Kraft F , Federkonstante k und Auslenkung Δs . Voruntersuchungen mithilfe einer in der Software *Algodo* programmierten Simulation im Vergleich zur Videoanalyse eines vollständigen Ollies deuten an, dass sich die beschriebene Modellierung eignet, um näherungsweise die elastischen Eigenschaften des Skateboards zu beschreiben.

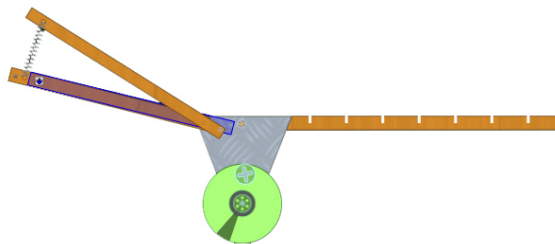


Abb.5: Darstellung der *Algodo*-Simulation zur Modellierung des Tails eines Skateboards als lineare Feder.

Zur Untersuchung des Einflusses des Deckmaterials auf den Pop, wurde die jeweilige Federkonstante des Tails der unterschiedlichen Deckzusammensetzungen, siehe Tab. 1, experimentell analysiert, da sich zunächst grundsätzlich die Frage stellt, ob eine geringfügige Variation des Deckmaterials durch das Hinzufügen einzelner Schichten oder Ausschnitte von Schichten die physikalischen Eigenschaften des Skateboard Decks nennenswert beeinflusst.

5.1. Versuchsaufbau- und Durchführung

Dem Hooke'schen Gesetz folgend soll mithilfe eines statischen Versuchsaufbaus die Auslenkung eines Skateboards Decks Δs bei Belastung mit einer Kraft

$F = m \cdot g$ durch eine Masse m bestimmt werden, um anschließend die jeweilige Federkonstante k durch lineare Interpolation zu bestimmen, siehe Abb. 6.

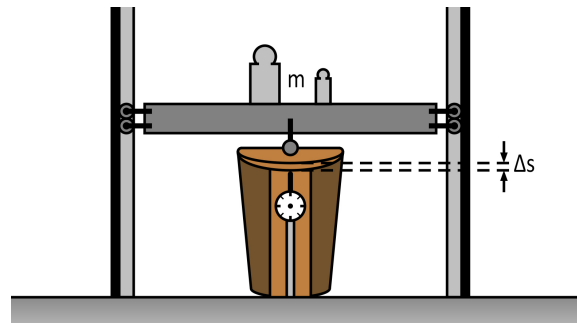


Abb.6: Versuchsaufbau zur Bestimmung der elastischen Eigenschaften des Skateboard Decks.

Da die elastischen Eigenschaften des Skateboards Decks gemäß der Modellierung des Ollies insbesondere beim Pop wirksam werden und dabei eine Kraft auf die Unterseite des Tails ausgeübt wird, soll der experimentelle Aufbau dieser Situation entsprechen, siehe Abb. 6. Dies erscheint weiterhin notwendig, da auf diese Art und Weise die Anisotropie der Form des Skateboards berücksichtigt wird. Da das Formmerkmal die Elastizitätseigenschaften voraussichtlich ebenfalls beeinträchtigt, werden für sämtliche untersuchten Deckmaterialien, siehe Tab. 2, möglichst identisch geformte Decks untersucht.

Die Auslenkung der Decks erfolgt durch Auflegen von Massestücken. Die Belastung wurde schrittweise auf eine Gesamtmasse von 40 kg erhöht. Dabei wurden insgesamt zehn vollständige Messdurchläufe durchgeführt. Die Bestimmung der Auslenkung erfolgte durch eine (sehr sensitive) Messuhr.

5.2. Ergebnisse und Diskussion

Die in Tab. 2 dargestellten Befunde ergeben sich aus der Interpolation der massenabhängigen Auslenkung. Die Messergebnisse deuten Unterschiede zwischen den untersuchten Deckmaterialien an. Entgegen der Beschreibung des Herstellers Titus und einer möglichen Hypothese aufgrund bekannter Materialeigenschaften von Fiberglas gegenüber Holz, zeigt sich in unseren Experimenten für Deck B mit zusätzlicher Fiberglas-Schicht jedoch keine Versteifung des Boards.

Material	Federkonstante k in [N/mm]
Deck A	$73,7 \pm 0,9$
Deck B	$69,0 \pm 1,1$
Deck C	$76,4 \pm 1,0$

Tab.2: Federkonstanten k unterschiedlicher Deckmaterialien (Deck A: 7-Layer Ahornholz, Deck B: 7-Layer Ahornholz + Fiberglas-Schicht, Deck C: 7-Layer Ahornholz + Carbon CFRP Einlage).

Insgesamt sind die dargestellten Ergebnisse als Pilotierung nachfolgender ausführlicherer Messungen zu beurteilen. Bei der Durchführung der Experimente erwies sich der eingesetzte Versuchsaufbau als

sinnvolle Konstruktion, die jedoch hinsichtlich der Steifigkeit noch optimiert sollte. Ein in der Entwicklung befindlicher alternativer Versuchsaufbau wird im Sinne der Triangulation eine Überprüfung der dargestellten Befunde ermöglichen. Zudem soll untersucht werden, welchen Einfluss die zeitliche Änderung der Kraftereinwirkung auf die Elastizitätseigenschaften des Decks hat.

Mit Blick auf die Durchführung der Experimente ist zu konstatieren, dass eine Variation der Belastung im gesamten Massenspektrum bis 40 kg erfolgte. Berücksichtigt man jedoch die Ergebnisse der Untersuchungen zur Kraftwirkung beim Kick und Pop nicht nur als obere Grenze für die wirkende Kraft, sondern fokussiert stärker den relevanten Kraftbereich des Pops, erscheint eine selektivere Belastung im Bereich von etwa 15 – 25 kg mit kleinen Variationen der Masse sinnvoll, um validere Aussagen über die Elastizitätseigenschaften des Skateboard Decks beim Pop treffen zu können.

Eine grundsätzliche Schwierigkeit hinsichtlich der Beurteilung der durchgeführten Messung ergibt sich dadurch, dass der jeweilige spezifische Aufbau der Decks und der Massenanteil der zusätzlich eingebrachten Materialien unbekannt ist, weshalb sich diesbezüglich keine theoretischen Elastizitätswerte berechnen lassen und somit die experimentellen Resultate die einzige Datenquelle darstellen.

6. Fazit und Ausblick

Der vorliegende Beitrag strebt eine Erweiterung der fachlichen Beschreibung des Skateboardings aus physikalischer Perspektive und dabei insbesondere eine Erweiterung bestehender Untersuchungen an. Der Beitrag fokussiert die Sprungeigenschaften eines Skateboards beim Ollie und erweitert bestehende Analysen auch methodisch durch den Einsatz experimenteller Analysemethoden.

Durch die Videoanalyse der Ollies und die Kraftanalyse ergeben sich erste Implikationen, die möglicherweise ein besseres Verständnis der Bewegungsabläufe ermöglichen. Insbesondere der Vergleich der wirkenden Kräfte beim Kick und Pop und ein Vergleich der Gewichtskraft der Fahrerinnen oder des Fahrers mit der maximalen Kraft auf das Skateboard beim Kick eröffnen eine interessante Perspektive.

Hinsichtlich einer Erweiterung der durchgeführten Untersuchungen ist festzuhalten, dass die ermittelten Befunde notwendigerweise durch eine vergrößerte Anzahl an Messungen mit verschiedenen Fahrerinnen und Fahrern, siehe Kraftwirkung in Abschnitt 4, oder alternative Messaufbauten und präzisere Messungen, siehe Elastizitätseigenschaften in Abschnitt 5, optimiert werden sollten. Für diese nachfolgenden Messungen stellen die im Beitrag beschriebenen Analysen jedoch eine Grundlage dar.

Neben diesen Aspekten erscheint auch der Einbezug der Formparameter für nachfolgende Analysen von

großer Bedeutung, da die charakteristische Biegung des Skateboard Decks dessen Elastizitätseigenschaften möglicherweise ebenfalls maßgeblich beeinflusst.

7. Anmerkungen

Die durchgeführten Untersuchungen zur Physik des Skateboardings wurden maßgeblich durch die *Titus GmbH* und insbesondere Herrn Ralf Middendorf unterstützt. Im Rahmen dieser Kooperation erfolgte freundlicherweise die Bereitstellung diverser Skateboards sowie die Mitarbeit von zwei professionellen Skateboardfahrern zur Durchführung der Kraftanalyse beim Sprung eines Skateboards.

8. Literatur

- [1] Marcus, B. & Griggi, L. D. (2011): *The Skateboard: The Good, the Bad, and the Gnarly: An Illustrated History*. Minneapolis, MN: MVP Books.
- [2] Donnelly, M. K. (2008): *Alternative and Mainstream: Revisiting the Sociological Analysis of Skateboarding*. In M. Atkinson & K. Young (Eds.): *Tribal Play – Subcultural Journeys through Sport, Research in the Sociology of Sport Vol. 4* (pp. 197-214). Bingley, United Kingdom: Emerald Group Publishing.
- [3] O'Connor, P. (2017): *Beyond the youth culture: Understanding middle-aged skateboarders through temporal capital*. In: *International Review for the Sociology of Sport*, 1-20.
- [4] Buckingham, D. (2009): *Skate Perception: Self-Representation, Identity and Visual Style in a Youth Subculture*. In D. Buckingham & R. Willett (Eds.): *Video Cultures – Media Technology and Everyday Creativity* (pp. 133-151). New York, NY: Palgrave Macmillan.
- [5] McCulloch, K., Stewart, A. & Lovegreen, N. (2006): *'We just hang out together': Youth Cultures and Social Class*. In: *Journal of Youth Studies* 9, 5, 539-556.
- [6] Wilhelm, T. (Hrsg.) (2014): *Physik und Fußball*. *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 63, 1.
- [7] Laumann, D. (2014): *Theoretisches Modell und Videoanalyse einer Bananenflanke*. In: *PhyDid B – Beiträge zur Frühjahrstagung*, Frankfurt.
- [8] Mück, T. & Wilhelm, T. (2009): *Physik und Sport – Fächerverbindender Unterricht mit moderner Videoanalyse*. In: *PhyDid B – Beiträge zur Frühjahrstagung*, Bochum.
- [9] Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H. & Komorek, M. (1997): *Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion – Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung*. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 3, 3, 3-18.

- [10] Hubbard, M. (1979): *Lateral Dynamics and Stability of the Skateboard*. In: Journal of Applied Mechanics 46, 4, 931-936.
- [11] Hubbard, M. (1980): *Human control of the skateboard*. In: Journal of Biomechanics 13, 9, 745-754.
- [12] Ispolov, Y. G. & Smolnikov, B. A. (1996): *Skateboard dynamics*. In Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 131, 3-4, 327-333.
- [13] Wieman, C. E., Adams, W. K., Loeblein, P. & Perkins, K. K. (2010): *Teaching Physics Using PhET Simulations*. In: The Physics Teacher 48, 4, 225-227.
- [14] Schmidt, W. (1932): *Messung von Trägheitsmomenten*. In: Technisches Messen 13-24, 448-449.

Ein haptischer Zugang zu Moden von Kugelschwingungen

Malte Ubben*, Stefan Heusler*

*Institut für Didaktik der Physik, Westfälische Wilhelms-Universität, Wilhelm-Klemm-Str. 10, 48149 Münster
malte.ubben@uni-muenster.de, stefan.heusler@uni-muenster.de

Kurzfassung

Kugelschwingungen können anhand der Anzahl und Lage ihrer Knotenflächen klassifiziert werden. Die Geometrie kann allerdings nicht einfach in zwei Dimensionen dargestellt werden. Ein Lösungsansatz ist daher die Darstellung mittels Animationen und 3D-gedruckten haptischen Modellen. Dieser Ansatz bietet eine Möglichkeit, das Lernen von Kugelflächenfunktionen und Kugelschwingungen sinnvoll zu unterstützen.

1. Einleitung

Eine Auseinandersetzung mit Kugelwellen – und in diesem Zusammenhang auch Kugelflächenfunktionen – gehört zu jedem Physikstudium dazu. Die Anwendbarkeit dieser Schwingungen ist zahlreich und nicht auf eine bestimmte Größenordnung eingeschränkt – ob es sich nun um Schwingungen auf der Oberfläche des Erdballs, einer Seifenblase oder in der Hülle eines Atoms handelt, eine Beschreibung mittels Überlagerung von Grundmoden der Kugelschwingungen ist oft zweckmäßig.

Der mathematische Zugang zu diesen Funktionen ist bereits Teil der Hochschullehre, wobei eine qualitative Darstellung der Schwingungen meist nur mittels Bildmaterial erfolgt.

Hinzukommend zu den bereits bekannten Bildmaterialien und Animationen stellen wir ein 3D-gedrucktes Modell vor, welches als sinnvolle Ergänzung beim Erlernen von Kugelschwingungen genutzt werden kann.

2. Qualitative Herleitung der 3D-Modelle

Die Grundidee unserer qualitativen Betrachtung ist die Klassifikation von Schwingungsmoden einzig anhand ihrer Knoten. Dabei wird die Tatsache genutzt, dass Punkte mit dem permanenten Wert 0 sowohl in komplexen Schwingungsfunktionen als auch in reellen Schwingungsfunktionen Orte eines zeitlichen Stillstandes darstellen.

Der erste Schritt bei einer Analyse von Kugelschwingungsmoden hinsichtlich ihrer Knotenpunkte ist es, eine allgemeine Kugelschwingungsmode $f_{klm}(r, \vartheta, \varphi)$ in ihren Radial- und ihren Winkelanteil zu zerlegen:

$$f_{klm}(r, \vartheta, \varphi) = R_k(r) \cdot Y_{lm}(\vartheta, \varphi). \quad \{1\}$$

Zunächst wird nur der Winkelanteil betrachtet, welcher durch die beiden ganzen Zahlen l und m klassifizierbar ist. Dies erlaubt es, zunächst nur die Oberfläche einer Kugel von beliebigem Radius zu untersuchen. Werden nun die Nullstellen der Funktion $Y_{lm}(\vartheta, \varphi)$ gesucht, so findet man, dass genau diese beiden Parameter l

und m alle notwendigen qualitativen Aspekte hinsichtlich einer Lokalisierung dieser Knoten beinhalten:

Die Knoten bilden jeweils Linien, die in sich geschlossen auf der Kugeloberfläche verlaufen. Die Anzahl dieser Knotenlinien wird durch den Parameter l beschrieben.

Ist nun diese Anzahl bekannt, kann an m die Ausrichtung dieser Knotenlinien abgelesen werden. Dabei gibt m an, wie viele Knotenlinien die Drehachse der Kugel schneiden; durch das Vorzeichen von m wird zusätzlich auch noch die Drehrichtung angegeben: Ein positives Vorzeichen weist auf rechtsdrehende Knotenlinien hin, ein negatives auf linksdrehende. Diese Betrachtung macht auch schnell verständlich, warum immer $l \geq |m|$ gelten muss – es können nicht mehr Knotenlinien die Drehachse schneiden, als Knotenlinien vorhanden sind.

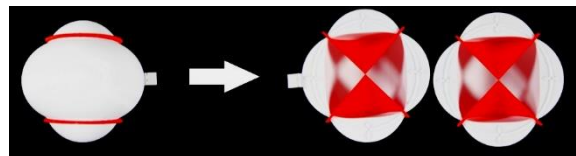


Abbildung 1: Kugelschwingungsmodenmodell mit Parametern $l = 2$ und $m = 0$ in geschlossener und offener Form.

Da die Drehung einer Kugel nur in bewegten Bildern gut dargestellt werden kann, bietet es sich in der Lehre an, hier Animationen zu verwenden (beispielsweise [1]). Der Vorteil dieser bewegten Bilder liegt dabei in ihrer Dynamik, der Nachteil allerdings ist die Beschränkung auf eine einzige – wenn auch beliebig große – Oberfläche. Die Funktion $Y_{lm}(\vartheta, \varphi)$ gibt aber so für jeden beliebigen Radius dieselbe relative Lage der Knotenlinien an.

3. Aufbau der 3D-Modelle

Um zu verstehen, was dies in drei Dimensionen bedeutet, wurden dreidimensionale Modelle entwickelt,

die mithilfe eines 3D-Druckers realisiert wurden. Eines der Modelle ist beispielhaft in Abb.1 zu sehen.

Diesem Modell liegt die Kugelflächenfunktion mit den Parametern $l = 2$ und $m = 0$ zugrunde. Von außen zu sehen sind nur die beiden rot dargestellten Knotenlinien, die beide nicht die Rotationsachse schneiden. Öffnet man das Modell jedoch, so wird schnell ersichtlich, dass diese Knotenlinien – über mehrere Radien betrachtet – eine Knotenfläche in Form eines Doppelkegels ausbilden. Somit kann im Modell die gesamte Knotenfläche innerhalb einer beliebig großen, schwingenden Kugel visualisiert werden.

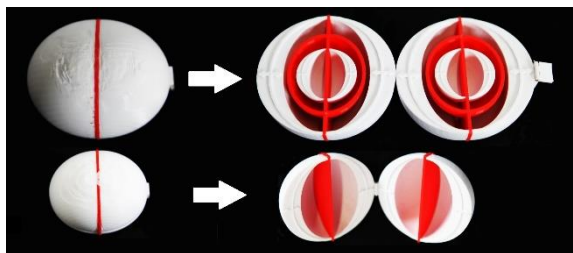


Abbildung 2: Die beiden Kugelschwingungsmoden $f_{020}(r, \vartheta, \varphi)$ und $f_{120}(r, \vartheta, \varphi)$ sind erst unterscheidbar, wenn sie geöffnet betrachtet werden.

Wird nun nicht nur der Winkelanteil $Y_{lm}(\vartheta, \varphi)$ von $f_{klm}(r, \vartheta, \varphi)$ betrachtet, sondern zusätzlich auch der Radialanteil $R_k(r)$, so kommt nur ein einziger weiterer Parameter hinzu: k , welcher die Anzahl der radialen Knotenflächen angibt. Diese radialen Knotenflächen sind von außen nicht auf der Kugeloberfläche sichtbar; erst das Innere der Kugel gibt einen Aufschluss über diese Flächen. So sind die beiden Kugelschwingungsmoden $f_{020}(r, \vartheta, \varphi)$ und $f_{120}(r, \vartheta, \varphi)$ nur zu unterscheiden, wenn sie dreidimensional betrachtet werden (siehe Abb. 2). Die nun hergeleiteten dreidimensionalen Modelle beschreiben jegliche möglichen Grundschwingungsmoden einer Kugel.

4. Beispielhafte Anwendung der 3D-Modelle an Atomorbitalen und Chladnischen Klangfiguren

Die 3-Dimensionalen Modelle können unter anderem dazu verwendet werden, ein tiefergreifendes Verständnis über den Aufbau des Periodensystems erhalten zu können [2].

Dabei ist die Vererbung der Knotenflächen von Kugelschwingungsmoden auf die Orbitale ausschlaggebend.

Die Wellenfunktionen gebundener Elektronen in der Atomhülle können bekannterweise mittels der Schrödingergleichung berechnet werden. Die Lösungen entsprechen hier genau Funktionen der Art $f_{klm}(r, \vartheta, \varphi)$.

Die Wellenfunktionen sind zwar komplexer Natur und die Modelle können daher nur für die Visualisierung des Realteils oder des Imaginärteils einzeln dienen, jedoch bleiben die Knotenflächen dieselben.

Auch wenn nun das Betrag und anschließend das Quadrat einer der Elektronwellenfunktionen gebildet wird, bleiben diese erhalten. So lassen sich die 3D-Modelle als „Blaupausen“ für die Atomorbitale verstehen (siehe Abb.3).

Die vorgestellten haptischen Modelle zeigen außerdem auf überraschende Weise die Chladnischen Klangfiguren: Die Schnittflächen entsprechen genau den Schwingungsmoden, die man auf einer runden angeregten Platte finden würde (siehe Abb.3).

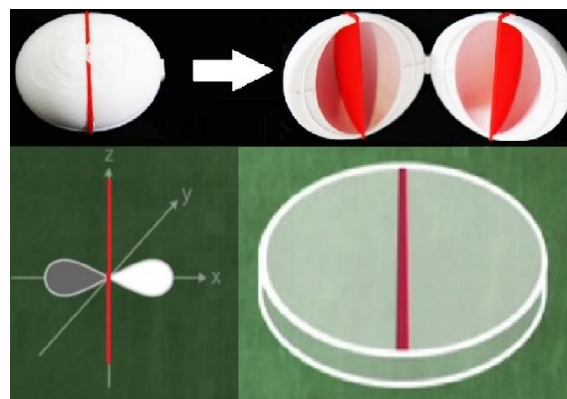


Abbildung 3: Vergleich des p-Orbitals (unten links), der zugehörigen Kugelschwingungsmode im Modell (oben) und die zugehörige Chladnische Klangfigur (unten rechts).

Dieser Zusammenhang zeigt eindrücklich, dass die 3D-Welt aus der 2D-Welt hervorgeht und könnte auch in der Hochschule zu einem besseren Verständnis von Kugelschwingungen führen. Außerdem stellen die Schnitte durch die Modelle auch Modelle der Klangfiguren selbst dar.

5. Literatur

- [1] Heusler, Stefan (2017): Quantenspiegelungen. Url: <http://www.quantenspiegelungen.de> (Stand 5/2018)
- [2] Ubben, Malte & Heusler, Stefan (2018): A haptic approach to spherical vibrations. In: *European Journal of Physics*, 39 (4)

Ein Dynamik-Lehrgang in der Sekundarstufe II unter Verwendung der Videoanalyse

Sebastian Diehl*, Thomas Wilhelm*

* Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt
sebastian.diehl80@gmx.de, wilhelm@physik.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

„Kraft und Bewegung“ ist das zentrale Thema in der gymnasialen Einführungsphase, aber der Unterricht erreicht nur wenig qualitatives Verständnis. Für die Sekundarstufe I zeigen mehrere Studien, dass mehr Verständnis erreicht werden kann, wenn mit zweidimensionalen Bewegungen begonnen wird. Im Rahmen eines Design-Based-Research-Projektes soll nun ein Unterrichtskonzept für den Mechanikunterricht der Oberstufe mit modernen Mess- und Visualisierungsmöglichkeiten ausgearbeitet werden. Kernideen sind, die kinematischen Grundgrößen anhand allgemeiner zweidimensionaler Bewegungen einzuführen, die Videoanalyse von Bewegungen als durchgehendes Messinstrument zu verwenden sowie insbesondere die mathematisch-quantitative Kinematik erst nach der Behandlung der Newton'schen Axiome zu unterrichten. Auf dem Poster wird das Konzept vorgestellt sowie das Treatment-/ Kontrollgruppendesign einer geplanten Studie, in der im regulären Unterricht mehrere Lehrkräfte unterrichten.

1. Motivation

Schulbücher weisen einige fachliche und physikdidaktische Mängel auf [1]. Außerdem werden unrealistische, meist eindimensionale und nicht alltagsnahe Bewegungen betrachtet. Führt man Bewegungen lediglich eindimensional ein, besteht die Gefahr, dass fachliche Begriffe wie z.B. „Beschleunigung“ falsch verstanden werden. Zudem sind Fahrbahnversuche sehr zeitintensiv und bringen nicht immer das gewünschte Ergebnis. Untersuchungen zu Schülervorstellungen belegen, dass Schüler nach dem Mechanikunterricht der Oberstufe nicht sicher über ein Verständnis des Newton'sche Kraftbegriffes verfügen [2-3].

Auf der Schwerpunkttagung „Newton'sche Mechanik“ 2016 der Gesellschaft für Didaktik und Physik haben viele Physikdidaktiker konsensuell Thesen zum Mechanikunterricht verabschiedet [4]. Einige Forderungen sind:

a) Dynamik und Statik

- Der Mechanikunterricht beginnt mit der Dynamik.
- Der dynamische Kraftbegriff steht dabei im Mittelpunkt.

b) Kinematik

- Der Begriff „Weg“ sollte durch die präziseren Begriffe „Ort“ und „Ortsverschiebung“ (als Grundlage der Geschwindigkeitsdefinition) ersetzt werden.
- Kinematische Größen sollten ausgehend vom Ort anhand zweidimensionaler Bewegungen eingeführt werden.

- Zwischen Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsbetrag (bzw. Tempo bzw. Schnelligkeit) muss im Unterricht klar unterschieden werden.
- In der Sekundarstufe II soll das in der Sekundarstufe I erarbeitete qualitative Verständnis der kinematischen und dynamischen Größen mit mathematischen Formulierungen verknüpft werden.

Aktuell gibt es aber kein Unterrichtskonzept mit Unterrichtsmaterialien, das dies mit aktuellen Möglichkeiten und aktueller Software umsetzt.

2. Vorarbeiten

2.1. Klassenstufe 11 Gymnasium in Bayern (G9)

Das Konzept von Wilhelm für die Klassenstufe 11 (Sekundarstufe II; G9) [2] beginnt zunächst ausführlich mit der Kinematik, wobei die Größen Ort, Geschwindigkeit, Schnelligkeit, Geschwindigkeitsänderung und Beschleunigung an allgemeinen zweidimensionalen Bewegungen eingeführt werden. Dafür wurden Bewegungen mit der PC-Maus und dem Messwerterfassungssystem PAKMA analysiert und alle gemessenen Größen in Echtzeit ikonisch mithilfe von Pfeilen dargestellt. Danach wurden bei eindimensionalen Bewegungen Diagramme und mathematische Berechnungen behandelt.

Die Newton'schen Gesetze wurden im Anschluss anhand von eindimensionalen Bewegungen erarbeitet. Dabei wurden Experimente mit mehreren Kräften durchgeführt und alle gemessenen Größen in Echtzeit ikonisch mithilfe von Pfeilen in PAKMA dargestellt. Dabei wird das zweite Newton'sche Axiom als zentrale Gleichung folgendermaßen definiert:

$$\vec{a} = \frac{\sum \vec{F}}{m_{ges}}$$

Es folgten viele Anwendungen zunächst bei eindimensionalen Bewegungen (auch Fall- und Wurfbewegungen) sowie bei Kreisbewegungen.

Die Software PAKMA ist allerdings auf heutigen Betriebssystemen nicht mehr lauffähig, so dass zur Messwerterfassung und -darstellung eine andere Software verwendet werden muss. Wilhelm schlägt dafür die Videoanalysesoftware „measure Dynamics“ vor [5]. Zudem stellt sich die Frage, ob das quantitative Rechnen in der Kinematik nicht erst dann gemacht werden sollte, wenn die Dynamik behandelt ist, damit den Schülern schon bekannt ist, wie eine Beschleunigung entsteht.

2.2. Klassenstufe 7 in Bayern (G8)

Das Konzept für die Jahrgangsstufe 7 (Sekundarstufe I; G8) führt zunächst kinematische Größen (Ort, Tempo, Richtung, Geschwindigkeit und Zusatzgeschwindigkeit; keine Beschleunigung) an zweidimensionalen Bewegungen mithilfe von Pfeildarstellungen ein [6-9]. Auf quantitative Messungen wurde verzichtet und zur Veranschaulichung wurden Stroboskopbilder und Videos verwendet. Es wurden auch keine Diagramme und keine Berechnungen von eindimensionalen Bewegungen vorgenommen. Obwohl das Konzept das Videoanalyseprogramm „measure Dynamics“ verwendet, ist eine Umsetzung des Konzeptes auch ohne Computereinsatz möglich. Im Zentrum des Unterrichtskonzeptes steht das zweite Newton'sche Axiom, das anhand eines senkrechten Stoßes auf eine rollende Kugel eingeführt wird und das als zentrale Gleichung folgendermaßen formuliert wird:

$$\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$$

Für den Mechanikunterricht der Oberstufe muss das Konzept deutlich erweitert werden.

3. Geplantes Forschungsprojekt

3.1. Konzept und Forschungsfragen

Ziel des geplanten Forschungsprojektes ist, bestehende Unterrichtsvorschläge weiterzuentwickeln und ein lehrplankonformes Unterrichtskonzept für die Oberstufe (Jahrgangsstufe 10 (G8) oder 11 (G9)) zu erstellen. Die Studie beschäftigt sich somit mit der Konzeption und Evaluation eines Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen unter Verwendung der Videoanalyse „measure Dynamics“ von Bewegungen. Damit kann das Projekt als ein weiterer Zyklus in einem Design-Based-Research-Forschungsprogramm verstanden werden.

Für das Unterrichtskonzept wurden folgende Entscheidungen getroffen:

- Inhaltlich soll das Konzept dem Pflichtstoff aller Bundesländer gerecht werden.
- Erkenntnisse aus der didaktischen Forschung zum Mechanik-Lernen sollen berücksichtigt

werden (insbesondere die Erkenntnisse in Bezug auf die Verwendung der Videoanalyse von Bewegungen).

- Das Konzept richtet sich an normale Klassen der Oberstufe mit „Standard“-Ausrüstung¹.

Aufgrund der vorherigen Untersuchungen ist das Konzept folgendermaßen aufgebaut:

- Die kinematischen Grundgrößen Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung werden zügig anhand von zweidimensionalen Bewegungen eingeführt. Dabei unterstützt die ikonische Pfeildarstellung das Verständnis bei Schülern.
- Dann folgen die Newton'schen Axiomen, die mithilfe von Experimenten und „measure Dynamics“ behandelt und danach vertieft werden. Dabei wird das zweite Newton'sche Axiom als zentrale Gleichung, wie beim Konzept von Wilhelm [2], folgendermaßen definiert:

$$\vec{a} = \frac{\sum \vec{F}}{m_{ges}}$$

- Erst danach erfolgen die üblichen kinematischen Behandlungen (auch Fall- und Wurfbewegungen) mit Rechnungen und Diagrammen und die Betrachtung eindimensionaler Bewegungen.

Dieses Konzept ist eine deutliche Erweiterung des Konzeptes aus Klassenstufe 7. Gegenüber dem Konzept aus Jahrgangsstufe 11 wird nicht nur das moderne Videoanalyseprogramm „measure Dynamics“ verwendet, es erfolgen auch nach der Dynamik die Berechnungen, so dass schon ein Verständnis für die zentrale Größe „Beschleunigung“ vorhanden ist.

Daraus ergeben sich folgende Forschungsfragen:

- Inwieweit verändert sich das Verständnis sowie die Schülervorstellung zur Newton'schen Mechanik bei den Schülern im Vergleich zum traditionellen Unterricht?
- Inwieweit verändert sich die Einstellung der Schüler zur Physik und speziell zur Mechanik?
- Wie beurteilen Lehrkräfte das Unterrichtskonzept?

3.2. Forschungsdesign

Geplant ist eine quasi-experimentelle Studie im Feld im Treatment-Kontrollgruppen-Design mit einer größeren Anzahl verschiedener Lehrkräfte. Ein fachlicher Verständnistest soll im Pre-Post-FollowUp-Design gestellt werden. Dieser Verständnistest soll Items des FCI-Tests [10] enthalten und mit Items anderer Tests ergänzt werden, z.B. dem Mechanics Baseline Test (MBT) [11], dem Test of Understanding Graphs-Kinematics (TUGK) [12] und einer überarbeiteten Variante des Force and Motion Conceptual Evaluation (FMCE) [13]. Ein Intelligenztest

¹ Kameras, Windowsrechner und ein Videoanalyseprogramm wie z.B. measure Dynamics werden zu einer „Standard“-Ausrüstung gezählt.

dient zur Kontrolle der kognitiven Voraussetzungen der Schülerinnen und Schüler.

Zur Kontrolle des durchgeführten Unterrichts werden die Lehrkräfte gebeten, während der Unterrichtsreihe ein knappes Unterrichtstagebuch zu erstellen. Um die Erfahrungen und Ansichten der teilnehmenden Lehrkräfte zu erheben, werden mit allen Lehrkräften leitfadengestützte Interviews geführt und diese mit einer qualitativen Inhaltsanalyse ausgewertet.

Zeitliche Planung des Forschungsvorhabens:

Schuljahr 2016/2017												
					Versuchsklasse (Unterrichtung einer Klasse mit „measure Dynamics“ innerhalb der gymnasialen Oberstufe einer Gemeinschaftsschule durch S. Diehl)							
8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	

Schuljahr 2018/2019												
					Kontrollgruppen (mehrere Klassen, die herkömmlich unterrichtet werden)							
8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	

Schuljahr 2019/2020												
					Treatmentgruppe (mehrere Klassen, die nach dem neuen Konzept unterrichtet werden)							
8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	

4. Qualitative Betrachtung relevanter Größen mit measure Dynamics

In der Versuchsklasse wurde in der ersten Doppelstunde das Programm „measure Dynamics“ vorgestellt. Danach hatten die Schüler selbst die Möglichkeit eigene Bewegungen aufzunehmen und zu analysieren. Eine Bewegung war ein hüpfender Ball (s. Abb.1), anhand der die kinematischen Grundgrößen besprochen wurden.

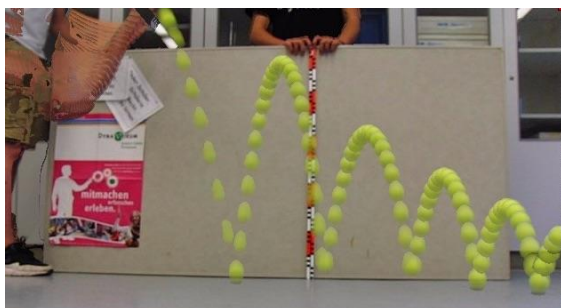


Abb. 1: Stroposkopbild „Hüpfender Ball“

4.1. Ort und Ortsverschiebung

Um Bewegungen von Objekten beschreiben zu können, ist es notwendig deren Ort zu jedem Zeitpunkt zu bestimmen. Measure Dynamics bietet die Mög-

lichkeit den Ursprung des Koordinatensystems nach Bedarf an einem frei wählbaren Ort zu fixieren. In Abb. 2 ist der Ursprung mit „x“ und die Orte des Balls von zwei aufeinanderfolgenden Bildsequenzen ist mit „•“ gekennzeichnet. Für die weitere Betrachtung interessieren die Ortsvektoren, die vom Ursprung aus in Richtung der Orte führen, an denen sich der Ball zu bestimmten Zeitpunkten befunden hat. So bekommt man zwei Pfeile ($\vec{Ort}_{neu}; \vec{Ort}_{alt}$), die die alte und die neu Lage des Balls zu bestimmten Zeitpunkten eindeutig definieren. Es ist auch unschwer erkennbar, dass sich der Ort des Balles verändert hat. Die Schüler konnten ohne Probleme den Pfeil der Ortsveränderung, auch für unbekannte Situationen, vorhersagen, das dann mit Hilfe von measure Dynamics schnell überprüft werden konnte (s. Abb. 2).

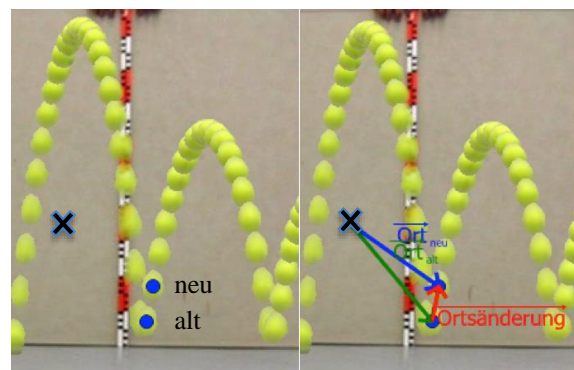


Abb. 2: Zwei Orte und deren Ortsänderung $\Delta \vec{x}$

Im weiteren Verlauf des Unterrichts wurden neben den Ortsverschiebungen $\Delta \vec{x}$ auch die Geschwindigkeiten \vec{v} im Stroboskopbild zu fünf verschiedenen Zeitpunkten eingeblendet (s. Abb. 3).

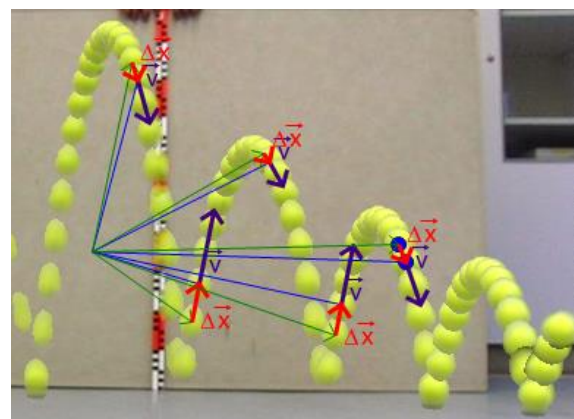


Abb. 3: Zusammenhang zwischen Ortsänderung $\Delta \vec{x}$ und Geschwindigkeit \vec{v}

Die Schüler erkannten sofort, dass die Größe Geschwindigkeit in Verbindung mit der Ortsverschiebung steht, da die entsprechenden Pfeile in die gleiche Richtung zeigen. Der einzige Unterschied ist die Länge der Pfeile. Des Weiteren stellten die Schüler folgenden Zusammenhang fest: Je größer der Pfeil der Ortänderung ist, desto größer ist auch der Pfeil der Geschwindigkeit. Dieser Zusammenhang lässt

sich im späteren Verlauf der Unterrichtsreihe aufgreifen, um die Gleichung

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t}$$

herzuleiten.

4.2. Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsänderung

Im weiteren Verlauf des Unterrichts wurden nun die Geschwindigkeit zu verschiedenen Zeitpunkten im Stroboskopbild gezeigt (s. Abb. 4). Beim Vergleich der Geschwindigkeiten stellten die Schüler fest, dass der Geschwindigkeitspfeil eine Länge und eine Richtung besitzt. Weiter vermuten sie, dass ein kleiner Pfeil „langsamer“ und ein längerer Pfeil „schneller“ bedeutet, da der Ball kurz vor dem Aufkommen auf dem Boden schnell (langer Pfeil) und im Umkehrpunkt langsam (kurzer Pfeil) ist. Diese Erkenntnisse zeigen, dass die Geschwindigkeit aus einer Richtung und einem Tempo besteht.

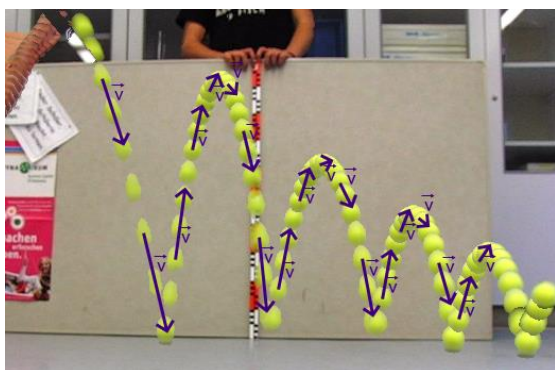


Abb. 4: Geschwindigkeiten an verschiedenen Orten

Wie bei der Ortsänderung auch besteht hier die Möglichkeit sich die Geschwindigkeiten des Balls zweier aufeinanderfolgender Bildsequenzen genauer zu betrachten (s. Abb. 5).

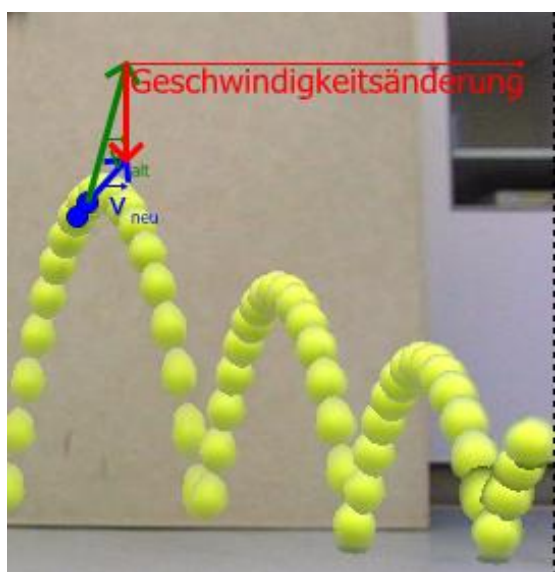


Abb. 5: Zwei Geschwindigkeiten und deren Geschwindigkeitsänderung $\Delta \vec{v}$

Die Schüler erkennen anhand den Geschwindigkeitspfeilen \vec{v}_{alt} und \vec{v}_{neu} , dass eine Geschwindigkeitsänderung stattgefunden hat. Es war für sie auch kein Problem den entsprechenden Pfeil für die Geschwindigkeitsänderung anzugeben. Im weiteren Verlauf wurden die Geschwindigkeitsänderungen $\Delta \vec{v}$ mit den entsprechenden Beschleunigungen zu verschiedenen Zeitpunkten im Stroboskopbild angezeigt (s. Abb. 6).

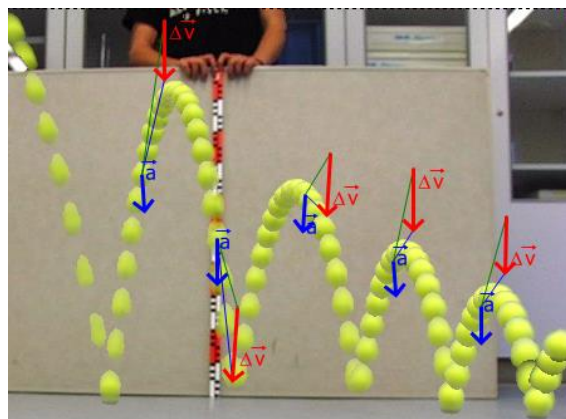


Abb. 6: Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsänderung $\Delta \vec{v}$ und Beschleunigung \vec{a}

Die Schüler erkannten auch hier sofort, dass die Beschleunigung \vec{a} in Verbindung mit der Geschwindigkeitsänderung $\Delta \vec{v}$ steht, da die Pfeile in die gleiche Richtung zeigen, aber unterschiedliche Längen aufweisen. Dieser Zusammenhang lässt sich im späteren Verlauf der Unterrichtsreihe aufgreifen, um die Gleichung

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

herzuleiten.

Für die Schüler war es allerdings erstaunlich, dass die Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsänderungspfeile annähernd gleich waren und alle Richtung Boden zeigen. Auf diesen Sachverhalt wurde eingegangen, indem die Beschleunigung separat betrachtet wurde.

4.3. Beschleunigung

Die Beschleunigungen zu verschiedenen Zeitpunkten wurden den Schülern im Stroboskopbild gezeigt (s. Abb. 7). Die Beschleunigungspfeile sind annähernd gleich lang und zeigen alle Richtung Boden. Nach dem Impuls „Welche physikalische Größe zeigt auch Richtung Boden“ kam aufgrund des Vorwissens der Schüler die Gewichtskraft. Ohne Gewichtskraft würde der Ball auch nicht Richtung Boden fallen „wollen“. Somit lässt sich die Gewichtskraft als Ursache für die Beschleunigung des Balls identifizieren. Dieser Sachverhalt ist für den späteren Unterrichtsverlauf wichtig, um das zweite Newton'sch Axiom zu definieren:

$$\vec{a} = \frac{\sum \vec{F}}{m_{ges}}$$

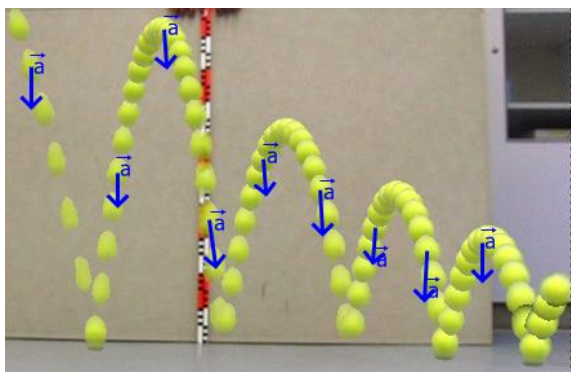


Abb. 7: Beschleunigungen an verschiedenen Orten

5. Literatur

- [1] Wilhelm, T. (Hrsg.) (2018): Stolpersteine überwinden im Physikunterricht. Anregungen für fachgerechte Elementarisierungen, Aulis/Friedrich, Seelze
- [2] Wilhelm, T. (2005): Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung (Bd. 46). Berlin: Logos-Verlag.
- [3] Wilhelm, T. (2007): Vektorverständnis und vektoriell Kinematikverständnis von Studienanfängern. In: Nordmeier, V.; Oberländer, A.; Grötzebauch, H. (Hrsg.) Didaktik der Physik - Regensburg 2007, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin
- [4] Wilhelm, T., Hopf, M. (2017): Bericht von der Schwerpunkttagung „Newton'sche Mechanik“ mit Thesen zur Mechanik. In Maurer, Chr. (Hrsg.): Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Zürich 2016, Band 37, S. 42-46.
- [5] Wilhelm, T. (2009): Videoanalyse mit unterschiedlichen Darstellungsformen. In: Höttecke, D. (Hrsg.): Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung, Jahrestagung der GDCP in Schwäbisch Gmünd 2008, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 29, Lit-Verlag, Münster, 2009, S. 289 – 291.
- [6] Waltner, C., Tobias, V., Wiesner, H., Hopf, M., Wilhelm, T. (2010). Ein Unterrichtskonzept zur Einführung in die Dynamik in der Mittelstufe. Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, 32 (4), S. 122-127.
- [7] Wilhelm, T., Tobias, V., Waltner, C., Hopf, M., Wiesner, H. (2011): Zweidimensionaldynamische Mechanik – Ergebnisse einer Studie. In: Höttecke, D. (Hrsg.): Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung, Jahrestagung der GDCP in Potsdam 2010, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 31, Lit-Verlag, Münster, 2011, S. 438-440.
- [8] Wodzinski, R. (1996): Untersuchungen von Lernprozessen beim Lernen Newtonscher Dynamik im Anfangsunterricht. Lit-Verlag, Münster.
- [9] Wodzinski, R., Wiesner, H. (1994): Einführung in die Mechanik über die Dynamik. Zusatzbewegung und Newtonsche Bewegungsgleichung. In: Physik in der Schule 32, Nr. 6, S. 202-207
- [10] Hestenes, D., Welles, M., Swackhammer, G. (1992): Force Concept Inventory. In: The physics teacher 30, S. 65-78.
- [11] Hestenes, D., Wells, M. (1992): A mechanics baseline test. In: The physics teacher 30, S.159-166.
- [12] Beichner, R. (1994): Testing student interpretation of kinematics graphs. In: American Journal of Physics, 62(8), S.750-762.
- [13] Thornton, R. K., Sokoloff, D.R. (1998): Assessing student learning of Newton's laws: The Force and Motion Conceptual Evaluation and the Evaluation of Active Learning Laboratory and Lecture Curricula. In: American Journal of Physics, 66(4), S.338-352.

Entwicklungssensibilität als Zugang zur Elementarteilchenphysik

Thomas Zügge, Oliver Passon, Johannes Grebe-Ellis

Bergische Universität Wuppertal, Physik und ihre Didaktik, Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal

zuegge@uni-wuppertal.de, passon@uni-wuppertal.de, grebe-ellis@uni-wuppertal.de

Kurzfassung

Die Behandlung der Elementarteilchenphysik in der Schule stellt Lehrende vor Herausforderungen. Die Verfügbarkeit von Unterrichtsmaterial ist gering und in den meisten Fällen ist eine pädagogisch geleitete Legitimation für die verfügbaren Rekonstruktionen nicht transparent nachvollziehbar. Mögliche Ansätze der Legitimierung werden kurz vorgestellt und anschließend um eine weitere, entwicklungssensible Perspektive ergänzt. Diese leitet aus dem Begriff der Entwicklungsaufgaben Beiträge zum Prozess der Elementarisierung ab.

1. Zum Stand der Didaktik der Elementarteilchenphysik

Mittlerweile ist die Elementarteilchenphysik obligatorischer Bestandteil des gymnasialen Physikunterrichts in Bayern, Bremen und Nordrhein-Westfalen. In drei weiteren Bundesländern (Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Schleswig-Holstein) ist sie optional. Die so geschaffene Aufnahme eines dynamischen und komplexen Forschungsgegenstandes in die Lehrpläne bedingte die Entwicklung angemessener Unterrichtsmaterialien und entsprechender Curricula. Neben älteren Arbeiten wie denen von Hacker und Hilscher [1][2] ergänzen vornehmlich Beiträge der Schulbuchverlage und des Netzwerks Teilchenwelt [3] das Repertoire, aus dem Lehrende ihren Unterricht gestalten können.

Mit auffälliger Einmütigkeit (und bis auf wenige Ausnahmen, vgl. [1]) verpassen es die genannten Zugänge, eine Transparenz bezüglich der Bildungs-/Lehrgangsziele herzustellen, durch welche ihre Rekonstruktionen geleitet sind. Häufig wird ein populärkultureller „lebensweltlicher Kontext“ postuliert¹, welcher sogleich als Anlass und Motivation für den Unterricht der Elementarteilchenphysik dient.

Gerade aber eine transparente Elementarisierung der Fachinhalte und die Definition von Bildungszielen, welche über die Vermittlung des Stoffes hinausgehen, erlauben erst eine zielführende Rekonstruktion. Darauf weisen Kattmann et. al. [4] hin, indem sie bemerken:

„Die Gegenstände des Schulunterrichts sind also nicht vom Wissenschaftsbereich vorgegeben, sie müssen vielmehr in pädagogischer Zielsetzung erst hergestellt, d.h. didaktisch rekonstruiert werden.“

¹ Im weiteren Verlauf wird deutlich werden, warum dieser Begriff hier in Anführungszeichen steht und welchen Begrenzungen

Dem dafür nötigen Prozess der diskursiven Klärung geht derjenige der Elementarisierung voraus, wie er im Folgenden für den Gegenstand der Elementarteilchenphysik skizziert wird.

2. Etablierte Zugänge der Elementarisierung

Bei Kattmann et. al. scheint bereits durch, dass über das didaktische (Unterrichts-)Handwerk hinaus weitere pädagogisch begründete Entscheidungen die Unterrichtsgestaltung bedingen. Demnach stehen sie zum einen unter dem Einfluss lehr-lerntheoretischer, zum anderen genuin bildungswissenschaftlicher Perspektiven. Beide Perspektivierungen werden im Folgenden kurz umrissen, bevor sie durch den Vorschlag einer dritten ergänzt werden sollen.

2.1. Ein Beispiel für eine lehr-lerntheoretische Perspektive

Exemplarisch für die lehr-lerntheoretisch geleitete Reduktion eines Fachinhalts ist die Wahrnehmung naturwissenschaftlichen Lernens als Konzeptwechselprozess, wie er beispielsweise von Möller [5] beschrieben wird: Den konstruktivistischen Prozess des Lernens ernst nehmend wird naturwissenschaftliche Bildung als schrittweises und i.d.R. un abgeschlossenes Unterfangen beschrieben (vgl. [6]). Daraus ergibt sich ein dreifaches Desiderat der Anschlussfähigkeit. Sowohl mit Blick auf die bereits richtig konzeptualisierten wie auch die zukünftig zu konstruierenden Zusammenhänge sollen den Lernprozess erschwerende „Spannungen“ vermieden werden. Drittens soll eine der „evolutionären Struktur“ des Lernens (vgl. [7]) bewusste Perspektive sich stark am unmittelbar vor und nach dem aktuellen Gegenstand unterrichteten Stoff orientieren.

unsere Antizipierbarkeit der Lebenswelt junger Menschen unterliegt.

Im Falle der Elementarteilchenphysik, wie sie im Lehrplan des Landes Nordrhein-Westfalen eingebettet ist, lässt sich dies dahingehend umsetzen, dass aus der zeitnah unterrichteten Kernphysik eine Brücke in die Elementarteilchenphysik geschlagen wird ohne die (im großen und ganzen schon fachlich angemessenen) Erkenntnisse aus dem Unterricht der Quantenphysik zu gefährden oder die spätere Auseinandersetzung mit der theoretischen Physik zu behindern. Ein Beispiel für eine bildungstheoretische Perspektive

Prägend für das Verständnis des Begriffs der Elementarisierung ist nach wie vor Klafkis Frage nach dem „Elementaren“ [8] und sein Vorschlag der „didaktische[n] Analyse als Kern der Unterrichtsvorbereitung“ [9]. Untrennbar mit einer solchen Elementarisierung verbunden ist die Identifikation derjenigen Sinnelemente, die für das Begreifen der Grundideen des Stoffs elementar zu nennen sind. Erst danach kann im Diskurs über diese eine Auswahl getroffen werden (vgl. [10]).

Die Grundideen der Elementarteilchenphysik zu bestimmen bedeutet indirekt die Frage nach den Erkenntnissen zu stellen, welche für die Lernenden „Neuigkeits-“ und somit „Irritationspotential“ bieten. Nach der Behandlung der Quanten- und Kernphysik finden sich diese eben nicht in der Reproduktion mechanisch geleiteter Bauanleitungen der Materie, sondern in der Nichtreproduzierbarkeit dieser auf kleineren Skalen. Die in der Quantenfeldtheorie notwendige Verletzung der Teilchenzahlerhaltung und der „umgekehrte Massendefekt“ im Nukleon stiften Anlässe, in Anknüpfung an die Quantenphysik die Dekonstruktion makroskopisch geprägter Teilchenvorstellungen weiter voranzutreiben.

3. Entwicklungssensibilität als Perspektive der Elementarisierung

Ergänzend zu den skizzierten etablierten Zugängen erlaubt es die Entwicklungspsychologie, eine dritte Perspektive zur Elementarisierung des Stoffinhalts einzunehmen. In dieser ist nicht die Reflexion über den Fachinhalt und seine Bedeutung Ausgangspunkt der Definition von Bildungszielen für den Lehrgang, sondern die Reflexion über die Zielgruppe. Wie sich dies konkret ausgestalten ließe soll im Folgenden erörtert werden. Zuvor aber soll der neue Zugriff trennscharf von den Etablierten abgegrenzt werden.

3.1. Entwicklungssensibilität und etablierte Zugänge

Bereits in lehr-lerntheoretischen Perspektiven spielt die Entwicklungspsychologie eine zentrale Rolle. Häufig wird die Entwicklung junger Menschen dabei

aber für den naturwissenschaftlichen Unterricht auf die Kognitionsentwicklung (vgl. [11]) oder die schrittweise Entwicklung von Kompetenzen (vgl. [6]) reduziert. Eine Orientierung an der Identitätsentwicklung junger Menschen, die in den gängigen Standardwerken der Entwicklungspsychologie eine zentrale Rolle einnimmt (vgl. [12]), bleibt bisher weitgehend den geistes- und gesellschaftswissenschaftlichen Fächern vorenthalten.

Auch in bildungswissenschaftlicher Perspektive führt der von Klafki geprägte Begriff der Bildung im Kontext epochaltypischer Schlüsselprobleme [13] teilweise zu entwicklungssensiblen Perspektiven. Ursächlich für die Herausforderungen, die durch junge Menschen zu bewältigen sind aber auch hier nicht die Entwicklungsprozesse der Heranwachsenden (Klafkis Herausforderungen sind weitestgehend altersunabhängig), sondern die Bildungsanlässe in ihrem Umfeld. Diese sind notwendig Teil einer entwicklungssensiblen Perspektivierung, vernachlässigen aber alle Prozesse, die aus den Individuen selbst heraus erwachsen.

3.2. Entwicklungsaufgaben und -räume

Entwicklungsaufgaben nennt man solche Aufgaben, die sich Menschen an bestimmten Punkten in ihrem Leben zur Bewältigung anbieten, bzw. aufdrängen². Ihre Bewältigung ist in dem Sinne unumgänglich, als dass die Nichtbewältigung in der Regel die Auseinandersetzung mit späteren Aufgaben erschwert oder verhindert (vgl. [14]). Ursache sind biologische, psychische und soziale Entwicklungsprozesse von Menschen, die deskriptiv für bestimmte Teilgruppen verallgemeinert werden können und somit normative Ansprüche an die Handelnden begründen. Der Begriff „normative Entwicklungsaufgabe“ beschreibt somit Entwicklungsprozesse, die von der deutlichen Mehrheit, d.h. dem „Normal“ der Jugendlichen durchlaufen werden und beinhaltet weder Wertung noch Appell. (vgl. [15]). In diesem Sinne unterscheidet er sich von in anderen Kontexten verwandten Bedeutungen des Wortes „normativ“³.

Zusätzlich zu den schon vielfältigen möglichen normativen Entwicklungszielen spüren Menschen individuelle, durch Lebensereignisse generierte Zieloptionen. Die letztendliche Wahl aus dem Kanon verfügbarer Entwicklungsaufgaben trifft das Individuum und widmet dieser einen Großteil der zur Verfügung stehenden Ressourcen [16]. In diesem Zusammenhang meint Entwicklungssensibilität die Antizipation normativer Entwicklungsaufgaben und das gezielte Angebot von Bearbeitungsräumen im Rahmen des Fachunterrichts, so dass fachliche

² Die Ablösung von der Herkunftsfamilie oder Berufswahl sind klassische Entwicklungsaufgaben.

³ Alter/Schulstufe ist nur eine Dimension, die zur Definition von Milieus im Sinne der Untersuchung auf mögliche normative

Entwicklungsaufgaben gewählt werden kann: Lebensumfeld, Familien- und Berufsstand sind weitere unter vielen, die einen Zugriff auf die unterschiedlichen Perspektiven der prinzipiell heterogenen Gruppe von Schülerinnen und Schülern ermöglichen.

Bildung nicht in Konkurrenz zu Persönlichkeitsentwicklung inszeniert werden muss (vgl. [17]).

3.3. Die späte Adoleszenz und damit verbundene normative Entwicklungsziele

Die besondere Position der Elementarteilchenphysik im Lehrplan des Landes Nordrhein-Westfalen als letzter Gegenstand vor den Abiturprüfungen ermöglicht die Definition einer eng definierten Zielgruppe, weitestgehend ohne dabei auf überholte, weil am Alter der Teilnehmenden orientierte, Entwicklungsstufenmodelle zurückgreifen zu müssen. Gerade mit dem Abschluss der gymnasialen Schullaufbahn und der damit verbundenen Reifeprüfung [18] sowie dem zeitnahen umfänglichen Gewinn an Autonomiebereichen [19] lässt sich eine außergewöhnlich homogene Gruppe in Bezug auf ihre normativen Entwicklungsziele definieren. Diese kann entwicklungspsychologisch mit der späten bzw. Postadoleszenz identifiziert werden [15], um die es im Folgenden ausschließlich gehen soll. Der Vollständigkeit halber soll bemerkt werden, dass Jugendliche anderer Schulformen in der Regel wesentlich früher in die späte Adoleszenz eintreten [20].

Um einen handhabbaren Zugriff auf die Frage, mit welchen normativen Aufgaben sich Heranwachsende in der späten Adoleszenz konfrontiert sehen zu erlangen, wird im Folgenden entsprechend ihrer Genese unterschieden werden.

3.3.1. Schulische Entwicklungsaufgaben

Unter schulischen Entwicklungsaufgaben sollen jene verstanden werden, die direkt und unmittelbar durch des Systems Schule an Heranwachsende während der späten Adoleszenz herangetragen werden.

Zusätzlich zu den impliziten Erwartungen durch in den Kernlehrplänen formulierte Kompetenz- und Wissenserwartungen findet das Lernen Heranwachsender stets im Kontext bevorstehender Leistungsüberprüfungen, Projekt- und Praktikumsphasen und potentiell inner- wie außerschulischer Wettbewerbe statt. Für Schüler*innen in der späten Adoleszenz, speziell im letzten Jahr vor den Abiturprüfungen, ist der Wunsch, diese zu bestehen, normatives Entwicklungsziel.

So naiv diese Perspektive scheinen mag, so wichtig ist es zu betonen, dass sich weder aus lehrerlerntheoretischer, noch aus bildungstheoretischer Perspektive Anlässe für die gängige Praxis, Unterricht inspiriert vom Lehrplan und den Vorgaben des Zentralabiturs zu gestalten, ergeben; immer vorausgesetzt man räumt dem Lehrplan keinen pädagogischen Wert *eo ipso* ein.

Die pädagogische Legitimation der Frage von Schüler*innen nach der „Prüfungsrelevanz von Unterrichtsinhalten“, und so real spürbaren Bedürfnissen zu begegnen, ergibt sich erst aus einer

entwicklungssensiblen Perspektive, welche danach sucht, den Lernenden selbst Gewicht in der Elementarisierung zu geben. In diesem Sinne ist die Schule und speziell ihr organisatorischer Rahmen lebensweltlicher Kontext.

3.3.2. Gesellschaftlich-soziale Entwicklungsaufgaben

Im Gegensatz zu schulischen Entwicklungszielen werden gesellschaftlich-soziale Entwicklungsziele durch äußere Einflüsse bedingt, die unabhängig von der Organisation Schule Heranwachsenden mit Erreichen der späten- oder Postadoleszenz angeboten werden.

Dazu zählt nicht nur die im Vergleich zu anderen Schulformen auf dem Gymnasium retardierte [20] Entwicklungsaufgabe der Berufsorientierung, sondern vor allem auch Entwicklungserwartungen seitens der Gesellschaft, die mit dem Erreichen juristischer Volljährigkeit verbunden sind. So sind der Erwerb der Rechte, die eigene politische Meinung im Wahlrecht auszudrücken oder ein Fahrzeug zu führen in der Regel eng mit der Erwartung, diese neuen Freiheiten reflektiert und verantwortungsbewusst ausüben zu können, verbunden.

Hinzu kommen Milieu-spezifische oder durch die unmittelbare Peergroup geprägte Erwartungen, die sich je nach Kontext in Form (populär-)kultureller Expertise, Engagement, Freizeitgestaltung etc. äußern. In diesem Sinne erfährt der eingangs erwähnte Kontext der Darstellung moderner Wissenschaft in der Populärkultur eine neue Deutung. Unabhängig davon, ob Heranwachsende selbst sich durch die Darstellungen von Physik(er*innen) in bspw. Dan Browns und Christopher Nolans Werken zum Physikunterricht hingezogen fühlen, wird von ihnen innerhalb der eigenen Peergroup aufgrund ihrer Kurswahl mitunter Urteilsfähigkeit erwartet, eine Erwartung, die sie als Teil der sich darin ausdrückenden eigenen Identitätskonstruktion selbst an sich stellen.

3.3.3. Individuell-psychologische Entwicklungsaufgaben

Diese Identitätskonstruktion gehört streng genommen schon zu den individuell-psychologischen Entwicklungsaufgaben. Insgesamt erreicht die Auseinandersetzung mit der eigenen Identität im Verlauf der Adoleszenz ihren vorläufigen Höhepunkt [15] abermals verschärft in der späten Adoleszenz durch den Zugewinn an Autonomiebereichen [19] und die Perspektive, die in den Aufgaben zuvor differenzierte Identität außerhalb der vertrauten Kontexte auf ihre Wirksamkeit in der „Welt“ hin zu überprüfen. Die Suche nach Augenhöhe und verlässlichen, differenzierten, eigenen Werturteilen gewinnt zunehmend an Bedeutung, Gedankenexperimente spielen in der Bewältigung

eine zentrale Rolle [21]. Zusammenfassend also lässt sich der Übergang der späten Adoleszenz also als Emanzipationsprozess verstehen.

Aus entwicklungssensibler Perspektive stiftet dies Anlass, emanzipatorische Räume auch innerhalb der Schule zu öffnen. Insofern sind die für viele Lehrende schwer zu fassende Komplexität von Themen der modernen Physik und mitunter fragwürdig verkürzte Schulbuchdarstellungen⁴ keine Barrieren für zielgruppengerechten Physikunterricht, sondern Chancen, den schulischen Bildungsprozess bewusst emanzipiert abzuschließen.

4. Fazit

Neben bildungstheoretischen und lehrerlernaufbauenden Perspektiven kann eine von den normativen Entwicklungsaufgaben junger Menschen geleitete Perspektive zusätzliche Impulse für die Elementarisierung liefern. Auch wenn dies nicht die diskursive Legitimierung des Lehrgangs abschließt, erweitert es in dieser die Möglichkeiten, zielgruppenbewusst Stoffinhalte auszuwählen und bietet neue Strukturpunkte zur Kontextualisierung des Unterrichts.

5. Literatur

- [1] Hacker, German (2001): Grundlagen der Teilchenphysik, Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation
- [2] Hacker G., Hilscher H. (2007): Elementarteilchenphysik in der Schule. In: Kircher, Ernst; Girwidz, Raimund; Häußler, Peter (Hrsg.): Physikdidaktik. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin, S. 479-508
- [3] Kobel, Michael et. al. (2017): Teilchenphysik – Unterrichtsmaterialien ab Klasse 10. Joachim Herz Stiftung, Hamburg
- [4] Kattmann, Ulrich et. al. (1997): Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, Jg. 3, Heft 3, S. 3-18
- [5] Möller, Kornelia (2013): Lenen in Naturwissenschaften heisst: Konzepte verändern. In: Labudde, Peter (Hrsg.): Fachdidaktik Naturwissenschaft, Haupt Verlag, Bern, S. 63-69
- [6] Jung, Walter (1993): Hilft die Entwicklungspsychologie dem Naturwissenschaftsdidaktiker. In: Duit, R.; Gräber, W. (Hrsg): Kognitive Entwicklung und Lernen der Naturwissenschaften. IPN an der Universität Kiel, S. 86-108
- [7] Kordes, Hagen (1989): Didaktik und Bildungsgang, Lit Verlag, Münster
- [8] Klafki, Wolfgang (1963): Das pädagogische Problem des Elementaren und die Theorie der kategorialen Bildung. Beltz, Weinheim
- [9] Klafki, Wolfgang (1969): Didaktische Analyse als Kern der Unterrichtsvorbereitung. In: Roth, Heinrich; Blumental, Alfred (Hrsg.): Didaktische Analyse. Schroedel, Hannover, S. 5-34
- [10] Frey, Karl (1975). Rechtfertigung von Bildungsinhalten im elementaren Diskurs. In: Künzli, Rudolf (Hrsg.): Curriculumentwicklung - Begründung und Legitimation. Kösel, München, S. 103-129
- [11] Kircher, Ernst et al. (2015): Physikdidaktik, Springer-Lehrbuch, Springer-Verlag, Berlin
- [12] Oerter, Rolf; Montada Leo (2008): Entwicklungspsychologie, BeltzPVU, Weinheim
- [13] Klafki, Wolfgang (2007): Neue Studien zur Bildungstheorie und Didaktik, Beltz, Weinheim
- [14] Havighurst, Robert J. (1975): Youth, University of Chicago Press, Chicago
- [15] Flammer, August; Alsaker, Françoise (2002): Entwicklungspsychologie der Adoleszenz, Verlag Hans Huber, Bern
- [16] Hericks, Uwe (1998): Der Ansatz der Bildungsgangforschung und seine didaktischen Konsequenzen, In: Meyer, Meinert; Reinartz, Andrea (Hrsg.): Bildungsgangdidaktik, Leske+Budrich, Opladen, S. 173-188
- [17] Hofer, Manfred (2014), Persönlichkeitsentwicklung als schulisches Erziehungsziel jenseits kognitiver Kompetenzen, In: Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie, 46(2), S. 55-66, Hogrefe Verlag, Göttingen
- [18] Albisser, Stefan; Buschor, Chrisine Bieri (2011): Sozialisation und Entwicklungsaufgaben Heranwachsender, Schneider Verlag Hohengehren, Baltmannsweiler
- [19] Lewin, Kurt (1963): Feldtheorie in den Sozialwissenschaften, Huber, Bern
- [20] Kunze, Ingrid (1998): Bildungsgangdidaktik, eine Didaktik für alle Schulstufen?, In: Meyer, Meinert; Reinartz, Andrea (Hrsg.):

⁴ Um zwei Beispiele aus der Behandlung von Feynman-Diagrammen zu nennen: Auf Seite 147 des Schulbuches Dorn-Bader [22] wird die Pfeilrichtung mit der Bewegungsrichtung identifiziert und geschlossen, dass Antiteilchen „also in der Zeit rückwärts“ laufen. Auf Seite 247 der Metzlerphysik [23] wird die Nicht-Beobachtbarkeit virtueller Teilchen damit erklärt, dass die Wechselwirkungszeit sehr kurz sei. Interessanterweise warnt

jeder der beiden Texte ausdrücklich vor dem Missverständnis, das sich im jeweils anderen findet. So könnte schon allein der Vergleich von diesen nicht nur zu einem vollständigeren Verständnis von Feynman-Diagrammen führen, sondern zudem den Emanzipationsprozess von etablierten Autoritäten (in diesem Fall dem Schulbuch) Raum geben.

- Bildungsgangdidaktik, Leske+Budrich,
Opladen, S. 247-260
- [21] Oerter, Rolf; Dreher, Eva (2008): Jugendalter,
In: Oerter, Rolf; Montada Leo (Hrsg):
Entwicklungspsychologie
Entwicklungspsychologie, BeltzPVU,
Weinheim, S. 271-332
- [22] Kilian, Ulrich (Hrsg.) (2016): Dorn-Bader
Physik, Qualifikationsphase Grundkurs NRW,
Bildungshaus Schulbuchverlage, Braunschweig
- [23] Grehn, Joachim; Krause, Joachim (Hrsg.)
(2015): Metzler Physik Gesamtband SII,
Grundkurs NRW, Bildungshaus
Schulbuchverlage, Braunschweig

Smartphone-Experimente mit externen Sensoren

Dominik Dorsel*, Sebastian Staacks*, Simon Hütz[†], Heidrun Heinke[†], Christoph Stampfer*

*2. Physikalisches Institut IIA, RWTH Aachen University

[†]1. Physikalisches Institut IA, RWTH Aachen University

dorsel@physik.rwth-aachen.de, staacks@physik.rwth-aachen.de,

huetz@physik.rwth-aachen.de, heinke@physik.rwth-aachen.de, stampfer@physik.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Smartphones sind heutzutage weit verbreitet und eignen sich aufgrund der vielen verbauten Sensoren auch als Messgeräte für physikalische Experimente. Die an der RWTH Aachen entwickelte App *phyphox* ermöglicht ein einfaches Auslesen dieser verbauten Sensoren sowie die Weiterverarbeitung und Darstellung der Messdaten. Die gängigsten verbauten Sensoren, wie zum Beispiel Beschleunigungssensoren oder ein Gyroskop, eignen sich besonders gut für Experimente aus der Mechanik, von denen viele bereits in der App implementiert sind. Um neue Experimente zum Beispiel aus der Thermodynamik durchführen zu können sind aber neue Sensortypen wie zum Beispiel ein Temperatursensor nötig. Deshalb unterstützt *phyphox* mit dem nächsten Update die Einbindung von externen Sensoren über die Schnittstelle Bluetooth Low Energy. Dadurch können externe Sensoren auf verschiedene Weise in *phyphox* eingebunden werden: als fertige Sensormodule verschiedener Hersteller (wie z.B. die Sensorbox SensorTag von Texas Instruments), als Sensoren in Alltagsgegenständen (wie z.B. einer Computermaus) oder als selbstentwickeltes Sensormodul. Bei letzterem kommen neben den Sensoren Mikrocontroller wie der Arduino zum Einsatz.

1. Motivation

Smartphone-gestützte Experimente sind eine willkommene Abwechslung im Physikunterricht und werden deshalb bereits vielfach genutzt [1,2,3]. Die in Smartphones verbauten Sensoren wie Beschleunigungssensor, Gyroskop und Magnetometer ermöglichen bereits eine Vielzahl an Experimenten insbesondere im Bereich der Mechanik [1]. Allerdings bieten die Sensoren nur begrenzte Möglichkeiten für Versuche aus anderen Gebieten der Physik wie der Thermodynamik, da Sensortypen wie zum Beispiel ein Temperatursensor in Smartphones fehlen. Um die für

die Experimente zur Verfügung stehende Auswahl der verschiedenen Sensortypen zu vergrößern, unterstützt *phyphox* deshalb mit dem nächsten Update die Einbindung externer Sensoren über die Schnittstelle Bluetooth Low Energy (BLE). Dies eröffnet vielfältige zusätzliche Experimente in physikalischen Gebieten jenseits der Mechanik und in weiteren MINT-Fächern (siehe schematische Darstellung in Abb. 1). Beispiele für letzteres sind die Aufzeichnung des zeitlichen Verlaufs eines pH-Wertes in einem chemischen Experiment, der über die Einbindung eines pH-Wert-Sensors zugänglich wird.

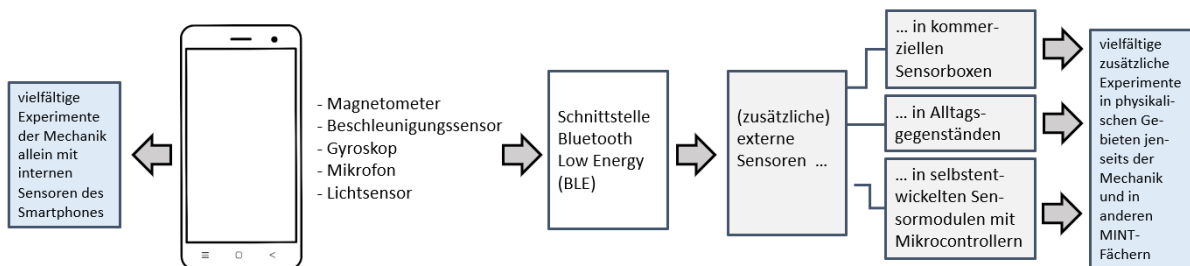


Abb.1: Die Schnittstelle Bluetooth Low Energy (BLE) ermöglicht eine Erweiterung der verfügbaren Sensoren und bietet somit neue vielfältige Experimente besonders jenseits der Mechanik und in anderen MINT-Fächern.

2. Die App *phyphox*

Die App *phyphox* (physical phone experiments) von der RWTH Aachen liest die meisten der in Smartphones verbauten Sensoren aus und unterstützt das Experimentieren mit einigen hilfreichen Features. So ermöglichen verschiedene Rechenoperationen von einfacher Addition bis hin zur Fouriertransformation die Weiterverarbeitung der Messdaten direkt auf dem Smartphone. Anschließend können die Messdaten in verschiedenen Graphen visualisiert werden. Zudem sind in *phyphox* bereits eine Vielzahl an Experimenten vorhanden. Je nach Experiment können die Rohdaten der Sensoren oder auch weiterverarbeitete Messdaten dargestellt werden. Ein Editor ermöglicht die individuelle Anpassung der vorhandenen Experimente sowie die Erstellung eigener Experimente [4].

Weiterhin kann in der App *phyphox* ein Fernzugriff aktiviert werden, wodurch die Messwerte auf einem zweiten Gerät mit einem Internetbrowser dargestellt werden können. Dadurch können Messungen überwacht oder gesteuert werden, obwohl das Smartphone-Display bedingt durch einen Messaufbau nicht einsehbar und bedienbar ist.

Die App *phyphox* wird dabei stetig weiterentwickelt. Beispielsweise laufen zurzeit umfangreiche Arbeiten von physikkundigen Freiwilligen, um *phyphox* in weitere Sprachen jenseits von Deutsch und Englisch zu übersetzen und damit weiteren Nutzergruppen zugänglich zu machen.

Zudem wird mit der hier vorgestellten Weiterentwicklung die Möglichkeit geschaffen, über die Schnittstelle BLE auch externe Sensoren als Quelle experimenteller Daten nutzen zu können. Diese Daten können dann ebenfalls mit den Auswerte- und Darstellungsroutinen von *phyphox* weiterverarbeitet werden. Über die damit erschlossene praktisch unbeschränkte Vielfalt von adressierbaren Sensortypen eröffnet sich eine große Palette neuartiger Experimente. Diese sind nicht nur in verschiedenen Gebieten der Physik jenseits der Mechanik zu finden, sondern können ebenso in anderen MINT-Fächern genutzt werden. Denkbar wäre z. B. die Einbindung externer pH-Wert-Sensoren in der Chemie oder von Beleuchtungsstärkesensoren in der Biologie.

3. Mögliche externe Sensoren

Um *phyphox* Zugang zu externen Sensortypen zu ermöglichen, wird mit dem nächsten Update eine Bluetooth Low Energy Schnittstelle implementiert. Abbildung 1 zeigt schematisch, dass über den Standard Bluetooth Low Energy prinzipiell drei verschiedene Typen von Sensoren nutzbar werden: Fertige Sensorboxen, Geräte aus dem Alltag, aber auch selbst entwickelte Messgeräte auf Mikrocontrollerbasis können eingebunden werden. Diese drei Möglichkeiten werden nachfolgend genauer erläutert.

3.1. Sensorboxen

Sensorboxen wie der SensorTag von Texas Instruments (Abb. 2.), der BBC micro:bit (Abb. 2.) oder das

PocketLab von Myriad Sensors ermöglichen eine sehr einfache Erweiterung der zur Verfügung stehenden Sensoren. Die genannten Sensorboxen enthalten unterschiedliche Sensoren und sind für 20 bis 100 Euro zu erhalten. Neben den praktisch in jedem Smartphone vorhandenen Sensoren wie beispielsweise Beschleunigungssensoren oder einem Gyroskop bieten die verschiedenen genannten Modelle auch neue Sensoren wie zum Beispiel einen Druck-, Temperatur- oder Luftfeuchtigkeitssensor. Mithilfe der GPIO-Anschlüsse am BBC micro:bit können auch Ströme und Spannungen gemessen werden.

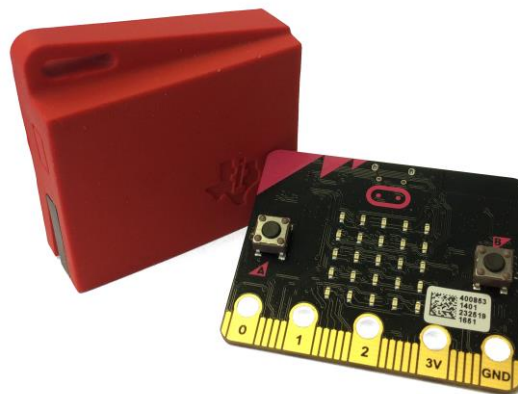


Abb.2: Links die Sensorbox SensorTag der Firma Texas Instruments und rechts die Sensorbox micro:bit von BBC.

Die Sensormodule können mit der weiterentwickelten App *phyphox* sehr einfach in die Aufnahme und damit auch nachfolgende Auswertung und Darstellung experimenteller Daten mit *phyphox* eingebunden werden. Dies bietet verschiedene Vorteile auch für Schülerexperimente im MINT-Unterricht:

- Werden die externen Sensoren einer Sensorbox zur Messwerteaufnahme genutzt, dann wird damit auch die oft sehr unterschiedliche Hardwareausstattung bei Smartphone-Experimenten mit schüler eigenen Geräten umgangen. Durch die Nutzung gleicher Sensorboxen haben alle Schülerinnen und Schüler Zugriff auf die gleichen Sensoren mit identischen Auflösungen und Messbereichen. Dies homogenisiert die Nutzung von Smartphone-gestützten Experimenten im Physikunterricht. Die Homogenisierung der entscheidenden experimentellen Ausstattung wird zudem die Betreuung der Experimente durch die Lehrkraft vereinfachen.
- Mit der Nutzung von Sensorboxen wird die Sensorik in ein externes Gehäuse verlagert, das verglichen mit den Smartphones in der Regel kleiner, zudem in seinem Aufbau weniger (stoß)empfindlich und auch deutlich kostengünstiger ist. Dies eröffnet neue Experimentiermöglichkeiten. Beispielsweise können die Kräfte in einem geworfenen oder springenden Ball gemessen werden, ohne das Smartphone zu gefährden.
- Die Einbindung von zusätzlichen Sensortypen, die in Sensorboxen oft ergänzend zu den gängigen in Smartphones verbauten Sensoren enthalten sind,

ermöglicht zudem einen Zugang zu weiteren Experimenten in der Physik und den anderen Naturwissenschaften.

- Der einfach realisierbare Zugriff auf die von Sensorboxen gelieferten Daten kann dafür genutzt werden, Schülerinnen und Schüler z.B. im Rahmen von Projektunterricht oder außerunterrichtlichen Aktivitäten ihre eigenen Experimente entwickeln zu lassen.

3.2. Sensoren aus dem Alltag

Der Standard Bluetooth Low Energy wird auch in vielen Geräten aus dem Alltag verwendet. Manche dieser Geräte wie zum Beispiel ein Fitnesstracker oder eine Bluetooth-Maus eignen sich hervorragend zur Messung physikalischer Messgrößen.

Mithilfe eines Fitnesstrackers kann beispielsweise die Herzfrequenz gemessen werden. Diese experimentellen Daten können dann in einem kontextorientierten Unterricht zum menschlichen Körper genutzt werden. Eine Bluetooth-Maus hingegen bietet eine einfache Möglichkeit zur Distanzmessung.

Die eingebundenen externen Sensoren können mit dem in *phyphox* implementierten Editor beliebig mit anderen externen oder im Smartphone vorhandenen Sensoren kombiniert werden. Zum Beispiel kann, wie in Abb. 3 zu sehen, mit einer Bluetooth-Maus und dem Lichtsensor des Smartphones die $\frac{1}{r^2}$ -Abhängigkeit zwischen gemessener Beleuchtungsstärke und Abstand zur Lichtquelle gemessen werden. Dafür muss lediglich ein Teelicht zusammen mit der Bluetooth-Maus vor dem Lichtsensor positioniert werden.

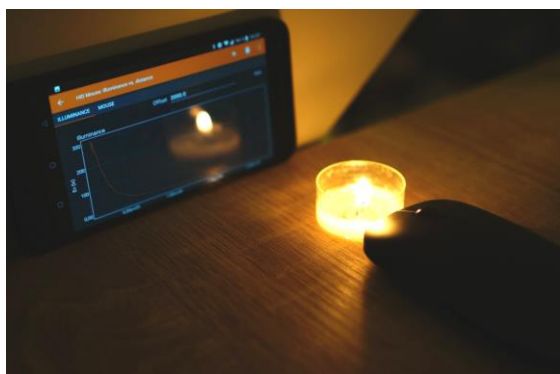


Abb.3: Versuchsaufbau zur Messung der $\frac{1}{r^2}$ -Abhängigkeit zwischen Lichtstärke und Abstand zur Lichtquelle

In *phyphox* wird die gemessene Beleuchtungsstärke gegen die Strecke aufgetragen. Wenn nun Teelicht und Bluetooth-Maus zusammen auf den Lichtsensor zu oder von ihm wegbewegt werden, wird der $\frac{1}{r^2}$ -Zusammenhang im Graphen sichtbar (Abb. 4.).

Die Vorteile der Nutzung von Sensoren in Alltagsgegenständen zur Messwertaufnahme mit *phyphox* überdecken sich teilweise mit den bereits oben für Sensorboxen genannten Aspekten.

- Auch durch Sensoren in Alltagsgegenständen wird die Palette der zur Messwertaufnahme nutzbaren Sensoren gegenüber den gängigen in Smartphones

verbauten Sensoren verbreitert und damit der Experimente-Pool deutlich erweitert, was den gesamten MINT-Unterricht bereichern kann.

- Auch die Sensoren in Alltagsgegenständen können von Schülerinnen und Schülern z.B. im Rahmen von Projektunterricht oder außerunterrichtlichen Aktivitäten in selbst entwickelten Experimenten genutzt werden, wobei der Entwicklungsaufwand gegenüber der Nutzung von Sensorboxen als etwas höher einzuschätzen ist.
- Zusätzlich verknüpft die Nutzung von Sensoren aus dem Alltag den MINT-Unterricht auf natürliche Weise mit der Erfahrungswelt der Schülerinnen und Schüler.

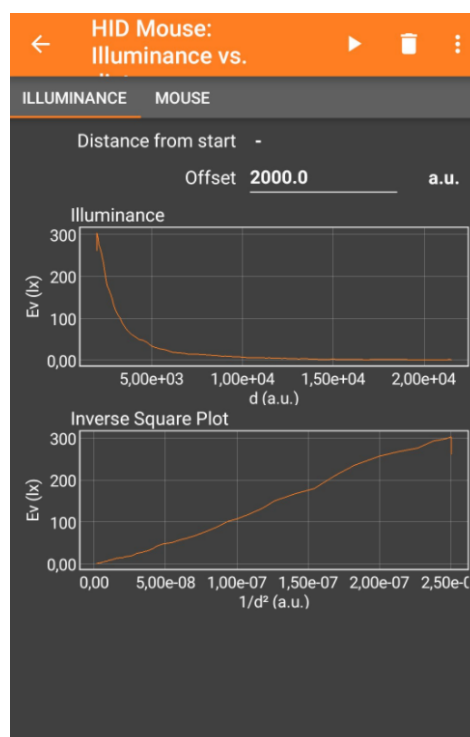


Abb.4: Messung der $\frac{1}{r^2}$ -Abhängigkeit zwischen der gemessenen Lichtstärke gegen den Abstand zur Lichtquelle.

3.3. Eigenbausensoren

Durch die Kombination von einzelnen Sensoren oder Modulen aus mehreren Sensoren mit einem Mikrocontroller wie dem Arduino oder dem ESP32 können auch eigene Messgeräte entwickelt und in die Messdatenerhebung mit *phyphox* eingebunden werden.

Exemplarisch sei hier das Sensormodul „BMP280“ vorgestellt, welches Messungen von Luftdruck, Luftfeuchtigkeit und Temperatur ermöglicht. Dieses Sensormodul kann zum Beispiel kombiniert mit einem ESP32 in ein Einmachglas gesteckt werden, das dann verschlossen und in einen Topf mit kochendem Wasser gestellt wird (Abb. 5.).



Abb.5: Ein ESP32 mit dem Sensormodul BME280 in einem Einmachglas zur Messung eines isochoren Prozesses.

Dadurch kann ein isochorer Prozess beobachtet werden, wie in Abb. 6 zu sehen ist.

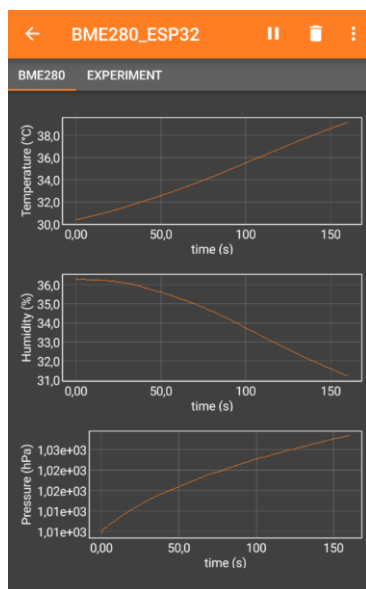


Abb.6: Messung von Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit mithilfe des Sensormoduls BMP280 und eines ESP32 innerhalb eines sich erwärmenden Einmachglases.

Solche selbst entwickelten Eigenbau-Sensormodule aus der Kombination von Sensor(en) und Mikrocontroller bieten verschiedene Vorteile, die sie auch gegenüber den weiter oben diskutierten fertigen Sensorboxen oder kommerziellen Messgeräten auszeichnen.

- Wie schon bei den Sensorboxen ermöglicht auch bei den Eigenbau-Sensormodulen die Einbindung von zusätzlichen Sensortypen einen Zugang zu weiteren Experimenten in der Physik und den anderen Naturwissenschaften. Dabei kann hier nahezu jeder beliebige Sensor genutzt werden. Dadurch können auch für Sensorboxen untypische Messgrößen wie die Feinstaubbelastung oder der UV-Index gemessen werden. Aufgrund der großen Arduino Community findet man auch bei vielen

Sensoren Hilfestellung in diversen Webseiten, die zur Realisierung der eigenen Messgeräte genutzt werden können.

- Zusätzlich können bei den Eigenbau-Sensormodulen die Sensoren hinsichtlich des Messbereiches oder der Genauigkeit individuell auf das Experiment angepasst oder Sensoren auch für verschiedene Messbedingungen wie bspw. Aggregatzustände ausgewählt werden. Wie bei der Nutzung von Sensorboxen wird auch hier die Sensorik in ein externes Gehäuse verlagert. Der Aufbau wird somit verglichen mit den Smartphones ebenfalls weniger empfindlich und auch deutlich kostengünstiger, was neue Experimentiermöglichkeiten eröffnet.
- Neben den genannten Vorteilen bietet der günstige Preis von Mikrocontrollern und Sensoren die Möglichkeit Messgeräte auch für jeden Schüler zugänglich zu machen. Damit können nun auch Experimente als Schülerversuche realisiert werden, bei denen diese Option bislang aus Kostengründen entfiel [5]. Eigenentwicklungen erfordern allerdings auch einen höheren Arbeitsaufwand, verbessern aber auch gleichzeitig das Verständnis der Funktionsweise der verwendeten Sensoren bzw. der Elektronik.
- Dass die App *phyphox* mit ihren umfangreichen Funktionalitäten zur Datenverarbeitung und -darstellung in solchen Experimenten eine universelle Konsolenfunktion übernehmen kann, die den Schülerinnen und Schülern zudem bereits aus Smartphone-Experimenten unter Nutzung der geräteinternen Sensoren bekannt sein kann, vereinfacht die Handhabung solcher Schülerexperimente deutlich. Dadurch kann auch die extrinsische kognitive Belastung bei anspruchsvolleren Schülerexperimenten, welche die Aufnahme und Auswertung digitaler Daten beinhalten, entscheidend reduziert werden.
- Außerdem können *phyphox*-Experiment-Konfiguration auf dem Mikrocontroller hinterlegt und mithilfe der Bluetooth-Schnittstelle übertragen werden. Dadurch können *phyphox*-Experimente auch ohne eine aktive Internetverbindung lokal verbreitet werden.

Wie bereits für die anderen beiden Sensortypen postuliert, kann auch der Ansatz mit Eigenbau-Sensormodulen genutzt werden, um Schülerinnen und Schüler z.B. im Rahmen von Projektunterricht oder außerunterrichtlichen Aktivitäten ihre eigenen Experimente entwickeln zu lassen. Dabei ist der Entwicklungsaufwand für solche Experimente gegenüber der Nutzung von Sensorboxen oder Sensoren in Alltagsgegenständen nochmals als etwas höher zu bewerten.

4. Ausblick

Mithilfe von externen Sensoren kann die limitierte Anzahl der im Smartphone verbauten Sensortypen enorm erweitert und für Smartphone-gestützte

Experimente genutzt werden. Alle drei hier vorgestellten Varianten der Einbindung externer Sensoren in die Datenaufnahme mit der App *phyphox* versprechen klare Vorteile für die Gestaltung von Experimenten im naturwissenschaftlichen Unterricht. Dabei bietet besonders die Einbindung von Eigenbau-Sensormodulen mit externen Sensoren in Kombination mit einem Mikrocontroller wie einem Arduino oder ESP32 eine ideale Möglichkeit die naturwissenschaftlichen Gebiete miteinander zu verknüpfen. Ausgehend von der Programmierung des Mikrocontrollers können mit selbstentwickelten Messgeräten physikalische Messgrößen aufgenommen, verarbeitet, dargestellt und anschließend im Kontext verschiedener MINT-Fächer interpretiert werden.

5. Literatur

- [1] S. Staacks, S. Hütz, H. Heinke, C. Stampfer
Advanced tools for smartphone-based experiments: *phyphox*. In: *Physics Education* 53, 045009, (2018)
- [2] P. Vogt, J. Kuhn, S. Gareis. Beschleunigungssensoren von Smartphones: Beispieleexperimente zum Einsatz im Physikunterricht. In: *PdN-PhiS*. 7/60 (2011), S. 15-23.
- [3] P. Vogt, J. Kuhn. Elastische und inelastische Stöße mit den in Smartphones verbauten Beschleunigungssensoren. In: *PdN-PhiS* 1/64, (2015), S. 46-48
- [4] S. Staacks, C. Stampfer, T. Wilhelm, J. Kuhn, *Phyphox* bringt das Smartphone ins Rollen In: *Physik in unserer Zeit*. 48 (3), (2017), S. 148-149.
- [5] C. Salinga, A. Zeus, S. Hütz, F. Deußen, L. Büsch, H. Heinke, Schülerexperimente unter Nutzung eines Arduinos. In: *Plus Lucis* 1/2018, (2018), S. 12-16.

Storyboards für die Erstellung von Mixed-Reality-Experimentierumgebungen

Dorothee Ermel, Sebastian Haase, Marcus Pfaff, Jürgen Kirstein, Volkhard Nordmeier

Freie Universität Berlin, Didaktik der Physik

dorothee.ermel@fu-berlin.de, sebastian.haase@fu-berlin.de, marcus.pfaff@fu-berlin.de,
juergen.kirstein@fu-berlin.de, volkhard.nordmeier@fu-berlin.de

Kurzfassung

Ziel des Projekts "Erfahrungsbasiertes Lernen durch interaktives Experimentieren in erweiterten Realumgebungen (ELIXIER)" ist die lernförderliche Erweiterung naturwissenschaftlicher sowie ingenieurtechnischer experimenteller Praktika. Dies soll durch den Einsatz multimedialer und interaktiver Elemente im Experimentierprozess sowie einer adaptiven Lernbegleitung in allen Phasen des Experimentierprozesses ermöglicht werden. Um digitale Lernangebote und reale Experimente zu kombinieren, wird das Seamless-Smart-Lab (S2L) entwickelt. Die darin verankerten Strukturen sollen eine nutzerfreundliche Erstellung von interaktiven Laboranwendungen ohne Programmierung beinhalten. So dient das Storyboard zur Festsetzung, welche Daten und Handlungen erhoben werden sollen, wie diese auszuwerten sind (Learning Analytics) und welche Rückmeldungen gegeben werden sollen. Die Datenerhebung erfolgt durch Tracking der Experimentierfortschritte der Lernenden. Ebenso sind für die bedarfsgerechte Anpassung von Inhalten Analysetools für Lernprozesse und Nutzer*innenaktionen vorgesehen. In diesem Beitrag werden die Elemente und technischen Spezifikationen des Systems vorgestellt.

1. Das Seamless Smart Lab (S2L)

Im Rahmen des Projekts ELIXIER soll ein System entwickelt werden, welches eine nutzerfreundliche Erstellung von Mixed-Reality-Experimentierumgebungen ermöglicht. Dieses bringt unterschiedlichste Anforderungen mit sich. So müssen einerseits Lerninhalte erstellt werden können, die sich zur Nutzung in einem erweiterten Lernraum eignen, Parameter festgesetzt werden, welche vom System erhoben und ausgewertet werden sollen, sowie eine Verknüpfung von realem Experiment und virtuellen Informationen oder Hinweisen hergestellt werden. Andererseits sollte darauf geachtet werden, eine nutzerfreundliche Erstellung zu ermöglichen, bei der keine Program-

mierkenntnisse nötig sind sowie leicht Anpassungen an individuelle Leistungen oder Rahmenbedingungen vorgenommen werden können.

Das S2L-System (Seamless Smart Lab) vereint diese Anforderungen (Abb. 1). Die Autorenumgebung ist für unterschiedliche Nutzerrollen geeignet. So unterstützt das System nicht nur Lehrende und Lernende, sondern bereits auch alle Akteure, die in den Herstellungsprozess der Experimentierumgebung involviert sind. So können im System experimentenspezifische Templates für weitere Autor*innen bereitgestellt werden, gerätebezogene Inhalte (Daten, Bilder, ...) erstellt und Referenzdaten der idealen Versuchsdurchführung verfasst werden.

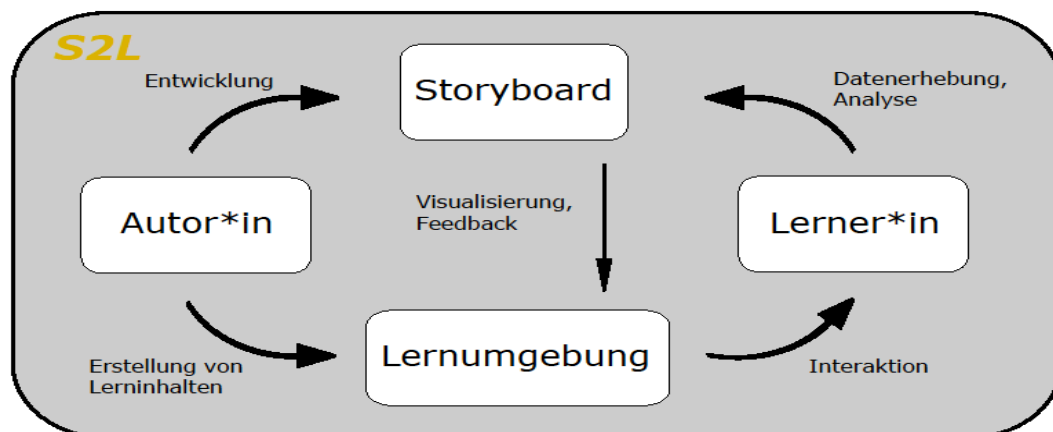


Abb. 1: Das S2L-System integriert eine Autor*innenumgebung mit der intelligenten Erhebung und Analyse von Handlungen und Daten sowie einer daraus folgenden bedarfsgerechten Anpassung der Lernumgebung

Inhalte können unter anderem in Form von Self-Assessments, der Nutzung modifizierbarer Vorlagen und in einer intuitiven Umgebung erstellt werden. Der Autor oder die Autorin sind also verantwortlich für die Erstellung von Lerninhalten sowie für die Entwicklung eines geeigneten Storyboards.

Im Storyboard werden die Lerninhalte strukturiert (siehe Abschnitt 4.). Durch dieses können verschiedenste Einstellungen und Abläufe definiert werden. Auch die Erstellung des Storyboards soll ohne besondere Kenntnisse möglich sein, erfordert jedoch ein tiefes Verständnis der zu gestaltenden und zu Grunde liegenden Experimente. So kann der Autor oder die Autorin festlegen, wann welche Lerninhalte und in welcher Form diese in der Mixed-Reality-Experimentierumgebung erscheinen sollen. Zusätzlich wird entschieden, welche Daten zur Analyse des Lernprozesses herangezogen und welche Konsequenzen aus bestimmten Interaktionen und Handlungen gezogen werden können. (Dieser Prozess der Lernanalyse wird in Abschnitt 3 genauer erläutert.) So haben die Interaktionen der Lernenden mit der Lernumgebung direkten Einfluss auf die angezeigten Inhalte, welche durch das Storyboard festgelegt sind.

All dies ermöglicht eine bedarfsgerechte sowie individuelle Gestaltung der Experimentierumgebung und eine hohe Verbindung der verschiedenen Experimentierphasen (Vorbereitung – Durchführung – Nachbereitung).

2. Kombination von Theorie und Realität

Durch die Bereitstellung virtueller Inhalte und interaktiver Materialien zum Experiment ist eine stärkere Verknüpfung von Theorie und realem Experiment möglich. Ziel ist die direkte Integration multimedialer Elemente in jeder Phase des Experimentierens und in das reale Experiment (Abb. 2).

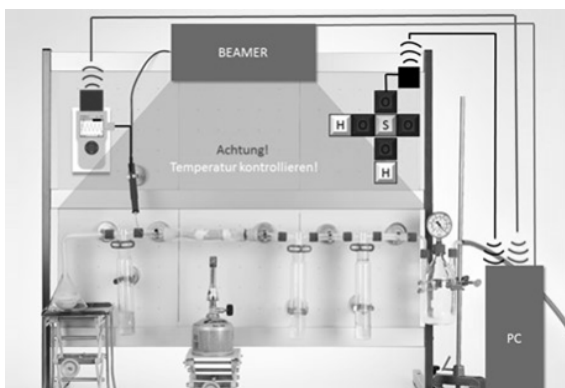


Abb. 2: Beispielhafte Darstellung einer Mixed-Reality-Experimentierumgebung mit Aufprojektion aus dem Bereich der Chemie.

So können in der Vorbereitung bereits die Geräte und Materialien erkundet werden, eventuelle Defizite im Umgang mit diesen aufgedeckt und sich mit dem Aufbau beschäftigt werden. Dies soll nicht nur

theoretisch erfolgen, sondern interaktiv mit den realen Geräten und Aufbauten. Je nach Vorwissen können Videos aufgerufen werden oder mit virtuellen Repräsentationen der Realgeräte Übungen absolviert werden (Abb. 3)

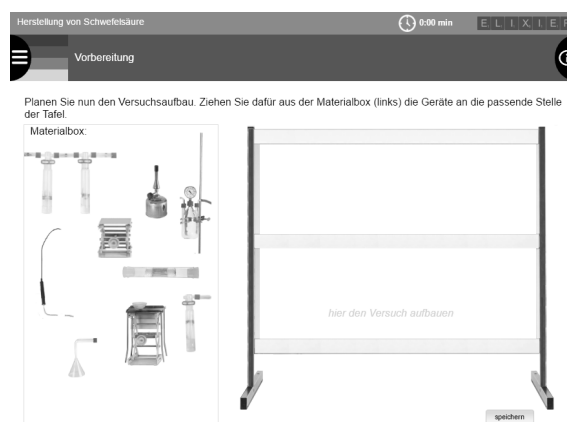


Abb. 3: Virtuelle Versuchsvorbereitung. Der Aufbau kann interaktiv geplant und eventuelle Defizite einfach nachgeholt werden.

In der Nachbereitung ist es möglich, das eigene Experiment in einem Replay-Modus nochmal anzuschauen oder weiterführende Handlungsschritte als interaktives Bildschirmexperiment (IBE) ([1], [2]) durchzuführen. Die webbasierte Infrastruktur des S2L-Systems ermöglicht so die virtuelle Fortsetzung eigener Experimente über die zeitlichen und räumlichen Grenzen des Laborpraktikums hinaus im IBE-Format. Dies eignet sich besonders für Versuche mit Gefahrenpotential, beispielsweise beim Experimentieren mit Chemikalien oder bei Experimenten mit radioaktiven Präparaten, sowie zur Differenzierung im Unterricht. So können IBE einerseits genutzt werden, um den grundsätzlichen Umgang mit Geräten oder Gefahrstoffen nochmals zu üben, oder ergänzende Versuche auch außerhalb des Unterrichts oder des Praktikums kennenzulernen.

Während der Durchführung ist es durch die Anreicherung von virtuellen Elementen direkt am realen Experiment (Augmented Reality) möglich, die Kombination von Theorie und Realität zu veranschaulichen ([3], [4]). Dadurch können Informationen, die normalerweise nicht sichtbar sind, direkt in der realen Welt dargestellt werden. Somit wirken die virtuellen Objekte, als würden sie zur Realumgebung gehören [5]. Augmented Reality (AR) wird hierbei als Zusatz und Anreicherung der realen Erfahrung, Geräte und Handlungen verstanden ohne diese ersetzen zu wollen. Technologisch soll dies durch das Tracking von Objekten, Handlungen und Sensordaten ermöglicht werden. Zur Visualisierung können hierbei Beamer (Projektionen) oder Tablets genutzt werden. Des Weiteren sollen Anleitungen in der Realität direkt erfahrbar gemacht werden. Die Bedienung eines Gerätes oder der Aufbau einer Versuchsanordnung (siehe Abb.4) wird durch die erweiterte Realität begreiflich gemacht. Die Anlei-

tungsschritte sind dabei mit den Benutzerhandlungen rückgekoppelt. Anleitungstexte werden so erheblich einfacher, da sie sich unmittelbar auf die realen Objekte oder Handlungen beziehen. Heute noch übliche sprachliche Anleitungen in der Form "Bringen sie Schalter (20) in Position (3) und lesen dann Display (12) ab.", werden überflüssig.

Zudem kann durch die AR-Unterstützung gezielt die Aufmerksamkeit der Lernenden gesteuert werden, indem Bedienelemente oder Teile des Experiments hervorgehoben werden (Abb. 4).

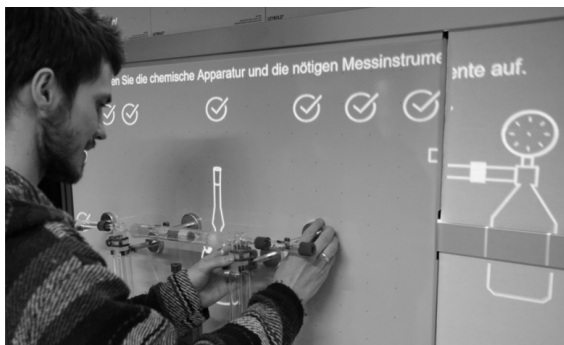


Abb. 4: Ein Proband wird beim Aufbau eines Chemie-experiments unterstützt. Ortsnah werden ihm Hinweise für das weitere Vorgehen gegeben.

Bei der Nutzung von AR ist die Erhebung wichtiger und experimentspezifischer Daten und Handlungen erforderlich. Die Analyse dieser Daten ist wesentlich für die bedarfsgerechte, personalisierte Anpassung der Lernumgebung und bietet zusätzlich die Möglichkeit der Feststellung und Rückmeldung des individuellen Lernlevels der Experimentierenden.

3. Learning Analytics

„Learning Analytics“ dient der Erhebung, Zusammenfassung, Analyse, Auswertung und Visualisierung verschiedenster Daten, mit dem Ziel, die Lehre, das Lernen sowie das Lehr- und Lernumfeld zu optimieren ([6], [7]). Dabei werden Daten unterschiedlicher Quellen interpretiert, die „von Studierenden produziert oder für sie erhoben werden, um Lernfortschritte zu messen, zukünftige Leistungen vorauszuberechnen und potenzielle Problembereiche aufzudecken“ [8].

Das S2L-System soll eine adaptive Mixed-Reality-Lernumgebung anbieten, die einen erfahrungsbasierten, selbstgesteuerten Aufbau von Wissensstrukturen effektiv unterstützt. Die Echtzeit-Lernanalyse ermöglicht eine unmittelbare Rückmeldung über den Stand des individuellen Lernprozesses. Dies ist eine wesentliche Grundlage für die Personalisierung des Lernens oder die Steuerung tutorieller Assistenz. Im Vorhaben sollen auf dieser Basis neuartige Verfahren entwickelt und untersucht werden, welche Messgrößen, Interaktions- oder Handlungsmuster aus realen Laborszenarien als Indikatoren im Rahmen der Lernanalyse einzubeziehen sind.

4. Das Storyboard

Durch das S2L-System soll die Lernumgebung mit dem Realexperiment und den Lerner*innen verknüpft werden. Um diese Interaktionen zu steuern dient das Storyboard. Dort wird festgelegt, welche Daten und Handlungen erhoben werden, wie diese auszuwerten sind (**Learning Analytics**) und in welcher Form Feedback gegeben werden soll.

Das Storyboard besteht im Wesentlichen aus drei zentralen Elementen.

- Eine „**Situation**“ beschreibt einen Zustand während des Experiments. Dies kann zum Beispiel der Start des Versuchs sein oder der fertige Aufbau.
- Die „**Transition**“ beschreibt den Übergang zwischen zwei Situationen. So bewirkt beispielsweise eine Änderung im Versuchsaufbau einen Wechsel zur nächsten Situation.
- Die Bedingungen, welche den Übergang zu einer weiteren Situation auslösen, werden als „**Conditions**“ bezeichnet. Diese können das Anfordern von Hilfe, das Erreichen einer Messwertschwelle, ein Ergebnis der Lernanalyse oder eine Gefahrensituation sein.

Abbildung 5 zeigt beispielhaft die schematische Darstellung eines Storyboards. **T1** bewirkt einen Übergang von Situation **S1** zu **S2**, sobald die **Conditions 1** und **2** erfüllt sind.

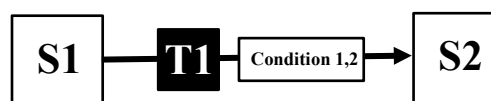


Abb. 5: Schematische Darstellung des Storyboards

Im Folgenden soll an einem Beispiel die Storyboard-Funktion und das S2L-System veranschaulicht werden.

4.1. Storyboard einer erweiterten Experimentierumgebung

Beim Experiment „Wasser kochen“ soll eine be-

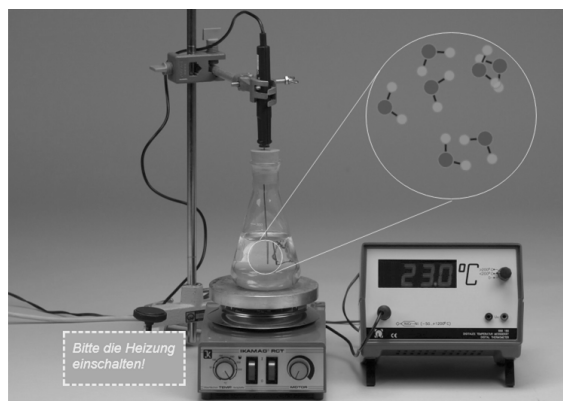


Abb. 6: Wasser soll erhitzt werden, die Heizplatte ist ausgeschaltet (S0)

stimmte Menge Wasser erhitzt und zum Sieden gebracht werden. Die Lernenden werden dabei durch virtuelle Elemente im Experimentierprozess unterstützt (z. B. Handlungsanforderungen) und nicht sichtbare Vorgänge (z. B. Molekülbewegungen) visualisiert. In Abb. 6 ist die Lernumgebung zu sehen. Die Lernenden werden aufgefordert, die Heizplatte einzuschalten, und sehen, wie sich die Wassermoleküle in Abhängigkeit von der Wassertemperatur bewegen.

Das S2L-System trackt dafür die Aktivitäten der Experimentierenden. Nachdem die Heizplatte angeschaltet wurde, erhöht sich die Temperatur und das Storyboard wechselt von Situation S0 zu Situation S2. Dieser Prozess kann in Abb. 7 nachvollzogen werden. Durch die Transition T1, welche das Einschalten der Heizplatte voraussetzt, wechselt das Storyboard von S0 zu S2 und bewirkt das Anzeigen neuer Lerninhalte.

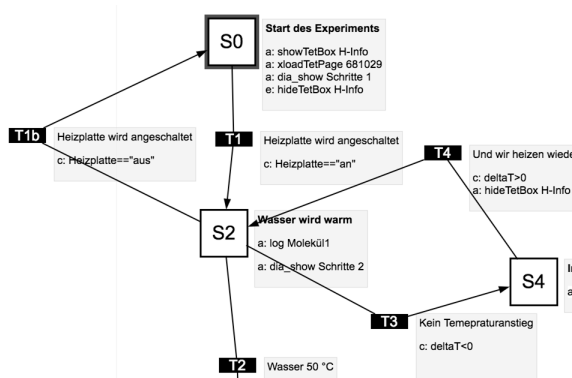


Abb. 7: Ausschnitt aus dem Storyboard für das Experiment „Wasser kochen“. Übergang von S0 zu S2.

Im weiteren Verlauf werden gemäß dem Storyboard und der verfolgten Handlungen der Experimentierenden bedarfsgerechte und zur jeweiligen Situation passende Hinweise oder Informationen gegeben. So ändert sich z. B. die Molekülbewegung simultan zur steigenden Wassertemperatur (Abb. 8).

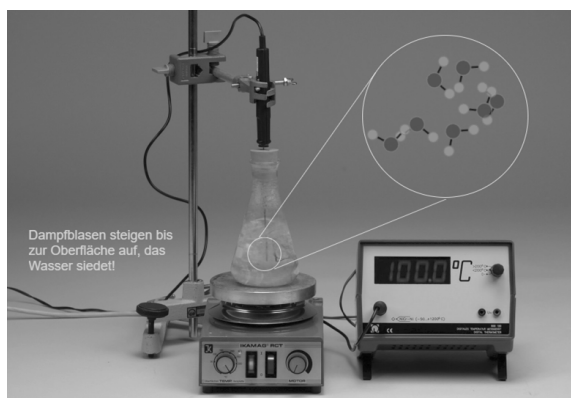


Abb. 8: Die Heizplatte ist angeschaltet, das Wasser kocht (S7)

Das Storyboard zum Experiment "Wasser kochen" besteht insgesamt aus sieben Situationen, so dass das Experiment erfolgreich absolviert worden ist, sobald

das Storyboard in Situation 7 (hier fett umrandet) angekommen ist (Abb.9).

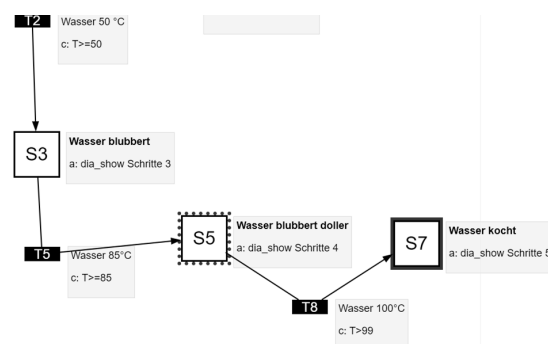


Abb. 9: Ausschnitt aus dem Storyboard für das Experiment „Wasser kochen“. S7 wurde erreicht.

Verschiedene „Pfade“ können als Experimentierschritte durch das Storyboard genommen werden. Durch vorher festgelegte Bedingungen wird entschieden, welche Situation als nächstes eintritt und welche virtuellen Elemente (z. B. Hilfen oder Informationen) angezeigt werden. Der individuelle Weg wird vom S2L-System verfolgt und entsprechend ausgewertet. So kann personalisiertes und bedarfsgerechtes Feedback gegeben werden, welches nicht nur im Nachhinein sondern bereits während des Experimentierprozesses zur Verfügung gestellt werden kann.

5. Ausblick

Im weiteren Projektverlauf werden drei verschiedene Demonstratoren entwickelt und das S2L-System an diesen umgesetzt. Sie dienen der methodischen Erforschung und Evaluation mit verschiedenen Nutzergruppen (universitäre und berufliche Bildung). Machbarkeit und Mehrwert eines universell anwendbaren Lern- und Unterstützungssystems für Laborpraktika werden auf diese Weise in unterschiedlichen Nutzungskontexten untersucht und optimiert. Einen wesentlichen Forschungsschwerpunkt stellen dabei Aspekte der Usability, sowie Fragen der didaktischen Gestaltung der Lerninhalte und tutoriellen Assistenz dar.

6. Literatur

- [1] Kirstein, J. (1999): Interaktive Bildschirmexperimente - Technik und Didaktik eines neuartigen Verfahrens zur multimedialen Abbildung physikalischer Experimente. Dissertation, Technische Universität Berlin
- [2] Kirstein, J., Haase, S., Mühlenbruch, T., & Nordmeier, V. (2016). 20 Jahre Interaktive Bildschirmexperimente. PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung
- [3] Salmi, H., Thuneberg H. & Vainikainen, M. (2017): Making the invisible observable by Augmented Reality in informal science educa-

- tion context. International Journal of Science Education, Part B Vol. 7, Iss. 3
- [4] Bacca, J. Baldiris, S., Fabregat, R., Graf, S., Kinshuk (2014): Augmented Reality Trends in Education: A Systematic Review of Research and Applications. Educational Technology & Society, 17
- [5] Azuma, R. (1997): A Survey of Augmented Reality. Teleoperators and Virtual Environments 6, 4, 355-385
- [6] <https://hochschulforumdigitalisierung.de/de/blog/learning-analytics-hochschullehre>
- [7] <http://learning-analytics.info/>
- [8] Johnson, L., Adams Becker, S., Cummins, M., Estrada, V., Freeman, A., und Hall, C. (2016). NMC Horizon Report: 2016 Higher Education Edition: Deutsche Ausgabe (Übersetzung: Helga Bechmann, Multimedia Kontor Hamburg). Austin, Texas: The New Media Consortium.

Gelingensbedingungen von Innovationen in der Hochschullehre am Beispiel des Einsatzes der App *phyphox*

Simon Hütz*, Sebastian Staacks⁺, Christoph Stampfer⁺, Heidrun Heinke*

*I. Physikalisches Institut IA, RWTH Aachen, ⁺ II. Physikalisches Institut IIA, RWTH Aachen
huetz@physik.rwth-aachen.de, kühlen@physik.rwth-aachen.de, stampfer@physik.rwth-aachen.de,
heinke@physik.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Die an der RWTH Aachen entwickelte App *phyphox* erweitert die Gestaltungsmöglichkeiten von Physik-Vorlesungen und –Übungen insbesondere um aktive experimentelle Tätigkeiten der Studierenden jenseits klassischer physikalischer Praktika. Der bisherige Einsatz von *phyphox* in diversen Haupt- und Nebenfachvorlesungen in verschiedenen Szenarien hat jedoch gezeigt, dass die Akzeptanz sowohl auf der Seite der Studierenden als auch auf der Seite der Dozierenden sehr unterschiedlich ist. Deshalb können am Beispiel des *phyphox*-Einsatzes exemplarisch wesentliche Gelingensbedingungen für Innovationen in der Hochschullehre genauer untersucht werden. Dabei wird auf der einen Seite erhoben, welche Gründe die Studierenden für die Bearbeitung oder die Nicht-Bearbeitung von *phyphox*-basierten experimentellen Aufgaben angeben. Auf der anderen Seite werden am Beispiel von *phyphox* die Beweggründe der Dozierenden für die Einbringung von Innovationen in ihre Lehrveranstaltung oder entsprechende Hemmnisse abgeleitet. Im Beitrag werden neben Erfahrungen mit dem *phyphox*-Einsatz auch das Forschungsdesign und Daten aus ersten Erhebungen vorgestellt.

1. Ausgangslage

Bereits die HIS-Studie von 2011 konstatierte, dass es mit 12% Studienabbrechern bzw. Studienwechslern einen hohen Anteil an Studierenden gibt, die ihr Studienfach nach den ersten Semestern wechseln [1, S. 262]. Diese Tendenz ist auch in den Naturwissenschaften wiederzufinden [1, S. 264]. Als einen möglichen Grund hierfür führt P. Klein in seiner Dissertation an, dass die Studierenden in Experimentalphysikveranstaltungen nur eine beobachtende Rolle einnehmen [2, S. 20]. Dies zeigt, dass die Studierenden selbst in einem Fach, in dem das Wort „Experiment“ im Titel der Veranstaltung vorkommt, in den zur Vorlesung gehörenden Übungen keine eigenständigen Experimente durchführen [ebd.]. Diese mangelnde praktische Tätigkeit im Studium stellt für die Studienanfänger eine große Herausforderung zu Beginn ihres Studiums dar und trägt somit zu den hohen Studienabbruchquoten bei [ebd.].

Um die Quote an Studienabbrechern bzw. Studienwechslern zu verringern, sind bereits mehrere Ansätze entwickelt worden. Beispielhafte Versuche der Erhöhung der Aktivität der Studierenden in den Vorlesungen sind die Peer Instruction von Mazur [3], das Just-in-time teaching von Novak [4] oder der Inverted Classroom nach Fischer und Spannagel [5].

Die große Verbreitung von inzwischen sehr leistungsfähigen Smartphones erweitert die Möglichkeiten zur

adäquaten Ausgestaltung des Inverted Classroom Ansatzes speziell für Lehrveranstaltungen zur Experimentalphysik. Nach der JIM-Studie 2016 ist der Anteil an Smartphone-Besitzern bei den 18- bis 19-Jährigen in den letzten Jahren auf über 95% gestiegen [6, S. 23]. Dies lässt vermuten, dass auch unter den Studierenden an Hochschulen eine ähnlich hohe Verbreitung von Smartphones vorliegen wird. Hierdurch können Smartphones auch systematisch in der Hochschullehre eingesetzt werden. Mit den in den Smartphones verbauten Sensoren ist es möglich, zum einen die Inhalte der Vorlesung näher an die Lebenswelt der Studierenden zu bringen und zum anderen Elemente des Inverted Classroom sinnvoll in Experimentalphysikvorlesungen zu integrieren. Eine App, die das Auslesen und Darstellen der Sensordaten aus den Smartphones ermöglicht, ist die App *phyphox* (www.phyphox.org). Eine Beschreibung der App ist in Ref. [7] zu finden.

2. Einsatzmöglichkeiten von *phyphox*

Die App *phyphox* kann auf verschiedene Arten in Experimentalphysikvorlesungen eingesetzt werden. Auf drei davon wird in diesem Beitrag kurz eingegangen, wobei diese Aufzählung keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Wichtige Charakteristika dieser drei Szenarien sind in Abbildung 1 zusammengefasst. Eine genauere Beschreibung der drei vorgestellten Einsatzszenarien ist in den Ref. [8, 9] zu finden.

thematisch abgestimmt		Szenario A	Szenario B	Szenario C
	experimentelle Aufgabe	✓		
	Vorlesung	✓	✓	
	Übungsaufgaben		✓	✓
	Übung/Tutorium		✓	✓

Abb. 1: Einsatzszenarien für die App *phyphox* in Physikvorlesungen.

Im Szenario A, das sich sehr an das Prinzip des Inverted Classroom anlehnt, wird den Studierenden im Rahmen eines Aufgabenblattes für selbstständig zu bearbeitende Übungen eine experimentelle Aufgabe gestellt. Die Aufgabe behandelt ein Thema, das zum Zeitpunkt der Bearbeitung durch die Studierenden noch nicht in der Vorlesung besprochen wurde. Die experimentelle Aufgabe wird von den Studierenden durchgeführt und anschließend tragen die Studierenden ihre Messdaten in einem Online-Tool ein oder geben sie mit der Übung ab. Anhand der Messdaten der Studierenden kann nun ein Diagramm erstellt werden, das in einer folgenden Vorlesung entweder zur Herleitung oder zur Überprüfung eines theoretischen Zusammenhanges genutzt werden kann. Somit tragen die Studierenden mit den von ihnen erhobenen Messdaten aktiv zur Vorlesung bei.

Das Szenario B setzt direkt in der Vorlesung an. In der Vorlesung wird ein Experiment durchgeführt, bei dem die Messwerte mit Hilfe der App *phyphox* aufgenommen werden. In den Aufgaben für die darauffolgende Übung erhalten die Studierenden dann den Auftrag, das in der Vorlesung gezeigte Experiment in modifizierter Form selber durchzuführen. Hierbei kommt der Vorteil zum Tragen, dass die Durchführung vieler Smartphone-Experimente neben dem Smartphone selbst nur in typischen Haushalten zur Verfügung stehende Materialien erfordert.

Im Szenario C wird eine Übungsaufgabe, die bisher als theoretische Aufgabe oder Rechenaufgabe gestellt wurde, durch eine experimentelle Übungsaufgabe ersetzt oder ergänzt. Wie bei den klassischen Übungsaufgaben wird in der Aufgabe ein bereits in der Vorlesung besprochenes Thema erneut aufgegriffen. Bei der experimentellen Aufgabe wird jedoch der Fokus vom Rechnerischen hin zum Experimentellen verschoben.

In allen Szenarien ist es möglich, die Studierenden nicht nur zur Einreichung ihrer experimentellen Er-

gebnisse aufzufordern, sondern sie zusätzlich zu bitten, ihre Versuchsaufbauten und die Versuchsdurchführung zu filmen.

3. Forschungsgegenstand: Gelingensbedingungen von Lehrinnovationen

Sollen die Gelingensbedingungen von Innovationen in der Hochschullehre untersucht werden, ist es sinnvoll, dies aus den beiden Perspektiven der Anbieter und Nutzer zu beleuchten. Wie in Abbildung 2 dargestellt, sollte bei der Untersuchung von Gelingensbedingungen von Lehrinnovationen sowohl die Seite der Studierenden, die den Einsatz der Innovationen annehmen müssen, als auch die Seite der Dozierenden, die zunächst einmal für den Einsatz der Innovationen in ihrer Vorlesung bereit sein müssen, betrachtet werden. Auf Seiten der Studierenden ist die Frage interessant, ob es möglich ist, ganze Studiengänge danach einzuordnen, inwieweit sich in diesen der Einsatz einer Innovation lohnt und anhand welcher Kriterien diese Einordnung erfolgen sollte. Alternativ könnten auch individuelle Eigenschaften der Studierenden die Gelingensbedingungen der Lehrinnovationen dominieren. Vor diesem Hintergrund erscheint es zusätzlich interessant zu untersuchen, ob es Möglichkeiten gibt, um auf Seiten der Studierenden die Annahme einer Lehrinnovation wie des Einsatzes der App *phyphox* zu fördern.

Bei den Dozierenden wäre es vor dem Einsatz einer Innovation wichtig zu wissen, inwieweit die betreffenden Dozenten überhaupt dazu bereit sind, sich auf eine Innovation in ihrer Lehre einzulassen. Dabei scheint es interessant herauszufinden, ob es möglich ist, Dozierende hinsichtlich dieser Frage zu kategorisieren. Dies wirft die Folgefrage auf, ob es Angebote gibt, mit denen es erfolgversprechend ist, Dozierende

Gelingensbedingungen von Innovationen in einer Vorlesung	
Studierende	Dozierende
Lassen sich Studiengänge hinsichtlich der Gelingenschancen einordnen?	Lassen sich Dozierende hinsichtlich der Gelingenschancen kategorisieren?
Gibt es Ansatzmöglichkeiten, um die Annahme von Innovationen zu fördern?	Gibt es Ansatzmöglichkeiten, um den Einsatz von Innovationen zu fördern?

Abb. 2: Aspekte zur Untersuchung von Gelingensbedingungen von Innovationen in der Hochschullehre. Dabei sollte sowohl die Seite der Studierenden als auch die Seite der Dozierenden betrachtet werden.

beim Einsatz einer Lehrinnovation maßgeblich zu unterstützen, die ohne solche Angebote eine Innovation nicht in ihrer Lehre eingesetzt hätten.

4. Erfahrungen mit dem Einsatz der App *phyphox* in Physikvorlesungen

Wie in Abbildung 3 dargestellt, wurden *phyphox*-Übungsaufgaben an der RWTH Aachen bereits in mehreren Vorlesungen eingesetzt. Die Abbildung verdeutlicht zum einen die Unterschiede in der Organisation der Physik-Lehrveranstaltungen für sogenannte Hauptfach- und Nebenfachstudierende. So sind für Studierende der Physik in einem Bachelorstudium (inklusive Lehramt) das wöchentliche Bearbeiten von sogenannten Übungszetteln und die Besprechung der Aufgabenlösungen in Kleingruppen verpflichtende Bestandteile des Studiums, über deren erfolgreiche Bearbeitung an der RWTH die Zulassung zur Abschlussprüfung erworben wird. Vor diesem Hintergrund wurden im WS 2016/17 erstmals *phyphox*-Übungsaufgaben in die Lehrveranstaltungen zur Experimentalphysik I integriert. Sie wurden allerdings nur als sogenannte Bonusaufgaben angeboten, mit denen die Studierenden zusätzliche Punkte zum Erreichen der Klausurzulassung erwerben konnten. Abbildung 3 zeigt, dass den Studierenden in der Lehrveranstaltung insgesamt vier *phyphox*-basierte Übungsaufgaben gestellt wurden, die sich auf alle drei beschriebenen Einsatzszenarien verteilen. Bei der Aufgabe zum Szenario A handelt es sich um eine Aufgabe zum Fadenpendel. Wie der Abbildung zu entnehmen ist, wurde diese Aufgabe (in Partnerarbeit) von 96 der ca. 300 Vorlesungsteilnehmer bearbeitet. Die Bearbeitung der Aufgabe kann dabei sowohl extrinsisch (Bonuspunkte) als auch intrinsisch motiviert (hohes Physikinteresse, dokumentiert durch hohen Anteil von Physik-Leistungskursteilnehmern und Studienfachwahl) gewesen sein.

In den beiden Physikveranstaltungen für Nebenfachstudierende (der Biologie und Biotechnologie bzw. des Maschinenbaus) wurden ebenfalls Übungsaufgaben gestellt. Jedoch war deren Bearbeitung freiwillig und die Lösungen wurden nur in sogenannten Globalübungen in Frontalveranstaltungen mit all denen Studierenden besprochen, die zu diesem Termin erschienen. Der Übersicht in Abbildung 3 kann entnommen werden, dass der *phyphox*-Einsatz in beiden Vorlesungen weniger intensiv war als in der Veranstaltung für die Physik-Studierenden. Dies war unter anderem der Tatsache geschuldet, dass die Nebenfach-Vorlesungen in kurzer Zeit einen breiten Überblick über für die jeweiligen Hörer relevante physikalische Themengebiete geben, so dass die Mechanik mit vielen potentiellen Smartphone-Experimenten hier in der Regel kürzer und weniger intensiv behandelt wird als in den Vorlesungen für Physikstudierende. In beiden Nebenfach-Veranstaltungen wurde aber die gleiche experimentelle Übungsaufgabe zum Fadenpendel wie in der Vorlesung für Physikstudierende gestellt. Anhand von Abbildung 3 lässt sich deutlich erkennen, dass die Bearbeitungsquote aber unter den organisatorischen Randbedingungen der Nebenfachvorlesungen in beiden Fällen marginal war. Diese Beobachtung gleicht sich für beide Veranstaltungen, obwohl den Teilnehmern angesichts der sehr unterschiedlichen Quote von teilnehmenden Studierenden mit absolvierten Physik-Leistungskurs ein sehr unterschiedliches Fachinteresse an Physik unterstellt werden darf. Dies lässt die Vermutung zu, dass die extrinsische Motivation für die Bearbeitung von experimentellen Übungsaufgaben eine dominante Rolle spielt. Um dieser Vermutung genauer nachzugehen, wurde in der Veranstaltung Physik für Maschinenbauer eine erste Fragebogenstudie durchgeführt, deren Ergebnisse nachfolgend diskutiert werden.

Experimentalphysik I Bachelor + Lehramt Physik	Physik für Studierende der Biologie und Biotechnologie	Physik (für Studierende des Maschinenbaus)
WS 16/17	SS 17	WS 17/18
verpflichtende Übung	freiwillige Übung	freiwillige Übung
7 Vorlesungsexperimente Szenario A: 2 Szenario B: 1 Szenario C: 1	2 Vorlesungsexperimente und eine Übungsaufgabe im Inverted- Classroom Ansatz (Szenario A)	2 Vorlesungsexperimente und eine Übungsaufgabe im Inverted- Classroom Ansatz (Szenario A)
Aufgabe bearbeitet: 96 von 300	Aufgabe bearbeitet: 2 von 230	Aufgabe bearbeitet: 10 von 540
Physik-LK: 62% HIS, 2011	Physik-LK: 7% RWTH, AG Heinke, 2017	Physik-LK: 49% RWTH, AG Heinke, 2017

Abb. 3: Einsatz der *phyphox*-Übungsaufgaben in verschiedenen Vorlesungen an der RWTH Aachen. Als Aufgabe nach dem Inverted Classroom Ansatz wurde in jeder Vorlesung das Fadenpendel gewählt. Zusätzlich ist die Übungsorganisation, die Anzahl der eingereichten Messwerte und der Anteil an Studierenden mit Physik-Leistungskurs in den einzelnen Veranstaltungen dargestellt.

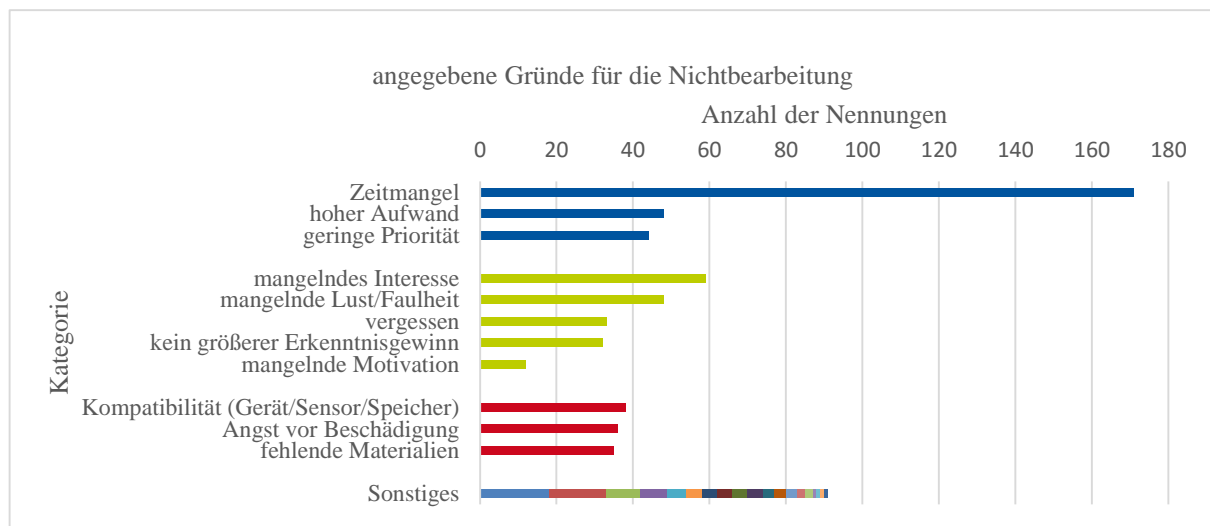


Abb. 4: Gründe für die Nichtbearbeitung der experimentellen Übungsaufgabe. Die Nennungen wurden hier Subkategorien zugeordnet.

5. Datenerhebung in der Vorlesung „Physik für Studierende des Maschinenbaus“

In der Veranstaltung Physik für Studierende des Maschinenbaus wurde in der zweiten Vorlesungswoche des Wintersemesters 2017/18 zunächst das Federpendel als Demonstrationsexperiment mit Messwertaufnahme durch *phyphox* durchgeführt. Im Anschluss an diese Vorlesung wurde eine experimentelle Übungsaufgabe mit Einsatz der App *phyphox* zur Messwertaufnahme im Rahmen der freiwilligen Übung gestellt. In der achten Vorlesungswoche wurde ein Experiment zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit Hilfe von *phyphox* als Demonstrationsexperiment durchgeführt. In der darauffolgenden Woche wurde ein Fragebogen im Paper-Pencil-Format an die Studierenden am Ende der Vorlesung ausgeteilt. Der Fragebogen enthielt Items mit geschlossenem und offenem Antwortformat. So wurde auf einer vierstufigen Skala abgefragt, ob die Studierenden generell auch freiwillige Übungsaufgaben bearbeiten. Zusätzlich wurde erfragt, in welchem Umfang die Studierenden die Aufgabe zum Fadenpendel bearbeitet haben. Im Rahmen eines Freitextfeldes wurden die Studierenden außerdem gebeten anzugeben, warum sie sich für oder gegen eine Bearbeitung der experimentellen Übungsaufgabe entschieden haben. Die Antworten wurden anschließend mittels qualitativer Inhaltsanalyse nach Mayring ausgewertet [10]. Von den ca. 650 anwesenden Studierenden wurden 537 ausgefüllte Fragebögen abgegeben.

Die Abbildung 3 legt nahe, dass insbesondere die Frage nach den Gründen für die Nichtbearbeitung der Übungsaufgabe reichhaltige Informationen verspricht. Die von den Studierenden angegebenen Gründe für die Nichtbearbeitung der Aufgabe wurden kategorisiert und werden weiter unten diskutiert.

Die Befragung der anwesenden Studierenden in der Vorlesung Physik für Studierende des Maschinenbaus hat ergeben, dass die Studierenden freiwillige

Übungsaufgaben eher selten bearbeiten (Mittelwert über alle Studierenden bei 1,5 von 4, mit 1 = nie, 2 = selten, 3 = manchmal, 4 = meistens). Weiterhin ergab die Befragung, dass weniger als 2% der Studierenden die experimentelle Übungsaufgabe vollständig bearbeitet haben. Dabei bedeutet „vollständig bearbeitet“ hier, dass die Studierenden einen Versuchsaufbau erstellt haben, mit dem eine Messung der Abhängigkeit der Schwingungsfrequenz von der Fadenlänge möglich war, dass sie Messwerte aufgenommen haben und dass sie ihre Messwerte in eine Online-Eingabemaske eingetragen haben. Das zusätzliche freiwillige Hochladen eines Videos des Experiments war nicht erforderlich, um das Bearbeiten der Aufgabe als vollständig zu bewerten.

Die kategorisierten Gründe für die Nichtbearbeitung der Übungsaufgabe sind in Abbildung 4 dargestellt. Dabei können den Probanden auch mehrere Gründe zugeordnet worden sein. Auffällig ist, dass der am häufigsten angegebene Grund für die Nichtbearbeitung der Aufgabe ist, dass die Studierenden keine Zeit gefunden haben, um die Übungsaufgabe zu bearbeiten (171 Nennungen). Der am zweithäufigsten genannte Grund, mangelndes Interesse, kommt nur auf gut ein Drittel dieser Nennungen (59 Nennungen). Ähnlich häufig wurde als Grund ein hoher Aufwand für die Übungsaufgabe, eine geringe Priorität der Vorlesung im Studium und mangelnde Lust zur Bearbeitung der Übungsaufgabe bzw. Faulheit angegeben. Außerdem wurde von den Studierenden noch vereinzelt angegeben, dass sie die Aufgabe vergessen haben, kein kompatibles Gerät zur Verfügung hatten, Angst vor einer Beschädigung ihres Gerätes hatten oder keine geeigneten Materialien zur Erstellung eines experimentellen Aufbaus zur Hand hatten. Ein interessanter Punkt ist, dass 32 Studierende angaben, dass sie von dem Experiment keinen größeren Erkenntnisgewinn erwartet haben. Da den Studierenden zum Zeitpunkt der Bearbeitung der Übungsaufgabe die

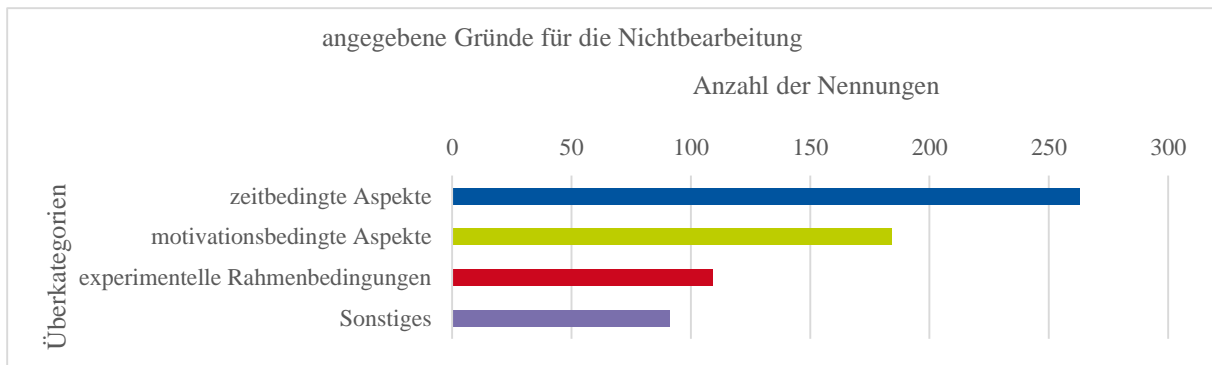


Abb. 5: Zusammenfassung der Kategorien aus Abbildung 4 in Überkategorien.

Theorie hinter dem Experiment eigentlich nicht bekannt sein sollte, waren diese Nennungen zumindest in der Häufigkeit zunächst unerwartet. Für die konkrete Veranstaltung können sie allerdings dadurch erklärt werden, dass das Experiment zwar im Inverted-Classroom Ansatz geplant war, jedoch das Fadenpendel trotzdem vor dem Stellen der Übungsaufgabe in der Vorlesung besprochen worden ist.

In Abbildung 5 wurden die von den Studierenden für die Nichtbearbeitung der experimentellen Übungsaufgabe genannten Gründe übergeordneten Kategorien zugeordnet. Dabei wird zwischen den Überkategorien „zeitbedingte Aspekte“, den „motivationalen Aspekten“ und den „experimentellen Rahmenbedingungen“ unterschieden. In Abbildung 5 ist zu sehen, dass die zeitbedingten Aspekte den größten Teil der Nennungen der Studierenden ausmachen. Die experimentellen Rahmenbedingungen wurden von den Studierenden mit der geringsten Häufigkeit genannt.

Betrachtet man die einzelnen Kategorien hinsichtlich der Möglichkeit, durch eine Änderung der Rahmenbedingungen eine höhere Beteiligung der Studierenden an den experimentellen Übungsaufgaben zu erreichen, so kommt man zu folgenden Vermutungen:

- Es scheint schwierig, im Rahmen einer Nebenfachveranstaltung an den zeitbedingten Aspekten wesentliche Änderungen herbeizuführen.
- Eine Änderung von einer freiwilligen zu einer verpflichtenden Bearbeitung der Aufgabe würde vermutlich zu einer höheren extrinsischen Motivation der Studierenden und damit zu einer häufigeren Bearbeitung der Aufgabe führen, wird sich aber in der Regel mit den Studienrahmenbedingungen in einer Nebenfachveranstaltung nicht vereinbaren lassen.
- Durch eine Änderung der experimentellen Rahmenbedingungen erscheint es möglich, den Studierenden Hilfen zu geben und damit mehr Studierende für die Bearbeitung der Übungsaufgabe zu gewinnen. Zum Beispiel kann der häufiger genannte Punkt von fehlenden Materialien durch das Verteilen von Experimentiermaterialien am Ende einer Vorlesung verringert werden. Inwiefern dadurch mehr Studierende entsprechende *phyphox*-Versuche auch durchführen, soll in einer Interventionsstudie überprüft werden. Bei positiver Evaluation der Maßnahme können die

damit gesammelten Erfahrungen sowohl in Hauptfach- als auch in Nebenfachveranstaltungen verwertet werden.

6. Fazit

Beim Einsatz der App *phyphox* zur Umsetzung experimenteller Übungsaufgaben in der Physikausbildung von Studierenden der Physik sowie verschiedener anderer Natur- und Ingenieurwissenschaften wurden erste Erfahrungen zur Akzeptanz solcher Aufgaben unter realistischen Studienbedingungen durch die Studierenden gesammelt. Dabei zeigt sich eine geringe Bearbeitungsquote solcher Aufgaben in Nebenfachveranstaltungen, in denen die Bearbeitung von Übungsaufgaben auf Freiwilligkeit beruht. Deshalb wurde eine Befragung in der Vorlesung „Physik für Studierende des Maschinenbaus“ vorgenommen, um die Gründe für die Nichtbearbeitung von experimentellen Übungsaufgaben auf Seiten der Studierenden detaillierter zu untersuchen. Die von den Studierenden genannten Gründe für die Nichtbearbeitung der Aufgabe lassen sich drei Hauptkategorien zuordnen, die als „zeitbedingte Aspekte“, „motivationale Aspekte“ und „experimentelle Rahmenbedingungen“ benannt wurden und in dieser Reihenfolge in unterschiedlicher Häufigkeit von den Studierenden aufgeführt wurden. Es erscheint für diese drei Kategorien unterschiedlich praktikabel, die Rahmenbedingungen dahingehend zu verändern, dass mehr Studierende die experimentellen Übungsaufgaben bearbeiten. So dürfte es beispielsweise schwierig sein, den generellen Zeitmangel der Studierenden zu verringern. Allerdings hat die Befragung der Studierenden auch gezeigt, dass ein Ansetzen bei den experimentellen Rahmenbedingungen durchaus hilfreich sein kann, was in einer Interventionsstudie genauer untersucht werden soll.

Es hat sich auch gezeigt, dass gerade bei der Einführung innovativer Lehrformate eine noch intensivere Absprache mit den beteiligten Dozierenden notwendig ist. In dem konkreten Fall der Vorlesung für Studierende des Maschinenbaus war der Einsatz der experimentellen Übungsaufgabe vor der Behandlung des Fadenpendels in der Vorlesung geplant, ist aber in der umgedrehten zeitlichen Reihenfolge umgesetzt worden. Möglicherweise hat dies auch bewirkt, dass

eine Reihe von Studierenden als Grund für die Nichtbearbeitung der Aufgabe angegeben haben, dass sie von der experimentellen Aufgabe keinen größeren Erkenntnisgewinn erwartet haben. Weitere Datenerhebungen werden zeigen, ob dieser Erklärungsansatz tatsächlich trägt. Hierzu wird aus den jetzt vorliegenden Antworten der Studierenden im offenen Format ein Fragebogen mit geschlossenen Items entwickelt, der dann in Physikvorlesungen in der Haupt- und Nebenfachausbildung zum Einsatz kommen soll.

7. Ausblick

Die im Beitrag vorgestellte Erhebung in der Veranstaltung „Physik für Studierende des Maschinenbaus“ war der erste Versuch, die Beweggründe der Studierenden für eine Annahme von Innovationen in der Hochschullehre am Beispiel der App *phyphox* zu erfassen. Aus den jetzt vorliegenden Antworten der Studierenden im offenen Format wird ein Fragebogen mit geschlossenen Items entwickelt, mit dem es in größerem Umfang möglich sein wird, die Beweggründe der Studierenden für eine (Nicht-)Bearbeitung von experimentellen Übungsaufgaben zu erfassen. Dieser Fragebogen soll im Wintersemester 2017/18 an der RWTH Aachen in zwei Erstsemesterveranstaltungen eingesetzt werden. Für diesen Einsatz werden auch Zusatzmaterialien für die Studierenden entwickelt, damit ihnen der Einstieg in das experimentelle Arbeiten mit der App *phyphox* erleichtert wird. Außerdem werden weitere *phyphox*-basierte Übungsaufgaben entwickelt.

Neben der weiteren Untersuchung der Gelingensbedingungen auf Seiten der Studierenden steht auch eine Untersuchung der Gelingensbedingungen auf Seiten der Dozierenden an. Hierzu werden ein Fragebogen und ein Interviewleitfaden entwickelt. Mit den erhobenen Daten soll es dann möglich sein, einerseits die Gelingensbedingungen für Innovationen in der Hochschullehre auf Seiten der Dozierenden zu ermitteln. Andererseits sollen am Beispiel der App *phyphox* eine Kategorisierung der Dozierenden hinsichtlich der Gelingenschancen von Lehrinnovationen vorgenommen und mögliche angepasste Unterstützungsangebote entwickelt werden.

8. Literatur

- [1] Willich, J., Buck, D., Heine, C. und Sommer, D. (2011). Studienanfänger im Wintersemester 2009/10. HIS Hochschul-Informationssystem GmbH. Verfügbar unter: http://www.dzhw.eu/pdf/pub_fh/fh-201106.pdf [16.03.2018]
- [2] Klein, P. (2016). Konzeption und Untersuchung videobasierter Aufgaben im Rahmen vorlesungsbegleitender Übungen zur Experimentalphysik (Mechanik). Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern.
- [3] Mazur, Eric: Peer Instruction: A User's Manual. London: Prentice Hall, 1997. -ISBN 978-0-135-65441-5.
- [4] Novak, Gregor M.: Just-in-time Teaching: Blending Active Learning with Web Technology. London: Prentice Hall, 1999.
- [5] Fischer, M. & Spannagel, C., (2012): Lernen mit Vorlesungsvideos in der umgedrehten Mathematikvorlesung. In: Desel, J., Haake, J. M. & Spannagel, C. (Hrsg.), DeLFI 2012: Die 10. e-Learning Fachtagung Informatik der Gesellschaft für Informatik e.V.. Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V.. (S. 225-236).
- [6] Feierabend, Plankenhorn & Rathgeb (2016). *JIM-Studie 2016. Jugend, Information, (Multi-)Media. Basisstudie zum Medienumgang 12- bis 19-Jähriger in Deutschland*. Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest (mpfs). Verfügbar unter: https://www.mpfs.de/fileadmin/files/Studien/JIM/2016/JIM_Studie_2016.pdf [18.05.2017]
- [7] Staacks, S., Hütz, S., Heinke, H. & Stampfer, C. (2018): Advanced tools for smartphonebased experiments: *phyphox*. In: *Physics Education*, 53 (2018) . In Druck
- [8] Hütz, S., Kuhlen, S., Stampfer, C., Heinke, H. (2017): Entwicklung und Evaluation modularer Vorlesungseinheiten mit Smartphone-Einsatz. In: *PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur Frühjahrstagung 1* (2017), Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/795/940>
- [9] Hütz, S., Staacks, S. Stampfer, C., Heinke, H. (2017): Einsatz der App *phyphox* in Physikvorlesungen und -übungen. In: Maurer, C. (Hrsg.): *Qualitätsvoller Chemie - und Physikunterricht - normative und empirische Dimensionen* (2017), S. 831-834
- [10] Mayring, P. (2015). *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken*. Langensalza: Beltz.

Entwicklung eines Echtzeit-Feedback-Systems für die Durchführung von Realexperimenten

Norman Joußen*, Heidrun Heinke*

*I. Physikalisches Institut IA, RWTH Aachen, Sommerfeldstraße 14, 52074 Aachen
joussen@physik.rwth-aachen.de, heinke@physik.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Zur detaillierten Untersuchung experimenteller Prozesse bei der Durchführung von Realexperimenten wurde in den letzten Jahren mit der objektfokussierten Erfassung ein neuer Ansatz entwickelt. Anders als bei probandenfokussierten Erhebungsmethoden, wie beispielsweise Laborberichten, vorstrukturierten Protokollen, der direkten Beobachtung oder Videostudien, wird die Abfolge der experimentellen Handlungen bei dem objektfokussierten Ansatz indirekt durch eine am Versuchsaufbau implementierte Sensorik und eine mindestens teilautomatisierte Auswertung der Sensordaten erfasst. Durch die Sicherstellung einer vollautomatisierten Auswertung der Sensordaten kann das Potential dieses Ansatzes für Forschung und Lehre deutlich erweitert werden. Dies erfordert für Experimente auf der optischen Bank einen Wechsel der bisher am Versuchsaufbau implementierten Sensorik. Im Beitrag wird die Umsetzung des objektfokussierten Ansatzes mit einer möglichen neuen Sensorik für Versuche auf der optischen Bank präsentiert und das Potential für Forschung und Lehre diskutiert. Insbesondere werden Einsatzszenarien in der Lehre beschrieben, die sich mit dem objektfokussierten Ansatz und einer vollautomatischen Auswertung der Sensordaten realisieren lassen.

1. Einleitung

Die Vermittlung und Bewertung von experimentellen Kompetenzen hat in den letzten Jahren durch die Verankerung im Bereich Erkenntnisgewinnung in den Bildungsstandards für das Fach Physik eine zunehmende Bedeutung erhalten. Eine Vermittlung und Bewertung von experimentellen Kompetenzen setzt aber voraus, dass geeignete Methoden zur Untersuchung experimenteller Prozesse vorhanden sind.

Im vorliegenden Beitrag wird ein Fokus auf die Untersuchung von experimentellen Prozessen bei der Durchführung von Realexperimenten gelegt. Diese Fokussierung ist darin motiviert, dass das Realexperiment sowohl in der Forschung als auch in der Lehre einen hohen Stellenwert einnimmt. Eine Untersuchungsmethode zur Erfassung experimenteller Prozesse bei der Durchführung von Realexperimenten sollte die Experimentiersituation am Realexperiment dabei so unverändert wie möglich lassen. Zudem sollte der experimentelle Prozess vollständig erfasst werden sowie rekonstruier- und vergleichbar sein. Erst dann ist u.a. eine Bewertung von experimentellen Kompetenzen möglich.

Bei Betrachtung bisheriger Forschungsvorhaben zur Untersuchung experimenteller Prozesse zeigt sich ein vielfältiges Spektrum von methodischen Ansätzen, was in Abbildung 1 illustriert ist. So werden experimentelle Prozesse durch Laborberichte (z.B. Shavelson & Baxter 1991) oder zeitlich beziehungsweise phasenweise vorstrukturierte Protokolle (z.B. Hofstein 2004, Emden 2011) erfasst. Diese Ansätze können darüber hinaus auch durch den Einsatz eines Smartpens ergänzt werden, um Zugang zur Kommunikationsebene der Probanden zu erhalten (z.B. Fraß

et al. 2014). Darüber hinaus finden sich aber auch Studien, bei denen die experimentellen Prozesse mittels direkter Beobachtung (z.B. Shavelson & Baxter 1991, Lock 1989 oder Kircher & Priemer 2010) oder Videoaufzeichnungen (z.B. Neumann 2004, Walpuski 2006, Emden 2011 oder Heidrich et al. 2014) der Probanden erfasst wurden.

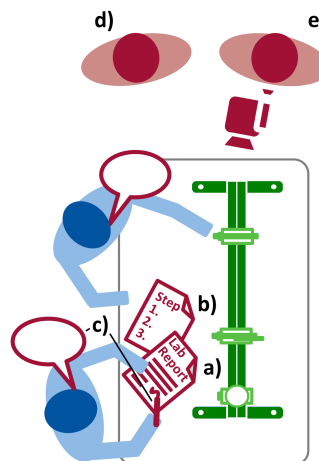


Abb. 1: Illustration probandenfokussierter Ansätze zur Erfassung experimenteller Prozesse bei Realexperimenten. a) Laborberichte, b) zeitlich/phasenweise vorstrukturierte Protokolle, c) Smartpen-Studien, d) direkte Beobachtung, e) Videostudien.

Bei den oben beschriebenen Forschungsansätzen gelingt der Zugang zum experimentellen Prozess über die Probanden und dabei insbesondere ihre Kommu-

nikation und ihre experimentellen Handlungen. In unserer Arbeitsgruppe wurde in den letzten Jahren neben diesen probandenfokussierten Ansätzen ein objektfokussierter Ansatz zur Erfassung experimenteller Prozesse entwickelt (z.B. Fraß & Heinke 2015). Bei diesem objektfokussierten Ansatz werden die relevanten Manipulationen am experimentellen Aufbau durch eine geeignete Sensorik erfasst. Eine Auswertung der gewonnenen Daten ermöglicht dann einen Rückschluss auf die experimentellen Handlungen der Probanden und somit einen alternativen Zugang zu den experimentellen Prozessen. Bisher wurde dieser objektfokussierte Ansatz exemplarisch für einen Versuch zum Photoeffekt (vgl. Fraß & Heinke 2014) und einen Versuch zur Radioaktivität (vgl. Büsch et al. 2017) umgesetzt.

Nachfolgend werden zunächst Grundzüge der objektfokussierten Erfassung von experimentellen Prozessen bei der Durchführung von Realexperimenten vorgestellt. Anschließend wird das Potential dieser Erhebungsmethode sowohl für die Forschung als auch für die Lehre diskutiert. Insbesondere werden in Abschnitt 4 Szenarien für den Einsatz dieses Ansatzes in der Lehre beschrieben. Diese setzen jedoch voraus, dass die bisherige Sensorik für Versuche auf der optischen Bank ausgetauscht wird. Eine Möglichkeit einer alternativen Sensorik wird daher zum Abschluss in Abschnitt 5 aufgeführt.

2. Objektfokussierte Erfassung

Der Zugang zum experimentellen Prozess bei der Durchführung von Realexperimenten erfolgt bei dem objektfokussierten Ansatz durch eine am Versuchsaufbau implementierte Sensorik, mit deren Hilfe alle relevanten Manipulationen am experimentellen Aufbau erfasst werden. Bei Versuchen auf der optischen Bank erfolgte dies bislang dadurch, dass an den optischen Bauteilen an geeigneten Stellen Laserdioden angebracht wurden, die einen Lichtspot auf einem halbtransparenten Schirm, der sich hinter dem experimentellen Aufbau befindet, erzeugen. Die Bewegung der Lichtspots auf dem halbtransparenten Schirm wird durch eine Videokamera, die wiederum hinter dem halbtransparenten Schirm positioniert ist, aufgezeichnet. Die beschriebene Sensorik ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

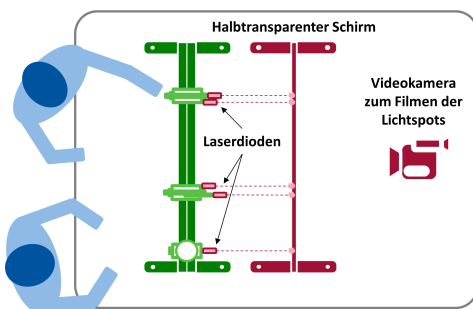


Abb. 2: Schematische Darstellung der bislang verwendeten Sensorik zur objektfokussierten Erfassung von experimentellen Prozessen bei Versuchen auf einer optischen Bank.

Aus den Videodaten werden anschließend mit Hilfe eines Videoanalyseprogramms Objektdaten für jeden Lichtspot auf dem halbtransparenten Schirm und damit für jedes optische Bauteil generiert. Die Objektdaten beinhalten dabei zu jedem Zeitpunkt t die x - und y -Position des Lichtspots auf dem halbtransparenten Schirm. Für eine Irisblende sind die Objektdaten in Abbildung 3 beispielhaft dargestellt. Es wurden sowohl die horizontale (x -Position) und vertikale (y -Position) Position des Bauteils auf der optischen Bank als auch die Einstellung des Blendendurchmessers erfasst.

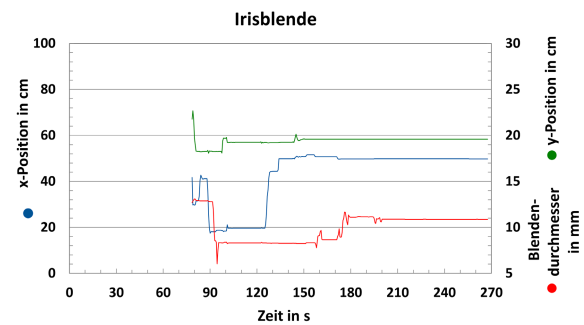


Abb. 3: Beispielhafte Darstellung der Objektdaten für eine Irisblende. Neben der x -Position (horizontale Position) des Bauteils auf der optischen Bank ist die zeitliche Änderung der y -Position (vertikale Position) des Bauteils und des Blendendurchmessers abgebildet.

Ein Auswerteskript bereitet die Objektdaten anschließend automatisiert auf und erzeugt eine kodierte Abfolge der experimentellen Handlungen der Probanden am Versuchsaufbau, das für detaillierte Analysen der experimentellen Prozesse genutzt werden kann. Das beschriebene Auswerteverfahren der objektfokussierten Erfassung ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt.

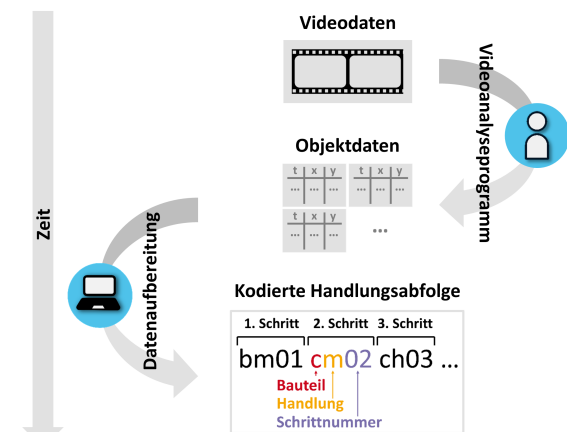


Abb. 4: Schematische Darstellung des Auswerteverfahrens bei der objektfokussierten Erfassung und der bisherigen Sensorik für Versuche auf der optischen Bank.

Somit kann insgesamt eine teilautomatisierte Auswertung der erhobenen Daten für Versuche auf der optischen Bank realisiert werden. Bei einem Versuch zur Radioaktivität konnte dagegen durch eine geeig-

nete Wahl der Sensorik bereits eine vollautomatisierte Auswertung der erhobenen Daten entwickelt werden (vgl. Büsch et al. 2017).

Für die bisherige Sensorik bei Versuchen auf der optischen Bank verhindert die Generierung der Objektdaten aus den Videodaten mit Hilfe eines Videoanalyseprogramms die vollautomatisierte Auswertung der Prozessdaten, da an dieser Stelle ein händisches Eingreifen in das Auswerteverfahren erforderlich ist. Zusätzlich zeigt sich, dass dieser händisch zu unterstützende Auswerteschritt auch zeitlich so aufwändig ist, dass er einen Flaschenhals im gesamten Auswerteverfahren darstellt. Ein Austausch der bisherigen Sensorik bei Versuchen auf der optischen Bank durch ein geeignetes alternatives System kann damit auch für diese Experimente eine vollautomatisierte und gleichzeitig auch eine deutlich schnellere Auswertung der Prozessdaten ermöglichen. Eine mögliche neue Sensorik wird in Abschnitt 5 beschrieben.

3. Potential für die Forschung

Die Realisierung einer mindestens teilautomatisierten Auswertung bei der objektfokussierten Erfassung experimenteller Prozesse ermöglicht einen vielfältigen Einsatz dieser Methode in der Forschung. In diesem Abschnitt wird das Potential dieses Ansatzes in der Forschung am Beispiel von Interventionsstudien zu experimentellen Prozessen diskutiert.

Wie eingangs beschrieben wurde, wird aufgrund der hohen Bedeutung des Realexperiments in Forschung und Lehre ein Fokus bei der Untersuchung experimenteller Prozesse auf solche Prozesse bei der Durchführung von Realexperimenten gelegt. Die Experimentiersituation soll dabei durch das Studiendesign möglichst unverändert bleiben. Gleichzeitig soll der experimentelle Prozess jedoch möglichst vollständig erfasst werden. Das bedeutet konkret, dass alle wesentlichen experimentellen Parameter in ihrer zeitlichen Abhängigkeit erhoben werden sollen, so dass der Ablauf des experimentellen Prozesses rekonstruierbar, mit anderen Prozessen vergleichbar und valide bewertbar wird. Damit lassen sich eventuelle Unterschiede im experimentellen Prozess zwischen verschiedenen Interventionsgruppen auffinden und aufzeigen. Der objektfokussierte Ansatz zeigt hier seine

Stärken. Die Probanden können am realen Versuchsaufbau experimentieren und in den experimentellen Prozess wird beispielsweise nicht durch das zum Experimentieren parallele Ausfüllen eines zusätzlichen Prozessprotokolls eingegriffen. Bei geeigneter Wahl der verwendeten Sensorik ist somit nahezu keine Beeinflussung der Experimentiersituation vorhanden. Aufgrund der teil- bzw. vollautomatischen Auswertung werden alle relevanten Manipulationen am Realexperiment in einer hohen zeitlichen Auflösung digital erfasst. Durch die Generierung einer kodierten Abfolge der experimentellen Handlungen der Probanden wird dieser Prozess zudem in seinen wesentlichen Merkmalen vergleich- und bewertbar.

Der objektfokussierte Ansatz eignet sich dabei durch seine teil- bzw. vollautomatische Auswertung auch für Interventionsstudien mit großen Probandenzahlen, da die Auswertung des Datenmaterials mit einem vertretbaren Aufwand verbunden ist. Hier zeigt der objektfokussierte Ansatz seine Stärken beispielsweise gegenüber Videostudien, die in der Regel ein sehr zeitaufwändiges Auswerten von ausgewählten Inhalten des Videomaterials mit sich bringen. Durch eine optionale Ergänzung des objektfokussierten Ansatzes durch den Einsatz von Smartpens im typischen paarweisen Betrieb eines Versuchsaufbaus ist eine zusätzliche Erfassung der Kommunikationsebene der Probanden sehr einfach möglich. Gleichmaßen kann in einfacher Weise die objektfokussierte Erfassung der Prozessdaten durch ein Think-Aloud-Studiendesign von einzeln experimentierenden Probanden ergänzt werden. Damit eignet sich der objektfokussierte Ansatz nicht nur für quantitative, sondern auch für qualitative Studien.

4. Potential für die Lehre

Neben dem im vorherigen Abschnitt diskutierten Potential des objektfokussierten Ansatzes in der Forschung ergibt sich auch ein großes Potential dieses Ansatzes in der Lehre. Dieses basiert auf der vollständigen Erfassung von experimentellen Prozessen sowie ihrer daraus resultierenden Rekonstruier- und Vergleichbarkeit, was neue Optionen der Diagnostik, des Feedbacks und der Bewertung von experimentel-

Einsatzszenario	Nutzung	Voraussetzung
A) Rekapitulation = nachgelagerte Betrachtung (von wesentlichen Merkmalen) des experimentellen Prozesses durch Lerner und/oder Lehrperson	zur Diagnostik, Unterstützung von Lernprozessen und Bewertung experimenteller Kompetenzen	mindestens teilautomatisierte Auswertung (und Weiterverarbeitung) der Prozessdaten
B) prozessbegleitende Analyse = begleitende Analyse des experimentellen Prozesses (in seinen wesentlichen Merkmalen) ... B1) ... mit (optionaler) Rückmeldung durch Lehrperson B2) ... mit Rückmeldung in interaktiver medial gestützter Lernumgebung	zur Diagnostik und Unterstützung von Lernprozessen bzgl. experimenteller Kompetenzen	vollautomatisierte Auswertung und Weiterverarbeitung der Prozessdaten

Tab. 1: Übersicht möglicher Einsatzszenarien des objektfokussierten Ansatzes in der Lehre (Details siehe Text).

len Prozessen eröffnet. Im Folgenden werden mögliche Einsatzszenarien des objektfokussierten Ansatzes zur Erfassung experimenteller Prozesse beschrieben, die in der Tabelle 1 im Überblick dargestellt sind. Dabei ist sowohl jeweils ein Einsatz in der Schule als auch in der Hochschule beispielsweise im Rahmen eines Praktikums denkbar.

Einsatzszenario A

Beim Einsatzszenario A handelt es sich um eine nachgelagerte Betrachtung des experimentellen Prozesses, der ggfs. auf seine wesentlichen Merkmale abstrahiert wurde. Diese Rekapitulation der experimentellen Abläufe kann entweder allein durch die Lerner, allein durch die Lehrperson oder/und gemeinsam von beiden Seiten erfolgen.

Konkret bekommen die Lerner zunächst eine experimentelle Aufgabe gestellt. Die Bearbeitung erfolgt an einem mit einer geeigneten Sensorik präparierten Realexperiment. Durch die nahezu vollständige Erfassung und Rekonstruierbarkeit des experimentellen Prozesses ermöglicht der objektfokussierte Ansatz eine nachgelagerte Betrachtung der Versuchsabläufe. Durch eine automatisierte Auswertung der Daten beim objektfokussierten Ansatz kann zudem eine Fokussierung auf wichtige Aspekte des vorliegenden experimentellen Prozesses erfolgen. Hier zeigt sich ein wichtiger Unterschied beispielsweise zu einer Videoaufzeichnung, bei der die vollständige händische Durchsicht des Videomaterials erforderlich ist.

Es ist auch denkbar, dass die aufgezeichneten Objektdaten in ein interaktives Bildschirmexperiment einfließen (z.B. Kirstein et al. 2016), sodass bei einer gemeinsamen Rekapitulation des experimentellen Prozesses von Lehrperson und Lerner zu jedem Zeitpunkt die experimentelle Situation in ihren relevanten Parametern rekonstruiert werden kann. Auf dieser Basis können mögliche experimentelle Handlungsalternativen aufgezeigt und nachvollzogen werden.

Die mögliche Rekapitulation experimenteller Prozesse ist insbesondere auch für solche Rahmenbedingungen interessant, in denen eine Diagnostik und Bewertung des experimentellen Prozesses für einzelne Lerner im Rahmen eines Schülerexperimentes in einer Schulklasse oder aber auch im Rahmen eines Praktikums in der Hochschule zwar aufgrund der angestrebten Lernziele sehr wünschenswert wäre, aber aufgrund der Zahl der gleichzeitig experimentierenden Lerner für die Lehrperson logistisch nur eingeschränkt möglich ist. Dabei darf man von der Möglichkeit der Rekapitulation eines experimentellen Prozesses in jedem Fall neue, bis jetzt kaum zugängliche Lerngelegenheiten für die Vermittlung prozessbezogener experimenteller Kompetenzen erwarten. Das gilt prinzipiell unabhängig davon, in welcher Form diese Rekapitulation erfolgt (ob allein durch den Lerner oder die Lehrperson oder (anschließend) gemeinsam durch beide), wengleich sich die Lerneffekte hier im Detail unterscheiden werden.

Einsatzszenarien B1 und B2

Neben der im Einsatzszenario A beschriebenen Rekapitulation des experimentellen Prozesses im Anschluss an eine experimentelle Aufgabe, die eine Lerngruppe in Einzelarbeit oder in Teams bearbeitet hat, ermöglicht der objektfokussierte Ansatz auch eine prozessbegleitende Analyse experimenteller Abläufe, sofern alle Auswerteschritte vollautomatisiert vorgenommen werden. Eine lernwirksame Rückmeldung noch während des Experimentierens kann dabei entweder durch die Lehrperson (B1) oder ebenfalls automatisiert innerhalb einer interaktiven medial gestützten Lernumgebung (B2) erfolgen. Diese Rückmeldung wird in der Regel eine weitere Aufbereitung der Prozessdaten voraussetzen. Das Szenario B2 ähnelt dabei in Teilen Lehr-Lern-Umgebungen, die experimentelle Abläufe in eine sog. *augmented* oder *mixed reality* einbeziehen.

Voraussetzung für beide Szenarien B1 und B2 ist erneut, dass die Versuchsaufbauten mit einer geeigneten Sensorik im Vorfeld präpariert wurden. Eine vollständig automatische Auswertung der aufgezeichneten Daten und meist auch geeignete Weiterverarbeitung dieser Prozessdaten ist notwendig, um Hinweise auf mögliche aufgetretene Probleme bei den einzelnen Lernern bzw. Teams rückmelden zu können. Solche Hinweise können dann über eine Lehrperson oder ein entsprechendes interaktives Lehr-Lern-Programm gezielt an die jeweiligen Lerner bzw. Teams vermittelt werden, die dadurch bei der Bearbeitung der experimentellen Aufgabe unterstützt werden und ihre prozessbezogenen experimentellen Kompetenzen weiterentwickeln können.

Insbesondere die beschriebenen Einsatzszenarien B1 und B2 setzen somit ein vollautomatisches Auswerteverfahren der von der gewählten Sensorik aufgezeichneten Objektdaten mit implementiertem Echtzeit-Feedback-System voraus. Wie oben bereits erwähnt, konnte für einen Versuch zur Radioaktivität bereits eine vollautomatische Auswertung wichtiger Prozessdaten realisiert werden (vgl. Büsch et al. 2017). Die in Abschnitt 2 vorgestellte Sensorik für Versuche auf der optischen Bank zeigt jedoch ihre Schwäche bei der Generierung der Objektdaten aus den Videodaten. Um das Potential des Ansatzes für Forschung und Lehre im Bereich der Optik weitreichender nutzen zu können, bedarf es daher eines Austauschs der bisherigen Sensorik. Eine mögliche neue Sensorik für Versuche auf der optischen Bank wird daher im Folgenden vorgestellt. Eine Übertragung dieser Sensorik beispielsweise auf Versuche zur Kinematik ist denkbar.

5. Austausch der bisherigen Sensorik bei Versuchen zur Optik

In Abschnitt 2 wurde beschrieben, dass das Videoanalyseprogramm zur Generierung der Objektdaten aus den aufgenommenen Videodaten einen limitierenden Faktor im Auswerteblauf darstellt, da hier

eine Bedienung und Überwachung eines zudem zeit- aufwändigen Auswerteschritts durch personelle Ressourcen notwendig ist. Insbesondere lässt sich mit der bisherigen Sensorik kein vollautomatisches Auswerteverfahren realisieren.

Bei der Entwicklung einer alternativen Sensorik für Versuche auf der optischen Bank wurde zunächst ein Fokus auf die Ermittlung der horizontalen Position eines optischen Bauteils auf der optischen Bank gelegt. Um die Sensorik möglichst kostengünstig und leicht nachbaubar zu gestalten, wird als optische Bank ein Standardaluminiumprofil (beispielsweise item®) verwendet. Daran ansetzend wurde ein optischer Reiter konstruiert, der sich mit Hilfe eines 3D-Druckers erstellen lässt. Auf der optischen Bank ist ein Barcode aufgebracht, der durch eine im Reiter untergebrachte Sensorik ausgelesen werden kann. Die Sensordaten werden von einem ebenfalls im Reiter untergebrachten Mikrocontroller (ESP32) ausgelesen, und daraus wird die Position des Reiters auf der optischen Bank berechnet. Um die eingangs aufgestellte Anforderung zu erfüllen, die Experimentiersituation so unverändert wie möglich zu lassen, wurden ein akkugestützter Betrieb und eine drahtlose Übertragung der Positionsdaten des Mikrocontrollers entwickelt. Der Mikrocontroller kommuniziert dafür mit einem Server (Raspberry Pi), an den er die Daten übermittelt. Im Server können die Daten, auch von eventuellen weiteren optischen Bauteilen, weiter aufbereitet und ausgewertet werden. Ebenfalls ist eine Weiterleitung der aufbereiteten Daten an andere Endgeräte möglich. Die Umsetzung der beschriebenen Sensorik ist in Abbildung 5 dargestellt.

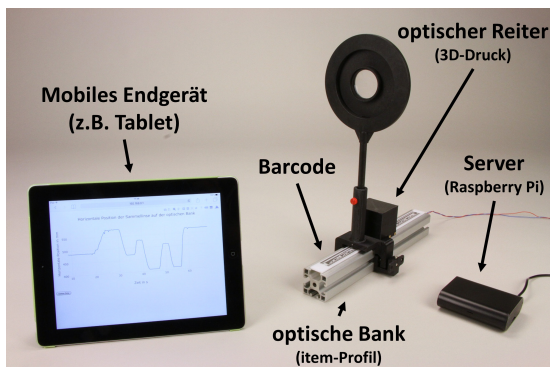


Abb. 5: Eine mögliche Realisierung für den Austausch der bisher eingesetzten Sensorik für Versuche auf der optischen Bank.

Damit wird die bisherige teilautomatisierte Auswertung der zeitlichen Abhängigkeit der relevanten Parameter der Bauteile auf der optischen Bank durch ein vollautomatisiertes Auswerteverfahren ersetzt, das in Abbildung 6 schematisch dargestellt ist. Dieses Verfahren ist nicht mehr durch Limitationen bei der Auswertung der Sensor-Rohdaten beschränkt.

Durch die Realisierung eines vollautomatischen Auswerteverfahrens ist eine wichtige Grundlage geschaffen worden, um auch bei Versuchen auf der optischen

Bank das in den Abschnitten 3 und 4 aufgezeigte Potential des objektfokussierten Ansatzes zur Erfassung experimenteller Prozesse umfassender nutzen zu können als bisher. Insbesondere lassen sich damit auch die in Abschnitt 4 beschriebenen Einsatzszenarien in der Lehre zur prozessbegleitenden Analyse und direkten Rückmeldung an die Lerner umsetzen.

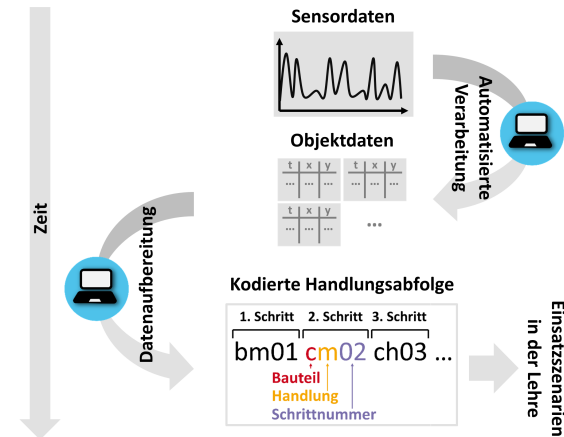


Abb. 6: Vollautomatisches Auswerteverfahren für Versuche auf der optischen Bank, das auf Grund des Austauschs der bisherigen Sensorik realisiert werden konnte.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Bei der objektfokussierten Erfassung experimenteller Prozesse bei der Durchführung von Realexperimenten wird ein Perspektivwechsel vollzogen. Im Gegensatz zu probandenfokussierten Erhebungsmethoden, wie beispielsweise Laborberichten, vorstrukturierten Protokollen, der direkten Beobachtung oder Videostudien, gelingt der Zugang zum experimentellen Prozess mittels Erfassung aller relevanten experimentellen Handlungen durch eine am Versuchsaufbau implementierte Sensorik. Durch die Sicherstellung einer teil- oder auch vollautomatischen Auswertung der Daten zeigt sich ein Potential dieses Ansatzes in der Forschung beispielsweise für Interventionsstudien zu experimentellen Prozessen, da diese mit dem objektfokussierten Ansatz nahezu vollständig erfasst werden sowie vergleich- und rekonstruierbar sind. Gleichzeitig wird die Experimentiersituation so unverändert wie möglich gelassen. Auch für die Lehre zeigt sich ein großes Potential dieses Ansatzes. Im vorliegenden Beitrag wurden mögliche Einsatzszenarien vorgestellt. Ihre umfassende Realisierung erfordert jedoch eine vollautomatische Auswertung der durch die Sensorik aufgenommenen Prozessdaten mit implementiertem Echtzeit-Feedback-System. Für Versuche auf der optischen Bank ist dafür ein Austausch der bisherigen Sensorik erforderlich, wofür ein Vorschlag vorgestellt wurde.

Für einen breiten Einsatz des objektfokussierten Ansatzes, insbesondere in den beschriebenen Einsatzszenarien in der Lehre, müssen für verschiedene Versuchsaufbauten jeweils geeignete Sensoriken entwickelt werden. Hierfür ist die Entwicklung passender Umgebungen sowohl auf der Hardware- als auch auf

Software-Ebene anhand konkreter experimenteller Aufgabenstellungen erforderlich.

7. Literatur

- Büsch, L.; Guntermann, C.; Heinke, H. (2017): Diagnostik experimenteller Vorgehensweisen am Beispiel eines Versuchs zur Radioaktivität. In: V. Nordmeier & H. Grötzebauch (Hrsg.): *PhyDid B – Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung des Fachverbands Didaktik der Physik*. Dresden: o. V., 2017, Beitrag DD 22.03, Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/781/923> (Stand 06/2018)
- Emden, M. (2011): Prozessorientierte Leistungsmessung des naturwissenschaftlichen-experimentellen Arbeitens. Eine vergleichende Studie zu Diagnoseinstrumenten zu Beginn der Sekundarstufe I. In: H. Niedderer, H. Fischler, & E. Sumfleth, (Hrsg.): *Studien zum Physik- und Chemielernen* (Bd. 118). Berlin: Logos Verlag.
- Fraß, S.; Heinke, H. (2015): Diagnostik experimenteller Fertigkeiten bei optischen Versuchen. In S. Bernholt (Hrsg.): *Heterogenität und Diversität - Vielfalt der Voraussetzungen im naturwissenschaftlichen Unterricht* Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik Jahrestagung in Bremen 2014 (S. 301–303). Kiel: IPN, Url: <http://gdcp.de/index.php?id=10058> (Stand 06/2018)
- Fraß, S.; Weyers, C.; Heinke, H. (2014): Können IBE experimentelle Fertigkeiten vermitteln? Entwicklung eines prozessorientierten Analyseinstrumentes. In: V. Nordmeier & H. Grötzebauch (Hrsg.): *PhyDid B – Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung des Fachverbands Didaktik der Physik*. Frankfurt: o. V., 2014, Beitrag DD 04.02, Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/565/710> (Stand 06/2018)
- Heidrich, J., Petersen, S., & Neumann, K. (2014). Kognitive Validierung eines Experimentiertests durch Think Alouds. In: S. Bernholt (Hrsg.): *Naturwissenschaftliche Bildung zwischen Science- und Fachunterricht* Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik Jahrestagung in München 2013 (S. 180–182). Kiel: IPN, Url: <http://gdcp.de/index.php?id=9508> (Stand 06/2018)
- Hofstein, A. (2004): The Laboratory In Chemistry Education: Thirty Years Of Experience With Developments, Implementation, And Research. *Chemistry Education, Research and Practice*, 5(3), 247–264.
- Kirchner, S. & Priemer, B. (2010): Welche Kompetenzen zeigen Schüler beim Umgang mit Variablen?. In: D. Höttecke (Hrsg.): *Entwicklung naturwissenschaftlichen Denkens zwischen Phänomen und Systematik* (S. 206-208). Münster: LIT-Verlag.
- Kirstein, J.; Haase, S.; Mühlenbruch, T.; Nordmeier, V. (2016): 20 Jahre Interaktive Bildschirmexperimente – Von den Anfängen bis zu ELIXIER. In: V. Nordmeier & H. Grötzebauch (Hrsg.): *PhyDid B – Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung des Fachverbands Didaktik der Physik*. Hannover: o. V., 2016, Beitrag DD 02.06, Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/739/872> (Stand 06/2018)
- Lock, R. (1989): Assessment of Practical Skills Part 1. The Relationships between Component Skills. *Research in Science & Technological Education*, 7(2), 221–233.
- Neumann, K. (2004): Didaktische Rekonstruktion eines physikalischen Praktikums für Physiker. In: H. Niedderer, H. Fischler, & E. Sumfleth, (Hrsg.): *Studien zum Physiklernen* (Bd. 38). Berlin: Logos Verlag.
- Shavelson, R. J., Baxter, G. P., & Pine, J. (1991): Performance Assessment in Science. *Applied Measurement in Education*, 4(4), 347–362.
- Walpuski, M. (2006): Optimierung von experimenteller Kleingruppenarbeit durch Strukturierungshilfen und Feedback: eine empirische Studie. In: H. Niedderer, H. Fischler, & E. Sumfleth, (Hrsg.): *Studien zum Physik- und Chemielernen* (Bd. 49). Berlin: Logos Verlag.

Nutzung von mobile devices im naturwissenschaftlichen Unterricht

Erik Kremser*, Verena Spatz⁺, André Ploch[°]

*Fachbereich Physik, Technische Universität Darmstadt, Hochschulstraße 6, 64289 Darmstadt,

⁺ Physikdidaktik, FB Physik, Technische Universität Darmstadt, Hochschulstraße 12, 64289 Darmstadt

[°]August-Bebel-Schule, Richard-Wagner-Straße 45, 63069 Offenbach

erik.kremser@physik.tu-darmstadt.de, verena.spatz@physik.tu-darmstadt.de, ploch@august-bei-Schule.de

Kurzfassung

„Digital macht schlau!“ so titelte das GEO-Magazin 2014 [1]. Allgemein ist Forderung der Nutzung von mobile devices im Unterricht durch Lehrkräfte mit hohen Erwartungen hinsichtlich der Steigerung der Unterrichtsqualität und dadurch das Lernerfolges verbunden. Um diese erhoffte Wirkung entfalten zu können, bedarf es jedoch einer aufgeschlossenen Grundhaltung der Lehrkräfte sowie entsprechender medienpädagogischer Kompetenzen, die über alle Ausbildungsphasen (Studium, Vorbereitungsdienst, Fort- und Weiterbildung) entwickelt und kultiviert werden müssen (vgl. [2]). Mit dem längerfristigen Ziel, passgenauen Angebote zur Unterstützung des Gebrauchs von Smartphones und Tablets im naturwissenschaftlichen Unterricht anbieten zu können, sollen die persönliche Einstellung und das derzeitige Nutzungsverhalten der Lehrkräfte erhoben werden. Hierzu wurde ein Fragebogen weiterentwickelt, der außerdem gewünschte Unterstützungsformate abdeckt. Eine Erhebung anhand dieses Fragebogens im Raum Darmstadt ergab, dass die Lehrkräfte mobile devices zwar eine große Bedeutung beimessen, mit der technischen Handhabung dieser Geräte im schulischen Umfeld jedoch Schwierigkeiten haben. Dementsprechend ist das Interesse an Unterstützungsangeboten sehr groß.

1. Einleitung

Am Fachbereich Physik der TU Darmstadt werden mit dem Projekt „Tablets als Arbeitsgeräte in der Lehre“ Methoden zur Vermittlung von Medienkompetenz in Lehrveranstaltungen entwickelt und umgesetzt (vgl. [3]), mit denen die kompetente Nutzung von mobile devices seitens der Lehrenden nachhaltig gefördert wird (vgl. [4] und [5]). Ergänzend findet Forschung zu aktuellen Nutzungen von mobile devices in Lehr-Lern-Situationen an Schule und Hochschule statt. Zwar wurde bereits mit zahlreichen Studien der Besitz bzw. die Verfügbarkeit von mobile devices untersucht (u.a. [6]). Jedoch gibt es nach unserem Kenntnisstand keine Studien, die sich detailliert mit der Nutzung von mobile devices von Lehrenden auseinandersetzen. Diese Zielgruppe ist von besonderem Interesse, weil Lehrende zum einen Vorbilder für Lernende sind und zum anderen Multiplikatoren bei der Vermittlung von Fertigkeiten, in diesem Fall der sinnstiftenden Nutzung von mobile devices. Mit der von Herrn Ploch für seine Master Thesis [7] an der TU Darmstadt durchgeführten Studie wurden daher sowohl die Nutzungsgewohnheiten als auch die persönlichen Einstellungen zur Nutzung von mobile devices der Lehrerinnen und Lehrern an weiterführenden Schulen in und um Darmstadt untersucht, mit

dem längerfristigen Ziel, bedarfsorientierte und adressatenspezifische Fortbildungsveranstaltungen anbieten zu können.

2. Studiendesign

Mit der Studie sollten folgende Fragen beantwortet werden:

- Wie sieht die Ausstattungssituation von mobile devices bei Lehrkräften aus?
- Welche Arbeitsgeräte finden im privaten und schulischen Alltag am häufigsten Anwendung?
- Wie werden mobile devices im privaten und schulischen Umfeld von Lehrkräften eingesetzt?
- Welche Gründe sprechen aus Sicht von Lehrkräften gegen den Einsatz von mobile devices in der Schule und welche Gegebenheiten müssten erfüllt sein, um mobile devices (gewinnbringend) in den Unterricht einzubinden?
- Welche Einstellungen haben Lehrkräfte gegenüber mobile devices?
- Welche Einstellungen haben Lehrkräfte in Bezug auf die Informationsbeschaffung?
- Besteht das Bedürfnis an Weiterbildung zum Thema mobile devices und welche Wünsche haben Lehrkräfte an einem Workshop zu diesem Thema?

Als Erhebungsinstrument wurde der Fragebogen verwendet, der für ähnliche Erhebungen im Rahmen des Projektes an der TU Darmstadt entwickelt und eingesetzt wurde, weil die Daten einer möglichst großen Anzahl von Teilnehmenden in dem zur Verfügung stehenden Zeitraum erfasst werden sollten. Um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Teilnehmenden zu erreichen, die aus medialer Sicht eine heterogenen Gruppe darstellen, wurde ein vollstandardisierter Ablauf mit vorwiegend geschlossenen Antwortformaten (dichotome Items und ordinalskalierte Items mit fünfstufigem Antwortformat), ergänzt durch offene Antwortkategorien bei komplexen Fragestrukturen, gewählt. So wurden Fragenkomplexe (1.) zu berufsbiographischen Angaben, (2.) zur bisherigen Nutzung von Arbeitsgeräten für die Schule im Allgemeinen und (3.) zur bisherigen Nutzung von Smartphones und Tablets für die Schule im Besonderen aufgenommen. Hier waren auch Fragen nach Gründen beinhaltet, warum ein Smartphone bzw. Tablet nicht häufiger für bzw. in der Schule genutzt wird. Beispielsweise wurden bei der Angabe der Gründe, warum ein Smartphone nicht oder nicht häufiger für bzw. in der Schule genutzt wird, Antwortmöglichkeiten für persönliche Gründe (u.a. „aus Gewohnheit“), technische Gründe (u.a. „geringe Akkulaufzeit“) und schulische Gründe (u.a. „Anbindung an Beamer/Anzeigegerät problematisch“) vorgegeben, die durch freie Antworten unter „andere Gründe“ ergänzt werden konnten (vgl. Abb. 1).

3.3 Gründe, warum ich ein Smartphone nicht, bzw. nicht häufiger für bzw. in der Schule einsetze

Zutreffendes bitte ankreuzen. Mehrfachnennungen möglich	
besitze keines	<input type="checkbox"/>
aus Gewohnheit	<input type="checkbox"/>
sehe keine Anwendungsmöglichkeit	<input type="checkbox"/>
Handhabung zu zeitaufwendig	<input type="checkbox"/>
halte ich für unzuverlässig	<input type="checkbox"/>
halte ich für kompliziert	<input type="checkbox"/>
hohe Kosten	<input type="checkbox"/>
Haptik des Touch-Screens	<input type="checkbox"/>
Größe des Displays	<input type="checkbox"/>
geringe Akkulaufzeit	<input type="checkbox"/>
Anbindung an Schulnetz schwierig (z.B. weil kein WLAN vorhanden)	<input type="checkbox"/>
Anbindung an Beamer/Anzeigegerät problematisch	<input type="checkbox"/>
aus Datenschutzgründen	<input type="checkbox"/>
andere Gründe:	<input type="checkbox"/>

Abb.1: Ausschnitt aus dem Fragebogen zu Gründen, warum ein Smartphone nicht bzw. nicht häufiger für bzw. in der Schule genutzt wird.

Diese Komplexe wurden ergänzt durch Skalen (4.) zur persönlichen Einstellung im Umgang mit Smartphones und Tablets, um mögliche nicht-technische Gründe, die gegen die Akzeptanz von mobile devices sprechen, ergründen zu können. Hierzu wurden die

Items der Kategorien „Anxiety“ (Angst), „Enjoyment“ (Vergnügen) und „Usefulness of Computers“ (Nützlichkeit von Computern) von Newby (vgl. [8]), die in zahlreichen anderen empirischen Erhebungen verwendet werden (siehe auch [9]), auf mobile devices angepasst. Weiterhin wurden eigene Items (5.) zur persönlichen Einstellung in Bezug auf Informationsbeschaffung ergänzt. Schließlich wurden die Lehrkräfte (6./7.) auch nach ihrem Interesse an Unterstützungsangeboten sowie diesbezüglichen Wünschen befragt.

Als zu befragende Zielgruppe dieser Studie wurden primär Lehrkräfte aus den Bereichen der beruflichen und der weiterführenden Schulen (Sekundarstufe 2) ausgewählt, weil diese an der TU Darmstadt ausgebildet werden und somit zur direkten Zielgruppe der angestrebten Fortbildungsveranstaltungen gehören. Zusätzlich wurden auch Lehrkräfte von Gesamtschulen mit integrierter Oberstufe berücksichtigt. Mit Hilfe der Datenbank des Hessischen Bildungsservers (http://schul-db.bildung.hessen.de/schul_db.html) wurden insgesamt 53 Schulen aus den Regionen Rheingau-Taunus-Kreis, Main-Taunus-Kreis, Frankfurt, Stadt und Land Offenbach, Main-Kinzig-Kreis, Kreis Groß-Gerau, Darmstadt-Dieburg, Kreis Bergstraße und dem Odenwaldkreis ausgewählt und, mit der Bitte um Teilnahme an der Studie, kontaktiert. Insgesamt nahmen 253 Lehrende aller Unterrichtsfächer an 20 Schulen im Zeitraum vom 10.05.17 – 30.06.17 an der Befragung teil. 69% der Befragten haben die Möglichkeit genutzt, den Fragebogen online auszufüllen. 114 Befragte (45%) unterrichten mindestens ein MINT-Fach, 130 Befragte (55%) kein MINT-Fach.

3. Ergebnisse

3.1. Nutzungsgewohnheiten

Von den 253 Befragten nutzen 214 (85 %) ein Smartphone und hiervon 156 (62%) dieses sowohl privat als auch schulisch. Tablets verwenden hingegen nur 154 Befragte (61%) und hiervon 77 (30%) dieses sowohl privat als auch schulisch.

Bei der detaillierten Betrachtung der Nutzungen des Smartphones fällt auf, dass es, wie auch bei den Jugendlichen (vgl. [6]), hauptsächlich zur privaten, aber weniger zur schulischen Kommunikation genutzt wird. (vgl. Abb. 2).

Während bei den Heranwachsenden das Anfertigen und Teilen von Bildern und Filmen zum Alltag gehört, werden diese Techniken von den Lehrkräften nur privat, aber in der Schule und für die Schule nur wenig genutzt (vgl. Abb. 3).

Als Hauptgründe dafür, dass Smartphones nicht bzw. nicht häufiger für die Schule bzw. in der Schule genutzt werden, wurden „Größe des Bildschirms“ mit 44 % und die „Anbindung an Beamer/Anzeigegerät problematisch“ mit 42% am häufigsten genannt. Obwohl man den jüngeren Lehrkräften eher zutraut, „die

Kompetenz zum Umgang mit dem Berührungsbildschirm und unzähligen Apps fast selbstverständlich“ mitzubringen (vgl. [10]), gaben diese häufiger als ihre älteren Kolleginnen und Kollegen an, mit der Anbindung an einen Beamer bzw. an ein Anzeigergerät Probleme zu haben. Diejenigen Lehrkräfte, die keine MINT-Fächer unterrichten, hatten hier mit 41 % geringfügig weniger Probleme als Lehrkräfte, die wenigstens ein MINT-Fach unterrichten (46 %).

Dagegen gaben nur 28 % der Befragten an, ein Tablet nicht bzw. nicht häufiger für bzw. in der Schule zu nutzen, weil die Anbindung an Beamer/Anzeigergerät problematisch ist. Warum dies ein deutlich geringer Prozentsatz ist als bei der Anbindung von Smartphones an Beamer/Anzeigergerät, konnte aus den Daten der aktuellen Studie nicht ermittelt werden, soll aber im Rahmen des Projektes weiterverfolgt werden.

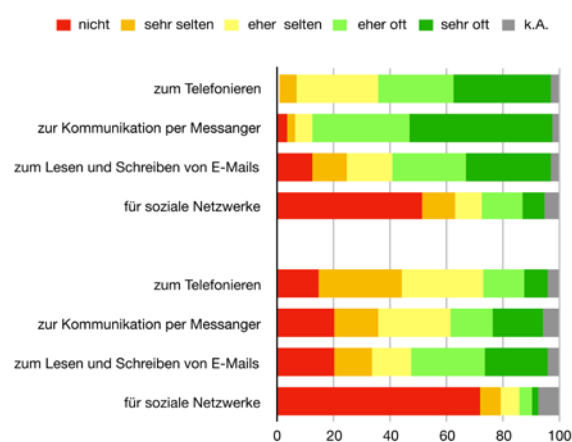


Abb.2: Verwendung von Smartphones zur Kommunikation durch Lehrkräfte (N=253).

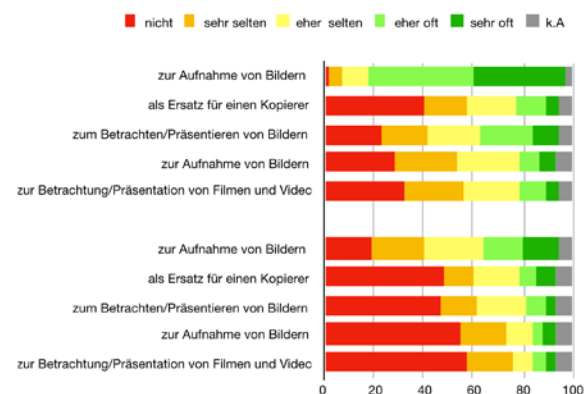


Abb.3: Verwendung von Smartphones für Bilder und Filme durch Lehrkräfte (N=253).

3.2. Persönliche Einstellung im Umgang mit mobile devices

Neben den technischen und infrastrukturellen Gegebenheiten, ist die Nutzung von mobile devices seitens der Lehrenden auch abhängig von der persönlichen Einstellung im Umgang mit diesen Geräten. U.a. haben 58 % der Lehrkräfte auf die Frage, ob ihnen der Umgang mit mobile devices leicht fällt, mit „trifft voll zu“ und „trifft eher zu“ geantwortet. Dies scheint

zunächst mit den oben dargestellten Angaben zur Anbindung an Beamer/Anzeigergerät gut zusammenzupassen. Wenn man allerdings diese Angaben in Abhängigkeit voneinander aufträgt (vgl. Abb.4) wird deutlich, dass wohl beim Umgang mit dem Gerät die technischen Probleme mit der Anbindung an Beamer/Anzeigergerät nicht berücksichtigt wurden.

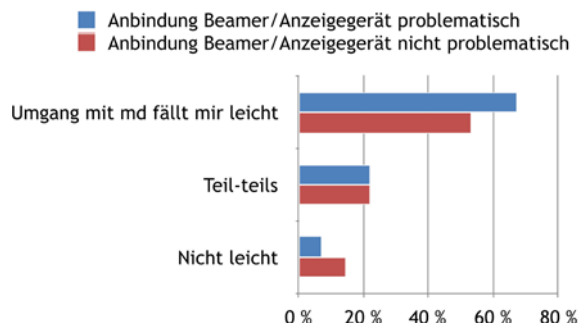


Abb.4: Angabe, ob Lehrkräften die Anbindung an Beamer/Anzeigergerät problematisch erscheint in Abhängigkeit davon, ob ihnen der Umgang mit einem mobile device leicht fällt (N=253).

In Bezug auf die Nützlichkeit von mobile devices sind die befragten Lehrerinnen und Lehrer mehrheitlich der Meinung, dass der kompetente Umgang mit „mobile devices“ für junge Menschen unabdingbar ist und dass „mobile devices“ in Zukunft immer wichtiger werden (vgl. Abb. 5).

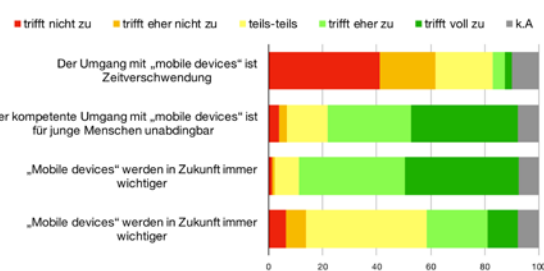


Abb.5: Persönliche Einstellung der Lehrkräfte im Umgang mit mobile devices (N=253).

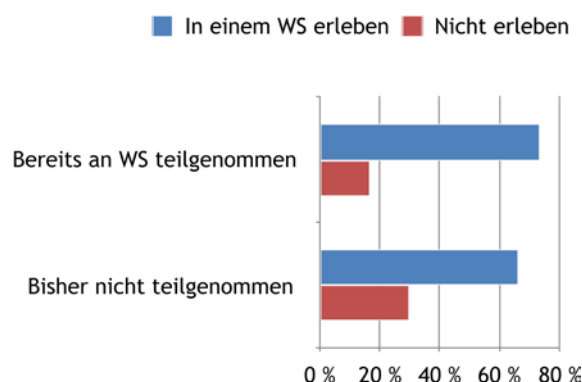


Abb.6: Angabe, ob Lehrkräfte bereits an einem Workshop der TU Darmstadt teilgenommen haben in Abhängigkeit davon, ob sie Interesse an einem solchen Workshop bekunden (N=253).

Dabei sehen die Lehrkräfte die große Bedeutung von mobile devices nicht nur für die Schülerinnen und Schüler, sondern auch für sich selbst. Das kann man

daran erkennen, dass ein sehr großer Anteil von ihnen (68 %) Interesse hat, mobile devices im Unterricht zu nutzen bzw. in einem Workshop kennenzulernen. Bisher haben nur 28 % an einem Workshop zur Nutzung von Tablets in der Schule teilgenommen. Unabhängig von der bereits erfolgten Teilnahme ist das Interesse an einem Workshop sehr groß (vgl. Abb. 6).

Das spricht dafür, dass es viele Fragen im Umgang mit mobile devices in Lehr-Lern-Situationen zu klären gibt.

Außerdem fällt auf, dass Lehrkräfte den kompetenten Umgang junger Menschen mit diesen Geräten für unabdingbar halten, unabhängig davon, ob sie selbst ein solches Gerät in ihrem Unterricht ausprobieren möchten (vgl. Abb. 7).

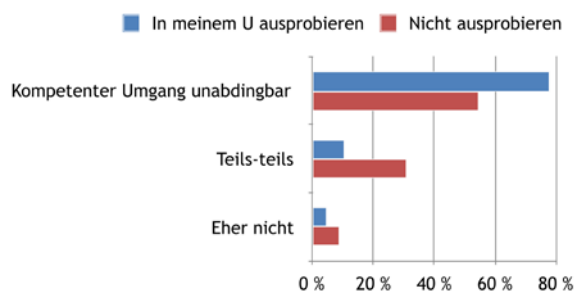


Abb.7: Angabe, ob Lehrkräfte mobile devices im eigenen Unterricht ausprobieren möchten in Abhängigkeit davon, ob ihnen der kompetente Umgang junge Menschen hiermit unabdingbar erscheint (N=253).

Neben der Möglichkeit mobile devices in einem Workshop oder im eigenen Unterricht kennen zu lernen, wird im Projekt „Tablets als Arbeitsgeräte in der Lehre“ auch die angeleitete und begleitete Nutzung angeboten. Hierbei wird die Lehrkraft begleitet und dabei eine individuelle Arbeitsumgebung erstellt, mit der das mobile device für die betreffende Lehrkraft bestmöglich eingesetzt werden kann. Für diese Nutzung wird die Lehrkraft angeleitet und beim Einsatz begleitet. Ähnlich wie bei der Fahrschule wird mit einer intensiven Betreuung begonnen, die mit zunehmend gewonnener Erfahrung und Selbstvertrauen immer weiter reduziert wird. Das Ziel ist es, ein mobile device in Lehr-Lern-Situationen gewinnbringend nutzen zu können, Fehlerquellen erkennen und mit geeigneten Maßnahmen begegnen zu können.

An dieser angeleiteten und begleiteten Nutzung haben 145 (57 %) Lehrerinnen und Lehrer Interesse.

3.3. Wünschenswertes

Der Großteil der befragten Lehrerinnen und Lehrer wünschen sich subventionierte Endgeräte. Zudem fordern die Lehrkräfte, dass die Wartung und Administration der Geräte nicht in ihrer eigenen Verantwortung liegt, sondern durch einen entsprechenden Administrator vorgenommen wird. Da die meisten Daten von mobile devices in Clouds hinterlegt sind, wird eine entsprechende Datensicherung gewünscht, die den geltenden Datenschutzbestimmungen gerecht wird.

4. Literatur

- [1] Schaefer, Jürgen (2014): Lernen mit neuen Medien: Digital macht schlau! In: GEO-Magazin, 2014 (12), S. 28-46, Url: http://www.geo.de/GEO/Heftreihe/geo_magazin/lernen-mit-neuen-Medien-digital-macht-schlau-79266.html (Stand 4/2018)
- [2] Herzig, Bardo (2014): Wie wirksam sind digitale Medien im Unterricht? Gütersloh: Verlag Bertelsmann Stiftung, Url: https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/Studie_IB_Wirksamkeit_digitale_Medien_im_Unterricht_2014.pdf (Stand 4/2018)
- [3] Kremser, Erik (2017): Konzepte zur gewinnbringenden Nutzung von Tablets in der Lehre. Beitrag zum Fachdidaktischen Symposium an der Technischen Universität Darmstadt, Url: https://www.physik.tu-darmstadt.de/media/fachbereich_physik/phys_studium/vorlesungsassistenz/vorlesungsassistenz_grafiken/forschung_beitraege_1/poster_1/Poster_FS_TUD_TaAidL_20170630.pdf (Stand 4/2018)
- [4] Fischer, Julian (2015): Erstellung einer adressatenspezifischen Methode um die gewinnbringende Nutzung von Tablets im Physikunterricht zu fördern. Wissenschaftliche Hausarbeit am Fachbereich Physik der Technischen Universität Darmstadt, Url: https://www.physik.tu-darmstadt.de/media/fachbereich_physik/phys_studium/vorlesungsassistenz/wiss_hausarbeiten/2015_WH_Fischer_-_adressatenspezifische_Methode_Foerderung_Nutzung_Tablets_von_LuL.pdf (Stand 4/2018)
- [5] Kremser, Erik (2015): Tablets als Arbeitsgeräte in der Lehre - erste Erfahrungen. In: Schiefner-Rohs, Mandy; Gómez Tutor, Claudia; Menzer, Christine (Hrsg.): Lehrer. Bildung. Medien: Herausforderungen für die Entwicklung und Gestaltung von Schule. Baltmannsweiler: Schneider Verlag Hohengehren, S.83-99
- [6] Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest (2017): JIM-Studie 2017: Jugend, Information, (Multi-) Media. Basisstudie zum Medienumgang 12- bis 19-Jähriger in Deutschland, Url: https://www.mpfs.de/fileadmin/files/Studien/JIM/2017/JIM_2017.pdf (Stand 4/2018)
- [7] Ploch, André (2018): Die Nutzung von Mobile Devices im naturwissenschaftlichen Unterricht durch Lehrkräfte: Eine empirische Untersuchung. Wissenschaftliche Hausarbeit am Fachbereich Physik der Technischen Universität Darmstadt, Url: https://www.physik.tu-darmstadt.de/media/fachbereich_physik/phys_studium/vorlesungsassistenz/wiss_hausarbeiten/Master-Thesis_Ploch_-_Nutzung_Mobile_Devices_im_naturwissenschaftlichen_Unterricht_durch_Lehrkrafte.pdf (Stand 8/2018)

- [8] Newby, Michael (1998): A study of the effectiveness of computer laboratory classes as learning environment. Dissertation an der Perth: Curtin University of Technology, Url: <http://hdl.handle.net/20.500.11937/1256> (Stand 4/2018)
- [9] Dooly, Melinda (2009): New competencies in a new era? Examining the impact of a teacher training project. In: ReCALL, 21 (03), S. 352–369
- [10] Groebel, Jo (2012): Digitale Lernwerkzeuge. Metastudie der BSP Business School Berlin Potsdam, Url: https://tablets.schule/wp-content/uploads/2014/03/bsp_studie_final_2_-_11.pdf (Stand 4/2018)

Interdisziplinäre Konzeptentwicklung interaktiver digitaler Lehr-Lernmedien durch Fachdidaktik und Design

Daniel Laumann*, Matthias Ries⁺, Reinhard Schulz-Schaeffer⁺ & Stefan Heusler*

*Institut für Didaktik der Physik
Westfälische Wilhelms-Universität
Wilhelm-Klemm-Str. 10
48149 Münster

daniel.laumann@uni-muenster.de
stefan.heusler@uni-muenster.de

⁺Informative Illustration
Hochschule für angewandte Wissenschaften
Finkenau 35
22081 Hamburg

matthias.ries@haw-hamburg.de
reinhard.schulz-schaeffer@haw-hamburg.de

Kurzfassung

Das Projekt *Real:Digital – die Integration zweier Welten* (nf. *Real:Digital*) widmet sich der physikalischen Lehre im Spannungsfeld realer und digitaler Repräsentationen. Um die Glaubwürdigkeit realer Experimente und das Potential interaktiver digitaler Lehr-Lernmedien gewinnbringend integrativ zu nutzen, ist die Berücksichtigung unterschiedlicher Expertisen in der Konzeption entsprechender Lehr-Lernmaterialien notwendig. Bezüglich der Entwicklung interaktiver digitaler Lehr-Lernmedien wurden zahlreiche Gestaltungsmerkmale in empirischen Untersuchungen eingehend analysiert. Die Betrachtung verfügbarer interaktiver digitaler Lehr-Lernmaterialien lässt darauf schließen, dass die an der Entwicklung beteiligten Disziplinen Fachdidaktik (und Schule) sowie Design spezifische Gestaltungsmerkmale in unterschiedlicher Form und in variierendem Maß berücksichtigen.

In diesem Sinne wurden in einem Workshop mit Teilnehmenden der Disziplinen Fachdidaktik und Design sowie Lehrkräften Konzepte für ein interaktives digitales Lehr-Lernmedium zu einem exemplarischen Realexperiment (Wirbelstrombremse) entwickelt. Der Workshop ermöglichte einen Austausch der beteiligten Disziplinen und wurde durch eine Studie zu disziplintypischen Gestaltungsmerkmalen und dem Einfluss interdisziplinärer Arbeit auf Entscheidungen im Konzeptentwicklungsprozess begleitet. Die Befunde weisen auf Unterschiede zwischen den Gruppen insbesondere im Bereich narrativer Elemente und hinsichtlich des Ausmaßes an Interaktivität bei den interaktiven digitalen Lehr-Lernmedien hin.

1. Einleitung

Die Nutzung digitaler Lehr-Lernmedien als Element der Wissensvermittlung in den Naturwissenschaften ist aktuell bereits sowohl in Schulen als auch an Hochschulen weit verbreitet [1]. Aufgrund des stetig wachsenden Einflusses moderner Technologien auf die Lehre und den damit einhergehenden Erwartungen hinsichtlich einer umfassenden Digitalisierung des Bildungsbereichs, erscheint die Auseinandersetzung mit digitalen Lehr-Lernmedien von großer Bedeutung. Die Forderung nach einem verstärkten Einsatz digitaler Medien ergibt sich auf unterschiedlichen Ebenen u.a. dadurch, dass sowohl für das Individuum (Kompetenzentwicklung, Motivation etc.) als auch mit Blick auf die Unterrichtsqualität (kooperatives Lernen, Strukturierung von Lernprozessen etc.) und insbesondere für die Schule als Institution (infrastrukturelle Bedingungen, Weiterbildung von Lehrkräften etc.) positive Effekte erwartet werden [2].

Dabei ist jedoch stets kritisch zu berücksichtigen, dass in der empirischen Bildungsforschung und den

fachdidaktischen Disziplinen weitestgehend Einigkeit darüber herrscht, dass eine Reduktion auf das Darbietungsmedium spezifischer Inhalte die angestrebte Kompetenzentwicklung von Lernenden nicht bzw. nur in geringem Maße beeinflusst wird. Forschung im Kontext der Wirkung digitaler Medien sollte somit stärker auf die Nutzung durch Lernende sowie die jeweilige Gestaltung von Inhalten unter Berücksichtigung der technischen Möglichkeiten des Darbietungsmediums bezogen werden [3], [4]. Die Gestaltung von Inhalten unter Nutzung des Potentials digitaler Medien im Rahmen gegebener Gestaltungsprinzipien ermöglicht eine Vermittlung in aktiven und multimodalen Lernprozessen. Hinsichtlich dieser weisen kognitionspsychologische Befunde auf einen Mehrwert digitaler Lehr-Lernmedien bei entsprechender Konzeption hin, siehe Abschnitt 2.

Das Projekt *Real:Digital* befasst sich im Kontext der Gestaltung digitaler Lehr-Lernmedien mit dem Potential einer integrativen Nutzung innovativer Repräsentationen, insbesondere in Form interaktiver

digitaler Lehr-Lernmedien, sowie realer Repräsentationen, d.h. für die Lehre in der Physik klassischer Medien, wie Experimenten oder (Natur-)Phänomenen [5]. Der Zielsetzung des Design-Based Research folgend [6], [7], sollen im Rahmen des Projekts sowohl „nach außen kommunizierbare Theorien“ entwickelt werden, die „für die Praxis brauchbar sind“ als auch die „wissenschaftlichen Erkenntnisse zum Lernen und Lehren erhöht“ werden [8, S. 62]. Aus diesem Grund lassen sich die Projektinhalte von *Real:Digital* in drei zentrale Handlungsfelder unterteilen.

In einem ersten Handlungsfeld beschäftigt sich die Arbeit des Projekts mit einer naturwissenschaftsspezifischen Erweiterung der *Cognitive Theory of Multimedia Learning* (nf. *CTML*). Ausgehend von der *CTML* werden Gestaltungsprinzipien für den gemeinsamen Einsatz von Sprache und Visualisierungen als Repräsentationsformen abgeleitet. Die Erweiterung dieser Theorie, berücksichtigt mit Experimenten und Naturphänomenen, d.h. klassischen naturwissenschaftsspezifischen Medien, zusätzliche Repräsentationen, die ergänzende Wahrnehmungs- und Verarbeitungsprozesse von Informationen erfordern [5]. Ausgehend von der erweiterten *CTML* gilt es zudem weiterführende Gestaltungsprinzipien unter Berücksichtigung der genannten Repräsentationsformen zu entwickeln und empirisch zu beforschen.

Ein zweites Handlungsfeld bezieht sich auf Entwicklungsforschung zur integrativen Nutzung realer und digitaler Repräsentationen. Dieses Handlungsfeld strebt die Genese und Beforschung der erforderlichen Gestaltungsprinzipien, siehe erstes Handlungsfeld, im Kontext interdisziplinärer Konzeptentwicklung interaktiver digitaler Lehr-Lernmedien durch Fachdidaktik und Design, aber auch im Kontext der Entwicklung realer Repräsentationen zu existierenden interaktiven digitalen Lehr-Lernmedien an. Dabei werden die exemplarische Entwicklung und empirische Untersuchung der Wirkung von Best-Practice-Beispielen zu eben dieser integrativen Nutzung mit einbezogen [9], [10].

Das dritte Handlungsfeld sieht zudem die Integration von Lehrelementen zu realen und digitalen Repräsentationen in die Lehramtsausbildung vor. Diesbezüglich erfolgte die erfolgreiche Erprobung und Implementation eines Seminarkonzeptes im Rahmen des *Kollegs Didaktik:digital* der *Joachim Herz Stiftung* im Bereich der fachdidaktischen Module des Lehramtsstudiums an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster [11].

Der vorliegende Beitrag lässt sich durch den starken Bezug zur Entwicklung und Untersuchung von Gestaltungsprinzipien als Perspektive und Zielsetzung an der Grenze des ersten und zweiten Handlungsfeldes des Projekts *Real:Digital* verorten.

2. Theoretische Grundlage

Von zentraler Bedeutung für die integrative Nutzung realer und digitaler Repräsentationen scheint eine entsprechende Konzeption und Gestaltung der jeweiligen Medien grundlegend. Dieser Beitrag befasst sich dabei insbesondere mit Gestaltungsprinzipien auf Seiten der digitalen Repräsentationen, während spezifische Forschungsbefunde zur Gestaltung realer Experimentiersituationen für Lernende und damit verbundene Instruktionen etc. nicht vertieft werden sollen.

Hinsichtlich digitaler Lehr-Lernmedien sollte angestrebt werden, deren Konzeption und Realisierung unter Berücksichtigung der jeweiligen Zielsetzung des Einsatzes bestmöglich und unter Berücksichtigung aktueller Forschungsbefunde zur Gestaltung digitaler Lehr-Lernmedien, aber auch Lehr-Lernmedien generell, auszuführen.

Mit Bezug zur bereits genannten *CTML* befassen sich zahlreiche Forschungsarbeiten mit der Vermittlung von Informationen durch die Korrelation von Text und Bild. Besonders grundlegend sind die im Rahmen der Entwicklung der *CTML* abgeleiteten zwölf Gestaltungsprinzipien [12]. Besonders häufig werden dabei das Modality Principle (Modalitätsprinzip) sowie das Multimedia Principle (Multimediasprinzip) mit Bezug zur *Dual Coding Theory* [13] sowie zur *Cognitive Load Theory* [14] rezipiert und angewendet. Aktuelle Untersuchungen zum Modalitätsprinzip, für das bei der Verknüpfung von Bildern und gesprochenen gegenüber geschriebenen Texten beim Lernen ursprünglich eine positive Wirkung auf die Lernwirksamkeit festgestellt wurde, stellen die Allgemeingültigkeit des Modalitätsprinzips jedoch in Frage und diskutieren die grundsätzliche Sinnhaftigkeit einer universellen Empfehlung zur Berücksichtigung von gesprochenem statt geschriebenem Text in multimedialen Lernumgebungen [15], [16]. Im Rahmen dieser Untersuchungen ergibt sich Kritik am Modalitätsprinzip dadurch, dass die ursprünglichen Befunde zu diesem Gestaltungsprinzip insbesondere nicht hinsichtlich der Effektstärke der Befunde reproduziert werden können.

Andere Untersuchungen zur Gestaltung multimedialer Lehr-Lernumgebungen befassen sich mit dem Einfluss spezifischer Textcharakteristika auf die Verarbeitung multimedialer Materials. Die Untersuchungen deuten an, dass der Inhalt eines Textes die Effektivität multimedialer Darbietungen beeinflussen kann. Es zeigt sich u.a., dass durch die Beschreibung von räumlichen Konfigurationen in Texten Konflikte im Bereich der Text- und Bildverarbeitung des Arbeitsgedächtnisses ausgelöst werden können. Diese Konflikte werden bei der Beschreibung von visuellen und gestalterischen Merkmalen durch Text nicht ausgelöst, sodass räumliche gegenüber visuellen Textinformationen unter Umständen schlechtere Lernleistungen verursachen [17].

Ein weiteres Untersuchungsfeld stellen Erhebungen zum Einfluss des Realitätsgrades der Visualisierung im Kontext digitaler Lehr-Lernmedien dar. Obwohl Untersuchungen diesbezüglich durchaus ambivalente Befunde erbringen [18], [19], ergibt sich insgesamt eher der Eindruck, dass realistische Darstellungen möglicherweise hilfreiche Kontextinformationen vermitteln, die die Lernwirksamkeit hinsichtlich spezifischer Inhalte potentiell positiv beeinflussen und Nachteile realistischer Darstellungen im Bereich einer zusätzlichen extrinsischen kognitiven Belastung somit ausgeglichen werden könnten. Kritisch anzumerken ist an dieser Stelle jedoch, dass die genannten Untersuchungen nicht zwischen dokumentierenden und interpretierenden Bildern unterscheiden. Da sich insbesondere die Illustration mit der Interpretation von Realität im Sinne eines Modells befasst, wäre es wünschenswert die in der Studie untersuchten Abbildungen genauer zu klassifizieren. Zudem beeinflusst der Realitätsgrad eines interaktiven digitalen Lehr-Lernmediums auch über die Visualisierung hinaus zusätzlich durch Merkmale der Usability etc. die nicht unbedeutende Beurteilung der Glaubwürdigkeit eines interaktiven digitalen Lehr-Lernmediums, sodass auch dieser Aspekt bei der Gestaltung zu berücksichtigen ist [20].

Das nächste Gestaltungselement interaktiver digitaler Lehr-Lernmedien bezieht sich auf die Dynamik von Visualisierungen. Dabei existieren zur Untersuchung der Effektivität dynamischer und statischer Visualisierungen vielfältige Erhebungen. Eine Meta-Analyse weist dynamischen gegenüber statischen Repräsentationen eine positive Beeinflussung der Lernwirksamkeit unter Berücksichtigung bestimmter Umstände nach. So zeigten sich u.a. Vorteile bei der Vermittlung von prozeduralem Wissen und weniger im Bereich deklarativen Wissens oder des Aufbaus von Problemlösekompetenzen [21]. Aktuelle Untersuchungen kritisieren jedoch die Vereinheitlichung statischer Repräsentationen und unterscheiden hier zusätzlich zwischen statisch-simultanen und statisch-sequentiellen Darstellungen, wodurch sich differenziertere Befunde ergeben [19].

Ausgehend von der Annahme eines interaktiven digitalen Lehr-Lernmediums stellt der Grad der Interaktivität bzw. die Usability eine wichtige Dimension dar [22], [23]. In Bezug zum Projekt *Real:Digital* gilt es, die spezifische Lehr-Lernsituation und die Interaktionsmöglichkeiten in der realen (experimentellen) Repräsentationsform mit zu berücksichtigen.

Betrachtet man die gegenwärtige theoretische Grundlage, so zeigt sich, dass zahlreiche Gestaltungsprinzipien bereits (vergleichsweise isoliert) hinsichtlich ihrer spezifischen Wirkung durch empirische Untersuchungen genauer analysiert wurden. Weiterhin lässt sich durch die dargestellte Auswahl an Untersuchungen erkennen, dass bei der Konzeption und Realisierung interaktiver digitaler Lehr-Lernmedien hinsichtlich einer Vielzahl von Gestaltungsmerkmalen Entscheidungen zu treffen sind.

3. Aktuelle Forschungs- und Entwicklungskonzepte

Neben diesen vorwiegend kognitionspsychologischen und nur in Ansätzen fachdidaktischen Befunden, ergeben sich weitere zu berücksichtigende Aspekte bei der Gestaltung interaktiver digitaler Lehr-Lernmedien im Bereich der Physik durch die Analyse aktuell verfügbarer interaktiver digitaler Elemente. Es zeigt sich, dass die Qualität der fachdidaktischen und visuellen Konzepte sowie die wahrgenommene Usability und das Potential zur unterrichtlichen Nutzung erheblich variieren [24], [25], [26], [27].

Auch wenn die oben genannten Medien bzw. Plattformen nur einen Ausschnitt des breiten Spektrums verfügbarer digitaler Produkte darstellen, ist bereits hier zu erkennen, dass die in Abschnitt 2 genannten Gestaltungsprinzipien in sehr unterschiedlichem Ausmaß berücksichtigt bzw. verschiedenartig interpretiert werden. Für die angegebenen Medien ist weiterhin einzubeziehen, dass die für die Entwicklung verantwortlichen und an der Realisierung beteiligten Personen unterschiedlichen Disziplinen entstammen. So gehen je nach Medium stärker Konzepte, Erfahrungen und Wissen der Fachdidaktik, des Designs oder auch praktische Implikationen der Schule ein.

Setzt man die tatsächlich berücksichtigten Gestaltungsmerkmale mit Blick auf Abschnitt 2 sowie deren Interpretation und den Entwicklungshintergrund der interaktiven digitalen Lehr-Lernmedien, gegeben durch die Expertise bzw. den Hintergrund der beteiligten Personen, zueinander in Beziehung, deutet sich an, dass verschiedenartige Disziplinen bestimmte Merkmale bei der Entwicklung der genannten Medien stärker oder weniger stark berücksichtigen bzw. in Teilen möglicherweise sogar vernachlässigen.

4. Untersuchungsziel und Forschungsfragen

Ausgehend von der dargestellten theoretischen Grundlage in Form einer Vielzahl empirischer Untersuchungen einzelner Gestaltungsmerkmale multimedialer Lehr-Lernmaterialien und der deskriptiven und exemplarischen Analyse aktuell verfügbarer Entwicklungskonzepte, ergeben sich unterschiedliche mögliche Zielsetzungen für Forschungsarbeiten in diesem Feld.

Der vorliegende Beitrag strebt die Untersuchung zweier Forschungsfragen mit Bezug zu Gestaltungsmerkmalen interaktiver digitaler Lehr-Lernmedien an. In einem interdisziplinären Konzeptentwicklungsprozess für ein interaktives digitales Lehr-Lernmedium zu einem gegebenen physikalischen Kontext bzw. Experiment soll erhoben werden, welche Gestaltungsmerkmale bei unterschiedlichen Disziplinen Berücksichtigung finden.

Auf diese Art und Weise lässt sich feststellen, welche der gemäß Abschnitt 2 aus Forschungsperspektive relevanten Gestaltungsmerkmale von unterschiedlichen Gruppen genutzt werden und welche (bewusst oder

unbewusst) keine Berücksichtigung finden (Forschungsfrage 1). Die Beantwortung dieser Forschungsfrage verfolgt das Ziel potentiell notwendige Implikationen für die Ausbildung von handelnden Personen unterschiedlicher Disziplinen abzuleiten, um so möglicherweise bislang unbekannte oder vernachlässigte Erkenntnisse zum Einsatz von Gestaltungsmerkmalen in Ausbildungsprozesse integrieren zu können.

Weiterhin wird angestrebt die aus der Theorie und bestehenden Untersuchungen bekannten Charakteristika der Gestaltung mit eben solchen Gestaltungsmerkmalen abzugleichen, die bei der praktischen Konzeptentwicklungsarbeit Berücksichtigung finden (Forschungsfrage 2). Dieser Abgleich soll Anlässe für weiterführende empirische Untersuchungen im Sinne der in Abschnitt 2 beschriebenen Studien liefern und dabei Gestaltungsmerkmale adressieren, die bislang noch nicht bzw. noch nicht im Kontext interaktiver digitaler Lehr-Lernmedien untersucht wurden.

5. Studiendesign

Der für die Untersuchung notwendige interdisziplinäre Konzeptentwicklungsprozess wurde im Rahmen eines zweitägigen Workshops im November 2017 in Münster durchgeführt und erfolgte gemäß des in Abb. 1 dargestellten Verlaufsplans, der nachfolgend erläutert werden soll.

Die Realisierung des interdisziplinären Charakters erfolgte durch die Teilnahme von Expertinnen und Experten aus den Disziplinen Design mit Schwerpunkt Illustration ($N = 9$) sowie Fachdidaktik ($N = 8$). Der Schwerpunkt Illustration bezieht sich auf Personen innerhalb des Designs, die stark bildorientiert arbeiten und im Gegensatz zu anderen Gruppen (Modedesign, Industriedesign) ein etabliertes Verständnis von visueller Kommunikation aufweisen. Innerhalb der Gruppe der Fachdidaktik besaß mehr als die Hälfte der teilnehmenden Personen mehrjährige schulpraktische Erfahrung. Damit wurde angestrebt alle in der Praxis an der Entwicklung interaktiver digitaler Lehr-Lernmaterialien beteiligten Personengruppen und Disziplinen einzubinden.

Der Einstieg in den Workshop erfolgte über eine gemeinsame Plenumsphase mit Aufgabenstellung und einem Briefing zur Grundlagen der Fachinhalte und Fachdidaktik sowie designbezogenen Aspekten jeweils mit Bezug zur Aufgabenstellung. Die Aufgabenstellung für alle teilnehmenden Personen lautete:

„Entwickeln Sie ein Konzept für ein interaktives digitales Lehr-Lernmedium zur Erklärung der Wirbelstrombremse im Kontext des Realexperimentes für die Oberstufe.“

Das Briefing umfasste auf Seiten der Fachdidaktik die Beschreibung von Anwendungen der Wirbelstrombremse und die Demonstration des Phänomens der Wirbelstrombremse in Form eines Realexperimentes mit eingehender Beschreibung und Erklärung unter

Zuhilfenahme einer physikalischen Modellierung und Nennung grundlegender fachlicher Hintergrundinformationen (Eigenschaften magnetisches Feld, Erzeugung magnetischer Felder, Magnetische Wirkung des elektrischen Stroms, Lorentzkraft etc.). Der fachliche Inhalt des Workshops sowie die grundlegenden fachlichen Informationen zur Wirbelstrombremse und die modellbezogene Erklärung des Phänomens wurden den Teilnehmerinnen und Teilnehmern erstmalig am Vorabend des Workshops zugänglich gemacht.

Auf Seiten des Designs beinhaltete das Briefing insbesondere Informationen zur Form der Ausarbeitung der Konzeptentwicklung. Diese sollte als Storyboard bestehend aus prägnanten Einzelbildern (Panels) oder einem Netz-Diagramm (Wireframe) erfolgen und darüber hinaus eine Stilprobe als exemplarische Visualisierung einer Kernfunktion des zu entwickelnden Mediums, die ästhetisch und funktional überzeugend ausgearbeitet ist, umfassen. Die Erläuterungen zur Form der Ausarbeitung umfassten implizit jedoch auch methodische Anleitungselemente, die in Ansätzen Informationen über typische Vorgehensweisen vermittelten.

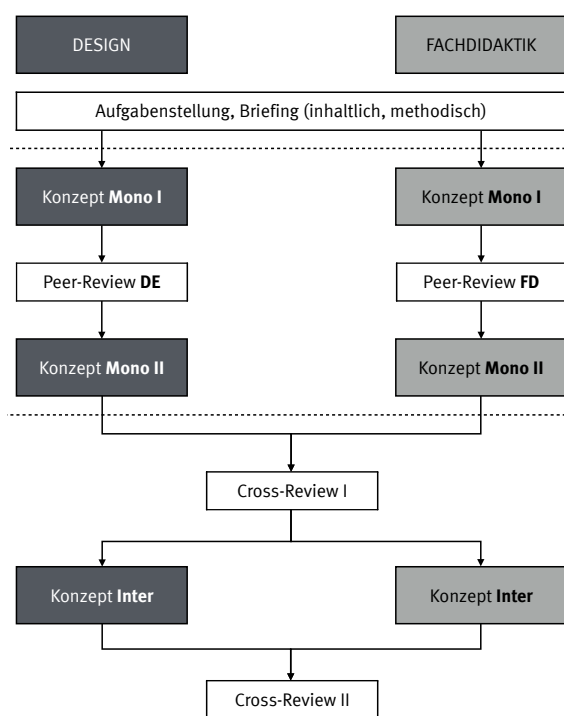


Abb.1: Verlaufsplan zur interdisziplinären Konzeptentwicklung eines interaktiven digitalen Lehr-Lernmediums.

Die nachfolgende Konzeptentwicklung selbst erfolgte in zwei übergeordneten Arbeitsphasen, die sich hinsichtlich des Grades an Interdisziplinarität als monodisziplinäre (nf. *Mono*) und interdisziplinäre (nf. *Inter*) Phase charakterisieren lassen, siehe Abb. 1.

In Arbeitsphase *Mono* erfolgte eine Aufteilung der Teilnehmerinnen und Teilnehmer hinsichtlich ihrer Disziplin. Alle Teilnehmerinnen und Teilnehmer entwickelten einen ersten Konzeptentwurf (*Mono I*), der im Rahmen eines Peer-Reviews nach einer

gegebenen Arbeitszeit den Personen der jeweils eigenen Disziplin präsentiert und mit diesen diskutiert wurde. Die Präsentation umfasste eine Darstellung der Funktionsweise, Bedienelemente, fachlichen Inhalte und visuellen Merkmale sowie eine Erläuterung der jeweils zugrundeliegenden Entscheidungen. Im Anschluss hatten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer Gelegenheit den Konzeptentwurf weiterzuentwickeln und dabei das Feedback der Peer-Review-Phase zu berücksichtigen (*Mono II*). Auf diese Art und Weise sollte eine Reflexion über disziplintypische Handlungsweise und Entscheidungen erfolgen.

Den Einstieg in die Arbeitsphase *Inter* bildete ein erstes Cross-Review, d.h. die Präsentation und Erläuterung der bis dahin existierenden Konzepte disziplinübergreifend mit allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern des Workshops. Die eigentliche und praktische interdisziplinäre Arbeitsphase (*Inter*) kennzeichnete sich dadurch, dass für die Konzeptentwicklung in unterschiedlicher Form auf die Expertise und Ansätze der jeweils anderen Disziplin zurückgegriffen werden konnte und sollte. Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer erhielten die Möglichkeit im Rahmen der Arbeitsphase *Inter*, die Beteiligten der jeweils anderen Gruppe um vertieftes individuelles Feedback zu bitten, dieser Gruppe disziplinbezogene Fragen zu stellen oder direkt Teile der im Rahmen des ersten Cross-Reviews präsentierten Konzepte zu übernehmen und in das eigene Konzept einzuarbeiten. Den Abschluss von Arbeitsphase *Inter* stellte dann ein zweites und finales Cross-Review dar, innerhalb dessen die finalen Konzepte und (in Ansätzen) Stilproben präsentiert und erläutert wurden. Ergänzend sollte an dieser Stelle erwähnt werden, dass als Abschluss des ersten Tages, d.h. nach *Mono II*, von Experten aus den Disziplinen noch ein kurzer Input mit Informationen zu disziplintypischen Arbeitsweisen erfolgte, der ebenfalls als Grundlage für die interdisziplinäre Arbeit genutzt werden konnte.

Neben dem in Abschnitt 4 beschriebenen Ziel des Workshops und der begleitenden Studie bezogen auf eine forschungsbasierte Genese von Erkenntnissen zu disziplintypischen Merkmalen im Entwicklungsprozess interaktiver digitaler Lehr-Lernmaterialien, sollte durch die Gestaltung des Workshops auch ein Austausch über Gemeinsamkeiten und Unterschiede im Handeln, in Zielen und in der Vorgehensweise der unterschiedlichen Disziplinen bei der Entwicklung von Lehr-Lernmedien ermöglicht werden.

Die Datenerhebung im Rahmen des Workshops erfolgte durch die Sicherung der jeweiligen Entwicklungskonzepte am Ende der Phasen *Mono I*, *Mono II* und *Inter* in Form der Stilproben mitsamt Videoaufzeichnungen und Transkripten der Review-Phasen. Die Analyse der berücksichtigten Gestaltungsmerkmale wurde dann durch eine induktive Genese auf Grundlage der Transkripte sowie eine deduktive Genese, die im Rahmen einer Expertendiskussion durch die Durchführenden des Workshops durchgeführt wurde, realisiert.

Fachliche Gestaltung	
<i>FG1</i>	Vermittlung in geringer/hocher fachlicher Komplexität
<i>FG2</i>	Teilchenbild für Elektronen/Ladungsbild für Elektronenfluss
<i>FG3</i>	Darstellung der Phänomenebene/Modell-ebene
<i>FG4</i>	Fokus Realexperiment/Ergänzung um Anwendung bzw. Analogie
<i>FG5</i>	Starke Idealisierung im Sinne der Lernenden/Geringe Idealisierung im Sinne der Fachlichkeit
<i>FG6</i>	Überblicksverständnis/Detailsverständnis
Visuelle Gestaltung	
<i>VG1</i>	Entwicklung innovativer/Nutzung klassischer bildsprachlicher Elemente
<i>VG2</i>	Visuelle Vermittlung (durch Bilder)/Verbale Vermittlung (durch Worte)
<i>VG3</i>	Zeitaktuelle Darstellung/Zeitlose Darstellung
Didaktische Gestaltung	
<i>DG1</i>	Erzählerische Einbettung/Sachliche Deskription zu vermittelnder Inhalte
<i>DG2</i>	Spektakulär/Sachlich
<i>DG3</i>	Personifizierung/Objektivierung von Elementen
<i>DG4</i>	Humorvoll/Ernst
Bedienbarkeit	
<i>BE1</i>	Vorgegebene/Frei wählbare Perspektive
<i>BE2</i>	Starke Reduktion/Umfassendes Angebot experimenteller Variationsmöglichkeiten
<i>BE3</i>	Lineare Abfolge/Flexible Auswahl von Inhalten bzw. Fragestellungen
<i>BE4</i>	Prüfung vorgegebener/eigener Hypothesen
<i>BE5</i>	Passives Konsumieren/Aktives Erarbeiten

Tab.1: Induktiv und deduktiv abgeleitete Gestaltungsmerkmale im Rahmen des Workshops zur Konzeptentwicklung eines interaktiven digitalen Lehr-Lernmediums.

6. Ergebnisse und Diskussion

Die nachfolgende Beschreibung der Ergebnisse bezieht sich jeweils auf eine Analyse der Konzeptentwürfe der Phasen *Mono II*, stellvertretend für die übergeordnete Arbeitsphase *Mono*, und *Inter*. Insgesamt ließen sich achtzehn Gestaltungsmerkmale in Form von Gegensatzpaaren identifizieren, die sich den Klassen fachliche Gestaltung, visuelle Gestaltung, didaktische Gestaltung sowie Bedienbarkeit zuordnen lassen, siehe Tab. 1.

Nach der Genese dieser Gegensatzpaare erfolgte für jede teilnehmende Person eine Inhaltsanalyse der angefertigten Konzeptentwürfe. Die nachfolgende Beschreibung bezieht sich auf ausgewählte Merkmale hinsichtlich derer sich interessante Unterschiede zwischen den Gruppen oder ein Einfluss durch die interdisziplinäre Arbeit feststellen lassen, genauer auf die Merkmale *FG4*, *DGI*, *BE2* und *BE5*.

6.1. Merkmal *FG4*: Fokus Realexperiment/ Ergänzung um Anwendung bzw. Analogie

Ein erster interessanter Befund zeigt sich für Merkmal *FG4* und ist in Tab. 2 dargestellt. Vergleich man die entwickelten Konzeptentwürfe der beiden Disziplinen offenbart sich, dass die Gruppe Design sowohl nach der Arbeitsphase *Mono* als auch nach der Arbeitsphase *Inter* etwa zur Hälfte ausschließlich einen Bezug zum gegebenen Realexperiment berücksichtigt oder dieses gemeinsam mit möglichen Anwendungen einbezieht. Der Bezug zum Realexperiment wurde in der Aufgabenstellung gefordert. In der Gruppe Fachdidaktik finden Anwendungsbezüge nach der Arbeitsphase *Inter* verglichen mit der Arbeitsphase *Mono* doppelt so häufig in den Konzepten Berücksichtigung. Als mögliche Interpretation für die Steigerung der Anwendungsbezüge in der Gruppe Fachdidaktik könnte diese entweder auf die längere Zeit der Konzeptentwicklung oder aber auf die Form der berücksichtigten Anwendungsbezüge der Gruppe Design zurückgeführt werden.

	<i>Mono DE</i>	<i>Inter DE</i>	<i>Mono FD</i>	<i>Inter FD</i>
Fokus Realexperiment	55.6	44.4	62.5	25.0
Ergänzung Anwendung	44.4	55.6	37.5	75.0

Tab.2: Prozentualer Anteil der Ausprägung des Merkmals *FG4* in Konzeptentwürfen beider Gruppen (Design DE, Fachdidaktik FD) nach den Arbeitsphasen *Mono* und *Inter*.

6.2. Merkmal *DGI*: Erzählerische Einbettung/ Sachliche Deskription

Ein anderer bemerkenswerter Befund lässt sich im Bereich der didaktischen Gestaltung bei Merkmal *DGI* verorten, siehe Tab. 3. Betrachtet man die beiden beteiligten Gruppen ergeben sich hinsichtlich dieses Merkmals Unterschiede in der Frage einer erzählerischen Einbettung gegenüber einer sachlichen Deskription der zu vermittelnden Inhalte. In der Gruppe Design wird nach der Arbeitsphase *Mono* insgesamt in etwa der Hälfte der Entwürfe eine erzählerische Einbettung, die in den meisten Fällen als Ergänzung zur sachlichen Deskription erfolgt, vorgesehen. Nach Arbeitsphase *Mono* findet sich jedoch nur ein einziger Entwurf in der Gruppe Fachdidaktik, der ebenfalls eine erzählerische Einbettung beinhaltet. Alle anderen Konzepte weisen eine rein sachliche Deskription auf. Dies kehrt sich durch die Arbeitsphase *Inter* um, da unter den finalen Konzeptentwürfen nur

ein einziger in der Gruppe Fachdidaktik auf eine entsprechende erzählerische Einbettung verzichtet.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Austausch über die Konzepte und die interdisziplinäre Arbeitsphase in der Gruppe Fachdidaktik ein Bewusstsein für die Sinnhaftigkeit einer erzählerischen Einbettung erzeugt haben und die Teilnehmerinnen und Teilnehmer darüber hinaus zur Veränderung der bereits existierenden Konzepte bewegt wurden.

Mit Bezug zu Merkmal *DGI* finden sich auch weiterführende qualitative Belege. So begründen Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus der Gruppe Design die erzählerische Einbettung dadurch, dass so „emotionale Relevanz für das Thema“ aufgebaut wird und sie beurteilen ein spezifisches Konzept in einer Aussage wie folgt: „Super fand ich die Idee [...] mit dem personalisierten Magnet und den Elektronen.“

	<i>Mono DE</i>	<i>Inter DE</i>	<i>Mono FD</i>	<i>Inter FD</i>
Erzählerische Einbettung	22.2	22.2	12.5	12.5
Sachliche Deskription	44.4	22.2	87.5	12.5
Beides	33.3	55.6	0.0	75.0

Tab.3: Prozentualer Anteil der Ausprägung des Merkmals *DGI* in Konzeptentwürfen beider Gruppen (Design DE, Fachdidaktik FD) nach den Arbeitsphasen *Mono* und *Inter*.

Die letztgenannte Äußerung bezieht sich auf die in Abb. 2 dargestellte Stilprobe, die ein Konzept verfolgt, dass die Erklärung über personenbezogene Eigenschaften des Magneten und der Elektronen führt. Die Entscheidung das eigene Konzept zu überarbeiten und Elemente der Gruppe Design zu übernehmen drückt sich durch eine exemplarische Äußerung der Gruppe Fachdidaktik wie folgt aus: „Was ich bei den den anderen schön fand, aber da liegt nicht meiner Stärke, wäre ein narrativer Ansatz. Das habe ich selbst nicht gut hinbekommen, aber ich halte es für eine tolle Idee so eine Rahmenstory einzubauen.“

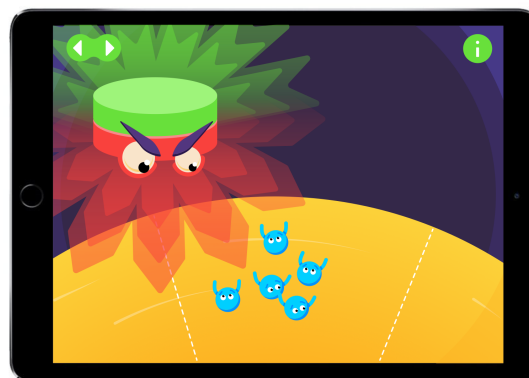


Abb.2: Stilprobe exemplarischer Entwurf Gruppe Design mit personalisiertem Magnet und Elektronen.

6.3. Merkmale *BE2* bzw. *BE5*: Starke Reduktion/Umfassendes Angebot experimenteller Variationen bzw. Passives Konsumieren/Aktives Erarbeiten

Ein dritter interessanter Befund bezieht sich auf die Merkmale *BE2* und *BE5*, siehe Tab. 4 und 5, und ist der Bedienbarkeit der Konzepte zuzuordnen.

	<i>Mono DE</i>	<i>Inter DE</i>	<i>Mono FD</i>	<i>Inter FD</i>
Starke Reduktion Variationen	11.1	0.0	62.5	50.0
Umfassendes Angebot Variationen	77.8	88.9	37.5	37.5
Beides	11.1	11.1	0.0	12.5

Tab.4: Prozentualer Anteil der Ausprägung des Merkmals *BE2* in Konzeptentwürfen beider Gruppen (Design DE, Fachdidaktik FD) nach den Arbeitsphasen *Mono* und *Inter*.

Betrachtet man die Auswertung hinsichtlich *BE2*, siehe Tab. 4, zeigt sich sowohl für die Arbeitsphase *Mono* als auch für die Arbeitsphase *Inter* ein Unterschied bezogen auf den Umfang des Angebotes so genannter experimenteller Variationsmöglichkeiten zwischen den Gruppen. Es ist festzustellen, dass die Gruppe Fachdidaktik in den Konzepten dabei restriktiver mit der Anzahl angebotener Variationsmöglichkeiten umgeht. Dieser Eindruck wird durch die Befunde zu *BE5* gestärkt, siehe Tab. 5. Diese deuten an, dass aktives Erarbeiten durch die Nutzerin oder den Nutzer in der Gruppe Design fast in allen Konzepten vorausgesetzt wird. In der Gruppe Fachdidaktik existiert dieser Aspekt ebenfalls, aber wird in stärkerem Umfang durch Elemente begleitet, die ein passives Konsumieren erfordern.

	<i>Mono DE</i>	<i>Inter DE</i>	<i>Mono FD</i>	<i>Inter FD</i>
Passives Konsumieren	11.1	0.0	37.5	12.5
Aktives Erarbeiten	88.9	88.9	62.5	25.0
Beides	0.0	11.1	0.0	62.5

Tab.5: Prozentualer Anteil der Ausprägung des Merkmals *BE5* in Konzeptentwürfen beider Gruppen (Design DE, Fachdidaktik FD) nach den Arbeitsphasen *Mono* und *Inter*.

Eine tiefergehende Analyse deutet daraufhin, dass der stärkere Bezug zur Implementation der Konzepte im schulischen Unterricht sowie tiefergehende fachliche Erklärungen den höheren Anteil von Elementen mit geringerer Interaktivität in der Gruppe der Fachdidaktik begründen könnten. Ebenfalls lässt sich ein Einfluss durch den Vergleich von realem und virtuellem Experimentieren vermuten, der vor allem in der Gruppe Fachdidaktik bekannt sein und diese bei Entscheidungen hinsichtlich der Interaktivität beeinflusst

haben könnte. Ein weiterer Erklärungsansatz bezieht sich auf die bei den entwickelnden Personen zugrundeliegenden Vorstellungen der (Lehr-)Lernsituation. Während die schulische Lehrpraxis aufgrund einer gewissen Linearität hinsichtlich der Erfüllung von Lernzielen bzw. Teil-Lernzielen eine Reduktion der Interaktivität erforderlich oder wünschenswert macht, erscheint aus Perspektive der Gruppe Design u.a. die Nutzung als Computerspiel möglich, die jedoch keine Begrenzung an Interaktivität aufgrund fehlender zeitlicher Vorgaben erfordert.

7. Fazit und Ausblick

Betrachtet man den durchgeführten Workshop und die im Rahmen dessen durchgeführte Studie vor dem Hintergrund der gegebenen Fragestellungen ist eine differenzierte Beurteilung notwendig.

Mit Blick auf die Teilnehmerinnen und Teilnehmer deuten die Rückmeldungen darauf hin, dass die gemeinsame Arbeit an Konzepten zu interaktiven digitalen Lehr-Lernmedien und der Austausch unterschiedlicher Disziplin als fruchtbar und anregend wahrgenommen wurde. Es konnten spannende Konversationen zwischen den Disziplinen aber auch innerhalb dieser beobachtet werden.

Hinsichtlich der Studie ist der Workshop als hilfreiche Pilotierungsphase zur Durchführung einer ausführlicheren Studie anzusehen. Die Daten der Pilotierung ermöglichen jedoch neben der Überarbeitung des Studiendesigns bzw. des Workshops auch durchaus eine weiterführende Arbeit auf Grundlage der erhobenen Daten, da diese umfangreiche Informationen zu Konzepten eines interaktiven digitalen Lehr-Lernmediums mit Erläuterungen von N= 9 bzw. N= 8 Expertinnen und Experten der Disziplinen Design und Fachdidaktik Physik beinhalten.

Bei einer wiederholten Durchführung der Studie wäre beispielsweise eine ausführlichere interdisziplinäre Arbeitsphase oder eine transdisziplinäre Arbeitsweise als Prinzip integrativer (Entwicklungs-)Forschung wünschenswert. Alternativ könnte für einen validen Vergleich angestrebt werden, in einer dritten Gruppe von Beginn an interdisziplinär in Kleingruppen an Konzepten zu arbeiten. Im durchgeführten Workshop musste aufgrund der engen Zeitplanung letztlich in vielen Fällen auf die in der Aufgabenstellung geforderten Stilproben verzichtet werden. Hier wäre bei einer erneuten Durchführung mehr Zeit für die einzelnen Arbeitsphasen wünschenswert, sodass für die Konzepte sowohl Storyboards als auch Stilproben zur Beurteilung herangezogen werden könnten.

Hinsichtlich der Durchführung weiterführender empirischer Untersuchungen deuten die Ergebnisse darauf hin, dass insbesondere für das Element der erzählerischen Einbettung, das Bezüge zum im Bereich der Fachdidaktik bekannten Ansatz des Storytellings aufweist [28], und bezüglich Usability und

Interaktionsmöglichkeiten, insbesondere in Bezug zum Realexperiment, genauere Analysen wünschenswert wären.

8. Anmerkungen

Die Durchführung des Workshops und der begleitenden Studie zur interdisziplinären Konzeptentwicklung interaktiver digitaler Lehr-Lernmedien durch Fachdidaktik und Design erfolgt in Kooperation mit der *Deutsche Telekom Stiftung* im Rahmen der Förderung des Projekts *Real:Digital – Die Integration zweier Welten*.



Abb.3: Logo des Projekts *Real:Digital – Die Integration zweier Welten*.

9. Literatur

- [1] Hanekamp, G. (2014): *Zahlen und Fakten: Al-lensbach-Studie 2013 der Deutsche Telekom Stiftung*. In J. Maxton-Küchenmeister & J. Meßinger-Koppelt (Hrsg.): *Digitalen Medien im naturwissenschaftlichen Unterricht* (S. 21-28). Hamburg: Joachim Herz Stiftung Verlag.
- [2] Herzig, B. (2014). *Wie wirksam sind digitale Medien im Unterricht?* Gütersloh: Bertelsmann Stiftung.
- [3] Jonassen, D. H., Campbell, J. P. & Davidson, M. E. (1994): *Learning with media: Restructuring the debate*. In: *Educational Technology Research and Development* 42, 2, 31-39.
- [4] Kerres, M. (2003): *Wirkungen und Wirksamkeit neuer Medien in der Bildung*. In R. Keil-Slawik & M. Kerres (Hrsg.): *Wirkungen und Wirksamkeit neuer Medien in der Bildung* (S. 31-44). Münster: Waxmann.
- [5] Laumann, D. (2017): *Integrativer Einsatz realer und interaktiver digitaler Repräsentationen in der Physik*. In: *PhyDid B – Beiträge zur Frühjahrstagung*, Dresden.
- [6] Design-Based Research Collection (2003): *Design-Based Research: An Emerging Paradigm for Educational Inquiry*. In: *Educational Researcher* 32, 1, 5-8.
- [7] Collins, A., Joseph, D. & Bielaczyc, K. (2004): *Design Research: Theoretical and Methodological Issues*. In: *The Journal of the Learning Sciences* 13, 1, 15-42.
- [8] Reinmann, G. (2005): *Innovation ohne Forschung? Ein Plädoyer für den Design-Based Research-Ansatz in der Lehr-Lernforschung*. In: *Unterrichtswissenschaft* 33, 1, 52-69.
- [9] Laumann, D. (2018): *Integrativer Einsatz realer und interaktiver digitaler Repräsentationen in der Physik*. In M. Schuhen & M. Froitzheim (Hrsg.): *Das Elektronische Schulbuch 2017*. Fachdidaktische Anforderungen und Ideen treffen auf Lösungsvorschläge der Informatik (S. 41-54). Münster: LIT Verlag.
- [10] Laumann, D. & Wichtrup, P. (2018): *Es schwingt und klingt – Interaktive Webanwendung zur Akustik*. In J. Maxton-Küchenmeister & J. Meßinger-Koppelt (Hrsg.): *Naturwissenschaften digital: Toolbox für den Unterricht* (S. 52-55). Hamburg: Joachim Herz Stiftung Verlag.
- [11] Vogelsang, C., Laumann, D., Thyssen, C. & Finger, A. (2018): *Der Einsatz digitaler Medien im Unterricht als Teil der Lehrerbildung – Analysen aus der Evaluation der Lehrinitiative Kolleg Didaktik: digital*. In C. Maurer (Hrsg.): *Qualitätsvoller Chemie- und Physikunterricht – normative und empirische Dimensionen*. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Jahrestagung in Regensburg 2017. Universität Regensburg.
- [12] Mayer, R. E. (2009): *Multimedia Learning*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [13] Paivio, A. (1986): *Mental Representations – A Dual Coding Approach*. New York, NY: Oxford University Press.
- [14] Sweller, J. (2005): *Implications of cognitive load theory for multimedia learning*. In R. E. Mayer (ed.): *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (pp. 19-30). New York, NY: Cambridge University Press.
- [15] Lindow, S., Fuchs, H. M., Fürstenberg, A., Kleber, J., Schweppe, J. & Rummer, R. (2011): *On the Robustness of the Modality Effect: Attempting to Replicate a Basic Finding*. In: *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie* 25, 4, 231-243.
- [16] Schüler, A., Scheiter, K. & Gerjets, P. (2011): *Does the Modality Effect in Multimedia Learning Appear only with Text Containing Spatial Information?* In: *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie* 25, 4, 245-256.
- [17] Schüler, A., Scheiter, K. & Gerjets, P. (2012): *Verbal descriptions of spatial information can interfere with picture processing*. In: *Psychology Press* 20, 7, 682-699.
- [18] Scheiter, K., Gerjets, P., Huk, T., Imhof, B. & Kammerer, Y. (2009): *The effects of realism in learning with dynamic visualizations*. In: *Learning and Instruction* 19, 6, 481-494.
- [19] Imhof, B., Scheiter, K. & Gerjets, P. (2011): *Learning about locomotion patterns from visualizations: Effects of presentation format and realism*. In: *Computers & Education* 57, 3, 1961-1970.
- [20] Couture, M. (2004): *Realism in the design process and credibility of a simulation-based virtual laboratory*. In: *Journal of Computer Assisted Learning* 20, 1, 40-49.
- [21] Höffler, N. T. & Leutner, D. (2007): *Instructional Animation Versus Static Pictures: A*

- Meta-Analysis*. In: Learning and Instruction 17, 6, 722-738.
- [22] Karapanos, M., Becker, C. & Christophel, E. (2018): *Die Bedeutung der Usability für das Lernen mit digitalen Medien*. In: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung, 36-57.
- [23] Smetana, L. K. & Bell, R. K. (2012): *Computer Simulations to Support Science Instruction and Learning: A critical review of the literature*. In: International Journal of Science Education 34, 9, 1337-1370.
- [24] Interaktive Simulationen der Stiftung CK-12: <https://www.ck12.org/> (Stand: 5/2018).
- [25] Interaktive Simulationen der University of Colorado at Boulder (PhET): <https://phet.colorado.edu/de/simulations/> (Stand 5/2018).
- [26] Interaktive Simulationen des Physiklehrers Matthias Borchardt: <http://www.mabo-physik.de/> (Stand 5/2018).
- [27] Interaktive Simulationen des Instituts für Didaktik der Physik der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster: <http://physikkommunizieren.de/realdigital/> (Stand 5/2018).
- [28] Heering, P. (2016): *Geschichten erzählen im naturwissenschaftlichen Unterricht*. In: MNU Journal 69, 3, 171-176

Effiziente Produktion von Lernvideos

Vorstellung einer erfolgreichen Strategie zur Entwicklung und Produktion effektiver audiovisueller Lernmaterialien für das Physikpraktikum

Silas Oppermann, Clemens Nagel

Universität Wien

silas.oppermann@gmail.com, clemens.nagel@univie.ac.at

Kurzfassung

Dieser Beitrag soll einen Einblick in eine erfolgreiche Strategie zur Entwicklung von audiovisuellen Lerninhalten für die universitäre Physiklehre geben. Dies geschieht anhand des Beispiels eines für das physikalische Anfängerpraktikum der Fakultät für Physik der Universität Wien durchgeführten Diplomprojektes bei dem 4 Videos entwickelt, produziert und deren Einsatz evaluiert wurde.

1. Einleitung

Viele Publikationen vergangener Jahre haben sich mit den Potentialen und potentiellen Anwendungen multimedialer Inhalte und Applikationen in verschiedensten Lehr-, und Lernsituationen beschäftigt. Der Grad der Detailtiefe und theoretischen Fundierung, mit der diese Potentiale erklärt werden, variiert stark und ist mancherorts eher allgemein gehalten. Insbesondere über den tatsächlichen Entwicklungsprozess wird eher wenig geschrieben. Das Problem dabei ist, dass mit der Komplexität einer multimedialen Anwendung auch die erforderlichen Anwendungsfähigkeiten und -fertigkeiten wachsen. Dies betrifft sowohl den „kreativen“ Teil (Konzeption, Projektentwicklung, Visualisierung, Kommunikation) des Entwicklungsprozesses als auch den „handwerklichen“ (Programmieren, Filmen, Schneiden, Bildbearbeitung, Animation). Hinzu kommen die Anforderungen an das Fachwissen in Bezug auf Lern-, und Medienpsychologische Theorien und deren Anwendung auf ein konkretes Projekt. Lehrende sehen sich also häufig damit konfrontiert, dass die Anforderungen zur Umsetzung eines Entwicklungsprojektes im Bereich Multimedia die eigenen Fertigkeiten gegebenenfalls in einem oder mehreren Teilaspekten überschreiten und fühlen sich dadurch überfordert oder haben das Gefühl, dass der nötige Fortbildungsaufwand die potentiellen Besserungen nicht rechtfertigen würde. Und während es viele Publikationen über Lern-, und Medienpsychologische Effekte gibt sind Veröffentlichungen welche konkrete Modelle zur Entwicklung eigener Inhalte vorstellen eher selten. Ebendies soll im vorliegenden Artikel erreicht werden. Anhand eines konkreten Beispiels wird Schritt für Schritt ein Modell zur effizienten Entwicklung audiovisueller Lernmaterialien (Videos) vorgestellt welches sich auf andere Bereiche übertragen lässt. Dadurch soll die Hemmschwelle zur Initiation eines eigenen Projektes für andere Praktiker herabgesetzt werden in der Hoffnung in der Zukunft viele

neue Erkenntnisse in diesem Bereich der Physikdidaktik erreichen zu können.

2. Bedarfserhebung und Ziele

Die Entwicklung jeglicher neuer multimedialer Inhalte, wie Apps, Programme, Videos etc. ist auch im kleinen Rahmen immer mit einem, gegenüber konventionellen Medien, erheblichem Aufwand verbunden. Deshalb sollte vor einem Projekt klar definiert werden was die Zielvorstellung ist um anschließend bestimmen zu können ob und wenn ja auf welche Art diese Ziele mit neuen Medien besser erreicht werden können als mit bereits bestehenden Mitteln. Die Bedarfserhebung für ein Entwicklungsprojekt sollte darauf ausgerichtet sein eine möglichst effiziente und effektive Durchführung zu ermöglichen. Sind die Ziele wohldefiniert, gilt es die Lernumgebung dahingehend zu analysieren, welche Aspekte sich durch die Verwendung neuer Medien ergänzen oder verbessern ließen und worin bisher die Schwierigkeiten lagen.

Im eingangs erwähnten Beispielprojekt wurde die Zielvorstellung definiert die Vorbereitung von Studierenden auf das physikalische Anfängerpraktikum zu verbessern um den Lernerfolg zu erhöhen, in dem die eigenständige Vorbereitung der Studierenden auf die Experimente verbessert wird bzw. die Selbstständigkeit der Studierenden bei der Bedienung komplexerer Geräte erhöht wird. Die anschließende Bedarfserhebung erfolgte einerseits durch die Analyse anderer Arbeiten im Bereich neuer Medien ([1][2][3][4][5][6][7][8]), insbesondere in Anfängerpraktika, und andererseits durch leitfadengestützte episodische Experteninterviews ([9]). Dabei wurden Betreuungspersonen des Anfängerpraktikums mit langjähriger Erfahrung befragt in welchen Bereichen des Praktikums in der Vergangenheit vermehrt Probleme aufgetreten sind und welcher Natur diese Probleme waren. Die Analyse der Arbeiten ergab, dass vielerorts Verweise auf Potentiale audio-

visueller Lernmaterialien deren Wirkung allerdings wenig erforscht wurde. Dies war mit Grund dafür, dass in dem Beispielprojekt explizit nur die Effekte von Lernvideos untersucht wurde. Diese wurden daraufhin in eine, zuvor bereits Entwickelte und bewährte digitale Online Lernumgebung integriert ([10]). Das Ergebnis der Interviews waren Audio-Gesprächsaufzeichnungen und handschriftliche – Interviewer-Notizen aus denen mittels interpretativ-reduktiver Inhaltsanalyse Themenblöcke zusammengefasst wurden, welche von mehreren Personen angesprochen wurden. Aus diesen Themenblöcken wurden in einer Besprechung mit der Praktikumsleitung jene Themen ausgewählt, welche nach intensiver und detailreicher Gespräche in kleiner Expertenrunde am vielversprechendsten bzw. effektivsten empfunden wurden. Da dieser Projektschritt in den Sommerferien erfolgte, konnten aus organisatorischen und zeitlichen Gründen leider keine Studierenden in die Bedarfserhebung eingebunden werden. Im kleinen Ausmaß wurde diese Rolle durch den Studienautor, welcher selbst als Studierender die Praktika besucht hatte, erfüllt. Nach Möglichkeit sollte aber die Lernenden-Perspektive ebenfalls in den Erhebungsprozess eingebunden werden um alle Seiten des fachdidaktischen Triplets der didaktischen Rekonstruktion ([11]) zu beleuchten und genauer feststellen zu können, welche Aspekte eines Inhalts zu den Schwierigkeiten führen. Um gegebenenfalls noch bestehende Unklarheiten oder Widersprüche in der Beschreibung von Lehrenden und Lernenden zu beseitigen, kann an die erste Erhebung auch Gruppendiskussion ([12]) mit beiden Parteien stattfinden bei dem dann allerdings nur mehr ein verkleinerter Themenpool besprochen wird welcher in den Vorerhebungen beider Gruppen Nennungen fand.

Als Modell wird hier eines der im Beispielprojekt entwickelten Videos zum PN-Übergang vorgestellt:

Thema: PN-Übergang

Hauptproblem: Studierende haben keine oder falsche Vorstellungen über die Vorgänge zur Ausbildung des pn-Überganges oder seine Verwendung in Sperr- oder Durchlassrichtung. Falsche Vorstellungen hierzu existieren trotz einer sehr gut elementarisierten und konzise strukturierten Erklärung im Anleitungstext. Daher ergibt sich die Hypothese, dass kein geeignetes Konzept zu Diffusion im Allgemeinen vorhanden ist.

Lernzielanforderung an das Medium und Grobinhalte:

- a) Die Studierenden haben Kenntnisse über den Aufbau und die Dotierung einer Halbleiterdiode

- b) Die Studierenden wissen was eine Sperrschicht in einer Diode ist und warum sie sich bildet und können dies richtig beschreiben
- c) Studierende können Diffusionsvorgänge mit andern Beispielen in Verbindung bringen und das Grundprinzip der Diffusion auf Elektronen in Festkörpern übertragen
- d) Studierende wissen, dass die Ursache von Diffusion in einer Diode die stochastische Natur ungeordneter Teilchenbewegung und nicht ein Potentialunterschied ist
- e) Studierende wissen was ein chemischen Potential ist und können dieses von einem Elektrischen unterscheiden
- f) Studierende verstehen warum das Lochmodell einem Halbleiterkristall wie ein positiver Ladungsträger gesehen werden kann
- g) Studierende Wissen wo in der Diode ein Potentialunterschied entsteht und warum
- h) Studierende wissen welche Funktion eine Diode als Bauteil in einem Schaltkreis hat und was in einer Diode bei Schaltung in Sperr-, und Durchlassrichtung geschieht

Sind so die Themen bzw. Grobinhalte der Videos sowie die Lernziele konkretisiert worden geht es an den nächsten Schritt der Umsetzung: der Projektplanung und Konzipierung der Videos.

Zusammenfassend hat sich folgende Vorgehensweise im Entwicklungsprozess bewährt:

1. Leitfadengestützte episodische Interviews mit Lehrpersonen (und Studierenden).
2. Erstellen einer Themenmatrix aus den Interviewaufzeichnungen
3. Analyse der Inhalte und Wahl eines geeigneten Mediums (hier Video)
4. Gegebenenfalls 2. Erhebungsschritt IN der Gruppendiskussion
5. Konkretisierung der Lernziele und der Grobinhalte

3. Projektentwurf, Zeitplanung

Um die Produktion möglichst effizient zu gestalten, ist es sinnvoll einem vorher festgelegten Projektplan zu folgen. Für die Produktion von Videos sollte ein solcher folgende Elemente beinhalten:

1. Konzeption der Videos (Detailinhalte, Drehbuch, Storyboard, Feststellung der nötigen Materialien, ggf. Machbarkeitsanalyse - „proof of concept“)

2. Erstellung eines Dreh-, und Personalplans (Orte, Zeiten, Personen, Aufgabenaufteilung, Material, ggf. Probeaufnahmen)
3. Durchführung der Aufnahmen
4. Schnitt (ggf. Animation)

Leider lässt sich über die jeweiligen Anteile der einzelnen Schritte am Gesamtaufwand des Projektes wenig Allgemeines sagen, außer, dass es in der Regel immer mehr ist als eingeschätzt wird. Insbesondere wieviel Zeit auf welche Arbeitsschritte entfällt variiert von Projekt zu Projekt erheblich und hängt von den spezifischen Anforderungen und den Anwen-derfähigkeiten ab. Im hier Beispielhaft angeführten Projekt betrug der Arbeitsaufwand pro Video Minute zwischen 10 und 20 Stunden. Dabei verfügte der ausführende Produzent zu Beginn nur über grundlegende Kenntnisse in der Videoproduktion.

Der Projektplan sollte jedenfalls jeden der oben genannten Punkte mit zugehörigen Deadlines und gegebenenfalls „check-in dates“ zur Begutachtung der Zwischenresultate beinhalten. Im Beispielprojekt gab es Zwischenbesprechungen mit der Praktikumsleitung jeweils nach der Erstellung der Drehbücher und der Storyboards sowie an einigen kritischen Punkten während der Videoproduktion zur Qualitätsüberprüfung. Punkt 1 und 2 können dabei parallel entstehen, was besonders dann wichtig ist, wenn die Produktion unter Einbindung mehrerer Parteien durchgeführt wird. In diesem, Projekt war nur der Diplomand selbst an den Produktionsschritten nach der Erstellung der Storyboards beteiligt weshalb der Organisationsaufwand diesbezüglich bescheiden war. Der sowohl Drehplan als auch der Schnitt orientierten sich dabei stark am Storyboard welches sich dadurch in Mehrfacher Hinsicht als essentiell für die effiziente Durchführung erwies. Jeder der Unterpunkte wird aber in Kapitel 5 und 6 genauer beschreiben.

4. Lernpsychologische Grundlagen

Es gibt viele gut dokumentierte Untersuchungen über die verschiedenen Effekte, welche audiovisuelle Lernmaterialien auf die *learning-outcomes* haben und unter welchen Bedingungen diese Effekte beobachtbar sind. Als ein wichtiges Standardwerk, nicht nur für Videos, sei das „*Cambridge Handbook of Multimedia Learning*“ [13] genannt aus dem ein Großteil der Publikationen stammen deren Bedeutung für die Produktion effektiver Lernvideos im Folgenden knapp zusammengefasst werden. Für eine ausführlichere Beschreibung dieser Effekte in Bezug auf Lernvideos siehe ([14])

Double Encoding Theory nach Paivio ([15]): Das Gedächtnis verfügt über zwei voneinander unabhängige Speichersysteme, ein verbalbedeutungsmäßiges und ein Bildhaftes.

Working Memory Theory nach Baddeley ([16]): Diesen beiden Speichersystemen sind auch eigene Instanzen im Arbeitsgedächtnis zugeordnet. Das Arbeitsgedächtnis hat die Aufgabe Sinneseindrücke als Information aufzunehmen, mit dem Langzeitgedächtnis zu vergleichen und sie in dieses zu integrieren. Jegliche Manipulation von Information ist nur im Arbeitsgedächtnis möglich. Jede Instanz des Arbeitsgedächtnisses kann dabei nur 3-7 Elemente gleichzeitig verarbeiten und diese nur für sehr kurze Zeit behalten bevor sie ins Langzeitgedächtnis integriert (wenn dies möglich ist) oder vergessen werden. Welche Informationen als ein Element gesehen werden können hängt vom Vorwissen des Individuums ab.

Modality Principle nach Low & Sweller ([17]): Bei Lerninhalten hoher innerer Komplexität (viele miteinander zusammenhängende Elemente), welche allerdings von dem individuellen Vorwissen des Lernenden abhängt, wird ein höherer Lernerfolg erzielt wenn die Informationen auf die zwei Sinneskanäle Sehen und Hören aufgeteilt wird. Es ist also dort wo verbale Information zusätzlich zu bildlicher Information notwendig ist besser diese Information als Audiospur darzubieten.

Split Attention Principle nach Ayres & Sweller ([18]): Alle zu einem Lernobjekt zugehörigen Informationen welche nur gemeinsam das Verstehen ermöglichen, sollten räumlich und zeitlich nahe zueinander dargeboten werden.

Redundancy Principle nach Kalyuga & Sweller ([19]): Es sollte zu keinem Zeitpunkt eine Information auf zwei Arten gleichzeitig dargeboten werden (z.B. einen Text gleichzeitig zu lesen und vorgelesen bekommen) es sei denn es ist das Lernziel genau diese beiden Darstellungsformen miteinander zu verbinden (z.B. lernen wie ein Wort klingt). Des Weiteren sollten überall dort wo es möglich ist nur Informationen dargeboten werden welche für das gegenwärtig behandelte Lernobjekt von unmittelbarer Bedeutung sind. Dekorative oder minder relevante hervorstechende Elemente sind zu entfernen.

Expertise Reversal Principle nach Kalyuga ([20]): Das Design von Lernmaterialien für Anfänger unterscheidet sich von dem für Experten. Dies lässt sich unter anderem dadurch erklären, dass viele der Informationen für Anfänger für Experten redundant sind. Ein und dasselbe Lernvideo ist also in aller Regel nicht für verschiedene Vorwissensstände bei Lernenden geeignet und sollte inhaltlich genau so anspruchsvoll sein wie es den Lernenden zuzumuten ist ohne sie zu überfordern oder unterfordern, da beides negative Lerneffekte erzeugt.

Signaling Principle nach Van Gog ([21]): Lässt es sich nicht vermeiden oder ist es aus narrativen Gründen sinnvoll mehrere nicht unmittelbar relevanten visuellen Informationen gleichzeitig zu zeigen so

sollten die momentan relevanten durch visuelle Signale hervorgehoben oder die nicht relevanten durch verblässen in den Hintergrund treten.

5. Präproduktion und Kommunikation

Die Präproduktionsphase umfasst Punkt 1 und 2 des Projektplans. Als erstes sollten gemäß den in Kapitel 4 genannten Prinzipien und der in der Bedarfserhebung festgelegten Ziele und Grobinhalte die Detailinhalte erarbeitet werden. Das bedeutet im Kontext der Videoproduktion es müssen ein Drehbuch und ein Storyboard erstellt werden.

Das Drehbuch sollte auf jeden Fall alle Texte beinhalten, welche im Video als Audiospur zu hören sein werden ([22] [23]). Aber auch konkrete Erklärungen und Hinweise auf die zugehörigen Visualisierungen wie z.B. die Bildeinstellung, die wichtigsten Elemente, Übergänge und Geschehnisse während einer Einstellung sollten darin vermerkt sein. Insbesondere dort wo das Drehbuch von einer anderen Person erstellt wird, als derjenigen welche die Aufnahmen macht, ist es meistens unerlässlich, zusätzlich ein Storyboard anzufertigen. In einem Storyboard werden nach Szenen oder Einstellungen getrennt die Aufnahmen skizzenhaft dargestellt ([22] [23]). Im Beispielprojekt wurde zunächst nur der „Sprechtext“ verfasst um einen Eindruck dafür zu verschaffen welche Audioinformation im Endprodukt enthalten sein soll. Das Format der Videos war hier allerdings so, dass sich die Narration an gewissen Stellen direkt auf das gezeigt bezieht (z.B. „Hier sehen Sie...“). Nachdem die Audioinhalte also mit der Praktikumsleitung abgestimmt waren wurde als nächster Schritt für jedes der Videos ein Storyboard entwickelt. Für ein Storyboard eignen sich je nach Projekt verschiedene Formate. Das Storyboard kann entweder auf Szenenmarker im Drehbuch verweisen und nur chronologisch geordnete skizzenhafte Darstellungen der Szenen beinhalten oder wie es im Beispielprojekt getan wurde in integrierter Form erstellt werden.

Ein Beispiel dafür ist in **Abb. 1** zu sehen. Dabei ist der Sprechtext immer rechts und die Regieinformation links zu angeführt. Dieses Format eignet sich auch hervorragend für Präsentationen und Besprechungen weil unmittelbar ersichtlich ist welcher Text zu welcher Einstellung zu hören sein wird und was in der Einstellung passiert. Dies erspart aufwendiges hin und her blättern in verschiedenen Dokumenten und dient zugleich als übersichtliches Gerüst für die Durchführung des Drehs. Derartige Zwischenbesprechungen waren im Beispielprojekt, ein essentieller Bestandteil der effektiven Kommunikation in der Präproduktion. So sind die Lehrenden in Expertenbesprechungen frühzeitig in die Gestaltung des Videos eingebunden und erhalten eine klare Vorstellung davon, wie das Endprodukt aussehen soll. So können wertvolle Tipps eingebaut und Leerläufe oder Sackgassen in der aufwendigen Produktion vermieden werden. So wurden zum Beispiel einige Passagen welche zunächst im Drehbuch als sinnvoll erschienen gestrichen und andere weiter ausgebaut. Passieren solche Änderungen erst nach erfolgtem Dreh werden wertvolle Arbeitszeit und Ressourcen unnötig verschwendet. Der Detailgrad der Aufschlüsselung der Szenen ist wiederum vom Projekt, konkret von der Komplexität der Abläufe in einer Szene und von den bei der Produktion involvierten Personen abhängig. In dem unten angeführten Beispiel ist die Aufschlüsselung eher grob. Zum einen da „fehlende“ Informationen vom Autor in der Besprechung ad hoc ergänzt wurden zum anderen weil der Autor auch gleichzeitig das gesamte Produktionsteam darstellte. Der in **Abb. 1 – 3** dargestellte Storyboardausschnitt ist der Erreichung der in Kapitel 2 genannten Lernziele b), c), d), g) und h) gewidmet. Die Zahl der gleichzeitig sichtbaren Elemente wurde im Laufe des Videos sukzessive erhöht wobei zunächst nur wenige Elemente zu sehen sind und diese beschrieben werden bevor sie in anderen Kontexten verwendet werden. Daher wurde „*cu-eing*“ durch hervortreten bzw. verblässen von

<p style="text-align: center;">SKIZZE</p> <p>Gleichungen werden über Grenzschicht eingeblendet; Elektronen bewegen sich zu P-Halbleiter, gleichzeitig erscheinen Plus und Minus über Grenzschicht und Gleichungen werden zu Ungleichungen</p>		<p>Im Falle der Halbleiterdioden besteht wie gesagt ein Konzentrationsunterschied an <u>Leitungselektronen</u> pro Stoffmenge. Daher diffundieren die Leitungselektronen des n-dotierten Halbleiters durch die Grenzschicht in den p-dotierten Halbleiter. Dort rekombinieren sie mit den Löchern hinter der Grenzschicht. Die Halbleiter welche vorher neutral geladen waren weil sie, alle Atome zusammen gesehen, gleichviele Protonen wie Elektronen hatten, werden dadurch dort, wo die Elektronen wegdiffundierten positiv, und dort wo sie hin diffundieren negativ geladen.</p>
--	--	---

Abb. 1: Ausschnitt aus dem Storyboard für das Video PN-Übergang, Diffusion von Elektronen/Löchern

Elementen hier besonders stark verwendet um trotz der hohen visuellen Anforderung die Verarbeitung aller relevanten Elemente zu ermöglichen. In **Abb. 1** wird das zuvor im Video anhand eines Konzentrationsunterschiedes zwischen zwei Flüssigkeiten eingeführte Prinzip der Diffusion wieder aufgegriffen und grafisch gezeigt wie die Elektronen und Löcher durch zufällige Teilchenbewegung zu den jeweiligen Gegenständen gelangen und weshalb dadurch an der Grenzschicht ein Ladungsunterschied entsteht (siehe Lernziel b), c), d), g)). In der Szene von **Abb. 2** Wird hervorgehoben, dass nun im Gegensatz zu

vorher eine Spannung entlang der Grenzschicht besteht. Die Befragung der Praktikumsleitung zu diesem Thema ergab nämlich, dass Studierende oft glauben die Diffusion würde durch diese, wegen der unterschiedlichen Konzentration an Löchern und Elektronen in der N-, und P-Schicht bereits vorher bestehende, Spannung verursacht werden. Der Begriff „Sperrschicht“ wird erst in Zusammenhang mit der Diode als Leitungselement erwähnt. Hier wird nur auf die isolierende Funktion der Grenzschicht eingegangen (siehe Lernziel d) und g)).

<p>SKIZZE</p> <p>Bei As und Ga sind in Grenzschicht + und – eingeblendet worden</p> <p>Über Grenzschicht entsteht Pfeil und Spannungszeichen</p> <p>Unterhalb werden am Anfang Gleichungen eingeblendet</p> <p>Elektron bewegt sich durch Grenzschicht, U und Pfeil vergrößern sich Nettokraft wird gezeigt</p> <p>Elektron bewegt sich zurück</p>		<p>Der Rest der Diode ist nach wie vor neutral/ungeladen. Da die diffundierenden Teilchen in diesem Fall aber eine Ladung tragen entsteht dadurch, wie man sehen kann, ein Ladungsunterschied an der Grenzschicht welcher eine elektrische Spannung erzeugt. Diese Spannung ist im Gleichgewicht genau so groß, dass die daraus resultierende Coulombkräfte die Diffusionsdrücke welchen sie entgegengerichtet sind gerade kompensiert. Würde ein weiteres Elektron durch ungerichtete thermische Bewegung von der n-Schichte in die p-Schichte diffundieren, wird dafür ein anderes auf Grund der elektrischen Spannung in die n-Schichte zurück beschleunigt. Das Gleichgewicht bleibt somit stabil. In dieser Grenzschicht befinden sich nun alle Leitungselektronen in schwachen Bindungen mit den Löchern, sind daher nicht frei beweglich und können daher keinen Strom leiten. Die Grenzschicht wirkt also isolierend.</p>
---	--	---

Abb. 2: Ausschnitt aus dem Storyboard für das Video PN-Übergang, Entstehung der Grenzschicht

Abb.3 zeigt die initiale Sequenz bei der die Diode in einen Schaltkreis übergeführt wird. In dieser und den darauf folgenden Szenen wird auf die inneren Vorgänge der Diode nur mehr Fallweise dort eingegangen wo es unmittelbar relevant ist. Zuvor bereits verwendete visuelle Elemente wie Elektronen die

sich zu Löchern hinter der Grenzschichte bewegen werden verwendet um unmittelbar sichtbar zu machen warum sich die Sperrschicht bei Anlegen einer Spannung in Sperrrichtung verbreitert bzw. in umgekehrter Richtung verschmälert (siehe Lernziel h)).

<p>SKIZZE</p> <p>Hinter der Diode wird eine Stromkreisskizze eingeblendet und herausgezoomt. Pfeil bewegt sich in Stromrichtung I wird eingeblendet mit dem Wort „Durchlassrichtung“.</p> <p>An der Spannungsquelle und an der Diode erscheinen Plus-, und Minussymbol</p>		<p>Wird nun eine Diode als Leiterelement in einen Stromkreis eingebaut lässt sie Strom nur in eine Richtung, die sogenannte Durchlassrichtung, durch. Dafür muss der P-dotierte Teil mit dem positiven, und der N Teil mit dem negativen Spannungsterminal verbunden werden.</p>
---	--	--

Abb. 3: Ausschnitt aus dem Storyboard für das Video PN-Übergang, Diode als Leiterelement

Das in **Abb. 1-3** gezeigte Format hat sich für nahezu alle Entwicklungsschritte als sehr nützlich und effektiv erwiesen. Je nach Anforderung des Projekts können aber auch andere Formate sinnvoll sein. Sind alle Storyboards unter Einbeziehung von Experten in Besprechungsschleifen erstellt worden, sollte als nächstes ein Drehplan entstehen. In diesem wird festgelegt, welche Szenen wann und wo gedreht werden und welches Material (zusätzlich zur Standardausrüstung) benötigt wird. Ein Ausschnitt eines Drehplans könnte also folgendermaßen aussehen:

17.03.2016, 08:00-12:00

Oszilloskop, Szene 1-4; Filmlabor

Material: DSO, 2 Koax-Kabel, Spannungsquelle

HAMA, 2 Scheinwerfer+Stativ+Schirm, Stativarm

Im Beispielprojekt stand für den Dreh ein Studio-raum in den Räumlichkeiten des Anfängerpraktikums zur Verfügung welcher für alle Aufnahmen verwendet wurde. Das Nötige Material sowie die Aufnahmetermine wurden wiederum in den Storyboards notiert. An jenen Stellen der Produktion wo sich die geplante Verbindung von Sprechtext und Visualisierung als schwierig oder anders sinnvoller erwies wurden die entsprechenden Änderungen und Kommentare für den Schnitt ebenfalls direkt im Storyboard vermerkt.

6. Dreh und Schnitt

Sind die Präproduktionsschritte wie oben vorgeschlagen durchgeführt worden, können die Aufnahmen entsprechend des Drehplans und der Storyboards durchgeführt werden. Die verwendeten Materialien unterschieden sich hierbei natürlich je nach Projekt. In aller Regel sollten aber mindestens folgende Geräte verfügbar sein:

- Mindestens eine Kamera welche in der Lage ist Aufnahmen in 1080p (1920x1080 Pixel) idealer Weise bei 60 Frames pro Sekunde zu tätigen, mit einem externen Monitor verbunden werden kann und über manuelle Einstellungsmöglichkeiten für Fokus und Blende verfügt
- Ein Kamerastativ
- Ein externer Monitor mit zur Kamera bzw. Verbindungskabel passenden Eingang
- Für Audioaufnahmen (insbesondere Studio und Voice-over) ein geeignetes externes Mikrofon
- Ladekabel und/oder Ersatz Akkus für die Kamera
- Ausreichend Große Speicherkarten
- 2 Scheinwerfer mit Diffusor Schirm
- Einen neutralen (am besten einfarbigen „Bluebox“) Hintergrund für Studioaufnahmen

- Ggf. einen Laptop oder Computer zur Aufnahmen-Überprüfung

Alles gefilmte Material sollte unmittelbar nach einem Dreh kurz auf einem geeigneten Monitor gesichtet werden um sicher zu stellen, dass die Aufnahmen verwendet werden können. Bei besonders wichtigen Aufnahmen sollte dies noch vor Ort gemacht werden. Dafür ist es hilfreich eine weitere Person vor Ort zu haben welche im laufenden Aufnahmebetrieb das Material sichtet. Dies war im Beispielprojekt nicht der Fall weshalb auch einige Szenen erneut aufgenommen werden mussten. Besteht nicht die Möglichkeit einen Raum über längere Zeiten zu verwenden sollten Aufnahmen vom Setaufbau gemacht werden. So lassen sich bei eventuellen Neuaufnahmen störende Diskontinuitäten wie andere Ausleuchtung oder geänderte Anordnung der Objekte im Bild vermeiden.

Da im Beispielprojekt alle Sequenzen im Voice-over Format (also ein Audio-kommentar zu Vorgängen in einer Aufnahme) produziert wurden hat es sich als außerordentlich praktisch erwiesen den Text zumindest provisorisch aufzunehmen und ihn während der Aufnahmen abzuspielen um das Timing der Vorgänge darauf anzupassen. Dies entspricht auch einem der eingangs erwähnten, sehr wichtigen, Designprinzipien dem *split attention* Prinzip. Zusammengehörnde visuelle-, und Audioinformation sollten demnach möglichst zeitnahe zueinander dargeboten werden. Weiters dient oft Bewegung im Bild, wie z.B. die Manipulation eines Geräteteils, als visueller Hinweis (vgl. *cueing principle*) darauf auf welchen Teil des Bildes sich der Audiotext bezieht. Ist die Information dabei nicht synchron zum *cue* kommt es zu zusätzlicher kognitiver Belastung für den Betrachter. Außerdem ließ sich dadurch die Mindestdauer der Videos abschätzen da der in einem durchgesprochene Text das absolute Mindestmaß an Zeit für das Video beansprucht. Hierbei kann es aber vorkommen, dass die erforderliche Zeit falsch eingeschätzt wurde und die Vorgänge in der Aufnahme dem Sprechtext vorauseilen. An Manchen Stellen erwies es sich daher als praktischer die Audiospur über die Videoaufnahmen zu timen.

Die Hardwareanforderungen an den Computer im Schnitt sollten hierbei nicht unterschätzt werden, insbesondere wenn im Schnittprozess mehrere Video-spuren gleichzeitig gerendert werden sollen. Im Beispielprojekt wurde z.B. am Ende jedes Videos eine Art DVD-Menü angehängt in dem die einzelnen Passagen des Videos anwählbar waren (siehe **Abb.4**). Dabei musste das System zum Teil sechs HD-Videospuren gleichzeitig Rendern was es an seine Grenzen brachte. Eine gute Grafikkarte ist hierfür daher unerlässlich.

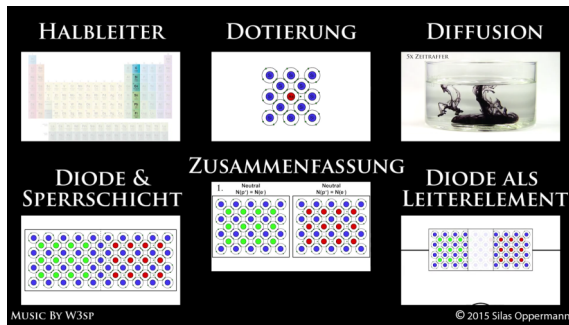


Abb. 4: DVD Menü am Ende des Videos

Für sehr einfache Projekte können auch schon leistungsschwächere Systeme ausreichend sein aber um einen Referenzwert zu geben werden hier die für das Beispielprojekt verwendeten Komponenten angegeben.

- Prozessor: Intel i7-3770k
- Grafikkarte: ASUS ROG Geforce GTX 970
- Arbeitsspeicher: 16 Gb GDDR3 RAM
- Festplatte: 128 Gb SSD Festplatte

Für den Schnitt eignen sich verschiedenste Programme. Es sollte jedoch auf jeden Fall eines verwendet werden welches GPU-Accelerated Rendering erlaubt (Rendering durch die Grafikkarte). Die zwei bekanntesten Programme sind *Adobe Premiere Pro* und Apples *Final Cut Pro*. Ein Vorteil von Adobe ist, dass für Lehrende und Studierende günstige Jahreslizenzen für die gesamte *Creative Suite* Programmgruppe erhältlich sind. Diese beinhaltet unter anderem auch Programme zur Audiobearbeitung (*Adobe Audition*), Animation, After Effects und Erstellung von Grafiken (*Adobe Illustrator*). Bei der Entwicklung des Beispielprojekts wurden *Adobe Premiere Pro*, *Adobe Audition* und *Adobe Illustrator* verwendet. Für die fertigen Videos wurde, wegen der sehr breiten Kompatibilität mit Wiedergabeprogrammen, als Ausgabeformat das H.264 Codec, auch als MP4 bekannt, gewählt.

Im Beispielprojekt wurden die Videos anschließend auf die Online-Plattform *Youtube* hochgeladen. Auf diese Weise wurde die Verteilung und Erhaltung der Videos sowie der Wiedergabesoftware ausgelagert. Außerdem kann so von jedem Gerät mit Internetanschluss auf die Videos zugegriffen werden. Des Weiteren lassen sich die Zugriffsmöglichkeiten auf die Videos auf einfache Weise einschränken und man kann ohne viel Vorwissen eine Art „DVD-Menü“ erstellen bei dem über einen Klick auf bestimmte Zeitmarker im Video gesprungen werden kann. Diese Entscheidung hat sich im Beispielkontext sehr bewährt.

7. Ergebnisse des Beispielprojekts

Die Befolgung der in diesem Artikel beschriebenen Entwicklungsschritte-, und Prinzipien hat sich im Beispielprojekt insofern bewährt als drei der Videos zu einer signifikanten Steigerung in der Leistung der Studierenden geführt haben. Das Beispielvideo zum PN-Übergang erzielte dabei die besten Ergebnisse. Alle Videos wurden von den Studierenden als strukturiert und informativ empfunden und für eine sinnvolle Ergänzung zu den bestehenden Vorbereitungsmaterialien gehalten.

8. Möglichkeiten an Universitäten

Um eine Vorstellung des nötigen Arbeitsaufwandes für ein Entwicklungsprojekt zu geben: Die vier Videos des Beispielprojektes wurden in einem Zeitraum von etwa zweieinhalb Monaten intensiver Arbeit von einer Person mit mittleren Vorkenntnissen produziert. Dabei sind alle in diesem Artikel angeführten Arbeitsschritte (Mit Ausnahme der Theorie-Recherche) inbegriffen. Die erforderlichen Fertigkeiten wurden Autodidakt hauptsächlich durch das Internet angeeignet.

An Universitäten bietet sich die hervorragende Möglichkeit Studierende im Rahmen von Lehrveranstaltungen oder Bachelor-, und Masterarbeiten, ähnlich wie im Beispielprojekt, effektive Lernmaterialien produzieren zu lassen welche für die Universität von unmittelbarem Nutzen und für die Studierenden mit der Aneignung interessanter und nützlicher Anwendungsfähigkeiten verbunden sind. Ebenso bietet es sich z.B. in Lehrveranstaltungen zu quantitativer Sozialforschung an, Evaluationstools zur Messung der Effektivität der so entstandenen Videos zu entwickeln. Der damit einhergehende Arbeits-, und Kommunikationsaufwand muss allerdings allen beteiligten bewusst gemacht und klar kommuniziert werden.

Für den Projektleiter empfiehlt es sich dabei jeden Produktionsschritt zumindest einmal selbst durchgeführt zu haben oder für ein Erstlingswerk ein eher einfaches Projekt mit ausreichend Zeit zu versuchen. Der vorliegende Artikel stellt dabei hoffentlich für viele zukünftige Unterfangen eine sinnvolle Unterstützung dar.

9. Literatur

[1] Büsch, L. & Heinke, H. (2015). *Wie kann die Attraktivität von web-basierten interaktiven Praktikumsanleitungen gesteigert werden?* DPG-Frühjahrstagung 2015. PhyDid B-Didaktik der Physik- Beiträge zu DPG-Frühjahrstagung DD 17.16. <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/639/767>

[2] Bauer, J. (2010). *Entwicklung und Evaluation von didaktisch optimierten realen und hypermedialen Experimenten für ein Physikpraktikum für Er-*

nahrungswissenschaften zum Thema Elektrizität.

Diplomarbeit an der Fakultät für Physik der Universität Wien.

[3] Fricke, A., Schecker, H., Rückmann, I. (2011). *Hypermedia in der Vorbereitung auf das Physikalische Praktikum*. DPG-Frühjahrstagung 2011. PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zu DPG-Frühjahrstagung DD 03.05. <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/284/330>

[4] Hamacher, J., Erkelenz, J., Heinke, H. (2015) *Messunsicherheiten mit Hilfe von Lehrvideos verstehen*. DPG-Frühjahrstagung 2015. PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zu DPG-Frühjahrstagung DD 17.14. <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/637/765>

[5] Hoffmann, M. (2011) *Entwicklung und Evaluation von didaktisch optimierten realen und hypermedialen Experimenten für ein Physikpraktikum für Ernährungswissenschaften zum Thema Flüssigkeiten und Wärme*. Diplomarbeit an der Fakultät für Physik der Universität Wien.

[6] Kreiten, M. (2012). *Chancen und Potenziale web-basierter Aufgaben im physikalischen Praktikum*. Dissertation an der mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Köln.

[7] Plückers, K., Heinke, H. (2015). Einsatz neuer Medien im Physikpraktikum für Medizinstudierende. DPG-Frühjahrstagung 2015. PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zu DPG-Frühjahrstagung DD 20.01. <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/638/731>

[8] Rehfeldt, D., Gutzler, T., Nordmeier, V. (2013). *TSL: Technology SUPPORTed Labs. Multimediale Unterstützung naturwissenschaftlicher Hochschulpraktika*. DPG-Frühjahrstagung 2015. PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zu DPG-Frühjahrstagung DD 17.21. <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/423/567>

[9] Nagel, C. (2009). *eLearning im physikalischen Anfängerpraktikum*. Dissertation an der Fakultät für Physik der Universität Wien.

[10] Häder, M. (2015). *Empirische Sozialforschung: Eine Einführung*. 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

[11] Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H., Komorek, M. (1997). *Das Model der Didaktischen Rekonstruktion - Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung*. Zeitschrift der Didaktik der Naturwissenschaften; Jg. 3, Heft 3, 1997, S.3-18.

[12] Lamnek, S. (2010). *Qualitative Sozialforschung*. 5. Auflage. Weinheim, Basel: Beltz Verlag.

[13] Mayer, E. (Hrsg.) (2014). *The Cambridge handbook of multimedia learning*. New York: Cambridge University Press.

[14] Oppermann, S. (2016). *Entwicklung und Evaluation von Lernvideos für das physikalische Anfängerpraktikum*. Diplomarbeit an der Fakultät für Physik der Universität Wien.

[15] Paivio, A. (1986). *Mental representations: A dual encoding approach*. New York: Oxford University Press.

[16] Baddeley, A. & Hitch, G. (1974). Working Memory. In Bower, G. (Hrsg.), *The psychology of learning and motivation* (Bd. 8., S. 47-89). New York: Academic Press.

[17] Low, R. & Sweller, J. (2014) The Modality Principle in Multimedia Learning. In Mayer, R., *Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (S. 227-246). New York: Cambridge University Press.

[18] Ayres, P. & Sweller, J. (2014). The Split-Attention Principle in Multimedia Learning. In Mayer, R., *Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (S. 206-226). New York: Cambridge University Press.

[19] Kalyuga, S. & Sweller, J. (2014). The Redundancy Principle in Multimedia Learning. In Mayer, R., *Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (S. 247-262). New York: Cambridge University Press.

[20] Kalyuga, S. (2014). The Expertise Reversal Principle in Multimedia Learning. In Mayer, R., *Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (S. 576-597). New York: Cambridge University Press.

[21] Van Gog, T. (2014). The Signaling (or Cueing) Principle in Multimedia Learning. In Mayer, R., *Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (S. 263-278). New York: Cambridge University Press.

[22] Kittelber, R. & Freisleben, I. (1994) *Lernen mit Video und Film*. 2. Auflage. Weinheim und Basel: Beltz Verlag.

[23] Schnell, M. (2002) *Bildungsfernsehen- Entwicklung und Gestaltung audiovisueller Lernangebote*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag GmbH.

Schutz vor Strahlung – Abschirmung durch Aluminium

- Ist die Bestimmung des Massenabschwächungskoeffizienten von Aluminium mit einer Mischprobe bestehend aus: Cs-137, Am-241 und Sr-90 mit einem Geiger-Müller-Zählrohr möglich?

Clemens Nagel, Melanie Matousek

Universität Wien

clemens.nagel@univie.ac.at, melanie_matousek@univie.ac.at

Kurzfassung

Experimente zur Abschirmung von ionisierender Strahlung sollten in keinem Anfängerpraktikum fehlen, um den Studierenden die Abschirmung (durch Absorption) als eines der Hauptprinzipien des Strahlenschutzes zu vermitteln. Eine besonders interessante Fragestellung für ein Experiment zu diesem Thema, ist die Bestimmung des Massenabschwächungskoeffizienten eines Gamma-Strahlers durch Aluminium. Da nicht jedes Grund- oder Anfängerpraktikum über geeignete reine Gamma-Präparate verfügt, wurde im Anfängerpraktikum der Fakultät für Physik an der Universität Wien eine Alternative gesucht und erprobt. Wir befassten uns mit der Frage, ob ein bereits vorhandenes, genehmigungspflichtiges Alpha/Beta/Gamma-Mischpräparat, bestehend aus Am-241, Sr90 und Cs-137 genauso geeignet ist, wie ein reines Cs-137 Präparat, um den Massenabschwächungskoeffizienten von Cs-137 durch Aluminium hinreichend zuverlässig zu bestimmen. Je nach Aufbau der Messapparatur lassen sich die vielfältigen Wechselwirkungen mit Materie und die Auswirkung der Proben- und Apparaturgeometrie eindrucksvoll zeigen. Mit je einem Kollimator an Probe und Zählrohr lässt sich der Literaturwert quantitativ bestimmen, aber selbst mit einfachem und kostengünstigen Aufbau (die Bearbeitung von Blei wird in vielen hauseigenen Werkstätten nicht mehr durchgeführt) sind zuverlässig wiederholbare Ergebnisse in der entsprechenden Größenordnung messbar.

1. Die Mischprobe (Am-241, Sr-90, Cs-137)

Die für diesen Versuch verwendete 15-jährige Mischprobe von (vertrieben von LD Didactic, Hersteller setzt sich aus einem Alpha-Strahler (Americium-241), einem Beta-Strahler (Stronzium-90) und einem Gammastrahler (Cäsium-137) zusammen. Sie hat eine verzeichnete Gesamtaktivität von 341,88 kBq und ist genehmigungspflichtig.

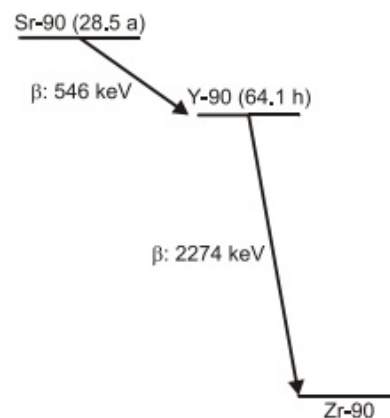
	Cs-137	Am-241	Sr-90
A	333 kBq	4,44 kBq	4,44 kBq
T _{1/2}	30,08 a	432,6 a	28,9 a
α		5,5 MeV	
β ⁻			195,8 keV
γ	32 keV 662 keV	13,9 keV 59,5 keV	

Tab. 1: Charakteristische Daten der Mischprobe

Aus Tab.1 kann man ablesen, dass Cs-137 mit 333 kBq eine viel höhere Aktivität hat als Am-241 und Sr-90.

Die niedrigsten Halbwertszeiten haben mit 30 Jahren Sr-90 und Cs-137, was für die Aktivität der gegenständlichen, erst 15 Jahre alten, Mischprobe keine Rolle spielt.

Sr-90 ist ein reiner Beta-Minus-Strahler (195,8 keV, (vgl. Abb.1) und kann für die Bestimmung des Massenabschwächungskoeffizienten außer Acht gelassen



werden, wenn die hochenergetischen Elektronen mit einem metallischen Filter abgeschirmt werden.

Abb. 1: Zerfallsschema von Sr-90. Quelle: [1, S.2]

Hingegen hat Am-241, ein Alpha-Strahler (vgl. Abb.2) Gamma-Energien bei 13,9 keV und 59,5 keV. Die Alpha-Teilchen sollten mit demselben o. g. metallischen Filter abgeschirmt werden können.

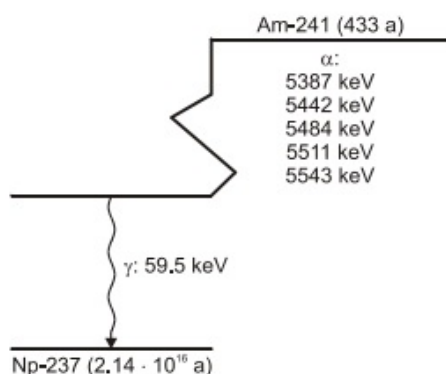


Abb. 2: Zerfallsschema von Am-241. Quelle: [1, S.2.]

Die Probengeometrie weist eine kegelförmige Abstrahlung in Längsrichtung auf. Ihr Maximum liegt an der Öffnungsseite (siehe Abb.3), wo die Probe jedoch von einer dünnen Goldfolie verschlossen ist. An der gegenüberliegenden Seite weist sie keine höhere Aktivität auf, als an den Längsseiten, was wichtig ist für den Schutz der Studierenden bei der Messung.



Abb. 3: Mischprobe. Links: Probenöffnung

Um den Aufbau der Messung nachzuvollziehen, ist es notwendig, sich mit allen relevanten Wechselwirkungen von Alpha-, Beta- und Gammastrahlung mit Materie (vor allem mit Aluminium und Blei) auseinanderzusetzen.

1.1. Spektrum der Mischprobe

Mithilfe eines Szintillationsdetektors (Thallium dotierten Na-I-Kristall) wird das Spektrum der Mischprobe aufgenommen, wodurch man wichtige Merkmale des Präparates erhält (Abb. 4). Der Szintillationszähler hat gegenüber dem Geiger-Müller-Zählrohr eine höhere Nachweiswahrscheinlichkeit und den Vorteil, dass er γ -Strahlungsenergien messen kann. Die Kalibrierung erfolgt mit Na-22 bei 511 keV.

Das Hauptmaximum hat Cs-137 in diesem Präparat bei $E=(651\pm 15)$ keV. (Literaturwert: 662 keV [2]). Das Compton-Gebirge entsteht durch Photonen, die an frei beweglichen Elektronen in der Präparat Umgebung oder im Kristall gestreut werden und einen Teil ihrer Energie übertragen (Compton-Effekt).

Den maximalen Energieübertrag auf das Elektron hat das Photon bei einer 180° -Streuung (= Compton-Kante). Der Rückstreupic stammt von Compton-Wechselwirkung mit der Präparat Umgebung außerhalb des Szintillationskristalls. (vgl. [3, S.20-21])

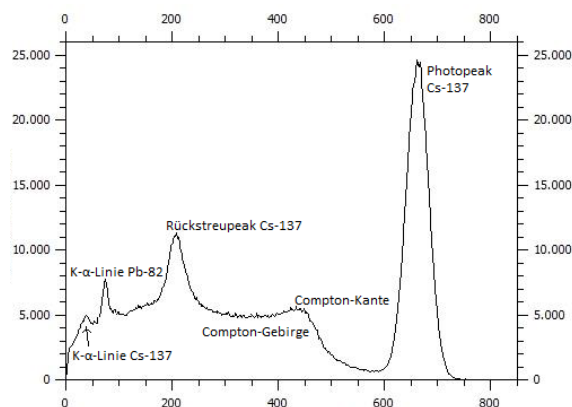


Abb. 4: Energiespektrum des Mischpräparates

Des Weiteren erkennt man auch die Linien der charakteristischen Röntgenstrahlung: Die K- α -Linie von Cs-137 liegt bei etwa 36 keV (Literaturwert: 32,2 keV [2]) und die K- α -Linie von Pb-207 liegt bei etwa 74 keV (Literaturwert 75 keV [2]).

2. Wechselwirkung von Alphastrahlung mit Materie

Geladene Teilchen verlieren ihre kinetische Energie durch zahlreiche aufeinanderfolgende Wechselwirkungen mit geladener Materie, wie etwa Ionisation oder Anregung von gebundenen Elektronen im Absorbermaterial. Diese Vorgänge werden als Stoßbremsung zusammengefasst. Die ionisierten Teilchen können selbst auch wieder weitere Teilchen anregen (=Sekundärionisation). Der Energieverlust ist abhängig von der Geschwindigkeit, der Ladung und dem Absorbermaterial. Diese Abhängigkeiten werden in der Bethe-Bloch-Formel zusammengefasst. Sie beschreibt den Energieverlust ΔE pro Wegstrecke Δx .

$$\frac{\Delta E}{\Delta x} \sim \frac{1}{v^2} z^2 \frac{Z}{A} \ln(aE) \quad \{1\}$$

Hier sind Z/A die Kernladungs- und Massenzahl des Absorbers, Z die Ladungszahl ($Z_\alpha = 2$), E die Gesamtenergie des Teilchens und A die Materialkonstante des Absorbermaterials. Die Geschwindigkeit ist umgekehrt proportional zur Energie, das heißt, je länger ein Teilchen im Material verweilt, desto mehr Wechselwirkungsprozesse können stattfinden.

Der mittlere Energieverlust ist bei Alpha-Strahlung ungefähr 100 keV/mm Luft. (vgl. [4, S.31-32])

In Metallen kommt es schon nach wenigen μm zur vollständigen Abschirmung von Alphastrahlung.

3. Wechselwirkung von β^- Strahlung (Elektronen) mit Materie

Elektronen aus dem Betazerfall haben eine kontinuierliche Energieverteilung, da es sich hier nicht wie bei Alphastrahlung um einen Zweikörperzerfall handelt, sondern um einen Dreikörperzerfall.

$$n \Rightarrow p^+ + \beta^- + \bar{\nu}_e + E \quad \{2\}$$

Man kann aus der Verteilung emittierter Elektronen eine mittlere und eine maximale Energie ausmachen. Treffen Elektronen auf eine Materieschicht, werden sie entweder zurückgestreut, absorbiert oder sie durchdringen den Absorber. Die Elektronen aus dem Betazerfall der o.g. Mischprobe haben 546 bzw. 2274 keV an maximaler Strahlungsenergie, sie sind also im niederenergetischem Fall mit 85% Lichtgeschwindigkeit noch keine relativistischen Elektronen, im höherenergetischen Fall jedoch schon. Während bei nichtrelativistischen Elektronen als Wechselwirkung mit Materie bei der Abschwächung (Absorption) die Stoßbremsung dominiert, wo Wärme freigesetzt wird, so dominiert bei den relativistischen immer mehr die Strahlungsbremsung, wobei Photonen (Bremsstrahlung) unterschiedlicher Energien entstehen. Die Transmission von Elektronen der o.g. Energien geht bei Aluminium als Absorbermaterial schon bei ca. 2 cm Schichtdicke gegen Null. (vgl. [5, S.287])

Jede Wechselwirkung von Elektronen mit Materie ist jedoch zudem mit einer Streuung der Elektronen verbunden, verändert also deren Bewegungsrichtung und die seitliche Ausdehnung des Strahlenbündels. Die Streuung ist umso stärker, je niedriger die Energie der Elektronen und je höher Dichte und Ordnungszahl des durchstrahlten Mediums sind. [5, S.287]

4. Wechselwirkung von Gammastrahlung mit Materie

Da Photonen keine elektrische Ladung haben, können sie weiter in Materie eindringen und erfordern einen stärkeren Strahlenschutz.

Tritt Gammastrahlung durch Materie hindurch, so kommt es zu Absorption oder Streuung. Die Intensität wird aufgrund von Wechselwirkungsprozessen der hochenergetischen Photonen mit den Hüllenelektronen, entlang der Wegstrecke der Photonen verringert. Diese Prozesse werden hauptsächlich von folgenden Effekten verursacht: der Photoeffekt, der Comptoneffekt und die Paarbildung. Abhängig von der Energie der Gammastrahlung dominiert jeweils einer der Effekte. (vgl. [5, S.167-168])

4.1. Photoeffekt

Die Wahrscheinlichkeit, dass der Photoeffekt auftritt ist für geringe Energien E (im keV Bereich) der

Gammastrahlung beziehungsweise für große Kernladungszahlen Z des Absorbermaterials hoch.

Das einfallende Photon wird von einem Elektron der Atomhülle komplett absorbiert und ionisiert es. Falls die Photonenenergie größer als die Bindungsenergie des Elektrons ist, kann dieses aus der Hülle herausgeschlagen werden. Das freiwerdende Elektron wird als Photoelektron bezeichnet.

Das Photoelektron kann nun Sekundärprozesse, wie Bremsstrahlung oder Stoßionisation auslösen. Wird ein inneres Elektron (z.B. aus der K-Schale) durch den äußeren Photoeffekt herausgelöst, so entsteht ein Loch, das durch ein Elektron aus der nächsthöheren, der L-Schale aufgefüllt wird. Bei diesem diskreten Energieübergang wird charakteristische Röntgenstrahlung frei (im Energiespektrum als K- α -Linie bezeichnet).

Außerdem kann auch ein einfallendes Photon zur Anregung eines äußeren Elektrons auf ein höheres Energieniveau verwendet werden, was auch als innerer Photoeffekt bezeichnet wird. Hierbei entstehen beim Übergang in den Grundzustand ebenfalls neue Photonen, die jedoch eine deutlich geringere Energie als das einfallende Photon aufweisen. (vgl. [5, S.169-173])

4.2. Compton-Effekt

Trifft Gammastrahlung mit einer Energie im Bereich 100 keV bis 10 MeV auf Materie, so ist die Wahrscheinlichkeit am größten, dass Compton-Effekt auftritt. Er beschreibt eine inelastische Wechselwirkung mit einem quasi freien Hüllenelektron, also einem schwach gebundenen Elektron des Absorbermaterials. Das Photon überträgt einen Teil seiner Energie auf das Elektron und wird in eine andere Bewegungsrichtung gestreut. Das Elektron erhält eine höhere Energie beziehungsweise einen größeren Impuls und verlässt die Elektronenhülle. Die Elektronenhülle befindet sich dadurch in einem einfach ionisierten Zustand. Das freiwerdende Elektron wird durch die unmittelbare Umgebung gebremst, wodurch es Bremsstrahlung abgibt, welche als Sekundärstrahlung emittiert wird (kontinuierliche Gammastrahlung im Röntgenbereich). (vgl. [5, S.174-178])

4.3. Paarbildung

Wechselwirkt ein hochenergetisches Photon im Coulombfeld eines Atomkerns, kann aus der Photonenenergie ein Elektron/Positron-Paar entstehen. Da es für die Paarbildung Photonen von mindestens 1022keV Energie bedarf und diese von der verwendeten Probe nicht emittiert werden, ist dieser Effekt nur im Rahmen der Sekundärwechselwirkungsprozesse der Alphateilchen bei der Ausfilterung von Belang, tritt dort jedoch hinreichend selten auf. Ein derart entstandenes Positron, annihiliert mit einem umgebenden Elektron unverzüglich zu 2 Photonen mit je 511keV. (vgl. [6, S.58])

4.4. Strahlaufweitung und Dosisertrag

Bei Strahlenquellen, die nicht parallel verlaufen, also nicht kollimiert sind, kommt es zu einer natürlichen Aufweitung des Strahles, der durch das quadratische Abstandsgesetz korrigiert werden könnte. Kommt es zwischen Quelle und Detektor zu einer Absorption (offene Geometrie des Versuchsaufbaus), so findet natürlich im absorbierenden Material neben den bereits beschriebenen Wechselwirkungen auch normale (diffuse) Streuung statt, die zu einer relativen Erhöhung der Ortsdosisleistung im Detektor führt. Dieser Dosisertrag auf Grund des Versuchsaufbaus kann durch einen Geometriefaktor B (oder durch eine Geometriefunktion) korrigiert werden. (vgl. [7, S.4-5])

4.5. Abschirmung und Reichweite

Gammastrahlung hat im Gegensatz zu Alpha- und Betastrahlung die höchste Eindringtiefe beziehungsweise die größte Strahlaufweitung.

Die Abschwächung eines monoenergetischen, parallelen Strahlenbündels von Gammastrahlung, kann durch das Lambert-Beer'sche Gesetz beschrieben werden.

$$I(d) = I_0 \cdot e^{-\mu d} - H \quad \{3\}$$

Die Abschwächung der Intensität der Gammastrahlung I_0 nimmt exponentiell mit der Dicke d des Absorbers ab, wobei μ der lineare Abschwächungskoeffizient ist und H die Hintergrundaktivität (vgl. [4, S.199-204]).

4.6. Massenabschwächungskoeffizient

Der Abschwächungskoeffizient ist die Summe der Wirkungsquerschnitte der einzelnen Wechselwirkungsprozesse, welche in Abschnitt 2. erklärt wurden.

Der Schwächungskoeffizient ist eine charakteristische Größe für verschiedene Absorbermaterialien. Gemeinsam mit der Dichte ρ des Absorbers ergibt sich die Größe des Massenabschwächungskoeffizienten μ/ρ (vgl. [5, S.199-204]).

γ (keV)	μ/ρ (cm ² /g)
600	$7,802 \cdot 10^{-2}$
¹³⁷ Cs*	$7,513 \cdot 10^{-2}$
800	$6,841 \cdot 10^{-2}$
1000	$6,146 \cdot 10^{-2}$

Tab. 2: Massenschwächungskoeffizient von Photonen mit 662 keV Energie (*aus Cs-137) in Aluminium (vgl. [5, S.688])

5. Experiment zur Messung des Massenabschwächungskoeffizienten von Aluminium

Um den Massenabschwächungskoeffizienten von Cs-137 durch Aluminium mit der vorhandenen Mischprobe zu bestimmen, muss zunächst in Vorversuchen gezeigt werden, unter welchen Bedingungen die Strahlung der beiden anderen Isotope Am-241 und Sr-90 und deren Sekundärwechselwirkungen für das Experiment vernachlässigbar sind.

5.1. Benötigtes Material

Für dieses Experiment wird oben beschriebene Mischprobe verwendet, deren Strahlung durch Aluminiumplatten à 1 cm gelenkt wird beziehungsweise durch dünnere Aluminiumfolien (siehe Vorversuche zur Abschirmung von Am-241, Kapitel 5.2.).

Detektiert wird die Strahlung mit einem selbstlöschenden Geiger-Müller-Zählrohr, in Kunststoffgehäuse, mit sehr dünnem Glimmerfenster (Durchmesser 9 mm), das auch die Registrierung weicher Betastrahlung ermöglicht. Es hat eine Neon, Argon, Halogen Gasfüllung und eine mittlere Arbeitsspannung von 450 V. Die Totzeit beträgt ungefähr 100 μ s und die Lebensdauer umfasst mindestens 10^{10} Impulse. Die Abmessungen (Durchmesser) sind 75 mm x 24 mm. (vgl. [8, S.576])

Zur Kollimation am Detektor wird ein Bleiblock benötigt, in dem das Geiger-Müller-Zählrohr platziert wird. Das Fenster des Zählrohrs sollte sich dabei zirka einen Zentimeter in der Bleiummanteung befinden. Um die Strahlendivergenz direkt an der Probe zu minimieren wird ein Bleiblock verwendet, der im Durchtrittsfenster zugleich einen Filter (3 cm Aluminium) beinhaltet.

Zum Schutz der Studierenden wird eine Bleiabschirmung benötigt (siehe Abb. 5).

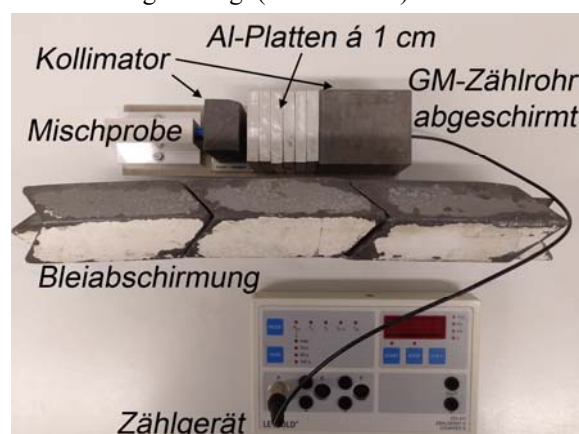


Abb. 5: Versuchsaufbau

5.2. Filterung niederenergetischer γ -Quanten

Da Am-241 bei den Energien 13,9 keV und 59,5 keV Gammastrahlung emittiert, welche bei einer

reinen Cäsium-137 Quelle nicht vorhanden ist, muss gezeigt werden, dass diese Strahlung gefiltert wird.

Es wurde hierfür die Zählrate in einem Intervall von 100s gegen die Schichtdicke in cm aufgetragen.

Ab bereits circa 0,3 cm konvergiert die Messkurve zu einem konstanten Wert, wodurch ersichtlich ist, dass niederenergetische Gammastrahlung gefiltert wird und der Einfluss der Strahlung von Am-241 in der Mischprobe vernachlässigbar ist. Ab einer Aluminiumschichtdicke von etwa 3cm ist zudem garantiert, dass kein messbarer Einfluss von Sekundärwechselwirkungsprozessen der Abschirmung von Alpha-, Beta- und niederenergetischer Gammastrahlung mehr vorhanden ist (vgl. Kapitel 2. und 3.). Für alle weiteren Experimente ist daher in den Bleikollimator nach der Probe bereits ein 3cm dicker Aluminiumfilter in der Bohrung eingebaut.

5.3. Bestimmung des Massenabschwächungskoeffizienten

Es wurden mehrere Versuche unter Variation des Aufbaus durchgeführt und Gammastrahlung durch Aluminiumplatten der Dichte

$$\rho_{Al} = (2,678 \pm 0,006) \frac{g}{cm^3}$$

abgeschirmt.

a). Ohne Kollimator und ohne Bleiabschirmung

Führt man die Messungen (Messreihen mit $n=5$) ohne Kollimator und ohne Bleiabschirmung durch, so erhält man einen Massenabschwächungskoeffizienten von

$$\frac{\mu}{\rho} = (5,41 \pm 0,06) \cdot 10^{-2} \frac{cm^2}{g}$$

Das ist eine Abweichung von 28 % zum Literaturwert (siehe Tab. 2).

b) Ohne Kollimator mit Bleiabschirmung

Da der Versuch in einem Grund- oder Anfängerpraktikum von Studenten durchgeführt wird, muss aus Strahlensicherheitsgründen eine Bleiabschirmung verwendet werden. Dieser Versuch wurde über ein Semester lang von Studierenden durchgeführt, sodass ein Stichprobenumfang von $n=30$ erreicht werden konnte.

Unter diesen Versuchsbedingungen erhält man einen Massenabschwächungskoeffizienten von

$$\frac{\mu}{\rho} = (5,11 \pm 0,05) \cdot 10^{-2} \frac{cm^2}{g},$$

welcher einer Abweichung von 32 % zum Literaturwert entspricht.

c) Strahl an der Quelle kollimiert

Will man experimentell näher an den theoretischen Wert herankommen, so lohnt sich die Anschaffung eines Kollimators aus Blei mit einem Filter. Anhand der durchgeführten Messreihe ($n=5$) konnte ein Massenabschwächungskoeffizient von

$$\frac{\mu}{\rho} = (5,76 \pm 0,17) \cdot 10^{-2} \frac{cm^2}{g}$$

gemessen werden. Hierbei konnten keine signifikanten Unterschiede in den Ergebnissen gefunden werden hinsichtlich einer konstanten Aufbaugeometrie (festsitzendes Zählrohr – ein Wert für I_0 und einer separaten $I_0(d)$ -Bestimmung (für die Korrektur etwaiger Aufweitungseffekte).

d) Strahl von Quelle und vor Zählrohr kollimiert

Die besten Ergebnisse werden jedoch mit einem Versuchsaufbau erreicht, bei dem der Strahl nach der Quelle und vor dem (abgeschirmten) Detektor kollimiert wird (Abb. 5). Hier wurde eine größere Stichprobe erhoben ($n=10$). Dabei konnte ein Massenabschwächungskoeffizient von

$$\frac{\mu}{\rho} = (6,80 \pm 0,38) \cdot 10^{-2} \frac{cm^2}{g}$$

gemessen werden (siehe auch Abb. 6). Hierbei konnten Unterschiede in hinsichtlich einer konstanten Aufbaugeometrie (festsitzendes Zählrohr – ein Wert für I_0 und einer separaten $I_0(d)$ -Bestimmung (für die Korrektur etwaiger Aufweitungseffekte) gefunden werden. Die besseren Ergebnisse werden erreicht, wenn Referenzintensitäten für jede Schichtdicke bestimmt werden.

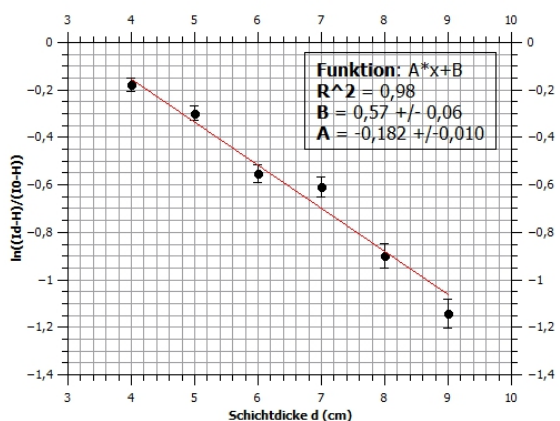


Abb.6: Auswertung Massenschwächungskoeffizient

6. Conclusio

Es konnte mit den durchgeführten Versuchen gezeigt werden, dass die Mischprobe (Am-241, Sr-90, Cs-137) ein hinreichend taugliches Präparat ist, um den Massenabschwächungskoeffizienten von Cs-137 durch Aluminium mit einer Abweichung von weni-

ger als 10% zum Literaturwert zu bestimmen. Die Versuchsdauer beträgt bei $n=10$ (wie in der Auswertung der hier publizierten Versuche) etwa 3:40h. Nachdem die Zählraten von Zerfallsprozessen jedoch poissonverteilt sind, können ohne Bedenken auch kleinere Stichproben gemacht. Bei $n=5$ steigt demgemäß die Messunsicherheit um etwa 40%. Hier werden durchschnittliche Studierende in einem Anfängerpraktikum etwa 2,0 Stunden inklusive Auswertung brauchen. Je nachdem, welcher Versuchsaufbau gewählt wird, kann man den Abschwächungskoeffizienten von Aluminium präziser und/oder richtiger bestimmen. Jedenfalls kann selbst ohne Kollimation ein wiederholbarer Wert erzielt werden, der bedingt durch den Dosisbeitrag (Sekundärwechselwirkungsprozesse) um etwa 30% zu niedrig ist, jedoch in der richtigen Größenordnung liegt. Der Grund, warum der Wert mit Bleiabschirmung um etwa 2% höher ist, als ohne liegt ebenfalls an den Sekundärwechselwirkungsprozessen ($K\text{-}\alpha$ -Linie von Blei, Abb. 4) und konnte mit hoher Signifikanz in einem t-Test statistisch gezeigt werden. Der bestmögliche Messwert konnte mit Kollimierung an Quelle und Detektor erreicht werden, wo der Literaturwert ohne Korrektur durch Geometriefaktoren im 2σ -Bereich der Messunsicherheit liegt.

Jedenfalls kann man in diesem Experiment nicht nur die Abschwächung von Gammastrahlung durch Aluminium (oder wahlweise auch andere Materialien) zeigen, die ein wichtiges Grundprinzip im Strahlenschutz darstellen, sondern auch die damit verbundenen Herausforderungen, wie etwa den Dosisbeitrag durch Sekundärwechselwirkungsprozesse. Besonders deutlich wird dieser Effekt sichtbar, wenn man die Ergebnisse von kollimiertem und nichtkollimiertem Strahl am Detektor vergleicht. Hier zeigt sich selbst mit Kollimierung die Notwendigkeit der Korrektur durch einen Geometriefaktor. Das Prinzip der Strahlaufweitung kann ebenfalls gezeigt werden, was man an der Notwendigkeit der Messung der Referenzintensitäten für jede Schichtdicke festmachen kann.

7. Literatur

[1] LD Didactic (2002): Gebrauchsanweisung 559 845 Mischpräparat α , β , γ . Hürth: Eigenverlag.

[2] Homepage des National Nuclear Data Center: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/chartNuc.jsp> (Stand: 05/2018).

[3] LD Didactic (1989): Szintillationszähler für γ - und β -Strahlung. Hürth: Eigenverlag.

[4] Grupen, C. (2008): Grundkurs Strahlenschutz. Praxiswissen für den Umgang mit radioaktiven Stoffen. 4., überarbeitet und ergänzte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

[5] Krieger, H. (2012): Grundlagen der Strahlenphysik und des Strahlenschutzes. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Spektrum.

[6] Demtröder, W. (2010) Experimentalphysik. Kern-, Teilchen- und Astrophysik 4. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

[7] Jahan, Z. et al. (2010): Gamma Shielding by Aluminium. Health Physics Division, Directorate of Systems & Services Pakistan Institute of Nuclear Science & Technology P. O. Nilore, Islamabad, Pakistan December, 2010.

<http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/43/107/43107414.pdf>

(Stand: 05.2018).

[8] LD Didactic (2012): Physik. Produktkatalog. Hürth: Eigenverlag.

Satellitenortung realitätsnah im Klassenzimmer nachempfunden

Tobias Schüttler*, Peter Groll* und Raimund Girwidz*

*Ludwig-Maximilians-Universität München, Theresienstraße 37, 80333 München
Tobias.Schuettler@lmu.de, Peter.Groll@lmu.de und Girwidz@lmu.de

Kurzfassung

Die Satellitenortung, umgangssprachlich auch oft als Satellitennavigation bezeichnet, ist eine Raumfahrttechnologie, die sich innerhalb eines Jahrzehnts, insbesondere durch die rasche Entwicklung entsprechend kleiner Empfangsgeräte und Smartphones, in vielen Bereichen unseres Alltags etabliert hat. Das physikalische Grundprinzip ist zwar relativ einfach, die technische Umsetzung jedoch überaus komplex. Da Physikunterricht, insbesondere in Bundesländern ohne speziellen Technikunterricht, auch die Aufgabe hat, moderne Technologien zu vermitteln, gab es bereits einige Bemühungen, Satellitenortung verständlich, auch über experimentelle Aufbauten, für Schülerinnen und Schüler zugänglich zu machen. Das hier vorgestellte Experimentierset NaviSat schafft einen sehr realitätsnahen Zugang zur Satellitenortung. Erstmals wurde damit ein auf digital kodierten akustischen Signalen basiertes Satellitenortungssystem für den Physikunterricht realisiert. Die Genauigkeit der Ortung liegt auch nach längerem Betrieb im Zentimeterbereich. Im praktischen Einsatz hat sich das Set mit Lehrer- und Schülergruppen aus verschiedenen Bundesländern bereits gut bewährt. Pünktlich zur Inbetriebnahme des Europäischen Satellitenortungssystems Galileo bietet NaviSat damit die Möglichkeit, diese anspruchsvolle aber auch faszinierende Technologie in adäquater Komplexität, verständlich und praktisch zu unterrichten.

1. Satellitenortung im Unterricht

Satellitenortung bezeichnet das Verfahren der Orts- und Zeitbestimmung mit Hilfe von Satelliten. Diese sind Bestandteile von so genannten globalen Satellitennavigationssystemen (GNSS) wie dem US-amerikanischen GPS oder dem Europäischen Galileo System.

In der Vergangenheit wurden bereits verschiedene Möglichkeiten vorgeschlagen, wie diese für den Alltag mittlerweile überaus relevante Technologie einerseits verständlich erklärt werden, andererseits aber auch im Physikunterricht als Messverfahren genutzt werden kann. Im Folgenden wird auf den erstgenannten Aspekt eingegangen. Zu Möglichkeiten der Nutzung von GPS-Empfängern als Messinstrument im Physikunterricht, siehe u.a. Backhaus & Gabriel (2011) oder Braun & Wilhelm (2008).

Müller (2008) zeigt einen Weg, wie die Funktionsweise des Global Positioning Systems anhand von einfachen Prinzipien und geometrischen Betrachtungen in sechs Schritten theoretisch nachvollzogen werden kann. Experimentelle Verfahren spielen bei dieser Herangehensweise, wenn überhaupt, nur eine sehr untergeordnete Rolle. Bei Priemer et al. (2009) hingegen findet man einen experimentellen Aufbau, welcher das der Satellitenortung zugrunde liegende physikalische Grundprinzip, die Messung von Signallaufzeiten, mit akustischen Signalen veranschaulicht. Der Versuchsaufbau auf einer großen Tischplatte ermöglicht dabei eine zentimetergenaue Ortung in drei Dimensionen. Von einer zentralen Steuer- und Messeinheit werden die Signale (Töne) generiert, über Lautsprecher ausgesendet und von einem Mikrofon empfangen. Aus den gemessenen

Signallaufzeiten ergeben sich die drei Schrägentfernungen L_i ($i = 1, \dots, 3$) zwischen den fest installierten Lautsprechern und dem Mikrofon:

$$L_i = c \cdot \Delta t_i = c \cdot (t_{\text{empfangen}} - t_{\text{gesendet}})$$

Die gesuchten Empfängerkoordinaten x_E , y_E und z_E hängen mit der Schrägentfernung aus Gründen der Geometrie wie folgt zusammen:

$$L_i = \sqrt{(x_i - x_E)^2 + (y_i - y_E)^2 + (z_i - z_E)^2}$$

Das so erhaltene Gleichungssystem aus drei Positionsgleichungen für die drei Unbekannten x_E , y_E und z_E kann auf Grund des vereinfachten Aufbaus auf einer Tischplatte mit Sendern auf den Koordinatenachsen leicht elementar gelöst werden und liefert die Empfängerposition.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgen Tobias & Heering (2010), mit einem ebenfalls auf akustischen Signalen basierenden Modellversuch, welcher die Möglichkeit bietet die Satellitenortung zweidimensional im Klassenzimmer, also einem deutlich größeren Raum, nachzuempfinden.

Bei der Evaluierung des darauf basierenden Unterrichtsgangs konnte das Thema „Satellitennavigation“ als interessant für Schülerinnen und Schüler der Mittelstufe identifiziert werden. Es zeigte sich zudem, dass die Probanden der Studie zu einem großen Teil kein adäquates Vorwissen über die Funktionsweise von Satellitenortungssystemen mitbringen. Eine Behandlung dieses gesellschaftsrelevanten Themas im Unterricht erscheint daher angebracht. Allerdings zeigte sich auch, dass sogar nach dem Unterricht zur Satellitennavigation die Hälfte der Probanden nach wie vor an gravierenden Fehlvorstellungen festhielt. Dies könnte zum einen an der

Komplexität und Neuheit des Themas zum anderen aber auch an der kurzen Dauer des Unterrichtsgangs liegen. Um ein tiefgehendes Verständnis der Thematik zu erlangen erscheint es daher nötig, sich intensiv damit auseinanderzusetzen.

Die angesprochenen Versuchsaufbauten unterscheiden sich in einigen Punkten stark von echten GNSS. Neben dem Informationsträger (Schall statt elektromagnetischer Wellen) unterscheidet sich auch das Ortungsverfahren. Dies wird besonders dadurch deutlich, dass zum Senden und Empfangen des Signals ein und dieselbe Steuerungseinheit verwendet wird. Zudem übertragen die Sender lediglich eine Zeitmarke aber keine Nachricht. Beides entspricht bei genauerer Betrachtung eher einer Entfernungsmessung „von außen“ – ähnlich, wie wenn eine äußere Instanz die Laufzeit der Signale vom Satelliten zum Empfänger messen könnte. Auf diese Weise wird ein zentraler physikalischer Aspekt der echten Satellitenortung, nämlich die Notwendigkeit der Uhrensynchronisation, umgangen.

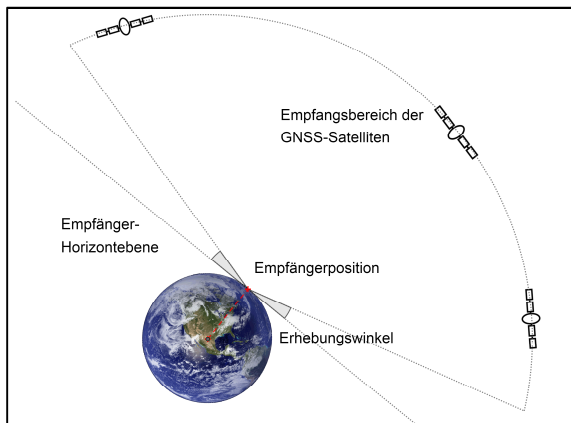


Abbildung 1: Zur Ortung verwendete Satelliten befinden sich immer über der Horizontebene.

Die Wahl der Senderpositionen auf den Achsen eines Koordinatensystems führt zwar zu einer vereinfachten Auswertung aber auch zu einem Verlust an Realitätsbezug: Echte GNSS Satelliten müssen sich oberhalb der Empfängerhorizontebene befinden, um überhaupt empfangen werden zu können. Mansfeld (2013) gibt unter Berücksichtigung von atmosphärischen Störungen einen minimalen Erhebungswinkel von etwa 15° an (Abbildung 1). Die Kenntnis, dass sich die zur Ortung genutzten Satelliten in diesem Sinne immer „über“ dem Empfänger befinden, wird bei der Berechnung der Empfängerposition genutzt, um Mehrdeutigkeiten auszuschließen.

2. Satellitenortung – prinzipielle Funktionsweise

Die Technik von GNSS wie GPS und Galileo ist im Detail sehr komplex und verbindet viele verschiedenen Fachdisziplinen wie Physik, Mathematik, Nachrichtentechnik, Raumfahrttechnik und viele mehr. Einen leicht verständlichen Überblick gibt Schüttler (2014), deutlich tiefere Betrachtungen findet man beispielsweise bei Mansfeld (2013). Im Fol-

genden sollen nur wenige, für das Verständnis des vorgestellten Analogieexperiments wichtige, Aspekte kurz beleuchtet werden.

GNSS werden üblicherweise untergliedert in das Navigations- und anderen Satelliten bestehende Raumsegment, in ein Bodensegment, welches alle Kontrollstationen umfasst, und das Nutzersegment (Abbildung 2). Die Satelliten senden digital kodierte Signale aus, im Falle von GPS und Galileo erfolgt die Modulation der Nachricht durch so genannte Phasenumtastung (eng. Binary Phase Shift Keying, BPSK). Dabei bedeutet ein Phasensprung von 180° im Signal den Wechsel von 0 und 1. Um die einzelnen Satelliten zu unterscheiden und um das sehr schwache Signal aus dem Hintergrundrauschen überhaupt herausfiltern zu können werden für jeden Satelliten spezifische, so genannte Gold-Codes verwendet. Die Gold-Codes haben eine hohe Autokorrelation bei gleichzeitig sehr geringer Kreuzkorrelation und damit ein sehr gutes Signal-Rausch-Verhältnis.

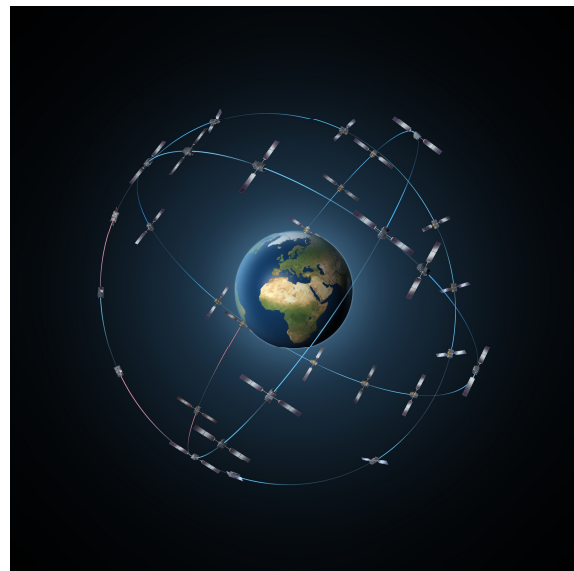


Abbildung 2: Raumsegment: Satellitenkonstellation des Galileo Systems. Quelle: ESA

Der zivile Code des GPS hat eine Länge von 1023 Bit (auch als Chips bezeichnet) und bei einer Übertragungsrate von 1,023 Mchip/s eine Dauer von 1 ms. Bei Galileo ist die Codelänge auf Grund des komplexen Modulationsverfahrens (Binary Offset Carrier, kurz BOC-Verfahren) unterschiedlich. Für das Frequenzband E1, welches mit einer Mittenfrequenz von 1575,42 MHz mit dem zivilen L1-Band des GPS identisch ist, wird ein $4 \cdot 1023 = 4092$ Chips langer Datenkode verwendet. Hinzu kommt im selben Frequenzband ein so genanntes „Pilot-Signal“ mit einer Länge von $100 \cdot 1023 = 102300$ Chips, welches keine Nachricht enthält und lediglich als sehr störsicheres Signal für die Laufzeitmessung dient (Flühr, 2013).

Die von jedem Satelliten übertragene Navigationsnachricht (Super-Frame) ist bei GPS zusammenge-

setzt aus 25 Frames, welche wiederum untergliedert sind in je 5 Subframes. Diese beinhalten eine Datenmenge von jeweils 300 Bit, wodurch sich bei einer Übertragungsrates von 50 Bit/s eine Übertragungsdauer von 6 Sekunden pro Subframe ergibt. Mit dem ersten Subframe werden bei allen Frames insbesondere Parameter zur Korrektur der Laufzeitverzögerung und zur Korrektur der Satellitenzeit, des empfangenen Satelliten übertragen. Die anderen Subframes enthalten die Ephemeridendaten des empfangenen sowie Almanachdaten je eines anderen Satelliten. Durch den Empfang eines vollständigen Frames erhält der Empfänger demnach die Positionsdaten und die Zeitparameter des jeweiligen Satelliten.

Die Aufteilung der Nachricht ermöglicht eine sehr schnelle Ortung, wenn die Ephemeridendaten aller Satelliten bereits bekannt sind. Ist dies, beispielsweise bei einem „Kaltstart“ nicht der Fall, muss der gesamte Superframe mit einer Datenmenge von 37,5 kbit empfangen werden, was 12,5 Minuten dauert.

Die Signallaufzeit wird ermittelt, indem ein im Empfänger generiertes, den Satellitensignalen identisches Signal so lange zeitlich verschoben wird, bis sich eine maximale Korrelation mit dem empfangenen Signal einstellt. Die Zeitspanne, um welche das Empfängersignal verschoben wurde, entspricht dabei der Differenz aus Sendezeitpunkt des jeweiligen Satellitensignals und Empfangszeitpunkt im Empfänger $\Delta\tilde{t}_i$. Die Schrägentfernung zum i -ten Satelliten erhält man durch Multiplikation mit der Lichtgeschwindigkeit:

$$r_i = c \cdot \Delta\tilde{t}_i$$

Durch den Empfang der Daten und der Zeitsignale von mindestens vier Satelliten kann der Empfänger seine Position bestimmen:

$$(c \cdot \Delta\tilde{t}_i)^2 = (x_i - x_E)^2 + (y_i - y_E)^2 + (z_i - z_E)^2$$

Dabei sind zwei Punkte zu berücksichtigen:

- Da die Empfängeruhr im Gegensatz zu den Senderuhren für eine präzise Ortung viel zu ungenau ist, beinhaltet das Gleichungssystem nicht nur die drei Ortskoordinaten des Empfängers als Unbekannte, sondern auch dessen Uhrenfehler Δt_E . Es ist also: $\Delta\tilde{t}_i = \Delta t_i + \Delta t_E$ mit der tatsächlichen Signallaufzeit Δt_i . Zur Lösung des Gleichungssystems sind daher vier Gleichungen und entsprechend die Messung der Daten von vier Satelliten erforderlich.
- Das quadratische Gleichungssystem hat eine zweideutige Lösung (\cong Wurzelterm). Allerdings kann die zweite Lösung verworfen werden, da sich die zugehörige Empfängerposition im Weltall „hinter“ den Satelliten befände.

Die Lösung der Ortsgleichungen kann analytisch, in geschlossener Form angegeben werden. Da hierbei jedoch durch die Wurzelausdrücke nach mehrmaliger Berechnung immer größere Fehler auftreten, ist

ein iterativer Lösungsalgorithmus nach vorangegangener Linearisierung des Gleichungssystems üblicher. Anschaulich, geometrisch betrachtet entspricht die Lösung des Gleichungssystems der Ermittlung des Schnittpunktes von vier Kugeloberflächen (vgl. Abbildung 3).

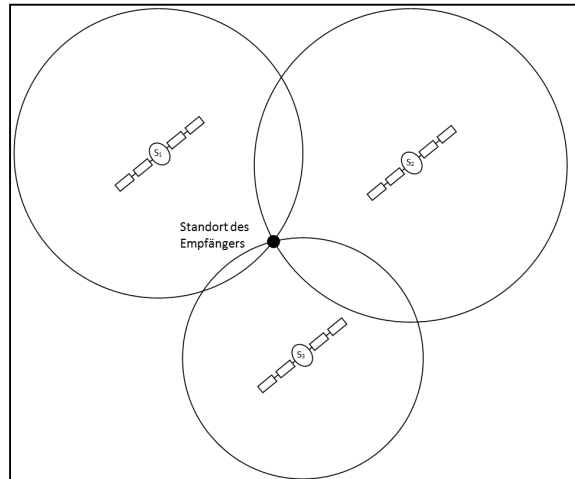


Abbildung 3: Die Lösung der Positionsgleichungen kann in der Ebene geometrisch als Schnitt von Positionskreisen bzw. im Dreidimensionalen von Kugelschalen interpretiert werden.

Die Ortung ist wie jede Messung fehlerbehaftet, wobei doch bemerkenswert ist, wie genau man mit diesem Verfahren die Empfängerposition bestimmen kann. Navigationssatelliten befinden sich mit Bahnhöhen über 20.000 km im mittleren Erdorbit und übertragen ihre Nachrichten mit Funksignalen, welche sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Beim Durchdringen der Ionosphäre werden die Signale gebrochen, was dazu führt, dass der Ausbreitungsweg nicht geradlinig ist. Eine andere Störung entsteht durch Mehrwegeeffekte: Wenn das Signal an sehr glatten Flächen, wie beispielsweise Hauswänden, reflektiert wird, entstehen im Empfänger Mehrdeutigkeiten, welche zur einer weniger genauen Ortung führen. Eine weitere Fehlerquelle entsteht durch die jeweilige vom Empfänger aus beobachtete Satellitengeometrie: Stehen die Satelliten zu dicht beieinander bedeutet dies einen ungünstigen Geometriefaktor (GDOP), was zu einer ungenauen Messung führt.

Die genannten Fehlerquellen sind maßgeblich dafür verantwortlich, dass man mit vier GPS-Satelliten alleine nur auf etwa 10 - 15 Meter genau orten kann. Eine höhere Präzision wird durch die Nutzung von mehr als vier Satelliten zur Fehlerausgleichsrechnung bei den Mehrweg- und Geometriefehlern erreicht. Die ionosphärische Brechung kann anhand von Daten über den Zustand der Ionosphäre (Ionosphären Index) oder durch die Verwendung eines zweiten Signals mit einer anderen Frequenz, wie bei Galileo, korrigiert werden. Dadurch können GNSS-Empfänger Ortungen mit Genauigkeiten um 5 Meter durchführen.

Eine kritische Komponente stellen auf Grund der hohen Anforderungen an die Präzision der Laufzeitmessung die Satellitenuhren dar. Diese sind hochgenaue Atomuhren mit Abweichungen von nur etwa 10^{-14} . Größere Fehler bei den Satellitenuhren führen zu unbrauchbaren Messungen, weshalb sie vom Bodensegment sehr genau überwacht werden. Eine Besonderheit des Galileo Systems wird es sein, dass durch ein sehr engmaschiges Netz an Kontrollstationen, Nutzer innerhalb von maximal 6 Sekunden eine Information über die Systemintegrität erhalten werden. Dies ist bei GPS bislang noch nicht der Fall – eine entsprechende Information darüber, ob ein Satellit, beispielsweise wegen eines Uhrenfehlers, unbrauchbare Signale aussendet, erhält man hier erst nach einigen Stunden.

Die Anforderungen an die Satellitenuhren sind so hoch, dass auch relativistische Effekte, welche auf Grund der Bahnhöhe (Gravitationspotential) und der Geschwindigkeit auftreten, berücksichtigt werden. Hierzu werden die Uhrenfrequenzen nach folgender Formel korrigiert (vgl. Giorgi et al., 2016):

$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)(r) = -\left(\frac{3GM}{2ac^2} + \frac{\Phi_E}{c^2}\right) + \frac{2GM}{c^2}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{r}\right)$$

Dabei ist Δf die relativistische Frequenzverschiebung der Grundfrequenz f , G die Gravitationskonstante, M die Masse der Erde, c die Lichtgeschwindigkeit, a die große Halbachse der Satellitenbahn, r der momentane, also zeitabhängige, Abstand des Satelliten vom Gravitationszentrum und Φ_E das effektive Gravitationspotential der Erde.

Ohne diese Korrektur würde sich die relativistische Uhrendrift der Satellitenuhren auf knapp $40 \mu\text{s}$ pro Tag gegenüber Referenzuhren auf der Erde summieren. Eine Panne beim Start der ersten beiden Galileo-FOC Satelliten (Full Operational Capability), 2014, konnte genutzt werden, um die relativistischen Einflüsse auf die Satellitenuhren direkt zu untersuchen. Die Satelliten Doresa und Milena (E14 und E18) wurden auf Grund eines Fehlers in der Oberstufe der Trägerrakete in einen falschen, stark elliptischen Orbit eingeschossen. Ihre Uhren zeigen nach aktuellen Messungen mit einer Abweichung von Bruchteilen einer Nanosekunde das in der obigen Formel beschriebene Verhalten. Details zu den relativistischen Effekten bei der Satellitenortung findet man bei Schüttler (2018).

3. NaviSat – ein realitätsnahes Analogieexperiment zur Satellitenortung im Klassenzimmer

Bereits die hier nur sehr oberflächliche Behandlung der Satellitenortung zeigt die Komplexität der Technologie auf. Um die ihr aus Sicht der Autoren inwohnende Faszination für Unterrichtszwecke zugänglicher zu machen, wurde im Rahmen des am Lehrstuhl für Didaktik der Physik an der LMU München durchgeführten Projektes SatTec, das Analogieexperiment „NaviSat“ entwickelt. Dabei wurde großer Wert darauf gelegt, die Funktionswei-

se von echten Satellitenortungssystemen möglichst realitätsnah abzubilden.

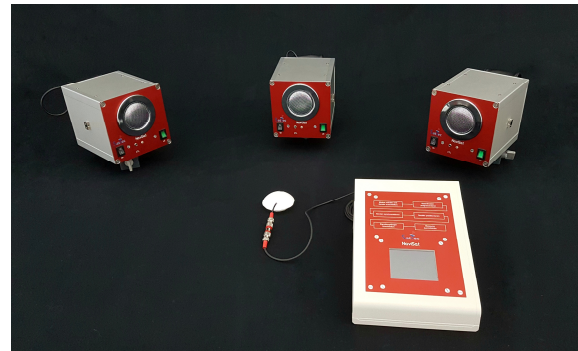


Abbildung 4: Das NaviSat System besteht im Wesentlichen aus drei Sendern (Satelliten) und einer zentralen multifunktionalen Kontrollstation

Das System besteht aus drei unabhängigen, durch Akkus mit Energie versorgten Sendern ($\hat{=}$ Satelliten), einer zentralen Kontrollstation, welche in Verbindung mit dem Ortungsmikrofon auch als Empfänger fungiert, sowie dem benötigten Kleinmaterial, wie Anschlusskabeln und einem Ladegerät (Abbildung 4). In einem stabilen Transportkoffer verpackt wird es nach einer ausgiebigen Erprobungs- und Optimierungsphase Schulen kostenfrei, leihweise zur Verfügung gestellt. Zu diesem Zweck werden derzeit zehn Sets produziert, welche voraussichtlich Ende 2018 verfügbar sein werden.

Jeder Sender überträgt eine akustische, hörbare, digital kodierte Navigationsnachricht bestehend aus der jeweiligen Sendernummer, den zugehörigen, zuvor einzuprogrammierenden Koordinaten, x_i , y_i und z_i , ($i = 1, \dots, 3$), der Systemzeit in Minuten, eines Zeitkorrekturparameters und einer Prüfsumme (Abbildung 5).

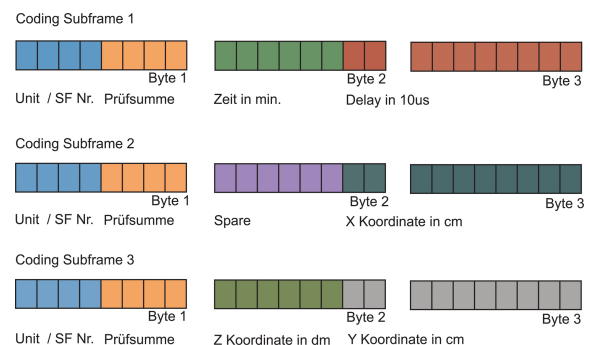


Abbildung 5: Navigationsnachricht eines Senders

Die Nachricht (ein Frame) eines Senders besteht aus drei Subframes. Diese werden in Zeitabständen von 15 Sekunden ausgesendet und bestehen aus je drei Byte Dateninhalt, welche sich jeweils in zwei 4 Bit große, sogenannte „Nibble“ unterteilen (Abbildung 6).

Die kleinste Informationseinheit von 4 Bit ergibt sich aus dem Kodierungsverfahren. Dabei musste von der bei echten GNSS genutzten Phasenumtastung abgewichen werden, da sich diese bei akusti-

schen Signalen als zu empfindlich gegenüber Reflexionen des Signals an Oberflächen herausstellte. Außerdem erwies sich das BPSK Signal als sehr unangenehm anzuhören und somit für den Unterricht ungeeignet. Die Übertragung der Navigationsnachricht erfolgt bei NaviSat durch kurze Sendephasen und nachfolgende Pausen. Das akustisch übertragene Signal ist digital frequenzmoduliert auf Basis von vier Frequenzen (1, 2, 3 und 4 kHz).

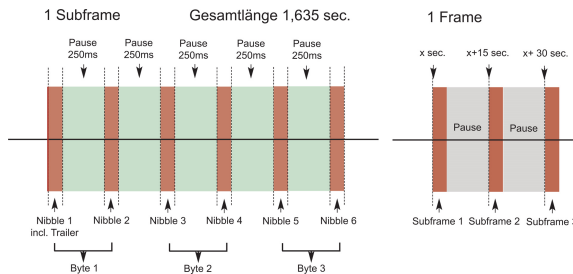


Abbildung 6: Zusammensetzung der Nachricht in 3 Subframes. Diese beinhalten 3 Byte an Information.

Es werden dabei vier unterschiedliche Sinustöne mit einer Gesamtdauer von 65 ms erzeugt. Das Signal ist immer aus einer bestimmten Reihenfolge aller vier Frequenzen zusammengesetzt und nutzt $4! = 24$ möglichen Permutationen (ohne Wiederholung) zur Datenkodierung (Abbildung 7).

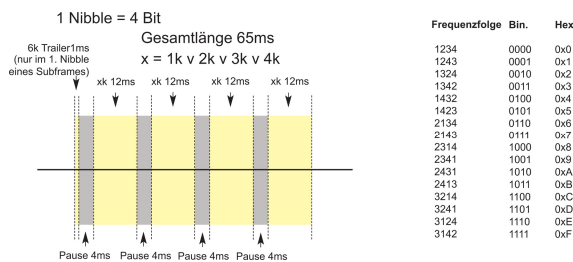


Abbildung 7: Signalkodierung mit vier unterschiedlichen Frequenzen. Von den 24 möglichen Permutationen werden nur 16 (4Bit) genutzt.

Um den Signalbeginn eindeutig zu identifizieren, wird im ersten Nibble jedes Subframes ein 1 ms langes Trailersignal mit einer Frequenz von 6 KHz übertragen. Mittels dieses Trailers kann der Empfangszeitpunkt mit einer Genauigkeit besser 0,01 ms bestimmt werden. Nachdem der Empfänger das komplette Signal empfangen hat, beginnt er die Nachricht zu dekodieren.

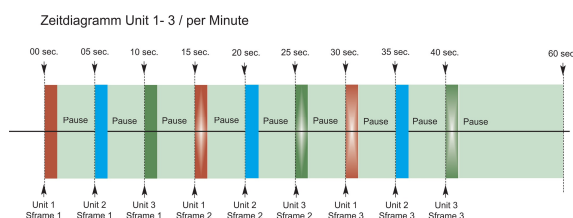


Abbildung 8: Zeitliche Abfolge des NaviSat Signals.

Die für die Ortung notwendige Kenntnis der Signallaufzeit erhält der Empfänger also aus dem Trailer Signal. Die Sender senden ihre Signale in einer genau festgelegten zeitlichen Reihenfolge.

(Abbildung 8). Die Uhren aller Sender (Satelliten) werden vor der Messung synchronisiert.

Nach dem Empfang der Daten von allen drei Sendern hat der Empfänger somit Kenntnis über deren Position im Raum (Koordinaten x_i , y_i und z_i , $i = 1, \dots, 3$) und die jeweiligen Signallaufzeiten Δt_i . Multipliziert mit der Schallgeschwindigkeit in Luft ($c \approx 340 \text{ m/s}$) ergeben sich daraus die Schrägentfernungen r_i und letztlich die Empfängerposition.

4. NaviSat – GNSS: Gemeinsamkeiten und Unterschiede

Das Ortungsverfahren des Analogieexperiments NaviSat entspricht weitestgehend dem echter GNSS: Die Messung des Empfängers ist vollkommen autonom, d.h. es gibt keinerlei Verbindung vom Empfänger zum Sender. Es findet nur einseitige Kommunikation (Empfang!) zwischen beiden statt. Dieser Punkt ist besonders hervorzuheben, da eine verbreitete Fehlvorstellung darin besteht, dass GNSS-Empfänger in irgendeiner Form mit den Satelliten kommunizieren würden (vgl. Tobias & Heering, 2010). Es handelt sich jedoch dabei um Systeme, bei welchen lediglich Datenempfang stattfindet.

Die Navigationsnachricht des NaviSat ist von der Grundstruktur her der von GNSS recht ähnlich. Der Datengehalt ist hier, den Anforderungen angepasst, deutlich geringer. Als Modulationsverfahren erwies sich eine Phasenumtastung für akustische Signale als zu störeffindlich und für den Unterricht ungünstig. Insbesondere unvermeidliche Reflexionen des Schalls im Raum führten bei Probemessungen zu unbrauchbaren Ergebnissen. Es wurde daher ein eigenständiges Modulationsverfahren auf Basis von vier diskreten Frequenzen völlig neu entwickelt.

Bei GNSS ist der Empfang des Signals auf Grund der äußerst geringen Intensität von lediglich etwa 10^{-16} W/m^2 nur durch spezielle Verfahren (Autokorrelation) möglich. Analog dazu musste auch beim NaviSat durch die Signalstruktur und die Filterung im Empfänger sichergestellt werden, dass die Informationen trotz allenthalben vorhandener Störgeräusche und Reflexionen empfangen werden können.

Die Hauptfehlerquellen bei der Satellitenortung sind die ionosphärische Refraktion, Mehrwegeeffekte und bei ungünstigen Konstellationen auch die Satellitengeometrie (GDOP).

Die beiden letztgenannten Fehlerquellen spielen auch beim Analogieexperiment eine große Rolle. So sollte beim Aufbau der Sender im Klassenzimmer darauf geachtet werden, dass deren Positionen sinnvoll, also möglichst ähnlich einer echten Satellitenkonstellation gewählt werden. Reflexionen, insbesondere in der Nähe des Empfänger-mikrofons, können die Dauer bis zur Ortung, ähnlich wie bei GPS, erheblich erhöhen. Mit dem NaviSat System wird eine Ortungsgenauigkeit von 3-5 cm angestrebt und auch erreicht

Ebenso wie bei der Satellitenortung auch, hat die Ganggenauigkeit der Senderuhren eine entscheidende Bedeutung. Das NaviSat System ist so konzipiert, dass die Ortung auch noch nach einer längeren Betriebszeit auf wenige Zentimeter genau erfolgen kann. Hierzu sind Uhren erforderlich, welche in einer Stunde eine Drift aufweisen, die im ungünstigsten Fall im Bereich von Zehntel Millisekunden liegen darf. Das bedeutet eine Ganggenauigkeit im Bereich von 10^{-7} (ein Zehntel ppm). Erreicht wird diese Genauigkeit durch hochwertige, temperaturkompensierte Schwingquarze (TCXO), welche zusätzlich bei der Herstellung der Sender mit einem beheizten Quarzoszillator (OCXO) kalibriert werden. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass die Senderuhren, beispielsweise während einer Doppelstunde Physikunterricht, immer noch ausreichend stabil laufen.

5. Einsatz und Experimentiermöglichkeiten

Mit dem NaviSat System können verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden durchgenommen werden. Die Ortung kann dabei vollkommen automatisch erfolgen, es können aber auch nur teilweise oder gänzlich unverarbeitete Rohdaten ausgegeben werden, aus welchen dann von den Lernenden selbst die Position bestimmt wird.

Die Messung unterscheidet sich zudem darin, ob zuvor die Senderuhren mit der Empfängeruhr synchronisiert wurden oder nicht. Im erstgenannten Fall kann mit den drei Sendern eine dreidimensionale Ortung im Raum erfolgen, ist die Empfängeruhr asynchron, also fehlerbehaftet, können mit NaviSat zwei Ortskoordinaten und die Systemzeit bestimmt werden.

Die einfachst denkbare Messung besteht in einer eindimensionalen Ortung auf einer Achse mit vorheriger Uhrensynchronisation. Das System besteht dann lediglich aus einem Sender und der Empfangseinheit. Vor der Messung wird ein willkürlich gewählter Ursprung des sodann verwendeten Koordinatensystems festgelegt, von dem aus der Abstand des Senders gemessen wird. Der Sender wird mittels des Touchscreens der Kontrollstation programmiert, wobei seine späteren Koordinaten (in diesem Fall lediglich die x-Koordinate) übertragen und die Uhren synchronisiert werden.

Anschließend wird der Sender von der Kontrollstation getrennt und mit Stativmaterial an seine Position gestellt. Von dort aus überträgt er nun seine Koordinaten, welche vom Ortungsmikrofon an der Kontrollstation aufgenommen werden. Die Daten werden nun automatisch dekodiert und daraus die Empfängerposition berechnet. Da die Rechnung sehr einfach ist, kann sie problemlos auch von den Lernenden vorgenommen werden. Sie erhalten dazu in der etwas schwierigeren Variante lediglich die gemessene Signallaufzeit und führen die Berechnung selbst durch. Alternativ kann die Ortung auch geo-

metrisch als Schnitt des Positionskreises mit der gewählten Achse erfolgen, wofür sich besonders dynamische Geometriesoftware (DGS) eignet (Abbildung 9).

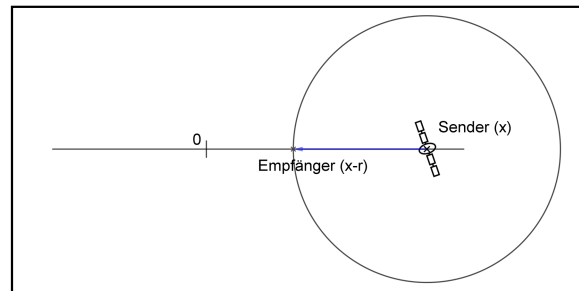


Abbildung 9: Eindimensionale Ortung auf einer Achse.

Im nächsten Schritt, erfolgt eine zweidimensionale und eine dreidimensionale Ortung nach Uhrensynchronisation. Während erstgenannte ebenfalls noch recht einfach rechnerisch oder geometrisch selbst ausgewertet werden kann ist das Lösen der drei quadratischen Gleichungen im dreidimensionalen Fall anspruchsvoll und daher Lernenden mit entsprechenden mathematischen Fähigkeiten vorbehalten. Eine dreidimensionale Auswertung mit entsprechender Geometriesoftware befindet sich derzeit im Entwicklungsstadium.

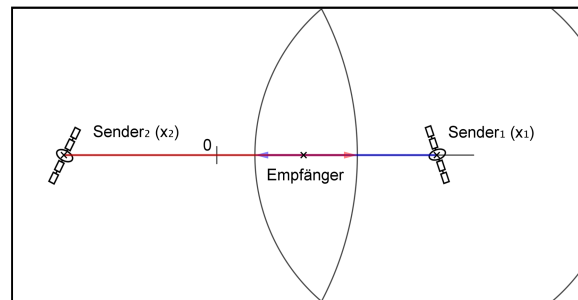


Abbildung 10: Eindimensionale Ortung mit einer vorgehenden Empfängeruhr. Die Signallaufzeiten werden überschätzt. Durch sukzessive Anpassung der Radien ($\hat{=}$ Synchronisieren der Uhr) wird die Empfängerposition geometrisch bestimmt.

Als etwas forderndere Aufgabe, kann die Synchronisation der Empfängeruhr nachempfunden werden. Hierzu kann ebenfalls DGS verwendet werden. Abbildung 10 zeigt, dass sich bei einer vorgehenden Empfängeruhr mit zwei Sendern kein gemeinsamer Schnittpunkt ergibt, da die Signallaufzeiten überschätzt werden. Dieser Fehler kann behoben werden, indem man die Radien der Positionskreise sukzessive um denselben Wert so lange verkleinert, bis sich die Kreise in einem Punkt auf der Achse schneiden. Praktisch kann man dies einfach durch Nutzung eines Schiebereglers in der DGS realisieren. Der Wert Δr , um welchen die Radien korrigiert werden müssen, ist proportional zum Uhrenfehler der Empfängeruhr:

$$\Delta r = c \cdot \Delta t_E$$

Das gleiche Prinzip kann mit dem NaviSat System auch noch für eine zweidimensionale Ortung mit nicht synchronisierter Empfängeruhr genutzt werden. Dabei ergeben sich dann drei Positionskreise ohne gemeinsamen Schnittpunkt, welche ebenfalls mittels DGS sehr gut visualisiert werden können (Abbildung 11). Alternativ kann auch das Gleichungssystem gelöst werden, was allerdings recht anspruchsvoll ist.

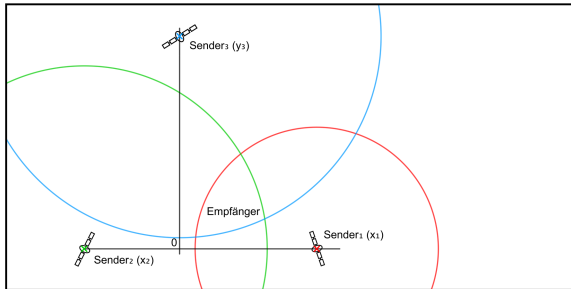


Abbildung 11: Zweidimensionale Ortung mit asynchroner Empfängeruhr: Die Positionskreise haben keinen gemeinsamen Schnittpunkt. Die Radien werden so lange um denselben Betrag verkleinert, bis sich alle drei Kreise in einem Punkt schneiden. Dieser ist die Empfängerposition. Der Wert, um welchen die Radien verkleinert wurden, wird verwendet um die Empfängeruhr zu synchronisieren.

Die aktuelle Version des NaviSat Systems bietet neben verschiedenen Test- und Präsentationsmodi auch noch die Möglichkeit, eine oder mehrere Senderuhren nach einem einstellbaren Schema vorgehen zu lassen. Auf diese Weise kann der große Einfluss der Messgenauigkeit auf das Ortungsergebnis sehr gut nachvollzogen werden. Diese Einstellung setzt bereits einige Erfahrung mit dem System, insbesondere mit der korrekten Positionierung der Sender voraus, da es wichtig ist, die Messungen korrekt zu interpretieren.

Die vorgestellten Funktionen wurden und werden derzeit im DLR_School_Lab, dem Schülerlabor des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Oberpfaffenhofen mit Schüler*innen der Mittel- und Oberstufe ausgiebig erprobt. Ziel der Erprobung ist zum einen, technische Schwierigkeiten zu identifizieren und zu beheben, zum anderen aber insbesondere auch die Ausarbeitung, Erprobung und Optimierung einer verständlichen und möglichst selbst-erklärenden Versuchsbeschreibung.

6. Weitere Ziele und Ausblick

Das NaviSat System wurde mittlerweile erfolgreich mit einer Vielzahl von Schülerinnen und Schülern sowie Lehrkräften durchgeführt und wurde dabei generell sehr gut angenommen. Eine systematische Evaluierung eines entsprechenden Unterrichtsgangs hinsichtlich der zu vermittelnden Kompetenzen und Lernziele steht aber derzeit noch aus. Zuvor werden noch weitere Tests nötig sein. So soll unter anderem die Frage, inwiefern und wie realitätsnah eine relativistische Uhrendrift mit dem System nachgestellt werden kann, noch genauer untersucht werden.

Ein weiterer Aspekt, der zurzeit noch erprobt wird, ist die mögliche Nutzung von Smartphones als Empfänger. Dies würde das Experiment für die beteiligten Schüler noch interaktiver machen. In der derzeitigen Fassung besteht bereits die Möglichkeit, alle Anzeigen der Kontrollstation über USB und ein entsprechendes Monitorprogramm auf einen PC und schließlich zum Beamer zu übertragen (Abbildung 12).

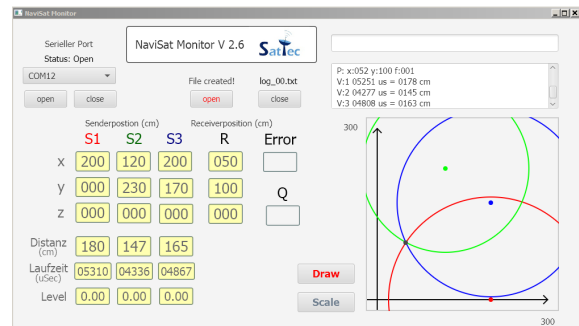


Abbildung 12: NaviSat-Monitorprogramm.

Die Durchführung einer Ortung mit dem eigenen Smartphone würde die Lernenden allerdings noch wesentlich stärker in das Geschehen einbinden.

Ein denkbarer „Spinn-Off“ des Systems ist die Möglichkeit, grundlegende Experimente zur digitalen Nachrichtenübertragung durchzuführen. Die Dekodierung des Signals kann ähnlich wie beim Morsemithilfe einer Kodetabelle erfolgen.

Für die Übergabe der zehn derzeit in Produktion befindlichen Sets an Schulen ist Ende 2018 eine Lehrerfortbildung vorgesehen – Interessenten daran sind herzlich eingeladen, den Hauptautor dieses Beitrags zu kontaktieren. Letztlich wird erst der Einsatz der Sets im echten Unterrichtsgeschehen aufzeigen, welche Anpassungen noch zu erfolgen haben, um die Satellitennavigation tatsächlich ins Klassenzimmer zu bringen. Im Alltag ist sie längst angekommen. Aus Sicht der Autoren ist es auch eine wichtige Aufgabe des Physikunterrichts, die Grundlagen moderner Technik verständlich und fachlich korrekt zu erklären. Das NaviSat System soll dabei helfen, dies im Falle der Satellitennavigation auf eine interessante und experimentell nachvollziehbare Art und Weise zu tun.

7. Literatur

- [1] Braun, M. & Wilhelm, T. (2008). Das GPS-System im Unterricht. Praxis der Naturwissenschaften-Physik in der Schule, 57(4), 20-27.
- [2] Backhaus, U., & Gabriel, P. (2011). Einsatzmöglichkeiten moderner GPS-Geräte im Mechanikunterricht. PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung.
- [3] Flühr, H. (2013). Avionik und Flugsicherungstechnik: Einführung in Kommunikationstechnik, Navigation, Surveillance. Springer-Verlag.
- [4] Giorgi, G., Lülff, M., Günther, C., Herrmann, S., Kunst, D., Finke, F. & Lämmerzahl, C. (2016).

- Testing general relativity using Galileo satellite signals. SignalProcessing Conference (EUSIPCO), 2016 24th European (pp. 1058-1062). IEEE.
- [5] Mansfeld, W. (2013). *Satellitenortung und Navigation: Grundlagen und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme*. Springer-Verlag.
- [6] Müller, R. (2008): Physik schafft Orientierung. Das Global Positioning System (GPS). *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik* 19/105-106, S. 89-91
- [7] Priemer, B., Schmidt, T. & Sniezyk, J. (2009). GPS-Navigation – ein akustisches Analogieexperiment. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 6/62, 346-350
- [8] Schüttler, T. (2014). *Satellitenavigation: Wie sie funktioniert und wie sie unseren Alltag beeinflusst*. Springer-Verlag.
- [9] Schüttler, T. (2018). *Relativistische Effekte bei der Satellitenavigation – Von Einstein zu GPS und Galileo*. Springer-Verlag.
- [10] Tobias, V. & Heering, P. (2010). SCHULPRAXIS-Satellitenavigation im Klassenraum. *Der Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht*, 63(1), 16.

Danksagung

Das Projekt SatTec, zu dem die vorliegende Arbeit zuzuordnen ist, wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) unter dem Förderkennzeichen 50RO1601 gefördert. Den Projektpartnern des DLR gilt ein herzlicher Dank für die konstruktive Diskussion und die Unterstützung bei der Erprobung des entwickelten Konzeptes im Schülerlabor.

Kim-Alessandro Weber*, Rüdiger Scholz[†]

*Institut für Didaktik der Mathematik und Physik, Leibniz Universität Hannover

[†]Institut für Quantenoptik, Leibniz Universität Hannover

weber@iqo.uni-hannover.de, r.scholz@iqo.uni-hannover.de

Kurzfassung

Experimente zur Statistik von Lichtfluktuationen bieten Möglichkeiten spezifische Perspektiven der experimentellen Quantenoptik auszuprobieren. Speziell die Untersuchung klassischer Lichtfelder kann hierbei weiterführende Experimente mit einzelnen Photonen in der Quantenoptik einleiten. Zu diesem Zweck wird in dem vorliegenden Artikel eine pseudothermische Lichtquelle vorgestellt und statistisch charakterisiert. Die Quelle zeichnet sich dadurch aus, dass sie gleichermaßen einfach wie durchschaubar aufgebaut ist.

Originaltitel/Konferenzbeitrag: Undergraduate experiments: Single photon optics

In light of the vocational relevance of the bachelor degree there is a noticeable disproportion: While wave optics experiments are absolute standard in undergraduate labs, the explicit observation of the quantum nature of light seems to be still challenging today. Here we present a series of experiments from classical optics to real quantum optics opening the door to a contemporary understanding of optical physics. The experiments are governed by the analysis of interferometry and coincidence counting, determining the value of the second order correlation function. Important parts of the analysis focus on noise measurements and the influence of coincidence schemes on the uncertainty of the measurements.

1. Einleitung: Befund und Motivation

In den letzten Jahrzehnten hat sich im Bereich der Quantenphysik unfassbar viel verändert und entwickelt. Zahlreiche technologische Möglichkeiten waren vor einigen Jahrzehnten völlig undenkbar, man denke nur an die mediengängigen Beispiele Quantenkommunikation oder Quantenkryptographie. In ihrem Grundsatzpapier beschreibt die „Nationale Initiative „Quantentechnologie – Grundlagen und Anwendungen“ (QUTEGA)“ vier Säulen für ein auf Forschung und Entwicklung ausgerichtetes Quantentechnologieprogramm: Quantenkommunikation, Quantencomputer, Quantensensorik und Quantensimulation (QUTEGA, 2017). Damit wird die Dynamik zumindest spürbar, die dieses wissenschaftliche Feld auszeichnet. Am Schluss ihres Papiers formulieren die QUTEGA-Autoren ihre Anforderungen an Öffentlichkeitsarbeit und deren Verankerung mit Bildungsanstrengungen bis in die Lehrplanentwicklung hinein:

„Die Quantenphysik wird in der Öffentlichkeit zurzeit eher als wissenschaftliche Kuriosität wahrgenommen. Das gilt auch für weite Kreise in der Wirtschaft. Insbesondere die mit dem Begriff ‚Zweite

Quantenrevolution‘ verbundenen Konzepte und Potentiale für Anwendungen (d.h. zum Beispiel das Superpositionsprinzip und die Eigenarten des Quantenmessprozesses) sind weitgehend unbekannt. Aus der Sicht der QUTEGA-Initiative scheint ... eine besondere und gemeinsame Bildungsanstrengung außerordentlich wichtig, um sowohl die technisch interessierte als auch die breitere Öffentlichkeit mit diesem Thema vertraut zu machen. Konkret sollten diese Anstrengungen versuchen, die Quantenphysik mehr als bisher in den Lehrplan der Schulen zu integrieren, ...“ (QUTEGA, 2017)

Experimente zur Statistik von Lichtfluktuationen bieten hervorragende Möglichkeiten spezifische Perspektiven der experimentellen Quantenoptik auszuprobieren. Eine hervorragende Passung von Experiment und Theorie zeichnet diese Experimente für Ausbildungszwecke aus.

Scholz, Friege und Weber (Scholz, 2018) skizzieren einen „pedestrian approach“ zur Quantenoptik mit Realexperimenten, von der klassischen Wellenoptik bis zur Quantenoptik mit Einzelphotonen. Die Charakterisierung von Lichtquellen anhand ihrer Photo-

Photonenstatistik	Klassisches Äquivalent	$I(t)$	$(\Delta n)^2$
Superpoisson-Licht	Thermisches Licht	Zeitl. variierend	$> \bar{n}$
Poisson-Licht	Kohärentes Licht	Konstant	\bar{n}
Sub-Poissonlicht	kein	Konstant	$< \bar{n}$

Tabelle 1 Unterscheidung von Strahlungsfeldern nach ihrer Photonenzustatistik (vgl. Fox)

nenstatistik ist ein zentrales Element des Kurses. Anhand der Standardabweichung der Photonenstatistik werden gemäß Tabelle 1 drei Fälle unterschieden. Um den Weg in die Quantenoptik zu ebnen, erfahren die ersten beiden Fälle (kohärentes Licht bzw. thermisches Licht) besondere Aufmerksamkeit. Die Untersuchung klassischer Lichtfelder setzt auf experimentelle Konzepte, die eben auch in der Quantenoptik eingesetzt werden. Hier benötigt man Lichtquellen, deren charakteristische thermische bzw. kohärente Fluktuationen gut messbar sind.

Liegen die Zeitskalen der Fluktuationen weit unterhalb der zeitlichen Auflösung der Detektoren oder ist die Bestrahlungsstärke des Lichtfeldes konstant, wird man stets eine Poisson-Verteilung der Photoelektronen messen (1.).

Hierzu eignen sich auch LED. Diese sind zwar den thermischen Lichtquellen zuzuordnen, ihre Fluktuationen spielen sich jedoch auf Zeitskalen ab, die durch den Detektor zeitlich nicht aufgelöst werden können (10^{-15} s). Dies gilt nicht nur für LED, sondern ist typisch für thermische Lichtquellen. Ein Zugang zu der Bose-Einstein-Verteilung in der Ausbildung ist daher direkt nur mit relativ viel Aufwand möglich. Ein Ausweg bietet die Untersuchung von *pseudothermischem Licht*.

Ein häufig gewählter Weg zur Erzeugung derartigen Lichts verwendet die Speckle-Streuung kohärenter Laserstrahlung durch eine rotierende Milchglascheibe (Martienssen & Spiller, 1962; Scholz et al., 2016). Hier stellen wir ein alternatives Verfahren vor, das deutlich leichter realisierbar ist und dabei sehr kostengünstig.

2. Thermisches Licht

Das Modell. Die Fluktuationen thermischen Lichts können mittels eines „Random-Phasor“-Modells erklärt werden (Loudon, 2000). Es werden ν emittierende Atome betrachtet, die elektromagnetische Wellen emittieren. Den Amplituden werden Zeiger zugeordnet. Jeder atomare Stoß unterbricht für die Dauer des Stoßes die Emission und erzeugt somit einen Phasensprung zufälliger Größe des emittierten Wellenzuges. Betrachtet man nur eine Polarisationsrichtung können die Zeiger einfach algebraisch addiert werden. Loudon (Loudon, 2000) zeigt, dass die resultierende Zeigerlänge durch eine zweidimensionale Gaußverteilung beschrieben werden kann. Die resultierende Bestrahlungsstärke ist proportional zum Quadrat der resultierenden Zeigerlänge.

Die Photonenstatistik. Betrachtet wird eine einzelne Mode mit der Frequenz ω innerhalb eines Hohlraums. Die Mode wird physikalisch als harmonischer Oszillator beschrieben und entsprechend quantisiert. Für die Energie-Eigenwerte ergibt sich:

$$E_n = (n + 1/2)\hbar\omega$$

Das Boltzmann-Gesetz beschreibt die Wahrscheinlichkeit n Photonen in der Mode zu finden:

$$P_\omega(n) = \frac{\exp(-E_n/k_b T)}{\sum_{n=0}^{\infty} \exp(-E_n/k_b T)}$$

Setzt man den Wert der geometrischen Reihe im Nenner ein kann die Wahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der mittleren Photonenzahl \bar{n} dargestellt werden (Bose-Einstein-Verteilung) (Fox, 2006):

$$P_\omega(n) = \frac{\bar{n}^n}{(\bar{n}+1)^{n+1}} \tag{1}$$

Als Varianz ergibt sich (Fox, 2006):

$$(\Delta n)^2 = \bar{n} + \bar{n}^2$$

Die Korrelationsfunktion zweiter Ordnung. Die Korrelationsfunktion zweiter Ordnung $g^{(2)}(\tau)$ beschreibt die Korrelation der Bestrahlungsstärke zweier um τ gegeneinander verzögerter Wellenzüge. Der Wert für $\tau = 0$ beschreibt die Feldfluktuationen:

$$g^{(2)}(0) = \frac{\langle I_1 I_2 \rangle}{\langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle} = \frac{\langle N_1 \cdot N_2 \rangle}{\langle N_1 \rangle \langle N_2 \rangle} \tag{2}$$

Dabei bezeichnen N_1 und N_2 die Zählraten zweier Detektoren D_1 und D_2 . Diese Zählraten werden im Rahmen einer einfachen semiklassischen Detektortheorie als proportional zur den Bestrahlungsstärke am Detektoreingang angenommen (Loudon, 2000). Aus Gl. (1) lässt sich eine Beziehung zwischen $g^{(2)}(0)$ und der mittleren Photonenzahl \bar{n} im Strahlungsfeld und Varianz der Photonenstatistik $(\Delta n)^2$ ableiten (Loudon, 2000):

$$g^{(2)}(0) = 1 + \frac{(\Delta n)^2 - \bar{n}}{\bar{n}^2} \tag{3}$$

Jetzt wird klar, dass diese Größe einen trennscharfen Indikator für die Art des Lichts liefert. Setzt man für Einzelphotonenzustände $n = 1$ und $(\Delta n)^2 = 0$ ein (genau bekannte Zahl der Photonen) folgt $g^{(2)}(0) = 0$. Entsprechend erhält man für kohärentes Licht (Poisson verteilte Photonenzahl) $(\Delta n)^2 = \bar{n}$ und damit $g^{(2)}(0) = 1$. Thermisches Licht rauscht stärker als das kohärent Licht des idealen Lasers: $(\Delta n)^2 = \bar{n} + \bar{n}^2$. Die Korrelationsfunktion hat damit den Wert $g^{(2)}(0) = 2$.

Lichtart	\bar{n}	$(\Delta n)^2$	$g^{(2)}(0)$
Einzelphoton	1	0	0
Kohärent	\bar{n}	\bar{n}	1
Thermisch	\bar{n}	$\bar{n} + \bar{n}^2$	2

Tabelle 2 Übersicht – Lichtarten und ihre statistischen Eigenschaften

Zusammengefasst. Eine pseudothermische Lichtquelle führt bei der Untersuchung mit einem Binärdetektor zu einer Verteilung gemäß Gl. (2). Eine Korrelationsanalyse mittels zweier Detektoren führt zu einem Wert $g^{(2)}(0) = 2$. Die im Folgenden vorgestellte Quelle wird hinsichtlich dieser beiden Charakteristika untersucht.

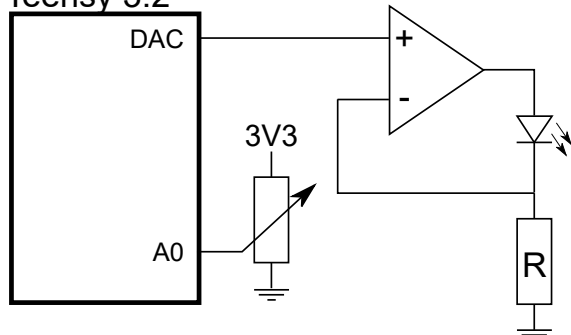
3. Eine neue Lichtquelle für pseudothermisches Licht

Als pseudothermisch bezeichnet man Licht, dessen Intensität, gemäß des im Abschnitt 2 beschriebenen Modells, moduliert wird. Dementsprechend eignen sich stochastische Modulationsverfahren: Das Kohärente Licht eines Lasers wird hierbei an stochastisch bewegten Zentren gestreut – ein stochastisch in der Zeit variierendes Speckle-Muster entsteht. Zur Umsetzung eignet sich zum Beispiel die Streuung an einer rotierenden Milchglasscheibe oder an Partikeln die eine Brownsche Bewegung ausführen (Milchemulsion) (Martienssen & Spiller, 1964).

Durch die beschriebenen Verfahren rücken jedoch zahlreiche Einflussfaktoren in den Fokus: Welches Milchglas eignet sich am besten, wie viel Milch sollte in der Emulsion gelöst sein, welche Temperatur sollte diese haben usw. – durchaus wichtige Fragen, die jedoch von der Kernfrage wegführen.

Bei der hier vorgestellten Lichtquelle wird das stochastische Verhalten als Monte Carlo Methode mit Hilfe eines Mikroprozessors simuliert. Mit der simulierten Bestrahlungsstärke wird anschließend der Diodenstrom einer LED moduliert. Hierzu wurde eine spannungsgesteuerte Stromquelle realisiert (Schaltung 1), welche direkt an dem Digital zu Analog Konverter Ausgang des Mikroprozessors (Teensy 3.2) betrieben wird. Als Variable kann die mittlere Zeit zwischen den Stößen über ein Potentiometer eingestellt werden.

Teensy 3.2



Schaltung 1 Der Digital Analog Konverter des Teensy 3.2 ermöglicht eine direkte Modulation der LED

Zur Simulation der Bestrahlungsstärke. Wie beschrieben wird die Variation des elektrischen Feldes durch eine zweidimensionale Gaußverteilung beschrieben. Auf dem Mikrokontroller werden daher zwei Gaußverteilte Pseudozufallszahlen (x,y) erzeugt, welche die Quadraturen repräsentieren (Komponenten des Zeigers). Die Länge des Zeigers ergibt sich zu:

$$z = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Mit der Zufallszahl z^2 wird die Bestrahlungsstärke moduliert.

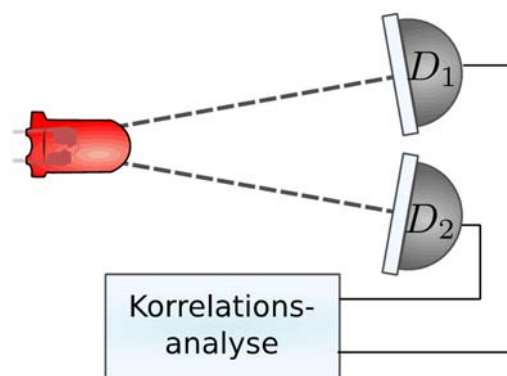


Abb. 1 Aufbau zur statistischen Analyse der pseudothermisch modulierten LED

4. Charakterisierung der Lichtquelle

Zur Charakterisierung der Lichtquelle wurde der in Abbildung 1 dargestellte Aufbau umgesetzt.

Der Aufbau besteht aus zwei Avalanche-Photodioden (APD)-Detektoren, einer Koinzidenzelektronik (2 Kanäle) und der modellierten LED als Lichtquelle.

Die zwei APD-Detektoren werden im Geigermode betrieben und mit einer Optik ausgestattet, die es ermöglicht die Lichtquelle auf die aktive Fläche der Diode abzubilden. Weiter ist im verwendeten Objektiv ein Laserlinienfilter verbaut, so dass das Experiment unempfindlich wird gegen Raumbelichtung.

Zur Charakterisierung der Lichtquelle werden die Photoelektronen-Statistik und die Korrelationsfunktion zweiter Ordnung untersucht.

Für den Zugang zur Photoelektronen-Statistik werden 10.000 Messungen von einem der beiden Detektoren (D_1) im Histogramm dargestellt. Die Messzeit betrug hierbei 1 ms. Innerhalb der 10.000 Messungen wurden n (Hochachse) mal x (Längsachse) Ereignisse registriert.

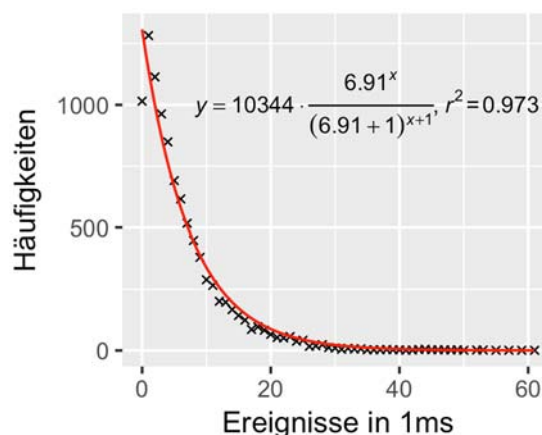


Abb. 2 Die Photoelektronen-Statistik folgt einer Bose-Einstein-Verteilung

Abbildung 2 stellt die Photoelektronen-Statistik als Histogramm dar – Die gemessenen Häufigkeiten werden dem aus der Theorie abgeleiteten Modell gegenüber (Bose-Einstein-Verteilung, Gl. (1)) gestellt.

Es zeigt sich eine hervorragende Passung zwischen Theorie und Experiment. Die Häufigkeit des Ereignisses „Null“ weicht von der Theorie ab – es werden zu wenig Nullen registriert. Dies ist der Dunkelzählrate der Detektoren zuzuschreiben. Im Mittel werden 6,91 Photoelektronen registriert.

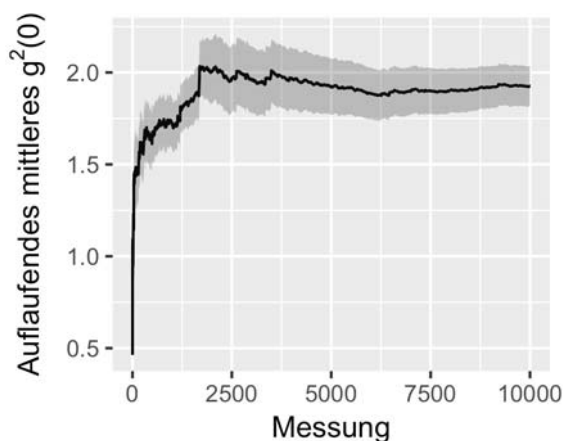


Abb. 3 Annäherung $g^{(2)}(0)$ gegen den Wert 2

Weiter wurde die Korrelationsfunktion zweiter Ordnung betrachtet. Nach Gleichung (3) ist eine Annäherung an den Wert $g^{(2)}(0) = 2$ zu erwarten. Abbildung 3 zeigt die Entwicklung der gemittelten Korrelationsfunktion zweiter Ordnung $\langle g^{(2)}(0) \rangle$ bei einer auflaufenden Messreihe.

Der graue Bereich stellt die Standardabweichung dar. Der letzte gemessene Wert (längste Mittelung) beträgt $g^{(2)}(0) = 1,9258 \pm 0,0011$. Es ergibt sich eine Abweichung vom theoretischen Wert, welche auf die unterschiedlichen Langzeitverhalten der Detektoren zurückzuführen ist.

5. Zusammenfassung

Es wurde eine einfache und leicht durchschaubare pseudothermische Lichtquelle präsentiert, welche eine vollständige Kontrolle der Modulation der Bestrahlungsstärke ermöglicht. Hierdurch wird ein unkomplizierter Zugang zu den statistischen Eigenschaften pseudothermischer Lichtquellen bereitgestellt. Die theoretischen Vorhersagen bestätigen sich im Experiment. Studierende können an dem Aufbau statistische Methoden zur Analyse von Licht erarbeiten (Histogramm-Analyse) und darüber hinaus erste Erfahrungen im Umgang mit der Korrelationsanalyse sammeln, welche bei quantenoptischen Experimenten grundlegend sind.

Limitationen. Auf Speckle-Muster basierende Verfahren öffnen Wege zu Experimenten zur räumlichen Kohärenz (Pieper et al, 2018) und Untersuchungen im Interferometer. Dies ist mit der hier vorgestellten Lichtquelle nicht möglich.

6. Literatur

- [1] QUTEGA (2017): Leuchs, G. et al: Konzeptpapier der Nationalen Initiative zur Förderung der Quantentechnologie von Grundlagen bis Anwendungen (QUTEGA)
- [2] Scholz, R. et al (2018): Undergraduate quantum optics – Experimental steps to quantum physics. In: Eur. J. Phys. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/aac355>
- [3] Scholz, R. et al (2016): Undergraduate experiments on statistical optics. In: Eur. J. Phys. **37**, 055302; <https://doi.org/10.1088/0143-0807/37/5/055302>;
- [4] Loudon, R. (2000). The Quantum Theory of Light (Third Edit). Oxford: Oxford University Press.
- [5] Fox, M. (2006). Quantum Optics (Second Edition). Oxford: Oxford University Press.
- [6] Martienssen, W. and Spiller E. (1964): Coherence and Fluctuations in light beams. Am. J. Phys. **32**(12), 919
- [7] Pieper, K., Bergmann, A., Dengler, R. and Rockstuhl, C.: Using a pseudo-thermal light source to teach spatial coherence". Eur. J. Phys, formal accepted on 23.03.1

Experimente mit Luftkissenpucks

Thomas Wilhelm; Jacqueline Stein

*Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt
wilhelm@physik.uni-frankfurt.de; Jacqueline.Stein@gmx.net

Kurzfassung

Besonders am Anfang des Physikunterrichts werden bestimmte Einflüsse ausgeblendet, um reine Phänomene zu betrachten – im Falle der Mechanik ist dies die Reibung. Allerdings sind Luftkissenfahrbahnen und Luftkissentische teuer und der Inbegriff von Lebensferne. Luftkissenpucks sind dagegen ein günstiges und faszinierendes Spielzeug. Insbesondere für zweidimensionale Bewegungen bietet sich die Messwerterfassung mittels Videoanalyse an.

Auf ebener Unterlage können Stöße verschiedener Pucks betrachtet werden: Stöße auf einen ruhenden oder bewegten Puck mit gleicher oder unterschiedlicher Masse, Stöße eines Pucks mit der Wand oder vollkommen unelastische Stöße, indem ein Puck mit doppelseitigem Klebeband beklebt wird. Auf einer schiefen Unterlage sind Modelle eines waagrecht und eines schiefen Wurfes möglich. Mit entsprechenden Befestigungen in der Mitte sind Kreisbewegungen und Spiralbewegungen möglich.

1. Motivation und frühere Varianten

Im Physikunterricht werden besonders zu Beginn der Behandlung eines Themas bestimmte Einflüsse ausgeblendet, um reine Phänomene zu betrachten. In der Mechanik ist dieser Einfluss die Reibung. Dieses Bemühen, bei Bewegungen die Reibung stark zu verringern, führte zur Entwicklung von verschiedenen Luftkissen-Experimentiergeräten. Nach Heffner und Wilke [1] muss man lineare Anordnungen und flächenförmige Anordnungen unterscheiden. Außerdem gibt es für die Erzeugung des Luftpolsters nach Heffner und Wilke [1] zwei Möglichkeiten, da es entweder vom Schwebekörper oder von der Unterlage erzeugt wird, wobei das Letztere aufwändiger ist. Von der Unterlage wird das Luftkissen bei Luftkissenfahrbahnen und bei Luftkissentischen [1-5] erzeugt. Insbesondere die Luftkissenfahrbahnen wurden zum Standardgerät im Mechanikunterricht und zum Inbegriff der Lebensferne des Physikunterrichts. Außerdem wissen wir heute, dass die Konzentration auf geradlinige Bewegungen Fehlvorstellungen fördert und erzeugt. Ferner sind Luftkissenfahrbahnen und Luftkissentische störend laut und teuer – sieht man von selbst gebauten Luftkissentischen [3+6] ab.

So ist es naheliegend, Luftkissenpucks zu verwenden, die sich ihr Luftkissen selbst erzeugen. Eine alte Idee ist, dafür kleine Scheiben zu verwenden, in deren Mitte ein aufgeblasener Luftballon befestigt wird, dessen Luft unter der Scheibe ausströmt [1]. Solche Plastikscheiben waren früher im Stark-Verlag zu kaufen [7] (siehe Abb. 1). Mit ihnen konnte auf einer ebenen, glatten und waagerechten Fläche eine reibungsfreie Bewegung beobachtet werden. Weitere Versuche waren kaum möglich, da die

Pucks zu leicht waren. Da der Schwerpunkt des Ballons nie genau über dem Mittelpunkt des Luftkissengleiters wurde ein kleiner seitlicher Schub hervorgerufen.



Abb. 1: Einfachste Luftkissengleiter

Entsprechend gab es Vorschläge, solche Scheiben etwas größer aus Aluminium zu fertigen [8+9]. Dazu wird allerdings eine Drehmaschine benötigt sowie fachkundige Bedienkenntnisse. Pusch und Bruns haben deshalb vorgeschlagen, solche Scheiben mit Hilfe eines 3D-Druckers herzustellen [10].

Besser ist es, wenn der Luftkissengleiter das Luftkissen mit einem Gebläse erzeugt. Ein aufwändiger Bau eines Luftkissenpucks wurde schon 1978 vorgeschlagen [1]. 1987 wurde der Selbstbau eines propellergetriebenen Luftkissenfahrzeuges beschrieben, das mit einem Gleichstrom-Minimotor betrieben wird [11]. Eine moderne Bauanleitung eines Luftkissengleiters mit Hilfe einer Polystyrolschale, einem Müllsack und einem Gleichstrommotoren beschreiben Pürmayr, Wolny und Hopf [12]. Daneben gibt es auch Bauanleitungen für Luftkissengleiter, auf denen eine Person sitzen kann [13-14] und sogar

fertig kaufbare Luftkissengleiter für eine Person [15].

Für Experimente im Physikunterricht sind auf jeden Fall Luftkissenpucks am geeignetsten [16-18]. Diese gibt es manchmal in Spielzeugläden oder Supermärkten günstig zu kaufen oder sie sind bei Lehrmittelherstellern zu erwerben [17] (siehe Abb. 2). Dabei handelt es sich um ein sehr robustes und faszinierendes Spielzeug. In diesem Artikel soll es nur um solche käuflich erwerbaren Luftkissenpucks gehen. Sie haben mehrere Akkus in sich und ein Gebläse, das die Luft durch ein kleines Loch in der Oberseite ansaugt und gleichmäßig nach unten ausströmen lässt. Außen herum haben sie einen weichen Schaumstoffrand, so dass sie sich gut für Stöße eignen.



Abb. 2: Luftkissenpucks: Links von einer Lehrmittelfirma [17] und rechts aus dem Supermarkt

Bei den Versuchen wurden zwei unterschiedliche Arten von Luftkissenpucks verwendet. Zum einen war dies ein kleines No-Name-Modell, welches von der Firma Pearl.GmbH vertrieben wird (Preis 12,90 €). Es hatte einen Durchmesser von 9,2 cm und eine Masse von 68,7 g. Zum anderen wurden zwei Pucks der Firma 4Kidz verwendet, die u.a. von der Lehrmittelfirma Conatex vertrieben wurden und mit herkömmlichen AA-Batterien betrieben werden können. Mit neuwertigen Akkus mit einer Ladung von 2400 mAh konnten die Pucks im Dauerbetrieb ohne Probleme zwei Stunden laufen. Die Pucks hatten einen Durchmesser von 18 cm und eine Masse 304 g bzw. 306 g. Um für die Versuche unterschiedliche Massen der Pucks zu haben, wurde ermittelt, wie viel Zusatzmasse an diesen befestigt werden konnte, ohne dass es zu einem Schleifen der Pucks auf dem Untergrund kommt. Bei voller Akkuladung konnte ein Puck mit zusätzlich 284 g ausgestattet werden. Dafür wurden 10 g-Massestücke an der Unterseite des Pucks festgeklebt und 50 g-Massestücke mithilfe von Knete auf der Oberseite befestigt, so dass das Endgewicht bei 590 g lag.

2. Qualitative Freihandversuche

Lässt man einen Luftkissenpuck senkrecht auf eine feste Wand gleiten, kommt er mit gleichem Tempo

wieder zurück (Impulserhaltung). Trifft er unter einem schrägen Winkel auf die Wand, gilt Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel (siehe Abb. 3), was beim Billard genutzt wird. Zusätzlich kann man nach dem Stoß eine Rotation sehen (siehe Abb. 4), die vorher nicht da war, was an einer tangentialen Kraft von der Wand auf den Puck liegt. Dieser Vorgang wird in [19] zur Einführung der Reibung als tangentiale Kräfte verwendet.

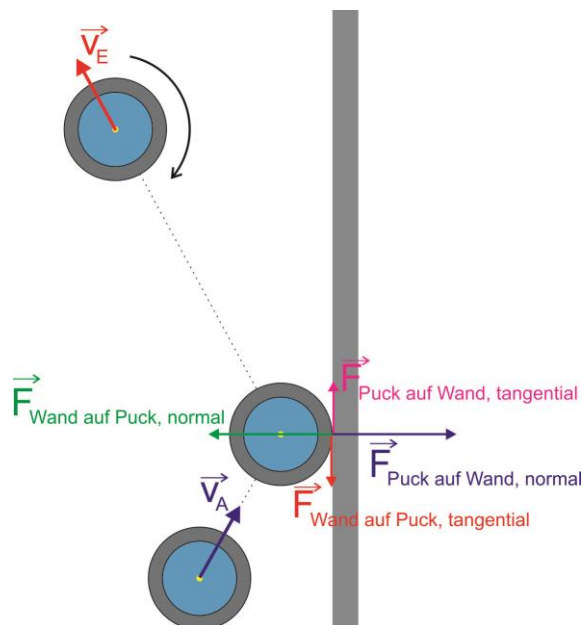


Abb. 3: Kräfte beim Stoß eines Pucks auf die Wand (nach [19])

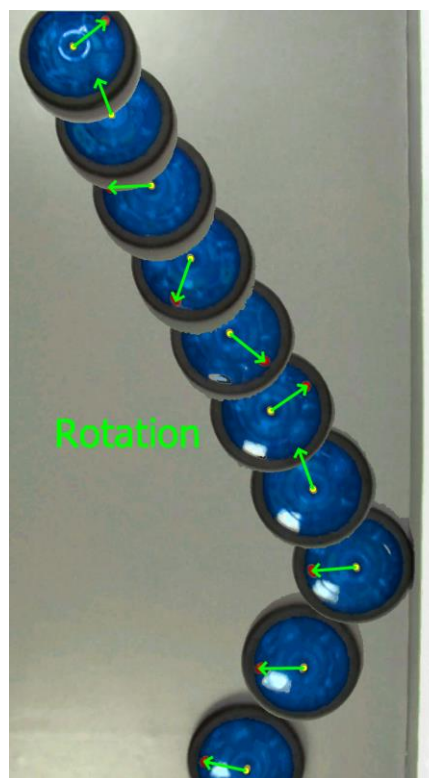


Abb. 4: Bewegung beim Stoß eines Pucks auf die Wand (nach [19]), erzeugt mit measure dynamics

In dem zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept von Wiesner, Wilhelm, Hopf, Waltner und Tobias zur Einführung in die Mechanik in der Sekundarstufe I [20] spielt der senkrechte Stoß auf eine Kugel eine große Rolle: Eine Kugel kommt von links angerollt und es wird senkrecht zur Bewegungsrichtung auf die Kugel gestoßen. Schülerinnen und Schüler erwarten dann häufig, dass die Kugel danach in die Stoßrichtung weiterrollt, also die einwirkende Kraft die Geschwindigkeitsrichtung bestimmt. Sie erkennen aber, dass die Bewegung schräg abläuft und es wird ihnen mitgeteilt, dass tatsächlich wie erwartet eine Geschwindigkeit in Richtung der Einwirkung dazukam, aber die Anfangsgeschwindigkeit auch noch da ist und beide zusammen die Endgeschwindigkeit bestimmen. Problematisch daran ist die Frage, welchen Einfluss die Rotation der Kugel hat, weshalb Luftkissenpucks dazu besser geeignet sind. Sie können mit kleiner oder großer Anfangsgeschwindigkeit auf dem Boden ankommen und werden leicht oder fest mit einem Holz gestoßen (oder kurz mit dem Fuß getreten). Auch Stöße schräg zur Bewegungsrichtung sind möglich (siehe Abb. 5).

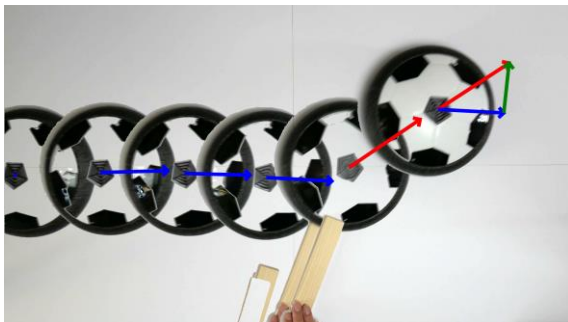


Abb. 5: Schräger Stoß auf einen Puck (blau: Anfangsgeschwindigkeit, rot: Endgeschwindigkeit, grün: Geschwindigkeitsänderung = Zusatzgeschwindigkeit durch Stoß)

3. Quantitative Messmöglichkeiten

Man kann auf einem Luftkissengleiter eine Schnur befestigen und diese über ein Bewegungsmesslaufwerk laufen lassen, um so die Bewegung zu erfassen. Dies geht aber nur bei geradlinigen Bewegungen. Auch Ultraschallsensoren oder Lasermessgeräte eignen sich nur für geradlinige Bewegungen.

Man könnte sich auch vorstellen, auf einen Luftkissengleiter einen 3D-Beschleunigungssensor zu befestigen, der seine Daten per Funk an einen PC sendet [21]. Entsprechende Sensoren von Lehrmittelfirmen sind aber zu groß, um sie auf dem Gleiter befestigen zu können.

Insbesondere für zweidimensionale Bewegungen gibt es noch die Möglichkeit, Stroboskopbilder zu erzeugen, z.B. mit der Freeware-Software „Live Video Strobe“ [22], der App „Motion Shot“ oder dem Videoanalyseprogramm „measure dynamics“.

Die meisten Möglichkeiten ergeben sich mittels Videoanalyse. Dabei kann der Puck als Ganzes oder

ein aufgeklebter Punkt verfolgt werden. Je nach Videoanalysesoftware können in das Video auch Pfeile für die physikalischen Größen eingezeichnet werden oder aus dem Video Stroboskopbilder oder Stroboskopfilme [23] erzeugt werden. Alle Beispiele in diesem Artikel wurden mit „measure dynamics“ aufgenommen. Hilfreich sind dazu eine helle, einfarbige Grundfläche, ein Fotostativ und eine Lampe (siehe Abb. 6). Alle Versuche wurden auf einer Holzplatte mit den Maßen 1,2 m mal 0,8 m durchgeführt, welche mit einer Wasserwaage justiert wurde und mit einem weißen Papier abgedeckt wurde.



Abb. 6: Aufbau für die Videoanalyse der Bewegungen des Luftkissenpucks

4. Beispiele für Experimente mit Luftkissenpucks mit Videoanalyse

Der Schwerpunkt dieses Beitrags liegt darauf zu zeigen, wie mit der Videoanalyse die Versuche mit den Spielzeug-Luftkissenpucks ausgewertet werden können. Eine detailliertere Darstellung findet sich in [17].

4.1. Zentralkräfte

Für die Analyse einer Kreisbewegung wurde eine Schraube, die durch ein Teilgewinde über einen glatten Schaft verfügte, auf der Holzplatte mittig positioniert. Als Verbindungsschnur zum Luftkissenpuck wurde ein Perlon-Draht genommen, da dieser über gute Gleiteigenschaften verfügt. Der Draht wurde mit einem Palstek-Knoten zu einer Schlinge geformt, da diese sehr haltbar ist und sich bei Belastung nicht zusammenzieht. So ist ein freies Drehen des Pucks gewährleistet. Oben im Gebläse des Pucks der Lehrmittelfirma [17] wurde ein kurzer stabiler Stab befestigt. Da in der oberen Ansaugfläche des Pucks ein Netzmuster vorhanden war, wurde der Stab so gewählt, dass er genau in das mittlere

Loch passte. Der Luftstrom wird dadurch kaum beeinflusst. Der Stab auf dem Puck und die Schraube auf der Holzplatte erreichten die gleiche Höhe, so dass die Perlon-Draht nirgends entlangschleifte.

Um die komplette Kreisbewegung aufzuzeichnen, muss die Kamera dementsprechend hoch positioniert werden, z.B. unter der Decke. Die Länge der Verbindungsschnur lag bei 20 cm. In measure dynamics können nun verschiedene Größen berechnet und dynamisch in das Video eingezeichnet werden. Ein Geschwindigkeitsvektor hat immer die gleiche Länge, ändert aber ständig seine Richtung. Aus aktuellem und vergangenen Geschwindigkeitsvektor entsteht der Geschwindigkeitsänderungsvektor, mit dem die Beschleunigung eingeführt werden kann. Abbildung 7 zeigt ein Stroboskopbild mit dem Beschleunigungsvektor. Da die Reibung klein ist, zeigt er fast genau zur Mitte und hat fast eine konstante Länge. Hierzu wurden für die Analyse eine Schrittweite von 5 (bei 29,98 fps) eingestellt, d.h. nur jedes fünfte Bild im Zeitabstand von 0,1668 s wird verwendet. Da das Tempo geringfügig abnimmt, nimmt auch die Länge des Beschleunigungsvektors etwas ab.



Abb. 7: Beschleunigung eines Luftkissenpucks bei einer Kreisbewegung

Für eine Variante wurde die Schraube entfernt und der Perlon-Draht durch das Loch in der Mitte der Holzplatte genutzt. Ans Drahtende wurde ein Gewichtsstück der Masse 50 g befestigt, das auf den Puck eine konstante Zentralkraft ausübt. Nach dem Anstoßen des Pucks verändert sich der Radius und theoretisch müsste eine Rosettenbahn entstehen mit konstanter Beschleunigung zum Mittelpunkt. Die Verbindungsschnur lag jedoch auf dem Puck auf und schliff am Schaumstoff der Umrandung, so dass eine Reibungskraft vorhanden war. In Abbildung 8 ist deshalb zu erkennen, dass die Beschleunigung eine Komponente gegen die Bewegungsrichtung hat und ihr Betrag nicht konstant ist.

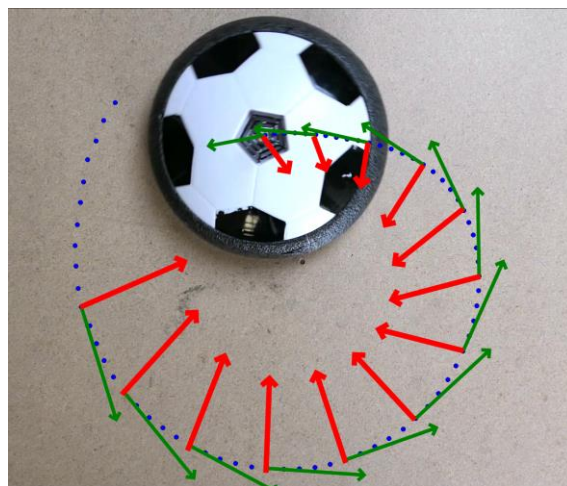


Abb. 8: Geschwindigkeit und Beschleunigung eines Luftkissenpucks bei einer Bewegung mit konstanter Zentralkraft und Reibung.

4.2. Simulation von Würfeln

Mit den Luftkissenpucks können auch Wurfbewegungen simuliert werden, denn bei Wurfbewegungen ohne Luftreibung ist bei geeigneter Wahl des Koordinatensystems eine Beschleunigungskomponente null und die andere konstant ungleich null. Ohne Luftreibung können die Komponenten unabhängig voneinander betrachtet werden (Superpositionsprinzip), mit Luftreibung gilt das nicht mehr [24].

Dazu wird die Holzplatte zu einer schiefen Ebene umgebaut, indem auf einer Seite ein 5 cm hoher Holzblock unterlegt wurde, was einen Winkel von ca. 2,5° ergab, und die Kameraposition der Neigung der Platte angepasst wurde. Um einen waagerechten Wurf zu simulieren, muss der Puck senkrecht zum Gefälle angestoßen werden. Im Stroboskopbild der Abbildung 9 ist zu erkennen, dass sich die x-Komponente der Geschwindigkeit (blau) nicht ändert, während die y-Komponente der Geschwindigkeit (grün) gleichmäßig zunimmt. In [19] wird das so dargestellt, dass zur Anfangsgeschwindigkeit (blau) eine Zusatzgeschwindigkeit (grün) dazu kommt, was die Endgeschwindigkeit (rot) ergibt.

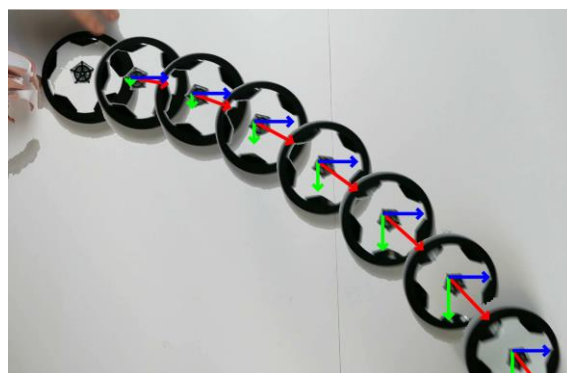


Abb. 9: Simulation eines waagerechten Wurfes (rot: Geschwindigkeit, blau: x-Komponente, grün: y-Komponente)

Möglich wäre hier noch, sich verschiedene Diagramme anzuschauen. Das t - x -Diagramm ist eine steigende Gerade, das t - y -Diagramm eine nach unten offene Parabel und die Bahnkurve (x - y -Diagramm) auch eine nach unten geöffnete Parabel. Gibt man eine entsprechende Funktion mit dem Parameter a_y ein, kann man den Parameter über einen Schieberegler so verstellen, bis die berechnete Kurve in Übereinstimmung mit der gemessenen ist [25, S. 57 ff.]. Hier wurde eine Beschleunigung von $a_y = 0,435 \text{ m/s}^2$ bestimmt.

Auch ein schräger Wurf kann simuliert werden, indem er Puck in einem Winkel die schiefe Ebene hoch gestoßen wird. Abbildung 10 zeigt ein Stroboskopbild einer solchen Bewegung. Wieder ist zu erkennen, dass sich die x -Komponente der Geschwindigkeit (blau) nicht ändert, während sich die y -Komponente der Geschwindigkeit (grün) gleichmäßig ändert, d.h. erst abnimmt und dann in entgegengesetzte Richtung zunimmt.

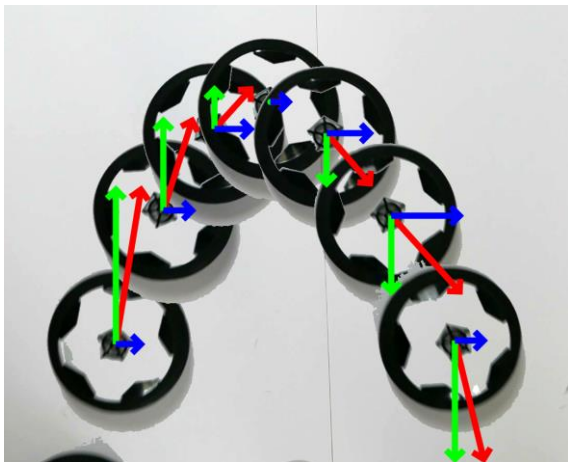


Abb. 10: Simulation eines schiefen Wurfes (rot: Geschwindigkeit, blau: x -Komponente, grün: y -Komponente)

4.3. Elastische Stöße

Des Weiteren können unterschiedliche Stöße zwischen zwei Pucks betrachtet werden. Möglich ist, dass ein bewegter Puck auf einen ruhenden oder einen ebenfalls bewegten Puck stößt. Möglich ist, zwei gleiche Pucks zu verwenden, zwei Pucks mit unterschiedlicher Größe und Masse zu nehmen (siehe Abb. 2) oder einen Puck zusätzlich zu beschweren.

Besonders schön lassen sich nicht-zentrale Stöße zeigen, wobei der Stoßparameter leicht variiert werden kann. Das ist qualitativ interessant, kann aber auch quantitativ ausgewertet werden. Ein perfekt zentraler Stoß ist dagegen kaum möglich. Auch eine ganz kleine Anfangsbewegung ist kaum zu vermeiden.

Zunächst soll ein Puck ungefähr zentral auf einen gleichschweren, ruhenden Puck stoßen. Für die Abbildung 11 wurde das Koordinatensystem so gelegt, dass der erste Puck (blaue Werte) anfangs nur eine kleine Geschwindigkeit in y -Richtung hat.

Man erkennt schön, dass sich die x -Komponente der Geschwindigkeiten bei beiden Pucks gleich viel ändert, also der Impuls in x -Richtung erhalten bleibt. Da der Stoß nicht ganz zentral war, ist es aber nicht so wie erwartet, dass die Geschwindigkeiten ausgetauscht werden.

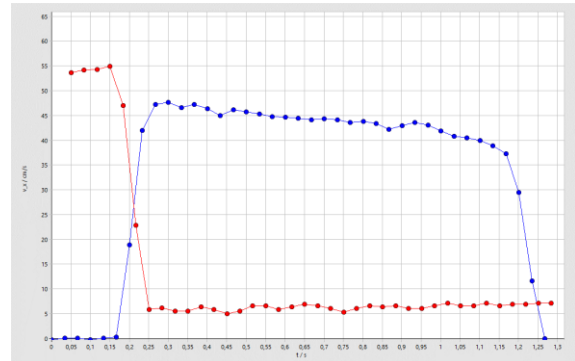


Abb. 11: x -Komponenten der Geschwindigkeit zweier gleich schwerer Pucks bei einem fast zentralen Stoß

Abbildung 12 zeigt, wie ein kleiner Puck (rot, 68 g) auf einen größeren (blau, 304 g) auftrifft, diesen anstößt und selbst in Gegenrichtung zurückgestoßen wird. Abbildung 13 zeigt, dass dabei Impulserhaltung gilt.

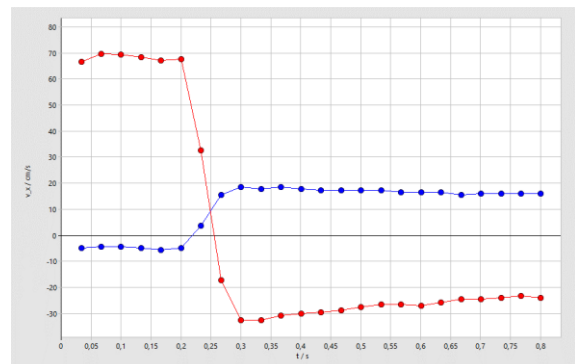


Abb. 12: x -Komponenten der Geschwindigkeit zweier Pucks bei einem fast zentralen Stoß: Ein leichter Puck (rot) stößt auf einen schweren Puck (blau).

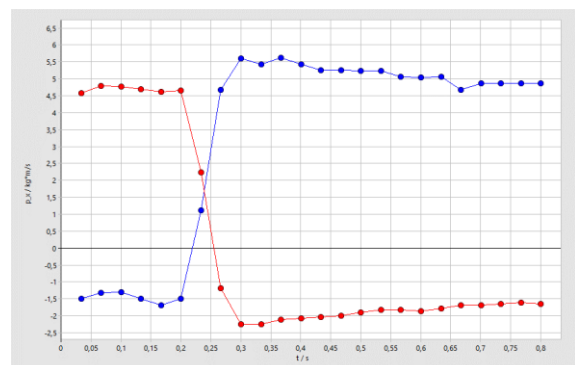


Abb. 13: x -Komponenten der Impulse zweier Pucks bei dem Stoß aus Abbildung 12.

Da das Diagramme-Interpretieren nicht einfach ist, ist es von Vorteil, wenn die physikalischen Größen, wie der Impuls als Pfeil in das Video eingezeichnet

werden können. In Abb. 14 ist dies für diesen Vorgang zu sehen.



Abb. 14: Ein leichter Puck stößt auf einen schweren Puck mit eingezeichneten Impulsfeilen.

Genaue Untersuchungen ergeben, dass bei den Stößen nur etwas kinetische Energie verloren geht, der Stoß also näherungsweise elastisch ist. Zu beobachten ist auch, dass die Pucks, die vor dem Stoß keine Drehung aufweisen, nach dem Stoß rotieren. Dies bedeutet, dass ein Teil der kinetischen Energie nach dem Stoß als Rotationsenergie vorliegt.

4.4. Unelastische Stöße

Mithilfe von doppelseitigem Klebeband, das jeweils an einer Seite der Pucks befestigt wurde, konnte neben den elastischen Stößen auch der vollkommen unelastische Stoß untersucht werden, bei welchem die Stoßpartner nach der Wechselwirkung eine gemeinsame Geschwindigkeit aufweisen. In Abbildung 15 ist der eine Puck fast in Ruhe. Da die Massen gleich sind, ergibt sich nach dem Stoß etwa die mittlere Geschwindigkeit.

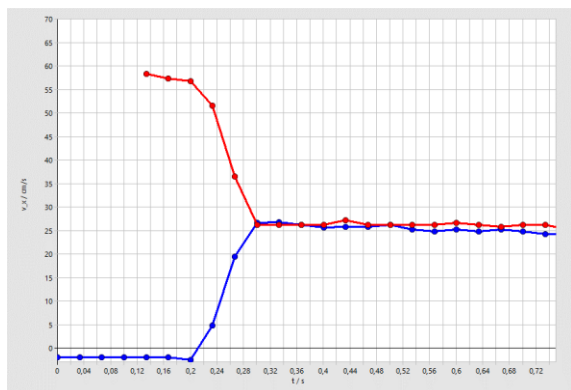


Abb. 15: x-Komponenten der Geschwindigkeit zweier gleicher Pucks bei einem fast zentralen unelastischen Stoß

5. Fazit

Luftkissenpucks sind faszinierende und preisgünstige Spielzeuge, die sich sowohl für qualitative wie auch für quantitative Experimente verwenden lassen. Für quantitative Auswertungen eignet sich die Videoanalyse von Bewegungen.

6. Literatur

[1] Heffner, J.; Wilke, H.-J. (1978): Luftkissen-Experimentiergeräte. In: Physik in der Schule, Heft 1-2, S. 50 – 61
 [2] Herlitz, P.; Widulla, U. (1981): Experimente auf dem großen Ealing-Luftkissentisch, In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, Heft 2, S. 51 – 56

[3] Stöckel, H. (1990): Stoß zweier Scheiben. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, Heft 8, S. 24 – 29
 [4] Kagan, D. T.; Klein, L. (2000): Why Is There No Vertex in Air-Table Collisions? In: The Physics Teacher 38, Heft 7, S. 414
 [5] Krämer, C. (2016): Experimente mit dem Luftkissentisch zur Einführung der Zusatzgeschwindigkeit. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 65, Heft 8, S. 32 – 36
 [6] Greenslade, T. B. (1997): A Small Air Table. In: The Physics Teacher 35, Heft 2, S. 116
 [7] Luftkissengleiter, Physik-Boutique, Stark-Verlag, Bestell-Nr. 11888
 [8] Straulino, S.; Bonechi, L. (2011): A simple frictionless device for the study of motion. In: Physics Education 46, Heft 5, S. 583 – 586
 [9] Müller, K.; Müller, R. (2017): Mechanik pur: Luftkissen-Experimente ohne Kompressor. In: MNU Journal 70, Heft 3, S. 169 – 171
 [10] Pusch, A.; Bruns, C. (2018): Von der Idee zum Produkt – Experimente aus dem 3D-Drucker. In: MNU Journal 71, Heft 1, S. 14 – 19
 [11] Laux, G. (1987): Das Luftkissenfahrzeug - Versuche mit einem Modell. In: Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie 29, S. 30 – 33
 [12] Pürmayr, J. E.; Wolny, B.; Hopf, M. (2017): Low Cost 2D-Hover Puck, Proceedings Girep 2016, Krakau, Poland, [https://ucris.univie.ac.at/portal/en/publications/low-cost-2dhover-puck\(d301852d-7bbd-4a1e-83f4-55700993d7fb\).html](https://ucris.univie.ac.at/portal/en/publications/low-cost-2dhover-puck(d301852d-7bbd-4a1e-83f4-55700993d7fb).html)
 [13] Siemsen, F.; Deichmann, U. (1999): Und die Studentin schwebte ... – „Luftkissenfahrzeuge“, die Eingang in Unterricht und Arbeitsgemeinschaft finden können. In: Physik in der Schule, Heft 2, S. 96 – 98
 [14] Sperber, A.; Fiedler, F.; Heuper, W.; Trefzger, T. (2009): Gleitend zur Impulserhaltung - Versuche mit dem Luftkissengleiter. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, Heft 6, S. 44 – 46
 [15] Hovercraft von Pasco: https://www.pasco.com/prodCatalog/ME/ME-9838_hovercraft/index.cfm
 [16] Carlson, J. E. (2004): Kick Dis Power Puck. In: The Physics Teacher 42, Heft 3, S. 144 – 45
 [17] Hover Puck von Pasco: https://www.pasco.com/prodCatalog/SE/SE-7335_hover-puck/index.cfm oder Luftkissengleiter von Conatex: https://www.conatex.com/catalog/physik_lehrmittel/mechanik/statik_krafte_dynamik/product-luftkissengleiter/sku-1041959#.Wn8HJuciGUK
 [18] Stein, J. (2017). Experimente mit Luftkissenpucks, Examensarbeit Goethe-Universität Frankfurt am Main. In: <http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Luftkissenpucks.htm>

- [19] Wilhelm, T.; Wiesner, H.; Hopf, M.; Rachel, A. (2013): Mechanik II: Dynamik, Erhaltungssätze, Kinematik, Reihe Unterricht Physik, Band 6, Aulis-Verlag
- [20] Wilhelm, T.; Tobias, V.; Waltner, C.; Hopf, M.; Wiesner, H. (2012): Einfluss der Sachstruktur auf das Lernen Newtonscher Mechanik. In: Bayrhuber, H.; Harms, U.; Muszynski, B.; Ralle, B.; Rothgangel, M.; Schön, L.-H.; Vollmer, H.; Weigand, H.-G. (Hrsg.): Formate Fachdidaktischer Forschung. Empirische Projekte – historische Analysen – theoretische Grundlagen, Fachdidaktische Forschungen, Band 2, Waxmann, Münster/ New York/ München/ Berlin, S. 237 – 258
- [21] Scheler, S.; Wilhelm, T. (2009): Neue Möglichkeiten durch Funksensoren. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 58, Nr. 7, S. 28 – 35
- [22] Wilhelm, T.; Suleder, M. (2015): Stroboskopbilder mit „Live Video Strobe“. In: Plus Lucis, Heft 1-2, S. 14 – 18, <http://www.univie.ac.at/pluslucis/PlusLucis/151/S14.pdf>
- [23] Suleder, M.; Wilhelm, T. (2015): Stroboskopvideos. In: PhyDid B - Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Wuppertal 2015
- [24] Wilhelm, T. (2018): Sind die Bewegungskomponenten unabhängig voneinander? – In: Wilhelm, T. (Hrsg.): Stolpersteine überwinden im Physikunterricht. Anregungen für fachgerechte Elementarisierungen, Aulis/Friedrich, Seelze, S. 27 – 30
- [25] Sauer, M. (2013): Ein Tutorial zu measure dynamics, <http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Tutorial.pdf>

Zukunft des Physikunterrichts – Bericht vom Workshop über die DPG-Schulstudie am 19. März 2018 in Würzburg

Johannes Grebe-Ellis

Bergische Universität Wuppertal
grebe-ellis@uni-wuppertal.de

Kurzfassung

Die DPG hat vor zwei Jahren eine umfangreiche Studie zum Physikunterricht in Deutschland veröffentlicht, die darauf zielt, eine Diskussion über die Zukunft des Physikunterrichts an deutschen Schulen anzustoßen (DPG 2016). Während der Hauptteil der Studie überwiegend zustimmend aufgenommen wurde, zeigt die bisherige Rezeption der Anlage zur Studie mit den unterrichtsbezogenen Konkretisierungen zu den Basiskonzepten, dass hier die Auffassungen aus schulischer, fachlicher und fachdidaktischer Sicht auseinandergehen. Vor diesem Hintergrund wurde vom Vorstand des FV Didaktik der Physik eine Diskussionsveranstaltung angeregt, die im Rahmen der DPG-Frühjahrstagung in Würzburg stattgefunden hat und von der hier berichtet wird. Ziel der Veranstaltung sollte die Identifikation inhaltlicher und methodischer Aspekte in der Anlage zur Studie sein, die zu präzisieren, zu hinterfragen oder weiter zu entwickeln wären. Eröffnet wurde der Workshop mit einer Einführung ins Thema durch die Moderation (Prof. Dr. B. Priemer und Prof. Dr. R. Wodzinski) sowie mit zwei kurzen Impulsreferaten aus fachlicher und schulischer Sicht (Prof. Dr. I. Hertel, Berlin und StD M. Rode, Lüneburg). Anschließend bestand für die 25 anwesenden Expertinnen und Experten aus Schule, Fach und Fachdidaktik Physik die Möglichkeit zur Diskussion. Vom Verlauf der Veranstaltung wurden drei Verlaufsprotokolle erstellt. Diese bilden die Grundlage für den folgenden Bericht, der zugleich Anknüpfungspunkte für eine Weiterarbeit am Thema liefern soll. Die Präsentationen der Vortragenden sind als Anhang beigefügt.

1. Einführung

Herr Priemer würdigt die Schulstudie der DPG als aussagekräftige Zusammenführung relevanter Gesichtspunkte und unterschiedlicher Ansichten zur Zukunft des Physikunterrichts in Deutschland. Er hebt hervor, dass die aktive Beteiligung des Fachverbands Didaktik der Physik an Studien dieser Art gefordert ist und im vorliegenden Fall auch stattgefunden hat. Allerdings wurde die Studie bisher nicht in der wünschenswerten Breite rezipiert und diskutiert. Dies gilt insbesondere für die Anlage zur Studie mit dem Vorschlag zur Umsetzung der modifizierten Basiskonzepte, wozu dem Fachverband Didaktik bisher zwei ausführliche Stellungnahmen vorliegen (M. Rode, K.-G. Bruns). Der Workshop verfolgt das Ziel, einen Austausch anzuregen und eine Klärung über die Frage herbeizuführen, wie eine Weiterarbeit an dem durch die Studie angestoßenen Prozess aussehen könnte. Konkret werden im Workshop folgende Schritte angestrebt: 1. Positionierung zu der Präzisierung der Basiskonzepte in der Anlage zur Studie, 2. Verständigung über Defizite und tragfähige Ansatzpunkte inhaltlicher und methodischer Art und 3. Verständigung über potentielle Überarbeitungsschritte.

2. Impulsvortrag aus fachlicher Sicht

Herr Hertel war als Koordinator der Studie für die inhaltliche Gestaltung wesentlich mitverantwortlich. Er begrüßt die Initiative des Workshops und erhofft sich praktikable Konkretisierungen für eine mögliche Überarbeitung. Er gibt eine Zusammenfassung zur Entstehungsgeschichte der Studie und skizziert vor diesem Hintergrund Problemstellung, Rahmenbedingungen und Kerngesichtspunkte, die bei der Erstellung der Studie berücksichtigt wurden (vgl. die Folien im Anhang). Dazu gehörten insbesondere die folgenden „Grundideen“ der Studie: Reduzierung der Stofffülle; weniger Rechnen – mehr Physik verstehen; Abschied vom Anspruch auf fachkanonische Vollständigkeit, stattdessen die großen Zusammenhänge des physikalischen Wissens und Tuns aufzeigen; exemplarisches Lernen anhand „roter Fäden“ (kein Spiralcurriculum, sondern Leitlinien). Ausgehend von den Basiskonzepten der KMK (2014) und in Anlehnung an die Next Generation Science Standards (NGSS 2013) wurde ein modifiziertes Gliederungsschema entwickelt, das aus vier „Physikalischen Kernideen“ besteht (Materie, Kräfte und Wechselwirkungen, Energie, Schwingungen und Wellen). Diese strukturieren die fachliche Dimensi-

on von Physikunterricht und bilden mit den weiteren Dimensionen Methoden und Kontexte eine Art „Phasenraum des Physikunterrichts“. – Ziel der Anlage zur Studie, so Hertel, sei in erster Linie ein Machbarkeitsnachweis gewesen. Unter der Voraussetzung, dass die modifizierten Basiskonzepte eine sinnvolle und tragfähige Grundlage für ein modernes Curriculum darstellen, sollte erstmals exemplarisch gezeigt werden, wie mehr oder weniger alle relevanten Inhalte der Schulphysik unter diesen Rahmenbedingungen in ein kumulativ aufgebautes Curriculum eingeordnet werden können. Ein Vorschlag für eine solche Einordnung und damit eine Grundlage für weitere Diskussionen wurde mit der Anlage zu den Basiskonzepten 2016 vorgelegt. Auf eine ausführlichere Darstellung wird hier verzichtet, die Kenntnis der Studie wurde im Workshop vorausgesetzt.

3. Impulsvortrag aus schulischer Sicht

Herr Rode begrüßt das Anliegen der Studie und bekräftigt seine Zustimmung zu den Grundideen des Hauptteils. Aus schulischer Perspektive macht er gegenüber der exemplarischen Präzisierung der Basiskonzepte in der Anlage zur Studie sechs Vorbehalte geltend, die er in der Form einer Wunschliste an eine Überarbeitung der Anlage präsentiert (vgl. die Folien im Anhang). Die Anlage zu den Basiskonzepten sollte

a. ... stärker auf erfolgreiches Lernen zielen.

Es wirkt zu sehr nach instruierendem Unterricht, legt zu wenig Wert auf Lernprozesse; Ergebnisse der Lehr-Lernforschung sollten stärker berücksichtigt, alle Schulformen und die Altersgemäßheit der Gegenstände mitgedacht werden.

b. ... die Erzeugung von Überfülle vermeiden.

Hier besteht ein Widerspruch zur Aussage im Hauptteil der Studie; Zeitansätze müssen revidiert werden (insb. für die Entwicklung prozessbezogener Kompetenzen).

c. ... einen in allen Ländern akzeptierten Kern ausweisen.

Die Auswahlmöglichkeit führt zu weiterer Uneinheitlichkeit; Akzeptanz entsteht durch Einbeziehung vorhandener bewährter und moderner didaktischer Konzepte sowie durch Berücksichtigung der Realisierbarkeit (Ausstattung).

d. ... prozessbezogene Kompetenzen entwickeln helfen.

Es muss durchdacht und dargestellt werden, welche Inhalte sich zur Entwicklung welcher Kompetenzen in welcher Altersgruppe eignen und welche organisatorischen Anforderungen sich daraus ergeben. Die Könnens-Beschreibungen müssen durch schärfere Operationalisierung aussagekräftiger werden.

e. ... dringend Bezüge zum Mathematikunterricht herstellen.

Die DPG sollte sich die Definition eines angemessenen Maßes an Mathematik für den Physikunterricht zur Aufgabe machen; einer sinnvollen

Auswahl und Anordnung von Inhalten muss allerdings eine Abstimmung mit den Mathematik-Curricula vorausgehen; diese Anordnung muss vorrangig dem Aufbau prozessbezogener Kompetenz dienen und unter Beachtung von Ergebnissen der Lehr- und Lernforschung gestaltet werden.

f. ... ihre Grundannahmen kritisch überprüfen.

Der Einfluss der Lernzeit auf den Lernerfolg wird unterschätzt; Kontexte brauchen viel Zeit (für Einordnung in den Kontext und Ablösung vom Kontext); Interesse resultiert nicht primär aus den Sachgebieten, sondern aus Handlungsmöglichkeiten und Erfolgserleben; Basiskonzepte für den Physikunterricht haben sich bisher nicht bewährt. Eine Neuformulierung sollte eine stärkere Orientierung an *physikalischen Methoden* und die *Funktion von Basiskonzepten für das Lernen* beachten.

In seinem Fazit rät Herr Rode von einer Erprobung der unterrichtsbezogenen Vorschläge der Studie ab. Seiner Einschätzung nach wäre es dagegen hilfreich für die Arbeit in den Ländern, wenn die DPG

- ... einen an der Minimalstundenzahl orientierten *Kanon von verbindlichen Inhalten und prozessbezogenen Kompetenzen* vorlegte, getrennt für mittleren Abschluss und Abitur.
- ... die für einen erfolgreichen Einstieg in ein Studium unabdingbaren *mathematischen Voraussetzungen* identifizierte und beschrieb.
- ... sich für einen *angemessenen Stundenanteil* für den MINT-Unterricht ($\approx 1/3$ der Pflichtstundenzahl) einsetzte.
- ... die *materielle Ausstattung der Physiksammlungen* durch eine deutliche Forderung nach Erhöhung der Etatmittel ($\approx \text{€ } 3\text{-}5$ je erteilte Stunde) unterstützte.

4. Diskussion

Zu Beginn der Diskussion wird Herrn Hertel die Gelegenheit zur Entgegnung gegeben. Er stimmt den von Herrn Rode geltend gemachten Vorbehalten und seiner allgemeinen Sichtweise auf Ziele und Probleme des Physikunterrichts weitgehend zu. Dass die Anlage dem selbst gesteckten Ziel der Stoffreduktion am Ende nicht gerecht geworden ist, war der Autorengruppe bewusst; eine entsprechende Überarbeitung wurde zugunsten einer Veröffentlichung der Studie schließlich zurückgestellt. Herr Hertel betont noch einmal, dass mit der Anlage kein Curriculum beabsichtigt war. Vielmehr sollte exemplarisch gezeigt werden, dass die Ausbuchstabierung der modifizierten Basiskonzepte „fachsystematisch funktioniert“. Insofern mahnen die von Herrn Rode geltend gemachten Vorbehalte Aspekte von Physikunterricht an, die für sich genommen berechtigt und wesentlich erscheinen, der Studie aber nicht als Mängel angelastet werden können, weil sie von vornherein explizit ausgeklammert waren. Zugleich herrscht Konsens darüber, dass Unterricht grundsätzlich vom

Lernenden her gedacht werden muss, und nicht (nur) von der Sache. Was dies konkret bedeutet, d.h. welche Perspektiven neben der fachsystematischen zu berücksichtigen sind, wenn der Anspruch erhoben werden soll, die Bedingungen altersgerechter und nachhaltiger Lernprozesse im Physikunterricht angemessen abzubilden, wird den thematischen und methodischen Schwerpunkt bei einer Überarbeitung der Anlage zur Studie bilden müssen.

4.1 Ziele von Physikunterricht

Vor diesem Hintergrund dreht sich die Diskussion zunächst um die Frage nach den Zielen von Physikunterricht: Was soll Physikunterricht eigentlich leisten? Studierfähigkeit, Berufsqualifizierung? Allgemeinbildung? Und inwiefern tragen bisherige Zielvorstellungen der Bedeutung der Physik als Kulturgut, als der Aufklärung verpflichtete Kulturtätigkeit Rechnung? Die Schule soll nicht für das Physikstudium ausbilden; allerdings lässt sich Allgemeinbildendes vom Berufsqualifizierenden nicht ohne weiteres trennen; der Mittelstufenunterricht muss auch auf die Oberstufe vorbereiten. In der Studie wurde der allgemeinbildende Aspekt von Physik berücksichtigt und das Thema „Natur der Physik“ (NdP) in der Anlage genannt. Allgemeinbildung, gibt Herr Rode zu bedenken, heißt nicht „mitteilen“, sondern „erfahren“. Eine Ausschärfung im Bereich der „Natur der Physik“ mit klaren Könnenserwartungen sollte jedenfalls Bestandteil einer Weiterentwicklung der Anlage sein. Allerdings muss Wissen über die Natur der Physik durch eigenes Handeln angebahnt werden, und das erfordert Zeit. Gegenüber dem Ansatz, möglichst alle Themenbereiche abdecken zu wollen und dies mit geringen Könnenserwartungen zu erkaufen, warnt Herr Rode mit Hinweis auf die Bedeutung von Misserfolgserlebnissen und plädiert für „hohen Anspruch, aber exemplarisch“. Es wird ergänzt: Breites Faktenlernen ist gescheitert, „Tiefenbohrungen“ sind nötig, aber wenige Beispiele reichen nicht. Zugleich sollte vermieden werden, dass ein Konsens über exemplarisches Unterrichten im Ergebnis zu einer Reduktion der Stundentafeln führt. Kernanliegen der Fachdidaktik sollte ein guter, schülergerechter Physikunterricht sein: „das Curriculum ist nur Mittel zum Zweck“. Jedoch: Wir wissen nicht, was schülergerechter Physikunterricht ist. Herr Hertel gibt zu bedenken: Ziel des Ansatzes der Basiskonzepte sollte gerade ein Querdenken sein, also das Gegenteil einer kanonischen Durchkonjugation der Inhaltsbereiche.

4.2 Mögliche Ziele einer Überarbeitung

Der zweite Diskussionsschwerpunkt betraf die Frage, was das Ziel einer Überarbeitung bzw. Neuformulierung der Anlage zur Studie sein könnte: Machbarkeitsnachweis der Basiskonzepte, Aufzeigen eines breiten Spektrums an ausgearbeiteten Beispielen oder Minimalkanon? Als Hindernis für einen Minimalkanon wird die starke Heterogenität der

Lehrpläne in den Ländern gesehen, die in der derzeitigen Fassung keinen vernünftigen Konsens ergeben. Hier wird ein möglicher Auftrag für die DPG gesehen, einen längerfristigen Prozess zu gestalten, der zu einem Konsens bezüglich eines Minimalcurriculums führen könnte. Andererseits werden die Vorteile eines länderübergreifenden Curriculums infrage gestellt. Zu beachten sei ferner die Ressourcenlage als Randbedingung für guten Physikunterricht. Man sollte weniger nach einem gemeinsamen „minimalen“ Lernzielkanon suchen, sondern vielmehr ein Bild guten Physikunterrichts und seiner Randbedingungen entwerfen, das geeignet ist, die Motivation zur Umsetzung in den Ministerien zu wecken. In der Vorgabe eines Minimalkanons wird hingegen die Gefahr gesehen, dass er zum Regelkanon wird und mittelfristig zur Kürzung von Stundentafeln und Ressourcen führt. Als Beispiel für eine „Tiefenbohrung“ wird Unterricht zum Thema Fadenpendel nach dem Vorbild Wagenscheins skizziert. Solche Beispiele müssten ausgearbeitet und vorgestellt werden. Offen bleiben Fragen zur angemessenen Berücksichtigung der Mathematik. Die Bedeutung der Mathematik für die Physik sollte deutlich bleiben, auch wenn man sich dafür entscheidet, das physikalische Verständnis dem Rechnen vorzuziehen. Insbesondere ist eine „Physik ohne Formeln“ keine realistische Grundlage für fundierte Berufswahlentscheidungen.

5. Ausblick

Grundsätzlich wird die Überarbeitung der Anlage als ein sinnvolles Anliegen angesehen. Die Frage nach den Zielen einer solchen Überarbeitung steht allerdings unter dem Vorbehalt einer kritischen Abklärung der zu involvierenden Perspektiven: In welchem Maße sollte sich die Arbeit an der Fachsystematik bzw. an lernprozessbezogenen Erkenntnissen orientieren? Was wissen wir aus der fachdidaktischen Forschung? Für welche Inhaltsbereiche haben wir solide Evidenz über Lernwege? Voraussetzung für die Relevanz und Akzeptanz einer Überarbeitung ist, dass eine Problembeschreibung vorliegt, aus der hervorgeht, welche pädagogischen, fachdidaktischen, fachlichen und schulischen Gesichtspunkte zu berücksichtigen sind. Eine Klärung und Verständigung über diese Frage steht aus und sollte deshalb der nächste Schritt sein.

6. Literatur

DPG (2016): Physik in der Schule. Studie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. Bad Honnef, siehe <https://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/index.html>

Anhang

Foliensätze von Ingolf Hertel und Michael Rode in der Zusatzdatei zum Artikel.

Ich danke Heike Theyßen und Heiko Krabbe, die mir ihre Protokolle der Veranstaltung zur Verfügung gestellt haben.

General relativity in German secondary schools

Ute Kraus, Corvin Zahn, Magdy Moustafa

Universität Hildesheim, Institut für Physik, Universitätsplatz 1, 31141 Hildesheim
ute.kraus@uni-hildesheim.de, corvin.zahn@uni-hildesheim.de, magdy27@hotmail.de

Abstract

This contribution describes the status quo of the incorporation of general relativity into physics classes at secondary schools in Germany. Secondary school (Gymnasium) curricula and university curricula for pre-service physics teachers (Lehramt Gymnasium) are analyzed with respect to instructional goals related to general relativity. The study includes the secondary school curricula of all 16 federal states and the university curricula of 50 universities nationwide. The general relativity content of the curricula is discussed, with a view to current physics education research on teaching general relativity at secondary school level.

1. Introduction

Relativity is one of the fundamental advancements of physics in the 20th century, the other being quantum physics. However, while quantum physics and special relativity are well established in secondary school, the same is not yet true for general relativity.

To establish the status quo of general relativity in physics classes in German secondary schools, we analyze the school curricula (Gymnasium) of the 16 federal states. We also study to what extent teachers are proficient in general relativity by analyzing the course descriptions of pre-service physics teacher education at German universities. We close with an outlook on current developments in design and testing of educational resources for teaching general relativity in secondary schools.

2. General relativity in secondary school

We have studied physics curricula with a view to the teaching of general relativity in German schools. School curricula being within the responsibility of the federal states, the study includes the curricula of all 16 states. We focus on curricula for the Gymnasium (a secondary school with grades 5 to 12 or 13, i. e., ages 10 to 17 or 18, leading to a general qualification of university entrance), since we do not expect this subject to be taught in other types of school.

The school curricula were downloaded from the official websites of the ministries of education of the 16 federal states. Supplementary documents (guidelines, model implementations) were studied where available. The documents are as at December 2017.

The general relativity content of the school curricula is summarized in tables 1 and 2. We find that four out of the 16 secondary school (Gymnasium)

curricula explicitly mention general relativity as a subject taught in physics classes. In one case (Saarland), only the keyword general relativity is mentioned, as a recommended addendum to a unit on electromagnetism. This case will not be considered further. In the other three states (Bremen, North Rhine-Westphalia, Saxony), there are dedicated units on general relativity with time frames of 2, 4, 6, and 8 lessons (à 45 minutes), respectively (where in the case of Saxony, 2 and 4 lessons, respectively, are estimates based on the assumption that the time for the unit on relativity is divided equally between special and general relativity). In all three cases, general relativity is scheduled for grade 11 or grade 12 and is part of the advanced level course, only in Saxony it is part of the standard level course, too. In North Rhine-Westphalia and Saxony, general relativity is a required subject in the advanced level course.

Comparing the descriptions given in the three curricula, we find that there is a single common topic, referred to as gravitational time dilation, gravitational redshift, or experiments with atomic clocks, respectively. Topics mentioned in two out of the three curricula are the equivalence principle and the curvature of space or spacetime. Several keywords are found in only one out of the three curricula: light deflection, precession of the perihelion of Mercury, black holes, big bang theory, impact on physical world view. In conclusion, the topics to be covered strongly differ between the states, and a consensus on the content of a first short introduction to general relativity is not apparent.

In the curricula of several federal states, there are time frames with topics at the teachers' discretion. This provides additional possibilities for teaching general relativity. From personal contacts we know that this possibility is used but cannot estimate to what extent.

State	Grade & Level	Designation of the class	GR topics covered	Ref
North Rhine-Westphalia (NRW)	11/12 AL	Relativity (SR and GR), total: 24 / GR: 8 lessons (<i>/2/</i>)	Basic statements of GR: gravitational time dilation, equivalence principle; Gravitation and time measurement (describe qualitatively); gravitation, time measurement and curvature of space (illustrate using models and graphics); impact on physical world view	[1]
Saxony	11 AL	Introduction to relativity (SR and GR), 8 lessons	Selected aspects of GR: gravitation and curved spacetime, experiments with atomic clocks, black holes in the universe, big bang theory	[3]

Table 1: General relativity in secondary school, as a required subject. (GR: general relativity, SR: special relativity, SL: standard level (Grundkurs), AL: advanced level (Leistungskurs), lesson: à 45 minutes)

State	Grade & Level	Designation of the class	GR topics covered	Ref
Bremen	11/12 AL	General relativity, 6 lessons	Equivalence principle, experimental tests (precession of the perihelion of Mercury, light deflection near the sun, gravitational redshift)	[4, 5]
Saarland	11	Fields, Section "Motion of charged particles in fields", 17 lessons	Reference to GR as theory of gravitation and to its significance for astrophysics and cosmology (recommendation)	[6]
Saxony	11 SL	Relativity of time and space (SR and GR), 4 lessons	Evidence for the impact of gravitation on light: reference to GR, gravitation and curved spacetime, experiments with atomic clocks, black holes in the universe	[3]

Table 2: General relativity in secondary school, as an optional subject. (GR: general relativity, SR: special relativity, SL: standard level (Grundkurs), AL: advanced level (Leistungskurs), lesson: à 45 minutes)

University	Level	Designation of module	GR topics in module description	Ref
U Bremen	M	Theoretical physics 2: mechanics and relativity, 6 credits, 4 SWS	Fundamental aspects of GR	[8]
U Kaiserslautern	B	Theoretical physics 1: mechanics, electrodynamics, 8 credits, 6 SWS	GR	[9]
U Stuttgart	B	Relativity, astrophysics, cosmology, 6 credits, 6 SWS	Steilkurs GR, classic tests in the solar system, double pulsar 1913+16, gravitational waves, cosmology based on GR (solution of the field equations, cosmological redshift, models with cosmological constant)	[10]

Table 3: General relativity in pre-service teacher education, as a required subject. (GR: general relativity, credits: ECTS credit points, SWS: lessons per week (à 45 minutes, for 15 weeks), B: Bachelor studies, M: Master studies)

3. General relativity in pre-service teacher education

Since teachers' proficiency in a subject is a prerequisite for its teaching in school, we also study the role of general relativity in pre-service teacher education. Fifty German universities nationwide offer pre-service teacher education (Gymnasium) in physics (*/7/*), see the appendix for a list. They are all included in this study. Study and examination regulations, academic guides, and handbooks of modules were downloaded from the official websites of these universities. The documents are as at July 2017.

The general relativity content of the studies of pre-service physics teachers is summarized in tables 3 and 4. Where relativity was mentioned in a module description, but without further details and not qualified as either "special" or "general", we took this to mean special relativity. This concerns physics education modules on modern physics at U Bayreuth, KIT Karlsruhe, U Köln, and U Oldenburg. These are not included in the tables. We find that nine universities offer general relativity for pre-service physics teachers. In three cases (U Bremen, U Kaiserslautern, U Koblenz-Landau), general relativity is mentioned as a single keyword

with no further details, as part of a theoretical physics course on mechanics and electrodynamics. These cases will not be considered further. There remain six universities that offer courses with a substantial general relativity content. The courses are partly on the level of the Bachelor studies (4 cases) and partly of the Master studies (2 cases). In four universities (U Bonn, U Dortmund, U Jena, U Konstanz), pre-service physics teachers can take a standard general relativity course as an optional course. The time frames of these courses vary between 30 lessons and 90 lessons (à 45 minutes), where in the case of U Jena the time frame for

general relativity was estimated to be half the course. The remaining two universities combine general relativity with other topics. In the case of U Stuttgart, general relativity is combined with astrophysics and cosmology. In the case of U Tübingen it is part of a course on classical field theory. From the course description, we roughly estimate 30 lessons as the time frame for general relativity in both cases. U Stuttgart stands out with a course that has a substantial general relativity content and is a required course (for students with physics as the major subject of their Bachelor studies).

University	Level	Designation of module	GR topics in module description	Ref
U Bonn	M	General relativity and cosmology, 7 credits, 5 SWS	Aims: Understanding GR and its cosmological implications. Contents: Relativity principle, gravitation in relativistic mechanics, curvilinear coordinates, curvature and energy-momentum tensor, Einstein-Hilbert action and the equations of the gravitational field, black holes, gravitational waves, time evolution of the universe, Friedmann-Robertson-Walker solutions	[11, 12]
U Bonn	M	General relativity for experimentalists, 7 credits, 5 SWS	Aims: The students shall learn the basics of GR and be able to apply it to applications such as experimental tests of GR, GPS, astrophysical objects and simple issues in cosmology. Contents: Review of SR, curved spacetime of GR, experimental tests of GR, GPS, black holes, gravitational waves, introductory cosmology	[11, 12]
TU Dortmund	M	General relativity, 6 credits, 4 SWS	Equivalence principle, principle of covariance and tensor analysis, covariant formulation and gravitational effects, curvature and curvature tensor, field equations, Schwarzschild metric, tests of GR, stellar structure and gravitational collapse (Oppenheimer-Volkoff equation, Kruskal metric, Eddington-Finkelstein metric, black holes)	[13]
U Jena	B	Relativistic physics (SR and GR), 4 credits, 4 SWS	Fundamental ideas of GR, Riemannian geometry, physical laws in Riemann space, field equations, Newtonian limit, Schwarzschild solution, classical GR effects, spherically symmetric stellar models, black holes	[14]
U Koblenz-Landau	B	Theoretical physics 1: mechanics, electrodynamics, 7 credits, 4 SWS	GR	[15]
U Konstanz	B	General relativity, 10 credits, 6 SWS	Introduction to SR, Riemannian geometry, field equations, predictions of the theory for static fields and comparison with experiments (precession of the perihelion of Mercury, light deflection, gravitational redshift, Shapiro time delay, Lense-Thirring effect), gravitational waves, stellar models (white dwarfs, neutron stars, black holes), cosmology (big bang)	[16]
U Tübingen	B	Classical field theory, 9 credits, 6 SWS	Equivalence principle, fundamentals of Riemannian geometry, field equations, Schwarzschild solution, gravitational waves	[17]

Table 4: General relativity in pre-service teacher education, as an optional subject. (GR: general relativity, credits: ECTS credit points, SWS: lessons per week (à 45 minutes, for 15 weeks), B: Bachelor studies, M: Master studies)

4. Discussion and Outlook

Among the 16 German federal states, two stand out by featuring general relativity both in school and in pre-service teacher education. Both Bremen and North Rhine-Westphalia have a substantial general relativity contribution in school. U Bremen provides an introduction to general relativity that is

presumably short, but is part of a required class for pre-service physics teachers. In North Rhine-Westphalia, two universities (out of 11), U Bonn and U Dortmund, offer general relativity as an optional subject to pre-service physics teachers.

General relativity has been newly introduced into various school curricula in recent years, both in

Germany and internationally, e. g. in Korea, Norway, and Scotland. Concurrently, there is increasing activity in physics education research on the teaching and learning of general relativity in school. This is partly triggered by the increasing role of general relativity in school curricula, and partly based on the conviction that general relativity is a fundamentally important part of the contemporary physical world view that every student should have the opportunity to get acquainted with.

Examples of recent work in general relativity education research include

- an online module designed for Norwegian upper secondary schools ([18]), also available online in English at [19]
- a course for secondary school students centered on student activities using models and analogies ([20], [21])
- courses for secondary school and pre-service teacher education based on the true-to-scale representation of curved spacetimes by sector models ([22], [23], [24]), with teaching resources available online at [25].

An important issue is pre-service teacher education in general relativity. Standard courses in general relativity are aimed at future theoretical physicists and involve learning an extensive mathematical apparatus. Since pre-service teachers in Germany study two subjects plus education science, the time available for studying physics will as a rule not allow for such a comprehensive general relativity course. Teacher education requires a shorter course, focussed on conceptual understanding and on the significance of relativistic phenomena in physics and astrophysics. Physics education research into this question should greatly help to pave the way for establishing general relativity in secondary schools.

Information on any omissions or mistakes in the data presented in this overview is very welcome.

5. References

- [1] (NRW) Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen, Physik, 2014
- [2] (NRW) QUA-LIS NRW, Physik, Inhaltsfeld: Relativitätstheorie (LK), 2014 (Umsetzungsbeispiel schulinterner Lehrplan)
- [3] (Saxony) Lehrplan Gymnasium, Physik, in Kraft 08/ 2011
- [4] (Bremen) Physik. Bildungsplan für die Gymnasiale Oberstufe – Qualifikationsphase, 2008
- [5] (Bremen) Handreichung zum Bildungsplan für das Gymnasium – Qualifikationsphase, 2008
- [6] (Saarland) Gymnasiale Oberstufe Saar, Lehrplan Physik, 2008
- [7] Studien- und Berufswahl 2016/17, Meramo Verlag, 2016
- [8] (U Bremen) Physik für das Lehramt an Gymnasien und Oberschulen, Webseite des Instituts für Didaktik der Naturwissenschaften, Modul TP L2, Stand 5.4.2013
- [9] (U Kaiserslautern) Studienanleitung Lehramt Physik (u.a.), WiSe 2016/17, Modul TP1
- [10] (U Stuttgart) Modulhandbuch Studiengang Bachelor of Arts (Lehramt) Physik HF, Stand: 3.4.2017, module 59030
- [11] (U Bonn) Modulhandbuch LA Master Physik, Stand: 25.4.2014
- [12] (U Bonn) Module-Handbook Master in Physics, SS 2017, 02/2017, course physics754, course physics768
- [13] (TU Dortmund) Modulhandbuch Master Physik für Lehramt an Gymnasien und Gesamtschulen und für Lehramt an Berufskollegs, Stand 06/2010, Modul V1.3_GY
- [14] (U Jena) Modulkatalog Bachelor of Science - 128 Physik, PO-Version 2013, Stand 25.4.2017, Modul 128BX521 Relativistische Physik
- [15] (U Koblenz-Landau) Modulhandbuch Physik für Lehramtsstudiengänge, Stand: 15.9.2015, Modul 03PH1109
- [16] (U Konstanz) Veranstaltungsverzeichnis und Vorlesungskommentar, FB Physik, WiSe 2016/17
- [17] (U Tübingen) Modulhandbuch Lehramt Physik in den Studiengängen Lehramt Physik an Gymnasien und Lehramt Sozialpädagogik/Pädagogik und Physik an beruflichen Schulen, Stand 1.12.2014, Modul BMTPKFT
- [18] M. Kersting, E. K. Henriksen, M. V. Boe, C. Angell, 2018, Design and evaluation of an online learning environment using the model of educational reconstruction, *Physical Review Physics Education Research* **14** 010130
- [19] The ReleQuant project, University of Oslo, www.viten.no/relativity
- [20] T. Kaur, D. Blair, J. Moschilla, W. Stannard, M. Zadnik, 2017, Teaching Einsteinian physics at schools: part 1, models and analogies for relativity, *Physics Education*, **52** (6) 065012, arXiv:1704.02058[physics.ed-ph]
- [21] T. Kaur, D. Blair, J. Moschilla, W. Stannard, M. Zadnik, 2017, Teaching Einsteinian physics at schools: part 3, review of research outcomes, *Physics Education*, **52** (6) 065014, arXiv:1707.03729[physics.ed-ph]
- [22] C. Zahn, U. Kraus, Sector models—A toolkit for teaching general relativity: I. Curved spaces and spacetimes, 2014, *EJP* **35** 055020, arXiv:1405.0323[physics.ed-ph]
- [23] C. Zahn, U. Kraus, Sector models—A toolkit for teaching general relativity: II. Geodesics, 2018, arXiv:1804.09828[physics.ed-ph]

- [24] U. Kraus, C. Zahn, Sector models—A toolkit for teaching general relativity: III. Spacetime geodesics, 2018, arXiv:1804.09765[physics.ed-ph]
- [25] C. Zahn, U. Kraus, Relativity visualized, www.spacetimetravel.org, www.tempolimitlichtgeschwindigkeit.de

Appendix

List of universities included in this study, grouped by federal state. Baden-Württemberg: U Freiburg, U Heidelberg, KIT Karlsruhe, U Konstanz, U Stuttgart, U Tübingen, U Ulm. Bavaria: U Augsburg, U Bayreuth, U Erlangen-Nürnberg, U München, TU München, U Regensburg,

U Würzburg. Berlin: FU Berlin, HU Berlin. Brandenburg: U Potsdam. Bremen: U Bremen. Hamburg: U Hamburg. Hesse: U Darmstadt, U Frankfurt, U Gießen, U Kassel, U Marburg. Lower Saxony: U Braunschweig, U Göttingen, U Hannover, U Oldenburg, U Osnabrück. Mecklenburg-West Pomerania: U Rostock. North Rhine-Westphalia: TU Aachen, U Bielefeld, U Bochum, U Bonn, U Dortmund, U Duisburg-Essen, U Köln, U Münster, U Paderborn, U Siegen, U Wuppertal. Rhineland-Palatinate: TU Kaiserslautern, U Koblenz-Landau, U Mainz. Saarland: U Saarbrücken. Saxony: U Dresden, U Leipzig. Saxony-Anhalt: U Halle-Wittenberg. Schleswig-Holstein: U Kiel. Thuringia: U Jena.

Programm MILENa zur MINT-Lehrer-Nachwuchsförderung: Weiterentwicklungen des Programms für größere Teilnehmendenzahlen

Bernadette Schorn, Heidrun Heinke

I. Physikalisches Institut IA, RWTH Aachen, Sommerfeldstr. 14, 52074 Aachen
schorn@physik.rwth-aachen.de, heinke@physik.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Das Programm MILENa zur MINT-Lehrer-Nachwuchsförderung zielt auf die Gewinnung von am MINT-Lehramt interessierten und dafür besonders geeigneten Schülerinnen und Schülern ab. Dazu werden die Teilnehmerinnen und Teilnehmer mit einem Bündel von schulischen und außerschulischen Angeboten längerfristig in einer Lebensphase begleitet, in der sich Studienwahlentscheidungen herausbilden bzw. festigen können und erhalten hierdurch einen vielschichtigen praxisnahen Einblick in den Lehrerberuf und in Teilaspekte des MINT-Lehramtsstudiums. Das seit 2013 wirkende Programm haben bislang ca. 300 Schülerinnen und Schüler absolviert. Basierend auf den mit den ersten drei Jahrgängen gewonnenen Erfahrungen wird das MILENa-Programm seit dem Herbst 2017 in einer modifizierten Form umgesetzt, die sich von dem ursprünglichen Programm vor allem in der Organisationsform derjenigen Programmteile unterscheidet, die durch lehrausbildende Hochschulen durchgeführt werden. Sie umfassen nunmehr von einer Hochschule betreute ein- und mehrtägige Veranstaltungen zu allgemein- und fachdidaktischen Inhalten sowie zur Vermittlung von Informationen zum MINT-Lehrerberuf und -Lehramtsstudium. Im Beitrag werden die Inhalte dieser Hochschulveranstaltungen detaillierter vorgestellt.

1. MILENa-Programm

Vor dem Hintergrund des bereits in vielen Bundesländern bestehenden Mangels an MINT-Lehrkräften, der sich laut Prognosen beispielsweise in Nordrhein-Westfalen in den allgemeinbildenden Schulen der Sekundarstufen I und II in den nächsten Jahren zum Teil nochmals drastisch verschärfen wird ([1], [2]), wurde 2013 das Programm MILENa zur MINT-Lehrer-Nachwuchsförderung gestartet. Auf der Grundlage der Erfahrungen mit den ersten drei Programmdurchläufen und ersten Bewertungen dieses überregionalen Programms durch die beteiligten Jugendlichen und Lehrkräfte [3] wurde das Programm zwischenzeitlich

mit dem Ziel modifiziert, deutlich mehr Schülerinnen und Schüler adressieren zu können [4]. Die wichtigsten Bestandteile des weiterentwickelten MILENa-Programms sind in Abbildung 1 dargestellt:

- Den Programmteilnehmerinnen und -teilnehmern ab der 10. bzw. 11. Jahrgangsstufe werden während der (durch die Schulen wählbaren) zwei- bzw. einjährigen Laufzeit des MILENa-Programms umfassende Angebote unterbreitet, in denen sie sich an ihren eigenen Schulen oder in deren Umfeld als Lehrende im MINT-Bereich erproben können. Diese Lehrgelegenheiten und die Be-

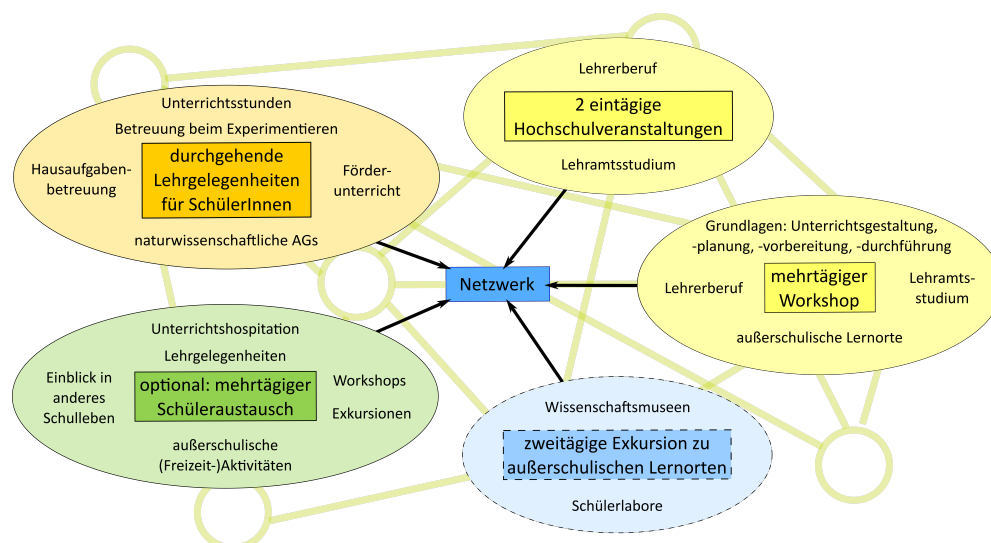


Abb. 1: Programmbestandteile des weiterentwickelten MILENa-Programms, das seit dem Herbst 2017 durchgeführt wird.

betreuung der Lehraktivitäten durch MINT-Lehrkräfte der teilnehmenden Schulen stellen einen zentralen Bestandteil des Nachwuchsförderprogramms dar.

Die schulischen Angebote werden von weiteren außerschulischen Programmbausteinen flankiert:

- Den Kern der außerschulischen Angebote bilden von einer Hochschule betreute ein- und mehrtägige Veranstaltungen zu allgemein- und fachdidaktischen Inhalten sowie zur Vermittlung von Informationen zum MINT-Lehrerberuf und -Lehramtsstudium.
- Außerdem besteht für die Schulen die Möglichkeit einen mehrtägigen Schüleraustausch mit einer Partnerschule aus dem Förderprogramm durchzuführen.
- Eine Exkursion zu einem außerschulischen Lernort ist in kleinem Umfang in die mehrtägigen Workshops integriert. Sie kann durch eine separate zweitägige Exkursion ergänzt werden.

Durch alle genannten Maßnahmen erhalten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer einen vielschichtigen praxisnahen Einblick in den Lehrerberuf sowie in Teilaspekte des MINT-Lehramtsstudiums. Sie werden dabei auch in ein umfangreiches Netzwerk eingebunden, das neben Schülerinnen und Schülern mit Interesse am MINT-Lehrerberuf auch MINT-Lehrkräfte an Schulen sowie Dozentinnen und Dozenten und MINT-Lehramtsstudierende an Hochschulen umfasst.

2. Hochschulveranstaltungen

Einen wesentlichen Bestandteil des MILENa-Programms bilden seit seinem Start im Herbst 2013 Hochschulveranstaltungen. Im Verlauf des ursprünglichen, damals immer zweijährigen MILENa-Programms waren sechs eintägige Veranstaltungen an einer betreuenden lehrerausbildenden Hochschule vorgesehen. Die detaillierte Konzeption dieser Veranstaltungen und die Ausarbeitung der ersten Versionen der entsprechenden Arbeitsmaterialien für die Schülerinnen und Schüler erfolgte seinerzeit in enger Kooperation zwischen der RWTH Aachen (H. Heinke, G. Jonas-Ahrend) und der Universität Duisburg-Essen (H. Theyßen). Da bei den Hochschulveranstaltungen stets Schülerinnen und Schüler von mindestens zwei teilnehmenden Schulen gemeinsam adressiert wurden, war die Durchführung der Veranstaltungen mit einem relativ großen koordinativen Aufwand verbunden, der auch eine Ausweitung des Programms auf deutlich größere Teilnehmerzahlen verhinderte.

Eine Befragung von Mitwirkenden am MILENa-Programm nach drei Teilnehmer-Jahrgängen hat ergeben, dass die Integration der Hochschulveranstaltungen im Programm als essentiell und unverzichtbar bewertet wurde. Deshalb wurde bei der Weiterentwicklung des MILENa-Programms nach einem Weg gesucht, die Einbindung der Hochschulen ebenso wie die wesentlichen Inhalte der von ihnen angebotenen

Veranstaltungen bei gleichzeitiger Reduktion des Koordinationsaufwands zu erhalten. Als Ergebnis bietet das modifizierte MILENa-Programm weiterhin zwei eintägige Hochschulveranstaltungen sowie einen mehrtägigen Workshop.

Die beiden eintägigen Hochschulveranstaltungen bilden in nahezu unveränderter Weise den Start und das Ende der Betreuung der Schülerinnen und Schüler durch die Hochschulen. Die Auftaktveranstaltung nimmt dabei eine Sonderstellung ein, weil sie bislang stets sämtliche teilnehmende Schülerinnen und Schüler eines MILENa-Jahrgangs gemeinsam adressiert hat. Sie dient damit nicht nur der Einführung in das Programm und der Vorstellung ausgewählter Facetten des MINT-Lehrerberufs, sondern auch der als wichtig bewerteten Netzwerkbildung im Programm. Für die Schülerinnen und Schüler stehen dabei Kontakte zu gleichgesinnten Peers im Vordergrund, die sie bei der standortübergreifenden Auftaktveranstaltung handlungsorientiert initiieren und pflegen können. Gleichzeitig bietet der Einführungstag auch den betreuenden Lehrkräften der MILENa-Teilnehmerschulen unter anderem breite Gelegenheiten zum Erfahrungsaustausch.

Das alte, eintägige Format wurde ebenfalls für die letzte Hochschulveranstaltung beibehalten. Sie dient im Wesentlichen der expliziten Vorstellung des MINT-Lehramtsstudiums an der betreuenden Hochschule und wurde deshalb standortabhängig gestaltet. Dabei wird analog zum ursprünglichen MILENa-Programm versucht, den Termin dieser abschließenden Hochschulveranstaltung konsequent jeweils an den Beginn des letzten Schuljahrs der Teilnehmerinnen und Teilnehmer zu legen. Damit soll eine große Nähe zu den möglichen Studienentscheidungen der Teilnehmerinnen und Teilnehmer erzielt werden, ohne eine zu große Ablenkung durch schulische Belastungen in der Endphase der Oberstufe in Kauf nehmen zu müssen. In Aachen hat es sich bewährt, in die Durchführung dieser letzten Veranstaltung Lehramtsstudierende aus dem MINT-Bereich zu integrieren. Zudem bietet diese Veranstaltung an der RWTH den Jugendlichen die Möglichkeit, einen Online Self-Assessment-Test für ein Studienfeld ihrer Wahl zu absolvieren, was an der RWTH Aachen für die übergroße Mehrheit der Studiengänge zur Einschreibung vorausgesetzt wird. Die abschließende Reflexion des MILENa-Programms im Rahmen der Abschlussveranstaltung durch die jugendlichen Teilnehmerinnen und Teilnehmer dient auch der steten Weiterentwicklung des Programms.

Die Inhalte der vier weiteren früheren eintägigen Hochschulveranstaltungen werden im modifizierten MILENa-Programm in leicht veränderter Form in einem mehrtägigen Workshop behandelt, der den Teilnehmerinnen und Teilnehmern verteilt auf vier Tage insgesamt 24 Stunden diverser Programmbestandteile bietet. Im Rahmen dieses Workshops erhalten die Schülerinnen und Schüler einen Einblick in einige allgemein- und fachdidaktische Aspekte zur Gestaltung,

Planung, Vorbereitung und Durchführung von (naturwissenschaftlichem) Unterricht. Auf Anregung der Lehrkräfte von erfahrenen MILENa-Schulen wird die mehrtägige Veranstaltung aktuell immer im Herbst des ersten MILENa-Jahrs für die Teilnehmerinnen und Teilnehmer angeboten und findet damit im Regelfall in Vorbereitung der Lehrgelegenheiten an ihren eigenen Schulen oder in deren Umfeld statt. Im Folgenden werden die Inhalte des mehrtägigen Workshops näher erläutert.

MINT-Lehrerberuf und -Lehramtsstudium

Im Zusammenhang mit einer allgemeinen Einführung in den MINT-Lehrerberuf zu Beginn des Workshops werden zunächst die im Vorfeld im Rahmen einer Hausaufgabe dargelegten Motive der Teilnehmerinnen und Teilnehmer für diesen Beruf erörtert und im Vergleich zu Ergebnissen einer Studie zum Prestige des Lehrerberufs [5] diskutiert. Zudem werden die Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler über naturwissenschaftlichen Unterricht und die Rolle bzw. das Handeln einer Lehrkraft in den MINT-Fächern thematisiert. Dazu fertigen die Teilnehmerinnen und Teilnehmer Zeichnungen an, in denen sie selbst als Lehrkraft im naturwissenschaftlichen Unterricht zu sehen sind („Draw a science teacher“). Diese werden anschließend analysiert und diskutiert, u.a. im Vergleich zu Ergebnissen fachdidaktischer Studien zu entsprechenden Vorstellungen von Lehramtsstudierenden zu Beginn des Studiums [6].

Im Hinblick auf die Berufs- und Studienorientierung für die am MILENa-Programm teilnehmenden Schülerinnen und Schüler erhalten sie außerdem zum einen Informationen zum MINT-Lehramtsstudium und zum anderen einen Einblick in die beruflichen Perspektiven an Schulen und Hochschulen, die sich rund um das MINT-Lehramt bieten. Dazu stehen ihnen während des Workshops zum informellen Austausch verschiedene Ansprechpartnerinnen und Ansprechpartner wie Lehramtsstudierende oder wissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sowie Dozierende der Universität zur Verfügung.

Unterrichtsgestaltung, -planung, -vorbereitung und -durchführung

Im Hinblick auf einen Einblick in zunächst allgemeindidaktische Grundlagen zur Gestaltung, Planung, Vorbereitung und Durchführung von Unterricht werden die „10 Merkmale guten Unterrichts“ nach Hilbert Meyer [7] sowie die Strukturierung von Unterricht behandelt. In Bezug auf den naturwissenschaftlichen Unterricht werden die bundeseinheitlichen Bildungsstandards, Kompetenzen und Kompetenzbereiche, Kontexte sowie Kernlehrpläne naturwissenschaftlicher Unterrichtsfächer thematisiert. Im Zusammenhang mit der Kontextorientierung wird zudem auf Ergebnisse fachdidaktischer Studien zu Schülerinteressen im naturwissenschaftlichen Unterricht und zu kontextorientiertem Unterricht ([8], [9]) sowie auf lernpsychologische Grundlagen, wie die konstruktivistische Auffassung vom Lernen, einge-

gangen. Des Weiteren werden Experimente und Experimentieraufgaben thematisiert, die bei der Gestaltung, Planung, Vorbereitung und Durchführung von naturwissenschaftlichem Unterricht von besonderem Interesse sind. Dabei lernen die Teilnehmerinnen und Teilnehmer einerseits Freihandexperimente kennen und führen diese selbst durch. Auf diese Weise erhalten sie nicht nur einen praktischen Einblick in eine bedeutende Form des Experimentierens im naturwissenschaftlichen Unterricht, sondern durch ihre Präsentationen der Freihandexperimente auch Möglichkeiten für erste „eigene Lehrerfahrungen“. Andererseits können sie beim praktischen Experimentieren eigene Erfahrungen bezüglich der Wirkung der Skalierung von Exponaten, wie sie bspw. in Science Centern realisiert werden, sammeln. Im Rahmen der Behandlung der für den naturwissenschaftlichen Unterricht essenziellen Experimentieraufgaben erarbeiten die Schülerinnen und Schüler Arbeitsblätter für einen Lernzirkel zum Thema „Luft ist nicht Nichts“. Die einzelnen Experimentierstationen einschließlich der erstellten Materialien werden im Anschluss erprobt, wobei sich die Teilnehmerinnen und Teilnehmer unter Berücksichtigung von ausgewählten Kriterien für die Gestaltung von Arbeitsblättern gegenseitig Feedback für eine mögliche Überarbeitung ihrer Materialien geben. Als weitere praktische Übung hinsichtlich des für die Unterrichtsplanung wichtigen Aspekts der Strukturierung von Unterricht konzipieren die Schülerinnen und Schüler Unterrichtseinheiten für unterschiedliche Klassenstufen zu dem fächerübergreifenden Thema „Oberflächenspannung“. Diese Arbeitsphase schließt auch das Entwerfen von Unterrichtsmaterialien für die verschiedenen Phasen einer Unterrichtsstunde ein. In diesem Zusammenhang erhalten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer durch die gegenseitige Präsentation der entwickelten Unterrichtseinheiten in Form eines hypothetischen Unterrichts wiederum Möglichkeiten für erste „eigene Lehrerfahrungen“. Zudem geben sie sich gegenseitig Feedback zur Strukturierung und Gestaltung des geplanten Unterrichts, wobei auch die Umsetzung von Feedbackregeln eingeübt wird.

Außerschulische Lernorte

Zur Vorbereitung einer halbtägigen Exkursion zu einem außerschulischen Lernort erhalten die Schülerinnen und Schüler eine allgemeine Einführung in diese Thematik. Im Rahmen der Exkursion setzen sich die Teilnehmerinnen und Teilnehmer umfassend mit dem informellen Lernen auseinander und können dazu sowohl aus der Perspektive einer Schülerin/eines Schülers als auch einer Lehrkraft eigene Erfahrungen sammeln. Dazu erhalten sie u.a. Beobachtungsaufgaben, die in der Reflexion der Exkursion besprochen werden.

Bei der Beschäftigung mit den Inhalten des mehrtägigen Workshops steht im Allgemeinen nach einer Einführung beispielsweise in Form von Kurzvorträgen der Dozentinnen und Dozenten die handlungsorientierte Auseinandersetzung in Einzel- und vor allem

MINT-Lehrerberuf	<ul style="list-style-type: none"> • Aufgaben, Chancen, Herausforderungen und berufliche Perspektiven einer MINT-Lehrkraft • Motive für den MINT-Lehrerberuf • Vorstellungen zu naturwissenschaftlichem Unterricht und Rolle bzw. Handeln einer Lehrkraft in den MINT-Fächern („Draw a science teacher“)
MINT-Lehramtsstudium	<ul style="list-style-type: none"> • Informationen zum MINT-Lehramtsstudium • Berufliche Perspektiven an Hochschulen zum MINT-Lehramt
Unterrichtsgestaltung, -planung, -vorbereitung und -durchführung	<p>Allgemeindidaktische Grundlagen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • „10 Merkmale guten Unterrichts“ nach Hilbert Meyer • Strukturierung von Unterricht <p>Naturwissenschaftlicher Unterricht:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bundeseinheitliche Bildungsstandards • Kompetenzen und Kompetenzbereiche • Kernlehrpläne • Kontexte • Experimente und Experimentieraufgaben
Außerschulische Lernorte	<ul style="list-style-type: none"> • Allgemeine Einführung • Exkursion

Tab. 1: Übersicht über die Inhalte der Hochschulveranstaltungen im weiterentwickelten MILENa-Programm

Partner- oder Gruppenarbeit im Vordergrund. Zu diesem Zweck wurden Materialien entwickelt, die Präsentationen sowie Arbeitsmaterialien für die Schülerinnen und Schüler für den Einsatz während des Workshops umfassen. Diese Unterlagen können die Schülerinnen und Schüler auch zur weiteren vertieften Beschäftigung mit den Themenfeldern und bei der Gestaltung ihrer eigenen Lehrgelegenheiten an ihren Schulen oder in deren Umfeld nutzen. Darüber hinaus werden den Teilnehmerinnen und Teilnehmern umfangreiche Experimentiermaterialien für die Beschäftigung mit Freihandexperimenten, mit der Skalierung von experimentellen Exponaten sowie für die Erarbeitung von Arbeitsblättern für einen Lernzirkel zum Thema „Luft ist nicht Nichts“ und der Unterrichtseinheiten zum Thema „Oberflächenspannung“ zur Verfügung gestellt. Auf diese Weise dienen die mehrtägigen Workshops neben einer Thematisierung des MINT-Lehrerberufs und -Lehramtsstudiums auch der Vermittlung eines breitgefächerten und praxisorientierten Einblicks in einige allgemein- und fachdidaktische Aspekte zur Gestaltung, Planung, Vorbereitung und Durchführung von (naturwissenschaftlichem) Unterricht.

3. Ausblick

Im Herbst 2017 startete in Nordrhein-Westfalen eine erste Pilotierung des weiterentwickelten MILENa-Programms mit 47 Schülerinnen und Schülern, für die von einer Hochschule zwei mehrtägige Workshops in den Herbstferien in Nordrhein-Westfalen angeboten wurden. Da das neue Format der Hochschulveranstaltungen als erfolgreich bewertet wurde, wird im Herbst 2018 eine zweite Pilotphase mit Schülerinnen und Schülern aus Nordrhein-Westfalen starten. Dabei werden von einer Hochschule bis zu vier Workshops für jeweils ca. 25 Schülerinnen und Schüler in den Herbstferien oder an einem verlängerten Wochenende angeboten werden. Dieser weitere Schritt bei der Weiterentwicklung des Programms soll zeigen, dass

es in dem neuen Programmformat im Vergleich zu dem ursprünglichen Nachwuchsförderungsprogramm gelingen kann, die Anzahl der Teilnehmerinnen und Teilnehmer an einem Hochschulstandort deutlich zu steigern. Dies macht der Vergleich mit den Teilnehmerzahlen im ursprünglichen überregionalen Programm deutlich, in dem in vier Jahrgängen insgesamt 250 Schülerinnen und Schüler erreicht wurden, von denen in einem Jahrgang im Regelfall ca. 15, maximal aber 26 Jugendliche von einem der sechs Hochschulstandorte betreut wurden.

Mit dem Ziel, die bereits vorliegenden vielfältigen positiven Erfahrungen und weitere Ideen zu schulischen und universitären Aktivitäten zur MINT-Lehrer-Nachwuchsförderung zu verbreiten, hat im Herbst 2017 ein sog. Themencluster seine Arbeit aufgenommen. Dieser Arbeitsverbund von Lehrkräften sowie Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern von Hochschulen erarbeitet Materialien, die niederschwellige Einstiegs- und Erweiterungsmöglichkeiten für Aktivitäten zur MINT-Lehrer-Nachwuchsförderung an ihren Schulen beschreiben und dabei sowohl Schulleitungen als auch Lehrkräfte adressieren. Zum anderen werden Materialien für Hochschulen aufbereitet, die sowohl in organisatorischer als auch inhaltlicher Hinsicht umfassende Hilfestellungen zur Durchführung eines MINT-Lehrer-Nachwuchsförderungsprogramms bieten sollen.

4. Literatur

- [1] Klemm, Klaus (2015): Lehrerinnen und Lehrer der MINT-Fächer: Zur Bedarfs- und Angebotsentwicklung in den allgemein bildenden Schulen der Sekundarstufen I und II am Beispiel Nordrhein-Westfalens, Url: <https://www.telekom-stiftung.de/klemm-studie> (Stand 5/2018)
- [2] Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2018): Prognose zum Lehrkräftearbeitsmarkt in Nordrhein-Westfalen: Einstellungschancen für Lehrkräfte bis zum

- Schuljahr 2039/40, Url: <https://www.schulministerium.nrw.de/docs/LehrkraftNRW/Arbeitsmarkt/Prognosen.pdf> (Stand 5/2018)
- [3] Schorn, Bernadette; Plückers, Katharina; Salinga, Christian; Schreiber, Nico; Theyßen, Heike; Heinke, Heidrun (2017): Programm MILENa zur MINT-Lehrer-Nachwuchsförderung. In: C. Maurer (Hrsg.), Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Zürich 2016. (S. 194-197). Universität Regensburg.
- [4] Schorn, Bernadette; Salinga, Christian; Heinke, Heidrun (2018): Perspektiven des Programms MILENa zur MINT-Lehrer-Nachwuchsförderung. In: C. Maurer (Hrsg.), Qualitätsvoller Chemie- und Physikunterricht – normative und empirische Dimensionen. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Regensburg 2017. (S. 392-395). Universität Regensburg.
- [5] Süßlin, Werner (2012): Lehre(r) in Zeiten der Bildungsapanie - Eine Studie zum Prestige des Lehrerberufs und zur Situation an den Schulen in Deutschland. Im Auftrag der Vodafone Stiftung Deutschland, Url: https://www.vodafone-stiftung.de/uploads/tx_newsjson/allensbach_04_2012.pdf (Stand: 5/2018)
- [6] Markic, Silvija; Eilks, Ingo (2007): Vorstellungen von Lehramtsstudierenden der Physik über Physikunterricht zu Beginn des Studiums und ihre Einordnung. In: Physik und Didaktik in Schule und Hochschule (PhyDid) 6(2) (2007), S. 31-42, Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid/article/view/54/54> (Stand: 5/2018)
- [7] Meyer, Hilbert, Praxisbuch: Was ist guter Unterricht?, Cornelsen (2004).
- [8] Hoffmann, Lore; Häußler, Peter; Lehrke, Manfred (1998): Die IPN-Interessenstudie Physik. Kiel: IPN Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften
- [9] Holstermann, Nina; Bögeholz, Susanne (2007). Interesse von Jungen und Mädchen an naturwissenschaftlichen Themen am Ende der Sekundarstufe I. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 13, S. 71 - 86.

Danksagung

Die Weiterentwicklung des MILENa-Programms wird im Rahmen der gemeinsamen „Qualitätsoffensive Lehrerbildung“ von Bund und Ländern aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Besonderer Dank gilt auch dem zdi Netzwerk Aachen & Kreis Heinsberg und der Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung für die finanzielle Förderung, dem Verein MINT-EC sowie den Lehrkräften an den Schulen und den Dozentinnen und Dozenten der anderen Hochschulstandorte für ihre Mitwirkung.

Stolpersteine überwinden im Physikunterricht – ein Buch zu fachgerechten Elementarisierungen

Thomas Wilhelm

*Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt
wilhelm@physik.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

Welche Inhalte, Sachstrukturen, Experimente und Elementarisierungen im Physikunterricht verwendet werden, ist stark von Traditionen bestimmt. Manche Elementarisierung, die eine lange Tradition hat, ist aber fachlich problematisch und didaktisch ungeschickt. In diesem Beitrag wird dazu ein neues Buch präsentiert. Darin stellen mehrere Physikdidaktiker bekannte Erklärungen, bekannte Versuche und bekannte Vorgehensweisen vor, die aber missverständlich, verwirrend oder lernhinderlich sind, und verbreitete Behauptungen, die den aktuellen Forschungsergebnissen widersprechen. Jedes der Kapitel beschränkt sich jeweils auf ein kleines schwieriges Thema der Sekundarstufe, das kritisch hinterfragt und bei dem zum kritischen Nachdenken angeregt wird.

1. Die Inhalte des Buches

Der Sammelband „Stolpersteine überwinden im Physikunterricht. Anregungen für fachgerechte Elementarisierungen“ (siehe Abb. 1) richtet sich in gleicher Weise an erfahrene Physiklehrkräfte der Sekundarstufe wie an Referendare, Studierende des Physiklehramts und an Auszubildende [1]. Die einzelnen Kapitel sind zum Teil aus der Reihe „Moment mal ...“ der Zeitschrift „Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule“ und zum Teil ansonsten unveröffentlicht. Das Buch hat 160 Seiten, besteht aus 49 Kapiteln von 33 verschiedenen Autoren und hat Inhalte zu den verschiedensten Gebieten der Physik

Welche Inhalte, Sachstrukturen, Experimente und Elementarisierungen im Physikunterricht verwendet werden, ist stark von Traditionen bestimmt, die u.a. durch Schulbücher und Experimentierbücher weitergegeben werden. Zunächst ist das positiv, als Lehrkraft auf diesen Schatz an Erfahrungen zurückgreifen zu können und sich nicht alles selbst überlegen zu müssen. Immer wieder zeigen aber empirische Studien der Physikdidaktik auf, dass andere Sachstrukturen zu mehr Verständnis bei den Schülern führen können. Beispielhaft genannt sei das Konzept der Sender-Strahlungs-Empfänger-Vorstellung im Gegensatz zur konstruktionsbetonenden Optik [2+3], das Energie-vor-Arbeit-Konzept [4] oder das Konzept der zweidimensional-dynamischen Mechanik [5+6]. Es sind aber nicht nur die großen Konzepte und die grundlegenden Vorgehensweisen, die im Unterricht von Bedeutung sind. Manchmal ist es nur ein Versuch, der Schüler verwirrt, oder eine bestimmte Formulierung, die zu Fehlvorstellungen führt. Daneben gibt es Erklärungen, die eine lange

Tradition haben, aber dennoch fachlich falsch sind und ohne Verlust weggelassen werden können.

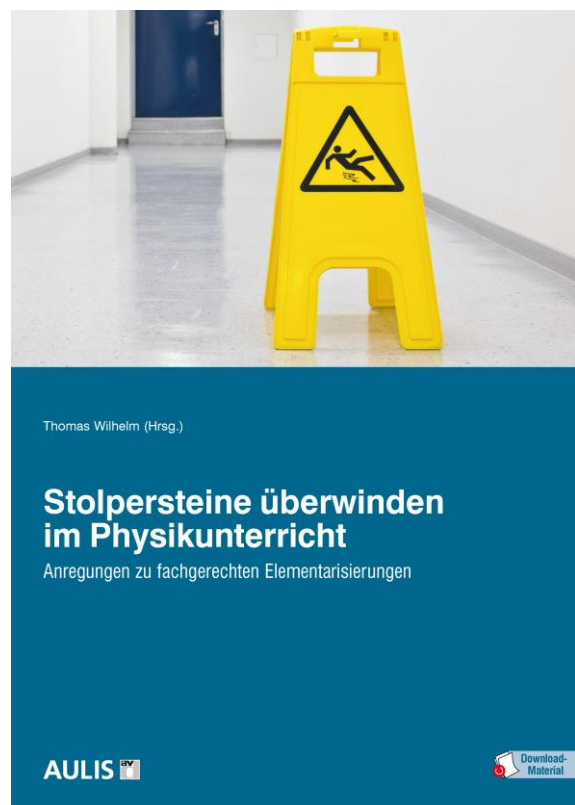


Abb. 1: Das Titelbild

In diesem Buch werden bekannte Erklärungen, bekannte Versuche und bekannte Vorgehensweisen vorgestellt, die aber missverständlich, verwirrend oder lernhinderlich sind, und verbreitete Behauptungen, die den aktuellen Forschungsergebnissen widersprechen. Jedes Kapitel beschränkt sich jeweils

auf ein kleines schwieriges Thema der Sekundarstufe. Verständnissvoll werden ungeschickte Vorgehensweisen oder falsche Behauptungen geschildert und dann kritisch hinterleuchtet. Manchmal wird dann vorgeschlagen, dies anders oder überhaupt nicht zu unterrichten. Im Vordergrund steht aber nicht, alternative Unterrichtskonzepte vorzustellen, sondern zum kritischen Nachdenken anzuregen.

Es soll nicht darum gehen, jemanden zu tadeln, weil er einen Baustein im Unterricht benutzt, der sich innerhalb von Jahrzehnten bewährt zu haben scheint. Sondern es geht darum, vor manchen Stolperfallen zu warnen, damit keiner hinfällt. Manche dieser Gedanken wurden schon an anderer Stelle vorgestellt, aber die Artikel wurden kaum bekannt und haben unsere Lehrtradition noch nicht verändert. Manche Stolpersteine sind auch recht neu und nicht so verbreitet, aber es besteht die Gefahr, dass sie zur Tradition werden.

Es geht in diesem Buch darum, manch alte Pfade neu zu überdenken. Gute Elementarisierungen zu finden, bleibt eine Herausforderung und eine zentrale Aufgabe der Physikdidaktik, zu der es neben Schulerfahrung, guter fachlicher und fachdidaktischer Kenntnis insbesondere Kreativität und Ideen braucht [6].

2. Was bedeutet „fachgerechte Elementarisierung“?

Bei manchem in diesem Buch kritisierten Vorgehen mag der Leser sagen, das Vorgehen sei eben eine Elementarisierung und diese muss nicht fachlich korrekt sein. Richtig ist, dass wir die komplexe Sachstruktur der Physik für den Physikunterricht didaktisch reduzieren müssen und in kleine Sinneinheiten zerlegen müssen, die dann zu einer evtl. ganz anderen Sachstruktur des Unterrichts wieder zusammengesetzt werden müssen. Diesen Vorgang nennt man Elementarisierung [7] oder Didaktische Rekonstruktion [8]. Elementarisieren bedeutet demnach a) Vereinfachen, b) das Wesentliche Herausarbeiten und c) in Bestandteile Zerlegen [9+10]. Eine Vereinfachung des Inhalts bedeutet eine Niveaubasenkung, eine Verminderung der Abstraktheit durch Rückführung zum Konkreten und einen Abbau der Komplexität. Dies geschieht durch eine Rückführung auf das Qualitative, durch Vernachlässigungen und durch bildhafte Darstellungen. Das Wesentliche oder Elementare, das herausgearbeitet wird, ist die grundlegende Idee, das Gesetz, das Prinzip, die tragende Wirkungsweise oder Zweckbestimmung. Schließlich braucht man für den Unterricht eine Abfolge kleinerer Sinneinheiten, also kleine Bestandteile, da man nicht alles auf einmal vermitteln kann.

Eine gute Elementarisierung ist schülergerecht und zielgerecht, muss aber nicht in allen Aspekten fachlich richtig sein; insbesondere muss sich der Unterricht nicht an die Fachsystematik der Hochschule halten [11]. Manchmal müssen Umwege über halb-

richtige Zwischenstufen gegangen werden. Manchmal ist – da man vereinfacht hat – eine Aussage nur in einen gewissen Gültigkeitsbereich richtig (den man aber angeben sollte). Auch Modelle bzw. Analogien sind zugelassen, die natürlich außerhalb ihres Modellbereiches häufig falsch sind [7]. Außerdem werden aus fachdidaktischer Sicht Fachbegriffe erfunden, die es in der Hochschulphysik nicht gibt. Deshalb ist für Elementarisierungen statt „fachlich richtig“ besser „fachlich relevant“ [12] bzw. „fachgerecht“ [7] zu fordern. Der physikalische Sinn eines Begriffes darf nicht verfälscht und ein Phänomen oder die Funktionsweise eines Gerätes nicht auf falsche Grundlagen bezogen werden [7]. Außerdem muss eine Elementarisierung „entwicklungsfähig“ [12] bzw. „fachlich erweiterbar“ [7] bzw. „anschlussfähig“ [13] sein. Das bedeutet, dass Schüler in höheren Jahrgangsstufen nicht umlernen müssen, sondern grundlegende Bedeutungen erhalten bleiben. Bedenklich ist eine Elementarisierung dann, wenn sie dem Lernen anderer Themen oder einer späteren Erweiterung im Wege steht. Das Kriterium ist also nicht die fachliche Richtigkeit aus Hochschulsicht, sondern ob eine Erklärung oder Elementarisierung langfristig zum Verständnis der Physik beiträgt oder nicht.

Es gibt Versuche, die bei dem Thema, bei dem sie eingesetzt werden, eher Fehlvorstellungen erzeugen, als das Verständnis des Themas zu unterstützen. Sie können deshalb weggelassen und durch andere Versuche ersetzt werden. Es gibt Versuche, die Fehlvorstellungen in einem anderen physikalischen Gebiet fördern und durch andere Versuche ersetzt werden können. Es gibt Erklärungen, die nicht nur fachlich falsch, sondern kompliziert sind und bei denen eine richtige Erklärung viel einfacher ist. Ganze Analogien haben sich als problematisch erwiesen, weil sie Fehlvorstellungen fördern oder weil sie sich trotz fachlicher Richtigkeit nicht als lernförderlich erwiesen haben.

Es wäre ein Missverständnis, das Buch so aufzufassen, als ob die Autoren gegen Elementarisierung bzw. Vereinfachungen seien und dafür eintreten, die Physik in der Schule so wie in der Hochschule zu unterrichten. Manchmal geht es nur darum, einen Versuch oder eine Erklärung oder einen Inhaltsaspekt schlicht wegzulassen. Manchmal muss eine Erklärung nur leicht anders formuliert werden.

Physiklehrkräfte, Physikdidaktiker und Physiker entwickeln ständig neue Ideen für den Physikunterricht, d.h. neue Beispiele, neue Inhalte, neues Vorgehen. Insbesondere neue technische Errungenschaften eröffnen viele Möglichkeiten im Unterricht. Gleichzeitig hat sich die Unterrichtszeit aber nicht erhöht. Deshalb ist es positiv, wenn es Vorschläge gibt, was man weglassen sollte; es bleiben genug Inhalte übrig.

3. Die einzelnen Themen

Die einzelnen Themen und Autoren werden in der Tabelle 1 aufgelistet.

Die Kapitel des Buches	Die Autoren der Kapitel
Zur Einführung	
1 Was ist eine gute Elementarisierung?	T. Wilhelm
Kinematik	
2.1 Ort, Ortsverschiebung, Weg – wofür steht eigentlich das s ?	T. Amenda, H. Schecker
2.2 Geschwindigkeit oder Tempo?	T. Wilhelm
2.3 Durchschnitts- und Momentangeschwindigkeit?	T. Wilhelm
2.4 Wie ist die Beschleunigung an der Rampe?	T. Wilhelm, M. Wenzel, W. Reusch
2.5 $s = \frac{1}{2} a t^2$?	T. Wilhelm
2.6 Welche Bewegungsarten gibt es?	T. Wilhelm
2.7 Sind die Bewegungskomponenten unabhängig voneinander?	T. Wilhelm
2.8 Wo ist die potenzielle Energie?	H. Schwarze
Kräfte	
3.1 Was sind die Bestimmungsstücke einer Kraft?	T. Wilhelm
3.2 Trägheit nur bei schnellen Bewegungen?	T. Wilhelm
3.3 Trägheit nur bei großen Kräften?	T. Wilhelm
3.4 Eine Kraft kann verformen?	T. Wilhelm, M. Wenzel
3.5 Wo ist die Gegenkraft?	T. Wilhelm
3.6 Wie entsteht die Hangabtriebskraft?	T. Wilhelm
3.7 Woher kommt die Gleitreibung?	T. Wilhelm, H. Wiesner, P. Vogt
3.8 Warum können wir Schlittschuh laufen?	T. Wilhelm, M. Hopf
3.9 Wie hoch springt ein Astronaut auf dem Mond?	S. Thaller
3.10 Warum fährt ein Fahrrad stabil?	R. Erb
3.11 Auftrieb gleich Gewichtskraft der verdrängten Wassermenge?	H. Wiesner
3.12 Wird die Oberflächenspannung zu oberflächlich betrachtet?	W. Reusch
3.13 Wie ist das mit der Zentrifugalkraft?	R. Berger, M. Kahnt
Optik und Akustik	
4.1 Wie ist das optische Auflösungsvermögen definiert?	O. Passon, J. Grebe-Ellis
4.2 Schwarze Gegenstände verschlucken das gesamte Licht?	C. Haagen-Schützenhöfer
4.3 Warum hören wir nichts aus dem Vakuum?	M. Hopf, T. Wilhelm
4.4 Was gibt Musikinstrumenten ihren Klang?	P. Vogt
Thermodynamik	
5.1 Sieht man die Molekularbewegung im Wasserglas?	S. Riegel
5.2 Erklärt das Teilchenmodell die Volumenreduktionen bei Mischversuchen?	J. Winkelmann, J. Behle
5.3 Warum ist die Luft feucht?	T. Wilhelm, R. Müller
5.4 Hat jedes Wasser eine Dichteanomalie?	T. Wilhelm
5.5 Warum dehnen sich Festkörper bei Erwärmung aus?	R. Berger, A. Helzel, K. Rincke
Elektrizitätslehre und Magnetismus	
6.1 Elektronen als Energieträger?	T. Wilhelm
6.2 Hilft die Wasserkreislaufanalogie?	J.-P. Burde, T. Wilhelm
6.3 Wie visualisiert man Elementarmagnete?	T. Wilhelm
6.4 Wie schwimmt die Magnethöhle?	M. Suleder
6.5 Genügt die Bewegung eines Magneten für Induktion?	R. Berger
6.6 Wirbelströme bedeuten Abbremsen?	T. Wilhelm
6.7 Warum wird der Thomson'sche Ring abgestoßen?	U. Backhaus, R. Berger
6.8 Warum rollt die Achse?	T. Wilhelm
6.9 Gibt es die mechanische Analogie zum Schwingkreis?	J.-P. Meyn
Moderne Physik	
7.1 Wie ist die I_A - U -Kurve beim Franck-Hertz-Experiment zu interpretieren?	M. Hildebrandt, R. E. Robson
7.2 Sind Elementarteilchen kugelförmig?	G. Wiener
7.3 Was ist eigentlich ein Photon?	O. Passon
7.4 Wie funktioniert die Solarzelle?	T. Bauer, T. Wilhelm
7.5 Die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation am Einzelspalt?	H. Wiesner

7.6 Ist die Herleitung der Energieniveaus im Potenzialtopf fachlich korrekt?	R. Berger, R. Müller
7.7 Zerfällt Bierschaum analog zum radioaktiven Zerfall?	T. Wilhelm, W. Ossau
Methodisches	
8.1 Sind Schülerexperimente erfolgreicher als Demonstrationsexperimente?	J. Winkelmann, R. Erb
8.2 Ist jede Messung prinzipiell fehlerbehaftet?	S. Heinicke, C. Holz

Tab. 1: Kapitel und Autoren des Sammelbandes

4. Literatur

- [1] Wilhelm, T. (Hrsg.): Stolpersteine überwinden im Physikunterricht. Anregungen für fachgerechte Elementarisierungen, Aulis/Friedrich, Seelze, ISBN: 978-3-7614-2965-5, 2018, www.friedrich-verlag.de/shop/aulis-bei-friedrich/sekundarstufe/physikunterricht/stolpersteine-uberwinden-im-physikunterricht/
- [2] Herdt, D.: Einführung in die elementare Optik. Vergleichende Untersuchung eines neuen Lehrgangs, Westarp, Essen, 1989
- [3] Vier Lehrerhandbücher wurden von H. Wiesner, P. Engelhardt, D. Herdt u.a. in der Reihe Unterricht Physik im Aulis-Verlag veröffentlicht: Band 1: Optik I, Band 2: Optik II, Band 3/I: Optik III/1 und Band 3/II: Optik III/2
- [4] Bader, M.: Vergleichende Untersuchung eines neuen Lehrganges „Einführung in die mechanische Energie und Wärmelehre“, Dissertation Universität München, 2001
- [5] Wilhelm, T.; Tobias, V.; Waltner, C.; Hopf, H.; Wiesner, H.: Einfluss der Sachstruktur auf das Lernen Newtonscher Mechanik – In: Bayrhuber, H.; Harms, U.; Muszynski, B.; Ralle, B.; Rothgangel, M.; Schön, L.-H.; Vollmer, H.; Weigand, H. G. (Hrsg.): Formate Fachdidaktischer Forschung. Empirische Projekte – historische Analysen – theoretische Grundlegungen, Fachdidaktische Forschungen, Band 2, Waxmann, Münster/New York/München/Berlin, 2012, S. 237 - 258
- [6] Zwei Lehrerhandbücher wurden im Aulis-Verlag veröffentlicht: Wiesner, H.; Wilhelm, T.; Waltner, C.; Tobias, V.; Rachel, A.; Hopf, M.: Mechanik I: Kraft und Geschwindigkeitsänderung. Neuer fachdidaktischer Zugang zur Mechanik (Sek. 1), Aulis-Verlag, 2016 und Wilhelm, T.; Wiesner, H.; Hopf, M.; Rachel, A.: Mechanik II: Dynamik, Erhaltungssätze, Kinematik - In: Reihe Unterricht Physik, Band 6, Aulis-Verlag, 2013
- [7] Kircher, E.: Elementarisierung und didaktische Rekonstruktion – In: Kircher, E.; Girwidz, R.; Häußler, P. (Hrsg.): Physikdidaktik. Theorie und Praxis, 3. Auflage, Berlin/Heidelberg, Springer Spektrum, 2015, S. 107 – 139
- [8] Kattmann, U.; Duit, R.; Gropengießer, H.; Komorek, M.: Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion. Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 3, Heft 3, 1997, S. 3 - 18.
- [9] Bleichroth, W.: Elementarisierung, das Kernstück der Unterrichtsvorbereitung - In: Naturwissenschaften im Unterricht - Physik 2, 1991, S. 4 - 11
- [10] Bleichroth, W.; Dahncke, H.; Jung, W.; Kuhn, W.; Merzyn, G.; Weltner, K.: Fachdidaktik Physik, 2. Überarbeitete und erweiterte Auflage, Aulis Verlag Deubner & Co KG, Köln, 1999
- [11] Duit, R.: Zur Rolle des Faches Physik beim Lehren und Lernen von Physik - In: Maurer, Chr. (Hrsg.): Authentizität und Lernen - das Fach in der Fachdidaktik, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Berlin 2015, Band 36, 2016, S. 4 - 12, http://www.gdcp.de/images/tagungsbaende/GD_CP_Band36.pdf
- [12] Jung, W.: Fachliche Zulässigkeit aus didaktischer Sicht, Arbeitspapier zum IPN Seminar 2, IPN polykop, Kiel, 1972. Und in: Kahlke, J.; Kath, F. M.: Didaktische Reduktion und methodische Transformation. Quellenband, Leuchtturm-Verlag, Alsbach, 1984, S. 111 – 121
Wiesner, H.; Schecker, H.; Hopf, M.: Physikdidaktik kompakt, Aulis Verlag in der Stark Verlagsgesellschaft, 2011