

Grötzebauch, H. & Heinicke S. (Hrsg.)

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

Fachverband Didaktik der Physik

Greifswald 2024

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 von PhyDid B 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, Quantenphysik, Studienreform-Forum Physik, und Weitere Themen*.

Zitierweise beispielsweise:

Grötzebauch, H. & Heinicke S. (Hrsg.). (2024). PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Greifswald 2024. 427 S.
Url.: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/1473>
ISSN 2191-379X

Copyright Hinweise

Die einzelnen Autoren sind für die rechtmäßige Verwendung von eingereichten Beiträgen, Abbildungen, Hyperlinks und Zusatzmaterialien verantwortlich und tragen 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: <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/index>

ISSN: 2191-379X



Namensnennung - Nicht-kommerziell - Weitergabe unter gleichen Bedingungen

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode.de>

Inhaltsverzeichnis

Anregungen aus dem Unterricht für den Unterricht

- Kooperative Datenerfassung am Beispiel des Hertzsprung-Russell-Diagramms** 1
Sven Levetzow, Lukas Maczewsky, Elisa Neuhaus, Heidi Reinholz

Astronomie

- Analysis of Gravitational Instabilities in Stars Using a Model Sequence** 7
Lina Jarck, Hans-Otto Carmesin
- Das Mondrätsel und die Erfindung der modernen Optik** 17
Thomas Quick, Johannes Grebe-Ellis
- Das Stellarium Gornegrat** 29
Simon Kraus, Stéphane Gschwind, Marvin zur Mühlen, Andreas Müller, Jean David Picon, Timm-Emanuel Riesen, Leon Rohde, Oliver Schwarz
- Students Learn to Derive the Energy Density of Volume** 35
Hans-Otto Carmesin

Hochschuldidaktik

- Digitale Übungsaufgaben zur Lehre von mathematischen Methoden in physikgeprägten Studiengängen** 43
Jonas Gleichmann, Hans Kubitschke, Jörg Schnauß
- Förderung digitaler Kompetenzen von Physik-Lehrkräften im ComeNet Physik** 47
David Weiler, Jan-Philipp Burde, Kasim Costan, Rike Große-Heilmann, Christoph Kulgemeyer, Josef Riese, Thomas Schubatzky
- Making Makers** 55
Fabian Bernstein, Thomas Wilhelm
- Modulübergreifendes Blended Learning in der Mathematikausbildung zur Experimentalphysik im Lehramtsstudium Physik** 61
Lydia Kämpf, Frank Stallmach
- Vernetztes Wissen zum Energiekonzept von Studierenden der Naturwissenschaften** 69
Dennis Dietz, Claus Bolte

Lehreraus- und Lehrerfortbildung

- Adaptive Lehrerfortbildung zum quantenmechanischen Weltbild** 77
Philipp Scheiger, Lukas Blessing, Kim Kappl, Ronny Nawrodt
- Das Q-Masterstudium als wissenschaftsbasierter Quereinstieg in das Lehramt** 83
Novid Ghassemi, Volkhard Nordmeier
- Der digitale Dozent: ChatGPT als Co-Pilot in der Lehrpersonenbildung** 91
Jens Damköhler, Wolfgang Lutz, Thomas Trefzger
- Fachwissenschaft für's Lehramt** 97
Andreas Schulz, Stefan Brackertz, Thomas Jockweg
- Lernen mit (interaktiven) Experimentiervideos** 109
Mathias Ziegler, Lisa Stinken-Rösner
- Mangelnde Implementation physikdidaktischer Innovationen** 115
Jakub Knebloch, Christian Hengel, Julie Kyas, Andreas Hansch, Thomas Wilhelm
- NOS im Fokus: Forschung zu Vorstellungen von Physiklehrkräften** 119
Linda Zwick, Rita Wodzinski
- Planung von Experimenten für den Physikunterricht** 125
Sven Levetzow, Heidi Reinholz

Lehr- und Lernforschung

- Arbeitsblattvorlagen als Mittel zur differenzierten Förderung der Variablenkontrollstrategie** 131
Tobias Winkens, Heidrun Heinke
- eMobility for Kids - das Lernwerkstattformat für 12- bis 15-Jährige** 139
Andreas Daberkow, Barbara Wild
- Entwicklungsvalidierung von Anleitungen zum selbstständigen Arbeiten im Physikunterricht** 145
Roland Berger, Maria Danzglock (geb. Wevers), Maria Wevers, Martin Hänze
- Eye-Tracking-Studie zur Untersuchung von Strategien im Umgang mit Schaltplänen** 151
Stefanie Peter, Olaf Krey

Forscherboxen und Unterrichtsmaterial zum Thema „Farben“ im inklusiven NaWi-Unterricht	119
Giulia Pantiri, Lea Mareike Burkhardt, Thomas Wilhelm, Volker Wenzel, Arnim Lühken, Dieter Katzenbach	
Identität von Schüler*innen und naturwissenschaftlicher Anfangsunterricht	F1 I
Lisa-Marie Christ, Frederik Bub, Olaf Krey, Thorid Rabe	
Konzeptionelles Verständnis von Studierenden der Ingenieurwissenschaften zum elektrischen Stromkreis	F1 I
Bernadette Schorn, Alexander Voigt	
Konzeption, Entwicklung und Evaluation eines Laserlabors für Schüler:innen	F1 J
Roman Kuhr, Heidi Reinholz, Lukas Maczewsky	
Modelle des einfachen Stromkreises in der Sekundarstufe I in Baden-Württemberg	F1 I
Katharina Leibfarth, Benedikt Gottschlich, Jan-Philipp Burde	
Transfer bei analogen Problemsituationen	FJH
Marco Seiter, Heiko Krabbe	
Wirksamkeit aktivierender Lehrmethoden in einführenden Physikmodulen	199
Andreas Modler	
Zum Einfluss der Nutzung von Modellanalogien auf das Konzeptwissen	207
Florian Frank, Thomas Trefzger	
Neue Konzepte	
Klimabildung – schulisch und außerschulisch vernetzt	215
Jonas Tischer, Elena Vetter, Ina de Buhr, Michael Komorek	
Project Find & Link	223
Ramona Schauer-Bollig, Maria Hinkelmann, Heidrun Heinke	
Neue Medien	
Digitale Messwerterfassung beim zentralen elastischen Stoß unter Einbeziehung von Reibungseffekten	231
Saskia Riedel, Frank Stallmach	
Erfassung von großräumigen zweidimensionalen Bewegungen mit GPS	237
Thomas Wilhelm, Patrick Zeder, Lukas Schauer	

Konzipierung und Erprobung einer Einführung in das Experimentieren mit der App phyphox	243
Marija Herdt, Maria Hinkelmann, Prof. Dr. Heidrun Heinke	
phyphox: Eines Sensorkette als DIY-Projekt - orts aufgelöste Messung von Beschleunigung und Temperatur	249
Johannes Schlaf, Dominik Dorsel, Sebastian Staacks, Heidrun Heinke	
PUMA : Optiklabor - Eine webbasierte AR-Simulation für die Sekundarstufe I	257
Stefan Kraus, Thomas Trefzger	
Videoanalyse in die Praxis bringen	261
Julie Kyas, Christian Hengel, Jakub Knebloch, Andreas Hansch, Thomas Wilhelm	
Videos von Bewegungen für den Unterricht vorbereiten	269
Christian Hengel, Julie Kyas, Jakub Knebloch, Andreas Hansch, Thomas Wilhelm	
Visualisierung von Elektronen in Stromkreisen mithilfe der App PUMA : Spannungslabor	275
Lisa Nebel, Christoph Stolzenberger , Florian Frank , Thomas Trefzger	
 Neue Versuche und Praktika	
Eine Box, viele Möglichkeiten: Experimentieren im Kontext Klima	279
Christopher Jörgens, Cornelia Geller, Hendrik Härtig	
Einführung in die Datenauswertung mit Python im physikalischen Praktikum für Lehramt- und Nebenfachstudierende	289
Maximilian Kühlkamp, Ralf Detemple, Dominik Dorsel, Heidrun Heinke	
 Quantenphysik	
Entwicklung von Testinstrumenten zu deklarativem Wissen und Vorstellungen zur Quantenphysik in der Mittelstufe	297
Carsten Albert, Gesche Pospiech	
Experimental and Theoretical Analysis of Quantum Computing	303
Philipp Schöneberg, Hans-Otto Carmesin, Phil Gustke, Jannes Ruder	
Quanteninformatik in der Lehrerbildung mit Transfer in den berufsorientierenden Unterricht	313
Gesche Pospiech, Moritz Förster	

Students Learn the Fundamental Exact Unification of Gravity, Relativity, Quanta and Elementary Charge Hans-Otto Carmesin	321
Students Learn to Derive Nonlocality from Fundamental Physics Hans-Otto Carmesin	331
Students Learn to Solve the Cosmological Constant Problem Hans-Otto Carmesin	341
Zur Rolle mathematischer Repräsentationen für das Verständnis quantenphysikalischer Prinzipien Moritz Förster, Gesche Pospiech	349
 Studienreform-Forum Physik	
Vom Karzer zum Bachelor Annemarie Sich, Stefan Brackertz, Philipp Bönninghaus, Barbara Obwaller, Lisa Lehmann, Jonathan Moeller, Manuel Längle, Amr Miniawy, Robert Bartz	357
Workshop: Vom Sinn des Physikstudiums Barbara Obwaller, Stefan Brackertz, Manuel Längle, Jonathan Moeller, Lisa Lehmann, Annemarie Sich, Robert Bartz, Amr El Miniawy, Milan Ončák, Luise Helmstreit, Paul Opitz, Marwin Handler, Ilja List, Antonia Bauer	365
 Weitere Themen	
Der Einfluss von Visualisierungen auf die Güte von Likert-Skalen oder wie Umfragen unbewusst das Antwortverhalten von Teilnehmenden beeinflussen können Teresa Tewordt, Lisa Stinken-Rösner	373
Ein einfaches Modell für die Vorhersage von CO₂ Konzentrationen in der Atmosphäre in Abhängigkeit von globalen CO₂ Emissionen Michael Vollmer, Wolfgang Eberhardt	379
Lernlabor zur Photolumineszenz-Spektrometrie didaktisch rekonstruiert Kai Bliesmer, Martin Esmann, Lukas Lackner, Diyar Sadiq	389
Physical and robust forecast of the climate Jannes von Bergen, Hans-Otto Carmesin	397
Students Analyse the Impact of the H₀ Tension of the Worldview Hans-Otto Carmesin	405
Students Learn to Derive Universal Properties of Gravitons Hans-Otto Carmesin	413

Zentrale Motive der MINT-Identitätsverhandlung

Markus Elsholz, Agnes Birner, Florian Frank, Thomas Trefzger

423

Tagungsprogramm

Url: <https://www.dpg-verhandlungen.de/year/2024/conference/greifswald/part/dd>

Kooperative Datenerfassung am Beispiel des Hertzsprung-Russell-Diagramms

Sven Levetzow¹, Lukas Maczewsky², Elisa Neuhaus³, Heidi Reinholz²

¹Universität Rostock, Institut für Mathematik, Ulmenstraße 69, 18057 Rostock

²Universität Rostock, Institut für Physik, Albert-Einstein-Straße 23, 18059 Rostock

³Staatliches Gymnasium „Albert Schweitzer“ Erfurt, Vilniuser Str. 17-19, 99089 Erfurt

Sven.levetzow@uni-rostock.de

Kurzfassung

Die digitale Messwerterfassung ist in den naturwissenschaftlichen Bildungsstandards und auch in den Rahmenplänen des Landes Mecklenburg-Vorpommerns fest verankert. Neben der Nutzung von Smartphones und Sensoren zur Messwerterfassung oder Videoanalysesoftware ist die kooperative Datenerfassung eine Möglichkeit, der digitalen Messwerterfassung gerecht zu werden. Es wird hier die kooperative Methode mit einem Ersatzversuch zur Einführung des Hertzsprung-Russell-Diagramms vorgestellt. Schülerinnen und Schüler werten Fotoaufnahmen von Sternen in verschiedenen Himmelsausschnitten hinsichtlich ihrer Farbe und ihrer Helligkeit aus. Durch das Zusammentragen vieler Messwerte kann das Hertzsprung-Russell-Diagramm erarbeitet und der wissenschaftliche Erkenntnisprozess nachvollzogen werden. Es wird eine mögliche Unterrichtsstunde vorgestellt, die auf die Entwicklung der experimentellen Teilkompetenz Fragestellung entwickeln fokussiert. Weiterhin wird diese Unterrichtsstunde anhand verschiedener didaktischer Modelle und Theorien in den Erkenntnisprozess von Schülerinnen und Schülern eingeordnet.

1. Fachlicher Hintergrund

Das Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) ist eine grundlegende Darstellungsart in der Astronomie, welches zu Beginn des 20. Jahrhunderts entwickelt wurde, um Sterne zu kategorisieren und nach ihren Charakteristiken einzuteilen (Hertzsprung, 1911; Russell, 1913; Carroll 2017). Das HRD hat sich zum unverzichtbaren Werkzeug entwickelt, welches nicht nur eine Klasseneinteilung der Sterne sondern auch das Nachvollziehen des Entwicklungsweges eines Sterns ermöglicht. Heutzutage kann das HRD mithilfe der immensen Datenlage aus unterschiedlichsten, hochpräzisen Beobachtungsquellen eine detailreiche Sterncharakterisierung ermöglichen. Im HRD wird die absolute Helligkeit über der Spektralklasse aufgetragen (Carroll, 2017). Typisch sind auch physikalische Größen wie Oberflächentemperatur, Farbindex oder Leuchtkraft. Ein didaktisch reduzierter Zugang ist die Verwendung von sogenannten Farben-Helligkeits-Diagrammen (Argelander-Institut für Astronomie der Universität Bonn 2022). Diese sind Schülerinnen und Schülern im Schulunterricht zugänglich, da Farben visuell wahrnehmbar sind.

Beim Unterrichten des HRD im Astronomie- oder Physik-Unterricht gibt es verschiedene Ansätze, um die Idee des Diagramms mit alltäglichen Größen und Vorstellungen zu verknüpfen. Beispielsweise kann das Auftragen der Maximalgeschwindigkeit eines Fahrzeugs über der Fahrzeugmasse analog die unterschiedlichen Charakteristiken von Landwirtschaftsmaschinen gegenüber der Klasse von Sportwagen aufzeigen. Auch die Darstellung der Körpermasse über der Körpergröße von Menschen unterschiedlichen Alters ermöglicht einen Zugang zum HRD (Schwarz, 2013). Mit solchen Ersatzversuchen

können Schülerinnen und Schülern so selbst ein alternatives HRD erstellen, wobei insbesondere die Vielzahl der benötigten Daten für eine charakteristische Klasseneinteilung hervorgehoben werden.

Hier soll nun ein Ansatz vorgestellt werden, bei dem die Schüler:innen mit astronomischen Daten ein alternatives HRD erstellen. Die Schüler:innen haben dabei die Möglichkeit, den Prozess der Erstellung eines HRDs vom Blick in den Himmel bis zur Auftragung in einem Diagramm direkt nachzuvollziehen.

2. Beschreibung Experiment

Die kooperative Methode als eine Methode der digitalen Messwerterfassung zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass durch das Zusammentragen experimenteller Messdaten zügig eine hohe Datenmenge erreicht werden kann. Dafür nutzt man unter anderem digitale Tabellenkalkulationsprogramme, wie Excel oder OpenOffice Calc (Wilhelm 2023), die zumeist bereits in Lernmanagementsystemen integriert sind. In diesen kollaborativen Programmen arbeiten und schreiben mehrere Personen gleichzeitig, was somit zu einem zeiteffektiven Stundenablauf beiträgt. Die dabei erreichte Datenmenge verringert den Einfluss von Messunsicherheiten bei zufälligen Vorgängen. Die automatisierte Datenauswertung ermöglicht es zudem, den Fokus von Experimenten mehr auf die Identifikation und Reflexion der wissenschaftlichen Arbeitsweisen zu legen, sodass die Entwicklung von Fragestellungen, das Bilden von Hypothesen und die Auswertung der Messergebnisse in Bezug auf die Fragestellung und die Hypothese an Bedeutung gewinnen. Diese Vorteile der kooperativen Methode können genutzt werden, um die Erarbeitung des Hertzsprung-Russell-Diagramms zu verdeutlichen. Es

kommt eine Softwareanwendung (Android: Color-Picker, IOS: Color Picker AR, <https://photocolorpicker.com/de>) zum Einsatz, die die Farbwerte von Bildern beziehungsweise Bildbereichen ausgibt. Dazu lädt man das Bild eines Himmelsausschnittes in eine entsprechende Softwareanwendung und markiert einen hinreichend kleinen Bildbereich. Die Anwendung gibt die Farbwerte des Bildbereiches aus, wobei in diesem Zusammenhang die Farbwerte der HSL-Farbskala genutzt werden. Der Farbwert Hue (Farbton) entspricht einem Wert auf dem Farbkreis im Intervall von 0° bis 360° . Für die Auswertung mit dem Tabellenkalkulationsprogramm wird diese Skala auf einen Wert zwischen 0 und 400 [arb. u.] rekali­briert. Der Wert für den Farbton ersetzt die Spektralklasse im HRD.

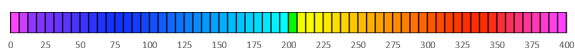


Abb. 1: Rekalibrierte Farbskala im Intervall von 0 bis 400 [arb. u.]

Der Farbwert Lightness beschreibt die Helligkeit im Intervall von 0 % bis 100 %. Dieser wird genutzt, um den Wert für die absolute Helligkeit eines Sterns im HRD zu ersetzen. Durch das Auslesen dieser beiden Farbwerte kann die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Spektralklasse und der absoluten Helligkeit eines Sternes simuliert werden. Dabei wird insbesondere bei der Helligkeit/Lightness didaktisch reduziert, da die Bestimmung einer absoluten Helligkeit, wie sie im HRD verwendet wird, nicht möglich ist, jedoch auch nicht für das Lernziel benötigt wird.

3. Stundenverlauf

Die hier vorgestellte Unterrichtsstunde zur Erarbeitung des Hertzsprung-Russell-Diagramms zielt auf das Erkennen des experimentellen Erkenntnisprozesses durch die wiederholte Entwicklung von Fragestellungen und Aufstellen von Vermutungen ab. Aus diesem Erkenntnisprozess können erste Aussagen abgeleitet werden, die zum HRD führen. Dafür werden in der Unterrichtsstunde selbst erstellte Diagramme interpretiert und miteinander verglichen.

Die Unterrichtsstunde gliedert sich klassisch in eine Reaktivierung und Zusammenfassung, aus der eine motivierende Zielorientierung folgt. Die anschließende erste Experimentierphase ermöglicht eine erste Auseinandersetzung mit der Softwareanwendung und der graphischen Auswertung der Daten für einen Himmelsausschnitt. Die daraus resultierende Fragestellung wird in einem zweiten experimentellen Durchlauf mit einer Vielzahl verschiedener Himmelsausschnitte untersucht. Die Interpretation und der Vergleich aller entstandenen Diagramme ermöglicht erste Rückblicke auf die Fragestellungen, sodass allgemeine Aussagen formuliert werden können, die zum HRD führen.

Reaktivierung, Motivierung, Zielorientierung

Die Unterrichtsstunde zur Erarbeitung des HRD soll-

te langfristig vorbereitet werden. So könnte das Unterrichtsfach Astronomie mit der Frage beginnen, was man am Sternenhimmel beobachten kann. Es folgt eine Sammlung von Alltagssprachlichen Wörtern und fachlichen Begriffen, wie „Punkte bewegen sich“, „Asteroiden“, „Sterne flackern“, „Mond ist größter Körper“ uvm. Diese Sammlung der Beobachtungen dient als langfristige Zielorientierung der im Alltag beobachtbaren Phänomene, die es im Unterrichtsfach Astronomie zu klären gilt. Zu Beginn der hier vorgestellten Unterrichtsstunde wird nun auf diese Sammlung Bezug genommen und diejenigen Wörter und Begriffe identifiziert, die in vorherigen Unterrichtsstunden bereits diskutiert wurden. Die Schüler:innen erkennen, dass Formulierungen, wie „Sterne“, „verschiedene Helligkeit“, „verschiedene Farben“ noch nicht thematisiert wurden. Die Lehrkraft leitet die Schüler:innen zu der Fragestellung: „Kann man Sterne anhand ihrer Helligkeit und Farbe klassifizieren“, sodass die Schüler:innen die Untersuchung von Sternen als Stundenthema erkennen. Dabei soll darauf geachtet werden, dass die Schüler:innen die Fragestellung möglichst eigenständig entwickeln und formulieren. Möglichkeiten, die Schüler:innen bei der Entwicklung einer Fragestellung zuzustützen, schlagen Tschentscher & Kulgemeyer (2014) in ihrem Artikel zum Umgang mit Heterogenität beim Experimentieren vor.

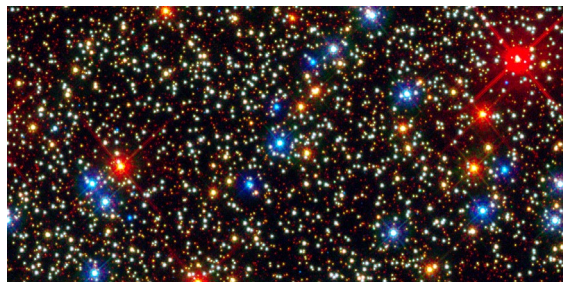


Abb. 2: Bildausschnitt "Omega Centauri - WFC3" bereitgestellt von NASA, ESA, and J. Anderson and R. van der Marel unter <https://hubblesite.org/contents/media/images/2010/28/2764-Image.html?news=true>, Stand: Mai 2024

Erste Experimentierphase

Anschließend an die Zielorientierung erfolgt das Experiment, in dem alle Schüler:innen denselben Himmelsausschnitt (Abb. 2) auswerten.

Die Schüler:innen sollen ohne Vorgabe eines Bildsegmentes verschiedene Sterne vermessen und die Messergebnisse kollaborativ in die Tabellenkalkulation einfügen. Das mit diesen Daten erstellte Diagramm wird beschrieben und analysiert. Daraus leiten die Schüler:innen Hypothesen über existierende Gruppen von Sternen, die zu einer Sternklassen zusammengeführt werden können, ab.

Die Schüler:innen entwickeln daraufhin geleitet die Frage ab, ob diese Klassen von Sternen auch bei anderen Himmelsausschnitten zu entdecken sind. Gleichzeitig erfolgt eine Diskussion möglicher Mess-

unsicherheiten, sodass in einem zweiten Experiment die Messwerterfassung exakter durchgeführt wird. Das heißt zum Beispiel, es soll keine Mehrfachmessung einzelner Sterne oder die Vermessung eines Sternenzentrums erfolgen.

Zweite Experimentierphase

Für die zweite Experimentierphase, in der die vorher aufgestellten Hypothesen über etwaige Klassen von Sternen geprüft werden soll, erhält jede Schülerin und jeder Schüler einen eigenen Himmelsausschnitt. Dazu bieten sich Himmelsausschnitte mit vielen verschiedenfarbigen, annähernd punktförmigen Objekten, wie zum Beispiel das Hubble Deep Field, an. Es sollen jeweils mehrere Sterne vermessen und in die Tabellenkalkulation eingetragen werden, sodass jede:r Schüler:in eine eigene Diagrammdarstellung erhält aber gleichzeitig auch Daten zu einem gemeinsamen Diagramm beiträgt. Bereits im Verlauf der zweiten Experimentierphase können die Schüler:innen die Diagramme aus der ersten und zweiten Experimentierphase miteinander vergleichen, sodass die Fragestellung zu bestehenden Klassen von Sternen diskutiert werden kann.

Auswertung, Zusammenfassung

In der Phase der Auswertung und Zusammenfassung der Unterrichtsstunde vergleichen die Schüler:innen die entstanden Diagramme aus der zweiten Experimentierphase, setzen ihre Diagramme zu einer Darstellung des HRD in Beziehung und verbalisieren explizit ihre Erkenntnisse. Eine abschließende Animation (Quelle: <https://esahubble.org/videos/heic1017b/>, Stand: Mai 2024), die die Erstellung des HRDs zeigt, illustriert, was bei der Messwertaufnahme des Experimentes und der graphischen Auswertung geschehen ist, und fasst den experimentellen Erkenntnisprozess zusammen.

Dazu werden in der Animation die Sterne eines Himmelsausschnittes hinsichtlich ihrer Farbe und anschließend hinsichtlich ihrer Helligkeit sortiert. Als Ausblick für folgende Stunden wird die Auseinandersetzung mit den im HRD erkennbaren Klassen von Sternen als Zielorientierung formuliert.

4. Begleitforschung

Das Facettenmodell experimenteller Teilkompetenzen nach Nawrath et al. (2011) beschreibt für den experimentellen Erkenntnisprozess sieben Kompetenzen, die es im Unterricht zu fördern gilt. Mit diesem Spinnennetzmodell können die durch ein Experiment geförderten Kompetenzen der Schüler:innen eingeschätzt werden. Die Unterrichtsstunde fokussiert die Entwicklung der Teilkompetenz „Fragestellung entwickeln“, indem das beschriebene Experiment mehrfach durchgeführt wird und dabei die Formulierung von Fragestellungen durch die Schüler:innen anregt. Für die erste Experimentierphase wird aus einer konkreten Himmelsbeobachtung eine „sinnvolle Fragestellung [abgeleitet], die sich auf das zugrundeliegen-

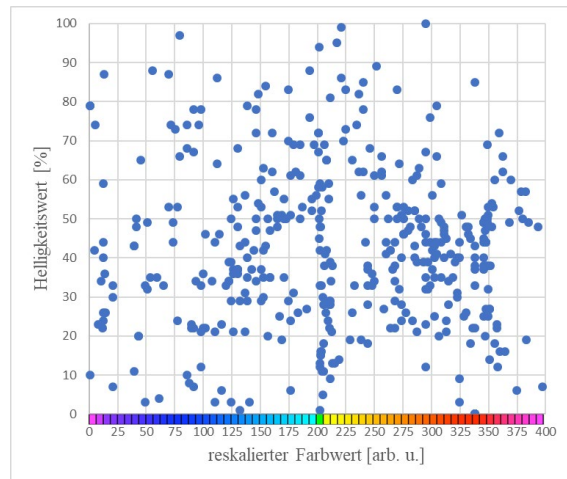


Abb. 3: Farbmessung der Sterne nach der HSL-Skala, Messwerte zu dem Bild Omega Centauri (Abb. 2) der gesamten Klasse, Anzahl Messdaten: 424

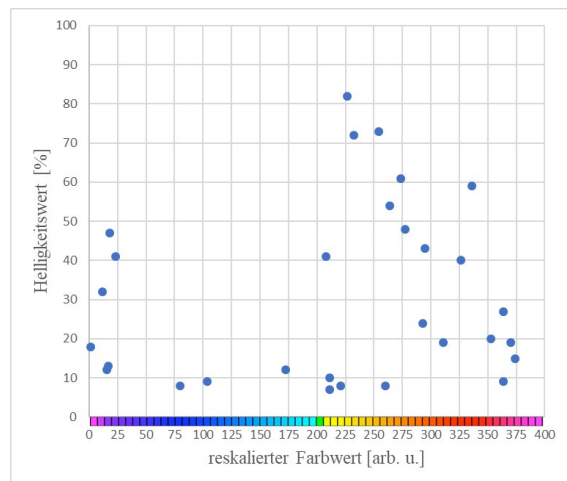


Abb. 4: Farbmessung der Sterne nach der HSL-Skala, Messwerte zu dem Bild "Monster Galaxy Lacks a Bright Core" einer Schüler:in, Anzahl Messdaten: 20

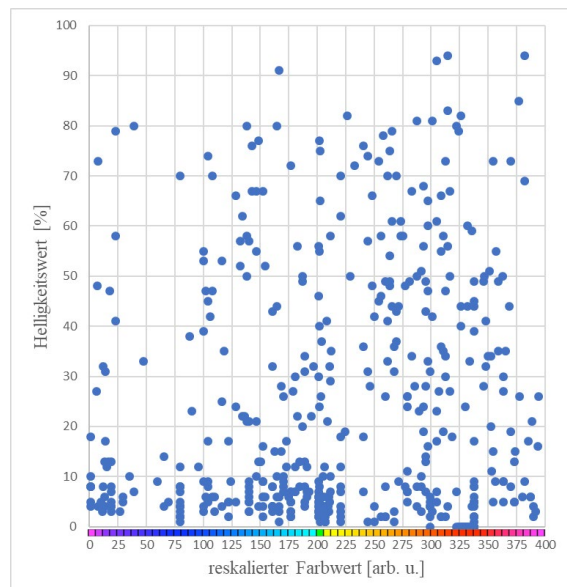


Abb. 5: Farbmessung der Sterne nach der HSL-Skala, Messwerte zu allen Bildern der zweiten Experimentierphase, Anzahl Messdaten: 480

de naturwissenschaftliche Phänomen bezieht.“ (Nawrath et al., 2011).

Die daraus abgeleitete Hypothese dient als Grundlage für eine weitere Fragestellung, die zielgerichtet und „mit den verfügbaren experimentellen Mittel untersucht werden kann.“ (Nawrath et al., 2011) Mittels eines zweiten Experimentierprozesses soll die Hypothese widerlegt oder bestätigt werden. Es wird also der experimentelle Erkenntnisprozess mehrfach durchlaufen. Für die Unterrichtsstunde mit dem Experiment zur Erarbeitung des Hertzsprung-Russell-Diagramms ergibt sich damit folgende Spinne für die experimentellen Teilkompetenzen:

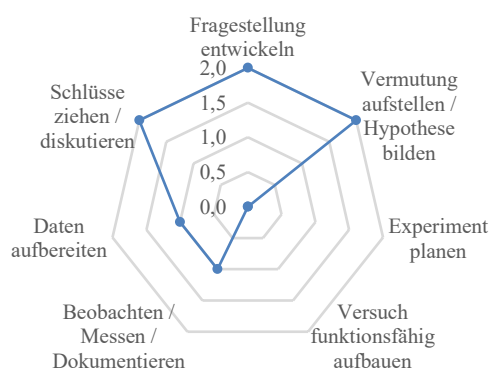


Abb. 6: Bewertung der durch das Experiment bei den Schüler:innen geförderten experimentellen Teilkompetenzen (Nawrath et al., 2011)

Für eine qualitative Beschreibung des Lernerfolges wird ein Fragebogen im Pre-Post-Format genutzt. Dieser fokussiert das (Vor-)Wissen zu Sternen und Sternenarten sowie das Verständnis über den wissenschaftlichen Erkenntnisprozess und wie das experimentelle Vorgehen verstanden wird, um neues Wissen zu generieren. In diesem Zusammenhang wird konkret erfragt, inwieweit die Schüler:innen die einzelnen experimentellen Teilkompetenzen in der Unterrichtsstunde wahrnehmen und für sich erkennen.

5. Ergebnisse der Pilotierung

An der Unterrichtsstunde zur Pilotierung nahmen N=20 Schüler:innen einer gymnasialen neunten Klasse teil. Die Abbildungen 3 bis 5 zeigen die Ergebnisse der beiden Experimentierphasen durch die Schüler:innen. In den Abbildungen sind Clusterbildungen erkennbar, ähnlich denen im HRD.

Die ausführende Lehrkraft stellte fest, dass mit der beschriebenen Unterrichtsstunde das Ziel, den experimentellen Erkenntnisprozess für die Schüler:innen bewusst zu machen, erreichbar ist. Jedoch würde die genutzte Softwareanwendung vorrangig schwarze Farbe, also eine geringere Farbhelligkeit, ausweisen. Dies irritierte die Schüler:innen in den Experimentierphasen, sodass sie die Lehrkraft um Unterstützung baten. Aufgrund der zeitlichen Begrenzung der Stunde wurde die Interpretation der Diagramme und das Ableiten von Aussagen, die zum HRD führen, in der Anschlussstunde fortgesetzt. In der Post-Testung,

die am Ende der beschriebenen Unterrichtsstunde erfolgte, wurden die Schüler:innen gefragt, inwieweit sie die experimentellen Teilkompetenzen in der Unterrichtsstunde wahrgenommen haben. Dabei erkannten 30 % der Schüler:innen die Teilkompetenz „Fragestellung entwickeln“ als Teil der Unterrichtsstunde. Das Aufstellen von Vermutungen bzw. Formulieren von Hypothesen wurde 60 % der Schüler:innen deutlich. Für die Schüler:innen lag der Schwerpunkt der Unterrichtsstunde bei der Durchführung und Auswertung des Experimentes. Die folgende Abbildung 7 illustriert die von der Lehrkraft intendierten experimentellen Kompetenzen im Vergleich zu den von den Schüler:innen in der Unterrichtsstunde wahrgenommenen enthaltenen experimentellen Tätigkeiten.

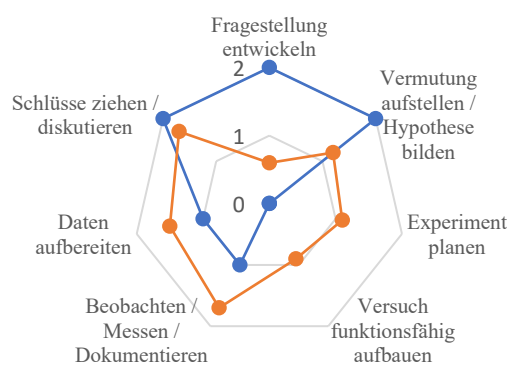


Abb. 7: Vergleich der durch das Experiment zu fördernden experimentellen Kompetenzen (blau) und der durch die Schüler:innen wahrgenommenen experimentellen Tätigkeiten als Mittelwert (orange)

6. Diskussion der Ergebnisse

Es wurde eine Unterrichtsstunde zur Erarbeitung des Hertzsprung-Russell-Diagramms vorgestellt. Dabei wurde die digitale Messwerterfassung in Form einer kooperativen Methode genutzt. Die Pilotierung der Unterrichtsstunde zeigte, dass die Planung adäquat umsetzbar ist. Zeitliche Probleme können durch mangelnde technische Fähigkeiten der Schüler:innen entstehen. Weiterhin ist die Wahl der Softwareanwendung zu überdenken. Die hier genutzte, anmeldefreie Anwendung verwendet bei der Farbanalyse einen relativ großen Bildbereich, sodass viele Farbpixel einbezogen werden. Insbesondere bei kleinen Sternen misst die Anwendung nicht nur die tatsächliche Farbe des gewählten Sternes, sondern auch weiter umliegende, meist schwarze Farbpixel, die die Messwerte maßgeblich beeinflussen. Daher ist eine Softwareanwendung zu wählen, bei der die Größe der zu messenden Bildbereiche durch die Pixelanzahl verstellbar ist.

Die experimentelle Tätigkeit, Fragestellungen zu entwickeln, wird von den Schüler:innen bedingt wahrgenommen. Es ist darauf zu achten, diesen Prozess mehr in den Mittelpunkt der entsprechenden Unterrichtsphasen zu rücken und die Entwicklung von Fragestel-

lungen zu unterstützen. Als entsprechende Maßnahmen schlagen Tschentscher & Kulgemeyer (2014) verschiedene Varianten vor, die die Erarbeitung der Fragestellungen begünstigen. So wäre es denkbar, die Schüler:innen die Fragestellung als Lückentext oder „Sprechblasen mit gezielten Fragen zur Entwicklung einer Fragestellung“ (ebd.) vorzugeben. Ein ebenfalls interessanter Ansatz wäre die Vorgabe mehrerer Fragestellungen, aus denen die Schüler:innen eine für sie passende auswählen.

Zusammenfassend erwies sich die hier vorgestellte Unterrichtsstunde mit dem Ersatzversuch zur Erarbeitung des Hertzsprung-Russell-Diagramm als durchaus gewinnbringend. Es zeigt jedoch auch, dass die gezielte Förderung der experimentellen Teilkompetenz „Fragestellung entwickeln“ schwierig ist und einer detaillierteren Untersuchung bedarf.

7. Literatur

- Argelander-Institut für Astronomie der Universität Bonn (2022): Sternentwicklung und Farben-Helligkeits-Diagramm. Online verfügbar unter https://astro.uni-bonn.de/andromeda/m2_fhd/, zuletzt aktualisiert am 18.02.2022, zuletzt geprüft am 27.05.2024.
- Hertzsprung, E., (1908). Über die Sterne der Unterabteilung c und ac nach der Spektralklassifikation von Antonia C. Maury *Astronomische Nachrichten*, 179, 373–380.
- Russell, H.N., (1914). Relations between the spectra and other characteristics of the stars. *Popular Astronomy*, 22, 275–294.
- Carroll, B.W., Ostlie, D.A. (2017). An introduction to modern astrophysics. *Cambridge University Press*.
- Schwarz, O. (2013). Das HRD – Erkundungen im Unterricht. *Astronomie+Raumfahrt* 135/136(3/4), 6–10.
- Nawrath, D., Maiseyenko, V. & Schecker, H. (2011). Experimentelle Kompetenz: Ein Modell für die Unterrichtspraxis. *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, 60(6), 42–48.
- Tschentscher, C. & Kulgemeyer, C. (2014). Mit Heterogenität beim Experimentieren umgehen: Hilfen und Tipps zur Erstellung differenzierter Versuchsanleitungen. *Unterricht Physik*(144).
- Wilhelm, Thomas (2023): Digital Physik unterrichten, zuletzt geprüft am 27.05.2024.

Danksagung

Sven Levetzow dankt für die finanzielle Unterstützung durch das Verbundprojekt LEHREN in M-V der Qualitätsoffensive Lehrerbildung. Lukas Maczewsky dankt für die finanzielle Unterstützung durch den SFB 1477 der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

Analyse von Gravitationsinstabilitäten bei Sternen mithilfe einer Modellsequenz

Lina Jarck*, Hans-Otto Carmesin **,***

*Gymnasium Athenaeum, Harsefelder Str. 40, 21680 Stade

**Studienseminar Stade, Bahnhof Str. 5, 21682 Stade

*** Universität Bremen, Fachbereich 1, 28334 Bremen

lina.jarck@athenetz.de; hans-otto.carmesin@athenetz.de

Kurzfassung

In dieser Forschungsarbeit haben wir uns mit der Untersuchung von Gravitationsinstabilitäten bei Sternen beschäftigt. Dazu verwendeten wir eine progressive Sequenz von Modellen, teils mit variabler Dichte. Auch bieten die Modelle Möglichkeiten der Überprüfung und des Vergleichs. Zusätzlich optimieren wir unsere letztjährige Untersuchung. Um diesen Ansatz zu validieren, erstellen wir zunächst ein Modell, das die variable Dichte der Sonne als Funktion des Radius ermittelt. Da diese Funktion bekannt ist, lässt sich die Herangehensweise optimal überprüfen. Zur weiteren Progression und Überprüfung unserer Methode erstellen wir ein Modell mit variabler Dichte für einen Weißen Zwerg, bei dem die Chandrasekhar-Grenze unsere Ergebnisse bestätigt. Weiterführend modellieren wir die variable Dichte eines Neutronensterns im gekürzten Raum und vergleiche die Ergebnisse mit einem selbst erstellten Zustandsdiagramm. Das Diagramm zeigt Übergangszustände zwischen einem Neutronenstern, Schwarzen Loch und in verschiedene Schichte mit Quark-Gluon-Plasma, abhängig von Radius und Masse des Sterns.

Abstract

In this research paper, we focused on the investigation of gravitational instabilities in stars. For this purpose, we used a progressive sequence of models, some with variable density. The models also provide opportunities for verification and comparison. Additionally, we optimized our study from last year. To validate this approach, we first created a model that determines the variable density of the Sun as a function of radius. Since this function is well-known, the approach can be optimally verified. To further progress and verify our method, we created a model with variable density for a white dwarf, where the Chandrasekhar limit confirms our results. Subsequently, we modeled the variable density of a neutron star in a reduced space and compared the results with a self-constructed state diagram. The diagram shows transitional states between a neutron star, black hole, and various layers with quark-gluon plasma, depending on the radius and mass of the star.

1. Einleitung

In Sternen finden spannende physikalische Prozesse statt: Sterne erzeugen viele Atome verschiedener chemischer Elemente. In Sternen kann so hoher Druck entstehen, dass die Atome in Weißen Zwergsternen zu entarteter Materie werden. Wenn die Masse eines solchen Sterns die Chandrasekhar-

Masse M_{Ch} übersteigt, dann kann er kollabieren und zu einem Neutronenstern werden. Falls dessen Masse weiter zunimmt, kommt es zu Raumdehnungen, und oberhalb eines weiteren kritischen Wertes M_c kommt es zu einer weiteren Gravitationsinstabilität, und in der Folge zu einem Quark-Gluon-Plasma oder sogar zu einem Schwarzen Loch.

Diese Gravitationsinstabilitäten haben wir letztes Jahr bereits mithilfe eines Sternmodells untersucht, bei dem wir vereinfachend im ganzen Stern die gleiche Dichte angenommen habe. Tatsächlich sind aber der Druck und somit auch die Dichte der Materie im Stern umso größer, je näher die Materie am Zentrum ist. Das vereinfachte Programm hatte den Nutzen, dass man schichtenweise den Stern berechnen könnte, bis wir einen Gravitationsdruck erhalten haben, den wir mit dem von uns berechneten nach außen wirkendem Druck (beim Weißen Zwerg den Fermi-Druck) normalisieren konnten, indem wir die Masse des

Sternes verändern. Die Masse, bei der die beiden Drucke gleich groß sind, ist der Beginn der Kollabierung eines Sterns.

In unserem aktuellen Forschungsprojekt untersuchen wir daher allgemeinere Sternmodelle, bei denen diese Abhängigkeit der Dichte vom Zentrum zusätzlich ermittelt und berücksichtigt wird. Dabei leiten wir grundsätzlich die gleichen Gravitationsinstabilitäten her, wie mit dem vereinfachten Modell. Dadurch bestätigen wir unser Modell des Vorjahres durch unser neues fundamentaleres Modell. Darüber hinaus ermitteln wir die genauen Instabilitäten und stellen sie in einem Phasendiagramm dar. Zusätzlich ermitteln wir die unterschiedlichen Zustände der Materie im Stern, abhängig vom Abstand zum Zentrum. So erhalten wir besonders fundierte Erkenntnisse über den Stern, über die Umwandlungen der Materie im Stern, über Raumdehnungen, über Gravitationsinstabilitäten, über den dabei auftretenden Aufbau und darüber, wie diese spannenden Veränderungen von der Masse und vom Radius des Sterns abhängen.

2. Vorgehensweise und Ziel

- a) Das Forschungsprojekt „Analyse von Gravitationsinstabilitäten bei Sternen mithilfe einer Modellsequenz“ verfolgt das übergeordnete Ziel, die

Gravitationsinstabilitäten in unterschiedlichen Sternmodellen zu untersuchen und zu verstehen. Dabei steht die Entwicklung und Anwendung einer progressiven Modellsequenz mit variabler Dichte im Fokus. Hierbei haben wir folgende Vorgehensweise:

- b) Modellierung der variablen Dichte der Sonne: Initial wird ein Modell erstellt, das die variable Dichte der Sonne in Abhängigkeit vom Radius ermittelt. Diese bekannte Funktion dient als Ausgangspunkt und ermöglicht die optimale Überprüfung der angewandten Methodik.
- c) Weiterentwicklung und Überprüfung anhand eines Weißen Zwerges: Zur Progression und Überprüfung der Methodik wird ein Modell mit variabler Dichte für einen Weißen Zwerg erstellt. Die Ergebnisse werden mit der Chandrasekhar-Grenze verglichen, um die Validität des Ansatzes zu bestätigen.
- d) Modellierung eines Neutronensterns mit variabler Dichte: Ein weiteres Modell mit variabler Dichte wird für einen Neutronenstern erstellt. Die Ergebnisse werden in einem eigens erstellten Phasendiagramm analysiert, das die Übergangszustände zwischen Neutronenstern, Schwarzen Loch und einem Stern aus Quark-Gluon-Plasma in Abhängigkeit vom Radius und der Masse zeigt.
- e) Weiterentwicklung des Modells aus dem Vorjahr: Der Fokus liegt auf der Verbesserung des Modells aus dem Vorjahr, das sich mit dem Kollaps von Sternen beschäftigt. Hierbei wird insbesondere die Variable der Dichteverhältnisse innerhalb der Sterne berücksichtigt.
- f) Schlussfolgerungen und Erkenntnisgewinn: Durch die progressive Modellsequenz mit variabler Dichte sollen nicht nur hochwertigere Ergebnisse erzielt, sondern auch neue Erkenntnisse über Gravitationsinstabilitäten in verschiedenen Sternen gewonnen werden.

Das Projekt strebt an, durch die Weiterentwicklung und Anpassung der Modelle an die variablen Dichteverhältnisse innerhalb der Sterne einen vertieften Einblick in die zugrunde liegenden physikalischen Prozesse zu erhalten.

3. Hintergrund und theoretische Grundlagen

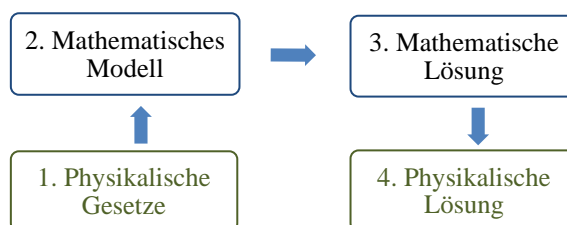
In unserem Forschungsprojekt des letzten Jahres haben wir Modelle entwickelt, um zu berechnen, wie groß die Masse eines Weißen Zwerges sein muss, um sich in einen Neutronenstern zu verwandeln. Von diesem Punkt aus haben wir ein weiteres Modell erstellt, das den Übergang vom Neutronenstern zu einem Schwarzen Loch oder einem Quark-Gluon-Plasma-Stern beschreibt. Diese Modelle sind so konzipiert, dass sie schichtweise vorgehen, um den lokalen Gravitationsdruck zu analysieren.

Bei diesem Ansatz berücksichtigen wir den Druck des Gases, der zum Beispiel beim Weißen Zwerg durch den Elektronendruck entsteht und dem

Gravitationsdruck standhält, bis der Stern kollabiert. Unsere Berechnungsmethode beinhaltet das Bestimmen des entgegengewirkenden Gasdrucks, bekannt als Fermi-Druck, nachdem wir den Gravitationsdruck ermittelt haben. Dann variieren wir die Masse so lange, bis die Drücke genau gleich groß sind, was darauf hinweist, dass der Stern instabil wird. Dabei spielt die Dichte eine entscheidende Rolle, da sie sich je nach Schicht ändert.

Durch die Berücksichtigung dieser Variation in unserem ersten Modell sind die Ergebnisse nun besser. Beim Weißen Zwerg ist dieses Manko noch akzeptabel, da es bereits eine präzise Masse gibt, die angibt, ab wann er instabil wird; diese Masse wird als Chandrasekhar-Masse bezeichnet. Im Fall des Neutronensterns gibt es jedoch noch weniger Klarheit über eine solche genaue Masse. Aus diesem Grund beabsichtigen wir im Verlauf dieses Projekts, entsprechende Werte zu bestimmen, um dazu beizutragen, diese Lücke zu schließen.

Mathematische Ebene



Physikalische Ebene

Abb. 1: Das Flussdiagramm stellt unsere Vorgehensweise graphisch dar und wird in diesem Aufsatz mehrfach bei der Erarbeitung der Modelle durchlaufen in dem Sonnenmodell (4.2), den Sternmodellen mit Quantengasen (4.3) und den Sternmodellen mit Quantengasen und Raumkrümmung, zum Beispiel für Neutronensterne und Quark-Gluon-Sterne (4.4).

4. Methoden

Wir beschreiben unser Vorgehen mit einem Flussdiagramm zur mathematischen Modellbildung, siehe Abb. (1).

Ziffer 1 - Physikalische Gesetze bezieht sich auf die von uns herangezogenen Grundlagen, siehe Carmesin (2004).

Ziffer 2 – Das mathematische Modell wird auf der mathematischen Ebene, die in Punkt 4.1.1 verwendeten Gleichungen beinhaltet. In diesem mathematischen Prozess werden wir ξ und ϕ ermitteln. Die Herleitung dieser Gleichungen sind in Carmesin (2004) dargestellt.

Ziffer 3 - Die mathematische Lösung kann aus den Gleichungen mit Hilfe des Eulerschen Polygonzugverfahrens, siehe Carmesin u.a. (2018) ermittelt werden. Daraus kann die Berechnung der Nullstelle von ξ erreicht werden, welche Voraussetzung für die physikalische Rückübersetzung als reale Lösung ist.

Ziffer 4 – Die Physikalische Lösung entspricht der realen Lösung. Diese wird erreicht durch das Durchlaufen des mathematischen Lösungsprozesses der verwendeten physikalischen Gesetze und kann als physikalische Rückübersetzung verstanden werden. Wir stellen diese in Punkt 4.1.2 Druck und Dichte dar. Flussdiagramm zur mathematischen Modellbildung:

4.1. Polytrope Sternmodelle

Im ersten Schritt legen wir einen Wert für ξ fest, der einfach die schrittweise Erhöhung des ξ -Werts angibt. Da dieser nicht genau definiert werden muss, reicht es ihn einfach klein zu halten, um Genauigkeit zu gewährleisten. In unserem Modell beträgt dieser Wert daher 0,01.

Graphische Auflösung der Lane-Emden-Gleichung:

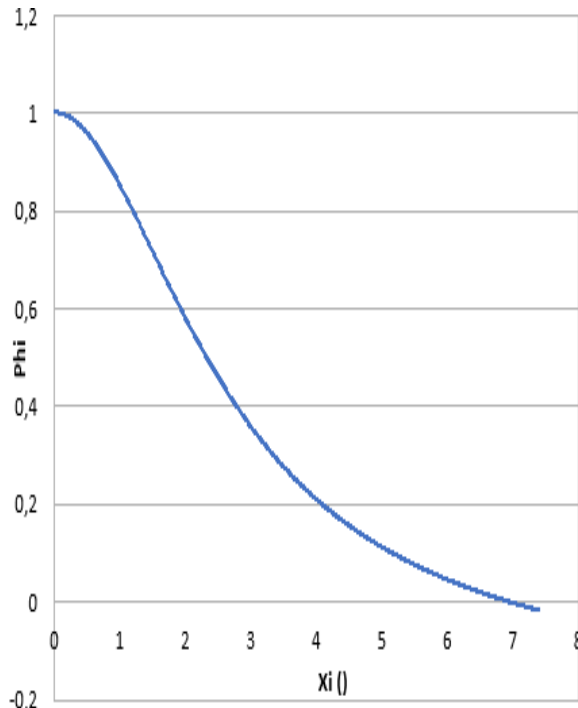


Abb. 2: Darstellung der Funktion Φ abhängig von ξ , Bestimmung des Faktors a mithilfe der Nullstelle. (Auf der x-Achse ist ξ in beliebig kleinen Algorithmen dargestellt; auf der y-Achse ist Φ dargestellt).

Als nächstes definieren wir eine Variable, die einen wesentlichen Unterschied zwischen anderen Objekten und der von uns betrachteten Sonne ausmacht. Die Variable, als n definiert.

4.1.1. Eulersches Polygonzugverfahren

Das hier beschriebene Lösungsverfahren ist nachzulesen in Carmesin u.a. (2018, Seite 56 bis 58).

Wir legen vorzeitige Werte für Φ' und Φ'' fest, die durch das Modell begründet sind. Φ entspricht zunächst 1, und Φ' ist zunächst 0. Dann geben wir die Iteration an:

$$\Phi'(\xi + d\xi) = \Phi'(\xi) + \Phi''(\xi) \cdot d\xi \quad \{1\}$$

$$\Phi = \Phi + \Phi' \cdot d\xi \quad \{2\}$$

Φ'' wird dann mit folgender Formel bestimmt:

$$\Phi''(\xi) = -\Phi^n(\xi) - 2/\xi \cdot \Phi'(\xi) \quad \{3\}$$

Daraus entsteht ein Graph, auf dem auf der

Hochachse Φ und auf der Querachse ξ dargestellt wird. Damit können wir nun die Parameter a und später die Masse bei der Nullstelle ablesen. Nun können wir einen Graphen erstellen, der anzeigt bei welchem Radius welche Dichte herrscht.

4.1.2. Druck und Dichte

Zur Übersetzung der mathematischen Lösung in die physikalische Lösung gehen wir von der Tatsache aus, dass die Nullstelle (ξ_0) von ξ , dem Sternradius R entspricht. Daher ist

$$\frac{dr}{d\xi} = \frac{R}{\xi_0} = a \quad \{4\}$$

$$dr = d\xi \cdot \frac{R}{\xi_0} \quad \{5\}$$

Zur Berechnung von ρ_c (Rho c) verwenden wir folgende Gleichung siehe Carmesin (2004).

Die Masse M kann durch die Variablen in der

Tabellenkalkulation dargestellt werden:

$$M = 4\pi \int_0^R r^2 \rho dr = 4\pi \rho_c a^3 \cdot I \quad \{6\}$$

Dabei kürzt I das Integral ab

$$I = \int_0^{\xi(r)} \xi^2 \phi^n d\xi \quad \{7\}$$

Daraus lässt sich das Integral I ermitteln:

$$I = -[\xi^2 \cdot d\phi/d\xi]_R = 2,0 \quad \{8\}$$

Beim Einsetzen ergab dies:

$$M = 8\pi \rho_c a^3 \quad \{9\}$$

Nach ρ_c umgestellt:

$$\rho_c = M/(8\pi a^3) \quad \{10\}$$

Diese Berechnungen wenden wir auf das Sonnenmodell an. Bei dem Weißen Zwerg kommen noch Quantengase und beim Neutronenstern die Raumkrümmung dazu. Dann wird für ρ_c als erstes eine Schätzung abgegeben, bevor es zur Berechnung kommt. Nach der Berechnung wird dieser Wert angepasst bis die Schätzung äquivalent zur Berechnung steht. An dieser Stelle ist das Programm noch nicht voll automatisch, könnte allerdings durch einen simplen Algorithmus ersetzt werden. Die Gleichsetzung des Programmes, um beispielsweise das Phasendiagramm zu erstellen ist nicht besonders anspruchsvoll, weswegen wir auf eine Anpassung durch einen Algorithmus verzichten haben. Um nun ein neues Modell zu erstellen, brauchen wir auch noch weitere Informationen. So ist es nun wichtig eine Konstante zu bestimmen, mit der wir die Druckwerte bestimmen können. Diese Konstante nennen wir K und diese wird aus der Auflösung des Parameter a entnommen. Daraus erfolgt folgende Formel, die in Spalte J1 dargestellt ist:

$$K = \frac{a^2 \cdot \rho_c^{1-1/n}}{(n+1)} \cdot \frac{1}{4\pi G} \quad \{11\}$$

G in Spalte J2 repräsentiert die Gravitationskonstante, die konstant den Wert

$$G = 6,6743 \cdot 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{kg^2} \quad \{12\}$$

hat. In der Spalte I wird ein Testlauf in Form einer Auflösung eines Integrals durchgespielt, entscheidend ist dabei nur der letzte Wert, der in der Tabellenkalkulation ermittelt wird.

Dieses Modell gleicht im Wesentlichen dem Sonnenmodell. Ein Unterschied besteht in den hinzugefügten Spalten K bis P, ab der vierten Zeile.

In diesem Abschnitt berechnen wir, wie zuvor angekündigt, die beiden verschiedenen aufeinander wirkenden Drücke, um eine Masse zu bestimmen, bei der der Zustand der Kollabierung eintritt. Zunächst haben wir in Formel {11} die Konstante K bestimmt.

Mit diesem Wert können wir nun in Spalte K den Gasdruck bestimmen. Dies geschieht mit folgender Formel:

$$P(\text{Gas}) = K \cdot \rho^Y \tag{13}$$

Für die Berechnung des P_c - Werts des Drucks können wir eine ähnliche Formel verwenden. Der Unterschied ist, dass dieser Wert den Druckwert von der äußeren Schicht des Sterns angibt. Dafür werden jeweils nur das erste Rho verwendet und Gamma.

$$P_c = K \cdot \rho^Y \tag{14}$$

Aus Formel {13} und {14} erstellen wir ein Graph, siehe Abb. (3). Dieser gibt auf der y-Achse die jeweilige Teilung der Drücke an und auf der x-Achse den Druck durch den Radius.

In der Spalte N berechnen wir die Dichte in Abhängigkeit vom einzelnen Radius. Dafür verwenden wir folgende Formel:

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{4}{3}\pi \cdot G \cdot \rho^2 r \tag{15}$$

Im nächsten Schritt ermitteln wir den entgegenwirkenden Druck, den Gravitationsdruck. Dieser wird in den Tabellenspalten von unten nach oben berechnet, da als Berechnungsgrundlage der Wert aus der darunterliegenden Spalte herangezogen wird.

$$P_{grav.}(r + dr) = P_{grav.}(r) + \frac{dp}{dr} \cdot dr \tag{16}$$

Zur Ermittlung des Zeitpunktes, wann die jeweiligen Drücke gleich groß sind und somit zur Kollabierung des Sterns führt, werden wir die Drücke teilen. Diese Masse wird in Spalte P5 erreicht, wenn der Wert 1 ist.

Dichteverlauf der Sonne:

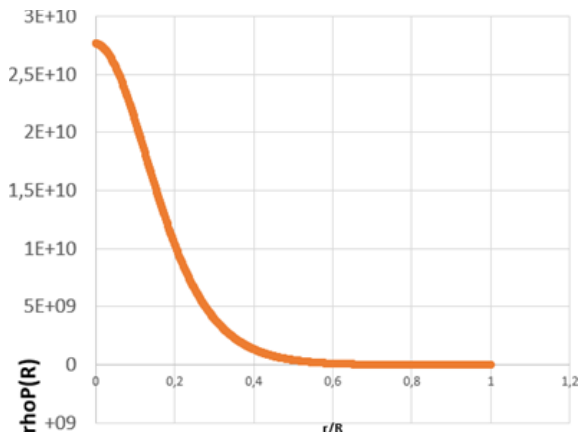


Abb. 3: Grafische Darstellung des Dichteverlaufes abhängig vom Abstand r zum Zentrum und vom Radius R der Sonne: Lösung der Lane-Emden-Gleichung mit dem Eulerschen Polygonzug-Verfahren (auf der x-Achse 0 im Zentrum und 1 ganz außen; auf der y-Achse die Dichte angegeben in kg/m^3).

4.2. Sonnenmodell

4.2.1. Relevanz

Wir erstellen verschiedene Modelle, angefangen mit einem Modell zur Bestimmung der Variabilität der Dichte der Sonne. Dazu verwenden wir polytrope Sternmodelle, siehe Chandrasekhar (1983), Kippenhahn und Weigert (1994), Carmesin (2004). Wir erstellen das Modell zuerst für die Sonne, diese ein Stern ist, der bereits gründlich untersucht wurde und dementsprechend viele Testergebnisse aufweisen kann, siehe Kippenhahn und Weigert (1994). Die Werte der variablen Dichte der Sonne sind bereits bekannt und wir können so unser Modell überprüfen.

Aufbau des Modells als tabellarische Darstellung:

	A	B	C	D	E	F
1	R	1,100E+07 dxi		0,01 h_quer		1,05E-34
2	dr	14,864,86 n		3,00 q=		1,9E+11
3		y		1,3333333333 h		6,63E-34
4	A	xi	rho	r	r/R	Phi
5	1	0,01	1,8955E+11		0	0
6	2	0,02	1,8949E+11	14,864,86	0,001351	0,3999
7	3	0,03	1,89E+11	29,729,73	0,002703	0,3998
8	4	0,04	1,89E+11	44,594,59	0,004054	0,399667
G	H	I	J	K	L	M
a=	1,587E+06 K=		1,142E+10 P(Grav.)=		1,89548E+11 Test 2=	
Masse=	1,32E+31 G=		6,67E-11 P(Gas.)=		1,243E+25 pc	
			Test=		6,558E+13	
Phi'	Phi''	Z		P(Gas.)=	pc	p(pc(Gas.)
0	-1	0	6,33	1,243E+25	1,243E+25	1,000E+00
-0,01	0,0003	0		1,243E+25		9,996E-01
-0,01	-0,33293	0		1,242E+25		9,992E-01
-0,01333	-0,33268	0		1,241E+25		9,987E-01

Abb. 4: Modellaufbau von der Sonne und Dichte-Berechnung.

4.2.2. Konkrete Parameter

Das relativistische Elektronengas bei der Sonne ist $n = 3$ und dies ist von Objekt zu Objekt unterschiedlich. Für die folgenden Berechnungen benötigen wir die Radien der Objekte. Die Sonne hat einen Literaturwert von 696.000.000 m.

Anschließend geben wir eine Spalte A an, in der wir die kommenden Schichten auflisten. Im nächsten Schritt teilen wir den Radius (R) durch die Anzahl der Schichten, um einen Wert zu erhalten (dr), der den Durchmesser einer Schicht angibt. Diesen Wert stellen wir in der nächsten Spalte dar, indem er sich sukzessive aufaddiert.

Danach geben wir den ξ -Wert, wie zuvor beschrieben, in Spalte B an. Im Anschluss berechnen wir einen Wert für die Dichte im Zentrum ρ , der 76800 kg entspricht.

4.2.3. Validierung und Ergebnisse

Daraus lässt sich ableiten, dass im Zentrum der Sonne über 50 Prozent der Dichte konzentriert ist, im Vergleich zu einem geringeren Dichtewert im äußeren Bereich. Diese Verteilung vermittelt nicht nur Einblicke in die inneren Strukturen der Sonne, sondern demonstriert auch die Effektivität dieses Modells. Die erfolgreiche Anwendung dieses Ansatzes eröffnet die Möglichkeit, ähnliche Untersuchungen auf andere astrophysikalische Modelle auszudehnen. Dies könnte zu neuen Erkenntnissen und vertieftem Verständnis verschiedener Himmelskörper führen.

4.3. Weißer Zwerg-Modell

4.3.1. Voruntersuchung für den Weißen Zwerg

Aus diesem Grund entwickeln wir durch gezielte Anpassungen am Sonnenmodell ein neues Modell für einen Weißen Zwerg.

4.3.1.1. Quantengase

Die Quantengase sind wesentliche Merkmale des Weißen Zwergs, daher ist eine Überarbeitung der vorherigen Version notwendig. Quantengase entstehen bei zunehmendem Druck, unter welchem die Atome kaputt gehen.

In Carmesin u.a. (2020, S. 252) ist die Energie eines Quants angegeben, welche im relativistischen Quantengas ist:

$$E_1 = \hbar c (3\pi^2)^{1/3} \left(\frac{N}{L^3}\right)^{1/3} \quad \{17\}$$

Um die Energie für N-Teilchen zu bekommen, multiplizieren wir nun mit N. Für das Volumen des Quantengases gilt, siehe Carmesin u.a. (2020, S. 246 und 252):

$$L^3 = V \quad \{18\}$$

Das impliziert:

$$E_N = E_1 \cdot N = \hbar c (3\pi^2)^{1/3} \cdot \frac{N^{4/3}}{V^{1/3}} \quad \{19\}$$

Um den Druck zu erhalten, multiplizieren wir mit $\frac{1}{V}$

$$P_F = \frac{E_N}{V} = \hbar c (3\pi^2)^{1/3} \cdot \left(\frac{N}{V}\right)^{4/3} \quad \{20\}$$

Um die Masse in dieser Formel einzufügen, betrachten wir N. Dies entspricht dann:

$$N \cdot m_p = M$$

Dabei ist m_p die Masse eines einzelnen Protons.

$$N = \frac{M}{m_p} \quad \{21\}$$

Im Rahmen einer näherungsweisen Herleitung der Chandrasekhar-Masse verwenden wir folgende Näherungsformel:

$$V \approx R^3 \quad \{22\}$$

Damit wird aus Gleichung {20} folgende Gleichung:

$$P_F = \frac{E_N}{V} = \hbar c (3\pi^2)^{1/3} \cdot \left(\frac{M}{m_p R^3}\right)^{4/3} \quad \{23\}$$

Damit leiten wir die Formel für den Gravitationsdruck her:

$$F_G = \frac{G \cdot M_1 \cdot M_2}{r^2} \quad \{24\}$$

Die Fläche einer Kugel entspricht:

$$A = 4\pi \cdot r^2 \quad \{25\}$$

Da der Druck die Kraft pro Fläche ist, setzen wir diese zusammen, verwenden wir $M_1 = M_2 = M$ und erhalten folgende Formel:

$$P_{Grav} \approx \frac{GM^2}{R^4} \quad \{26\}$$

Wenn der Gravitationsdruck P_{Grav} den Druck des Quantengases P_F erreicht, dann entsteht im Stern eine Gravitationsinstabilität. Dabei gilt also:

$$\frac{GM^2}{R^4} \approx \hbar c \frac{M^{4/3}}{R^3} \cdot m_p^{-4/3} \quad \{27\}$$

Danach stellen wir die Formel um, so dass wir

$$R^4 \cdot M^{-4/3} \cdot \frac{1}{G} \quad \{28\}$$

multiplizieren:

$$M^{2/3} \approx \hbar c \frac{1}{G} m_p^{-4/3} \approx \left(\frac{\hbar c}{G}\right) \cdot \frac{1}{m_p^{4/3}} \quad \{29\}$$

Auf die Gleichung wenden wir die Potenz $\uparrow 3/2$ an:

$$M \approx \left(\frac{\hbar c}{G}\right)^{3/2} \cdot \frac{1}{m_p^2} \quad \{30\}$$

Bei der Berechnung mit Quanteneffekten benötigen wir noch einige zusätzliche Werte. Mit dem Wert h, der Planck-Konstanten, berechnen wir \hbar :

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \quad \{31\}$$

Danach benötigen wir noch einen Wert für m_1 , der sich durch eine Multiplikation von m_p , mit einer Konstanten μ ergibt. Dabei ist μ die mittlere Anzahl der Nukleonen pro Elektron.

Dieser Wert liegt zwischen 1 und 3 und kann bei verschiedenen Sternen verschiedene Werte annehmen.

Daraus können wir nun den geänderten K-Wert berechnen:

$$K = \hbar \cdot c \cdot (3\pi^2)^{1/3} \cdot m_1^{-4/3} \quad \{32\}$$

Wir leiten diesen Term für K her:

Wir nutzen Gleichung {20}, indem wir mit $m_1^{4/3}$ erweitern:

$$P_F = \hbar c (3\pi^2)^{1/3} \cdot \left(\frac{N \cdot m_1}{V}\right)^{4/3} \cdot m_1^{-4/3} \quad \{33\}$$

Wir identifizieren den Quotienten mit der Dichte:

$$P_F = \hbar c (3\pi^2)^{1/3} \cdot \rho^{4/3} \cdot m_1^{-4/3} \quad \{34\}$$

Wir nutzen Gleichung {13}, wobei der Gasdruck gleich dem Druck im Quantengas ist:

$$P(Gas) = P_F = K \cdot \rho^\gamma$$

Dies ergibt $\gamma = \frac{4}{3}$:

$$K \cdot \rho^{4/3} = \hbar c (3\pi^2)^{1/3} \cdot \rho^{4/3} \cdot m_1^{-4/3} \quad \{35\}$$

Wir teilen die Gleichung durch $\rho^{4/3}$:

$$K = \hbar \cdot c \cdot (3\pi^2)^{1/3} \cdot m_1^{-4/3} \quad \{36\}$$

Damit haben wir Gleichung {32} hergeleitet.

Daraus ergibt sich, wie in der graphischen Abbildung 5 zu sehen ist, die Erkenntnis, dass $\mu^2 \cdot M$ eine Konstante ist.

4.3.1.2. Ergebnisse

Durch diese beiden Modelle lassen sich in beiden Fällen wichtige Erkenntnisse gewinnen. Im ersten Modell ist der Faktor μ nicht berücksichtigt, weshalb das Ergebnis der Masse nicht direkt die Masse selbst ist und auch nicht direkt mit der Chandrasekhar-Masse verglichen werden kann, sondern mit M, siehe Chandrasekhar (1931). Dabei ist M die Masse der Gravitationsinstabilität.

Um M nun überprüfen zu können, an welchem Punkt die Chandrasekhar-Masse erreicht wird, können wir feststellen, dass M geteilt durch μ^2 gleich der Chandrasekhar-Masse ist. Es entsteht eine Potenzfunktion, und dadurch kann abgeleitet werden, dass M etwa bei einem Faktor von $11 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ liegt:

$$M_{Ch} = Q \cdot 10^{30} \text{ kg} = \frac{Q}{2} \cdot M_{\odot} = \frac{Q}{2} \cdot \text{Sonnenmassen} \quad \{37\}$$

$$M_{Instabilität} = \mu^2 \cdot M_{Ch} \quad \{38\}$$

Bei Chandrasekhar (1983) ist $Q = 11$, bei uns ist aufgrund einer Näherung $Q = 170$, siehe Abb. (7). Dies entspricht der Tatsache, dass die Gravitationsinstabilität bei 1,4 Sonnenmassen auftritt, bei $\mu = 1,98$. Der Vorteil bei diesem Ergebnis ist, dass es für alle Wert von μ gilt.

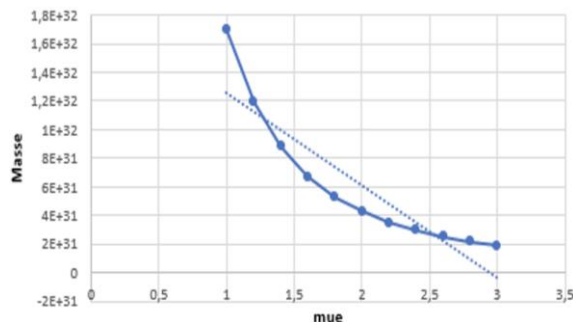


Abb. 5: Darstellung der Masse der Gravitationsinstabilität $M_{Instabilität}$ abhängig von μ .

4.3.2. Weißer Zwerg mit variierbarer Dichte

Excel-Tabelle:

A	B	C	D	E	F		
1	R	1,100E+07 dxi	0,01		a=		
2	dr	14.864,86 n	3,00 q=	1,088E+11	Mas		
3		y	1,333333333				
4	A	xi	rho	r	r/R	Phi	Phi'
5	1	0,01	1,088E+11	0	0	1	
6	2	0,02	1,0858E+11	14.864,86	0,00135135	0,9999	
7	3	0,03	1,0853E+11	29.729,73	0,0027027	0,99980003	-1
8	4	0,04	1,0849E+11	44.594,59	0,00405405	0,99966677	-0,

F	G	H	I	J	K	L
a=	1,587E+06 K=	1,202E+10 P(Grav.)=	1,0859E			
1,088E+11 Masse=	1,1E+31 G=	6,672E-11 P(Gas.)=	6,22E			
Phi	Phi'	Phi''	Z	P(Gas.)=	pc	
0	1	0	-1	0	6,93	6,228E+24
135	0,9999	-0,01	0,00029997	0		6,228E+24
7027	0,99980003	-0,009997	-0,3329335	0		6,223E+24
3405	0,99966677	-0,0133263	-0,3326839	0		6,2197E+24

Abb. 6: Modellaufbau vom Weißen Zwerg ohne Quanteneffekte

4.4. Neutronenstern Modell

4.4.1. Neutronenstern mit variierbarer Dichte

Unser Ziel ist es, ein Phasendiagramm mit variabler Dichte zu erstellen. Dafür erstellen wir zunächst ein Modell für einen Neutronenstern mit variabler Dichte. Die Vorgehensweise ist angelehnt an die Modellentwicklung für die Sonne und den Weißen Zwerg. Allerdings erfordert die Modellierung eines Neutronensterns einige spezifische Anpassungen und Hinzufügungen, die die Erstellung des Modells komplexer gestalten lässt.

Ein besonderes Merkmal in diesem Fall ist, dass bei einem Neutronenstern eine Raumkrümmung aufgrund eines Schwarzschildradius vorhanden ist. Die Einbeziehung des Schwarzschildradius führt zu Veränderungen einiger weiterer Parameter und lässt die Erstellung eines Modells mit variabler Dichte komplexer werden.

4.4.2. Raumkrümmung mit Quantengas und polytropen Sternmodellen und Polygonzug

Um die Änderungen im Modell zu berücksichtigen, gehen wir schrittweise vor. Zunächst verwenden wir das vorherige Modell des Weißen Zwergs mit der Berücksichtigung von Quanteneffekten bei K. In der Abbildung 7 haben wir alle Änderungen markiert, um diese erweiterten Werte hervorzuheben. Der erste Schritt ist die Erstellung von vier neuen Spalten, die die Raumkrümmung einbeziehen.

Aufbau des Modells und Graphen als Tabelle:

R	M-ist	SF	Alte Werte	Obere Grenze	
8000			5,39E+30	2,70E+00	
9000			6,00E+30	3,00E+00	
10000			6,74E+30	3,37E+00	
11000	3,36E+30	1,68E+00	1,81	7,41E+30	3,71E+00
12000	3,03E+30	1,52E+00	1,52	8,00E+30	4,00E+00
13000	2,82E+30	1,41E+00	1,41	8,76E+30	4,38E+00
14000	2,70E+30	1,35E+00	1,35	9,44E+30	4,72E+00
15000	2,61E+30	1,31E+00	1,31	1,00E+31	5,00E+00
16000	2,55E+30	1,28E+00	1,28	1,07E+31	5,35E+00
17000	2,50E+30	1,25E+00	1,25	1,14E+31	5,70E+00
18000	2,46E+30	1,23E+00	1,23	1,21E+31	6,05E+00

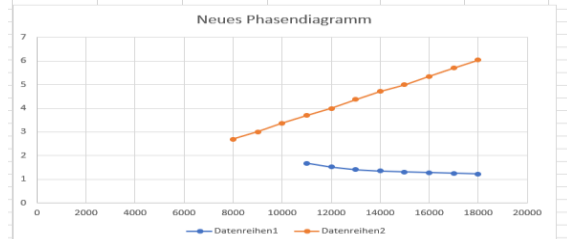


Abb. 7: Neues Phasendiagramm mit variierbarer Dichte und Raumkrümmung

Die erste neue Spalte ist dL. Der Faktor dx_i wird in der Simulation durch Epsilon E geteilt, weil dr zu dL wird, siehe Burisch (2022, S. 484-489). Unser berechnetes Phasendiagramm stimmt gut mit den Beobachtungen überein, siehe Margalit und Metzger (2017); Miller u.a. (2021).

In der dL -Spalte wird der Faktor dr mit der Abhängigkeit der Raumkrümmung so verändert, dass der Radius bewusst angepasst wird. Dies geschieht, indem wir den ursprünglichen dr -Wert durch den ϵ_E -Wert teilen. Dabei wird der ϵ Wert erstellt, indem wir folgende Formel verwenden:

$$\epsilon_E = \sqrt{1 - \frac{R_S}{r}} \quad \{40\}$$

Der Schwarzschildradius wird berechnet mit folgender Formel:

$$r = R_S = \frac{2GM}{c} \quad \{41\}$$

$$R_S = \frac{2Gm_r}{c^2} \quad \{42\}$$

$$m_r(\xi + d\xi) = m_r(\xi) + dm_r(\xi) \quad \{43\}$$

Der dm -Wert gibt die Masse pro aktuelle Schicht an und wird mit folgender Formel berechnet:

$$dm_r = 4\pi \cdot r^2 \cdot \rho \cdot dL \quad \{44\}$$

$$\text{mit } dL = \frac{dr}{\epsilon_E} \quad \{45\}$$

Wir erhalten die Größe dL , die wir durch Umstellen der Masse pro aktueller Schicht erhalten haben. Dieser Wert gibt Aufschluss über die Radius-Veränderung des Sterns in Bezug auf die Raumkrümmung. Bestimmt wird dieser Wert mit dem Teil-Radius und dem Epsilon Wert, der bei keiner Raumkrümmung 1 ist, somit keine Änderungen hervorhebt und bei Raumkrümmung abhängig von der Intensivität der Krümmung langsam abnimmt entlang der Schichten.

Dabei erhalten wir ein Modell, das genauen Aufschluss und Berücksichtigung der Raumkrümmung anzeigt.

Der m_r Wert ist die Masse innerhalb des Radius r , die für die Berechnung des Schwarzschildradius entscheidend ist:

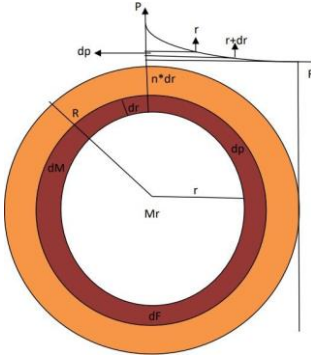


Abb. 8: Graphische Darstellung der Modellberechnung von Druckverhältnissen in einem Stern

4.4.3. Erstellung des physikalischen Phasendiagramm

Nach Fertigstellung des Modells mit variabler Dichte, welches Verbesserungen in den Quanten-Effekten und der Raumkrümmung integriert, haben wir ein passendes Phasendiagramm erstellt. Als ersten Schritt haben wir die obere Grenze berechnet.

Diese gibt an, dass alles, was definitiv einen größeren Sonnenfaktor als die Linie mit dem entsprechenden Radius aufweist, auf jeden Fall ein vollständiges Schwarzes Loch ist.

Um diesen bestimmten Zustand sicher feststellen zu können, ist es erforderlich sicherzustellen, dass der gesamte Stern sowohl von außen als auch von innen so weit zerfallen ist. Wenn $E = 0$ ist entsteht ein Schwarzes Loch. Wenn $P_{Grav} > P_F$ ist, dann zerstört die Gravitation die Neutronen. Diese Zerfälle werden im Modell konstant dokumentiert sein. Eine Solche Gravitationsinstabilität wurde bereits von Tolman (1939) oder Oppenheimer und Volkhoff (1939) untersucht.

Diese Bedingungen lassen sich bereits durch einfache Überlegungen mit der Schwarzschild-Metrik ableiten, so dass wir dafür bereits eine bestimmende Formel erhalten haben. Wir erkennen dabei, dass der Wert außerhalb des Schwarzen Loches liegt, wenn r größer als der Schwarzschild-Radius ist. Wir bestimmen den Grenzfall mit der Formel:

$$r = R_s = \frac{2GM}{c} \quad \{46\}$$

Aufgelöst bedeutet das:

$$M = \frac{r \cdot c}{2G} \quad \{47\}$$

und:

$$R \cdot c^2 / 2G \cdot 1/S_m \quad \{48\}$$

Das ergibt wieder Gleichung {12}. Um nochmal zusätzlich diese Formel zu überprüfen und sicher zu stellen, dass die Herleitung von der Schwarzschildmetrik korrekt ist, haben wir das Ganze noch mal manuell gemacht und genau dieselben Werte ablesen können. Dafür beachten wir, dass konstant vom

Anfang bis zu Ende des Sternradius eine Fehlermeldung schon beim Epsilon-Wert herausgegeben wird. Diese Masse wird als obere Grenze mit steigendem Radius immer größer und bildet den orangefarbenen Graph, siehe Abb. (9).

Die Untergrenze gibt dabei an, dass alles Darunterliegende auf jeden Fall ein Neutronenstern ist und noch keine Neutronen in einer Schicht kaputt gegangen sind. Zur Berechnung des realen Sonnenfaktors beachten wir die Stabilitätsgrenze. Das Kriterium dafür ist, dass der auswärtswirkende Druck dividiert durch den Gravitationsdruck 1 ergibt.

4.4.3.1. Evaluation des Neutronenstern-Modells mit variabler Dichte durch Testdurchläufe

Zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit und Präzision des Modells haben wir Testdurchläufe durchgeführt. Insbesondere bei dem für uns relevanten Modell des Neutronensterns mit variabler Dichte haben wir im ersten Testverfahren sichergestellt, dass bei Verwendung geringer Dichte und physikalischer Dichte unter Berücksichtigung der Angaben eines Neutronensterns, keine signifikanten Änderungen auftreten sollten, da in diesem Fall keine Raumkrümmung vorhanden ist.

Im zweiten Test haben wir das Modell auf den Neutronenstern angewendet und überprüft, ob sich die Datenwerte verändern. Bei einer Veränderung haben wir in einem weiteren Schritt die zugrundeliegenden Ursachen eruiert. Dieses erforderte bei jedem Modell erneut einige Testdurchläufe, um sicherzustellen, dass die Ergebnisse konsistent und nachvollziehbar sind. Dadurch konnten potenzielle Fehlerquellen identifiziert werden und dieses sicherte die Qualität unserer gestellten Anforderungen an die Modelle. Für weitere Testdurchläufe haben wir auch Neutronensterne mit konstanter Dichte simuliert und das Phasendiagramm Abbildung 9 gewonnen.

5. Ergebnisse und Zielerreichung

Zunächst ist es gelungen ein verbessertes Modell zur Berechnung variabler Dichteverhältnisse innerhalb von Sternen zu entwickeln. Hierbei flossen Erkenntnisse aus vorherigen Modellen ein, insbesondere hinsichtlich der Kollabierung von Sternen. Die Modellierung der Sonne erwies sich als äußerst erfolgreich. Durch die präzise Darstellung der Dichteverteilung konnte ein tiefer Einblick in die inneren Strukturen der Sonne gewonnen werden.

Die Anpassung des Modells für Weiße Zwerge ergibt erfolgreich Instabilitätsfaktoren und die Chandrasekhar-Masse. Die Validierung und der Vergleich der Ergebnisse mit bekannten Testdaten bestätigen die Effektivität der Modelle für diese Sterne. Eine bedeutende Errungenschaft ist die Erstellung eines Phasendiagramms, das den Übergang zwischen Neutronensternen und Schwarzen Löchern verdeutlicht. Wir haben kritische Radien für die Stabilität von Neutronensternen bestimmt und ein Modell mit konstanter Dichte ermöglicht tiefere Einblicke in diese astrophysikalischen Phänomene.

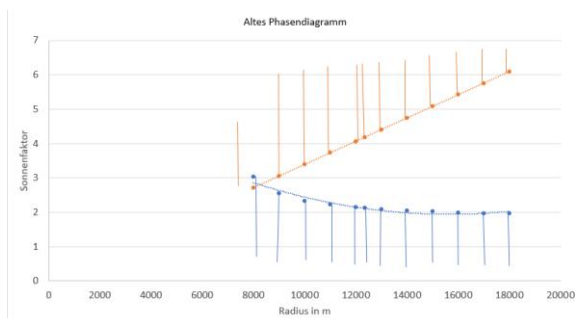


Abb. 9: Graphische Darstellung des Phasendiagramms mit konstanter Dichte

Das komplexe Modell für Neutronensterne mit variabler Dichte, welches sowohl Quanteneffekte als auch Raumkrümmung berücksichtigt, wurde erfolgreich entwickelt. Ein erweitertes Phasendiagramm mit neuen Parametern ermöglicht eine detailliertere Untersuchung dieser faszinierenden Himmelskörper. Die Verfeinerung des Modells konnte erfolgreich umgesetzt werden und somit die für uns wesentliche Zielerreichung. Die Modellierung der Sonne, die Anpassung für Weiße Zwerge und die Untersuchung von Neutronensternen, sowohl mit als auch ohne variable Dichte, tragen maßgeblich zu einem vertieften Verständnis der Gravitationsinstabilitäten verschiedener Sterne bei. Diese Forschungsergebnisse bieten bedeutsame Einsichten zur Weiterentwicklung unseres Wissens im Bereich der Astrophysik.

6. Ergebnisdiskussion

Im Phasendiagramm des Neutronensterns mit variabler Dichte haben wir festgestellt, dass der Druck im Verlauf des Radius erkennbar wird. Es zeigt sich, dass die Neutronen allmählich zerfallen, je weiter man sich vom äußeren Rand zum Inneren bewegt.

Eine unerwartete Erkenntnis ist, dass die Neutronen am Ende des Radius durch die Gravitation und den entgegenwirkenden Fermi-Druck zerfallen sind. Dabei entsteht der Eindruck, als ob sich die Neutronen bei näherer Betrachtung nach innen wieder zusammenfügen, bevor sie schließlich im Kern erneut auseinandergehen.

An diesem Entwicklungsstand haben wir festgestellt, dass die Neutronen am äußersten Radius tatsächlich zerfallen und sich später daraus möglicherweise Quarks bilden. Schon von außen ist sichtbar, dass der Neutronenstern zerstört ist, jedoch bildet sich darunter möglicherweise noch eine Schicht aus Quarks. Dafür ursächlich ist, wie in Spalte N zu sehen, dass das Ganze sich in drei Teile mit weniger Masse aufspaltet. Durch diese Erkenntnisse wird dasselbe Volumen zusätzlich möglicherweise mit einer Schicht aus Quark-Plasma und Gluonen gefüllt.

Es ist möglich das Phasendiagramm weiter zu optimieren, indem man diese Quarkschichten genauer berücksichtigt, berechnet und genauer anzeigt. Dadurch könnten präzise prozentuale Angaben mit einer zusätzlichen Gleichung eingefügt werden, um den Anteil der Quarks an der Schichtdicke genau zu berechnen. Eine Gravitationsinstabilität bei Neutronensternen

wurde bereits durch Oppenheimer, Volkhoff (1939) nachgewiesen.

7. Fazit und Ausblick

Grundlegende Inhalte zu diesem Thema wurden in einem Kurs zur Quantengravitation im Rahmen einer Jugend forscht AG unterrichtet. Der Kurs findet wöchentlich als Doppelstunde zusätzlich zur eigentlichen Jugend forscht AG statt.

In einer Doppelstunde wurde das Grundkonzept zum schwarzen Loch entsprechend dem Konzept des Entdeckers Michell (1784) entwickelt. Dazu wurde die Fluchtgeschwindigkeit im Gravitationsfeld einer Masse mit der Lichtgeschwindigkeit gleichgesetzt und nach dem Radius, also dem Schwarzschild Radius, aufgelöst. Dabei wird das grundlegende Konzept einer Gravitationsinstabilität entwickelt. Das Konzept ist universell, da keine Besonderheiten der Materie wichtig werden.

In einer zweiten Doppelstunde werden die Zeitdilatation und die relativistische Energie in der speziellen Relativitätstheorie hergeleitet, s. Burisch u. a. (2022, S. 472-483). Das ist grundlegend für die Herleitung der Raumkrümmung, welche wiederum wesentlich für das vertiefte Verständnis des schwarzen Loches ist.

In einer dritten Doppelstunde wird die Raumkrümmung in der Nähe einer Masse hergeleitet, s. Burisch u. a. (2022, 484-489). Das ist wesentlich für das vertiefte Verständnis des schwarzen Loches.

In einer vierten Doppelstunde wird die Druckverteilung innerhalb der Sonne für ein Modell mit konstanter Dichte ermittelt, s. Carmesin (2004). Hierbei entdecken die Schüler*innen, wie in einem Planeten der Druck mit der Tiefe zunimmt. Auch entwickeln sie die Kompetenz, dies mit einer Tabellenkalkulation als Computereperiment zu berechnen.

In den Doppelstunden 5-6 wird die Druckverteilung innerhalb der Sonne für ein Modell mit variabler Dichte behandelt, s. Carmesin (2004). Hierzu wird die Theorie polytroper Gaskugeln entwickelt und numerisch gelöst, s. Kippenhahn und Weigert (1994), Carmesin (2004). Dazu wird die Tabellenkalkulation der zweiten Doppelstunde erweitert. Hierbei erkennen und diskutieren die Lernenden, wie ein bestehendes Modell verfeinert werden kann und welche zusätzlichen Erkenntnisse das bietet.

In einer siebten Doppelstunde lernen die Schüler*innen experimentell an einer Elektronenbeugungsröhre die Welleneigenschaft von Elektronen kennen. Dies stellt eine Basis für das grundlegende Verständnis entarteter Materie dar.

In einer achten Doppelstunde wird das Elektronengas behandelt und die Fermi-Energie hergeleitet, s. Carmesin u. a. (2020, S. 246-247).

Als lebensweltliche Anwendung werden damit das Bändermodell sowie Nichtleiter, Halbleiter und Leiter behandelt. Das erzeugt ein vertieftes Verständnis von Elektronengasen, Fermi-Energie und entarteter Materie, sowie experimentelle Überprüfungen am

Beispiel von NTC – Widerständen und anderen Halbleiterbauteilen, s. Burisch u. a. (2022, S. 452-457).

In einer neunten Doppelstunde werden der Beta-Zerfall, seine Umkehrung und die Entstehung von Neutronensternen sowie entsprechende Beobachtungen behandelt. Das ist grundlegend zur Untersuchung von Gravitationsinstabilitäten in den Spätphasen der Sternentwicklung.

In einer zehnten Doppelstunde wird mithilfe der Druckverteilung innerhalb eines Sterns und der Fermi-Energie für das Sternmodell mit konstanter Dichte die Gravitationsinstabilität sowie ein Näherungswert für die Chandrasekhar – Masse hergeleitet, s. Carmesin (2004). Hierbei entdecken die Schüler*innen das Gleichgewichtskonzept der Gravitationsinstabilitäten bei den Spätphasen der Sternentwicklung.

In einer elften Doppelstunde wird das Modell der zehnten Doppelstunde auf Neutronen erweitert, wobei auch die Raumkrümmung berücksichtigt wird. Mit diesem Modell wird im Rahmen eines Jugend forscht-Projekts ein Radius – Masse Diagramm mit Übergängen von Neutronensternen zu möglichen Quark – Gluon – Sternen und weiter zu schwarzen Löchern entwickelt. Mit diesem Projekt erzielte Lina Jarck 2023 den ersten Platz im Regionalwettbewerb und den zweiten Platz im Landeswettbewerb.

In einer zwölften Doppelstunde wird geplant, wie das Modell der elften Doppelstunde auf variable Dichte erweitert werden kann. Mit diesem Modell wird im Rahmen eines Jugend forscht-Projekts ein Radius – Masse Diagramm mit Übergängen von Neutronensternen zu möglichen Quark – Gluon – Sternen und weiter zu schwarzen Löchern entwickelt. Mit diesem Projekt erzielte Lina Jarck 2024 den zweiten Platz im Regionalwettbewerb.

Insgesamt entwickeln die Lernenden bei diesem Thema verbreiterte und vertiefte Kompetenzen in den grundlegenden Bereichen Gravitation, Relativitätstheorie und Quantenphysik, s. Carmesin (2024). Zudem entwickeln die Schüler*innen bei dem Thema verbreiterte und vertiefte Kompetenzen in den Bereichen Sternentwicklung, Quantengase, Fermi-Energie, Thermodynamik und statistische Physik, Phasenübergänge, Instabilitäten, Halbleiter sowie Modelbildung, Computereperimente, Problemlösen und exaktes vernetztes Denken. Die Erfahrung zeigt, dass die Schüler*innen bei dieser breiten und vertieften kognitiven Aktivierung stets sehr motiviert und produktiv teilgenommen haben. Auch nutzten sie viele Gelegenheiten zur Selbstkompetenzerfahrung. Das Thema eignet sich daher hervorragend für die Begabtenförderung.

Das Thema wird in zwölf Schritten durch grundlegende Konzepte und progressiv aufeinander aufbauenden Modellentwicklungen erschlossen, s. Abb. (1). Das Konzept kann direkt im Unterricht eingesetzt werden. Zudem kann es zur Grundlegung von Schülerforschungsprojekten eingesetzt werden.

Die Untersuchung des Phasendiagramms eines Neutronensterns mit variabler Dichte hat wichtige Erkenntnisse über den Verlauf von Druck, Neutronenzerfall und der Bildung von Quarks offenbart. Die Beobachtung, dass die Neutronen allmählich zerfallen, während man sich vom äußeren Rand zum Inneren bewegt, wurde durch die Einflüsse von Gravitation und Fermi-Druck erklärt. Überraschenderweise scheint es jedoch, dass die Neutronen im mittleren Bereich zerfallen sind, während sie im inneren Bereich einer verringerten Raumkrümmung ausgesetzt sind.

Die Erkenntnis, dass das gleiche Volumen möglicherweise mit einer Schicht aus Quark-Plasma und Gluonen gefüllt wird, öffnet Möglichkeiten für die zukünftige Optimierung des Phasendiagramms. Eine genauere Berücksichtigung und Darstellung der Quarkschichten könnten durch präzise prozentuale Angaben mittels einer zusätzlichen Gleichung ermöglicht werden. Dies würde eine detailliertere Analyse der Quark-Anteile in Bezug auf die Schichtdicke ermöglichen.

Weiterführend kann zukünftig eine detaillierte Modellierung und Simulation erstellt werden, um die Wechselwirkungen und Dynamiken innerhalb der Quarkschichten genauer zu verstehen. Durch die Integration weiterer Parameter und Daten könnte das Phasendiagramm weiter verfeinert werden, um präzisere Vorhersagen und Erklärungen für das Verhalten von Neutronensternen zu liefern. Dies könnte auch zu tieferen Einblicken in die Struktur und Entwicklung dieser astronomischen Objekte führen und potenziell neue Erkenntnisse über die fundamentalen Kräfte und Materiezustände im Universum bieten.

8. Literatur

- Burisch, C. u. a. (2022): *Universum Physik Gesamtband SII*. Berlin: Cornelsen Verlag.
- Carmesin, H.-O. (2004). *Sternmodelle*. In Nordmeier, V. and Oberländer, A., Editors, *Tagungs-CD Fachdidaktik Physik*, ISBN 3-86541-066-9, Berlin. Deutsche Physikalische Gesellschaft, Deutsche Physikalische Gesellschaft.
- Carmesin, H.-O. u. a. (2020): *Universum Physik Qualifikationsphase*. Niedersachsen. Berlin: Cornelsen Verlag.
- Carmesin, Hans-Otto (2024). *How Volume Portions Form and Found Light, Gravity and Quanta*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Chandrasekhar, S. (1931). *The Highly Collapsed Configurations of a Stellar Mass*. Royal Astronomical Society, pp. 456-466.
- Chandrasekhar, S. (1983). *On Stars, their Evolution and their Stability*. Nobel Lecture, pp. 142-164.
- Kippenhahn, R. und Weigert, A. (1994) *Stellar Structure and Evolution*. Berlin: Springer Verlag.
- Margalit, B. and Metzger, B.D. (2017). *Constraining the Maximum Mass of Neutron Stars from Multi-messenger Observations of GW170817*. *The Astrophysical Journal Letters*.

- Michell, John (1784); On the means of discovering the distance, magnitude, etc. of the fixed stars in consequence of the diminution of the velocity of their light, in case such a diminution should be found to take place in any of them, and such other data should be procured from observations, as would be farther necessary for that purpose. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 74, pp. 35-57.
- Miller, M.C. a.u. (2021). The Radius of PSR J0740+6620 from NICER and XMM-Newton Data. *The Astrophysical Journal Letters*.
- Oppenheimer, J.R. and Volkoff, G.M. (1939). On Massive Neutron Cores. *Physikal Review*, Volume 55, pp. 374- 381.
- Tolman, Richard C. (1939). Static Solutions of Einstein's Field Equations for Spheres of Fluid. *Physical Review*, Volume 5 5, pp. 364- 373.

Danksagung

Wir möchten gerne unsere aufrichtige Dankbarkeit gegenüber Inga von Barga ausdrücken, die unsere Arbeit mit ihrer herausragenden Fähigkeit zur Korrektur und hilfreichen Formulierungen unterstützt hat. Ihre kritischen Einsichten und ihr Engagement haben maßgeblich dazu beigetragen, die Qualität unserer Arbeit zu verbessern.

Das Mondrätsel und die Erfindung der modernen Optik

Thomas Quick & Johannes Grebe-Ellis

Bergische Universität Wuppertal
quick@uni-wuppertal.de, grebe-ellis@uni-wuppertal.de

Kurzfassung

In der europäischen Astronomie des 16. Jahrhunderts war es üblich, die Größen von Sonne und Mond mithilfe einer Lochkamera zu bestimmen. Die Erschließung des Monddurchmessers aus dem konkaven Randstück der teilverdeckten Sonne führte jedoch zu Werten, die rätselhaft blieben, solange keine Theorie der Lochkamera existierte, die den Einfluss der Lochblende korrekt berücksichtigte. Auf diese Unstimmigkeiten aufmerksam geworden führte der junge Johannes Kepler am 10. Juli 1600 Messungen während einer Sonnenfinsternis in Graz durch. Nur kurze Zeit später präsentierte er in seinen Aufzeichnungen eine vollständig ausgearbeitete Theorie der Lochkamera, die bis heute gültig ist. Im folgenden Beitrag zeichnen wir den historischen Weg zur Formulierung dieser Theorie anhand ausgewählter Originalarbeiten von Kepler und Brahe nach und stellen eine Reihe veranschaulichender Experimente vor, die sich auch für den schulischen Einsatz eignen. Die damit präsentierte Episode aus der Geschichte der Optik dient zugleich auch als exemplarische Fallstudie, mit der NoS-Aspekte im Physikunterricht reflektiert werden können.

1. Einleitung

Am frühen Nachmittag des 10. Juli 1600 bereitete sich der junge Johannes Kepler (Abb. 1, links) auf dem Marktplatz in Graz auf die bevorstehende Sonnenfinsternis vor (Marek 1971, S. 138). Gemäß der Vorhersage würde der Mond auf dem Höhepunkt der Finsternis fast die Hälfte der sichtbaren Sonnenoberfläche verdecken. Mithilfe eines selbstgefertigten Lochkamerainstruments wollte Kepler die Finsternis vermessen und aus der Projektion der teilweise verdeckten Sonne den scheinbaren Durchmesser der beiden Himmelskörper, Sonne und Mond, bestimmen. Auf diese Weise, so hoffte Kepler, würde er Klarheit über einige von Tycho Brahe (Abb. 1, rechts) aufgebrachte astronomische Unstimmigkeiten gewinnen.

Trotz des Mangels an einer umfassenden Theorie verbreitete sich unter den europäischen Astronomen spätestens in der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts die Lochkameraprojektion als Methode, die Sonne und ihre Finsternisse auf einem Schirm zu beobachten und zu vermessen (Straker 1981, S. 267). Aus den Proportionen des Lochkamerabildes ließ sich die scheinbare Größe der beteiligten Himmelskörper berechnen. Allerdings führte die Methode zu Abweichungen gegenüber der direkten Beobachtung, die korrigiert werden mussten. Beispielsweise fielen die Ergebnisse für die Winkelausdehnung der Sonne systematisch zu groß aus. Brahe, der königliche Astronom in Prag, war einer der ersten, der den Einfluss der Blendenöffnung auf das Lochkamerabild berücksichtigte und vernünftige Ergebnisse erzielte, indem er den Blendendurchmesser vom Lochkamerabild der Sonne subtrahierte (ebd.). Eine besondere Herausforderung an die Lochkameramethode stellte die Bestimmung des Monddurchmessers während einer Sonnenfinsternis dar (siehe Abb. 2). Man verwendete dazu den konkaven Rand der teilverdeckten Sonne. Es stellte sich jedoch



Abb. 1: Links: Der junge Kepler (1571-1630) in Graz, Medaillon, 1597 (aus Ehtreiber *et al.* 1994, S. 23). Rechts: Der königliche Hofastronom Tycho Brahe (1541-1601) in Prag (aus Christianson 2020, S. 184).

heraus, dass die so ermittelten Werte für die scheinbare Größe des Mondes stets kleiner waren als bei direkter Sicht auf den Vollmond. Brahes Schlussfolgerungen aus diesem ‚Mondrätsel‘ deuteten auf Anomalien in der Astronomie und den Himmelsbewegungen hin, die das Interesse des 28-jährigen Kepler weckten.

Gegen 13:30 Uhr richtete Kepler sein Lochkamerainstrument auf dem Grazer Marktplatz aus und notierte sorgfältig die Messwerte in sein Notizbuch. Was sich zu diesem Zeitpunkt noch nicht abzeichnete: Wenige Tage später würde er eine vollständig ausgearbeitete Theorie der Lochkamera in seinem Notizbuch festhalten, die nicht nur das Rätsel um die scheinbare Verkleinerung des Mondes klärte, sondern auch den Weg für eine neue ‚optische Sichtweise‘ ebnete (Schlichting 2021). Rückblickend kann die Sonnenfinsternis von 1600 und die Auseinandersetzung mit dem Mondrätsel als ein wissenschaftsgeschichtlich bedeutendes Ereignis betrachtet werden. Mit Keplers Lochkameratheorie wurden die Grundlagen

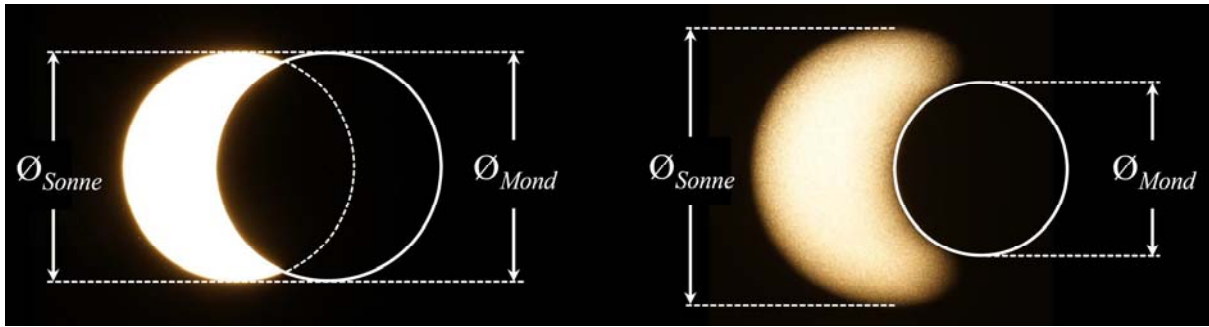


Abb. 2: Das Mondrätsel: In direkter Sicht (links) erscheinen Sonne und Mond etwa gleich groß. Im Gegensatz dazu erscheint die Sonne im Lochkamerabild (rechts) vergrößert, und der Durchmesser des Mondes, abgeleitet aus dem Radius des verdeckten Teils der Sonne, ist verkleinert. Die Fotos wurden mit dem experimentellen Aufbau aus Abbildung 5 realisiert.

der geometrischen Optik gelegt, die noch heute im Schulunterricht gelehrt werden.

In diesem Beitrag zeichnen wir den historischen Verlauf der Entwicklung von Keplers Lochkamerateorie nach, basierend auf ausgewählten Originalbeiträgen und unter besonderer Berücksichtigung von Quellenmaterial von Kepler und Brahe. Die Darstellung dieser wissenschaftshistorischen Episode wird durch eine Reihe von Experimenten ergänzt, die auch im schulischen Kontext durchführbar sind. Im ersten Abschnitt beleuchten wir die Vorgeschichte des Mondrätsels, die bis in die Antike zurückreicht und mit Brahens Untersuchungen zur Bildentstehung in der Lochkamera sowie seinen fragwürdigen Schlussfolgerungen endet. Der zweite Abschnitt widmet sich dem kurzen Zeitraum zwischen Keplers Beobachtung der Sonnenfinsternis am 10. Juli 1600 und der Formulierung seiner Lochkamerateorie wenige Tage später. Keplers Aufzeichnungen zeigen eine Theorie, die scheinbar aus dem Nichts entstand. Die Fülle und Genauigkeit seiner Aufzeichnungen begünstigt in besonderer Weise, nach den Voraussetzungen von Keplers Intuition zu fragen. Im dritten Abschnitt diskutieren wir Keplers 'Lichtfiguren', die er im zweiten Kapitel seines Werks ‚Ad Vitellionem Paralipomena‘ behandelte, das 1604 als Teil seiner umfangreichen ‚Astronomica Pars Optica‘ veröffentlicht wurde.

Das mit der Entwicklung der Lochkamerateorie verbundene Mondrätsel bietet einen interessanten und historisch bedeutsamen Kontext für die Behandlung der Lochkamera im Physikunterricht. Einerseits ermöglicht die Theorie nach Kepler eine Berücksichtigung von Aspekten, die über die ideale Lochkamera hinausgehen und den geometrischen Einfluss der Öffnungsblende einbeziehen. Andererseits dient diese Episode aus der Geschichte der Optik als exemplarische Fallstudie zur Reflexion über die Arbeitsweise Keplers im besonderen und die Entstehung von Theorien im allgemeinen. Auf einige dieser Aspekte gehen wir am Ende des Beitrags ein.

2. Vom Sonnentaler zum Mondrätsel

Die Frage, wie Lochkamerabilder hinter Öffnungen mit endlicher Ausdehnung entstehen, hat Gelehrte

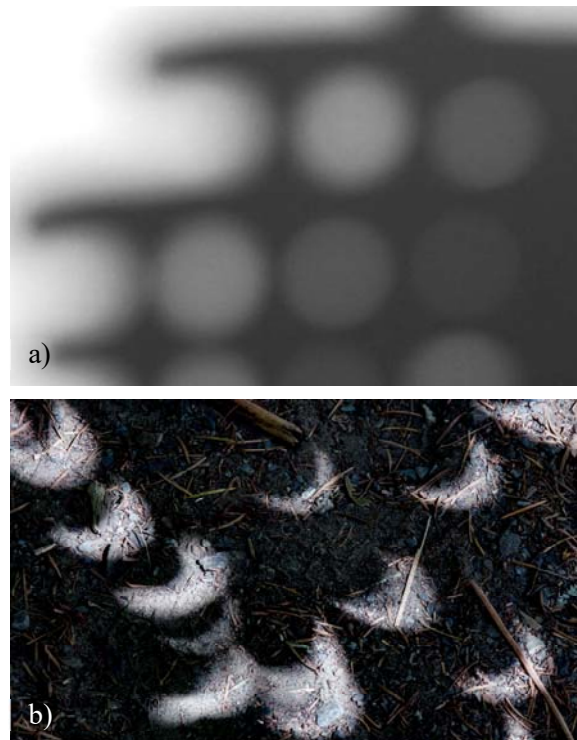


Abb. 3: Wie Sonnentaler hinter gekreuzten Fingern (a) oder Sonnensicheln während einer Sonnenfinsternis (b) entstehen, gab Gelehrten seit der Antike Rätsel auf. Foto (a) eigene Aufnahme, (b): Bill Gozansky (Alamy Stock Photo)

seit der Antike beschäftigt und ist eng mit dem Phänomen der ‚Sonnentaler‘ verbunden (Lindberg 1968, Schlichting 1995). Beispielsweise wird in Buch XV der pseudo-aristotelischen Schrift ‚Problemata physica‘ (Naturprobleme), einer Sammlung von 890 Problemen aus zahlreichen Wissensgebieten, die Entstehung von Lochkamerabildern diskutiert. In Frage 6 heißt es dort (Aristoteles 1991, S. 138):

Warum erzeugt die Sonne, wenn sie durch viereckige Gebilde dringt, nicht rechteckig gebildete Formen sondern Kreise, wie z.B. wenn sie durch Flechtwerk dringt?

In Frage 11 desselben Buchs werden auch die Lochkamerabilder der Sonne während einer Sonnenfinsternis diskutiert (ebd., S. 141):

Warum treten bei Sonnenfinsternis, wenn man durch ein Sieb oder durch Blätter(lücken) sieht, etwa einer Platane oder eines anderen breitblättrigen Baumes, oder wenn man die Finger der einen Hand mit der der anderen verflechtet, die Sonnenstrahlen auf der Erde halbmondförmig in Erscheinung?

Das allgemeinere ‚Fensterproblem‘ (eckige Fenster werfen abgerundete Schatten) war in der mittelalterlichen Forschung ebenfalls bekannt, wurde aber erst von Kepler mit der Lochkamera als Spezialfall verknüpft. Es war bekannt, dass sich die geometrischen Formen von Sonne und Öffnungsblende je nach Situation unterschiedlich in den Lochkamerabildern bemerkbar machen konnten. Allerdings stellte das Auftreten von kreisförmigen oder halbmondförmigen Abbildern der teilverdeckten Sonne hinter quadratischen oder dreieckigen Öffnungen eine große Herausforderung für die akzeptierten Prinzipien der geradlinigen Lichtausbreitung dar (Schlichting 1995). Einige Optiker beriefen sich auf Aristoteles und sprachen von einer unerklärlichen ‚Abschwächung‘ der peripheren Licht- oder Sehstrahlen, wodurch das Bild nicht die Form der Öffnung annahm. Andere nahmen nach Pecham und Witelo an, dass Licht die Fähigkeit besitzt, sich hinter eckigen Öffnungen ‚abzurunden‘ (ebd.). Viele dieser Überlegungen sind aus heutiger Sicht nur schwer nachvollziehbar. Ibn Al-Haitham, auch bekannt als Alhazen, hatte zwar bereits im 11. Jahrhundert eine korrekte Theorie zur Bildentstehung durch endliche Öffnungen formuliert, seine Beiträge waren in der westlichen Welt jedoch weitgehend unbekannt (Lindberg 1968, S. 156; Belting 2008, S. 104ff).¹

Versuch I: Sonnentaler erzeugen

Lochkamerabilder der Sonne lassen sich schon mit einfachsten Mitteln erzeugen, so z.B. mit kreuzweise übereinander gelegten Fingern beider Hände (siehe Abb. 3a). Die durchschnittliche Winkelgröße der Sonne beträgt $\alpha = 0,53^\circ \approx 1/108$ rad. Man kann die Bildgröße B der mit überkreuzten Fingern erzeugten Sonnenbilder abschätzen, indem man die Faustregel $B/b \approx 1/100$ rad verwendet, wobei b die Projektionsentfernung, d.h. die Bildweite ist. Kepler erzeugte mit seiner Lochkamera bei einer Bildweite von 4 m Sonnenbilder von etwa 40 mm Durchmesser. Um größere und vor allem kontrastreichere Sonnenbilder zu erzeugen, kann man die Sonne mit einem kleinen Taschenspiegel, der mit einer variablen Öffnungsblende bedeckt ist, in sonnenabgewandte Innenräume projizieren (siehe Abb. 4).

Spätestens im 16. Jahrhundert wurde die Lochkamera zu einem astronomischen Instrument. Auf diese

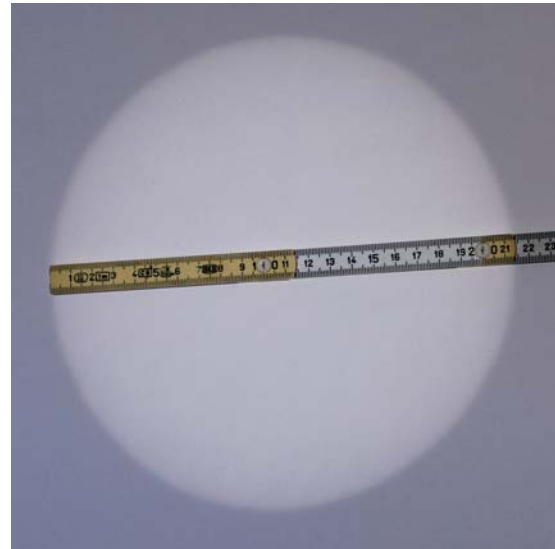


Abb. 4 Lochkamerabild der Sonne mit $B = 21,4$ cm, projiziert aus einer Entfernung von $b = 2255,0$ cm mit einer Spiegelblende von $D_A = 6$ mm in einen dunklen Raum. Mit $B/b \approx 1/105$ beträgt die Abweichung vom theoretischen Wert $1/108$ aufgrund der Ausdehnung der Blendenöffnung 2,7%.

Weise konnte die Sonne und ihre Verfinsternung bequem und augenschonend beobachtet werden. Auch Tycho Brahe passte die meisten seiner Instrumente an. Für die Astronomie der damaligen Zeit war das Studium der Finsternisse von zentraler Bedeutung. Sie boten die einzige Möglichkeit, die Meridiandifferenzen zwischen verschiedenen Orten zu bestimmen und waren daher entscheidend für das Studium der Bewegungen von Sonne und Mond. Astronomen wie Kepler, die das heliozentrische Weltbild von Kopernikus befürworteten, mussten sich auf präzise Theorien der Finsternisse stützen, um die Planetenbewegungen auf der Basis der bekannten Bewegungen von Erde und Sonne richtig zu interpretieren. Daher bestand ein großes Interesse daran, aus den Lochkamerabildern von Sonne und Mond auf die korrekten astronomischen Winkelausdehnungen zu schließen.

Versuch II: Simulation einer Sonnenfinsternis

Um die geometrischen Bedingungen einer Sonnenfinsternis nachzubilden (siehe Abb. 5), verwenden wir eine große Lichtquelle, die aus einer Halbkugel ($\varnothing = 30$ cm) besteht, deren Inneres mit einer hochmatten weißen Oberfläche beschichtet ist und von vier 500W-Halogenlampen beleuchtet wird. Vor der Leuchte befindet sich eine kreisförmige Öffnungsblende aus Stahl mit einem Durchmesser von $G = 19$

¹ Die westliche Geschichte der Lochkamerabilder, die durch Öffnungen endlicher Größe der Lochblende entstehen, scheint weitgehend unabhängig von Alhazen zu sein. In seiner *Perspectiva* (arab. *Kitāb al-Manāẓir*) diskutiert Alhazen lediglich die ideale Lochkamera, bei der die Lochblende als punktförmige angenommen wird. Seine vollständige Lochkamerateorie findet sich in seinem Traktat *Über die Form der Sonnenfinsternis*, in dem er die Entstehung

von Lochkamerabildern bei Sonnenfinsternissen detailliert beschreibt. Dieses Werk war bis ins 20. Jahrhundert ausschließlich in arabischer Sprache verfügbar und daher im Westen unbekannt (Lindberg 1968, S. 156).

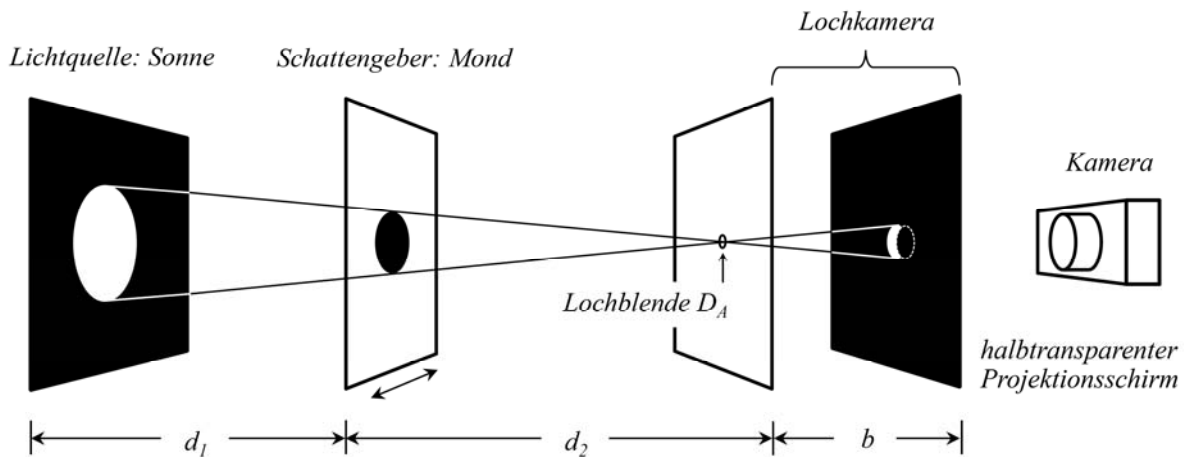


Abb. 5: Abbildung einer simulierten Sonnenfinsternis mithilfe einer Lochblende auf einen halbtransparenten Schirm, der von hinten betrachtet wird.



Abb. 6: Sonnenfinsternis, simuliert mit dem im Abbildung 5 gezeigten Aufbau und einer Blendenöffnung von $D_A = 1$ mm.

cm, welche die Sonnenscheibe darstellt. Eine kreisförmige Hindernisblende (Mond) mit gleicher Winkelausdehnung verdunkelt nach und nach die Sonnenscheibe (siehe Abb. 5). Mit einer Lochblende (Durchmesser $D_A = 1$ mm) bilden wir das Szenario auf einem halbtransparenten Schirm ab, den wir von hinten beobachten (siehe Abb. 6).

Viele Astronomen gingen ursprünglich davon aus, dass sie ihre Berechnungen der Sonnengröße auf die ideale Lochkamera beziehen könnten, d.h. dass die Ausdehnung der Blende vernachlässigbar sei und als punktförmig angenommen werden könne.² Die dadurch entstehenden Abweichungen zwischen direkt beobachteter Winkelausdehnung der Sonne und Größe des Lochkamerabildes führten Brahe dazu, als einer der ersten die Lochblende in seinen Berechnungen der scheinbaren Größe der Sonne zu berücksichtigen, indem er einen Durchmesser der Lochblende vom gemessenen Durchmesser des Lochkamerabildes der Sonne abzog. Diesem Verfahren lag keine theoretische Erklärung zugrunde; es handelte sich um eine heuristische Regel zur Korrektur des Lochkamerabildes der Sonne, die sich empirisch bewährte.³ Weshalb Brahe diese Regel nicht auch auf die Kontur

des Mondes im Lochkamerabild der teilverdeckten Sonne anwendete, stellt eine bis heute nicht weiter aufgeklärte wissenschaftshistorische Merkwürdigkeit dar (Straker 1981, S. 277).

Versuch III: Brahes empirische Regel

Wir verwenden weiter den Aufbau aus Versuch II, jedoch ohne die Mondscheibe. Die Lichtquelle (Sonne) befindet sich in einem Abstand von $g = 285,0$ cm zur Lochblende mit einem Durchmesser von $D_A = 4,0$ mm. Die Blende selbst ist in einem Abstand von $b = 45,0$ cm zur Leinwand positioniert. Ohne Vergrößerung durch die Lochblende, d.h. im Fall der idealen Lochkamera, würden wir einen Sonnenbilddurchmesser von $B_{ideal} = (G/g) \cdot b = 30$ mm erwarten. Tatsächlich erhalten wir jedoch $B_S = 34$ mm (vgl. Abb. 2, rechts). Dieses Ergebnis illustriert Brahes heuristische Regel, die besagt, dass die Abweichung der Größe des Sonnenbildes vom scheinbaren Sonnendurchmesser in etwa dem Durchmesser der Blende entspricht. Gleichzeitig zeigt dieses Experiment, dass dieses Ergebnis auch mit einem Aufbau erzielt

² Diese Einschränkung scheint auf die Wirkung des Werks ‚De Radio Astronomica et Geometrico‘ von Gemma Frisius (1508 – 1555), flämischer Mathematiker und Geograph, zurückzugehen. Frisius nutzte die Lochkamera erstmals dokumentiert zur Beobachtung der partiellen Sonnenfinsternis im Jahr 1544. Seine dort formulierte Messmethode läuft auf die falsche Annahme hinaus, dass die Größe der Blende vernachlässigt werden kann, wenn sie klein genug ist (Straker 1981, S. 270f). Frisius' Arbeit trug wesentlich dazu bei, die Camera Obscura als wichtiges Instrument in der astronomischen Forschung zu etablieren.

³ Brahe hat seine Korrekturmethode an keiner Stelle explizit formuliert oder dokumentiert, vielmehr implizit angewendet. Dennoch war er der erste, der die Größe der Blendenöffnung explizit in seinen Aufzeichnungen notierte. Straker (1981, S. 275) macht einen Vorschlag, wie Brahe zu einer geometrischen Begründung gelangt sein könnte, ohne eine vollständige Lochkameratheorie zu besitzen.

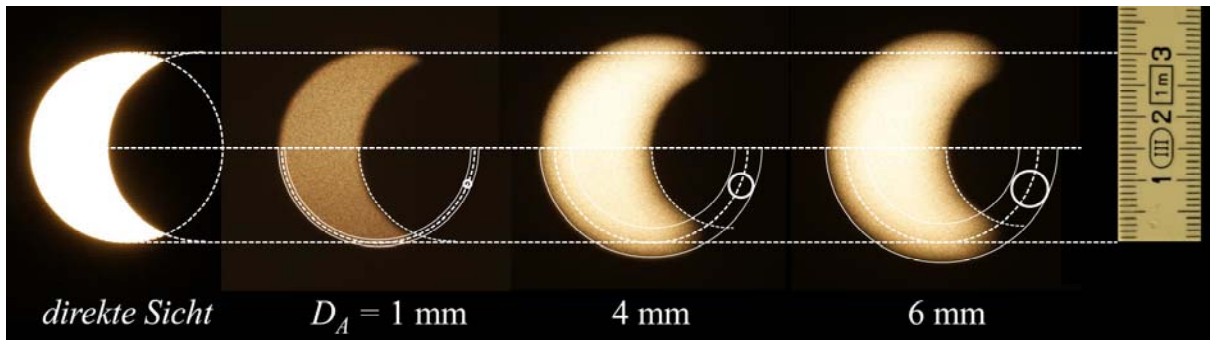


Abb. 7: Simulierte Sonnenfinsternis in direkter Sicht (links) und Lochkamerabilder dieser Situation, abgebildet mit einer zunehmend vergrößerten Blendenöffnung D_A . Die resultierenden Bildgrößen für die jeweiligen Sonnen- und Monddurchmesser B_S und B_M legen folgende Regel nahe: $B_{ideal} = B_S - D_A = B_M + D_A$.

werden kann, der nicht strikt den Bedingungen einer annähernd unendlich weit entfernten Lichtquelle entspricht.

In einem Brief an Michael Mästlin⁴ berichtete Brahe über die Beobachtungen der Sonnenfinsternis am 25. Februar 1598. Diese Beobachtungen deuteten indirekt auf Unstimmigkeiten innerhalb der Astronomie hin. Brahe schreibt (1913, S. 55):

Wahrhaftig, es muss anerkannt werden, dass der Mond während einer Sonnenfinsternis nicht dieselbe Größe hat wie während anderer Zeiten bei Vollmond, wenn er gleich weit entfernt ist; sondern es scheint, als wäre er um etwa 1/5 verengt, durch Ursachen, die anderswo offenbart werden sollen. Es scheint also, dass der Mond die Sonne niemals vollständig verdunkeln kann, und selbst wenn der Mond sich zentral dazwischen schiebt, umkreist ihn das verbleibende Licht der Sonne... Obwohl der Durchmesser des Mondes nach unseren Berechnungen damals 34' 45" hätte betragen sollen, konnte er vor der Sonne nicht mehr als 28' erscheinen, was ich erkannte und von niemandem vor mir bemerkt wurde.

Brahe hätte den Durchmesser der Blendenöffnung zum Durchmesser des Mondes hinzufügen sollen, anstatt ihn entweder unkorrigiert für seine Berechnungen zu verwenden oder den Fehler sogar noch zu verdoppeln, indem er die Sonnenbildkorrektur auf den Mond anwendete und den Blendendurchmesser ein weiteres Mal abzog. Dadurch ergaben sich Werte für die scheinbare Größe des Mondes, die deutlich zu klein ausfielen.

Versuch IV: Der Einfluss der Lochblende

Durch Variation der Blendenöffnung lässt sich ihr Einfluss auf das Lochkamerabild der teilverdeckten Sonne zeigen. Abbildung 7 vergleicht dafür die direkte Sicht auf die teilverdeckte Leuchte aus Versuch II mit Lochkamerabildern bei zunehmender Blenden-

öffnung. Es ist deutlich zu sehen, wie das Lochkamerabild wächst und damit der Durchmesser der Sonnensichel zunimmt, während der konkave Rand der Sonne (und damit der Rand des Mondes) kleiner wird. Der Versuch belegt eindrucksvoll, dass das Mondrätsel nicht auf astronomische Faktoren, sondern auf die Abbildungsbedingungen der Lochkamera (optische Faltung) zurückzuführen ist.

Als Brahe die scheinbare Verkleinerung des Mondes bemerkte, aktualisierte er seine Mondtabellen mit den kleineren Werten und informierte andere Astronomen über dieses Phänomen. Mindestens einer dieser Astronomen, Kepler, interpretierte Brahes Bericht als möglichen Hinweis darauf, dass der Mond tatsächlich weiter entfernt sein könnte, als es die damalige Mondtheorie vorhersagte. Dies ließ ihn vermuten, dass etwas in der astronomischen Theorie nicht korrekt sein könnte. Statt die Abweichungsfehler in den Abbildungsbedingungen der Lochkamera zu suchen, spekulierte Brahe über astronomische Ursachen für Größenschwankungen des Mondes. Später schlug er vor, die scheinbare Verkleinerung des Mondes auf die Intensität des Sonnenlichts zurückzuführen (zit. nach Straker 1981, S. 282):

... der Mond behält nicht denselben sichtbaren Durchmesser, den er sonst hat, sondern durch die Kraft des Sonnenlichts werden seine Grenzen verkleinert, wobei eine optische Ursache dieses Ergebnis bewirkt, so dass etwa ein Fünftel des Mondes verschwindet und sich dem Auge nicht zeigt.

Andere Theorien besagten, dass der Mond eine transparente Atmosphäre habe, die während eines Vollmonds beleuchtet werde, aber durchscheinend werde, wenn er vor die Sonne trete (ebd.).

So seltsam diese Überlegungen aus heutiger Sicht erscheinen, müssen wir uns gleichzeitig der Schwierigkeiten bewusst sein, mit denen Astronomen bei der

⁴ Michael Mästlin (1550–1631), Professor an der Universität Tübingen, war einer der wichtigsten Lehrer und Mentoren von Kepler und einer der ersten Astronomen, der die kopernikanische Theorie offen unterstützte. Unter Mästlin lernte Kepler die kopernikanische Kosmologie kennen und wurde ein überzeugter Anhänger des heliozentrischen Systems. Von Mästlin lernte Kepler wohl auch die

Lochkameramethode kennen. Obwohl Mästlin sich später gegenüber einigen von Keplers Ideen skeptisch zeigte (wie den elliptischen Planetenbahnen), blieb er bis zu seinem Tod ein wichtiger Korrespondenzpartner für Kepler.

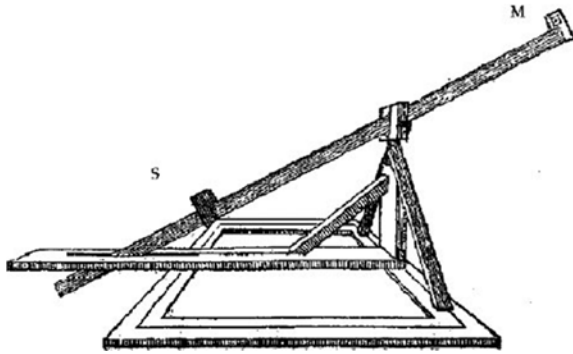


Abb. 8: Keplers Lochkamera-Instrument. Die Skizze findet sich in der späteren ‚Astronomiae pars optica‘ von 1604 und ist aussagekräftiger als die ursprüngliche Abbildung aus Keplers Notizbuch (Kepler 1939, S. 289).

Interpretation von Lochkamerabildern konfrontiert waren. Sie strebten nach einer umfassenden Theorie, die nicht nur instrumentelle Bedingungen wie den Einfluss der Blende berücksichtigte, sondern auch andere astronomische Faktoren und optische Beobachtungseinflüsse in Betracht zog.

Welche Effekte auf welche Ursachen zurückzuführen sind, ergibt sich aus dem Wechselspiel zwischen Beobachtung und theoretischer Deutung, d.h. aus einem Prozess, den wir im vorliegenden Fall beim Quellenstudium nachvollziehen können. Kepler selbst war sich der epistemischen Komplexität dieses Prozesses bewusst und bezeichnete Finsternisse in einem amüsanten Wortspiel als die ‚Augen der Astronomen‘ (Kepler 2002, S. 598), um die enge Verbindung zwischen Optik und Astronomie in diesem Phänomen zu betonen. Jedenfalls war er nicht von Brahes Ideen überzeugt, da er glaubte, dass die Umlaufbahnen und Dimensionen himmlischer Körper konstant seien. Er hoffte, dass die Sonnenfinsternis, die er am 10. Juli 1600 in Graz mit einem neuen Instrument beobachten wollte, dazu beitragen würde, das Rätsel zu lösen.

3. Kepler und die Sonnenfinsternis von 1600

In einem Brief von Anfang Juli an Erzherzog Ferdinand,⁵ Landesherr von Innerösterreich und Mäzen, formuliert Kepler seine Absicht, dem Mondrätsel bei der bevorstehenden Sonnenfinsternis auf die Spur zu kommen (Kepler 1949, S. 120, Brief 166):

...denn das Thema der Finsternisse ist äußerst aufschlussreich und verdient die sorgfältige Beachtung

⁵ Erzherzog Ferdinand II. von Innerösterreich (1578–1637), der spätere Kaiser Ferdinand II., war in den frühen Jahren ein Gönner und Unterstützer von Kepler. 1594 erhielt Kepler eine Anstellung als Mathematiklehrer an der Stiftsschule in Graz, wo er unter anderem sein ‚Mysterium Cosmographicum‘ (1596) verfasste. Allerdings zwang Ferdinand II. im Rahmen der Gegenreformation 1598 alle Protestanten, entweder zum Katholizismus zu konvertieren oder Graz zu verlassen. Kepler, ein überzeugter Protestant, musste daher im September 1598 die Stadt verlassen. Er kehrte im Frühjahr 1599 nach Graz zurück, nachdem er einen Schutzbrief des Erzherzogs erhalten hatte. Aufgrund der weiteren Verschärfung der Religionspolitik musste Kepler Graz jedoch 1600 endgültig verlassen.

aller Menschen, insbesondere der Könige und Fürsten. Außerdem hoffe ich, dass mir, so Gott will, die klare Beobachtung dieser Finsternis, über die ich nachdenke, sehr bei den noch unvollkommenen Hypothesen Tychos bezüglich des Mondes helfen wird, die er jedoch bereits als sicher angenommen hat, und dass ich durch offensichtliche Experimente beweisen kann, dass sie richtig sind.

Kepler hatte für die bevorstehende Sonnenfinsternis eigens ein Instrument konstruiert (siehe Abb. 8). Das Herzstück war eine 4 Meter lange Achse, die sich um einen festen Punkt im Azimut drehen und zusätzlich in der Höhe verstellen ließ. An dieser Achse waren Scheiben befestigt, die in spezifischen Abständen senkrecht zur Längsrichtung positioniert waren. Die obere Scheibe (M) besaß eine kreisförmige Lochblende, während die untere Scheibe (S) als Bildschirm diente.⁶ Seine Notizbuchaufzeichnungen bezeugen Kepler mit einer Darstellung und einem Datenblatt zu seinem Instrument.

Bereits zuvor, am 7. Juli, hatte er sich bemüht, den scheinbaren Durchmesser der Sonne mit diesem Instrument zu ermitteln – und hatte festgestellt, dass die gemessenen Werte zu groß waren. Um mögliche Beobachtungsfehler zu berücksichtigen hatte er deshalb seine Werte nach Brahes Korrekturmethode angepasst und ferner untersucht, ob die Textur des Papiers die Wahrnehmbarkeit des Sonnenbildes beeinflusst. Nachdem er eine Unstimmigkeit in der Entfernung zwischen dem Schirm und der Blende entdeckt hatte, begann die Berechnung von neuem, die neu errechneten Werte für den Sonnendurchmesser blieben immer noch zu groß.

Am 10. Juli bestimmte Kepler den scheinbaren Sonnendurchmesser erneut (Kepler 2002, S. 246):

Auf diese Weise ergibt sich der Sonnendurchmesser 29'30". Zuvor schien der Radius allein durch Schätzung um 2 Teile größer zu sein. Ich hatte keinen Zirkel benutzt. Tycho setzte 29'40" fest. Der Unterschied beträgt 10". Dies geschah am 10. Juli, am Tag der Finsternis.

Nun macht sich Kepler daran, den Monddurchmesser zu bestimmen (ebd.):

Den Durchmesser des Mondes habe ich nur einmal gemessen, und dieser war nicht genau, sondern etwas kleiner als erwartet. Zu anderen Zeiten war das Bild zu blass. Aus drei speziell markierten Punkten am

⁶ Aus heutiger Sicht erscheint es unvorstellbar, dass die Lochkamera offen war, d.h., dass keine weiteren Maßnahmen ergriffen wurden, um den Strahlengang von dem Umgebungslicht abzuschirmen. Kepler kannte zwar etwaige Empfehlungen, aber scheint diesen hier keine Priorität eingeräumt zu haben. Lochkameras, die störende Lichteinflüsse unterdrücken, wurden erst etwas später von Balthasar Conrad (1599-1660) und Melchior Balthasar Hanel (1627-1689) konstruiert (Marek 1971, S. 141f). Wie Marek (ebd.) bemerkt, ist dies möglicherweise auch einer der Gründe, weshalb Kepler nicht die Beugung entdeckt hat, obwohl sie in Reichweite seiner experimentellen Möglichkeiten lag.

Mondumfang und drei speziell markierten Punkten am Sonnenumfang ergab sich aufgrund des Schnittwinkels und der optischen Verhältnisse der Sonnenradius deutlich, d.h. in richtiger Größe. Der Mondradius betrug 1 Fingerbreit und $26 \frac{2}{3}$ scr oder $98 \frac{2}{3}$. Wenn $105 \frac{1}{2}$ [Einheiten] $29'30''$ ergeben, was ergibt dann $98 \frac{2}{3}$?

Es folgen einige Rechnungen, die Kepler nicht zufriedenstellen. Am 12. Juli überprüft er erneut die Anordnung seines Instruments (ebd., S. 247 ff):

Am 12. Juli bei kräftigem Wind, der selten meine Wetterfahne in Ruhe ließ, richtete ich mein Instrument nach der Meridianlinie aus, um die Höhe der Sonne zu messen. Das Senklot war richtig ausgerichtet. Aber im rechten Winkel gab es zwei Seiten, die Bezug auf die Senkrechte unsicher waren. Die erste aufrechte Seite war etwas länger, etwa 5 Fuß und 10 Finger, etwa 3 Teile. Denn Diebe hoben daran.

Abermals setzt Kepler seine Berechnungen fort, sucht den Fehler in der Geometrie seines Instruments. Mitten in seinen Überlegungen taucht dann plötzlich eine unerwartete Einsicht auf (ebd., S. 249):

Da fällt mir gerade etwas ein wegen der Durchmesser der Leuchten [Sonne und Mond], warum der Mond in Konjunktion kleiner erscheint als in Opposition. Der Beweis geht aus der Figur klar [Abb. 9, Anm. d. Verf.] hervor. Ich muss mir nur noch die Reihenfolge der Probleme überlegen.

Unmittelbar im Anschluss entwickelt Kepler eine neuartige Theorie der Camera Obscura, indem er in nummerierter Reihenfolge Sätze und Folgerungen formuliert. Zunächst werden in 17 Sätzen die Grundlagen einer allgemeineren Theorie der Lochkamera dargelegt, die anschließend in weiteren 14 Sätzen auf das Mondrätsel angewendet wird. Gleich zu Beginn formuliert er, zusammen mit dem Prinzip der geradlinigen Lichtausbreitung, die entscheidende Idee: Er betrachtet die Lichtquelle als Summe unendlich vieler Punktlichtquellen (ebd.).

3. *Sowohl die Kreislinie [hiermit meint Kepler die Kontur von Sonne und Mond, Anm. d. Verf.] als die Kreisfläche besitzt unendlich viele Punkte.*
4. *Das Licht fällt in geraden Linien vom Leuchtenden auf das Beleuchtete.*
5. *Alle Punkte eines leuchtenden Körpers senden Lichtstrahlen aus.*

Für den Fall einer punktförmigen Lichtquelle erscheint bei der Durchleuchtung ein Lichtbild der Blende auf dem Schirm (Satz 7), das mit der Blende größengleich wird, wenn die Punktlichtquelle unendlich weit entfernt ist (Satz 9). Da sowohl die Lichtquelle als auch die Blende eine Ausdehnung haben, machen sich auch beide Geometrien im Lochkameranbild bemerkbar (Sätze 10-12). Nur wenn die Blende ein Punkt wäre, ergäbe sich ein umgedrehtes, das heißt, punktgespiegeltes Bild der Lichtquelle (Satz 13, ideale Lochkamera). Vor diesem Hintergrund nennt Kepler ein Kriterium, unter welchem das

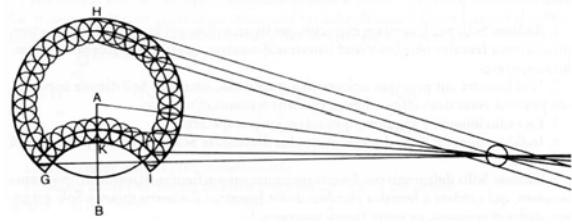


Abb. 9: Keplers Skizze aus seinem Notizbuch, welche die Auflösung des Mondrätsels veranschaulicht. Der Durchmesser des Mondes wird durch den Durchmesser der Blende verringert, so wie der Durchmesser der Sonne durch den Durchmesser der Blende vergrößert wird (aus Kepler 2002, S. 249).

Lichtbild auf dem Schirm der Tendenz nach zum Bild der Lichtquelle wird (ebd., S. 250):

14. *Ist der Abstand des Fensters vom Schirm in Vielfachen seines Durchmessers nicht kleiner als der des leuchtenden Körpers in Vielfachen seines, so weicht die Figur des Lichtbildes auf dem Schirm von der des Fensters nach der des leuchtenden Körpers hin ab.*

Die Situation der Sonnenfinsternis in Abbildung 9 erweist sich für Kepler als ein Sonderfall der zuvor skizzierten Theorie. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse und die richtige Interpretation der Finsternis werden in 14 weiteren Sätzen formuliert. An erster Stelle steht die Lösung des *Sonnentalerproblems*, d.h., unter welchen Bedingungen das Sonnenlicht, das durch eine beliebig geformte Blende auf einen Schirm fällt, eine Kreisform annimmt (Satz 1). Dieselben Bedingungen sind auch während der Sonnenfinsternis und in der Lochkamera wirksam. Ein scharfes Bild der Sonne entsteht nur, wenn die Blende punktförmig ist. Nach und nach entfaltet Kepler vor dem Hintergrund seiner skizzierten Lochkamerantheorie die Lösung des Mondrätsels und gibt Erklärungen für eine Reihe von rätselhaften Details. Zum Beispiel erklärt er, weshalb die Hörner der Sonnensichel im Lochkameranbild abgerundet erscheinen, während sie in der direkten Ansicht spitz sind, oder weshalb der Übergang von der partiellen zur totalen Finsternis auf dem Lochkameranbild nicht stetig wie am Himmel, sondern sprunghaft erfolgt (ebd.):

7. *Wenn das Fenster rund ist, erweitert sich das gesamte Bild des leuchtenden Teils, indem die Ränder um einen Fensterradius in alle Richtungen verschoben werden. Daher erscheinen die Hörner des leuchtenden Teils der Sonne im Lichtbild nicht scharf, wie am Himmel, sondern stumpf, entsprechend der Breite des Fensters.*

[...]

12. *Wenn der Kreis um die Sonne verschwindet, entspricht er im Bild dem Durchmesser des Fensters. Und wenn die Sonne vollständig verfinstert ist, geschieht dies im Lichtbild plötzlich, nicht allmählich wie am Himmel.*

Dies ist Keplers Lösung des Rätsels der scheinbaren Verkleinerung des Monddurchmessers bei Sonnen-

finsternissen: Der Mond wird nicht kleiner, sondern das Bild der leuchtenden Sonne vergrößert sich auf Kosten des Mondbildes. Bei einer unendlich weit entfernten Sonne und einem kreisförmigen Fenster vergrößert sich das Sonnenbild entlang des gesamten Randes der Sonnensichel um den Radius der Blende. Im gleichen Maße, wie das helle Lochkamerabild der Sonne um den Durchmesser der Blende wächst, schrumpft der verdunkelnde Teil des Mondes um den gleichen Durchmesser. Damit ergibt sich sofort die Lösung zur Berechnung der scheinbaren Durchmesser: Der Radius des konkaven Bogens der teilverdeckten Sonne im Lochkamerabild muss durch Hinzufügen des Blendendurchmessers korrigiert werden. Kepler beginnt erneut zu rechnen und kommt bereits nach wenigen Zeilen zum Ergebnis (ebd., S. 251): *Das Verhältnis von Sonnendurchmesser zu Monddurchmesser beträgt etwa 10 zu 11.*

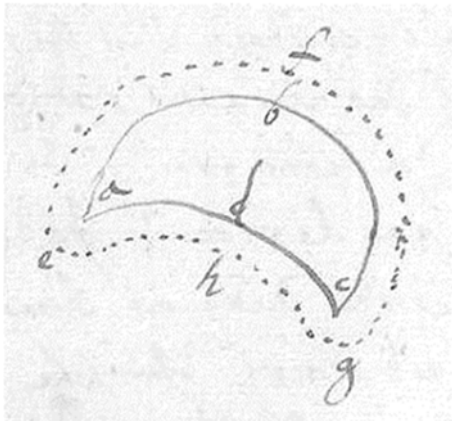


Abb. 10: Originalskizze zur Lösung des Mondrätsels von Kepler aus seinem Brief an Mästlin vom 9. September 1600 (aus Kepler 1949, S. 151).

Am 9. September 1600 informiert Kepler seinen Freund und ehemaligen Lehrer Mästlin über seine Entdeckung, bei der wir auch erfahren, dass Kepler Opfer eines Diebstahls geworden war (Kepler 1949, Brief 175, S. 150):

In der Zwischenzeit war ich ganz damit beschäftigt, Sonnenfinsternisse zu berechnen und zu beobachten. Während ich damit beschäftigt war, ein spezielles Instrument herzustellen und eine Bühne im Freien zu bauen, nutzte ein anderer die Gelegenheit, um Dunkelheit zu erforschen, und verursachte keinen Sonnenfehler, sondern einen Fehler im Geldbeutel, indem er dreißig Gulden entwendete. Ein teurer Fehler, wahrhaftig, aber seitdem habe ich gelernt, warum der Neumond bei einer Sonnenfinsternis einen so kleinen Durchmesser zeigt. Daher schrieb ich im restlichen Juli eine Ergänzung zum sechsten Buch der Optik von Vitellio.

⁷ Herwart von Hohenburg (1553–1622), ein hoher Beamter und Diplomat am Hofe Kaiser Rudolfs II., war ein bedeutender Förderer der Wissenschaften und insbesondere der astronomischen Forschungen Keplers. Als Mäzen und Korrespondent unterstützte Herwart Keplers Arbeit sowohl finanziell als auch intellektuell und

Kepler findet nicht nur eine adäquate Lösung des Mondrätsels, sondern legt in seinen Tagebuchaufzeichnungen auch eine verallgemeinerte Theorie der Lochkamera vor, die im Rahmen der geometrischen Optik auch heute noch unverändert Gültigkeit besitzt. Damit haben wir hier ein wissenschaftshistorisches Zeugnis vor uns, das nicht nur Keplers Fähigkeit illustriert, komplexe Zusammenhänge intuitiv zu erfassen, sondern zugleich auch die Anfänge der moderneren Optik dokumentiert. Schlichting (1995, S. 204) spricht sogar von einer 'konzeptuellen Revolution' im Sinne Thomas S. Kuhn.

Gleichzeitig ist das Auftreten von Theorien ex nihilo, also das vermeintliche Entstehen von geistesblitzartigen Erkenntnissen, stets kritisch zu hinterfragen. Allzu leicht verfällt man in den Duktus der Erzählung einer Heldengeschichte bzw. leistet einer 'Quasi-Geschichte' Vorschub (Whitaker 1979a, 1979b). Auch Kepler war in ein wissenschaftssoziologisches Gefüge eingebettet: Er stand zu vielen astronomischen Themen, auch zum Mondrätsel, in regem Briefaustausch mit Astronomen wie Mästlin oder dem Gelehrten und Diplomaten Herwart von Hohenburg.⁷ Im Februar 1600 besuchte Kepler Tycho Brahe in Prag, was den Beginn einer wichtigen wissenschaftlichen Zusammenarbeit markierte. Dort hatte Kepler wahrscheinlich die Korrekturmethode für das Lochkamerabild der Sonne kennengelernt; möglicherweise auch eine geometrische Begründung dafür (Straker 1981). Glaubt man Kepler selbst, hatte ihn das Studium der Lochkamerateorie von John Pecham bei der Lösung des Mondrätsels nicht weitergebracht, und er suchte die Antwort in einem gegenständlichen Modell. Rückblickend schreibt er in seiner *Ad Vitellionem* (Kepler 2008, S. 84):

Mir ist vor mehreren Jahren aus den Pisanischen [gemeint ist John Pecham, Anm. d. Verf.] Dunkelheiten einiges Licht aufgeblitzt. Da ich nämlich den so sehr dunklen Sinn der Worte aus der ebenen Zeichnung nicht entnehmen konnte, so nahm ich meine Zuflucht zur $\alpha\upsilon\tau\omicron\psi\upsilon\alpha\nu$ [eigenen Anschauung] in der Körperlichkeit.

Und weiter heißt es:

Ich brachte in der Höhe ein Buch an, das die Stelle des leuchtenden Körpers vertrat. Zwischen diesem und dem Erdboden wurde eine Tafel mit einem vieleckigen Loch befestigt; darauf wurde ein Faden von einer Ecke des Buchs durch das Loch nach dem Erdboden hinabgelassen und derart auf dem Erdboden hin und her geführt, daß er die Ränder des Lochs streifte. Seinen Verlauf auf dem Fußboden zeichnete ich mit Kreide nach, wodurch ich auf dem Fußboden eine dem Loch ähnliche Figur erhielt. Dasselbe trat ein, wenn ich den Faden an der zweiten, dritten, und vierten Ecke des Buchs anheftete und schließlich an unzähligen Punkten des Randes. Und so

trug maßgeblich zur Verbreitung von Keplers revolutionären Ideen bei.

zeichnete die Reihe zahlloser zarter Abbildungen des Lochs die große und viereckige Figur des Buchs ab. Daraus ging also hervor, daß nicht die Rundung des Sehstrahls, sondern die der Sonne zur Lösung der Aufgabe beitrage, nicht weil dies die vollendetste Figur ist, sondern weil dies im allgemeinen die Form des leuchtenden Körpers ist. Dieses ist in der vorliegenden Arbeit der erste Erfolg.

Ob Kepler tatsächlich mit einem physischen Modell experimentierte oder ob er die Vergegenständlichung geometrischer Überlegungen lediglich aus didaktischen Gründen verwendete, bleibt offen. In jedem Fall scheint in den Tagen nach der Sonnenfinsternis im Jahr 1600 eine derartige Auseinandersetzung stattgefunden zu haben. Dafür spricht, dass die im Notizbuch notierten Sätze und Folgerungen schon von ihrer Struktur her Ausdruck gereifter Gedanken sind.

Im Jahr 1604 veröffentlichte Kepler seine ‚Paralipomena ad Vitellionem‘, in der er seine Lochkamerateorie der gelehrten Welt vorstellte.

4. Keplers Lichtfiguren

Im zweiten Kapitel der *Paralipomena*, das als Teil der astronomischen Abhandlung *Astronomiae Pars Optica* erschien, diskutiert Kepler das Konzept der ‚Lichtfiguren‘, das eine verallgemeinerte Theorie der Lochkamera enthält. Viele der in seinem Notizbuch formulierten Sätze finden sich hier wieder, teilweise ausführlicher und in der Struktur aus „Satz und Beweis“ mathematisch dargestellt.

Im Kern präsentiert Kepler hier ein allgemeines geometrisches Konstruktionsprinzip zur Beschreibung der Genese von Schattenbildern ausgedehnter Blendenöffnungen in der Beleuchtung ausgedehnter Leuchten. Das Lochkamerabild bildet den einen Spezialfall dieser Anordnung, bei dem die beleuchtete Öffnung sehr klein wird; der scharfe Schattenriss der Öffnungsblende in der Beleuchtung einer quasi ausdehnungslosen Leuchte den anderen. Das Konstruktionsprinzip wird in Abbildung 11 verdeutlicht. Kepler verwendet eine asymmetrische Dreiecksform als Lichtquelle und ein quadratisches Fenster als Blende.

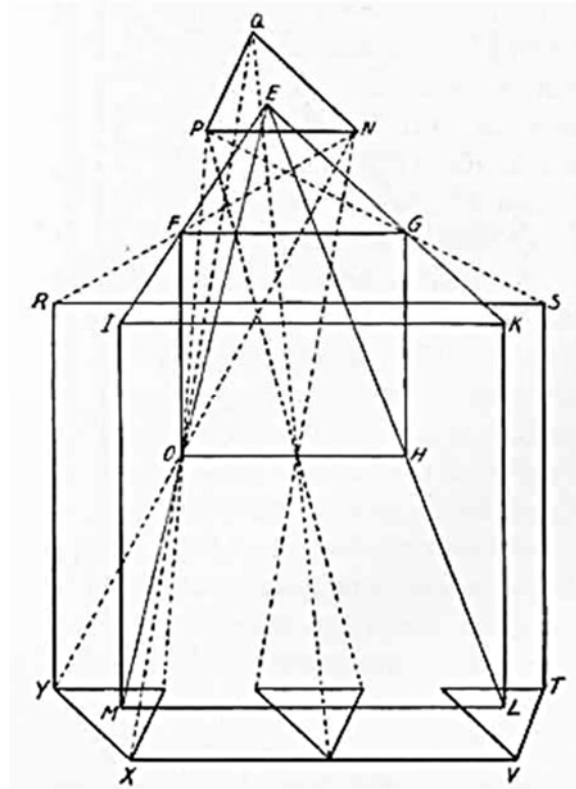


Abb. 11: Keplers Darstellung zur Erläuterung der Erzeugung des Lochkamerabildes: Das Dreieck PNQ symbolisiert eine leuchtende Fläche mit Zentrum E, während das Rechteck FGHO eine Blende ist. Jeder Punkt entlang seines Umfangs erzeugt ein invertiertes Bild der Lichtquelle. Die Ansammlung dieser invertierten Bilder von PNQ bildet die Umrisse des Lochkamerabildes RSTVXY. Man könnte sich dies vorstellen, indem man das Projektionszentrum entlang des Fensterrands zum Punkt O verschiebt und dadurch eine Reihe von Lochkamerabildern über dem klaren Bild IKLM des Fensters nachzeichnet (aus Kepler 2008, S. 91)

Die ‚Lichtfigur‘ auf dem Schirm im Vordergrund entsteht, indem die Blende als Summe punktförmiger Öffnungen betrachtet wird. Jeder Punkt entlang des Blendenrandes erzeugt ein punktsymmetrisch gespiegeltes Bild der beleuchteten Lichtquelle. Die resultierende ‚Lichtfigur‘ (Lochkamerabild) entsteht auf diese

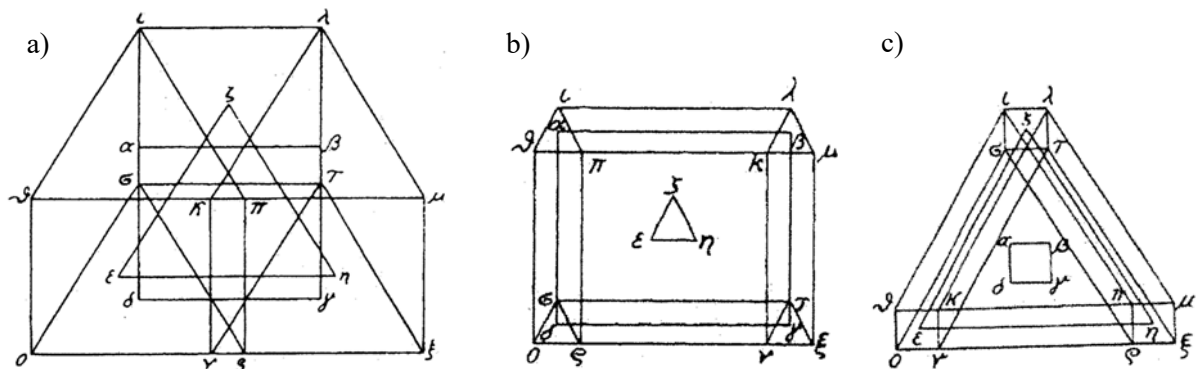


Abb. 12: Keplers Fallunterscheidung zu den Lichtfiguren. Sie entstehen, indem die Blende (hier ein Quadrat $\alpha\beta\gamma\delta$) in Punktöffnungen zerlegt wird. Das resultierende Lochkamerabild ergibt sich dann als Summe idealer Lochkamerabilder der Leuchte (hier ein Dreieck $\epsilon\zeta\eta$). a) Die Lichtfigur zeigt eine ausgewogene Mischung der Formen von Leuchte und Blende. In den anderen Fällen dominiert in der Lichtfigur entweder die Blende (b) oder die Leuchte (c) (aus Kepler 2008, S. 96ff).

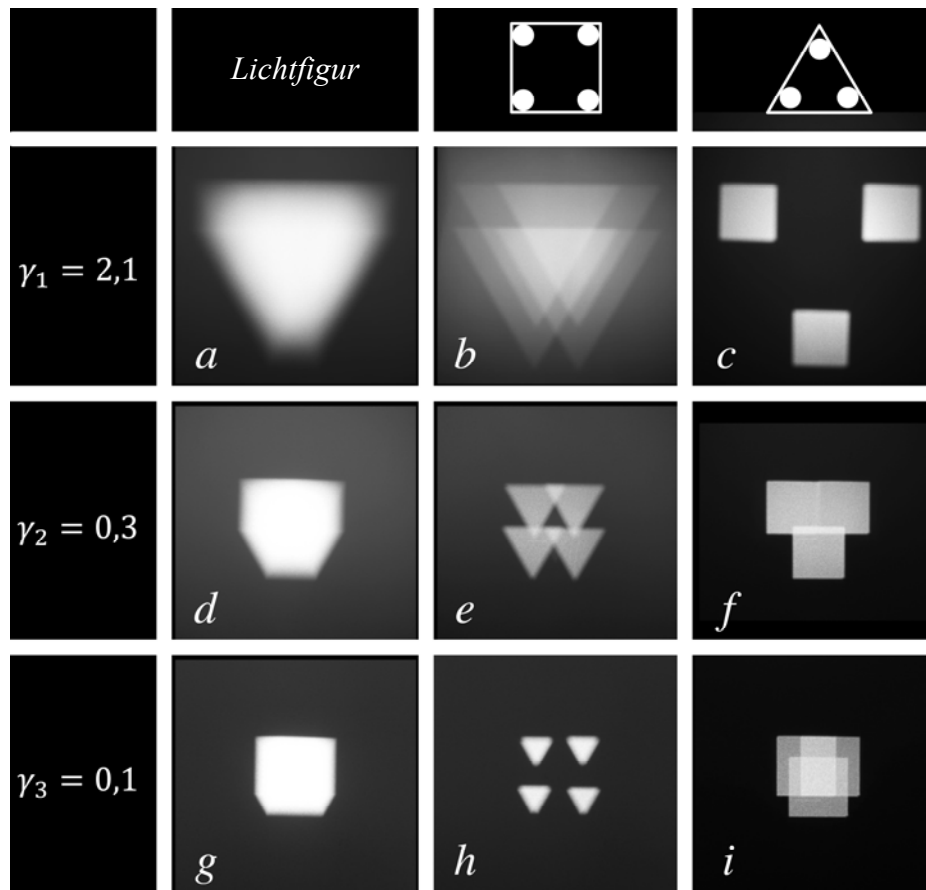


Abb. 13: Die Matrix zeigt die Lichtfiguren nach Kepler für verschiedene Abstandsverhältnisse. Es gilt $\gamma = d_1/d_2$, wobei d_1 und d_2 die Abstände zwischen Leuchte und Blende bzw. Blende und Schirm bezeichnen (vgl. Abb. 5). Je näher die Blende zum Schirm hin verschoben wird, desto stärker bringt sich im resultierenden Schattenbild die Blendengeometrie zur Geltung (Spalte 2). Spalte 3 und 4 veranschaulichen die beiden Konzeptualisierungsmethoden allgemeiner Lochkamerabilder: zum einen als Summe der Lochkamerabilder der Leuchte in Spalte 3, zum anderen als Summe der Blendenprojektionen in Spalte 4.

Weise als Gesamtheit idealer Lochkamerabilder der Lichtquelle, die durch die Blende vermittelt werden. Kepler schreibt (Kepler 2008, S. 91):

Die Lichtfigur an der Wand wird gemeinschaftlich erzeugt aus der umgekehrten Figur der leuchtenden Fläche und der aufrechten des Fensters und entspricht ihnen dem Aussehen nach auf diese Weise.

Welche der beiden Geometrien, die der Lichtquelle oder die der Blende im resultierenden Schattenbild dominiert, hängt nun davon ab, wie das Größenverhältnis der Projektionen beider auf den Schirm beschaffen ist. Abbildung 12 zeigt die maßgebliche Fallunterscheidung: Ist das ideale Lochkamerabild der dreieckigen Leuchte $\varepsilon\zeta\eta$ auf dem Schirm in etwa so groß wie die Projektion der Blende $\alpha\beta\gamma\delta$, wobei das Projektionszentrum im Schwerpunkt der Leuchte liegt, dann (ebd., S. 97)

sieht man sowohl die schrägen Seiten des Dreiecks wie die geraden des Quadrats in dem Umfang der ganzen Figur fast gleichgroß hervortreten, ...

Das Lochkamerabild zeigt eine ausgewogene Mischung aus Leuchten- und Blendengeometrie, sodass eine eindeutige Zuschreibung, welche der beiden Formen in der Lichtfigur vorherrscht, nicht möglich ist.

Das Gleichgewicht dieser Mischung weist zugleich auf die beiden anderen Fälle hin, in denen die Geometrie der einen zugunsten der anderen zurücktritt. Ist die Projektion der Blendenöffnung auf dem Schirm deutlich größer als das Lochkamerabild der Lichtquelle, dann fehlt dem resultierendem Lochkamerabild (ebd., S. 98)

nur ganz wenig, um dem vollkommenen Fenster ähnlich zu sein. Die Spuren von der leuchtenden Fläche sind aber sehr klein.

Andererseits kehren sich die Bedingungen gerade um, wenn die Projektion der Blende sehr klein gegenüber dem Bild der Leuchte wird. Nun (ebd.)

fehlt der Figur nur ganz wenig, um ihren Ursprung, nämlich die leuchtende Fläche, in umgekehrter Lage darzustellen.

Durch diese Fallunterscheidung erfasst Kepler das gesamte Spektrum möglicher Schattenbilder als Mischbilder der Geometrien von Leuchte und Öffnungsblende und formuliert Kriterien, die es ermöglichen, zu bestimmen, welche Geometrie in der Lichtfigur dominiert. Der damit formulierte Zusammenhang zwischen abbildenden und abgebildeten Elementen stellt ein bis heute gültiges grafisches

Verfahren zur Darstellung des Prinzips der *optischen Faltung* dar.

Versuch V: Keplers Lichtfiguren I

Um das Konstruktionsprinzip im Unterricht verständlicher zu machen, wandeln wir den Versuchsaufbau aus Abbildung 5 ab. Wir verwenden, wie Kepler, eine dreieckige Lichtquelle und eine quadratische Blende. Die Abmessungen von Blende und Lichtquelle sind gerade so gewählt, dass alle drei in Abbildung 12 dargestellten Fälle, d.h. der Übergang vom Blendenbild zum Leuchtenbild, realisiert werden können (siehe Abb. 13, a, d, g). Mithilfe einer kleinen Testblende (3 Spalte, oben), bei der die durchbohrten Ecken als nahezu ideale Punktlochblenden wirken, erzeugen wir Lochkamerabilder der Lichtquelle (b, e, h). Es wird deutlich, wie man sich die resultierende Lichtfigur als Summe der über den Blendenrand geführten umgedrehten Lochkamerabilder der Leuchte denken kann.

Versuch VI: Keplers Lichtfiguren II

Interessanter Weise behandelt Kepler indirekt ein zweites, geometrisch äquivalentes Konstruktionsprinzip, ohne es im Detail auszuführen. Bei diesem Ansatz wird die Leuchte in gedachte Punktlichtquellen zerlegt und das resultierende Lochkamerabild auf dem Schirm entsteht als Summation der Blendenprojektionen auf dem Schirm. Mit einer zweiten Testblende vor der Leuchte (Spalte 4, oben) erzeugen wir drei Projektionen der quadratischen Öffnungsblende. Der Umriss dieser Konturen ergibt abermals die Lichtfigur.

Und das Mondrätsel? Das Rätsel bildet gewissermaßen die Klammer in Keplers Kapitel über die Lichtfiguren. So schreibt er zu Beginn (ebd., S. 85):

Denn so viele Finsternisse auch nach dieser Methode [Lochkameramethode, Anm. d. Verf.] beobachtet worden sind, alle zeigten am Himmel einen größeren Umfang, als wie er an dem Lichtkegel erschien, alle zeigten am Himmel einen größeren Durchmesser des Mondes als an dem Lichtkegel. Daher kam es, daß sich jener Phönix unter den Astronomen, Tycho Brahe, im Drang dieser Schwierigkeiten bewundernswert erwies, indem er verkündete, daß sich der Monddurchmesser bei den Konjunktionen stets um den fünften Teil kleiner erweise, als er in den Oppositionen erscheint, obwohl er in beiden Fällen gleich weit von uns entfernt sei.

Am Ende des Kapitels diskutiert Kepler die uns schon bekannte Lösung des Mondrätsels. Reagieren konnte Brahe nicht mehr: Er starb im Oktober 1601; Kepler übernahm seine Stelle als kaiserlicher Mathematiker und Astronom am Hof von Kaiser Rudolf II in Prag.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag haben wir die Entwicklung der Lochkameratheorie nach Kepler anhand von originalen Quellen nachvollzogen. Die alte Frage zur Entstehung der Sonnentaler war zunächst vor allem akademischer Natur. Erst als die Lochkamera zu einem festen Beobachtungsinstrument in der Astronomie wurde, führte das Fehlen einer Abbildungstheorie der Lochkamera zu ernsthaften Schwierigkeiten bei der Deutung astronomischer Daten. Die von Brahe vorgeschlagene Interpretation des Mondrätsels stellte einige von Kepler als sicher angenommene Bedingungen der Himmelsmechanik in Frage. Kepler, der in erster Linie Astronom war und dem optische Erkenntnisse vor allem zur richtigen Interpretation astronomischer Beobachtungen dienten, muss einen erheblichen Erkenntnisdruck verspürt haben, vielleicht auch persönliche Rivalität gegenüber Brahe.⁸ Die hier vorgestellte historische Kontextualisierung kann vor diesem Hintergrund und aufgrund des hervorragenden Quellenmaterials verschiedene Anknüpfungspunkte bieten, zum Beispiel in der Vermittlung von Aspekten der ‚Natur der Naturwissenschaft‘ (McComas 2002) oder im Bereich des ‚Storytelling‘ (Heering 2013).

Wie das Beispiel von Kepler und Brahe verdeutlicht, ist naturwissenschaftliches Wissen von historischen, kulturellen und sozialen Faktoren beeinflusst. Die Forschung umfasst subjektive Aspekte, die sich zum Beispiel zeigen, wenn Brahe den verkleinerten Monddurchmesser ohne klare oder nachvollziehbare Begründung in seinem Sinne interpretiert. Zudem ist Forschung eine kreative Tätigkeit, die sich keineswegs einer starren Schritt-für-Schritt-Methode unterordnet. Dies zeigt sich unter anderem in Keplers Aufzeichnungen, aus denen hervorgeht, dass die Entwicklung seiner Lochkameramethode nicht auf einer methodischen Anleitung basierte, sondern vielmehr Elemente von Intuition und Zufall beinhaltet. Aus diesem Grund könnte das Mondrätsel auch gut geeignet sein, um im Rahmen des Storytelling-Ansatzes als Geschichte gestaltet zu werden. Dies würde es ermöglichen, ein weiteres authentisches Beispiel zu schaffen, das ein angemessenes Bild der Naturwissenschaften, ihrer Methoden, ihrer Erkenntnisgewinnung und ihrer Diskurse vermittelt.

Aus fachlicher Perspektive bietet das Mondrätsel Anknüpfungspunkte, um eine allgemeinere Theorie der Lochkamera im Unterricht zu thematisieren. Häufig bleibt die Diskussion auf den Fall der idealen Lochkamera beschränkt. Abweichungen von der punktförmigen Blende, hervorgerufen durch Blenden mit endlicher Größe, werden dann – bereits aus einer technischen Perspektive – als Fehler der Bilderzeugung thematisiert. Keplers Konstruktionsprinzip der Licht-

gekennzeichnet. Als sie 1600 in Prag zusammenkamen, wurde Kepler Brahes Assistent.

⁸ Die Rivalität zwischen Johannes Kepler und Tycho Brahe ist ein faszinierendes und gut dokumentiertes Kapitel in der Geschichte der Astronomie. Obwohl beide Männer letztendlich zum Fortschritt der Himmelswissenschaften beitrugen, waren ihre Beziehungen durch eine Mischung aus Bewunderung und Wettbewerb

figuren zeigt, wie sich verallgemeinerte Lochkamera-bilder in das Wechselspiel von Abbilden und Abgebildetwerden der Leuchten- und Blendengeometrie einfügen, das sich ganz allgemein für Schattenbilder formulieren lässt (Grebe-Ellis & Quick 2023). Die Lösung des Mondrätsels erweist sich aus dieser Perspektive als Spezialfall der optischen Faltung.

6. Literatur

- Aristoteles (1991): *Problemata Physica*. Flasher, H. (Übers.), Berlin: Akademie Verlag
- Belting, H. (2008): *Florenz und Bagdad. Eine west-östliche Geschichte des Blicks*. München: C.H. Beck.
- Brahe T. (1913): *Opera Omnia*, Vol XII, Dreyer, J. L. E. (Hrsg.), Hauniae: Libraria Gyldendaliana
- Christianson J. (2020): *Tycho Brahe and the measure of the heavens*. London: Reaktion Books
- Ehtreiber J. Hohenester A. Rath G. (1994): *Der kosmische Träumer. Johannes Kepler - die andere Seite*. Graz: Leykam
- Grebe-Ellis, J. (2010): Schattenbilder wie Schriftzeichen lesen. Eine bildoptische Studie nach Johannes Kepler, *PhyDid A* 9 34–44
- Grebe-Ellis J. & Quick T. (2023): Soft shadow images. *Eur. J. Phys.* 44 045301
- Heering, P. (2013): Storytelling als Zugang zur Bildung in den Naturwissenschaften. *Phydid B*. Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG Frühjahrstagung 2013 in Jena, 1-7
- Kepler J. (1939): *Astronomiae pars optica*. Gesammelte Werke 2. Hammer, J. & Caspar, M. (Hrsg.), München: C.H. Beck
- Kepler J. (1949): *Briefe 1599-1603*. Gesammelte Werke 14. Casper, M. & Dyck, W. von (Hrsg.), München: C.H. Beck
- Kepler J. (2002): *Manuscripta astronomica (III)* Gesammelte Werke 21.1. Bialas, V., Boockmann, F., Dyck, W. von, Knobloch, E., Casper, M. (Hrsg.), München: C.H. Beck
- Kepler J. (2008): *Schriften zur Optik: 1604-1611*, Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften: 198, Frankfurt a. M.: Verlag Harri Deutsch
- Lindberg D. C. (1968): The Theory of Pinhole Images from Antiquity to the Thirteenth Century, *Arch. Hist. Exact Sci.* 15: 154-176
- Marek J. (1971): Ansätze zu Youngs und Fresnels Versuchen bei Kepler: Die Rolle der Lochkamera in der Entwicklung der physikalischen Optik, In: *Sudhoffs Archiv*, 55/2, 136-155
- McComas W. F. (2002): *The Nature of Science in Science Education: Rationales and Strategies*, Dordrecht: Springer Verlag
- Schlichting H. J. (1995). Sonnentaler fallen nicht vom Himmel. *MNU*, 48/4, 199-204
- Schlichting H. J. (2021): Der Vater der modernen Optik. *Spektrum*, 12, 60–62
- Straker S. (1981): Kepler, Tycho, and the 'Optical Part of Astronomy': the Genesis of Kepler's

Theory of Pinhole Image. *Arch. Hist. Exact Sci.* 24, 267-293

- Whitaker M. A. B. (1979a): History and quasi-history in physics education – Part I. *Phys. Educ.*, 14, 108–112
- Whitaker, M. A. B. (1979b): History and quasi-history in physics education – Part 2. *Phys. Educ.*, 14, 239–242

Das Stellarium Gornergrat

- Aktuelle Entwicklungen und zukünftige Perspektiven -

Simon F. Kraus*, **Stéphane Gschwind⁺**, **Marvin zur Mühlen***, **Andreas Müller⁺**, **David Picon⁺**,
Timm Riesen[§], **Leon Rohde***, **Oliver Schwarz***

*Universität Siegen, Department Physik, Didaktik der Physik, Adolf-Reichwein-Str. 2, 57068 Siegen ⁺University of Geneva, Faculty of Science / Physics Section and Institute of Teacher Education, Pavillon d'Uni Mail, Boulevard du Pont d'Arve 40, CH-1211 Genève [§]University of Bern, Center for Space and Habitability, Gesellschaftstrasse 6, CH-3012, Bern

kraus@physik.uni-siegen.de

Kurzfassung

Das Stellarium Gornergrat stellt seit 8 Jahren ein robotisches Observatorium für Schweizer Schulen bereit. Die Nutzung der Teleskope erfolgt in Verbindung mit didaktisch aufbereiteten Aktivitäten, die über ein Portal abrufbar sind. Im vorliegenden Beitrag wird aufgezeigt, in welche Richtung die zukünftige Weiterentwicklung dieser Aktivitäten gehen kann. Hierbei steht aktuell vor allem die Verbindung von historischen Daten, in Form von Fotoplatten, mit neuen Erkenntnissen der Astrophysik sowie den Beobachtungsmöglichkeiten auf dem Gornergrat im Fokus. So soll etwa eine aktuelle fachwissenschaftliche Veröffentlichung, in der die Entwicklung der Farbe des Sterns Betelgeuze über einen Zeitraum von 2 000 Jahren hinweg nachvollzogen werden konnte, in eine solche Schüleraktivität überführt werden. Der Beitrag stellt weiterhin eine Reihe von Aktivitäten dar, die sich noch einem frühen konzeptionellen Stadium befinden. Neben den neuen Aktivitäten soll auch die fachdidaktische Begleitforschung ausgebaut werden. Ein Schwerpunkt soll hier auf dem Authentizitätsempfinden bei der Nutzung eines robotischen Teleskops liegen.

1. Überblick: Das Stellarium Gornergrat

1.1. Projektbeteiligte und aktuelle instrumentelle Ausstattung

Beim Stellarium Gornergrat handelt es sich um ein Verbundprojekt, in dessen Rahmen seit 2016 ein robotisches Teleskop für die kostenfreie Nutzung durch Schweizer Schulen bereitgestellt wird. Das Teleskop befindet sich auf dem namensgebenden Gornergrat nahe Zermatt, in einem Kuppelgebäude, welches zur Hochalpinen Forschungsstation Jungfrauoch & Gornergrat (HFSJG) gehört. Neben der HFSJG trägt auch die Burgergemeinde Zermatt wesentlich zum Betrieb des Teleskops bei. Als wissenschaftliche Träger sind dazu die Universitäten Bern (mit dem Center for Space Habitability) und die Universität Genf am Projekt beteiligt. Dazu kommt, als einziger nicht in der Schweiz angesiedelter Partner, die Universität Siegen, deren Beitrag vorrangig in der Gestaltung und Evaluierung von Lehr-Lern-Materialien besteht, die in Verbindung mit dem Teleskop zum Einsatz kommen sollen.

Die Ausstattung des Stellarium Gornergrat besteht aus modernen Instrumenten, wie einem 60 cm Spiegelteleskop für Deep Sky Aufnahmen, einem langbrennweitigen Takahashi Mewlon-250, einer DSLR für Übersichtsaufnahmen (der sogenannten „ConstellationCam“) sowie einem Linsenfernrohr für Führungen vor Ort. [1] Der ehemals für die Planetenbeobachtung vorgesehene Takahashi Mewlon wurde kürzlich mit einem Spektroskop ausgestattet, um niedrig aufgelöste Spektren von hellen Sternen

anfertigen zu können und so neue Beobachtungsmöglichkeiten zu eröffnen.

Die gesamte Hardware ist für den robotischen Betrieb, d. h. eine vollständig automatisierte Beobachtungsdurchführung, optimiert, so dass Nutzer eine Vorab-Planung der Beobachtung durchführen, selbst jedoch zur eigentlichen Beobachtungszeit nicht eingreifen müssen und, nach dem erfolgreichen Abschluss, das gewonnene Bildmaterial abrufen können. Die Steuerung der Instrumente erfolgt dabei über das Portal des Stellarium Gornergrat (siehe [2]).

1.2. Nutzungskonzept für Lernende

Das didaktische Material, in welches die Nutzung des Stellarium Gornergrat eingebettet ist, stellt schlüsselfertige Aktivitäten für die Nutzung im Unterricht bereit. Dabei werden zwei unterschiedliche Herangehensweisen verfolgt. Die zuerst angebotenen Aktivitäten wurden in Form von PDF-Dateien verfügbar gemacht, wobei eine Datei das eigentliche Lehr-Lern-Material für die Lernenden enthält und die zweite Datei Hintergrundinformationen und didaktische Kommentare für die Lehrkraft liefert. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die aktuell in diesem Format vorhandenen Aktivitäten, die sich in verschiedene Niveaustufen gliedern. Niveau A adressiert dabei Lernende von ca. 8 bis 15 Jahren, Niveau B richtet sich an die Mitte der Sekundarstufe I (13 bis 16 Jahre) und Niveau C entspricht dem Ende der Sekundarstufe I und der Sekundarstufe II (16 bis 19 Jahre). Dazu existiert eine weitere Niveaustufe, die sich an besonders interessierte Jugendliche richtet und im Rahmen von

Astronomiekursen und Maturaarbeiten zum Einsatz kommen soll. [1] Bei der zweiten Herangehensweise wurden bestehende Aktivitäten in eine vollständig digitale Umgebung transferiert, die nun auch automatisierte Kontrollen des Lernfortschritts bzw. interaktive Aufgaben enthält. [3]

Tab. 1: Übersicht der aktuell verfügbaren Aktivitäten der Niveaustufe A bis C im klassischen PDF-Format.

Aktivität	Niveau
Die Phasen des Mondes	A
Die Wanderung der Sterne	A
Sternbilder	A
Das Sonnensystem	A
Galaxien-Zoo	B
Ein Tag auf Jupiter	B
Das Einmaleins des Nachthimmels	B
Der Krebsnebel	C
Berge auf dem Mond	C
Der Supermond	C

Die Nutzung der Teleskope erfolgt bei beiden Herangehensweisen jeweils aus der Aktivität heraus, d. h. es existiert zu jeder Aktivität ein vorkonfigurierter Beobachtungsplan, mit dem eigenes Bildmaterial mit wenigen Vorkenntnissen gewonnen werden kann.

Zu dieser etablierten Form der Nutzung ist im Jahr 2024 der sogenannte Multi-Mode, als eine alternative Form der Generierung von Beobachtungsaufträgen, getreten. Mit dem Multi-Mode ist es möglich, unabhängig von einer speziellen Aktivität, Beobachtungen zu planen und durchzuführen. Damit wird auch die Art der Beobachtung deutlich flexibilisiert und rationalisiert, d. h. es können beispielsweise mehrere Aufnahmen mit unterschiedlichen Farbfiltern gleichzeitig in Auftrag gegeben werden.

1.3. Nutzungsstatistiken

Zur Nutzung des Stellarium Gornegrat liegen eine Reihe von Statistiken vor. Aus diesen ergibt sich, dass ca. 42% aller Beobachtungspläne erfolgreich abgearbeitet werden. [4] Für mehr als 90% aller „fehlgeschlagenen“ Beobachtungen, sind dabei die Wetterbedingungen auf dem Gornegrat verantwortlich, so dass insgesamt auf Seiten der Hard- und Software eine hohe Zuverlässigkeit konstatiert werden kann.

Das am häufigsten nachgefragte Instrument ist das RiFast-Spiegelteleskop. Die Nutzungsstatistiken für einzelnen Aktivitäten, bzw. Objekte, zeigen dazu einen Schwerpunkt auf aktuellen Ereignissen. So führen Beobachtungen des Kometen C/2022 E3 (ZTF) die Statistiken für das Jahr 2023 mit einem Anteil von ca. 23% an. Dahinter folgen die Aktivitäten für variable Sterne, Galaxien und die Objekte des Messier Katalogs. [4] Neben Kometen stehen damit die Photometrie sowie Deep Sky Objekte im Allgemeinen im Zentrum des Interesses.

2. Neue Aktivität: Sternfarben und stellare Entwicklungsprozesse

2.1. Historische Quellen als Daten in der modernen Astrophysik

Im Folgenden wird eine neue Aktivität in ihren Grundzügen beschrieben, welche sich gegenwärtig in einem fortgeschrittenen Stadium der Entwicklung befindet.

Es ist gut bekannt, dass sich die Entwicklung von Sternen (und der überwiegenden Mehrzahl astronomischer Objekte generell) allgemein nicht in historischen Zeiträumen anhand eines einzelnen Exemplars beobachten lässt. Mit historischen Zeiträumen ist hier der Zeitraum gemeint, über den hinweg schriftliche Zeugnisse überliefert worden sind. Ein sehr seltenes Gegenbeispiel stellt die Nachverfolgung der Farbveränderungen des Stern Beteigeuze über einen Zeitraum von 2 000 Jahren hinweg dar, wie sie von Neuhäuser et al. [5] gesammelt und ausgewertet worden sind.

Hierbei ist es gelungen, eine ausreichend große Zahl historischer Quellen auszuwerten, in denen die Farbe des Sterns in Bezug zu geeigneten Vergleichsobjekten – d. h. Sternen oder Planeten, deren Farbe als unveränderlich angenommen werden kann – gesetzt worden ist. Auf diese Weise konnte nachvollzogen werden, wie sich die Farbe von Beteigeuze von orange bis hin zum heute wahrgenommenen rot verschoben hat.

In der neu zu entwickelnden Aktivität werden die Grundgedanken dieser Fachveröffentlichung aufgegriffen und Sterne auf eine mögliche Veränderung ihrer Farbe über lange Zeiträume hinweg untersucht. Gerade die sprachlichen Aspekte stellen bei der Auswertung historischer Quellen jedoch eine Hürde dar, die sich im Unterricht kaum überwinden lässt. Es wird daher ein leicht geänderter Ansatz verfolgt, in dem Sekundär- anstelle der Primärquellen verwendet werden. Dies geschieht durch Rückgriff auf Publikationen, in deren Rahmen bereits in der Vergangenheit einschlägige ältere Quellen zusammengestellt und die Möglichkeit für Farbveränderungen bei Sternen diskutiert wurde. Dazu wird auf Ausschnitte aus den Büchern Kosmos (Band 3) von Alexander von Humboldt sowie Wunderbau des Weltalls von Johann Heinrich Mädler zurückgegriffen. [6] [7] Beide Büchern enthalten allgemeine Beschreibungen von Sternfarben sowie die genannten Beispiele für vermutete Farbveränderungen, die wiederum unter Rückgriff auf deutlich ältere Publikationen kompiliert wurden. So führt z. B. Humboldt auf folgender Weise in das Phänomen der Farbveränderungen ein ([6], S. 169-170):

Eine Farbenverschiedenheit des eigenthümlichen Lichtes der Fixsterne wie des reflectirten Lichtes der Planeten ist von früher Zeit an erkannt; aber die Kenntniß dieses merkwürdigen Phänomens ist erst durch das telescopische Sehen, besonders seitdem man sich lebhaft mit

den Doppelsternen beschäftigt hat, wunderbar erweitert worden. Es ist hier nicht von dem Farbenwechsel die Rede, welcher, wie schon oben erinnert worden ist, das Funkeln auch in den weißesten Gestirnen begleitet; noch weniger von der vorübergehenden, meist röthlichen Färbung, welche nahe am Horizont wegen der Beschaffenheit des Mediums (der Luftschichten, durch die wir sehen) das Sternlicht erleidet: sondern von dem weißen oder farbigen Sternlichte, das als Folge eigenthümlicher Lichtprocesse und der ungleichen Constitution seiner Oberfläche jeder Weltkörper ausstrahlt.

Deutlich wird hierbei, wie Humboldt zwischen den atmosphärischen Einflüssen und den intrinsischen Veränderungen des Sterns unterscheidet, ganz so wie es auch in der didaktisch aufbereiteten Aktivität notwendig sein wird. Gleichzeitig wird durch Humboldt bereits hier die Bedeutung der instrumentellen Weiterentwicklung aufgezeigt, die ebenfalls im Rahmen der Aktivität thematisiert werden soll.

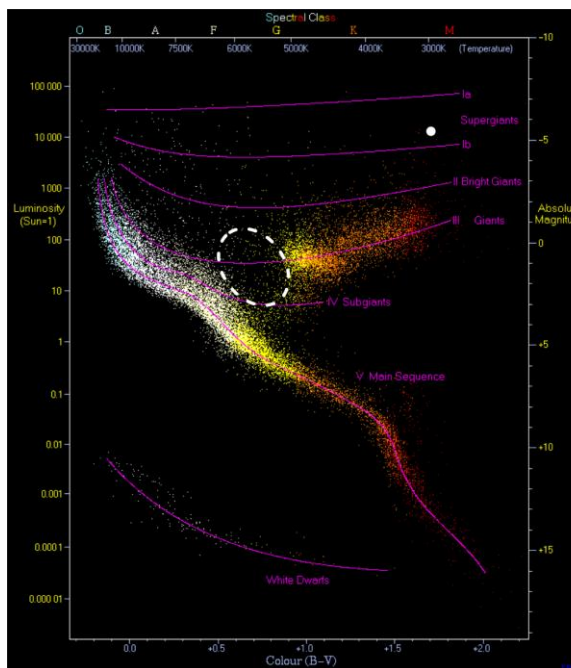


Abb. 1: Hertzsprung-Russell-Diagramm mit Hervorhebung der Hertzsprung-Lücke (gestricheltes Oval) sowie der heutigen Position des Sterns Beteigeuze (weißer Punkt) (Richard Powell, [HRDiagram](#), Einfügung weiße Markierungen durch die Autoren, [CC BY-SA 2.5](#)).

Einen Einblick in die Art der Kompilation älterer Quellen liefert der folgende Textauszug ([6], 169-170):

[...] Ptolemäus nennt in seinem Fixstern-Catalog 6 Sterne [...], feurröthlich: nämlich Arcturus, Aldebaran, Pollux, Antares, α des

Orion (die rechte Schulter) und Sirius. [...] Von den 6 oben aufgezählten Sternen haben 5 noch zu unserer Zeit ein rothes oder röthliches Licht. Pollux wird noch als röthlich, aber Castor als grünlich aufgeführt. Sirius gewährt demnach das einzige Beispiel einer historisch erwiesenen Veränderung der Farbe, den er hat gegenwärtig ein vollkommen weißes Licht.

Hier wird, in sehr knapper Form, die eine Verbindung der von Ptolemäus überlieferten Beobachtungen der Sternfarben und den Vergleichsbeobachtungen zu Humboldts Zeit hergestellt. Humboldt identifiziert folglich Sirius als einen solchen Stern, für den ein Farbwechsel (vermeintlich) nachgewiesen wurde.

Auch der zugrundeliegende methodische Ansatz wird bei Humboldt weiter ausgeführt ([6], 169-170):

Es wäre zu wünschen, da dieser Gegenstand bei den großen Fortschritten der neueren Optik ein lebhaftes Interesse auf sich gezogen hat, daß man die Epoche einer solchen Naturbegebenheit, des Verschwindens der Röthung des Sirius, durch Bestimmung gewisser Zeitgrenzen, auffinden könne. Zu Tycho's Zeit hatte Sirius gewiß schon weißes Licht; denn als man mit Verwunderung den neuen in der Cassiopeja 1572 erschienenen blendend weißen Stern im Monat März 1573 sich röthen und im Januar 1574 wieder weiß werden sah, wurde der rothe Stern mit Mars und Aldebaran, aber nicht mit Sirius verglichen.

So wird an dieser Stelle ein Vorgehen angeregt, welches starke Parallelen zu Vorgehen von Neuhäuser et al. aufweist und die genauere Bestimmung des Zeitpunkts dieses Farbwechsels anhand der Auswertung weiterer Quellen vorschlägt. Im weiteren Verlauf der Ausführungen werden sodann auch Quellen benannt, die Listen rötlicher Sterne umfassen und teilweise bis ins 9. Jahrhundert zurückreichen. Es gelang Humboldt jedoch nicht, das Rätsel um den Farbwechsel bei Sirius zu lösen, da die genutzten Quellen ein uneinheitliches Bild abgeben.

2.2. Astrophysikalische Überlegungen zu stellaren Entwicklungsprozessen

Zu Zeiten Humboldts und Mädlers waren Modelle zur Sternentwicklung noch nicht vorhanden, so dass lediglich eine rein phänomenologische Betrachtung vorgenommen werden konnte. Für eine Untersuchung des Phänomens aus moderner Sicht steht jedoch, auch für eine schulische Behandlung, mit dem Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) ein Werkzeug zur Verfügung, um die Angaben in den Quellen auf Plausibilität überprüfen zu können. [8] In diesem Diagramm wird die Leuchtkraft in Vielfachen der Sonnenleuchtkraft (bzw. die absolute Helligkeit) gegen den sogenannten Farbindex (bzw. die Temperatur) aufgetragen.

So ist aus moderner Sicht klar, dass solche, im astronomischen Sinn, schnelle Veränderungen in den Zustandsgrößen von Sternen nur bei solchen Sternen

aufzutreten können, die sich in sehr speziellen Entwicklungsstadien befinden. Dieses Entwicklungsstadium findet sich im HRD im Bereich der sogenannten Hertzsprung-Lücke, einem Bereich zwischen der diagonal verlaufenden Hauptreihe und dem sich darüber anschließenden Riesenast (Abb. 1). Das Zentrum dieser sehr dünn besetzten Region liegt bei ca. 10 Sonnenleuchtkräften und einem Farbindex (B-V) von knapp unter +1,0. Bereits der Umstand, dass diese Lücke nur von äußerst wenigen Sternen besetzt ist, ist ein Indiz für die kurze Aufenthaltsdauer der Sterne in diesem Stadium. Der Lebenszyklus eines Sterns lässt sich dazu mit einfachen Simulationen (z. B. [9]) nachvollziehen, wo die zeitliche Veränderung wesentlicher Zustandsgrößen, wie dem Durchmesser und der Farbe (bzw. Temperatur), in Abhängigkeit der Masse nachverfolgt werden können.

Vergleicht man nun die Lage des Sirius im HRD mit der Hertzsprung-Lücke, so zeigt sich, dass Sirius mit einer Leuchtkraft von 25 Sonnenleuchtkräften und einem Farbindex von +0,01 (beide Angaben beziehen sich hierbei auf Sirius A, da die zweite Komponente des Doppelsternsystems durch ihre geringe Leuchtkraft an dieser Stelle irrelevant ist) eindeutig ein Stern der Hauptreihe ist. Dementsprechend ist ein Farbumschlag innerhalb eines Zeitraums von weniger als 2 000 Jahren vollkommen aufgeschlossen, zumindest wenn es sich dabei um eine Änderung des intrinsischen Zustands des Sterns und nicht um einen äußeren Einfluss (z. B. den Durchgang des Sterns durch dichtes interstellares Gas) handeln soll. Die Behauptung Humboldt, anhand des Sirius den Nachweis für eine Farbveränderung über einen historischen Zeitraum hinweg erbracht zu haben, ist damit zurückzuweisen. Die vermeintliche Farbveränderung bei Sirius wird heute auf Szintillationseffekte oder Fehler bei der schriftlichen Überlieferung des Manuskripts über die Jahrhunderte hinweg zurückgeführt.

Da solche Farbwechsel zwar äußerst selten, jedoch nicht grundsätzlich unmöglich sind, soll die Aktivität nicht mit dieser Widerlegung enden, sondern auch den Stern Beteigeuze als Untersuchungsobjekt einschließen. Dazu werden historischen Daten in geeigneter Form aufbereitet, so dass Lernende die Veränderung der Sternfarbe bis in die heutige Zeit hinein nachverfolgen können. Als ein Teil der Aktivität soll das Stellarium Gornegrat genutzt werden, um eigenes Bildmaterial der Sterne (je nach verfügbarer Teleskopzeit derjenigen Exemplare aus den Quellen oder lediglich von Beteigeuze) aufgenommen werden. Vorab wird die Aufnahme von Bildmaterial durch standardisierte Farbfilter (hier Johnson B und V) eingeführt, über die sich Rückschlüsse auf die Temperatur von Sternen ziehen lassen und die vor allem geeignet sind, die Farbe eines Sterns unabhängig von individuellen Einflüssen zu messen.

Aus astrophysikalischer Sicht ist anzumerken, dass Beteigeuze mit ca. 65 000 Sonnenleuchtkräften und einem B-V-Farbindex von +1,85 heute deutlich außerhalb der Hertzsprung-Lücke liegt (siehe markierte

Region und Position des Sterns Beteigeuze zur heutigen Zeit in Abb. 1). Der eigentliche Farbwechsel fand zu einem Zeitpunkt statt, als sich der Stern aber gerade innerhalb der Lücke befand, bzw. diese mit hoher Geschwindigkeit durchlief. Dies verdeutlicht einmal mehr die Kürze der Aufenthaltsdauer, des Sterns in dieser Region des HRD.

2.3. Didaktischer Wert der neuen Aktivität

Ein besonderer Wert der neuen Aktivität besteht in der Möglichkeit, Veränderungen – im Sinne von Entwicklungen – sichtbar zu machen, wie es in der Astronomie anhand von Einzelobjekten nur selten gelingt. Ausnahmen hiervon stellen Supernova-Explosionen oder die Veränderung von Pulsationsperioden veränderlicher Sterne dar. Mit der Änderung der Farbe eines Sterns tritt nun ein weiteres Phänomen hinzu, welches einen Entwicklungsprozess zumindest unter Hinzuziehung schriftlicher Quellen zugänglich macht. Mit einem solchen Ansatz lässt sich dem falschen Eindruck von der Unveränderlichkeit astronomischer Objekte entgegenwirken, wie er sich vielfach in historischen Weltbildern nachweisen lässt.

Die Aktivität ermöglicht weiterhin die Verbindung verschiedener methodischer Zugänge und unterschiedlicher Aspekte dieser Zugänge. So kann ein Einstieg in dem Versuch der freitägigen Beobachtungen von Sternfarben bestehen, ggf. verbunden mit der Frage, warum nur relativ wenige Sterne farbig gesehen werden können. Darauf aufbauend lässt sich der (historische) Wert der Einführung einfacher Teleskope in die Astronomie, auch im Hinblick auf die hier Wahrnehmbarkeit von Sternfarben, thematisieren. Damit wird das Feld der Wahrnehmungsphysiologie und -psychologie berührt und damit ein Ansatz für fächerverbindenden Unterricht eröffnet, wie er häufig auch in Lehrplänen gefordert wird.

Ein weiterer Aspekt von besonderer Bedeutung ist, dass mit dieser Aktivität der Wert historischer Daten in der Astronomie dargestellt werden kann. Es wird hier deutlich, dass gerade bei besonders alten Daten der Wert für die moderne Forschung durch die geringe Messgenauigkeit nicht wesentlich beeinträchtigt wird. Vielmehr wird diese durch das hohe Alter gerade wieder ausgeglichen. Schriftliche Zeugnisse können damit vielmehr Phänomene erschließen, die ansonsten generell unzugänglich bleiben würden.

Ebenso sind im Rahmen der Aktivität Fehlerdiskussionen notwendig, die sich hier z. B. auf atmosphärische Effekte (Luftmassenkorrektur) erstrecken, wie sie auch bereits von Humboldt angesprochen wurden. Weitere Effekte, die je nach gewünschter Genauigkeit der Ergebnisse zu korrigieren sind, ergeben sich dann durch tiefergehende astronomische Überlegungen. Dazu gehört etwa auch die zunehmende Rötung des Sternlichts durch die Wirkung interstellarer Materie. Das auch solche Effekte zu berücksichtigen sind, wird wiederum mit Blick auf das HRD deutlich, aus dem die enorme Leuchtkraft vieler Sterne hervorgeht, die auch mit bloßem Auge noch als farbig

wahrgenommen werden können, und deren Entfernung zur Erde dennoch enorm groß sein kann. Ein zentrales Beispiel hierzu ist wiederum der Stern Betelgeuze selbst, dessen Entfernung bei einigen Hundert Lichtjahren liegt.

Auf methodischer Seite wird, nach den möglichen freitägigen Beobachtungen, auf ein modernes Remote-Observatorium mit standardisierten Filtern zurückgegriffen. Damit wird die Brücke von individuellen visuellen Beobachtungen zu international standardisierten Messungen geschlagen, deren Vergleichbarkeit unabhängig von Aufnahmeort, -zeit und beobachtender Person gewährleistet ist.

3. Mögliche weitere Aktivitäten

Weitere Aktivitäten befinden sich in einem weniger fortgeschrittenen Stadium. Diese sollen hier als mögliche Ansatzpunkte für die inhaltliche Weiterentwicklung der Angebote vorgestellt werden.

Der vorstehend kurz skizzierte Gedanke der Nutzung historischer Daten soll in mehreren weiteren Aktivitäten aufgegriffen werden. Im Gegensatz zu den Schriftquellen wird der Ausgangspunkt hier jedoch das Archiv historischer Fotoplatten des Argelander-Instituts der Universität Bonn bilden. Die hier vorhandenen Fotoplatten reichen teils bis in das Jahr 1900 zurück und sind damit ausreichend alt, um etwa Effekte der Astrometrie, wie die Eigenbewegung von Sternen über lange Zeiträume hinweg, nachzuweisen.

Ein Beispiel für eine, bereits mit sehr einfachen Mitteln nachweisbare, Eigenbewegung stellt Barnards Pfeilstern dar. Hier genügt eine Aufnahmeserie über wenige Jahre hinweg, um eine deutliche Verschiebung der Sternposition gegenüber der Hintergrundsterne abbilden zu können. Mit sehr alten Aufnahmen lassen sich jedoch die Positionsverschiebungen vieler Sterne darstellen, was wiederum verdeutlicht, dass die Sterne und die aus ihnen gebildeten Strukturen, wie die Milchstraße, keineswegs statisch in ihren Positionen sind, sondern es sich dabei vielmehr um sehr dynamische Gebilde handelt. Der Bezug zu den Weltbildern ist auch hier direkt gegeben.

Eine weitere Möglichkeit zur Nachverfolgung von Entwicklungsprozessen, stellt die Messung der Periodendauern der Helligkeitsveränderungen veränderlicher Sterne dar. Für die Sternklasse der klassischen Cepheiden, denen als Standardkerzen eine hohe Bedeutung in der Astrophysik zukommt, ist bekannt, dass die Periodendauer einer Drift unterliegt, der sich bei zeitlich hochaufgelösten Messungen nachweisen lässt. Zusätzlich kommt es mitunter zu Sprüngen in der Periodendauer. Sehr alte Messungen können hier, durch die Akkumulation der Drift auch bei begrenzter Qualität der Daten, verwertbare Beiträge liefern. Das Verfahren ist, zum gegenwärtigen Zeitpunkt, jedoch noch nicht mit den verfügbaren Fotoplatten erprobt worden.

Ebenfalls auf möglichst lange Datenreihen angewiesen ist die Vermessung von Doppel- oder

Mehrfachsternsystemen. Hinweise auf solche Systeme können sich aus einer gemeinsamen Eigenbewegung der Sterne ergeben. Sofern die Ausrichtung der Bahnebene eines solchen Systems günstig ist, kann der Versuch unternommen werden, eine Veränderung des Positionswinkels nachzuweisen.

Auch Einzelmessungen mit begrenzter Genauigkeit können hier wiederum zu einer Verbesserung bei der Bestimmung der Umlaufzeit eines solchen Systems beitragen oder ggf. den Doppelsterncharakter überhaupt erst enthüllen. Dafür kommt jedoch lediglich ein sehr kleiner Teil der Doppel- oder Mehrfachsternsysteme in Betracht, so dass es recht unwahrscheinlich ist, eine solche Entdeckung bzw. Messung machen zu können. Aufgrund des erheblichen motivationalen Potentials soll eine solche Suche, trotz der niedrigen Erfolgswahrscheinlichkeit, dennoch angegangen werden.

4. Begleitforschung

Wie bereits in Abschnitt 1.3 dargestellt, liegen allgemeine Nutzungsstatistiken vor. Bislang weitgehend unbekannt sind jedoch die konkrete Art der Nutzung der Aktivitäten (oder der Beobachtungsmöglichkeiten im Allgemeinen) im Unterricht sowie die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Lernenden. Im Rahmen des aktuellen Projekts soll auch an der Schließung dieser Lücken gearbeitet werden. So ist z. B. angedacht, die empfundene Authentizität der bereitgestellten Lernumgebung auf Seiten der Lernenden zu messen. So ist gut bekannt, dass beispielsweise das bereitgestellte Material, der Ort der Durchführung und die verwendeten Methoden einen Einfluss auf dieses individuelle Empfinden haben. Weiterhin ist bekannt, dass dieses Authentizitätsempfinden wiederum u. a. die Motivation und situationale Interesse beeinflusst. [10]

Im Hinblick auf die Lernumgebungen, die in Verbindung mit dem Stellarium Gernergrat angeboten werden, soll nun dieses Authentizitätsempfinden untersucht werden. Es darf angenommen werden, dass dieses bei der unmittelbaren Arbeit mit einem Teleskop hoch ist. Bislang unbekannt ist jedoch, welche Auswirkungen auf das Authentizitätsempfinden die zunehmende Trennung vom eigentlichen Instrument hat, wie sie bei remote ausgeführten Beobachtungen (d. h. einer Beobachtung, die praktisch mittels einer Fernbedienung des Instruments durchgeführt wird) auftritt. Die robotische Beobachtung, wie sie aus Effizienzgründen mittlerweile bei praktisch allen für pädagogische Zwecke verfügbaren Instrumenten praktiziert wird, erscheint zunächst nochmals weniger geeignet, bei Lernenden ein hohes Maß an gefühlter Authentizität zu hinterlassen. Nochmals weiter gedacht stellt sich die gleiche Frage beim Umgang mit astronomischen Beobachtungen aus Datenbanken (sei es internen Bildarchiven eines konkreten Teleskops oder bei öffentlichen Datenbanken). Da genau diese Arbeitsweisen – sowohl die robotisch ausgeführte Beobachtung wie auch der starke Rückgriff auf

archivierte Beobachtungen – in der modernen Astronomie und Astrophysik ein essentieller Bestandteil der Arbeitsweise sind, könnte sich an dieser Stelle eine Diskrepanz zwischen der Vermittlung von Aspekten von Nature of Science und motivationalen Aspekten der jeweiligen Aktivitäten ergeben.

5. Fazit

Mit dem aktuellen Projekt zum Ausbau der Angebote des Stellarium Gernergrat werden zusätzliche Inhalte und neuartige Zugangsweisen zur astronomischen Forschung in die Aktivitäten eingebunden. Dies betrifft vorrangig die Nutzung von historischem Material. Neben den inhaltlichen Aspekten, wie der Untersuchung der Sternfarben, der Eigenbewegungen und der Doppel- und Mehrfachsternsystemen, ist in der verstärkten Integration von Nature of Science Aspekten eine bedeutsame Weiterentwicklung zu sehen.

Mit der, parallel zur Entwicklung neuer Aktivitäten durchzuführenden, Begleitforschung wird es zukünftig möglich sein, über reine Nutzungsstatistiken hinaus Einblick in die reale Verwendung der Materialien und Beobachtungsmöglichkeiten im Unterricht und deren Wirkung auf die Lernenden zu erfassen und damit gezielte Schwerpunkte für die weitere Entwicklung zu setzen.

6. Literatur

- [1] Hohmann, S., Gschwind, S., Müller, A., Nordine, J. & Riesen, T. (2021). Das Stellarium Gernergrat. PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung.
- [2] Stellarium Gernergrat. <https://stellarium-gernergrat.ch/>
- [3] Riesen, T.-E., Gschwind, S., Müller, A., Ruffieux, S., Weder, J., Frey, J., Missura, M., Summermatter, H., Schlatter, P., Franz, M., Hohmann, S., Schildknecht, T., Susanne, W. & Alibert, Y. (2022). Stellarium Gernergrat. In International Foundation HFSJG (Hrsg.), Activity Report. https://www.hfsjg.ch/reports/2022/pdf/202_GG_CSH_Riesen_cf.pdf
- [4] Riesen, T.-E., Alibert, Y., Ekstrom, S., Frey, J., Gschwind, S., Hohmann, S., Kraus, S., Missura, M., Müller, A., Pepe, F. A., Picon, J.-D., Ruffieux, S., Schildknecht, T., Schlatter, P., Schwarz, O., Summermatter, H., Susanne, W. & Weder, J. (2023). Stellarium Gernergrat. In International Foundation HFSJG (Hrsg.), Activity Report. https://www.hfsjg.ch/reports/2023/pdf/202_GG_CSH_Riesen_cf_neu.pdf
- [5] Neuhäuser, R., Torres, G., Mugrauer, M., Neuhäuser, D. L., Chapman, J., Luge, D. & Cosci, M. (2022). Colour evolution of Betelgeuse and Antares over two millennia, derived from historical records, as a new constraint on mass and age. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 516(1), 693–719. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac1969>
- [6] Humboldt, A. von. (1850). Kosmos (Bd. 3). J. G. Cotta.
- [7] Mädler, J. H. von. (1861). Der Wunderbau des Weltalls, oder Populäre Astronomie: Nebst einem Atlas.
- [8] Schwarz, O. (2013). Das HRD - Erkundungen im Unterricht. Astronomie + Raumfahrt im Unterricht, 50; Jg. 2013(3/4), 6–12.
- [9] Yardley, J., Lowe, S., Gomez, E., Gomez, H. & North, C. (o. D.). Star in a Box. <https://starinabox.lco.global/>
- [10] Betz, A., Flake, S., Mierwald, M. & Vanderbeke, M. (2016). Modelling authenticity in teaching and learning contexts. A contribution to theory development and empirical investigation of the construct. In C.-K. Looi, J. Polman, U. Cress & P. Reimann (Hrsg.), Transforming Learning, Empowering Learners: The International Conference of the Learning Sciences (ICLS) (S. 815–818).

Danksagung

Die Verfasser danken der Wilfried und Ingrid Kuhn-Stiftung für die großzügige Unterstützung, ohne die der hier Ausbau des didaktischen Begleitmaterials nicht möglich wäre.

Students Learn to Derive the Energy Density of Volume

Hans-Otto Carmesin*

*¹Gymnasium Athenaeum, Harsefelder Straße 40, 21680 Stade

²Studienseminar Stade, Bahnhofstr. 5, 21682 Stade

³Universität Bremen, Fachbereich 1, Postfach 330440, 28334 Bremen
hans-otto.carmesin@t-online.de

Abstract

In everyday life, we are used to the space in which we live. However, physicists need to know or assume properties about that space: Newton (1668) preferred a flat and constant space. Maxwell (1865) proposed that space should be an electromagnetic aether. Einstein (1917) suggested that space would be characterized by a cosmological constant Λ , corresponding to an energy density u_{vol} of space or of volume. Moreover, he provided an equation that determines how u_{vol} is related to the expansion of space since the Big Bang. Based on that relation, Perlmutter et al. (1998) discovered a nonzero observed value $u_{vol,obs}$ of u_{vol} . The derivation of u_{vol} represents an essential and exciting problem about nature and physics. Carmesin (2023a) derived the dynamics of volume in nature, the volume dynamics, VD. They bridge general relativity and quantum physics. In this paper, we use the VD to derive u_{vol} . For that derivation, we provide a learning process, so that you can directly use the concept in your courses. The learning process has been tested in various learning groups, and experiences are reported.

1. Introduction

1.1. On Einstein's idea of Λ

The expansion of space can be derived from general relativity, see Einstein (1917), Friedmann (1922) and Lemaître (1927). Thereby, a uniform scaling of space is derived. In general, such a uniform scaling can be described by the time evolution of a scale radius $r(t)$, see Fig. (1): If space expands by a factor q , then r is multiplied by q . That time evolution can be described by this differential equation, DEQ:

$$\frac{\dot{r}^2}{r^2} = \frac{8\pi G}{3} \cdot (\rho_r + \rho_m + \rho_K + \rho_\Lambda) \quad \{1\}$$

Hereby, G is the universal constant of gravity. Moreover, four densities are distinguished, so that each density has a characteristic scaling behaviour as a function of the scale radius r :

ρ_r is the density of radiation,

ρ_m is the density of matter,

ρ_K is the density of a curvature parameter, it is zero according to observation, see Planck collaboration (2020), and as a result of a proof, see Carmesin (2023c),

ρ_Λ is the density of the cosmological constant, it does not change as a function of the scale radius r .

A present-day value of a quantity is marked by the subscript zero. Next, the densities in Eq. {1} are expressed as functions of the scale radius:

$$\frac{\dot{r}^2}{r^2} = \frac{8\pi G}{3} \cdot \left(\rho_{r,0} \frac{r_0^4}{r^4} + \rho_{m,0} \frac{r_0^3}{r^3} + \rho_\Lambda \right) \quad \{2\}$$

surrounding universe

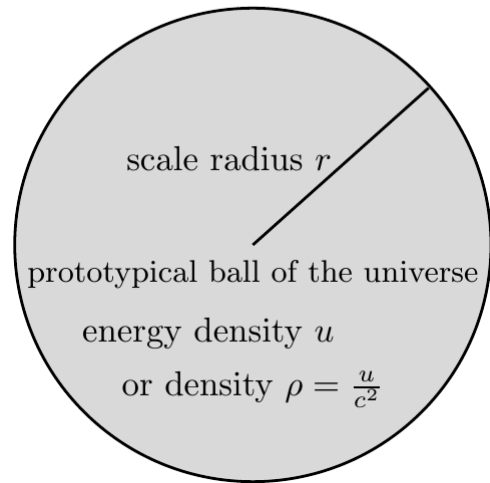


Fig. 1: A prototypical ball of the universe with a scale radius r and an energy density u . The energy density can be expressed in terms of a density or dynamic density $\rho = \frac{u}{c^2}$.

When ρ_Λ becomes essential, r is very large, so that ρ_r becomes very small, so we neglect it in section (1.1). We multiply by r^2 and apply the time derivative:

$$\frac{\partial}{\partial t} \dot{r}^2 = \frac{8\pi G}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_{m,0} \frac{r_0^3}{r} + \rho_\Lambda r^2 \right) \quad \{3\}$$

$$2\dot{r} \ddot{r} = \frac{8\pi G}{3} \left(-\rho_{m,0} \frac{r_0^3}{r^2} + 2\rho_\Lambda r \right) \dot{r} \quad \{4\}$$

In order to obtain a relative acceleration $\frac{\ddot{r}}{r}$, we divide by $2r\dot{r}$:

$$\frac{\ddot{r}}{r} = \frac{8\pi G}{3} \left(-\frac{1}{2} \rho_{m,0} + \rho_\Lambda \right) \quad \{5\}$$

Einstein (1917) had the idea of a static universe: If the ρ_Λ compensates $\frac{1}{2}\rho_m$ in the above DEQ, then r is not accelerated. Thus, if \dot{r} is zero initially, then \dot{r} remains zero and the universe is static.

For this purpose of a possibly static universe, Einstein (1917) proposed the cosmological constant Λ , corresponding to the density $\rho_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{8\pi G}$ and energy density $u_\Lambda = \frac{\Lambda c^4}{8\pi G}$, see e. g. Hobson (2006, section 15.1).

1.2. Epistemology

Kircher, Girwidz und Häußler (2001, section 4.1.2) describe the hypothetic deductive method. In the epistemological literature, this method is also called hypothetico-deductive testing (Niiniluoto, Sintonen, Wolenski 2004, S. 214). The method consists of three steps: In the hypothetic step, a thesis or hypothesis is suggested for testing. In the deductive step, implications are derived. In the third step, the implications are compared with observation. Hereby, in principle, a falsification should be possible. This method is used here as well as in Carmesin (2024a-g, 2017, 2018a-b, 2019a-b, 2020a-c, 2021a-d, 2022a-c, 2023a-f).

1.3. On the observed value Λ_{obs}

As a consequence of Eq. {5}, it was clear how ρ_Λ could be measured: If an observer would measure an accelerated expansion of space, then this could be explained by the dynamic density ρ_Λ . In fact, Perlmutter et al. (1998) discovered the accelerated expansion of the universe.

Meanwhile, many observers confirmed the accelerated expansion of the universe. An especially precise measurement of ρ_Λ has been achieved with help of the cosmic microwave background, CMB, see Planck collaboration (2020). That group applied several evaluation procedures, whereby the so-called temperature-temperature correlation is especially robust and used here:

The Hubble constant H_0 is the present-day value of the Hubble parameter $H = \frac{\dot{r}}{r}$, the observed value is:

$$H_{0,obs} = 66.88 (\pm 0.92) \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}} \quad \text{with} \quad \{6\}$$

$$1 \text{Mpc} = 3.086 \cdot 10^{19} \text{ km}, \quad \text{thus,}$$

$$H_{0,obs} = 2.167 (\pm 0.03) \cdot 10^{-18} \frac{1}{\text{s}} \quad \{6\}$$

With it, the so-called critical density is as follows:

$$\rho_{cr.} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} = 8.4 \cdot 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \{7\}$$

The density divided by the critical density is the density parameter, $\Omega_\Lambda = \frac{\rho_\Lambda}{\rho_{cr}}$. Its observed value is:

$$\Omega_{\Lambda,obs} = 0.679 (\pm 0.013) \quad \{8\}$$

Note that this density parameter means that 67.9 % of all energy and matter in the universe is the energy of ρ_Λ , the so-called dark energy, see Huterer (1999), Planck collaboration (2020), Workman et al. (2022).

Thus, the observed value of ρ_Λ is:

$$\rho_{\Lambda,obs} = \Omega_{\Lambda,obs} \cdot \rho_{cr.} = 5.704 (\pm 0.27) \cdot 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \{9\}$$

1.4. On the formation of volume in nature

The energy density $u_\Lambda = c^2 \cdot \rho_\Lambda$ includes all physical energy densities that do not change as a function of the scale radius or of the cosmological redshift, see Eq. {2}. The energy density of volume in nature, $u_{vol} = c^2 \cdot \rho_{vol}$, does not change as a function of the scale radius. Accordingly, u_{vol} is analysed next:

When the space expands, then a global formation of volume, GFV, takes place.

This is caused by a local formation of volume, LFV.

We will analyse this process of LFV causing GFV, and we will derive the energy density u_{vol} from that process.

For it, we will use the dynamics of volume in nature, the volume dynamics, VD, see Carmesin (2024a, 2023a, 2021a).

As a first test of that VD, the VD provides the curvature of space in the vicinity of a mass, see Fig. (2).

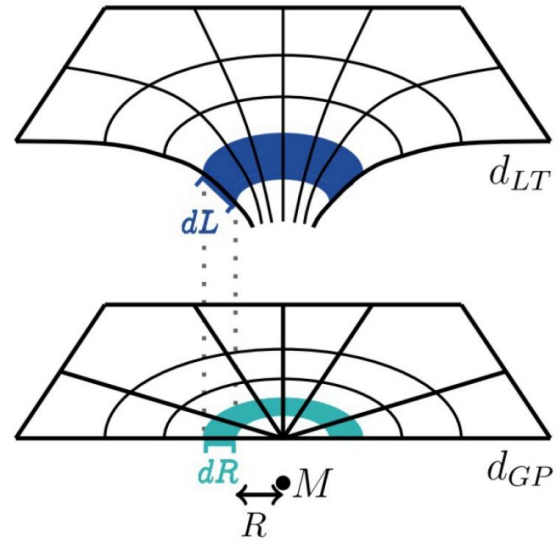


Fig. 2: In the vicinity of a mass M or effective mass M_{eff} , the radial increment dL of the light travel distance d_{LT} is increased with respect to the original increment dR that would occur in the limit M to zero. This increment dR is called gravitational parallax distance d_{GP} , see Carmesin (2023a).

1.5. Organization of the paper

A didactic analysis including a professional analysis is provided in section 2. The learning process including experiences with learning groups are shown in part 3. We discuss our findings in section 4. Of course, there are additional questions about u_Λ that are not treated in this paper. Many of these additional questions are clarified in my parallel papers in the report about the DPG conference in March 2024 in Greifswald, see Carmesin (2024a-g).

2. Didactic analysis

2.1. On LFV

2.1.1. Physical analysis

The dynamics of volume in nature have been derived directly from evident properties of volume, this is presented in a parallel paper in this report about the DPG conference in March 2024 in Greifswald, see Carmesin (2024a). Moreover, it has been derived with help of selected results of general relativity, see Carmesin (2023a, 2021a).

For the present purpose, the local formation of volume is essential, see Carmesin (2023a) or Carmesin (2024a, f):

For it, the normalized rate $\dot{\epsilon}_L$ of locally formed volume is defined:

If the increment of additional volume δV forms during an increment of time $\delta \tau$ in an increment dV_L of volume, then that volume forms at the following normalized rate $\dot{\epsilon}_L$:

$$\dot{\epsilon}_L = \frac{\delta V}{\delta \tau \cdot dV_L} \quad \{10\}$$

With it, the law of locally formed volume is presented:

At a gravitational field $|\vec{G}^*|$, there occurs locally formed volume, LFV, at the following normalized rate:

$$\dot{\epsilon}_L = \frac{|\vec{G}^*|}{c} \quad \{11\}$$

Thereby, a mass M causes the following gravitational field at a d_{GP} based distance R :

$$\vec{G}^*(R) = -\frac{GM}{R^2} \cdot \vec{e}_L \quad \{12\}$$

Hereby, \vec{e}_L is the direction vector in the radial direction.

In the present investigation, the space is globally flat, so that the above Eqs. {11} and {12} hold in an exact manner. For approximate and exact relations in curved space, see Carmesin (2023a, 2024a).

2.1.2. Didactic analysis

In a first didactic step, the relations {10} to {12} are introduced and exercises are performed. A possible derivation is presented in Carmesin (2024a). This step has no special learning barrier, as only the application of the relations is required.

2.2. Introduction of the process of GFV by LFV

2.2.1. Physical analysis

(1) That process is analysed in an especially ideal case, in a universe that consists of volume only.

(2) At a location R_0 , a region with the size of a probe volume dV_0 is marked, see Fig. (3). Thereby, the location R_0 and the size dV_0 of the region can be chosen arbitrarily. Hereby, the location R_0 and the region are constant or fixed during the whole process.

(3) During the time t_0 since the Big Bang until now, the present volume of the universe forms. In particular, in that region, the amount dV_0 of volume forms during t_0 .

(4) The formation of the volume in that region is caused by all dynamic masses dM_j of the volume in the universe.

(5) As a consequence, we will add or integrate all increments of LFV that are caused in the marked region by all dynamic masses dM_j in the universe. Remind that these consist of volume only.

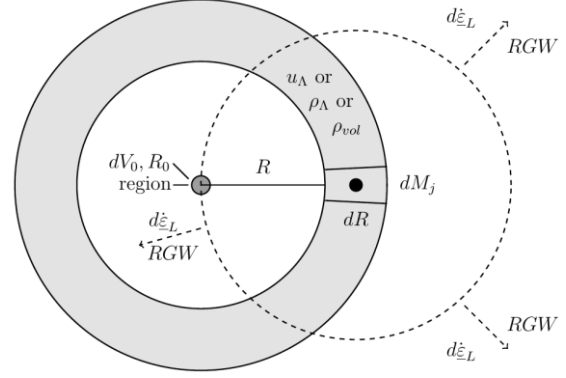


Fig. 3: A dynamic mass dM_j at a distance R from the analysed region (dark grey) with the size dV_0 causes LFV. It propagates in all directions in terms of RGWs, see Carmesin (2023a, 2024a). At a distance R , the mass dM_j causes LFV at a rate $d\dot{\epsilon}_L$.

2.2.2. Didactic analysis

In a first didactic step, the elements (1) to (4) of the process of GFV by LFV are introduced with help of Fig. (3). This step has no special learning barrier, as the four elements describe a clear process of formation and propagation of volume according to Eqs. {10} to {12}.

In a second didactic step, the plan (5) is developed. This step has no special learning barrier for students familiar with analysis. The reason is that the adding or integrating is planned for all increments of volume that form in the marked region. That is a clear analytic and arithmetic procedure.

2.3. Integrating the increments of the process of GFV by LFV

2.3.1. Physical analysis

(1) The dynamic masses dM_j in a shell with centre at R_0 , radius R and thickness dR are analysed, see Fig. (3). For each infinitesimal increment dR , the volume of that shell is the product of the surface $4\pi R^2$ and the thickness dR :

$$dV = 4\pi R^2 \cdot dR \quad \{13\}$$

The dynamic mass dM in that shell is equal to the product of the volume and the density:

$$dM = dV \cdot \rho_\Lambda = 4\pi R^2 \cdot \rho_\Lambda \cdot dR \quad \{14\}$$

That mass causes the following rate in the marked region, see Eqs. {11} and {12}:

$$d\dot{\epsilon}_L = \frac{G \cdot dM}{R^2 c} = \frac{G \cdot 4\pi R^2 \cdot \rho_\Lambda \cdot dR}{R^2 c} = \frac{G \cdot 4\pi \cdot \rho_\Lambda \cdot dR}{c} \quad \{15\}$$

(2) We realize that the normalized rate $d\dot{\epsilon}_L$ does not depend on the value of the radius of the shell. Thus, the integration is not complicated.

(3) As the process is introduced by the time from the Big Bang until the present-day, we substitute $dR = c \cdot dt$, since the RGWs propagate with the velocity c :

$$d\dot{\epsilon}_L = 4\pi G \rho_\Lambda dt \quad \{16\}$$

(4) The integration ranges from $t = 0$ to $t = t_0$. Thus, the integration yields the following normalized rate $\dot{\epsilon}_L$ arriving at the marked region during the time interval $[0, t_0]$:

$$\dot{\epsilon}_L([0, t_0]) = 4\pi G \rho_\Lambda \int_0^{t_0} dt = 4\pi G \rho_\Lambda t_0 \quad \{17\}$$

(5) The present-day time t_0 is essentially the same as the Hubble time $t_{H_0} = \frac{1}{H_0}$, see e. g. Hobson (2006), Carmesin (2019a):

$$\dot{\epsilon}_L([0, t_0]) = 4\pi G \rho_\Lambda \frac{1}{H_0} \quad \{18\}$$

2.3.2. Didactic analysis

In a first didactic step (1), the shell is analysed in Eqs. {13} to {15}. This step has no special learning barrier.

In a second didactic step, the integral is introduced and evaluated in Eqs. {16} to {18}. This step has no special mathematical learning barrier for learners familiar with analysis. However, that step has a mental learning barrier for learners that think the universe was small at the Big Bang. This mental barrier is clarified by the fact that the universe has already been infinite at the Big Bang, as the universe is globally flat, see Planck collaboration (2020) or Carmesin (2023c).

2.4. Integrating the increments of the process of GFV by LFV

2.4.1. Physical analysis

(1) The definition of the normalized rate (see Eq. {10}) is applied to the integrated rate in Eq. {18}:

$$\dot{\epsilon}_L([0, t_0]) = \frac{\delta V}{\delta r \cdot dV_L} = 4\pi G \rho_\Lambda \frac{1}{H_0} \quad \{19\}$$

According to the process in section (2.2), we analyse the formation of volume in the marked region with the size dV_0 . Consequently, the volume dV_L in the above Eq. is equal to dV_0 .

Moreover, in that process, the formed volume δV in the above Eq. is equal to the size dV_0 of the marked region.

Furthermore, the process takes place during the time from the Big Bang until the present-day time t_0 or $t_{H_0} = \frac{1}{H_0}$.

These three relations are inserted in the above Eq. {19}:

$$\dot{\epsilon}_L([0, t_0]) = \frac{H_0 \cdot dV_0}{dV_0} = H_0 = 4\pi G \rho_\Lambda \frac{1}{H_0} \quad \{20\}$$

The above Eq. is solved for ρ_Λ . The derived value is the theoretical value and marked by the subscript theo:

$$\rho_{\Lambda, \text{theo}} = \frac{H_0^2}{4\pi G} \quad \text{and} \quad u_{\Lambda, \text{theo}} = \frac{c^2 H_0^2}{4\pi G} \quad \{21\}$$

This density describes the value of ρ_Λ that is derived by the process of GFV by LFV. It is tested by comparison with observed values next:

(2) The observed value $H_{0, \text{obs}}$ in Eq. {6} is inserted:

$$\rho_{\Lambda, \text{theo}} = \frac{H_0^2}{4\pi G} = 5.600 (\pm 0.155) \cdot 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \{22\}$$

Consequently, the above derived result is in precise accordance with the observed value $\rho_{\Lambda, \text{obs}} = 5.704 (\pm 0.27) \cdot 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ in Eq. {9}, within the error of measurement.

2.4.2. Didactic analysis

In a first didactic step (1), the conditions of the process of GFV by LFV is applied to the rate in Eq. {18}. The resulting Eq. is solved for the density ρ_Λ in Eq. {21}. This step has no special learning barrier.

2.5. Interpretation of the process of GFV by LFV in a universe consisting of volume only

2.5.1. Physical analysis

(1) The analysed universe consists of volume only. Moreover, it is globally flat, see Planck collaboration (2020) or Carmesin (2023c). Thus, that universe is infinite all time, and the density is the same all time. As a consequence, the derived density of volume $\rho_{\Lambda, \text{theo}}$ is the same all time:

$$\rho_{\Lambda, \text{theo}} = \text{constant} \quad \{23\}$$

(2) Einstein (1917) defined the density ρ_Λ of the cosmological constant Λ indirectly by the rate of the expansion of the universe, see Eq. {1}. In that definition, ρ_Λ subsumes all physical densities that do not change as a function of the scale radius, see Eq. {2}. The theoretical value derived here consists of volume only, by construction of the process of GFV by LFV in section (2.2). Accordingly, the derived density is definitely the density of volume, without any conceivable additional component that is independent of the scale radius:

$$\rho_{\Lambda, \text{theo}} = \rho_{\text{vol}, \text{theo}} \quad \{24\}$$

(3) If the process of GFV by LFV is used at any time t_1 of the universe, different from the present-day time t_0 , than Eq. {17} changes to the following Eq.:

$$\dot{\epsilon}_L([0, t_1]) = 4\pi G \cdot \rho_{\text{vol}, \text{theo}} \int_0^{t_1} dt = 4\pi G \cdot \rho_{\text{vol}, \text{theo}} \cdot t_1 \quad \{25\}$$

In particular, the ratio of the rate and the time is a constant, as ρ_Λ is constant in the process of GFV by LFV:

$$\frac{\dot{\epsilon}_L([0, t_1])}{t_1} = \frac{\dot{\epsilon}_L([0, t_0])}{t_0} = 4\pi G \rho_{\text{vol}, \text{theo}} = \text{constant} \quad \{26\}$$

The results are summarized:

Theorem: Law of the derived energy density of volume in an empty universe.

In a universe consisting of volume only, the process of GFV from LFV causes the following energy density of volume:

$$u_{\Lambda, \text{theo}} = \frac{c^2 H_0^2}{4\pi G} = u_{\text{vol}}, \quad \text{thus}, \quad \{26\}$$

$$\rho_{\Lambda, \text{theo}} = \frac{H_0^2}{4\pi G} = 5.600 (\pm 0.155) \cdot 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \{27\}$$

The density is a consequence of the process of formation of volume since the Big Bang until the present-day time t_0 .

If that process ranges from the Big Bang to another time $t_1 \neq t_0$, then that process provides the same density of volume.

This result is in precise accordance with observation.

2.5.2. Didactic analysis

In a first didactic step (1), it is realized that the derived density $\rho_{\Lambda, \text{theo}}$ is constant, as there is no change of the physical conditions in the process of GFV by LFV in a universe consisting of volume only. This step has no special learning barrier.

In a second didactic step (2), it is realized that the derived density $\rho_{\Lambda, \text{theo}}$ describes the density of volume, as there is no other component in a universe consisting of volume only. This step has no special learning barrier.

In a third didactic step (3), it is realized that the derived density $\rho_{\Lambda, \text{theo}}$ is the same for all times t_1 in which the process of GFV by LFV is analysed. This step has no special learning barrier, as Eq. {26} is derived in a straight forward manner. Of course, nobody can directly measure the rate H_1 at another time t_1 after the Big Bang.

2.5.3. Experience: learning process and learners

The experiences with learning groups have been documented in terms of photographs of the blackboard and with help of additional reports. These are summarized as follows.

Since 2021, see Carmesin (2021a), the topic has been presented in five general studies courses at the university. The learning process was enriched by a permanent discussion of the achieved results and by exercises about the derived relations. In particular, the learning process took place as follows:

The law of locally formed volume has been treated in advance. The learning process of the process of GFV by LFV takes 90 minutes. This includes the derivation of $\rho_{\Lambda, \text{theo}}$ and Eqs. {21} to {25}, the exercises and discussion.

A quantum gravity group of a research club meets 90 minutes each week. Thereby topics such as quantum computers, cosmology, astrophysics or quantum gravity are treated. In that group, essentially the same learning process has been treated in four courses since 2021. Also in this case, all questions have been discussed directly, and exercises have been performed.

Altogether, in all nine learning groups, the learners asked questions. These have been discussed directly in a fully sufficient manner. Moreover, exercises have been used in order to achieve sufficient training, metacognitive activity and familiarity with the new concepts. In some of the exercises, the students were

instructed so that they were able to achieve parts of the derivations on their own. This is an efficient test of the ability of the students, and it provides self-esteem to the students in a convincing manner.

3. Discussion

Space is an ubiquitous entity of everyday life. Moreover, it is essential in physics, see e. g. Newton (1668) or Maxwell (1865). Einstein (1917) proposed that space has a cosmological constant Λ . It corresponds to an energy density u_Λ of space. The corresponding energy is called dark energy, see e. g. Workman et al. (2022). Observation shows that the dark energy amounts to more than 67 % of the whole energy of the universe, including matter, see Planck collaboration (2020). Thus, the question arises what properties this enormous amount of energy has.

For it, we analyse the process of global formation of volume, GFV, by local formation of volume, LFV. In particular, we analyse the ideal case of a universe consisting of volume only. As a result, we derive a formula $u_{\Lambda, \text{theo}} = \frac{c^2 H_0^2}{4\pi G}$. It is in precise accordance with observation. This fact provides convincing additional evidence for the used law of local formation of volume, which is derived from evident properties of volume, see Carmesin (2024a, f).

Moreover, the formation of volume in a universe with volume, radiation and matter has been investigated additionally, and it provides the solution of the Hubble tension, see Carmesin (2021a-b, 2023a, e, 2024d).

Altogether, we show how the volume of the universe forms in a permanent process. That process is an example of the more general dynamics of volume in nature, the volume dynamics, VD. That VD provide quantum physics and general relativity as special cases and solve many problems of physics beyond quantum physics and general relativity, see Carmesin (2021a, 2023a, e, 2024a-g).

The learning process is based on the hypothetic deductive method, see the section about the epistemology. Such a testing of a hypothesis and such a deduction from prior knowledge have a high learning efficiency, see Hattie (2006). Moreover, the learning process uses everyday life contexts, so that the learning is meaningful, see Muckenfuß (1995) and achieves an additional high learning efficiency, see Hattie (2006). In the particular case, applications to quantum cryptography and quantum computing are very motivating. For more interesting examples, see Carmesin (2020c).

The learning process of the process of GFV by LFV has been tested in nine learning groups. The learning process takes 90 minutes at university courses as well as in research club courses. In all these learning groups, the students were able to perform exercises and to use instructions in order to derive parts of the theory. Thus, the topic provides a large amount of self-esteem to the learners.

4. Literature

- Burisch, C. et al. (2022). *Universum Physik Gesamtband SII*. Berlin: Cornelsen Verlag.
- Carmesin, Hans-Otto (2017a). *Vom Big Bang bis heute mit Gravitation: Model for the Dynamics of Space*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2017b). *Schülerinnen und Schüler entdecken Gravitationswellen mithilfe von Computereperimenten*. *PhyDid B*, pp 11-18.
- Carmesin, Hans-Otto (2018a). *Entstehung dunkler Energie durch Quantengravitation - Universal Model for the Dynamics of Space, Dark Matter and Dark Energy*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2018b). *Entstehung der Raumzeit durch Quantengravitation - Theory for the Emergence of Space, Dark Matter, Dark Energy and Space-Time*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2019a). *Die Grundschwingungen des Universums - The Cosmic Unification - With 8 Fundamental Solutions based on G, c and h*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2019b). *A Novel Equivalence Principle for Quantum Gravity*. *PhyDid B*, pp 1-9.
- Carmesin, Hans-Otto (2020a). *The Universe Developing from Zero-Point Energy: Discovered by Making Photos, Experiments and Calculations*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2020b). *Explanation of the Rapid Enlargement of Distances in the Early Universe*. *PhyDid B*, pp 9-17.
- Carmesin, Hans-Otto et al. (2020): *Universum Physik, Qualifikationsphase, Niedersachsen*. Berlin: Cornelsen Verlag.
- Carmesin, Hans-Otto (2021a). *Quanta of Spacetime Explain Observations, Dark Energy, Graviton and Nonlocality*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2021b). *Cosmological and Elementary Particles Explained by Quantum Gravity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2021c). *The Elementary Charge Explained by Quantum Gravity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2021d). *Lernende erkunden die Raumzeit*. *Der Mathematikunterricht*. 67(2), 47-56.
- Carmesin, Hans-Otto (2022a). *Quantum Physics Explained by Gravity and Relativity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2022b). *Explanation of Quantum Physics by Gravity and Relativity*. *PhyDid B*, pp 425-438.
- Carmesin, Hans-Otto (2022c). *How Excitations of Vacuum Form Matter*. *PhyDid B*, pp 447-458.
- Carmesin, Hans-Otto (2022d). *The Electroweak Interaction Explained by and Derived from Gravity and Relativity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2023a). *Geometric and Exact Unification of Spacetime, Gravity and Quanta*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2023b). *{ Students Exactly Derive Quantization and its Universality*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2023c). *{ Students Derive an Exact Solution of the Flatness Problem*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2023d) *Fundamental Solution to the Cosmological Constant Problem*. *Results in Physic*. Preprint.
- Carmesin, Hans-Otto (2023e) *Derivation of Dark Energy and of the Source of the Hubble Tension*. *MNRAS*. Preprint.
- Carmesin, Hans-Otto (2024a). *Students Learn the Fundamental Exact Unification of Gravity, Relativity, Quanta and Elementary Charge*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024b). *Students Learn to Derive Universal Properties of Gravitons*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024c). *Students Learn to Derive the Energy Density of Volume*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024d). *Students Analyse the Impact of the H_0 Tension on the Worldview*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024e). *Students Learn to Derive Nonlocality from Fundamental Physics*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024f). *Students Learn to Solve the Cosmological Constant Problem*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024g). *How Volume Portions Form and Found Light, Gravity and Quanta*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Einstein, Albert (1917). *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*. *Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften*, pp 142-152.
- Friedmann, Albert (1915). *Die Feldgleichungen der Gravitation*. *Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften*, pp 844-847.
- Hattie, John (2009). *Visible Learning*. London: Taylor and Francis Ltd.
- Hobson, M. P. and Efstathiou, G. P. and Lasenby, A. N. (2006) *General Relativity*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Huterer, Dragan and Turner, Michael, S. (1999). *Prospects for probing the dark energy via supernova distance measurements*. *Phys. Rev. D*, 60, pp 081301-081306.
- Kircher, Ernst and Girwidz, Raimund and Häußler, Peter (2001) *Physikdidaktik*. 2. Ed. Berlin: Springer.
- Lemaitre, Albert (1915). *Die Feldgleichungen der Gravitation*. *Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften*, pp 844-847.
- Maxwell, James Clerk (1865) *A dynamical theory of the electromagnetic field*. *Phil. Trans. of the R.I Soc. London*, 155, pp 459-512.
- Muckenfuß, Heinz (1995). *Lernen im sinnstiftenden Kontext*. Berlin: Cornelsen

Newton, Isaac (1686) *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. London: Jussu Societatis Regiae ac typis Josephi Streater.

Niiniluoto, Ilkka and Sintonen, Matti and Wolenski, Jan (2004) *Handbook of Epistemology*. Dordrecht: Springer.

Perlmutter, Saul et al. (1998) Discovery of a Supernova Explosion at Half the Age of the Universe. *Nature*, 391, pp 51-54.

Planck-Collaboration (2020) Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, pp 1-73.

Workman, R. L. et al. (2022) Review of Particle Physics (by Particle Data Group). *Prog. Theor. Exp. Phys.*, pp 1-2270.

Acknowledgement

I am very grateful to I. Carmesin for many interesting discussions and for proofreading the manuscript. I am also grateful to Matthias Carmesin for interesting discussions.

Digitale Übungsaufgaben zur Lehre von mathematischen Methoden in physikgeprägten Studiengängen

Jonas Gleichmann*, Hans Kubitschke*, Jörg Schnauß*

*Universität Leipzig, Institut für Didaktik der Physik, Vor dem Hospitalore 1, 04317 Leipzig
Jonas.gleichmann@physik.uni-leipzig.de

Kurzfassung

Studierende in physikgeprägten Studiengängen benötigen ein gewisses Maß an mathematischen Fähigkeiten und Fertigkeiten, um physikalische Probleme lösen zu können. Diese algorithmischen Methoden der Mathematik werden meist in einem Modul in den ersten beiden Semestern gelehrt, wobei ein wesentlicher Teil des Lernprozesses durch die Abgabe von Übungsaufgaben realisiert wird. Wir möchten einen Ansatz vorstellen, wie diese Aufgaben digital im STACK-Format gestellt werden können. Mithilfe eines Computer-Algebra-Systems werden in den Aufgaben Variablen randomisiert, wodurch die Studierenden individuelle Aufgaben erhalten, welche auch wiederholt werden können. Gleichzeitig reduziert sich der Korrekturaufwand für die Lehrenden, da STACK die Aufgaben automatisch überprüft, bewertet und den Studierenden ein schnelles und individuelles Feedback gibt. Die freigewordenen Kapazitäten durch verringerten Korrekturaufwand können so für individuellere Betreuung genutzt werden. Nach dem mehrmaligen Einsatz in einem Modul möchten wir über erste Befragungsergebnisse berichten.

1. Einleitung

Nicht erst durch die Corona-Pandemie ist E-Assessment in der Hochschullehre immer mehr in den Fokus gerückt. Dies beginnt bereits mit diagnostischen Tests als Hilfsmittel zur Wahl des passenden Studiengangs. Immer mehr findet E-Assessment auch Anwendung als Form der summativen und formativen Bewertung. Dabei gibt es mittlerweile eine große Auswahl an Angeboten von Tools und digitalen Bewertungsmöglichkeiten, welche über das bloße Ausfüllen von Freitextfeldern oder das Ankreuzen von Multiple-Choice-Fragen hinausgehen.

Das von Chris Sangwin entwickelte Plugin STACK (System for Teaching and Assessment using Computer algebra Kernel) ist ein kostenfreies Tool für E-Assessment auf den Lernmanagementsystemen Moodle und Ilias (Sangwin, 2013). Das Plugin ermöglicht die Erstellung von digitalen Aufgaben für summative oder auch formative Bewertung primär in MINT-Studiengängen. Durch das dahinterstehende Computer-Algebra-System wird insbesondere die Randomisierung von STACK-Aufgaben ermöglicht (Sangwin, 2013). Dies führt dazu, dass eine erstellte Aufgabe bei mehrmaliger Lösung jeweils unterschiedliche Funktionen, Werte oder dergleichen enthält. So bleibt das der Aufgabe zugrundeliegende Konzept stets gleich und durch geeignete Randomisierung auch in einem äquivalenten Anforderungsbereich.

In Abbildung 1 ist eine Variante einer grundständigen STACK-Aufgabe beispielhaft dargestellt. Die Erläuterung, wie diese Aufgabe entstanden ist und wie die Randomisierung funktioniert, ist im 2. Kapitel des Artikels näher erläutert. Darüber hinaus kann STACK die Musterlösung auf algebraische Äquivalenz mit

den Antworten vergleichen und so beispielsweise verschiedene trigonometrische Lösungen korrekt bewerten. Im Bereich der Naturwissenschaften ist es in STACK möglich Einheiten miteinzugeben und so auch Fehler in der Dimensionierung der Ergebnisse zu erfassen bzw. rückzumelden.

Bestimmen Sie Real- und Imaginärteil der Komplexen Zahl $z^2 + 10$ mit $z = 4 - 4 \cdot i$.

Re($z^2 + 10$)=

Im($z^2 + 10$)=

Abb. 1: Beispiel für eine STACK-Aufgabe zur Bestimmung von Real- und Imaginärteil einer komplexen Zahl. Die komplexe Zahl ist dabei randomisiert, wodurch bei einer erneuten Bearbeitung eine andere Aufgabe gelöst werden muss.

Neben der Randomisierung ermöglicht STACK auch ein individuelles Feedback für die Studierenden, welches insbesondere beim selbstständigen Lernen von Bedeutung ist (Derr et al., 2017) und auch nach Hattie einen positiven Einfluss auf den Lernprozess besitzt (Hattie, 2009). Das Feedback zu einer Aufgabe muss vorher bei der Erstellung festgelegt werden und kann dabei häufige Fehlvorstellungen oder auch typische Fehler adressieren.

Gegenüber analogen Aufgaben ergeben sich so andere Gestaltungsmöglichkeiten. Zwar sind auch individuelles Feedback oder Randomisierung, anhand beispielsweise der Matrikelnummer, möglich, jedoch gehen diese beiden Punkte mit einem deutlich erhöhten Korrektur- und damit auch Personalbedarf einher.

Bei STACK-Aufgaben skaliert die Nutzungszahl nicht mit dem Aufwand.

Aus Sicht der Dozierenden als Aufgabensteller sind die Ergebnisse der Bewertung in Moodle tabellarisch leicht einsehbar. So können gemäß dem Just-in-time-Teaching-Konzept Lehrveranstaltungsinhalte an die Bedürfnisse der Studierenden angepasst werden (Novak et al., 1999). Bei einer analogen Abgabe von Aufgaben wäre dies durch die verzögerte Korrektur der Aufgaben meistens erst viel später möglich.

Aus den aufgelisteten Funktionen von STACK-Aufgaben ergeben sich eine Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten in der MINT-Hochschullehre, über welche Mai et al. (2021) einen Überblick bieten.

2. Erstellung von STACK-Aufgaben

Im Folgenden soll an einem einfachen Beispiel gezeigt werden, wie eine STACK-Aufgabe in Moodle erstellt wird. Bei dem Beispiel soll es um die Bestimmung des Real- und Imaginärteils einer komplexen Zahl gehen. Eine Variante der fertigen Aufgabe ist in Abbildung 1 dargestellt.

Im ersten Schritt werden die zu der Aufgabe gehörigen Variablen definiert und anschließend mögliche Zwischenschritte, Bedingungen und auch die Lösung festgelegt (Abb. 2 a)). Durch die Definition der Variablen wird die spätere Randomisierung der Aufgabe ermöglicht. STACK basiert dabei auf Maxima als Computer-Algebra-System. Anschließend wird der Aufgabentext, welchen die Studierenden am Ende angezeigt bekommen, formuliert. Im letzten Schritt wird der Rückmeldebaum oder auch Potential-Response-Tree (PRT) erstellt (Abb. 2 b)). Dieser ist für die Bewertung als auch das Feedback zur Aufgabe verantwortlich. Je nach Komplexität des PRTs kann dabei zwischen einer einfachen Rückmeldung der Richtigkeit oder aber einer Bewertung von Folgefehlern und einem detaillierten Feedback mit Hinweisen differenziert werden. Im Falle der Beispielaufgabe zu den komplexen Zahlen zielt das Feedback auf häufige Fehler beim Imaginärteil ab.

STACK verfügt über eine internationale, aktive Community, wodurch es zu einer stetigen Weiterentwicklung des Tools kommt. Dadurch existieren diverse Foren und auch Materialien, welche bei der Erstellung von, im speziellen sehr komplexen, STACK-Aufgaben helfen können. Darüber hinaus sind sowohl im deutschen als auch englischsprachigen Raum mehrere Aufgabenpools zu mathematischen Themen vorhanden.

3. Einsatz von STACK-Aufgaben

3.1. Das Projekt PhySTACK

Seit über drei Jahren werden STACK-Aufgaben an der Universität Leipzig im Fachbereich Physik eingesetzt. Im Projekt PhySTACK werden immer wieder neue STACK-Aufgaben für mathematische und physikalische Themen entwickelt. Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines qualitativ hochwertigen

```
a) /*Erstellen zufälliger Zahlen*/
x: rand_with_prohib(-10,10,[0]);
y: rand_with_prohib(-10,10,[0]);
a: rand_with_prohib(-10,10,[0]);
/*Erstellen der komplexen Zahl*/
z: x + ((%i)*y);
z1: z^2+a;
/*Erstellen der Lösungen*/
loes1:realpart(z1);
loes2:imagpart(z1);
/*Erstellen von möglichen Fehlern*/
loes2_f1: -1*imagpart(z1);
loes2_f2: (%i)*imagpart(z1);
loes2_f3: -(%i)*imagpart(z1);
```

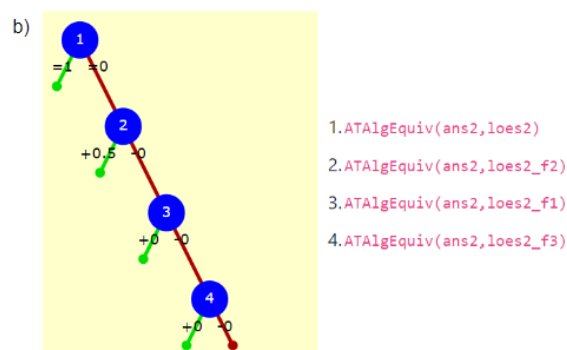


Abb. 2: STACK-Aufgabe zum Real- und Imaginärteil einer komplexen Zahl. a) Eingabe der Variablen für die Aufgabe, sowie der Lösung der Aufgabe und möglichen Fehlern für individuelle Rückmeldung. b) Rückmeldebaum für die Prüfung des Imaginärteils, wobei je nach Antwort entsprechendes Feedback gegeben wird.

Fragenpools zu verschiedenen Themengebieten der Mathematik und Physik in der Hochschullehre. Um die Qualität der Aufgaben sicherzustellen, durchlaufen die Aufgaben mehrere Schritte, bevor sie in Fragenpool gelangen. In der Abbildung 3 ist die Iteration zur Optimierung einer STACK-Aufgabe dargestellt.

Dabei liegt der Hauptfokus auf der sich an den Einsatz anschließenden Evaluierung und der daraus sich ergebenden Überarbeitung. Bei der Evaluierung betrachten wir die von den Studierenden abgegeben Lösungen und überprüfen diese auf häufige Fehler oder Verständnisprobleme. Darüber hinaus fließen auch studentische Rückmeldungen zu den Aufgaben mit ein. In der Überarbeitung werden dann häufige Fehler durch ein gezieltes Feedback adressiert, zum Beispiel

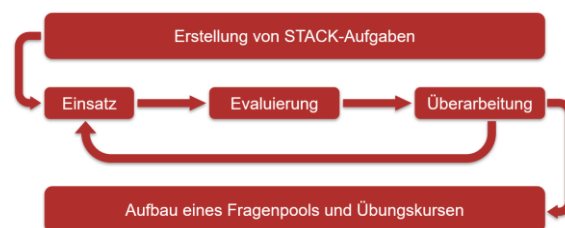


Abb. 3: Ablauf nach der Erstellung einer STACK- Aufgabe zur Optimierung der Aufgabe.

bei Vorzeichenfehlern, oder Umformulierungen an der Aufgabe vorgenommen. Nach einem erneuten Einsatz kommen dann entweder neue Überarbeitungen dazu oder die Aufgabe wird als fertig angesehen und gelangt in den Fragenpool.

3.2. Befragung der Studierenden zu STACK

Zur weiteren Evaluation von STACK-Aufgaben wurden Studierende befragt. Im Modul „Theoretische Mechanik und mathematische Methoden“ für das Lehramt an Gymnasien, Oberschulen und für Sonderpädagogik Physik im 4. Semester wurden im Sommersemester 2023 erstmals STACK-Aufgaben eingesetzt. Für die Klausurzulassung in diesem Modul müssen die Studierenden wöchentlich Übungsserien abgeben. Da sich STACK-Aufgaben nicht für alle Probleme in der theoretischen Physik eignen, wurden die Übungsserien zweigeteilt. Zum einen erhielten die Studierenden analoge Übungsaufgaben zu physikalischen Themen und zum anderen STACK-Aufgaben zu den mathematischen Inhalten. Nach Abgabe der Übungsserien wurden die gestellten STACK-Aufgaben zur erneuten Bearbeitung bereitgestellt. In den vorherigen Semestern hatten die Studierenden in keinem Modul STACK-Aufgaben erhalten und begegneten diesen zum ersten Mal in ihrem Studium.

Um die studentische Sichtweise zu den STACK-Aufgaben zu erfassen, wurde in der letzten Vorlesung eine Umfrage zu den im Semester gestellten Aufgaben durchgeführt. An dieser digitalen Umfrage nahmen $N=27$ von 31 angemeldeten Studierenden teil. In der Umfrage wurden der wahrgenommene Nutzen für den Lernprozess, die Motivation bei der Bearbeitung sowie die Benutzerfreundlichkeit erfragt. Auf einer fünfstufigen Likert-Skala konnten die Studierenden ihre Zustimmung zu bestimmten Aussagen notieren. Im Anschluss konnte in einem Freitextfeld weiteres Feedback gegeben werden. Die Ergebnisse der Befragung sind in der Abbildung 4 dargestellt.

Die Befragung zeigt ein positives Feedback zu STACK – Aufgaben. Dabei sehen 90% der Studierenden eine Verbesserung für ihr Lernen und etwa 65% der Studierenden empfanden STACK-Aufgaben als motivierender als analoge Aufgaben. Besonders die Wiederholbarkeit der Aufgaben und das Feedback zeigten eine große positive Resonanz durch die Studierenden. Dies zeigt sich auch darin, dass 90% der Studierenden später STACK-Aufgaben als Lehrkraft selbst einsetzen würden.

Durch die Abgabe der Aufgaben in digitaler Form besteht eine technische Hürde, welche wir ebenso abgefragt haben. Dabei gab die deutliche Mehrheit an, dass keine Programmierkenntnisse nötig seien und ebenso die Eingabe intuitiv war. Dies ist darin zu begründen, dass die Eingabe nur rudimentäre Kenntnisse ähnlich zu einem grafikfähigen Taschenrechner benötigt.

Aus dieser Befragung erschließt sich ein positives Bild der Studierenden zu STACK-Aufgaben, welches auch dadurch untermauert wird, dass die STACK-Aufgaben durchschnittlich von 77% der Studierenden mindestens nochmal einmal vor der Klausur bearbeitet wurden. Darüber hinaus gaben 85% der Studierenden an, dass sie sich mehr STACK-Aufgaben zu physikalischen Inhalten und auch in anderen Modulen wünschen würden.

4. Fazit und Ausblick

Anhand der ersten Befragungsergebnisse zu STACK-Aufgaben sehen wir eine Tendenz zur positiven Wahrnehmung von digitalen Aufgaben durch Studierende. Wegen den initialen positiven Rückmeldungen sollen STACK-Aufgaben breitgefächerter untersucht werden, um die Translation zu anderen Teilbereichen zu analysieren. Darüber hinaus vergrößert sich durch fortlaufenden Einsatz von digitalen Übungsaufgaben auch in anderen Modulen zum einen der Pool an

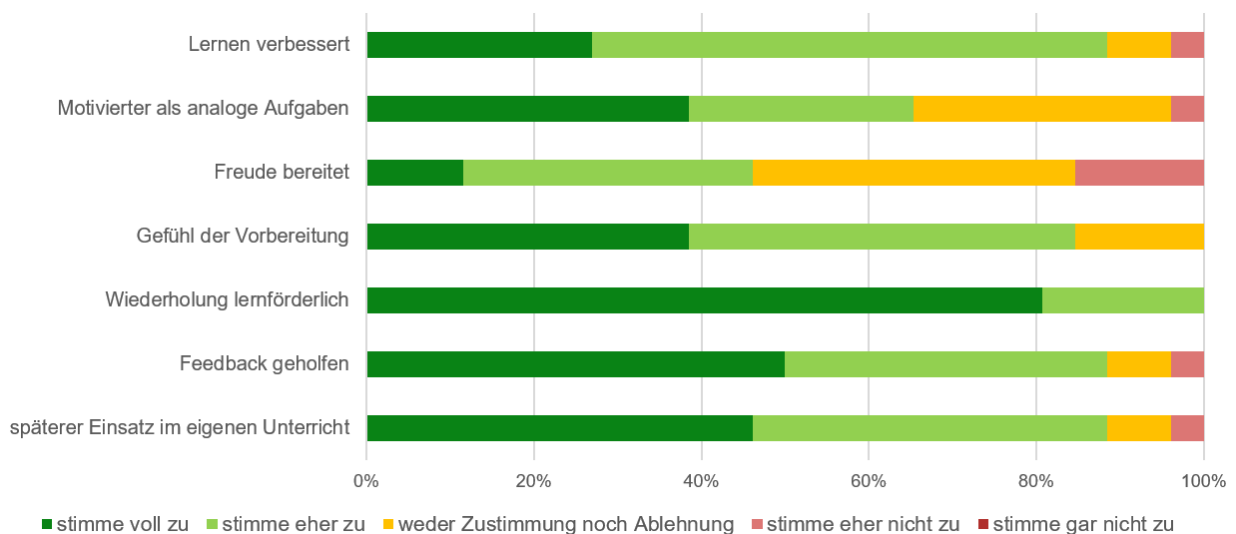


Abb. 4: Befragung von $N=27$ Lehramtsstudierenden zu STACK – Aufgaben nach dem Einsatz im Modul Theoretische Mechanik und mathematische Methoden im 4. Fachsemester

Aufgaben aber ebenso die Möglichkeit entsprechende Daten zu erheben.

Auch in anderen Fachbereichen, wie der Mathematik, dem Ingenieurwesen, der Chemie oder den Wirtschaftswissenschaften, finden sich immer mehr Interessenten für STACK-Aufgaben, wodurch sich der Einsatz von STACK stetig vergrößert und immer mehr Vernetzung stattfindet.

5. Literatur

Derr, K., Hübl, R., Mechelke-Schwede, E., Podgayetskaya, T. und Weigel, M. (2017). Inhaltliche und technische Aspekte des automatisierten Feedbacks. Einsatz des Fragetyps STACK im formativen eAssessment. In Beiträge zum Mathematikunterricht 2017, WTM, Münster, S. 1185–1192.

Hattie, John (2009): Visible Learning. A Synthesis of Over 800 Meta-Analyses Relating to Achievement. London.

Mai, To.; Wassong, T.; Becher, S. (2021): Über das Potenzial computergestützter Aufgaben zur Mathematik am Beispiel eines auf Blended Learning basierenden Vorkurses. In: Biehler R.; Eichler, A.; Hochmuth, R.; Rach S.; Schaper, N. (Hg.): Lehrinnovation in der Hochschulmathematik. Praxisrelevant didaktisch. [S.l.]: Springer (Konzepte und Studien zur Hochschuldidaktik und Lehrerbildung Mathematik), S. 291- 320.

Novak, G, Patterson, E.T., Gavrin, A.D., and Christian, W. (1999). Just-In-Time Teaching: Blending Active Learning with Web Technology, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

Sangwin, C. (2013). Computer Aided Assessment of Mathematics Using STACK. Oxford University Press, Oxford.

Danksagung

Das Projekt PhySTACK wird von der Stiftung Innovation in der Hochschullehre (Freiraum 2022: FRFMM-331/2022) gefördert. Außerdem bedanken wir uns bei den Studierenden, welche an der Befragung teilgenommen haben.

Förderung digitaler Kompetenzen von Physik-Lehrkräften im ComeNet Physik

David Weiler*, Jan-Philipp Burde*, Kasim Costan⁺, Rike Große-Heilmann[§], Christoph Kulgemeyer⁺, Josef Riese[§], Thomas Schubatzky[¶]

*Universität Tübingen, AG Didaktik der Physik, Auf der Morgenstelle 14, 72076 Tübingen, Deutschland;

⁺Universität Bremen, Didaktik der Physik, Otto-Hahn-Allee 1, 28359 Bremen, Deutschland;

[§]Universität Paderborn, Didaktik der Physik, Warburger Straße 100, 33098, Paderborn, Deutschland;

[¶]Universität Innsbruck, Didaktik der Physik, Fürstenweg 176, 6020, Innsbruck, Österreich

david-christoph.weiler@uni-tuebingen.de

Kurzfassung

Digitalisierungsbezogene Kompetenzen sind für Lehrkräfte eine notwendige Grundlage für die Gestaltung von zukunftsorientiertem Unterricht. Dennoch hatten viele Lehrkräfte in ihrer Ausbildung nicht die Gelegenheit, diese Kompetenzen aufzubauen. Daher werden im Verbundprojekt ComeMINT-Netzwerk digitalisierungsbezogene Fortbildungskonzepte zur Professionalisierung (angehender) MINT-Lehrkräfte forschungsbasiert entwickelt. Im ComeNet Physik liegt der Fokus dabei auf adaptiven Förder- und Fortbildungskonzepten zum fachdidaktisch begründeten Einsatz digitaler Medien auf Basis der Bedürfnisse von Lehrkräften. Im Rahmen einer Bedürfnisanalyse mit 122 praktizierenden Lehrkräften wurde insbesondere der Wunsch nach Fortbildungen zu Schülerexperimenten mit digitalen Medien, Smartphone-Experimenten und zu Augmented und Virtual Reality geäußert. Weiterhin bevorzugen Lehrkräfte halbtägige Präsenzfortbildungen oder kurze Online-Selbstlernmodule mit praktischem Ausprobieren der Medien. Dieser Beitrag stellt die Bedürfnisanalyse und das entwickelte Fortbildungskonzept vor.

1. Einleitung

Der Einsatz digitaler Medien in den naturwissenschaftlichen Fächern kann eine positive Auswirkung auf das Lehren und Lernen haben (Hillmayr et al., 2020). Betrachtet man die didaktischen Möglichkeiten, die der Einsatz digitaler Medien im Fach Physik bietet, scheint sich hier ein besonders großes Potenzial zu bieten (Wilhelm, 2023). So können beispielsweise nicht unmittelbar erfahrbare Größen oder Vorgänge (wie z.B. die elektrische Spannung, Elektronenbewegungen oder Felder in elektrischen Stromkreisen) mittels Augmented oder Virtual Reality (AR / VR) visualisiert werden und so dazu beitragen, das konzeptionelle Verständnis zu fördern. Zudem besitzen mittlerweile nahezu alle Schülerinnen und Schüler (SuS) Smartphones (Feierabend et al., 2022), die mit einer großen Auswahl an Sensoren als mobile Labore angesehen werden können (Kuhn & Vogt, 2019). Dies ermöglicht nicht nur, dass viele Versuche im Unterricht, die bisher nur als Demonstrationsexperiment möglich waren, nun direkt von den SuS durchgeführt werden können (Girwidz & Kohnle, 2021), sondern auch die Messungen und Auswertungen in authentischen Alltagssituationen statt im Klassenzimmer.

Trotz all der Möglichkeiten die durch den Einsatz digitaler Medien geboten werden, profitiert der Unterricht nicht per se vom Einsatz der Medien. Lehrkräfte benötigen für den didaktisch zielführenden Einsatz digitaler Medien im Fachunterricht sowohl entsprechende kognitive als auch affektive Komponenten

digitalisierungsbezogener Kompetenzen (vgl. Blömeke et al., 2015). Allerdings geben Lehrkräfte in Studien an, dass sie die notwendigen digitalisierungsbezogenen Kompetenzen in ihrer Ausbildung nicht erworben haben (Eickelmann et al., 2019). Auch nach der Pandemie und dadurch einer leichten Verbesserung der digitalisierungsbezogenen Kompetenzen bei Lehrkräften werden in aktuellen Studien Bedarfe nach fachspezifischen digitalisierungsbezogenen Fortbildungen abgeleitet (Endberg & Lorenz, 2022).

Um diesem Bedarf zu begegnen, hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung den Kompetenzverbund „lernen:digital“ ins Leben gerufen, in dem Maßnahmen zur Förderung der digitalisierungsbezogenen Kompetenzen von Lehrkräften unterstützt werden. Eines der geförderten Verbundprojekte ist das ComeMINT-Netzwerk, in dem forschungsbasierte Fortbildungen für MINT-Lehrkräfte entwickelt werden. Das ComeNet Physik, als Teil dieses Verbundprojekts, entwickelt ein adaptives Förder- und Fortbildungskonzept für Lehrkräfte zum Einsatz digitaler Medien im Physikunterricht (PhU), das die Bedürfnisse der Akteurinnen und Akteure aus der Schulpraxis systematisch berücksichtigt. Die Ergebnisse der Bedürfnisanalyse und das daraus abgeleitete Förderkonzept werden im Folgenden dargestellt.

2. Theoretischer Rahmen

2.1. Digitalisierungsbezogene Kompetenzen

Ein verbreitetes Modell zur Beschreibung der Struktur kognitiver digitalisierungsbezogener

Kompetenzen bei Lehrkräften ist das TPACK-Modell von Mishra & Koehler (2006). Ausgehend von den Kompetenzdomänen nach Shulman (1987) mit dem fachlichen Wissen (CK), dem pädagogischen Wissen (PK) und dem fachdidaktischen Wissen (PCK) wurden diese um den technologiebezogenen Aspekt (TK) erweitert. Damit ergeben sich der technologiebezogene fachliche Bereich (TCK), der technologiebezogene pädagogische Bereich (TPK) und der technologiebezogene fachdidaktische Bereich (TPCK). Ausformulierungen der notwendigen Kompetenzen verbleiben bei Anwendung dieses Modells zumeist auf einem generalisierten Niveau. Der Orientierungsrahmen „Digitale Kompetenzen für das Lehramt in den Naturwissenschaften“ (DiKoLAN, vgl. Becker et al., 2020) hat diese Kompetenzen fachspezifisch für den naturwissenschaftlichen Fächerkanon ausgeschärft. Diese können als fachspezifische Wissenskomponente von digitalisierungsbezogenen Kompetenzen von Lehrkräften herangezogen werden.

Neben dem Wissen über den fachdidaktisch durchdachten Einsatz digitaler Medien im Unterricht benötigen Lehrkräfte aber auch die Motivation, diese später einzusetzen (Lucas et al., 2021). Daher sind auch affektive Komponenten digitalisierungsbezogener Kompetenzen notwendig zu fördern. Einen Einfluss auf die Motivation digitale Medien im Unterricht einzusetzen haben insbesondere das wahrgenommene Nützlichkeitsempfinden und die Benutzerfreundlichkeit (Granic & Marangunic, 2019; Scherer & Teo, 2019). Dabei hat das Nützlichkeitsempfinden nicht nur Einfluss auf die Motivation, digitale Medien einzusetzen, sondern beeinflusst auch die Qualität des resultierenden Unterrichts (Backfisch et al., 2020).

Als ein Maß für die eigene Kompetenzerwartung kann die Selbstwirksamkeitserwartung herangezogen werden. Sie erweist sich als ein Prädiktor für den Einsatz und die Qualität des Einsatzes digitaler Medien im Unterricht (Hatlevik, 2017).

2.2. Konzeption von Fortbildungen

Für die Konzeption von Fortbildungen wurden in Studien unterschiedliche Kriterien identifiziert, die einen Einfluss auf die nachhaltige Veränderung der gelebten Unterrichtspraxis haben. So scheinen ein- oder halbtägige Bildungsformate allein wenig Auswirkung zu haben (Rzejak & Lipowsky, 2018). Ein Ansatz, um dem zu begegnen, können modulare Lehrkräftefortbildungen sein, in denen Selbstlern-, sowie Erarbeitungs- und Reflexionsphasen enthalten sind (Barzel & Selter, 2015; Lipowski & Rzejak, 2021). Dabei ist ein Austausch mit Kolleginnen und Kollegen, am besten von derselben Schule, unerlässlich (Desimone, 2009). So zeigt sich bei einem längeren zeitlichen Fortbildungsumfang, bei dem nicht nur Best-Practice-Beispiele gezeigt werden, sondern auch Materialien ausgetauscht und überarbeitet werden und in Follow-up-Gelegenheiten darüber diskutiert wird, als wertvoll für die nachhaltige

Veränderung der Unterrichtspraxis (Guyskey & Yoon, 2009; Drossel & Eickelmann, 2018).

Insbesondere für Lehrkräftefortbildungen zu digitalen Medien zeigt sich, dass die Nutzung der Potenziale digitaler Medien in Form konkreter Anwendungen von Vorteil ist. Hier sollten adaptive Möglichkeiten, die Orts- und Zeitungebundenheit von Lernmodulen und Open Educational Resources (OER) Materialien genutzt werden (Schulze-Vorberg et al., 2021).

Zwar zeigen bisherige fächerübergreifende Erhebungen, dass nicht nur der Bedarf an Fortbildungen zum Einsatz neuer digitaler Medien von Interesse ist, sondern auch an bereits etablierte Medien (Schulze-Vorberg et al., 2021), dennoch verbleiben diese Untersuchungen zumeist auf einer sehr allgemeinen und nicht fachspezifischen Ebene. Vor diesem Hintergrund wurde es für notwendig erachtet, eine Bedürfnisanalyse für die Zielgruppe der Physik-Lehrkräfte durchzuführen.

3. Forschungsfragen

Für die Entwicklung eines zielgruppenspezifischen Fortbildungskonzepts sollten zuerst die Bedürfnisse der Physik-Lehrkräfte für digitalisierungsbezogene Fortbildungen exploriert werden. Denn neben inhaltlichen Präferenzen müssen auch die Wünsche der Lehrkräfte zu dem Bildungsformat berücksichtigt werden, um die Akzeptanz der konzipierten Fortbildungen zu steigern. Daher wurden für die Bedürfnisanalyse die folgenden Forschungsfragen formuliert:

FF1: Zu welchen digitalisierungsbezogenen Themen haben Physik-Lehrkräfte ein Bedürfnis nach Fortbildungen?

FF2: Wie hoch ist das Interesse von Physik-Lehrkräften an unterschiedlichen inhaltlichen Aspekten von Fortbildungen?

FF3: Welches Bildungsformat bevorzugen Physik-Lehrkräfte?

FF4: Wie hoch ist die Selbstwirksamkeitserwartung der Physik-Lehrkräfte mit Blick auf den Einsatz digitaler Medien im Physikunterricht?

4. Methode und Stichprobe

Die Erhebung der Bedürfnisse der Physik-Lehrkräfte wurde mittels eines Online-Fragebogens durchgeführt. Der Fragebogen wurde an praktizierende Lehrkräfte und Fachleitungen in Deutschland und Österreich versendet und um freiwillige Teilnahme gebeten.

4.1. Eingesetzte Testinstrumente

Neben demographischen Variablen wurden die Vorerfahrungen der Lehrkräfte mit einzelnen digitalen Medien (z.B. „Ich habe schon Erfahrungen mit Experimenten oder Beobachtungen mittels Videoanalyse.“) angelehnt an Vogelsang et al. (2019), mit 6-stufigen Likert-Items und die Einsatzhäufigkeit von physiktypischen digitalen Medien erhoben (z.B. „Wie häufig setzen Sie Interaktive

Bildschirmexperimente in Ihrem Unterricht ein?“). Zur Beantwortung von FF1 und FF2 wurden 6-stufige Likert-Items zu den Bedürfnissen („Wie hoch ist ihr Bedarf an Fortbildungen zu folgenden Themen?“) und Interesse an inhaltlichen Aspekten („Wie hoch ist ihr Interesse daran, in Fortbildungen zu den oben genannten Themen und Medien folgende Aspekte zu behandeln?“) eingesetzt. Das präferierte Fortbildungsformat aus FF3 wurde über Mehrfachauswahl der möglichen Formate (z.B. „Präsenz“ oder „Online“) und der Organisationsformen (z.B. „Eine zusammenhängende Fortbildungsreihe über mehrere Tage“) abgefragt.

Zur Ermittlung der Selbstwirksamkeitserwartung (FF4) der Lehrkräfte wurde die bereits bei Studierenden eingesetzte Skala nach Weiler et al. (2022) eingesetzt (z.B. „Ich kann digitale Medien so auswählen, dass diese zu einem besseren konzeptionellen Verständnis im Unterricht beitragen.“). Die Skalenreliabilität wies mit einem Cronbachs $\alpha = 0.86$ einen guten Wert auf.

4.2. Stichprobe

An der Online-Umfrage nahmen 162 Personen teil, wobei nur $N = 122$ Lehrkräfte den Fragebogen zur Gänze bearbeiteten. Die mittlere Bearbeitungsdauer betrug 17 Minuten. Etwa 40 % der befragten Lehrkräfte gaben an weiblich zu sein ($n = 49$) und etwa 58 % ordneten sich dem männlichen Geschlecht zu ($n = 71$), die Übrigen machten keine Angabe. Die befragten Lehrkräfte waren im Schnitt 44 Jahre alt ($M = 44.18$; $SD = 11.69$; $min = 25$; $max = 72$) und hatten im Schnitt 16 Jahre Berufserfahrung ($M = 16.01$; $SD = 11.47$; $min = 0$; $max = 46$), wobei vier Personen angaben, im Referendariat zu sein und weniger als ein Jahr Berufserfahrung zu haben. Von den 122 befragten Lehrkräften und Fachleitungen gaben 111 an, gegenwärtig als Lehrkraft aktiv zu sein.

Die Lehrkräfte stammten aus neun unterschiedlichen Bundesländern in Deutschland und sechs unterschiedlichen Bundesländern in Österreich.

5. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Bedürfnisanalyse dargestellt. Dabei wird zuerst auf die inhaltlichen Themen und dann auf die gewünschten Fortbildungsformate eingegangen.

5.1. Themen

Die Physik-Lehrkräfte wurden nach ihrem Bedürfnis nach Fortbildungen zu unterschiedlichen fachspezifischen digitalen Medien und Themen befragt. Tabelle 1 stellt die Rangfolge der Bedürfnisse dar.

Aus Sicht der befragten Lehrkräfte waren Fortbildungen zu Schülerexperimenten mit digitalen Medien, zu AR und VR und zu Smartphone-Experimenten am beliebtesten. Dabei gaben etwa 76 % der befragten Lehrkräfte an, mindestens ein „eher hohes“ Interesse an Fortbildungen zu Schülerexperimenten zu digitalen Medien zu haben, wohingegen es bei Smartphone-Experimenten noch 63 % der Lehrkräfte waren. Auch waren diese Themen über die Berufserfahrung hinweg für die Lehrkräfte interessant. Die Berufserfahrung zeigte nur bei IBE (Pearson's $r = -0.194$, $p < 0.05$), mathematischer Modellbildung ($r = -0.206$, $p < 0.05$), digitalen Messwerterfassungssystemen ($r = -0.217$, $p < 0.05$) und Mikrocontrollern ($r = -0.208$, $p < 0.05$) einen Zusammenhang mit dem Bedürfnis nach Fortbildungen. Die erfahreneren Lehrkräfte hatten an diesen Themen ein eher geringes Interesse im Vergleich zu Lehrkräften mit wenig Berufsjahren.

Insbesondere bei den Themen AR und VR und Mikrocontroller war das Bedürfnis der Lehrkräfte nach Fortbildungen zum Thema stark polarisiert ausgeprägt. Entgegen den sonst eher normalverteilten

Tab. 1: Rangfolge möglicher Fortbildungsthemen nach Mittelwerten; Interesse⁺ sind Anteil bzw. Anzahl der Personen, die angaben, mindestens ein „eher hohes“ (Likert-Wert >3) Interesse zu haben.

Thema	<i>M</i>	<i>SD</i>	Interesse ⁺ (#)
Schülerexperimente mit digitalen Medien	4.15	1.14	76 % (93)
Augmented Reality (AR) und Virtual Reality (VR)	3.92	1.76	64 % (78)
Smartphone-Experimente	3.89	1.43	63 % (77)
Einbettung digitaler Medien in einen lernförderlichen PhU	3.77	1.35	65 % (79)
Interaktive Bildschirmexperimente (IBE)	3.65	1.36	56 % (69)
Simulationen und Animationen	3.43	1.41	50 % (61)
Erklärvideos und das Lernen von Physik	3.35	1.34	46 % (56)
Videoanalyse	3.35	1.37	48 % (59)
Digitale Verfahren mathematischer Modellbildung	3.34	1.61	47 % (57)
Digitale Messwerterfassungssysteme	3.30	1.48	47 % (57)
Mikrocontroller	3.29	1.79	49 % (60)
Lernpsychologisches Hintergrundwissen bezgl. des Einsatzes digitaler Medien im PhU	3.17	1.34	39 % (48)
Gesellschaftliche Relevanz digitaler Medien	2.99	1.55	38 % (46)

Rückmeldungen der Lehrkräfte fanden sich bei diesen Themen breite Ränder, d.h. die Extreme „sehr niedrig“ (21 Personen bei AR und VR) und „sehr hoch“ (27 Personen bei AR und VR) sind hier stark ausgeprägt.

Mit Abstand am geringsten ausgeprägt war das Interesse der Lehrkräfte an Fortbildungen zur gesellschaftlichen Relevanz digitaler Medien oder dem lernpsychologischen Hintergrundwissen zum schulischen Einsatz digitaler Medien.

5.2. Aspekte von Fortbildungen

Die Lehrkräfte wurden ferner gefragt, welche inhaltlichen Aspekte sie sich bei einer Fortbildung zum Einsatz digitaler Medien im Physikunterricht wünschen. Wie aus Tabelle 2 hervorgeht, liegt das größte Interesse der Lehrkräfte darin, bei den Fortbildungen die Medien auch selbst auszuprobieren und mit diesen zu interagieren. Ebenso eher positiv wird das Aufzeigen von didaktischen Einsatzmöglichkeiten für den Unterricht bewertet. Etwa 20 % der befragten Lehrkräfte hatten gegenüber diesen Aspekten ein niedriges Interesse.

Tab. 2: Bewertung einzelner inhaltlicher Aspekte von Fortbildungen zu digitalen Medien

Inhaltliche Aspekte	<i>M</i>	<i>SD</i>
Praktisches Ausprobieren	4.41	1.24
Didaktische Einsatzmöglichkeiten	4.16	1.28
Empirische Befunde	3.51	1.46
Eigene Unterrichtseinheiten und Feedback erhalten	3.48	1.36

Die Durchführung eigener Unterrichtseinheiten mit digitalen Medien und das Erhalten von Feedback zu diesen Einheiten wie auch die Behandlung von empirischen Befunden zur Lernwirksamkeit digitaler Medien schnitt bei den Lehrkräften eher schlecht ab. Etwa die Hälfte der Lehrkräfte hat ein Interesse an der Behandlung dieser Aspekte in Fortbildungen bekundet. Die Berufserfahrung hatte keinen Einfluss auf die inhaltlichen Aspekte.

5.3. Fortbildungsformat

Neben den thematischen Bedürfnissen und Interessen für die Ausgestaltung der Fortbildungen wurden auch das gewünschte Fortbildungsformat und die Organisationsform erhoben. Dabei waren Mehrfachnennungen möglich (siehe Tabelle 3).

Die meisten Lehrkräfte wünschten sich Präsenzfortbildungen, gefolgt von Online-Fortbildungen. Am schlechtesten schnitten Selbstlerneinheiten ab. Diese wurden meistens mit anderen Fortbildungsformaten zusammen angegeben, kamen aber nur einmal als alleinige Präferenz vor. Die meisten Lehrkräfte kann man für Fortbildungen gewinnen, wenn diese sowohl als Online- als auch als Präsenz-Fortbildung zur

Verfügung stehen (111 von 122 Befragten gaben mindestens eines der beiden Formate an).

Tab. 3: Gewünschtes Fortbildungsformat nach Anzahl der Nennung (Mehrfachnennung möglich)

Fortbildungsformat	#
Präsenz	89
Online	54
Hybrid	42
Selbstlerneinheit	37

Bezüglich der Organisationsformen der Fortbildung gaben die meisten Physik-Lehrkräfte an, an Halbtagesveranstaltungen in Präsenz interessiert zu sein (siehe Tabelle 4). Ähnlich viele Lehrkräfte gaben an, eine zusammenhängende Fortbildungsreihe, die über mehrere Tage geht, besuchen zu wollen. Am unbeliebtesten waren Selbstlernmodule auf Basis einer Online-Diagnose. Lange Selbstlernmodule (im Umfang von 90 Minuten zur freien Auswahl), die die Grundlagen zu einzelnen digitalen Medien vermitteln, waren unbeliebter als kürzere Selbstlernmodule (30 Minuten zu Grundlagen) mit individuellen Vertiefungsmöglichkeiten.

Tab. 4: Gewünschte Organisationsform der Fortbildung nach Anzahl der Nennungen (Mehrfachnennung möglich)

Organisationsform	#
Halbe Tage in Präsenz	65
Fortbildungsreihe	59
30min Selbstlernmodule mit individueller Vertiefung	45
90 Minuten Selbstlernmodule	37
Selbstlernmodule nach Online-Diagnose	28

Betrachtet man die Präsenzfortbildungen ohne Selbstlernmodule zeigt sich, dass 97 Personen entweder eine halbtägige oder eine Fortbildungsreihe besuchen würden, aber nur 27 Personen davon würden beides präferieren. Demgegenüber gibt es in Summe 70 Personen, die eine Form der Selbstlernmodule gewählt haben.

5.4. Selbstwirksamkeit der Lehrkräfte beim Einsatz digitaler Medien

Die Lehrkräfte zeigen größtenteils eine hohe Selbstwirksamkeitserwartung in Bezug auf den Einsatz digitaler Medien im Unterricht (siehe Abbildung 1). Der Mittelwert war mit $M = 4.51$ ($SD = 0.69$) im mittleren Bereich. Die Berufserfahrung oder das Geschlecht hatten keinen Einfluss auf die Selbstwirksamkeitserwartung.

6. Diskussion und Limitationen

Die Stichprobe der Physik-Lehrkräfte deckt nicht alle Bundesländer ab, daher ist es für die folgende Diskussion wichtig zu beachten, dass die Aussagen keinen Anspruch auf Generalisierbarkeit erheben. Zudem haben an dieser Gelegenheitsstichprobe vermutlich auch eher nur Lehrkräfte teilgenommen, die ohnehin schon ein Grundinteresse an der Thematik hatten, was zu einer Positivauswahl führt.

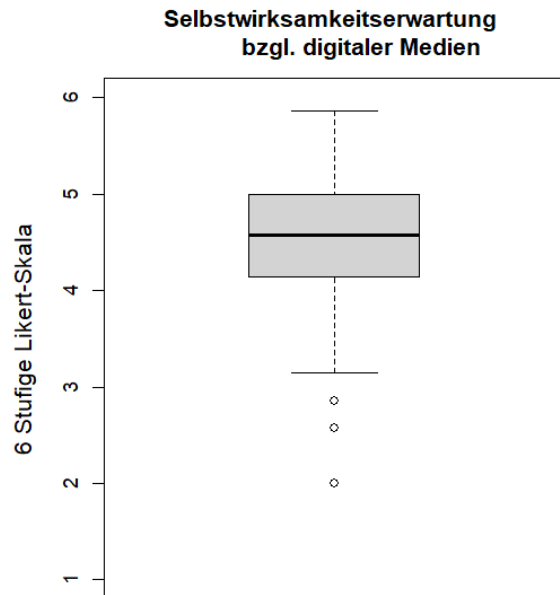


Abb. 1: Selbstwirksamkeitserwartung der befragten Lehrkräfte

Zur Beantwortung der FF1 hat sich gezeigt, dass Lehrkräfte insbesondere an Fortbildungen zu Schülerexperimenten mit digitalen Medien sowie zur Einbettung digitaler Medien in den Physikunterricht interessiert sind – beides Themen, die nicht spezifisch an ein Medium gebunden sind. Das größte medien-spezifische Interesse haben Lehrkräfte an Smartphones und Augmented und Virtual Reality. Dies könnte in der guten Verfügbarkeit von Smartphones auf Seiten der SuS und somit im Unterricht (Feierabend et al., 2022) und der Neuartigkeit von AR-Anwendungen begründet liegen, die auch mit Smartphones genutzt werden. Hingegen besteht an der gesellschaftlichen Relevanz oder den lernpsychologischen Hintergründen des Medieneinsatzes ein eher geringes Interesse. Es ist ergänzend festzuhalten, dass es bei Themen wie Mikrocontrollern zu starken Polarisierungen kommt, sodass hier die Gruppe, die einen großen Bedarf sieht, größer ausfällt als bei anderen Themen. Gleichzeitig gibt es aber auch viele Lehrkräfte, die nahezu kein Interesse daran haben. Es gibt zu nahezu allen digitalen Medien ein Bedürfnis nach Fortbildungen, das aber unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Kein Thema wird als vollständig uninteressant angesehen, sodass sich zu jedem Thema eine Gruppe an interessierten Lehrkräften finden dürfte.

Bezüglich der methodischen Aspekte von Fortbildungen (FF2) sind schulpraktische Umsetzungen, wie das konkrete Ausprobieren der Medien oder konkrete didaktische Einsatzmöglichkeiten im Unterricht, beliebter als die Auseinandersetzung mit empirischen Befunden. Die Kategorien „Erarbeiten von Unterrichtsstunden“ und „Peerfeedback erhalten“ sind am wenigsten beliebt, auch wenn diese sich in Studien als wirksame Elemente von Fortbildungen erwiesen haben (Desimone, 2009).

Das beliebteste Fortbildungsformat (FF3) ist die Präsenzfortbildung, was vor dem Hintergrund des großen Interesses am praktischen Ausprobieren von digitalen Medien wenig überrascht. Zeittechnisch sind halbe Tage oder mehrtägige Fortbildungen am beliebtesten. Dies bestätigt auch die Befunde von Schulze-Vorberg et al. (2021), bei denen ganztägige oder am Vormittag stattfindende Fortbildungen außerhalb der Ferien am beliebtesten waren.

Die Selbstwirksamkeitserwartung zum Einsatz digitaler Medien (FF4) befindet sich im oberen mittleren Bereich. Im Vergleich zu anderen Gruppen, wie Studierenden, kommt es hier nicht zu einer sehr stark ausgeprägten Überschätzung der eigenen Kompetenz (Weiler et al., 2022), was vermutlich auf die eigene Lehrerfahrung zurückzuführen ist. Vor dem Hintergrund, dass dieses affektive Konstrukt den späteren Einsatz digitaler Medien in der Schulpraxis beeinflusst, ist es daher wichtig, Lehrkräften in Fortbildungen die Möglichkeit zu geben, ihre eigene Selbstwirksamkeitserwartung zu steigern. Dies kann durch direktes Ausprobieren geschehen und bildet somit auch eine Verknüpfung zu den Wünschen der Lehrkräfte mit Blick auf die methodischen Aspekte von Fortbildungen.

7. Fortbildungskonzept

Basierend auf den Ergebnissen der Bedürfniserhebung wird im Folgenden das erarbeitete Fortbildungskonzept des ComeNet Physik vorgestellt. Die entwickelten Materialien für die Fortbildungen sind aus den Vorarbeiten aus dem Projekt „Digitale Kompetenzen von Lehramtsstudierenden im Fach Physik“ (DiKoLeP; Weiler et al., 2023) entwickelt worden. Nach einer Vorstellung des Fortbildungskonzepts wird der allgemeine Aufbau der Fortbildungsmodule dargestellt.

7.1. Fortbildungsstruktur

Die Fortbildungen gliedern sich in drei Teile, bei denen versucht wurde, die Wünsche der Lehrkräfte mit Blick auf die Fortbildungsformate zu berücksichtigen. Primär wird den Wünschen nach Präsenzfortbildungen nachgekommen. Es wurde jedoch auf mehrtägige Präsenzfortbildungen verzichtet, da die meisten Lehrkräfte an halbtägigen Präsenzfortbildungen interessiert sind und die Schnittmenge mit den Personen, die angaben, eine Fortbildungsreihe zu präferieren, als zu klein erachtet wurde.

Vor den in Präsenz stattfindenden Fortbildungen zu einzelnen digitalen Medien sind die teilnehmenden

Lehrkräfte angehalten, vorab einen Online-Kurs auf iMoox.at zu belegen, bei dem ihnen unterschiedliche Online-Selbstlernmodule zur Verfügung stehen. Dies ermöglicht es, obwohl Selbstlernfortbildungen allein als eher uninteressanten angesehen wurden, Inhalte vorwegzunehmen, um alle Lehrkräfte auf einen ähnlichen Wissensstand zu bringen und somit mehr Zeit für beliebtere Praxisphasen in den Präsenzfortbildungen zu haben. Die Plattform iMoox.at wurde gewählt, da sie eine in Österreich bereits etablierte Plattform für Selbstlernkurse ist. Die Materialien sind frei nutzbar und werden auch über die Projektlaufzeit hinaus von iMoox.at weiterhin gepflegt, was die Auffindbarkeit und Nachhaltigkeit der entwickelten Fortbildung steigert.

Zu Beginn des Online-Kurses können die Lehrkräfte zwischen einem geleiteten Weg oder der freien Auswahl von Inhalten wählen. Bei dem geleiteten Weg (siehe Abbildung 2) steht den Lehrkräften eine Eingangsdiagnostik zur Verfügung, die ihnen Empfehlungen zur Bearbeitung von Kursinhalten macht.

bildung mehr Zeit zum praktischen Ausprobieren zur Verfügung, was von den Lehrkräften für wichtig erachtet wurde. Zusätzlich wird versucht auch schon in den Online-Modulen die Möglichkeit zum Ausprobieren der Medien zu geben.

Die Präsenzfortbildungen im Anschluss an die vorbereitenden Online-Lernmodule finden an den beteiligten Standorten in Deutschland und Österreich statt. Auf diese Weise soll die Möglichkeit der Partizipation an den Fortbildungen erhöht werden.

In den Präsenzfortbildungen werden mögliche didaktisch begründete Einsatzszenarien der digitalen Medien besprochen. Dabei werden auch Möglichkeiten von Schülerexperimenten bei jeder Fortbildung diskutiert, um so das am meisten gewünschte Thema in mehreren Fortbildungen unterzubringen. Die Lehrkräfte haben spätestens bei den Präsenzfortbildungen die Möglichkeit, die unterschiedlichen digitalen Medien direkt selbst auszuprobieren, sofern dies in den Online-Selbstlernmodulen nicht möglich gewesen ist.

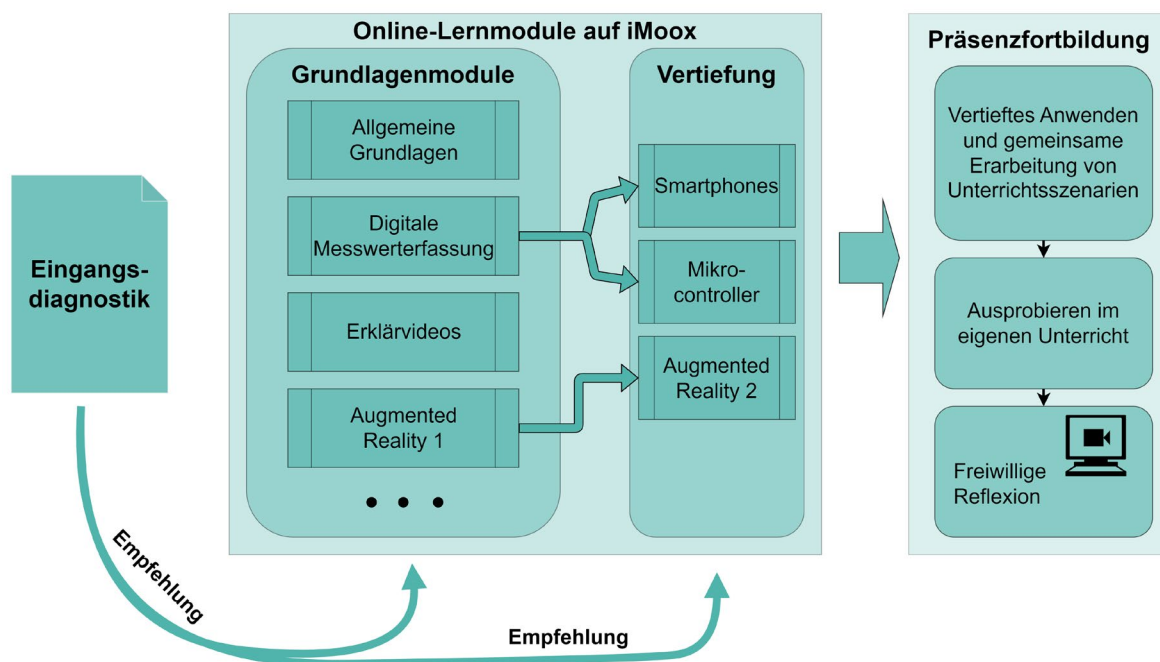


Abb. 2: Möglicher Ablauf der geleiteten Fortbildung.

So kann beispielsweise empfohlen werden, mit einem Grundlagenmodul zu beginnen oder - wenn bereits Vorerfahrungen bei den Lehrkräften bestehen - direkt mit einem Vertiefungsmodul zu interagieren. Vertiefungsmodulen können außerdem immer im Anschluss an ein abgeschlossenes Grundlagenmodul bearbeitet werden. Dennoch sind alle Module für die Lehrkräfte auffindbar, sodass ein hohes Maß an Autonomie gewährleistet ist. Der Umfang der einzelnen Selbstlernmodule wird eher kurzgehalten und soll, den Ergebnissen der Bedürfnisanalyse folgend, 30 Minuten nicht übersteigen. Durch das Auslagern von Inputphasen in Online-Selbstlernmodule steht den Lehrkräften während der anknüpfenden Präsenzfort-

Im Rahmen der Präsenzfortbildungen wird den Lehrkräften ferner das kollaborative Erarbeiten von Unterrichtsszenarien und Materialien ermöglicht. Dies umfasst neben der gemeinsamen Planung auch die Adaption bisheriger OER-Materialien. Dies ermöglicht es, dass Lehrkräfte, die das Gelernte direkt umsetzen wollen, eine niedrigere Einstiegshürde haben und die Rechte zum weiteren Teilen der Materialien gewährleistet werden.

Auf freiwilliger Basis findet eine Online-Nachbesprechung statt, sobald die Lehrkräfte die Möglichkeit hatten, ihre entwickelten Unterrichtsmaterialien in eigenen Unterricht einzusetzen. Dies ermöglicht

die Reflexion des Gelernten und das Aufbauen eines Netzwerks zum Austausch von Materialien, auch über die eigene Schule hinweg.

7.2. Inhalt der Lernmodule und Fortbildungen

Im ComeNet Physik werden Fortbildungen und Lernmodule zu unterschiedlichen digitalen Medien entwickelt. Die Module umfassen die Themenbereiche:

- Erklärvideos und deren Erstellung
- Simulationen und Animationen
- Interaktive Bildschirmexperimente
- Augmented Reality
- Mathematische Modellbildung
- Digitale Messwerterfassung mit Lehrmittelsystemen, Smartphones und Mikrocontrollern
- Videoanalyse

Ergänzend gibt es ein Online-Selbstlernmodul zur Einführung und Grundlagen zum Einsatz digitaler Medien im Physikunterricht.

Den Online-Selbstlernmodulen liegt die gleiche Systematik zugrunde. Zuerst wird geklärt, was die Besonderheiten des jeweiligen digitalen Mediums sind. Danach wird auf mögliche Einsatzszenarien im Unterricht eingegangen. Abschließend werden kurz empirische Befunde zu den Medien präsentiert. Dabei sind Anwendungsaufgaben für die Lehrkräfte mit eingeplant, damit die Medien, sofern es online möglich ist, direkt ausprobiert werden können. Die Lernmodule sind meistens in zwei Niveaustufen aufgeteilt. In einem Grundlagenmodul wird in das Medium eingeführt, während ein Vertiefungsmodul spezifischere oder aufwändigere Anwendungen berücksichtigt. So geht es beispielsweise im Grundlagenmodul zu Interaktiven Bildschirmexperimenten (IBE) um das Auffinden und Einbetten von IBE für den eigenen Unterricht und im Vertiefungsmodul um die Erstellung von eigenen IBE für den Physikunterricht.

Die auf iMoox.at zur Verfügung gestellten Online-Selbstlernmodule gehen im September 2024 an den Start und bleiben auch über die Projektlaufzeit hinaus erhalten. Die Fortbildungen werden im Zuge des Projekts ComeMINT durchgeführt und die entstandenen Fortbildungsmaterialien im Nachhinein zur Verfügung gestellt.

8. Literatur

Backfisch, I., Lachner, A., Hische, C., Loose, F. & Scheiter, K. (2020). Professional Knowledge or Motivation? Investigating the Role of Teachers' Expertise on the Quality of Technology-Enhanced Lesson Plans. *Learning and Instruction*, 66, Artikel 101300. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2019.101300>

Barzel, B., & Selter, C. (2015). Die DZLM-Gestaltungsprinzipien für Fortbildungen.

Journal für Mathematik-Didaktik, 36(2), 259–284. <https://doi.org/10.1007/s13138-015-0076-y>

Becker, S., Meßinger-Koppelt, J. & Thyssen, C. (Hrsg.) (2020). *Digitale Basiskompetenzen – Orientierungshilfe und Praxisbeispiele für die universitäre Lehramtsausbildung in den Naturwissenschaften*. Hamburg: Joachim Herz Stiftung.

Blömeke, S., Gustafsson, J. & Shavelson, R. (2015). Beyond Dichotomies. *Zeitschrift für Psychologie*, 223 (1), 3–13. <https://doi.org/10.1027/2151-2604/a000194>

Desimone, L. M. (2009). Improving Impact Studies of Teachers' Professional Development: Toward Better Conceptualizations and Measures. *Educational Researcher*, 38(3), 181–199. <https://doi.org/10.3102/0013189X08331140>

Drossel, K. & Eickelmann, B. (2018). Die Rolle der Lehrerprofessionalisierung für die Implementierung neuer Technologien in den Unterricht – Eine Latent-Class-Analyse zur Identifikation von Lehrertypen. *MedienPädagogik. Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung*, (31), 166–191. <https://doi.org/10.21240/mpaed/31/2018.06.04.X>

Eickelmann, B., Bos, W., Gerick, J., Goldhammer, F., Schaumburg, H., Schwippert, K., Senkbeil, M., & Vahrenhold, J. (Hrsg.). (2019). *ICILS 2018 #Deutschland. Computer- und informationsbezogene Kompetenzen von Schülerinnen und Schülern im zweiten internationalen Vergleich und Kompetenzen im Bereich Computational Thinking*. Waxmann.

Endberg, M., & Lorenz, R. (2022). Selbsteingeschätzte Kompetenzen von Lehrpersonen der Sekundarstufe I zum Einsatz digitaler Medien im Unterricht im Bundesländervergleich 2021 und im Trend seit 2017. In R. Lorenz, S. Yotyodying, B. Eickelmann, & M. Endberg (Hrsg.), *Schule digital—Der Länderindikator 2021: Lehren und Lernen mit digitalen Medien in der Sekundarstufe I in Deutschland im Bundesländervergleich und im Trend seit 2017* (1. Auflage, S. 89–115). Waxmann.

Feierabend, S., Rathgeb, T., Kheredmand, H., Glöckler, S., & Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest. (2022). *JIM-Studie 2022: Basisuntersuchung zum Medienumgang 12- bis 19-Jähriger*. https://www.mpfs.de/fileadmin/files/Studien/JIM/2022/JIM_2022_Web_final.pdf

Girwidz, R., & Kohnle, A. (2021). Multimedia and Digital Media in Physics Instruction. In H. E. Fischer & R. Girwidz (Hrsg.), *Physics Education* (S. 297–336). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87391-2_11

- Granic, A. & Marangunic, N. (2019). Technology Acceptance Model in Educational Context: A Systematic Literature Review. *British Journal of Educational Technology*, 50 (5), 2572–2593. <https://doi.org/10.1111/bjjet.12864>
- Guskey, T. R., & Yoon, K. S. (2009). What Works in Professional Development? *Phi Delta Kappan*, 90(7), 495–500. <https://doi.org/10.1177/003172170909000709>
- Hatlevik, O. E. (2017). Examining the Relationship between Teachers' Self-Efficacy, their Digital Competence, Strategies to Evaluate Information, and use of ICT at School. *Scandinavian Journal of Educational Research*, 61(5), 555–567. <https://doi.org/10.1080/00313831.2016.1172501>
- Hillmayr, D., Zienwald, L., Reinhold, F., Hofer, S. I., & Reiss, K. M. (2020). The potential of digital tools to enhance mathematics and science learning in secondary schools: A context-specific meta-analysis. *Computers & Education*, 153, 103897. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.103897>
- Kuhn, J., & Vogt, P. (2019). *Physik ganz smart: Die Gesetze der Welt mit dem Smartphone entdecken*. Springer Spektrum.
- Lipowsky, F., & Rzejak, D. (2021). Fortbildungen für Lehrpersonen wirksam gestalten: Ein praxisorientierter und forschungsgestützter Leitfaden. <https://doi.org/10.11586/2020080>
- Lucas, M., Bem-Haja, P., Siddiq, F., Moreira, A., & Redecker, C. (2021). The relation between in-service teachers' digital competence and personal and contextual factors: What matters most? *Computers & Education*, 160, 104052. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.104052>
- Mishra, P., & Koehler, M. J. (2006). Technological pedagogical content knowledge: A framework for teacher knowledge. *Teachers college record*, 108(6), 10171054.
- Rzejak, D. & Lipowsky, F. (2018). Forschungsüberblick zu Merkmalen wirksamer Lehrerfortbildungen. In I. Grothus (Hrsg.), *Lehrkräftefortbildung in Deutschland. Recherchen für eine Bestandsaufnahme* (S. 131–141). Deutscher Verein für Lehrerfortbildung.
- Scherer, R. & Teo, T. (2019). Unpacking Teachers' Intentions to Integrate Technology: A Meta-Analysis. *Educational Research Review*, 27, 90–109. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2019.03.001>
- Shulman, L. (1987). Knowledge and Teaching: Foundations of the New Reform. *Harvard Educational Review*, 57(1), 1–23. <https://doi.org/10.17763/haer.57.1.j463w79r56455411>
- Schulze-Vorberg, L., Krille, C., Fabriz, S., & Horz, H. (2021). Hinweise und Empfehlungen für die Konzeption von Lehrkräftefortbildungen zu digitalen Medien. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 24(5), 1113–1142. <https://doi.org/10.1007/s11618-021-01046-z>
- Vogelsang, C., Finger, A., Laumann, D., & Thyssen, C. (2019). Vorerfahrungen, Einstellungen und motivationale Orientierungen als mögliche Einflussfaktoren auf den Einsatz digitaler Werkzeuge im naturwissenschaftlichen Unterricht. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 25(1), 115–129. <https://doi.org/10.1007/s40573-019-00095-6>
- Weiler, D., Burde, J.-P., Lachner, A., Große-Heilmann, R., Riese, J., & Schubatzky, T. (2022). Bedarfsanalyse zu digitalen Medien bei Physik-Lehramtsstudierenden. In S. Habig & H. van Vorst (Hrsg.), *Unsicherheit als Element von naturwissenschaftsbezogenen Bildungsprozessen* (S. 768–771). <https://gdcp-ev.de/wp-content/uploads/2022/05/Tagungsband-2022-Stand-13522.pdf>
- Weiler, D., Burde, J.-P., Große-Heilmann, R., Lachner, A., Riese, J., & Schubatzky, T. (2023). Förderung von digitalisierungsbezogenen Kompetenzen von angehenden Physiklehrkräften mit dem SQD-Modell im Projekt DiKoLeP. In M. Meier, M. Hammann, G. Greefrath, K. Ziepprecht, & R. Wodzinski (Hrsg.), *Lehr-Lern-Labore und Digitalisierung* (1. Auflage 2023). Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer VS.
- Wilhelm, T. (Hrsg.). (2023). *Digital Physik unterrichten: Grundlagen, Impulse und Perspektiven* (1. Auflage). Klett | Kallmeyer.

Danksagung

Finanziert durch die Europäische Union – NextGenerationEU und gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung. Die geäußerten Ansichten und Meinungen sind ausschließlich die des Autors/der Autorin und spiegeln nicht unbedingt die Ansichten der Europäischen Union, Europäischen Kommission oder des Bundesministeriums für Bildung und Forschung wider. Weder Europäische Union, Europäische Kommission noch Bundesministerium für Bildung und Forschung können für sie verantwortlich gemacht werden.

Making Makers: Ein Seminarkonzept zum Educational Making in der Lehramtsausbildung im Fach Physik

Fabian Bernstein*, Thomas Wilhelm*

* Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt
bernstein@physik.uni-frankfurt.de, wilhelm@physik.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

Educational Making ist ein produktorientierter, interdisziplinärer und konstruktivistischer Ansatz, der insbesondere für die schulische MINT-Bildung neue Impulse verspricht. Um zukünftige Physiklehrkräfte zu befähigen, Making-Aktivitäten an ihren Schulen durchzuführen, wurde am Institut für Didaktik der Physik der Goethe-Universität Frankfurt mit Förderung durch die Joachim Herz Stiftung ein Seminarkonzept entwickelt und implementiert, das dazu dienen sollte, Lehramtsstudierende der Physik in die Prinzipien des Educational Making einzuführen. Insbesondere sollten die Studierenden a) technische Grundfertigkeiten in CAD, 3D-Druck und Mikrocontroller-Programmierung erwerben, b) Konzepte des Making praktisch kennenlernen und theoretisch reflektieren sowie c) lernen, schulische Randbedingungen bei der Planung von Making-Aktivitäten angemessen zu berücksichtigen. Die Evaluation des in drei Semestern angebotenen Seminars zeigt, dass das Seminarkonzept positiv durch die Studierenden (N = 23) aufgenommen und die angestrebten Ziele weitgehend erreicht werden konnten.

1. Warum Making im schulischen Kontext?

Educational Making erfährt seit geraumer Zeit neue Aufmerksamkeit – gerade im Hinblick auf die schulische Ausbildung in den MINT-Fächern – was sich in Initiativen wie dem „School Fablab-Netzwerk“ [1] oder „Make Your School“ [2] und einer zunehmenden Zahl von Makerspaces an Schulen widerspiegelt [3]. Während Akteure aus der Wirtschaft Maker Education primär unter dem Gesichtspunkt der Ausbildung von Problemlöse-, Innovations- und Teamfähigkeit diskutieren [3], regelmäßig unter Rückgriff auf den Begriff der 21st Century Skills [4] (für eine kritische Einordnung s. [5]), werden im Bereich der naturwissenschaftlichen Bildung Chancen insbesondere im Zusammenhang mit forschend-entdeckendem Lernen gesehen, verbunden mit der Hoffnung, mehr Schüler*innen für Naturwissenschaften zu begeistern [6]. MakerSpaces als innovative und projektzentrierte Lernumgebungen scheinen in besonderer Weise geeignet, diese Hoffnungen einzulösen.

Ob und bis zu welchem Grad diese „Chance Makerspace“ [7] in der schulischen Praxis tatsächlich ergriffen werden kann, hängt dabei neben der materiellen Ausstattung der Schulen und Implementierung praxistauglicher Konzepte maßgeblich von der Verfügbarkeit adäquat qualifizierter Lehrkräfte ab. Dem steht allerdings entgegen, dass Making – als Klasse von Aktivitäten, in denen konkrete physische oder digitale Prototypen in einem Prozess erstellt werden, der durch Selbstorganisation, Project Ownership und Kreativität gekennzeichnet ist [8, 9] – in die universitäre Ausbildung angehender Lehrkräfte der naturwissenschaftlichen Fächer vielerorts noch keinen Eingang gefunden hat.

Aus diesem Grund wurde am Institut für Didaktik der Physik der Goethe-Universität Frankfurt ein von der Joachim Herz Stiftung gefördertes Seminar für Studierende des Lehramtsstudiums Physik entwickelt, das sowohl technische Kompetenzen der Studierenden schulen als auch konzeptionelle Grundlagen des Making für die Arbeit mit Schüler*innen vermitteln und so Studierende befähigen sollte, eigenverantwortlich Making-Projekte an ihren zukünftigen Schulen durchzuführen.

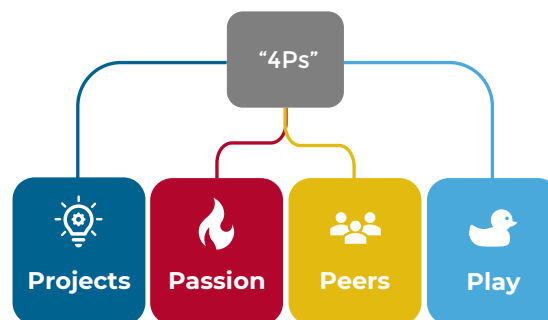
2. Operationalisierung des Begriffes „Making“

Die Entwicklung eines Seminarkonzeptes zum „Making“ setzt eine begriffliche Klärung voraus, was unter „Making“ verstanden werden soll und welche Konzepte und Aspekte als konstitutiv angesehen werden sollen – mithin eine Entscheidung, wie der weit gefasste Begriff des „Making“ inhaltlich ausgefüllt und konkret operationalisiert werden soll. Ein Vergleich der Begriffsbestimmungen verschiedener Autoren (siehe Tabelle 1) zeigt, dass zwischen unterschiedlichen Definitionsansätzen nur partielle Übereinstimmungen bestehen. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass es sich bei diesen Definitionen um nachträgliche Abstraktionen von bestehenden, eher heterogenen Praktiken handelt [10, 11] – überspitzt gesagt, geht der „Makerspace“ und das „Making“ den Anstrengungen zu ihrer begrifflichen Bestimmung voraus. Eine genauere Analyse zeigt, dass der Begriff des „Making“ verschiedene semantische Schwerpunkte aufweist, die je nach Autor und Interessenlage unterschiedlich akzentuiert werden [3].

Tab. 1 Definitionen des Begriffes „Making“

Definition „Making“	Autor
“Making is fundamental to what it means to be human. We must make, create, and express ourselves to feel whole.”	Hatch [12]
„Ein Maker [ist] eine Person, die etwas selbst baut, auseinandernimmt, erweitert, kreiert, (um-)gestaltet, Lösungen findet, seine oder ihre Ideen umsetzt. [...] Making ist ein Besinnen auf das, was der Mensch befähigt ist zu tun: Dinge zu bauen und Ideen umzusetzen, um seine Welt und deren Wandel mitzugestalten.“	Assaf [13]
“Making is using stuff to make stuff (that sometimes does stuff, but sometimes is just cool).”	Heroman [14]
“Make – to build or adapt objects by hand, for the simple personal pleasure of figuring out how things work.”	Honey & Kanter [15]
„Yet the origin of the Maker Movement is [...] ‘experimental play’.“	Dougherty [16]
“Making is about the active role construction plays in learning. The maker has a product in mind when working with tools and materials.”	Martinez & Stager [17]
„Selbermachen mit digitalen Technologien.“	Stilz et al. [9]
„Unter Making verstehen wir den Prozess des selbstgesteuerten und spielerischen Tüftelns mit verschiedenen analogen und digitalen Werkstoffen und Technologien, der von eigenen Ideen ausgeht und zur Konstruktion von Objekten oder Prototypen führt.“	Ingold & Maurer [18]
„Die Maker Education zielt darauf ab, Lernende dazu zu befähigen, möglichst selbstständig eigene Ideen mithilfe von analogen und digitalen Produktionsmitteln und Materialien umzusetzen.“	Ingold & Maurer [11]
“Making ist eine interessengesteuerte Verbindung von Kompetenzerwerb und Kompetenzanwendung.“	Ingold & Maurer [11]

Vielversprechender, als sich auf eine Definition festzulegen, scheint daher, sich auf charakteristische Merkmale zu konzentrieren, die generell als konstitutiv für Making-Aktivitäten angesehen werden. Für Mitchell Resnick, Nachfolger von Seymour Papert – dem Begründer des Konstruktivismus und Spiritus rector der Maker-Bewegung – am MIT, sind dies die 4Ps: „Projects“, „Passion“, „Peers“ und „Play“ (siehe Abb. 1) [19].

**Abb. 1:** Die „4Ps“ des Making nach Resnick [19]

Von zentraler Bedeutung für das „Educational Making“, also Making-Aktivitäten in formalen oder zumindest expliziten Bildungskontexten, ist zudem das Konzept der „Design Challenge“. Unter Design Challenges sind „problembasierte und teilstrukturierte Aufgaben, die selbstentdeckendes Lernen ermöglichen“ [11] zu verstehen, die in Bildungskontexten dazu eingesetzt werden, Lernprozesse zu initiieren [20]. Wesentliches Element von Design Challenges ist, dass von den drei Dimensionen Zielstellung, Material und Lösungsweg (siehe Abb. 2) mindestens eine mindestens teilweise offen bleiben muss.

**Abb. 2:** Die drei Dimensionen von Design Challenges

Diese Offenheit ist für Making-Aktivitäten generell konstitutiv: „Wenn 30 Kinder nach einer Unterrichtsstunde relativ gleiche Produkte erstellt, z. B. einen Roboter programmiert haben, ist dies eben keine typische Aktivität im Sinne der Maker-Education.“ [21] Design Challenges lassen daher immer Freiheitsgrade bei ihrer Bearbeitung, was auch entscheidend für eine Identifikation der Teilnehmenden mit der Design Challenge bzw. der von ihnen entwickelten Lösung ist [22]. Infolgedessen haben Design Challenges, anders als typische (Übungs)aufgaben in der Physik,

nicht eine richtige Lösung, sondern ermöglichen unterschiedliche Lösungen, die mehr oder weniger gelungen im Hinblick auf verschiedene Problemdimensionen sein können.

3. Das Seminarkonzept

Das entwickelte Seminarkonzept orientiert sich neben den 4Ps und dem Konzept der Design Challenge an dem Grundgedanken, dass für die Implementierung von Making-Aktivitäten im schulischen Kontext unter der Qualifikationsperspektive angehender Lehrkräfte drei Aspekte von besonderer Bedeutung sind: technische Skills, konzeptionelle Grundlagen sowie Einsicht in schulische Rahmenbedingungen. Mit anderen Worten: Making-Aktivitäten in der Schule erfolgreich durchführen zu können, setzt von Seiten der Lehrkräfte – so die Hypothese – zunächst voraus, verstanden zu haben, was „Making-Aktivitäten“ ausmacht und von anderen methodischen Formen unterscheidet, erfordert aber darüber hinaus die technischen Kompetenzen, Making-Aktivitäten erfolgreich umzusetzen sowie die Fähigkeit, schulische Rand- und Rahmenbedingungen angemessen zu berücksichtigen, mögliche Schwierigkeiten zu antizipieren und diesen planerisch zu begegnen.

Daneben sind eine ganze Reihe anderer Gelingensbedingungen für die Einbettung von Making-Aktivitäten im schulischen Kontext beschrieben [3, 18, 23], deren Vorliegen aber nicht im Zuge der Qualifikation von Lehramtsstudierenden im Rahmen der universitären Ausbildung sichergestellt werden kann. Das auf vierzehn Wochen angesetzte Seminarkonzept ist in fünf Blöcke unterteilt (siehe Abb. 3). Auf eine Einführung in die konzeptionellen Basics des Educational Making folgte eine Einheit zum Thema „Programmierung von Mikrocontrollern“, eine weitere zu „CAD & 3D-Druck“ sowie eine Einführung in die Verbindung von mechanischem und elektrischem Design (MCAD – ECAD), das eine Art Synthese aus den beiden vorgehenden Themenfeldern ermöglichen sollte. Abschließend wurden die im Seminar erworbenen Erfahrungen mit Blick auf die praktische Implementierung im schulischen Kontext reflektiert. Das strukturierende Prinzip der längeren Einheiten zu Mikrocontrollern und 3D-Druck war der fortschreitende Übergang von Instruktions- zu Konstruktionsphasen, wobei die Studierenden im ersten Teil (zwei Wochen) mit schrittweise komplexeren Übungsaufgaben konfrontiert waren, die teils über ein Learning Management System der Universität in Form eines

„Blended Learning“ vorgehalten wurden, um auf unterschiedliche Vorkenntnisse und Interessen der Studierenden eingehen zu können. Im zweiten Teil (drei Wochen) wurde das Konzept der Design Challenge als didaktischer Doppeldecker eingeführt: einerseits mussten die Studierenden eine Design Challenge zum jeweiligen Thema lösen, andererseits sollten sie das Prinzip der Design Challenge selbst reflektieren, um zu verstehen, wie Design Challenges für Schülerinnen und Schüler gestellt werden sollten, welche Fallstricke zu vermeiden und welche Aspekte zu bedenken sind. Jede Design Challenge wurde durch eine Präsentation abgeschlossen, in der die Studierenden die von ihnen entwickelten Lösungen vorgestellt haben. An Ausstattung stand eine FDM-3D-Druckfarm, die eigens für das Seminar am Institut aufgebaut wurde, sowie für jeden Studierenden ein Mikrocontroller-Set zur Verfügung.

4. Ergebnisse und „Lessons learned“

Über die Dauer von drei Semestern (Sommersemester 2022 bis Sommersemester 2023) haben insgesamt 23 Studierende des Haupt-/Realschullehramtes sowie des gymnasialen Lehramtes Physik am Making-Seminar teilgenommen. Schon während der Durchführung der Lehrveranstaltung zeichnete sich ab, dass die ursprüngliche Planung in einigen Teilen überarbeitet werden musste:

- Die Beschäftigung mit den konzeptionellen Grundlagen des Making ist am Anfang des Seminars mangels eigener Erfahrung der Studierenden mit Making und Makerspaces nicht sinnvoll. Making ist ein Konzept, das sich am besten im Nachvollzug, das heißt: auf der Grundlage eigener Erfahrungen, erschließt. Daher wurde diese theoretische Einheit bei späteren Durchgängen zwischen den Themenfeldern „Mikrocontroller“ und „CAD & 3D-Druck“ platziert.
- Die Einarbeitung sowohl in die Programmierung von Mikrocontrollern als auch CAD und 3D-Druck ist für viele Studierende nicht trivial und erfordert mehr als drei Zeitstunden. Daher wurde das Themenfeld ECAD-MCAD in späteren Durchgängen in die Hausarbeiten verlegt, um zusätzlichen Raum für die Einführungen bzw. die Design Challenges zu gewinnen.

Darüber hinaus wurden verschiedene Evaluationsmaßnahmen eingesetzt, um Stärken und Schwächen der Seminarkonzeption zu identifizieren. Neben der

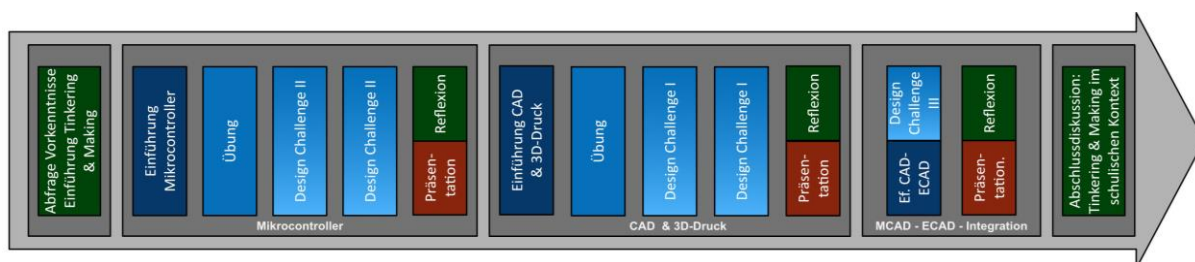


Abb. 3: Ursprüngliche Ablaufplanung des Seminars

universitätseigenen Evaluation wurde eine Kurzbefragung am Ende der Themenblöcke „Programmierung von Mikrocontrollern“ und „CAD und 3D-Druck“ in Form einer kurzen schriftlichen Befragung mit offenen und geschlossenen Items durchgeführt. Die geschlossenen Items wurden mithilfe einer fünfstufigen Likert-Skala mit den Endpunkten „stimme überhaupt nicht zu“ (= 0) und „stimme voll und ganz zu“ (= 5) bewertet (siehe Abb. 4).

Deutlich wird, dass die Studierenden einerseits die einzelnen Seminarbausteine überwiegend als hilfreich empfunden haben und positiv bewerten, andererseits aber auch, dass die Selbstwirksamkeitserwartung zur Durchführung von Projekten mit Schülerinnen und Schülern nur begrenzt ausgeprägt ist. Dies hängt, wie in Gesprächen mit den Studierenden deutlich geworden ist, nicht zuletzt mit dem Bewusstsein zusammen, dass die gleichzeitige Betreuung mehrerer unterschiedlicher Making-Projekte anspruchsvoll ist und Debugging und Troubleshooting mit Schülerinnen und Schülern eine hohe eigene Sicherheit im Umgang mit den jeweiligen Technologien voraussetzen. Dieses Problem ist bekannt und in der Literatur beschrieben [13]. Einerseits kann dem durch verschiedene Maßnahmen der Komplexitätsreduktion (bspw. Beschränkung der Hardware, Software oder anderer Ressourcen) entgegengewirkt werden, andererseits liegt hierin aber auch die für manche Lehrkraft ungewohnte Herausforderung, in Situationen zu geraten, in denen sie die Antworten auf Fragen von Schülerinnen und Schülern selbst nicht kennt und diese Fragen auch nicht – oder zumindest nur sehr begrenzt – antizipieren kann. Dies ist als Kontrast zu eher instruktionalen Lernsettings zu sehen, in denen Lehrkräfte es in der Regel nicht mit derartigen Schwierigkeiten zu tun bekommen [4].

In den offenen Items sollten die Studierenden für jeden Themenblock angeben, was ihnen gefallen hat und welche Verbesserungen sie sich gegebenenfalls gewünscht hätten. Positiv äußerten sich die Studierenden zu den offenen Aufgabenstellungen, dem innovativen Charakter des Seminars, der Möglichkeit, Aufgaben, die dem eigenen Lernstand entsprechen,

zu wählen und der intrinsischen Motivation, die sich aus dem vergleichsweise selbstbestimmten Lernsetting ergeben. Kritisch angemerkt wurden in erster Linie die begrenzt zur Verfügung stehende Zeit sowie das manchmal (zu) hohe Tempo der Einführungen.

Rückblickend zeigt sich, dass das Seminarkonzept als solches aufzugehen scheint, dass aber der Umgang mit den außerordentlich heterogenen Voraussetzungen der Studierenden – die Spanne reichte von Studierenden, die noch nie mit Coding oder 3D-Druck in Berührung gekommen waren, bis hin zu Studierenden mit Zweitfach Informatik und Vorerfahrungen im CAD – erhebliche Herausforderungen für die Durchführung des Seminars mit sich brachte, da gemeinsame Instruktionsphasen nur begrenzt möglich waren. Für eine Weiterentwicklung des Konzeptes unter vergleichbaren Rahmenbedingungen sollte daher über die Bereitstellung weiterer unterstützender Maßnahmen nachgedacht werden, um einer potenziellen Überforderung weniger leistungsstarker Studierender entgegenzuwirken. Auch könnte der Einsatz von „Peer Teaching“, das sich quasi von selbst im Seminar eingestellt hat, vorab systematischer gedacht werden.

Darüber hinaus könnte als Maßnahme zur Stärkung der Selbstwirksamkeitserwartung der Studierenden die Umsetzung von Maker-Aktivitäten an einem an vielen Universitäten vorhandenen Lern-Lehr-Labor mit Schülerinnen und Schülern eingeübt werden. An der Goethe-Universität Frankfurt wird aus dieser Erwägung heraus zum Sommersemester 2024 ein Seminar zum Thema „Making im Schülerlabor“ angeboten, das die Übernahme von Making-Aktivitäten in die schulische Praxis weiter begleiten und erleichtern soll.

5. Literatur

- [1] Homepage des Projektes „Make Your School“: <https://makeyourschool.de/> (Stand 05/2024)
- [2] Homepage der Initiative „School Fablab“ der Hochschule Rhein-Waal: <https://www.school-fablab.de/> (Stand 05/2024)



Abb. 4: Ergebnisse der Kurzevaluation

- [3] Maurer, B., & Ingold, S. (2023). Making als Bildungsinnovation: Gelingensfaktoren aus Sicht der Schulentwicklung. *MedienPädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung*, 56 (Making & more), S. 37–68. <https://doi.org/10.21240/mpaed/56/2023.12.02.X>
- [4] Merz, T. (2019). Großes Potential für Schulen der Zukunft. MakerSpaces ermöglichen und erfordern neue Lernformen und Schulentwicklung. In: Ingold, S., Maurer, B. & Trüby, D. (Hrsg.): *Chance MakerSpace. Making trifft auf Schule*. München: kopaed, S. 33-44.
- [5] Schmid, L. (2019). Menschzentriert–Kollaborativ–Handlungsorientiert. Design-Ansätze für die Primarschule des 21. Jahrhunderts. *Chance MakerSpace. Making trifft auf Schule*. München: kopaed, S. 19-32.
- [6] Vossoughi, S. & Bevan, B. (2014). Making and Tinkering: A Review of the Literature. National Research Council Committee on Out of School Time STEM.
- [7] Ingold, S., Maurer, B., & Trüby, D. (2019). *Chance MakerSpace. Making trifft auf Schule*. München: kopaed.
- [8] Harris, E., Winterbottom, M., Xanthoudaki, M., Calcagnini, S. & De Puer, I. (2017). Tinkering. A practitioner guide for developing and implementing tinkering activities.
- [9] Stilz, M. Ebner, M. & Schön, S. (2020). Maker Education. Grundlagen der werkstatorientierten digitalen Bildung in der Schule und Entwicklungen zur Professionalisierung der Lehrkräfte. In: Martin R. & Simone H. (Hrsg.): *Digital?! Perspektiven der Digitalisierung für den Lehrerberuf und die Lehrerbildung*. Münster: Waxmann, S. 143-159.
- [10] Blikstein, P. (2018). Maker movement in education: History and prospects. *Handbook of technology education*, S. 419-437.
- [11] Ingold, Selina & Maurer, Björn. (2020). MakerSpace - Raum für Kreativität. Ein Design-Based Research-Projekt zur partizipativen Entwicklung einer Making-Lernumgebung in einer Primarschule. Teil 2: Maker Education - Anliegen, Prinzipien, Praxis. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33324.49288>
- [12] Hatch, M. (2013). *The Maker Movement Manifesto: Rules for Innovation in the New World of Crafters, Hackers, and Tinkerers* (1. Aufl.), Mc Graw-Hill.
- [13] Assaf, D. (2019). Die Musterlösung liegt nicht bei - Best Practices zur Umsetzung von open-ended Maker-Projekten. In: Ingold, S., Maurer, B. & Trüby, D. (Hrsg.): *Chance MakerSpace. Making trifft auf Schule*. München: kopaed, S. 263-273.
- [14] Heroman, C. (2019). Making and Tinkering With STEM: Solving Design Challenges With Young Children. National Association for the Education of Young Children.
- [15] Honey, M., & Kanter, D. (2013). *Design-Make-Play: Growing the next generation of science innovators*. New York: New York Hall of Science, S. 4.
- [16] Dougherty, D. (2013). The Maker Mindset. In M. Honey, & D. E. Kanter (Hrsg.), *Design. Make. Play. Growing the Next Generation of STEM Innovators*. Routledge, S. 7-16.
- [17] Martinez, S. L., & Stager, G. (2013). *Invent to learn: Making, Tinkering, and Engineering in the Classroom*. Torrance: Constructing Modern Knowledge Press.
- [18] Ingold, S. & Maurer, B. (2019). Making in der Schule. Reibungspunkte und Synergieeffekte. In: Ingold, S., Maurer, B. & Trüby, D. (Hrsg.): *Chance MakerSpace. Making trifft auf Schule*. München: kopaed, S. 59-86.
- [19] Resnick, M. (2017). *Lifelong kindergarten: Cultivating creativity through projects, passion, peers, and play*. MIT press.
- [20] Crichton, S. E. & Carter, D. (2017). Taking Making into the Schools: An Immersive Professional Development Approach. In: I. Management Association (Hrsg.), *Educational Leadership and Administration: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*, S. 1712-1740. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-1624-8.ch078>
- [21] Schön, S., Narr, K., Grandl, M., & Ebner, M. (2019). Making mit Kindern und Jugendlichen. Einführung und ausgewählte Perspektiven. In: Ingold, S., Maurer, B. & Trüby, D. (Hrsg.): *Chance MakerSpace. Making trifft auf Schule*. München: kopaed, S. 45-58.
- [22] Clapp, E. P., Ross, J., Ryan, J. O., & Tishman, S. (2016). *Maker-centered learning : empowering young people to shape their worlds*. Jossey-Bass.
- [23] Ingold, Selina & Maurer, Björn. (2021). MakerSpace - Raum für Kreativität. Ein Design-Based Research-Projekt zur partizipativen Entwicklung einer Making-Lernumgebung in einer Primarschule. Teil 6: Making und Schule – Synergien, Reibungspunkte, Handlungsbedarf. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15683.73760>

Modulübergreifendes Blended Learning in der Mathematikausbildung zur Experimentalphysik im Lehramtsstudium Physik

Lydia Kämpf*, Frank Stallmach*

*Universität Leipzig, Institut für Didaktik der Physik, Vor dem Hospitalore 1, 04103 Leipzig
lydia.kaempf@uni-leipzig.de, stallmac@physik.uni-leipzig.de

Kurzfassung

Zu einer guten Physikausbildung gehört auch eine gute und transferfähige Mathematikausbildung. An der Universität Leipzig ist die Mathematikausbildung als mathematisches Methodenseminar in die Physikvorlesungen der ersten beiden Semester des Lehramtsstudiums Physik eingebettet. Die Mathematikseminare werden in einem Blended Learning Format durchgeführt, das sich an Gestaltungskriterien für digitale Lehr-Lern-Sequenzen orientiert und auf drei Säulen ruht: Parallelität zur Physikvorlesung, Spiralcurricularität zum Vorwissen und Interaktivität in Videos, Übungen und Seminaren. Eine erste Studie zeigte eine hohe Akzeptanz des Blended Learning Ansatzes bei den Studierenden und befriedigende bis gute Lernergebnisse in zwei ausgewählten Lernszenarien. Dieser Artikel stellt die Konzeption und erste Ergebnisse der Erprobung dieses Blended Learning Konzepts für die mathematischen Methodenseminare in den Lehramtsstudiengängen Physik vor.

1. Einleitung

Die Studieneingangsphase im Lehramtsstudium Physik ist für die meisten Studierenden schwierig. Sie ist gekennzeichnet durch hohe Abbrecherquoten und hohe Arbeitsbelastung [1]. Die Studierenden wünschen sich eine didaktische Aufarbeitung und Unterstützung in dieser Eingangsphase. Um eine adäquate und lernerzentrierte Ausbildung zu gewährleisten, verfolgt die Universität Leipzig seit 2014 als eine von sechs deutschen Universitäten das Modell sui generis mit Veranstaltungen, die speziell auf Lehramtsstudierende zugeschnitten sind [1,2]. Die experimentalphysikalischen Anfangsmodule zur Mechanik und Elektrodynamik beinhalten neben der lehramtspezifischen Vorlesung eigene Übungen und Tutorien sowie eigene mathematische Methodenseminare (MaMes). Alle Veranstaltungen werden von Lehrenden durchgeführt und didaktisch aufbereitet, die der Arbeitsgruppe Hochschuldidaktik Physik angehören oder schon lange in der Lehre mit Lehramtsstudierenden tätig sind.

Da nur etwa die Hälfte der Lehramtsstudierenden Mathematik als Zweitfach wählt [1], werden an der Universität Leipzig in die 10 Leistungspunkte starken Experimentalphysikmodule zur Mechanik und Elektrodynamik eigene mathematische Methodenseminare integriert, die schrittweise die notwendige Mathematik zur Beschreibung physikalischer Phänomene just-in-time einführen. Seit dem Wintersemester 2022/23 werden diese im Blended Learning Format durchgeführt, um der heterogenen Studierendenschaft ein möglichst hohes Maß an Differenzierung zu bieten. So können die Studierenden ihr Tempo, ihre Lernzeit, mögliche Wiederholungen und die verwendeten Lernmaterialien an ihre eigene Lernstrategie anpassen [3,4,5,6,7].

In diesem Beitrag stellen wir den spiralcurricularen Blended Learning Ansatz für die mathematische Ausbildung in unseren Lehramtsstudiengängen Physik in den ersten beiden Modulen der Experimentalphysik vor. Er ist an die mathematischen Anforderungen der physikalischen Grundlagenvorlesungen angepasst. Das Kursdesign wird mit Hilfe der drei innovativen Säulen: Spiralcurricularität, Parallelität und Interaktivität beschrieben.

Anhand der Lernsequenzen zum Rechnen mit komplexen Zahlen und zur Einführung von Lösungsverfahren von Differentialgleichungen diskutieren wir erste Ergebnisse zur Lernwirksamkeit und zum Aufbau von anwendbarem Langzeitwissen durch unser Konzept der integrierten Mathematikausbildung.

2. Vorstellung des Kursdesigns

Das Lehramtsstudium an den meisten Universitäten in Deutschland erfordert die gleichzeitige Ausbildung in zwei von den Studenten frei wählbaren Wissenschaften, die ihre beiden Hauptunterrichtsfächer als zukünftige Lehrkräfte sein werden. Da nur etwa die Hälfte der Studierenden Mathematik als Zweitfach wählt [1], ist ein auf die Lehrveranstaltungen der Experimentalphysik für Lehramtsstudiengänge angepasstes mathematisches Methodenseminare (MaMe) unabdingbar. Als gemeinsames Grundwissen aller Studierenden kann und werden daher die Bildungsstandards im Fach Mathematik für die allgemeine Hochschulreife [8] genutzt.

Auf dieser Grundlage wurden MaMes parallel zur Physikvorlesung entwickelt. Die Seminare folgen dem Blended Learning Ansatz, bei dem der theoretische Input durch zwei interaktive Lehr-Lernvideos,

Tab. 1: Kapitelüberschriften der Physikvorlesungen und Übungen zur Experimentalphysik I und II und die in den zugehörigen MaMe-Seminaren behandelten mathematischen Themen.

Themenliste der MaMe-Seminare zu den Vorlesung Mechanik (EP1) und Elektrodynamik (EP2)				
Nr.	Themen der Mechanikvorlesung	Themen der MaMes 1	Themen der Elektrodynamikvorlesung	Themen der MaMes 2
1	Einführung in den Mechanikkurs	Einführung in die Mathematischen Methoden	Einführung in den Elektrodynamikkurs	Funktionen mehrerer Veränderlicher
2	Mechanik des Massepunkts	Funktionen & Vektoren zur Beschreibung physikalischer Gesetze & Bahnkurven	Das elektrische Feld einer Punktladung	Das kartesische, Zylinder- & Kugelkoordinatensystem
3	Newton'sche Axiome & Erhaltungssätze der Mechanik	Einführung in Differentialgleichungen & Trennung der Variablen zur Lösung von Bewegungsgleichungen	Das elektrische Feld und das elektrische Potential von Punktladungen - Energieerhaltung	Die Differentialoperatoren Divergenz und Laplace
4	Bewegung mit nicht-konstanter Beschleunigung	Partielle Integration & Integration durch Substitution	Das elektrische Feld von Ladungsverteilungen & der elektrische Fluss	Oberflächenintegrale & der Integralsatz von Gauß
5	Systeme von Massepunkten	Volumenintegrale zur Bestimmung von Schwerpunkten	Das elektrostatische Feld eines Kondensators und seine Kraftwirkung auf Ladungen	Linienintegrale zur Berechnung von Potential und Arbeit, die im Kondensator am Elektron verrichtet wird
6	Dynamik starrer Körper	Massen- und Volumenintegrale zur Berechnung des Trägheitsmoments für starre Körper	Netzwerke (dc) & Kirchhoff'sche Regeln	Inhomogene Differentialgleichungen zur Herleitung der Ladekurve der RC-Reihenschaltung
7	Mechanische Schwingungen	Einführung der komplexen Zahlen: Formen der arithmetischen und grafischen Darstellung, Rechenoperationen, das komplex Konjugierte	Magnetfelder stationärer Ströme	Anwendung des Biot-Savart-Gesetz
8	Der freie gedämpfte Oszillator	Klassifizierung von Differentialgleichungen & Exponentialansatz zur Lösung für den frei gedämpften Oszillator	Faraday'sches Gesetz und Lenz'sche Regel	Stokes'scher Integralsatz zur Umformung der 3. & 4. Maxwellgleichung
9	Mechanik deformierbarer Körper, Flüssigkeiten & Gase	Potenzreihenentwicklung & Näherungspolynome	Wechselstromkreise mit komplexen Widerständen, Zeigerdiagramme	Vertiefung komplexe Zahlen zur Beschreibung von Impedanzen im Wechselstromkreis
10	Die Gravitationskraft als konservatives Kraftfeld	Einführung in die Vektoranalysis: Die Differentialoperatoren Rotation und Gradient	Die Entstehung elektromagnetischer Wellen, der Hertz'sche Dipol	Zusammenfassung des Kurses

einem Skript und erster gamifizierter Übungsaufgaben im Selbststudium erfolgt. Im anschließenden Präsenzseminar wird das erlernte mathematische Wissen genutzt und auf weitere aktuell relevante physikalische Beispiele gemeinsam angewendet. Dieses

Wissen können die Studierenden im anschließenden Selbststudium in Aufgaben ihrer Physikübungsblättern festigen, bei denen die Lösung mit der neu erlernten Mathematik besonders elegant erfolgen kann.

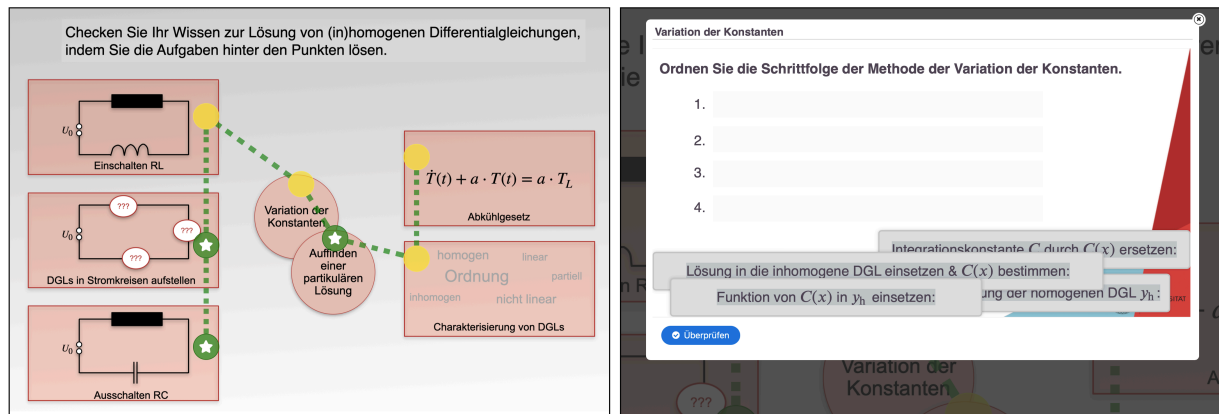


Abb. 1: Game Map mit verschiedenen Übungen zum Lösen (in)homogener Differentialgleichungen zum MaMe-Seminar 06 „Inhomogene Differentialgleichungen zur Herleitung der Ladekurve der RC-Reihenschaltung“.

Die MaMes sind didaktisch so aufgearbeitet, dass der Transfer in die Physik begünstigt wird. Für einen geringen cognitive load sind die Notationen in den Physik- und Mathematikveranstaltungen aufeinander abgestimmt [9] und die beiden Veranstaltungen parallel verwoben, damit die in den MaMes eingeführte Mathematik zeitnah in einem relevanten physikalischen Beispiel geübt werden kann.

2.1. Parallelität zur Physikvorlesung

Wie Dunn und Barbanel [10] anhand eines integrierten Mathematik-/Physikkurses mit den Schwerpunkten Elektrizität und Magnetismus gezeigt haben, macht eine solche verzahnte Lehre die mathematischen Themen für Studierende relevant, stellt eine Verbindung zu physikalischen Problemen her und fördert das Denken über mathematische und physikalische Lerninhalte.

Die Tabelle 1 zeigt den idealen Ablauf, wann die Mathematik verzahnt zu den entsprechenden physikalischen Themen im ersten Jahr des Physiklehramtsstudiums behandelt werden sollte. Die Reihenfolge der Themen der zwei Vorlesungen pro Woche in den beiden Experimentalphysik-Modulen (Mechanik EP 1 und Elektrodynamik EP 2) bestimmt die Themen, die in den entsprechenden integrierten MaMe Seminaren behandelt werden [2, 11].

Im Sinne des Blended Learnings findet die Selbstlernphase über die ganze Zeit zwischen den jeweiligen Präsenzseminaren statt, vom Erlernen der theoretischen Grundlagen in interaktiven Videos vor dem Präsenzseminar bis zum Anwenden der Mathematik in den physikalischen Übungsblättern nach dem Seminar.

2.2. Spiralcurricularität bezüglich allgemeiner Hochschulreife und der beiden Module

In Tabelle 1 ist am Beispiel der Seminare zu Differentialgleichungen erkennbar, dass sich das mathematische Wissen spiralcurricular im Laufe des Semesters vertieft. Aufbauend auf dem Wissen zur Differential- und Integralrechnung der allgemeinen Hochschulreife [8] werden im Seminar 03 Differentialgleichungen und die erste Lösungsmethode der Trennung der Variablen eingeführt. Dieses

mathematische Wissen wird physikalisch zur Lösung erster einfacher Bewegungsgleichungen, wie z.B. zur Herleitung der kosmischen Geschwindigkeit, angewendet und geübt.

Die erste vertiefende Schleife zu Differentialgleichungen wird im gleichen Semester im Seminar 08 mit der Klassifizierung von Differentialgleichungen und der Lösungsmethode des Exponentialansatz durchlaufen. In den MaMes zur Elektrodynamikvorlesung werden im Seminar 06 diese Lösungsmethoden für inhomogene Differentialgleichungen erweitert, um die zeitlichen Verläufe von Spannung und Stromstärke bei Ein- und Ausschaltvorgängen in verschiedenen Netzwerken herzuleiten.

Die Lerneinheiten zu Differentialgleichungen sind aufeinander aufbauend. Sie werden dreimal nacheinander aufgegriffen, gefestigt und vertieft. Analoges gilt für die anderen Themen der MaMes.

2.3. Interaktivität in Videos, Aufgaben und im Präsenzseminar

Interaktive H5P Videos und interaktive H5P Game Maps sind das Herzstück des ersten einführenden Selbststudiums der MaMes.

2.3.1. Interaktivität in den Videos

Für jede der Lernsequenzen wurden jeweils zwei Videos bereitgestellt. Das erste Video führt in die reine Mathematik ein. Das zweite Video wendet die neu erlernte Mathematik an, um ein physikalisches Problem zu lösen oder eine wichtige Gleichung aus der Physikvorlesung herzuleiten. Die Videos der MaMes zur Mechanik sind im Durchschnitt 12 min 43 s lang. Dabei sind die rein mathematischen Videos im Durchschnitt 1min 12s kürzer als die zweiten Videos.

Bei der Gestaltung der interaktiven Erklärvideos wurden die Qualitätskriterien für gute Erklärvideos von Kulgemeyer et al. [12,13] berücksichtigt. Bei der Planung und Produktion der Videos wurde darauf geachtet, dass sie gut strukturiert sind, nur die präzisesten und minimalen Erklärungen enthalten, die zum Verständnis der mathematischen Prinzipien notwendig sind, und dass die Inhalte eine hohe Relevanz für die Physikvorlesung haben. Der Inhalt der Videos orientiert

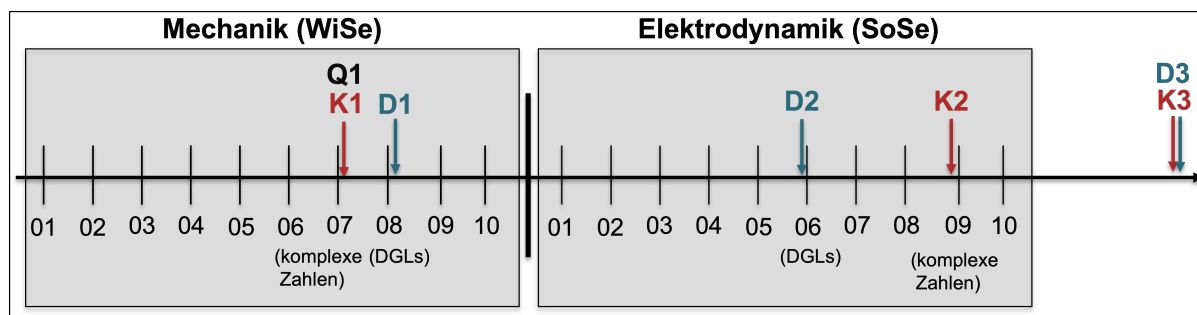


Abb. 2: Zeitplan der MaMe Seminare in den beiden aufeinanderfolgenden Semestern. Die Zahlen beziehen sich auf die in Tabelle 1 angegebenen Themen der jeweiligen Seminare. Angegeben sind die Zeitpunkte der Tests zur Untersuchung des Langzeitwissens zu den Themen Komplexe Zahlen (K1-K3), Differentialgleichungen (D1-D3) und eine Qualitätsumfrage Q1.

sich immer am Vorwissen der Studierenden, an relevanten physikalischen Beispielen, Analogien oder Modellen.

Chong et al. [14] haben herausgefunden, dass interaktive Videos die wertvollsten Komponenten eines gut angenommenen Flipped Classroom sind. Daran anlehnend enthalten unsere Videos zusätzlich interaktive Lernaufgaben, die die Lernenden dazu anregen, die neuen Informationen aktiv zu nutzen [12, 13, 15]. Diese interaktiven Elemente wurden den Videos mit Hilfe des Softwaretools H5P hinzugefügt. In jedem mathematischen Video zur Mechanik gibt es zwei bis drei Interaktionen. In den ersten Videos erfolgt die erste Interaktion nach durchschnittlich 3 min 35 s und in den zweiten Videos nach 6 min 45 s. Die Interaktionen befinden sich nach wichtigen Aussagen, neu gelernten arithmetischen Operationen oder längeren algebraischen Umformungen, so dass die Lernenden aufgefordert sind, das Video aktiv zu verfolgen und den Inhalt sofort anzuwenden.

Individuelle Rückmeldungen zu den Aufgaben zeigen den Lernenden ihren Lernstand auf und schlagen Wege vor, wie sie mit dem Video weiterlernen können. So beginnt der Wissenstransfer bereits während der Bearbeitung des Videos. Weitere interaktive Buttons, wie z.B. das Springen im Video in Abhängigkeit von der Beantwortung der Fragen oder Buttons mit versteckten Basis- oder weiterführenden Informationen, bieten ein breites Differenzierungsspektrum für die heterogene Lerngruppe [3,4].

2.3.2. Interaktivität in Aufgaben

Um den Transfer weiter zu fördern, können die Studierenden nach der Bearbeitung der Videos optional weitere formative interaktive Aufgaben lösen. Um die Studierenden zur Bearbeitung der Aufgaben zu motivieren, wurden mit den H5P-Modulen interaktive Präsentationen und Game Maps [16,17] abwechslungsreiche gamifizierte und interaktive Umgebungen gestaltet. Die implementierten Aufgaben beziehen sich immer auf die Hauptinhalte der Videos. Sie verlangen von den Studierenden die Anwendung der gerade gelernten Mathematik in einfachen Beispielen und bereiten auf die kommende Präsenzveranstaltung vor [15].

In Abbildung 1 ist eine solche gamifizierte Umgebung zum Thema Lösungsmethoden inhomogener Differentialgleichungen dargestellt. Im linken Bild ist die interaktive Umgebung zu sehen, in der sich hinter jedem gelben Punkt eine Aufgabe verbirgt. Die Verbindungslinien zeigen mögliche Lernwege an. Die Lernenden können ihren individuellen Lernweg bestimmen. Wurde eine Aufgabe richtig gelöst, färbt sich der Ort grün. Bei den Aufgaben handelt es sich in der Regel um Drag-and-Drop-Aufgaben, Textfelder und Multiple- oder Single-Choice-Fragen. Ein Beispiel einer Drag-and-Drop Aufgabe ist im rechten Fenster von Abbildung 1 zu sehen. Bei schwierigen Aufgaben sind als Differenzierungsmöglichkeit gestufte Hilfen implementiert [3,4]. In diesem Fall verborgen sich hinter den gelben Punkten interaktive Präsentationen, die die Aufgabe und die gestuften Hilfen als folgende, verlinkte Folien enthalten.

Nach der Beantwortung der Aufgaben erhalten die Studierenden wiederum Feedback. Dieses Feedback können sie freiwillig mit den Lehrenden teilen, um das folgende Präsenzseminar auf den aktuellen Lernstand abzustimmen. Die Abgabe ist freiwillig, um den Lern- und Leistungsraum voneinander zu trennen [17].

2.3.3. Interaktivität im Präsenzseminar

Das anschließende Präsenzseminar wird auch möglichst interaktiv gestaltet, indem eine anfängliche Frageunde oft durch ein Quiz motiviert wird und die Lerngruppe gemeinsam mit dem Lehrenden weitere physikalische Phänomene mathematisch beschreibt. Im Laufe des Seminars zieht sich der Lehrende immer mehr zurück und übernimmt die Rolle eines Moderators.

3. Evaluation des Kurses

Die Akzeptanz des neuen Kursdesigns mit den drei Säulen Parallelität, Spiralcurricularität und Interaktivität wurde mit Hilfe einer Befragung in zwei Kohorten C1 und C2 erhoben, die im Wintersemester 2022/23 bzw. Wintersemester 2023/24 ihr Physik-Lehramtsstudium begannen. Um neben der Akzeptanz auch den Wissenstransfer zu überprüfen, wurden zu drei verschiedenen Zeitpunkten Wissenstests zum Langzeitwissen zu den Themen komplexe Zahlen und

Tab. 2: Ergebnisse der Umfrage zur Qualität der Kurspfeiler Parallelität, Spiralcurricularität und Interaktivität mit mittleren Zustimmungswerten μ und Standardabweichungen σ .

Item		Stimme gar nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme vollkommen zu	μ	σ	μ	σ
Die Videos verdeutlichen die Relevanz der Mathematischen Methoden für den Mechanikkurs.	C2	0	4	11	6	3,10	0,47	3,24	0,57
	C1	2	2	18	19	3,32	0,61		
Die Analogie zwischen der Vektoralgebra und komplexen Zahlen ist verständlich.	C2	0	2	11	8	3,29	0,39	3,42	0,40
	C1	0	3	15	23	3,49	0,40		
Die Videos animieren mich durch interaktive Elemente zur aktiven Bearbeitung der Inhalte.	C2	1	1	6	13	3,48	0,63	3,34	0,77
	C1	2	7	10	22	3,27	0,83		

Einführung in die Differentialgleichungen durchgeführt (siehe Abb. 2).

3.1. Evaluation der drei Pfeiler Parallelität, Spiralcurricularität und Interaktivität

Abbildung 2 zeigt den Zeitpunkt der Evaluation Q1 der drei Säulen des Kurses. Sie erfolgte zusammen mit einer Befragung der Studierenden zur Qualität der interaktiven Videos im ersten Semester des Kurses zum Zeitpunkt des Seminars 07 [6]. Für jede Säule wurde ein eigenes Item am Beispiel der komplexen Zahlen formuliert, um Missverständnisse über die Dimension der Säulen zu vermeiden. So wird die Spiralcurricularität untersucht, indem die Studierenden die Aussage bewerten, dass sie die Analogien zwischen komplexen Zahlen und dem Vorwissen über Vektoren verstanden haben. Die Studierenden bewerten diese Aussage auf einer vierstufigen Likert-Skala. Die vier Antwortmöglichkeiten der Likert Skala wurden einem Zahlenwert gleichgesetzt (stimme überhaupt nicht zu $\hat{=}$ 1, stimme eher nicht zu $\hat{=}$ 2, stimme eher zu $\hat{=}$ 3, stimme vollkommen zu $\hat{=}$ 4). Auf diese Weise wurde für jedes Item ein mittlerer Zustimmungswert μ und eine Standardabweichung σ berechnet [19]. Tabelle 2 zeigt die Verteilung der Antworten für die Kohorten C1 ($N = 41$) und C2 ($N = 21$).

Die parallele Entwicklung von Mathematik und Physikvorlesung soll die Relevanz und Anschlussfähigkeit der mathematischen Methoden und der Physikvorlesung stärken. Tabelle 2 zeigt, dass 90% der Studierenden der Kohorte C1 und 81% der Studierenden der Kohorte C2 die Relevanz der MaMes für ihr Physikstudium erkennen. Die hohen Zustimmungswerte von $\mu_{C1} = 3,32$ ($\sigma = 0,61$) und $\mu_{C2} = 3,10$ ($\sigma = 0,47$) verdeutlichen die hohe Relevanz und durch die geringe Standardabweichung auch ein homogenes positives Empfinden der gesamten an der Umfrage teilnehmenden Studierendenschaft.

Der zweite wichtige Pfeiler der Spiralcurricularität wurde in dieser Umfrage am Beispiel des Aufgreifens des Vorwissens zur Vektoralgebra untersucht. 57 der 62 Befragten empfand das spiralcurriculare Aufgreifen anhand der Analogie zwischen komplexen Zahlen und Vektoren als verständlich. Die hohen mittleren Zustimmungswerte $\mu_{C1} = 3,49$ ($\sigma = 0,40$) und $\mu_{C2} = 3,29$ ($\sigma = 0,36$) zeigen, dass der Blended

Learning Kurs unsere Intentionen in Bezug auf die spiralcurriculare Erweiterung des Wissens der Studierenden erfüllt. Die Wissenserweiterung wird durch die Wissenstests K1-K3 und D1-D2 belegt.

Der letzte untersuchte Kurspfeiler stellt die Interaktivität des Kurses dar. Die Studierenden bewerteten die interaktiven Elemente im Video als motivierend, den Inhalten aktiv zu folgen ($\mu_{ges} = 3,34$; $\sigma_{ges} = 0,77$). Im optionalen Freitextfeld der Umfrage lobten 27 der insgesamt 62 Befragten die Interaktionen noch einmal explizit als motivierend und verständnisfördernd.

3.2. Leistungserhebung zum Kurz- & Langzeitwissen zu komplexen Zahlen

Abbildung 2 zeigt den Zeitpunkt, zu dem die Wissenstests zu komplexen Zahlen durchgeführt wurden. Der Test K1 wurde direkt nach den Einführungsvideos zu den komplexen Zahlen im Seminar 07 als Paper-Pencil-Test geschrieben. Der zweite Test K2 wurde im Sommersemester direkt vor dem Seminar 09 durchgeführt, bevor die komplexen Zahlen nochmals zur Beschreibung komplexer Impedanzen vertieft wurden. Der dritte Test K3 wurde ein Jahr nach der ersten Einführung der komplexen Zahlen geschrieben, um das langfristig behaltene und anwendbare Wissen nach der gesamten Intervention zu untersuchen. Alle drei Tests enthielten ähnliche Aufgaben zu Schlüsselaspekten der komplexen Zahlen, wie die komplexe Ebene, arithmetische Operationen, die komplexe Konjugation und die Darstellung von Schwingungen als komplexe Funktionen. Um die Unterschiede zwischen den Testergebnissen zu veranschaulichen, wurden die Gesamtpunktzahlen mit einem Mann-Whitney-U-Test verglichen, Einzelheiten siehe [20].

Abbildung 3 zeigt Boxplots der prozentualen Antwortverteilung der Kohorte C1 für die drei Tests K1, K2 und K3. Die Kohorte C2 hat bisher nicht alle Tests absolviert. Die Kohorte C1 hat im Durchschnitt befriedigende Ergebnisse in K1 ($\mu_{K1} \approx 70\%$) und K2 ($\mu_{K2} \approx 77,3\%$) und nach einem Jahr in K3 gute Ergebnisse ($\mu_{K3} = 80,3\%$) erzielt. Die 50%-Boxen werden im Laufe des Untersuchungszeitraumes immer schmaler, die unteren Whisker nehmen ab. Trotzdem konnten mit dem Mann-Whitney U Test keine

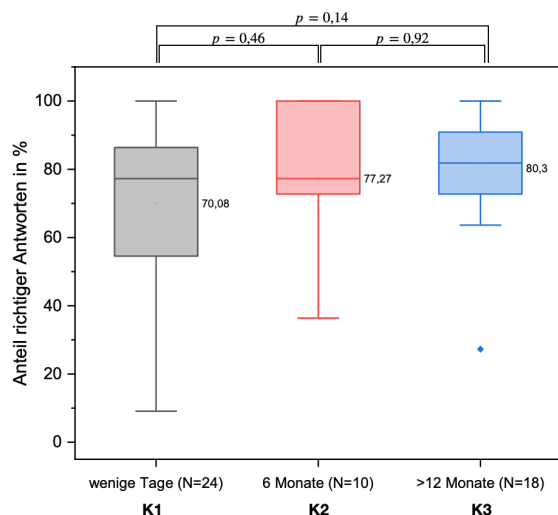


Abb. 3: Boxplots der Ergebnisse der drei Wissenstests K1-K3 zu komplexen Zahlen der Kohorte C1.

signifikanten Unterschiede zwischen den Testergebnissen festgestellt werden. Die Tests ergaben, dass die Unterschiede der erreichten Punkte sowohl zwischen K1 und K2 ($U(N_{K1} = 24, N_{K2} = 10) = 100, p = 0,46$), als auch zwischen K1 und K3 ($U(N_{K1} = 24, N_{K3} = 18) = 158, p = 0,14$) statistisch nicht signifikant sind. Dies bedeutet aber auch, dass das Wissen in das Langzeitgedächtnis übertragen wurde und über den Kurs hinaus anwendbar bleibt.

3.3. Leistungserhebung zum Kurz- & Langzeitwissen zur Einführung in gewöhnliche Differentialgleichungen

Analog zu den Wissenstests K1-K3 zum Thema komplexe Zahlen werden mit der Kohorte C2 zu drei verschiedenen Zeitpunkten Wissenstests D1-D3 zum Thema Lösungsmethoden für Differentialgleichungen durchgeführt (siehe Abb. 2). Derzeit hat die Kohorte C2 zwei der drei Tests absolviert, den freiwilligen Online-Test D1 nach dem Seminar 08 zur Einführung in die Charakterisierung von Differentialgleichungen und den Exponentialansatz und den Test D2 vor dem Seminar 06 im zweiten Semester zur Einführung in Lösungsmethoden für inhomogene Differentialgleichungen. D2 wurde in einer Übungsstunde durchgeführt, sodass dort die im zweiten Semester noch aktiven 28 Studierenden getestet wurden, womit ein gutes Bild des Wissensspektrums der gesamten Kohorte C2 entstanden ist. Beide Tests enthalten ähnliche Aufgaben zur Charakterisierung von Differentialgleichungen, zur Trennung von Variablen, zum Exponentialansatz und zum Finden der speziellen Lösung einer Differentialgleichung. Die teilweise gepaarten Testergebnisse wurden analog mit dem Mann-Whitney U-Test verglichen, da er die gesamte Stichprobe berücksichtigt [21]. Um seinen größeren α -Fehler zu relativieren, wurden mit den 13 gepaarten Stichproben beider Tests deshalb noch ein Wilcoxon-Test durchgeführt, der den α -Fehler minimiert, jedoch einzelne Testergebnisse ignoriert [21].

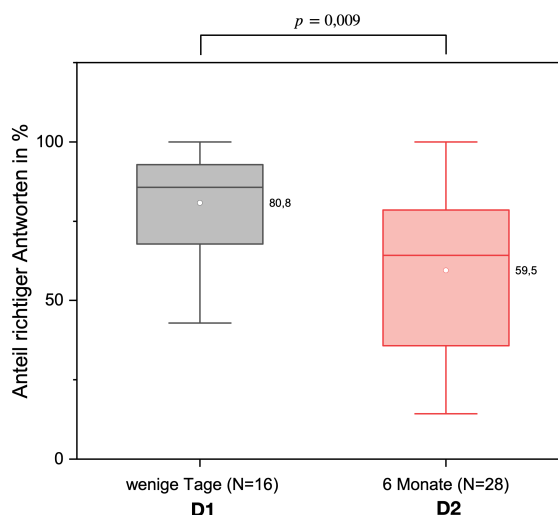


Abb. 4: Boxplots der Ergebnisse der zwei Wissenstests D1 & D2 zu Differentialgleichungen der Kohorte C2.

Abbildung 4 zeigt die Boxplots der prozentualen Verteilung der Antworten der Testergebnisse der Tests D1 und D2 der Kohorte C2. Im Test D1 haben die Studierenden das noch frische Wissen über Differentialgleichungen im Durchschnitt gut angewendet ($\mu_{D1} \approx 80,5\%$). Das im Gedächtnis gebliebene Wissen hat bis zum Test D2 abgenommen, so dass im Test D2 durchschnittlich nur noch ausreichende bis befriedigende Kenntnisse ($\mu_{D2} \approx 59,5\%$) nachgewiesen wurden. Die Spannweite der Testergebnisse ist wegen der größeren Teilnehmerzahl breiter. Ein Mann-Whitney U-Test zeigt einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Tests, $U(N_{D1} = 16, N_{D2} = 28) = 118, p = 0,009$, was auf eine signifikante Abnahme des Wissens schließen lässt.

In absoluten Zahlen haben jedoch sowohl in D1 als auch in D2 elf Teilnehmende mit mindestens 80% der Antworten gute Ergebnisse erzielt. In D2 gibt es zusätzlich größere Ausreißer nach unten, die wahrscheinlich durch die repräsentativere Stichprobengröße entsteht. Die 13 Studierenden, die an beiden Tests teilgenommen haben, haben mit durchschnittlich 83% in D1 und 78% in D2 in einem Wilcoxon-Test nicht signifikant unterschiedliche Ergebnisse erzielt ($W = 23, p = 0,14$). Bei dieser ausgewählten Gruppe kann davon ausgegangen werden, dass das Wissen zu Lösungsalgorithmen von Differentialgleichungen behalten wurde.

Im Hinblick aller Ergebnisse des Tests D2 ist das behaltene Wissen zur Lösung homogener Differentialgleichungen sehr heterogen, so dass für das kommende Seminar 06 im zweiten Fachsemester sehr differenziertes Material benötigt wird. Der Test D3 wird im weiteren Verlauf dieser Studie mit der Kohorte C2 im Wintersemester 2024/25 durchgeführt.

4. Zusammenfassung und Ausblick

An der Universität Leipzig sind seit 2014 die Lehramtsstudiengänge Physik aus den Bachelorstudiengängen Physik mit eigens zugeschnittenen Modulen

entkoppelt. Um eine adäquate mathematische Ausbildung aller Lehramtsstudierenden zu gewährleisten, werden die ersten beiden Experimentalphysik-Module zur Mechanik und Elektrodynamik durch integrierte mathematische Methodenseminare ergänzt, die seit dem Wintersemester 2022/23 im Blended Learning Format durchgeführt werden. Sie finden parallel zu den Physikvorlesungen statt und sind spiralcurricular auf den Wissensstand der Allgemeinen Hochschulreife und der vorangegangenen Sequenzen abgestimmt. Kernelemente des Selbststudiums sind interaktive Erklärvideos und Übungsaufgaben.

Bei einer Umfrage zur Qualität des Kurses wurden die drei Säulen Parallelität, Spiralcurricularität und Interaktivität sehr positiv bewertet. Die Kohorte C1 hat bisher das erste Studienjahr mit den umgestalteten MaMes absolviert. Sie haben sich in dieser Zeit ein durchschnittlich befriedigendes bis gutes Wissen über die Grundlagen der komplexen Zahlen zur Beschreibung von Schwingungen angeeignet und dieses auch ein Jahr nach der Einführung beibehalten. Eine zweite Kohorte C2 erprobt derzeit den Kurs. Sie nimmt an einer zusätzlichen Studie zum Langzeitwissen über Differentialgleichungen teil, bei der die ersten beiden Tests bereits durchgeführt wurden. Die Studierenden erzielten unmittelbar nach der Einführung in Differentialgleichungen durchschnittlich gute Ergebnisse. Die Testergebnisse eines ähnlichen Tests zum Langzeitwissen nach sechs Monaten ergaben sehr heterogene und nur noch durchschnittlich ausreichende bis befriedigende Ergebnisse im Vergleich zum ersten Test, wobei jedoch die Anzahl der guten Ergebnisse konstant blieb. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit eines differenzierten Lehr-/Lernangebots in der dritten Schleife zu Differentialgleichungen im Seminar 06 der Elektrodynamik.

Im nächsten Schritt werden die Erhebungen D1 und D2 durch einen weiteren Langzeitwissenstest D3 ergänzt, der ein Jahr nach der Einführung der Differentialgleichungen durchgeführt wird. Um das Langzeitwissen der Studierenden über komplexe Zahlen besser zu verstehen, werden die Tests K1-K3 auch in der Kohorte C2 durchgeführt und mit den bisherigen Ergebnissen verglichen. Die Kursmaterialien werden stetig weiterentwickelt und ihre Lernwirksamkeit weiter untersucht.

5. Literatur

- [1] Woitzik, Andreas; Mencke, Klaus; Düchs, Georg (2023): Das Lehramtsstudium Physik in Deutschland, Eine Studie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft e. V 2023. Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.
- [2] Universität Leipzig (2014): Modulbeschreibungen Staatsexamen Höheres Lehramt an Gymnasien Physik, Url: https://amb.uni-leipzig.de/?kat_id=826 (Stand 1/2022)
- [3] Diekjürgen, Diana; Minah, Margitta (2021): Blended Learning, In: SLE Discussion Paper 01/2021, Humboldt-Universität zu Berlin
- [4] Finkenberg, Frank (2018): Flipped Classroom im Physikunterricht. Berlin: Logos Verlag
- [5] Nouri, Jalal (2016): The flipped classroom: for active, effective and increased learning—especially for low achievers. In: International Journal of Educational Technology in Higher Education, 13. Jg., S. 1-10.
- [6] Kämpf, Lydia; Stallmach, Frank (2023): Erarbeitung eines spiralcurricularen Blended Learning Konzepts für die Mathematikausbildung der Studiengänge Lehramt Physik, In: PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, S. 79-85, Url: <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1361> (Stand 05/2024)
- [7] Bitzenbauer, Philipp; Henning, Fabian (2023): Flipped Classroom in physics teacher education: (how) can students' expectations be met?. In: Frontiers in Education, vol. 8 (2023), 1194963
- [8] Kultusministerkonferenz (2012): Bildungsstandards im Fach Mathematik für die Allgemeine Hochschulreife, Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland
- [9] Tindall-Ford, Sharon; Agostinho, Shirley; Sweller, John (2020): Advances in cognitive load theory. London: Routledge
- [10] Dunn, Jason W.; Barbanel, Julius (2000): One model for an integrated math/physics course focusing on electricity and magnetism and related calculus topics. In: American Journal of Physics 68, S. 749–757
- [11] Kaps, Andreas; Rieger, Peter; Stallmach, Frank (2020): Lehren und Lernen mit dem smarten Physikkolabor. In: PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, S. 69-76
- [12] Kulgemeyer, Christoph (2020): Didaktische Kriterien für gute Erklärvideos. Lehren und Lernen mit Tutorials und Erklärvideos. Weinheim: Beltz, S. 70-75
- [13] Kulgemeyer, Christoph (2020): A framework of effective science explanation videos informed by criteria for instructional explanations. In: Research in Science Education 50.6, S. 2441-2462
- [14] Chong Katie E., *et al.* (2019): Flipped-classroom with interactive videos in first year undergraduate physics course in Hong Kong. In: Education and Training in Optics and Photonics. Optica Publishing Group. S. 11143-11146.
- [15] Kim, Min Kyu, *et al.* (2014): The experience of three flipped classrooms in an urban university: An exploration of design principles. In: The Internet and higher education 22, S. 37–50
- [16] Manzano-León, Ana, *et al.* (2021): Between level up and game over: A systematic literature review of gamification in education. In: Sustainability, 13. Jg., Nr. 4, S. 2247

- [17] Ariffin, Noor Amalina Nisa, *et al.* (2022): Effectiveness of gamification in teaching and learning mathematics. In: *Journal on Mathematics Education*, 13. Jg., Nr. 1, S. 173-190
- [18] Helmke, Andreas; Schrader, Friedrich-Wilhelm (2015): Qualitätsmerkmale „guten Unterrichts“. In: *Handbuch der Erziehungswissenschaft*. Brill Schöningh. S. 701-712.
- [19] Veith, Joaquin Marc; Bitzenbauer, Philipp; Girnat, Boris (2022): Assessing learners' conceptual understanding of introductory group theory using the CI2GT: Development and analysis of a concept inventory. In: *Education Sciences*, 12. Assessing learners' conceptual understanding of introductory group theory using the CI2GT: Development and analysis of a concept inventory. 12. Jg., Nr. 6, S. 376.
- [20] Nachar, Nadim, *et al.* (2004): The Mann-Whitney U: A test for assessing whether two independent samples come from the same distribution. In: *Tutorials in quantitative Methods for Psychology*, 4. Jg., Nr. 1, S. 13-20.
- [21] Guo, B., & Yuan, Y. (2017): A comparative review of methods for comparing means using partially paired data. *Statistical methods in medical research*, 26(3), 1323-1340.

Danksagung

Wir danken den Lehrenden der Experimentalphysikmodule zur Mechanik und Elektrodynamik für ihre Unterstützung in der Konzeption und Durchführung der mathematischen Methoden Seminaren. Herrn Dr. Veith gilt unser Dank für seine Unterstützung bei der statistischen Auswertung der Test- und Umfrageergebnissen.

Weiterhin gilt unser Dank der Universität Leipzig und dem Freistaat Sachsen, die im Rahmen eines Landesgraduiertenstipendiums seit Oktober 2022 die Umsetzung unseres Blended Learning Konzepts für die Mathematischen Methodenseminare fördern.

Vernetztes Wissen zum Energiekonzept von Studierenden der Naturwissenschaften

Dennis Dietz*, Claus Bolte*

*Freie Universität Berlin, Didaktik der Chemie
dennis.dietz@fu-berlin.de

Kurzfassung

In erfolgreichen Lernprozessen werden Begriffe durch die möglichst vielfältige Verknüpfung von Begriffselementen gebildet. Auf diese Weise entsteht vernetztes Wissen, das nicht passiv verankert ist, sondern vom Lernenden in Handlungs- und Urteilsituationen aktiv genutzt werden kann. In den naturwissenschaftlichen Fächern ist die Bildung vernetzten Wissens zum fächerübergreifenden Energiekonzept in besonderem Maße erstrebenswert, da mit Hilfe des Energiekonzepts zahlreiche naturwissenschaftliche Prozesse nicht nur rekonstruiert, sondern auch erklärt werden können. Im Rahmen der hier vorgestellten Studie haben wir die Wissensvernetzung von Studierenden naturwissenschaftlicher Fächer in der Anfangsphase ihres Studiums in Bezug auf das Energiekonzept systematisch untersucht. Dazu haben wir insgesamt 108 Studierende zu Beginn des Sommersemesters 2023 in den Modulen „Grundlagen der Physikalischen Chemie“ sowie „Atombau und Chemische Bindung“ gebeten, ein Essay über das Energiekonzept zu verfassen. Diese Essays haben wir qualitativ-inhaltsanalytisch mit einem theoriebasiert konstruierten und empirisch erprobten Modell – dem Modell zur Analyse der Vernetzung von Begriffselementen (Akronym: MAVerBE) – untersucht. Unsere Untersuchungen zeigen, dass die befragten Studierenden eine nennenswerte Wissensbasis zum Energiekonzept aufgebaut haben und auch zu höheren Vernetzungsleistungen in der Lage sind. Allerdings stellen wir auch fest, dass unsere befragten Studierenden die – theoretisch betrachtet – höchstmöglichen Vernetzungsleistungen nur selten in ihren Essays dargelegt haben.

1. Ausgangspunkt

Sowohl aus bildungs- (u.a. Ausubel, 1974; Gagné, 1970) als auch aus lerntheoretischer Sicht (u.a. Klafki, 2007; Weinert, 2000) wird Lernen dann als erfolgreich angesehen, wenn Wissen vernetzt aufgebaut und so zu handlungs- und urteilsrelevantem Wissen wird. Aus diesem Grund stellt das Maß der Vernetzung von Wissensselementen ein bedeutsames Qualitätsmerkmal für den Wissenserwerb dar (de Jong & Ferguson-Hessler, 1996). Der Zusammenhang zwischen erfolgreichem Fachwissenserwerb und Vernetzungsleistungen wurde in den vergangenen Jahrzehnten verschiedentlich empirisch belegt (u.a. Knobloch et al., 2013; Kubsch et al., 2019; Neumann et al., 2008; Podschuweit et al., 2016; Podschuweit & Bernholt, 2020).

Dass der Erwerb vernetzten Wissens durchaus eine Herausforderung darstellt, ist am Beispiel des Energiekonzepts hinreichend belegt (u.a. Dietz, 2023; Dietz & Bolte, 2021; 2022; Kubsch et al., 2019; Podschuweit & Bernholt, 2020). Obgleich das Energiekonzept das Potenzial besitzt, sowohl inhaltliche Domänen eines Unterrichtsfachs (Duit, 1986, S. 94) als auch verschiedener Unterrichtsfächer miteinander in Verbindung zu bringen (Eisenkraft et al., 2014, S. 2), wird häufig moniert, dass das Energiekonzept von Schüler*innen nur wenig vernetzt erlernt wird (u.a. Lancor, 2014). In der hier vorgestellten Studie sind wir der Frage nachgegangen, inwieweit diese Befunde auch für Studierende mit naturwissenschaftlichem Fach gelten.

2. Theorie

2.1. Begriffe und Begriffselemente als Bausteine vernetzten Wissens

Aus kognitionsökonomischen Betrachtungen ist es notwendig, dass Individuen Begriffe als kognitive Einheiten bilden, um mit der (quasi) unendlichen Anzahl an vielfältigen Situationen im Zuge ihrer Interaktion mit der Umwelt umgehen zu können (Schnotz, 1994). Einen Begriff zu bilden, bedeutet, „eine Erscheinung im Griff“ zu haben (Aebli, 2003, S. 245). Damit die Begriffsbildung erfolgreich gelingt, stellt Aebli fest, dass „der erfolgreiche Abruf der Elemente des Begriffsaufbaus aus dem Wissen des Begriffsbildners und ihre richtige Verknüpfung“ gelingen muss (Aebli, 1981, S. 99). Diese Ausführungen verdeutlichen nicht nur die zwingende – lerntheoretisch umfassend beschriebene – Notwendigkeit, dass das Vorwissen von Lernenden in erfolgreichen Lernprozessen zu berücksichtigen und zu aktivieren sei (vgl. u.a. Ausubel, 1974; Gagné, 1970), sondern beschreiben auch, dass das Wissen des Menschen als Netzwerk aus miteinander vernetzten Begriffen bzw. Begriffselementen zu betrachten ist (Dörner, 1976; Schnotz, 1994). Dieses Netzwerk ist in Form von Komplexions- und Abstraktionshierarchien organisiert (Achtenhagen et al., 1992; Dörner, 1976; Schnotz, 1994). In Komplexionshierarchien sind Begriffselemente eines Begriffs durch „hat-als-Teil“-Relationen miteinander verknüpft (Dörner, 1976). In Abstraktionshierarchien liegen „ist-ein-Teil“-Relationen zwischen den Begriffselementen vor (Dörner, 1976).

Wenn ein Individuum einen Begriff rekonstruiert, bspw. indem es die Aufgabe bekommt, einen Begriff zu erklären, dann werden die im Zuge der Begriffsbildung ausgebildeten hierarchischen Strukturen zwischen den Begriffselementen des rekonstruierten Begriffs temporär identifizierbar (Aebli, 1981, S. 206 f.). Die Untersuchung des latenten Konstrukts „Wissensvernetzung“ wird dadurch möglich, wenn Individuen gebeten werden, einen Begriff zu erklären, und in diesem Zusammenhang die Fähigkeit der sinnstiftenden Verknüpfung einzelner Begriffselemente analysiert wird (Dietz, 2023; Dietz & Bolte, 2021; 2022). Im nächsten Abschnitt stellen wir ein Modell vor, mit welchem Untersuchungen dieser Art möglich sind.

2.2. MAVerBE – ein Modell zur Analyse von Vernetzungsleistungen

Das theoriegeleitet entwickelte Modell zur Analyse der Vernetzung von Begriffselementen (Akronym: MAVerBE) bietet die Möglichkeit, Vernetzungsleistungen umfassend zu untersuchen (Dietz, 2023; Dietz & Bolte, 2021; 2022). Dazu berücksichtigt das MAVerBE drei Dimensionen der Vernetzung: 1. das vertikale Vernetzungsniveau, 2. die horizontale Vernetzung und 3. die fachwissenschaftliche Richtigkeit (Dietz, 2023; Dietz & Bolte, 2021; 2022).

Im Kontext der ersten Dimension des MAVerBE – dem vertikalen Vernetzungsniveau – wird die Komplexität beschrieben, mit der Begriffselemente miteinander verknüpft sind (Dietz, 2023; Dietz & Bolte, 2021; 2022). Im MAVerBE werden hierfür fünf verschiedene Vernetzungsniveaus unterschieden. Auf dem niedrigsten – dem ersten – vertikalen Vernetzungsniveau (mit den Kategorien „Erfahrungswissen“ oder „wissenschaftlicher Fakt“) werden maximal zwei Begriffselemente in einer simplen Art und Weise miteinander verknüpft. Die Einfachheit der Verknüpfung ist i.d.R. an der Verwendung von Hilfsverben wie „sein“ oder „haben“ zu erkennen. In Aussagen, die dem zweiten vertikalen Vernetzungsniveaus zuzuschreiben sind, werden mindestens drei Begriffselemente in einer komplexeren Art und Weise miteinander in einen Sinnzusammenhang gebracht. Die mit dem zweiten vertikalen Vernetzungsniveau korrespondierende Kategorie wird als „Zusammenhang ohne Begründung“ bezeichnet (Dietz, 2023; Dietz & Bolte, 2021; 2022). Die komplexere Verknüpfung zeichnet sich durch die Formulierung von Kausalitäten, Abhängigkeiten, Bedingungen oder Prozessbeschreibungen aus. Das dritte oder sogar das vierte vertikale Vernetzungsniveau mit den Kategorien „verbundener Zusammenhang“ und „Zusammenhang mit Begründung“ wird erreicht, wenn Aussagen des zweiten vertikalen Vernetzungsniveaus explizit miteinander verknüpft werden. Die Verknüpfung von Kausalitäten zu einer Kausalkette wird der Kategorie „verbundener Zusammenhang“ zugeordnet. Wird ein Zusammenhang mit einem weiteren Zusammenhang begründet, dann liegt eine Aussage des vierten vertikalen Vernetzungsniveaus (Kategorie

„Zusammenhang mit Begründung“) vor. In Ausführungen, die dem höchsten – dem fünften – vertikalen Vernetzungsniveau mit der Kategorie „multiperspektivische Verallgemeinerung“ zuzuordnen sind, werden zentrale Aspekte des Energiekonzepts, wie Energiequelle, Energieform, Energieumwandlung, Energietransfer, Energieentwertung, Energieerhaltung und Entropie (u.a. Dietz, 2023; Duit, 1986; Neumann et al., 2013) explizit miteinander verknüpft. Außerdem wird die Verknüpfung der zentralen Aspekte des Energiekonzepts an mindestens einem Beispiel ausführlich erklärt (Dietz, 2023; Dietz & Bolte, 2021; 2022).

Die zweite Dimension des MAVerBE – die horizontale Vernetzung – beschreibt fächerübergreifende Vernetzungsleistungen (Dietz, 2023; Dietz & Bolte, 2021; 2022). Dazu werden alle in einer Aussage enthaltenen Begriffselemente in einem ersten Schritt einem Unterrichtsfach (Biologie, Chemie oder Physik) oder einer Kombination von Unterrichtsfächern (z.B. Biologie/Chemie, usw.) zugeordnet. Für diese Zuordnung der Begriffselemente wird deren Vorhandensein in den jeweiligen Rahmenlehrplänen der Bundesländer Berlin & Brandenburg (SenBJF & MBS, 2015a-c) herangezogen. Im zweiten Schritt wird ausgezählt, welche Unterrichtsfächer in der jeweiligen Aussage miteinander in Beziehung gesetzt wurden (Dietz, 2023; Dietz & Bolte, 2021; 2022).

Die dritte Dimension des MAVerBE berücksichtigt die fachliche Richtigkeit der untersuchten Aussagen (Dietz, 2023; Dietz & Bolte, 2021; 2022). Neben explizit richtigen und falschen Aussagen werden in einer dritten Kategorie (Kategorie „implizit richtig“) Aussagen berücksichtigt, die fachwissenschaftlich unpräzise, aber nicht gänzlich als falsch zu beurteilen sind (Dietz, 2023; Dietz & Bolte, 2021; 2022).

2.3. Energie – ein bedeutsames, jedoch schwierig zu erlernendes Konzept

Energie stellt ein bedeutsames Konzept dafür dar, um komplexe naturwissenschaftliche Prozesse verstehen und fachlich angemessen beschreiben zu können (u.a. Duit, 1986; Eisenkraft et al., 2014). Diese Bedeutsamkeit des Energiekonzepts zeigt sich darin, dass es als Basiskonzept sowohl in den Bildungsstandards für den Mittleren Schulabschluss (KMK, 2005a;b) als auch für die Allgemeine Hochschulreife (KMK & IQB, 2021a,b) explizit verankert und damit zentraler Bestandteil der naturwissenschaftlichen (schulischen) Allgemeinbildung ist (u.a. Bolte, 2003a;b; Häußler et al., 1988).

Typischerweise wird das Energiekonzept entlang der zentralen Aspekte Energiequelle und -form, Energieumwandlung und -transfer, Energieentwertung und Energieerhaltung gelehrt und gelernt (s. learning progression zum Energiekonzept in Neumann et al., 2013). Sowohl Schüler*innen als auch Studierende zeigen jedoch große Schwierigkeiten beim Lernen des Energiekonzepts. Die Lernenden haben insbesondere Probleme damit, die zentralen Aspekte der

Energieentwertung und der Energieerhaltung zu verstehen (u.a. Neumann et al., 2013; Opitz et al., 2017). Hinzu kommen zahlreiche Vorstellungen, die nicht der wissenschaftlichen Sichtweise entsprechen (Watts, 1983; Duit, 1986; Crossley et al., 2009; Pahl, 2013; Behle & Wilhelm, 2017). Häufig sehen Lernende die Energie bspw. als etwas an, dass lediglich als Nebenprodukt von Prozessen, bspw. im Zuge von chemischen Reaktionen, gebildet wird (u.a. Watts, 1983; Behle & Wilhelm, 2017). Eine weitere fachwissenschaftlich falsche Vorstellung von Lernenden besteht darin, dass Energie in chemischen Bindungen gespeichert sei (u.a. Watts, 1983; Cooper & Klymkowsky, 2013).

Die Schwierigkeiten in Bezug auf das Erlernen des Energiekonzepts sind auf mehrere Ursachen zurückzuführen. Ein Grund besteht darin, dass der Energiebegriff eine hohe Alltagspräsenz hat (u.a. Crossley et al., 2009). Dadurch entwickeln Lernende sehr früh Vorstellungen zum Energiebegriff, die nicht der wissenschaftlichen Sichtweise entsprechen, und die später nur schwer im Sinne des „conceptual change“ in wissenschaftlich korrekte Konzepte überführt werden können (Watts, 1983; Duit, 1986; Crossley et al., 2009; Pahl, 2012; Behle & Wilhelm, 2017). Ein weiteres wesentliches Lernhindernis stellt die Tatsache dar, dass es keine einheitlich akzeptierte Definition des Energiebegriffs gibt, da wissenschaftlich eigentlich immer noch ungeklärt ist, was Energie überhaupt ist (u.a. Feynman et al., 1970, S. 4-1). Dies hat zur Folge, dass Schüler*innen und Studierende je nach Unterrichtsfach und je nach Lehrperson verschiedene Definitionen des Energiebegriffs lernen und sich unterschiedliche Sprechweisen über das Energiekonzept aneignen (Cooper & Klymkowsky, 2013; Lancor, 2014). Aus diesem Grund ist es wenig verwunderlich, dass Lernende das Energiekonzept wenig vernetzt – und damit wenig erfolgreich – erlernen. Der mangelnde Lernerfolg zeigt sich bspw. darin, dass das Energiekonzeptverständnis von Lernenden kontextabhängig ist (u.a. Park & Liu, 2016; 2021; Opitz et al., 2017). Ein weiterer Indikator für den mangelnden Lernerfolg ist darin zu sehen, dass Lernende das Energiekonzept immer wieder mit anderen (vor allem physikalischen Konzepten) verwechseln (Watts & Gilbert, 1983; Trumper, 1996; 1998).

In zurückliegenden Studien haben wir explizit die Wissensvernetzung von Schüler*innen der 9. Jahrgangsstufe in Bezug auf das Energiekonzept in den Blick genommen (Dietz & Bolte, 2021; 2022). Im Zuge dessen haben wir Schüler*innen aufgefordert, ein Essay zum Energiekonzept zu verfassen. Dabei konnten die Schüler*innen – wenn sie wollten – auf 26 Begriffselemente des Energiekonzepts, deren Relevanz in einer Vorstudie validiert wurde (Dietz, 2023; Dietz & Bolte, 2021; 2022), zurückgreifen. Die Essays der Schüler*innen wurden anschließend qualitativ-inhaltsanalytisch unter Zuhilfenahme des MAVerBE (s. Abschnitt 2.2) untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass die Schüler*innen nur selten in der

Lage waren, Begriffselemente des Energiekonzepts in einer komplexen Art und Weise fachlich korrekt miteinander zu verknüpfen (Dietz, 2023; Dietz & Bolte, 2021; 2022).

Konkrete Untersuchungen dazu, inwieweit Studierende in der Lage sind, Begriffselemente des Energiekonzepts sinnstiftend miteinander zu verknüpfen, sind u.W. bisher nicht erfolgt. Um diese Forschungslücke zu adressieren und um einen (ersten) Einblick in das Wissen unserer Studierenden zum Energiekonzept zu erhalten, sind wir den im nächsten Abschnitt dezidiert dargelegten Forschungsfragen systematisch nachgegangen.

2.4. Forschungsfragen

Im Rahmen der in diesem Beitrag vorgestellten Studie sind wir den folgenden Forschungsfragen nachgegangen:

- (1) Inwieweit sind Studierende der Studienanfängsphase in der Lage, Begriffselemente des Energiekonzepts möglichst komplex und naturwissenschaftlich korrekt miteinander zu vernetzen?
- (2) Inwieweit unterscheiden sich die Leistungen von Studierenden der Studienanfängsphase von denen von Schüler*innen der 9. Jahrgangsstufe in Bezug auf die naturwissenschaftliche korrekte Vernetzung von Begriffselementen des Energiekonzepts?

3. Methode

Um diesen Forschungsfragen nachzugehen haben wir Studierende in den Einführungsveranstaltungen der Module „Grundlagen der Physikalischen Chemie“ (GPC) sowie „Atombau und chemische Bindung“ (ACB) gebeten, ein Essay zum Energiekonzept zu verfassen. Diese Module werden von Studierenden zu Beginn ihres Studiums der Bachelor-Studiengänge Chemie, Chemie-Lehramt oder Biochemie absolviert. Um die Studierenden zum Schreiben der Essays anzuregen, haben wir ihnen eine Liste mit 26 Begriffselementen zum Energiekonzept vorgelegt (s. Abschnitt 2.3).

Zur Auswertung der Essays haben wir das MAVerBE (Dietz, 2023; Dietz & Bolte; 2021; 2022; s. Abschnitt 2.2) genutzt und uns dabei auf die Dimensionen „vertikales Vernetzungsniveau“ und „fachliche Richtigkeit“ fokussiert.

Für den Vergleich der Vernetzungsleistungen der Studierenden mit den Vernetzungsleistungen von Schüler*innen der 9. Jahrgangsstufe (Forschungsfrage 2, s. Abschnitt 2.4) haben wir das t-Testverfahren für unabhängige Stichproben (Eid et al., 2011) genutzt.

4. Ergebnisse

4.1. Stichprobe und deskriptiv-statistische Daten zu den Essays

Zu Beginn des Sommersemesters 2023 haben wir in den Einführungsveranstaltungen der Module „Grundlagen der Physikalischen Chemie“ (GPC) sowie „Atombau und chemische Bindung“ (ACB)

insgesamt 108 Studierende (62 BCP und 46 ACB) gebeten, ein Essay zum Energiekonzept zu verfassen. In beiden Teilstichproben musste jeweils ein Essay von den weiteren Analysen ausgeschlossen werden, da die Aufgabenstellung nicht bearbeitet wurde.

Die verbliebenen 106 Essays wurden von Studierenden (männlich: 48, weiblich: 56, divers: 0, ohne Angabe: 2) geschrieben, die zum Zeitpunkt der Befragung im Mittel $20,3 \pm 2,4$ Jahre alt waren. Als Studienfach haben 44 Befragte Chemie, 45 Befragte Biochemie, 14 Befragte Chemie-Lehramt und eine Person Pharmazie angegeben. Zwei Befragte haben keine Angabe zu ihrem Studienfach gemacht. Die Studierenden sind zum Zeitpunkt der Befragung im Median im zweiten Fachsemester gewesen.

Die von den Studierenden unserer Stichprobe formulierten Essays sind im Mittel 230 ± 70 Wörter lang und enthalten durchschnittlich $35,2 \pm 11,2$ verschiedene Begriffselemente des Energiekonzepts. Auf Grundlage der Analyse der Verknüpfungen zwischen diesen Begriffselementen, wurden durchschnittlich $19,9 \pm 6,5$ Analyseeinheiten pro Essay festgelegt. Nach Ausschluss aller Analyseeinheiten, die entweder im Sinn unklar oder wiederholend waren, wurden im Mittel $19,4 \pm 6,5$ Analyseeinheiten pro Essay festgelegt und hinsichtlich der Dimensionen „fachliche Richtigkeit“ (s. Abschnitt 4.2) und „vertikales Vernetzungsniveau“ (s. Abschnitt 4.3) unter Anwendung des MAVerBE (s. Abschnitt 2.2) kodiert.

4.2. Dimension „fachliche Richtigkeit“

Die Verteilung der Analyseeinheiten auf die drei Kategorien zur Beschreibung der Dimension „fachliche Richtigkeit“ sind in der Tabelle 1 dargestellt. Außerdem sind in der Tabelle 1 zu Vergleichszwecken Ergebnisse von Schüler*innen eines Berliner Gymnasiums zu Beginn der 9. Jahrgangsstufe ($N = 132$ Essays, vgl. Dietz, 2023; Dietz & Bolte, 2021; 2022; s. Abschnitt 2.3) abgebildet.

Tab. 1.: Mittlere Verteilung der Analyseeinheiten auf die Kategorien zur Beschreibung der Dimension „fachliche Richtigkeit“ – differenziert nach Teilstichprobe (***) $p < 0,001$

	Studierende ($N = 106$)	Schüler*innen (9. Jgst., $N = 132$)
explizit richtig	$15,7 \pm 6,0^{***}$	$7,7 \pm 5,3$
implizit richtig	$2,4 \pm 1,9$	$2,3 \pm 2,1$
falsch	$1,4 \pm 1,7^{***}$	$3,6 \pm 2,7$
N (Gesamt)	$19,4 \pm 6,5^{***}$	$13,6 \pm 6,8$

Das Gros der Aussagen der Studierenden ist aus fachwissenschaftlicher Perspektive als explizit oder zumindest als implizit richtig zu beurteilen (s. Tab. 1). Im Mittel sind in den Essays der Studierenden nur ein bis zwei Analyseeinheiten als fachlich falsch zu werten (s. Tab. 1). Die mit Abstand häufigste Fehlerquelle in den Essays der Studierenden stellen Aussagen dar, in denen wiedergegeben wird, dass Energie erzeugt oder vernichtet würde. Zwei Beispiele hierfür

aus den Essays, in denen der Energieerhaltungssatz verletzt wird, lauten:

„Allein schon auf atomarer Ebene benötigen bzw. verbrauchen die Elektronen, die um einen Atomkern kreisen, Energie.“ (GPC-45)

„Unser Körper ist nicht nur in der Lage Energie zu produzieren, sondern auch zu speichern.“ (GPC-34)

Mit Blick auf bekannte als falsch zu beurteilende Lernendenvorstellungen zum Energiekonzept (s. Abschnitt 2.3), ist zu beobachten, dass lediglich in vier von 106 Essays der Studierenden Aussagen zu finden sind, denen zufolge Energie in chemischen Bindungen gespeichert sei.

Die Studierenden haben im Vergleich zu den Schüler*innen mehr Sinnzusammenhänge in ihren Essays dargelegt. Von diesen Analyseeinheiten sind – relativ betrachtet – mehr als explizit oder implizit richtig und weniger als falsch zu beurteilen (s. Tab. 1). Die unterschiedlichen Besetzungshäufigkeiten der Kategorien „explizit richtig“ und „falsch“ im Vergleich der Essays der Studierenden und der Schüler*innen sind statistisch signifikant (s. Tab. 1), wobei in beiden Fällen von einem großen Effekt zu sprechen ist ($|d| = 1,4$ und $|d| = 0,9$).

4.3. Dimension „vertikales Vernetzungsniveau“

Im Anschluss an die Analyse der fachlichen Richtigkeit der Studierenden Aussagen haben wir die Komplexität der Verknüpfungsstrukturen – das vertikale Vernetzungsniveau – untersucht. Dazu haben wir uns ausschließlich auf die Aussagen beschränkt, die fachwissenschaftlich als richtig zu beurteilen sind. Die Verteilung der Analyseeinheiten, die zuvor entweder als „explizit richtig“ oder zumindest als „implizit richtig“ kodiert wurden, auf die verschiedenen Kategorien zur Beschreibung des vertikalen Vernetzungsniveaus sind in der Abbildung 1 dargestellt (s. nächste Seite).

Die meisten Aussagen der Studierenden sind dem ersten oder zweiten vertikalen Vernetzungsniveau zuzuordnen (s. Abbildung 1). Im Mittel sind 2,7 Analyseeinheiten pro Studierenden-Essay dem dritten vertikalen Vernetzungsniveau zuzuweisen. Aussagen, die den beiden höchsten vertikalen Vernetzungsniveaus entsprechen, sind in den Essays der Studierenden kaum zu identifizieren (s. Abbildung 1).

Der Vergleich der Essays der Studierenden mit denen der Schüler*innen der 9. Jahrgangsstufe offenbart, dass die Studierenden in Bezug auf alle Kategorien zur Beschreibung der Dimension „vertikales Vernetzungsniveau“ im Mittel mehr fachwissenschaftlich korrekte Aussagen formuliert haben (s. Abbildung 1). Mit Ausnahme der Kategorien „Erfahrungswissen“ (erstes vertikales Vernetzungsniveau) und „multiperspektivische Verallgemeinerung“ (fünftes vertikales Vernetzungsniveau) fällt dieser Unterschied zwischen beiden Teilstichproben statistisch signifikant aus (s. Abbildung 1).

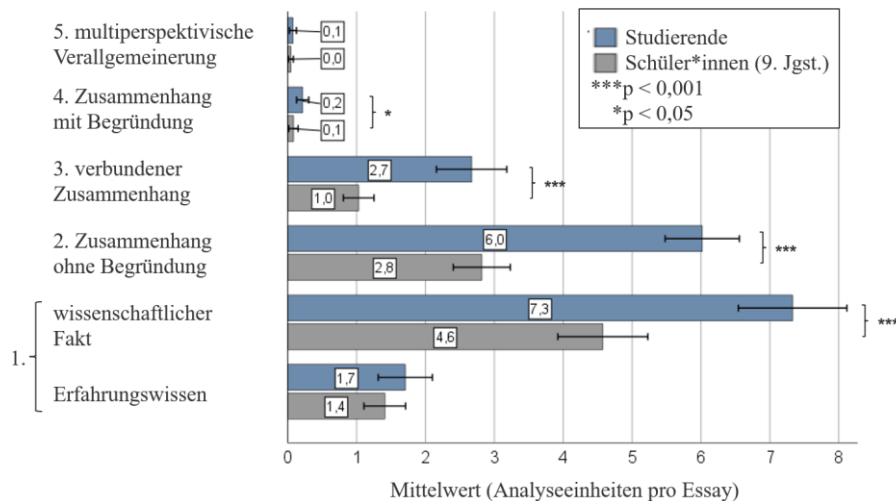


Abb. 1.: Mittlere Verteilung der Analyseeinheiten, die als „explizit richtig“ oder „implizit richtig“ kodiert wurden, auf die Kategorien der Dimension „vertikales Vernetzungsniveau“ – differenziert nach Teilstichprobe

Im Zuge der statistischen Vergleichsberechnungen wurde für das zweite und dritte Vernetzungsniveau ein großer Effekt ($|d| = 1,2$ und $|d| = 0,8$), für das erste vertikale Vernetzungsniveau (Kategorie „wissenschaftlicher Fakt“) ein mittlerer Effekt ($|d| = 0,7$) und für das vierte vertikale Vernetzungsniveau ein kleiner Effekt ($|d| = 0,3$) ermittelt.

5. Diskussion

In Anbetracht der Länge der Essays und der darin enthaltenen großen Anzahl an unterschiedlichen Begriffselementen des Energiekonzepts können wir konstatieren, dass die von uns befragten Studierenden bereits zu Beginn ihres Studiums eine lobenswerte Wissensbasis zum Energiekonzept besitzen. Diese Feststellung wird zusätzlich dadurch gestützt, dass die von uns befragten Studierenden relativ betrachtet nur wenige Aussagen formuliert haben, die aus fachlicher Perspektive als falsch zu beurteilen sind.

Dass die meisten als falsch beurteilten Aussagen in den Essays der Studierenden Verletzungen des Energieerhaltungssatzes darstellen, ist mit Blick auf die vorhandene Forschungsliteratur zu den Lernproblemen von Schüler*innen in Bezug auf das Energiekonzept wenig überraschend (u.a. Neumann et al., 2013; Opitz et al., 2017). An dieser Stelle möchten wir herausstellen, dass wir im Zusammenhang mit dem zentralen Aspekt der Energieerhaltung nicht nur formale sprachliche Ungenauigkeiten – wie von Pauly (2022, S. 195) beschrieben – als falsch beurteilt haben. Pauly (2022, S. 50 ff.) argumentiert, dass der Energieerhaltungssatz nur für ein abgeschlossenes System gilt, sodass Beschreibungen von Phänomenen, in denen Energie „verloren“ oder „verbraucht“ wird, nicht grundsätzlich als falsch zu beurteilen sind, wenn System und Umgebung nicht gemeinsam betrachtet werden. Die in Abschnitt 4.2 dargestellten Aussagen von den Studierenden GPC-45 und GPC-34 zeigen u. E. jedoch eindeutig ein fehlendes Verständnis des zentralen Aspekts der Energieerhaltung.

So beschreiben die Studierenden Situationen, in denen Energie wie eine Art Treibstoff verbraucht (GPC-45) oder produziert wird (GPC-34) und damit auch nicht vom jeweiligen System in die Umgebung entlassen oder aus der Umgebung entnommen wird.

Erfreulicherweise haben wir in den Essays unserer Studierenden nur überaus wenige Aussagen identifizieren können, die auf wissenschaftlich falsche Vorstellungen zum Zusammenhang von Energie und chemischen Bindungen schließen lassen. Ob die von uns befragten Studierenden jedoch wirklich die in der Forschungsliteratur umfassend beschriebenen fachwissenschaftlich falschen Vorstellungen tatsächlich nicht besitzen (u.a. Watts, 1983; Cooper & Klymkowsky, 2013; s. Abschnitt 2.3), können wir mit der von uns gewählten Methodik nicht mit Sicherheit sagen. An dieser Stelle wären zusätzlich leitfadengestützte Interviews – wie bspw. von Pahl & Komorek (2013) vorgeschlagen – für eine abschließende Klärung geeignet.

Mit Blick auf die Analysen zum vertikalen Vernetzungsniveau ist festzustellen, dass die von den Studierenden verschriftlichten Aussagen mehrheitlich einem eher niedrigen vertikalen Vernetzungsniveau entsprechen und das höchste vertikale Vernetzungsniveau leider nur überaus selten erreicht wird. Diese Befunde decken sich grundsätzlich mit denen aus Studien, in denen Vernetzungsleistungen von Schüler*innen untersucht wurden (u.a. Dietz, 2023; Dietz & Bolte, 2021; 2022; Knobloch et al., 2013; Neumann et al., 2008; Podschuweit et al., 2016; Wadouh, 2007).

Der Vergleich der Leistungen der Studierenden mit denen der Schüler*innen einer 9. Jahrgangsstufe (Dietz, 2023; Dietz & Bolte, 2021; 2022) offenbart jedoch, dass die Studierenden signifikant häufiger auch zu höheren vertikalen Vernetzungsleistungen in Bezug auf das Energiekonzept imstande waren. Dieser Befund ist erwartungskonform und kann als Beleg

für die Validität des von uns theoriegeleitet entwickelten Modells zur Analyse von Vernetzungsleistungen (MAVerBE, s. Abschnitt 2.2) interpretiert werden. Offen bleibt zum jetzigen Zeitpunkt allerdings die Frage, warum nur wenige Ausführungen dem höchsten vertikalen Vernetzungsniveau zuzuordnen sind und ob dies auf das fehlende Wissen seitens der Studierenden oder auf die gewählte Methode des Essayschreibens zurückzuführen ist.

Das häufige Auftreten von Studierenden-Aussagen, die einem niedrigen vertikalen Vernetzungsniveau entsprechen, kann u.E. zumindest zum Teil mit der Aufgabenstellung, ein Essay zum Energiekonzept schriftlich zu verfassen, erklärt werden. Essays besitzen grundsätzlich eine Einleitung, die die Funktion erfüllt, den Lesenden in das Thema des Essays einzuführen (siehe u.a. Krause, 2003). Wir konnten in den Essays der Studierenden häufig beobachten, dass in der Einleitung der Energiebegriff zunächst entweder als Definition über den Energieerhaltungssatz oder über den zentralen Aspekt der Energieform eingeführt wurde. Sowohl das Nennen einer Definition als auch das Aufzählen von Energieformen stellen nach unserem Modell MAVerBE (s. Abschnitt 2.2), eine Aneinanderreihung von wissenschaftlichen Fakten dar, sodass die Einleitung der Essays häufig von Aussagen, die nahezu ausschließlich dem ersten vertikalen Vernetzungsniveau entsprechen, dominiert werden.

Um zu prüfen, ob und wenn ja inwieweit das Fehlen von besonders hohen Vernetzungsleistungen auf die Essay-Methode zurückzuführen ist, könnte in weiterfolgenden Studien, z.B. durch anschließende Interviews, untersucht werden.

6. Ausblick

Wie zum Ende des vorherigen Abschnitts dargelegt, wäre es zur weiteren Validierung des MAVerBE im nächsten Schritt notwendig, z.B. zu untersuchen, ob Expert*innen (bspw. Doktorierende der naturwissenschaftlichen Fächer) in Essays über das Energiekonzept vermehrt auch Ausführungen darlegen würden, die dem höchsten vertikalen Vernetzungsniveau entsprechen.

Außerdem stellt die Frage, ob Studierende der Chemie und der Biochemie tatsächlich kaum Fehlvorstellungen zum Zusammenhang von Energie und chemischen Bindungen besitzen, einen interessanten Forschungsfokus dar. Wir planen daher auch zukünftig mit den Fachkolleg*innen zusammenarbeiten – sowohl um die von uns hier dargelegten offenen Fragen zu klären als auch um die Ergebnisse der hier vorgestellten Studie auf eine noch breitere empirische Basis zu stellen. Wir hoffen auf diese Weise einen Beitrag zur Verbesserung der Hochschullehre und der Studierendenleistungen leisten zu können.

7. Literatur

- Achtenhagen, F., John, E.G., Preiss, P., Tramm, T., Schunck, A., Seemann-Weymar, H. (1992). *Lernhandeln in komplexen Situationen. Neue Konzepte einer betriebswirtschaftlichen Ausbildung*. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH. Wiesbaden.
- Aebli, H. (1981). *Denken: das Ordnen des Tuns, Band 2: Denkprozesse*. Stuttgart: Klett.
- Aebli, H. (2003). *Zwölf Grundformen des Lehrens* (12. Auflage). Klett-Cotta.
- Ausubel, D. P. (1974). *Psychologie des Unterrichts. Band 1*. Weinheim: Beltz.
- Behle, J., & Wilhelm, T. (2017). Aktuelle Schülerrahmenkonzepte zur Energie. In V. Nordmeier & H. Grötzebauch (Hrsg.), *Tagungsband zur DPG-Jahrestagung*. Dresden.
- Bolte, C. (2003a). Konturen wünschenswerter chemiebezogener Bildung im Meinungsbild einer ausgewählten Öffentlichkeit – Methode und Konzeption der curricularen Delphi-Studie Chemie sowie Ergebnisse aus dem ersten Untersuchungsabschnitt. *ZfDN*, 9, 7–26.
- Bolte, C. (2003b). Chemiebezogene Bildung zwischen Wunsch und Wirklichkeit – Ausgewählte Ergebnisse aus dem zweiten Untersuchungsabschnitt der curricularen Delphi-Studie Chemie. *ZfDN*, 9, 27–42.
- Cooper, M. M., & Klymowsky, M. W. (2013). The trouble with chemical energy: Why understanding bond energies requires an interdisciplinary systems approach. *CBE – Life, Sciences Education*, 12, 306–312.
- Crossley, A., Hirn, N., & Starauschek, E. (2009). Schülervorstellungen zur Energie – Eine Replikationsstudie. In V. Nordmeier & H. Grötzebauch (Hrsg.), *Tagungsband zur DPG-Jahrestagung*. Bochum.
- De Jong, T. & Ferguson-Hessler, M. G. M. (1996). Types and Qualities of Knowledge. *Educational Psychologist*, 31(2), 105–113.
- Dietz, D. (2023). *Vernetztes Lernen im fächerdifferenzierten und integrierten naturwissenschaftlichen Unterricht aufgezeigt am Basiskonzept Energie. Eine Studie zur Analyse der Wirksamkeit der Konzeption und Implementation eines schulinternen Curriculums für das Unterrichtsfach „Integrierte Naturwissenschaften 7/8“*. Logos.
- Dietz, D. & Bolte, C. (2021). Mehrdimensionale Analyse zur Vernetzung von Begriffselementen des Basiskonzepts Energie. In: V. Nordmeier & H. Grötzebauch (Hrsg.), *Phydid B: Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung. Digitale Frühjahrstagung 2021* (S. 233-241), Berlin: DPG.
- Dietz, D. & Bolte, C. (2022). Multidimensional Analysis of Knowledge-Linking within the Concept of Energy in Student Essays. *NordiNa*, 18(3), 353-368.

- Dörner, D. (1976). *Problemlösen als Informationsverarbeitung*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Duit, R. (1986). *Der Energiebegriff im Physikunterricht* (Habilitationsschrift). Universität Kiel.
- Eid, M., Gollwitzer, M., & Schmitt, M. (2011). *Statistik und Forschungsmethoden* (2. korrigierte Auflage). Beltz.
- Eisenkraft A., Nordine, J., Chen, R., Fortus, D., Krajcik, J., Neumann, K., & Scheff, A. (2014) Introduction: Why Focus on Energy Instruction? In: R. Chen, A. Eisenkraft, D. Fortus, J. Krajcik, K. Neumann, J. Nordine, & A. Scheff (alle Hrsg.), *Teaching and Learning of Energy in K – 12 Education* (S. 1-11). Springer, Cham.
- Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (1970). *The Feynman Lectures on Physics. Mainly Mechanics, Radiation and Heat* (5. Auflage). Adison-Wesley. Publishing Company.
- Gagné, R. M. (1970). *Die Bedingungen des menschlichen Lernens*. 2. Auflage. Hannover: Schroedel.
- Häußler, P., Frey, K., Hoffmann, L., Rost, J., & Spada, H. (1988). *Physikalische Bildung für heute und morgen: Ergebnisse einer curricularen Delphi-Studie*. IPN.
- Klafki, W. (2007). *Neue Studien zur Bildungstheorie und Didaktik. Zeitgemäße Allgemeinbildung und kritisch-konstruktive Didaktik* (6. Auflage). Beltz Verlag.
- KMK: Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (2005a). *Bildungsstandards im Fach Chemie für den mittleren Schulabschluss*. Luchterhand.
- KMK: Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (2005b). *Bildungsstandards im Fach Physik für den mittleren Schulabschluss*. Luchterhand.
- KMK & IQB: Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland und Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen (2020a). *Bildungsstandards im Fach Chemie für die Allgemeine Hochschulreife*.
- KMK & IQB: Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland und Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen (2020c). *Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife*.
- Knobloch, R., Sumfleth, E., & Walpuski, M. (2013). Förderung der Qualität fachinhaltlicher Schüleräußerungen in experimenteller Kleingruppenarbeit im Chemieunterricht. *ZfDN*, 19, 347–373.
- Krause, S. (2003). Wissenschaftliches Arbeiten. In: H. Münkler (Hrsg.), *Politikwissenschaft: ein Grundkurs* (S. 651-679). Rowohlt.
- Kubsch, M., Nordine, J., Neumann, K., Fortus, D., & Krajcik, J. (2019). Probing the Relation between Students' Integrated Knowledge and Knowledge-in-Use about Energy using Network Analysis. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology*, 15(8), 1–20.
- Lancor, R. A. (2014). Using student-generated analogies to investigate conceptions of energy: A multidisciplinary study. *International Journal of Science Education*, 36(1), 1–23.
- Neumann, K., Lau, A., Fischer, H. E. & Sumfleth, E. (2008). Vertikale Vernetzung und kumulatives Lernen im Chemie- und Physikunterricht. In E.-M. Lankes (Hrsg.), *Pädagogische Professionalität als Gegenstand empirischer Forschung* (S. 141–151). Waxmann.
- Neumann, K., Viering, T., Boone, W. J., & Fischer, H. E. (2013). Towards a learning progression of energy. *Journal of Research in Science Teaching*, 50(2), 162–188.
- Opitz, S. T., Neumann, K., Bernholt, S., & Harms, U. (2017). How do students understand energy in biology, chemistry, and physics? Development and validation of an assessment instrument. *Eurasia Journal of Mathematics Science and Technology Education*, 13(7), 3019–3042.
- Pahl, E.-M. (2013). *Subjektive Überzeugungen von Lehrkräften des Sachunterrichts und Physikunterrichts zum Thema Energie*. Logos.
- Pahl, E.-M. & Komorek, M. (2013): "Energie" im Sach- und im Physikunterricht. Vorstellungen von Lehrpersonen vom Konzept der Energie und seiner Vermittlung im Unterricht. In: M. Komorek & S. Prediger (Hrsg.), *Der lange Weg zum Unterrichtsdesign. Zur Begründung und Umsetzung fachdidaktischer Forschungs- und Entwicklungsprogramme* (S. 237-255). Waxmann.
- Park, M., & Liu, X. (2016). Assessing understanding of the energy concept in different science disciplines. *Science Education*, 100(3), 483–516.
- Park, M., & Liu, X. (2021). An investigation of item difficulties in energy aspects across biology, chemistry, environmental science, and physics. *Research in Science Education*, 51(1), 43–60.
- Pauly, A. (2022). *Das Energieverständnis angehenden Chemielehrkräfte*.
- Podschuweit, S., Bernholt, S., & Brückmann, M. (2016). Classroom learning and achievement: how the complexity of classroom interaction impacts students' learning. *Research in Science & Technological Education*. 1–22.
- Podschuweit, S., & Bernholt, S. (2020). Investigating Network Coherence to Assess Students' Conceptual Understanding of Energy. *Education Sciences*, 10(4), 103, 1–20.
- Schnotz, W. (1994). *Aufbau von Wissensstrukturen. Untersuchungen zur Kohärenzbildung beim Wissenserwerb mit Texten*. Beltz.

- SenBJF & MBS: Senatsverwaltung für Bildung, Jugend und Familie Berlin & Ministerium für Bildung, Jugend und Sport Brandenburg (2015a). *Rahmenlehrplan Teil C Biologie, Jahrgangsstufen 7–10*.
- SenBJF & MBS: Senatsverwaltung für Bildung, Jugend und Familie Berlin & Ministerium für Bildung, Jugend und Sport Brandenburg (2015b). *Rahmenlehrplan Teil C Chemie, Jahrgangsstufen 7–10*.
- SenBJF & MBS: Senatsverwaltung für Bildung, Jugend und Familie Berlin & Ministerium für Bildung, Jugend und Sport Brandenburg (2015c). *Rahmenlehrplan Teil C Physik, Jahrgangsstufen 7–10*.
- Trumper, R. (1996). Survey of Israeli physics students' conceptions of energy in pre-service training for high school teachers. *Research in Science and Technological Education*, 14, 179-192.
- Trumper (1998). R. A longitudinal study of physics students' conceptions on energy in pre-service training for high school teachers. *Journal of Science Education and Technology*, 7(4), 311 – 318.
- Wadouh, J. (2007). *Vernetzung und kumulatives Lernen im Biologieunterricht der Gymnasialklasse 9*. Universität Duisburg-Essen
- Watts, D. M. (1983). *A study of alternative frameworks in school science*. University of Surrey.
- Watts, D. M., & Gilbert, J. K. (1983). Enigmas in school science: students' conceptions for scientifically associated words. *Research in Science & Technological Education*, 1(2), 161–171.
- Weinert, F. E. (2000). *Lehren und Lernen für die Zukunft – Ansprüche an das Lernen in der Schule*. *Pädagogische Nachrichten Rheinland-Pfalz*, 2, 1-16 (Nachdruck als Reprint 16/2000. München: Max-Planck-Institut für Psychologische Forschung)

8. Danksagung

Wir danken Frau Prof. Dr. Beate Paulus (AG „Theoretische Chemie“, Freie Universität Berlin) herzlich für die Möglichkeit, dass wir Studierende im Rahmen der Einführungsveranstaltungen der Module „Grundlagen der Physikalischen Chemie“ sowie „Atombau und chemische Bindung“ befragen durften.

Adaptive Lehrerfortbildung zum quantenmechanischen Weltbild

Philipp Scheiger*, Lukas Blessing*, Kim Kappl*, Ronny Nawrodt*

*Physik und ihre Didaktik, Universität Stuttgart, 70569 Stuttgart
p.scheiger@physik.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

Durch die prominente Platzierung der Quantenmechanik in den Bildungsstandards 2016 der Kultusministerkonferenz werden physikalische Inhaltsbereiche für den Schulunterricht relevant, die vorher nicht in allen Bildungs- und Lehrplänen der Länder standen. Eine Herausforderung dabei ist, dass das quantenmechanische Weltbild hinsichtlich der Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität und Determinismus für manche Lehrkräfte nie ein Thema in den Fachvorlesungen des Studiums war.

Folglich ist es im Rahmen von Lehrerfortbildungen von entscheidender Bedeutung, den Lehrkräften die Möglichkeit zu geben, sich sowohl fachlich als auch fachdidaktisch mit diesem Thema auseinanderzusetzen. Innerhalb des Verbundprojekts MINT-ProNed wird daher eine Lehrerfortbildung im Blended-Learning-Ansatz entwickelt, die das Thema auf verschiedenen Ebenen behandelt und somit adaptiv auf die individuellen Bedürfnisse der Lehrkräfte zugeschnitten werden kann. Ziel der verschiedenen Anforderungsebenen sind die Anschlussfähigkeit an bereits bestehende und gut funktionierende Lehrkonzepte wie den Wesenszügen der Quantenmechanik aus dem mlq-Konzept, die Vermittlung von vertieftem Hintergrundwissen für Lehrkräfte und die Einordnung des Nobelpreises von 2022 sowie der verschiedenen Interpretationsformen der Quantenmechanik.

1. Motivation

Die Behandlung des quantenmechanischen Weltbilds hinsichtlich der Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität und des Determinismus, wie sie in den KMK Standards [1] für die gymnasiale Oberstufe gefordert werden, stellt Lehrkräfte vor eine große Herausforderung. So ist eine klare Definition dieser Begriffe ohne Vorwissen nicht einfach. Entweder ist die gemeinte Bedeutung dieser Begriffe fachlich oft nicht angemessen [2] oder die Begriffe haben in unterschiedlichen Teilgebieten der Physik unterschiedliche Bedeutungen [3]. Außerdem bilden versteckte lokale Parameter eine sehr verlockende Erklärungsalternative, die auch sehr schnell von Lernenden bei diesem Thema zur Sprache gebracht werden. Damit bei Lernenden nicht der Eindruck einer unvollständigen Quantenmechanik entsteht, müssen Lehrkräfte in der Lage sein an dieser Stelle fachlich fundiert zu argumentieren.

Zusätzlich ist die quantenmechanische Verschränkung ein wichtiger Aspekt in der Diskussion um das quantenmechanische Weltbild. Dies ist wohl einer der bekanntesten Begriffe aus der Quantenphysik, der immer wieder in populärwissenschaftlichen Artikeln und Videos aufgegriffen und behandelt wird oder aber auch für vollkommen unphysikalische oder pseudowissenschaftliche Erklärmuster herhalten muss. Mit einer soliden Lehrkräftebildung möchten wir einen Beitrag leisten, damit Lehrkräfte ihre SchülerInnen später dazu befähigen adäquat das fachliche Niveau solcher Artikel oder Videos zu bewerten.

In diesem Beitrag soll die Planung und Konzeption einer Lehrerfortbildung beschrieben werden, die im

Rahmen des Verbundprojekts MINT-ProNed für die Physik entstehen soll. In Kapitel 2 wird der Rahmen der Fortbildung in den Zielen des Projekts erläutert. Kapitel 3 beschreibt die ausgewählten Inhalte zum Thema des Quantenmechanischen Weltbilds und in Kapitel 4 wird die geplante Umsetzung beschrieben.

2. Rahmen der Fortbildung

Das Netzwerk Fortbildungen im Verbundprojekt MINT-ProNed zielt darauf ab, evidenzbasierte Lehrkräftefortbildungen zu entwickeln, die Lehrkräfte befähigen, digitale Technologien adaptiv im Unterricht zu nutzen. Dabei orientiert sich das Netzwerk am Orientierungsrahmen DiKoLAN (Digitale Kompetenzen für das Lehramt in den Naturwissenschaften) [4], der die notwendigen fachspezifischen und digitalen Kompetenzen für Lehrkräfte beschreibt. Die Rahmenkonzeption des Netzwerks umfasst vier Abschnitte:

- a) Identifizierung der zu fördernden SchülerInnenkompetenzen,
- b) Einsatzmöglichkeiten digitaler Unterstützung,
- c) Identifizierung erforderlicher Lehrkräftekompetenzen und
- d) Abstimmung der Fortbildungen innerhalb des Netzwerks.

Diese Struktur soll sicherstellen, dass Fortbildungen praxisnah und zielgerichtet sind, um die adaptive Förderung von SchülerInnenkompetenzen zu ermöglichen.

Um einen adaptiven Einsatz digitaler Werkzeuge und Methoden zu gewährleisten, haben die Lehrerfortbildungen die folgende Unterrichtssequenz zum Vorbild. Nach einem ersten Lernsetting erfolgt eine Diagnose des Leistungsstands der SchülerInnen, die Ausgangslage der Wahl eines zweiten Lernsettings wird. Das zweite Lernsetting wird also entsprechend der SchülerInnen Leistung gewählt. Zu allen drei Zeitpunkten kann eine digitale Anreicherung die Qualität des Unterrichts steigern.

Im Themenbereich der quantenmechanischen Verschränkung ist neben der digitalen Fortbildung auch die fachliche Fortbildung der Lehrkräfte relevant. In vielen Lehr- und Bildungsplänen wird dieses Thema neu und für die Lehrkräfte unerprobt sein. Zusätzlich kann nicht erwartet werden, dass die entsprechenden Inhalte in den universitären Fachausbildungen aller Lehrkräfte thematisiert wurden. Das bedeutet, dass die Fortbildung für Lehrkräfte mit sehr unterschiedlichem Vorwissen konzipiert werden muss.

3. Lernziele für SchülerInnenkompetenzen und Inhalte

Bei den Lernzielen sollte zwischen den digitalen, prozessbezogenen und den inhaltlichen Kompetenzen unterschieden werden. Diese werden daher im Folgenden separat diskutiert.

3.1. Digitale, prozessbezogene Kompetenzen

Der Physikunterricht bietet sich (erwartbarer Weise) an, alle digitalen Kompetenzen, die der DiKoLAN [4] aufzählt

- Dokumentation,
- Präsentation,
- Kommunikation/Kollaboration,
- Recherche/Bewertung,
- Messwert-/Datenerfassung,
- Datenverarbeitung und
- Simulation/Modellierung,

zu adressieren und zu behandeln. Im Bereich der Quantenphysik ist dies anders, weil es ungleich schwieriger ist, eigene Messdaten echter Quantenexperimente zu generieren. Des Weiteren können die Datenmengen sehr groß und in ihrer Auswertung extrem komplex werden. Die fachspezifischen Kompetenzen (der Messwert- und Datenerfassung, der Datenverarbeitung und der Simulation und Modellierung) sind in diesem Themenkomplex also nur schwer zu vermitteln.

Durch das große populärwissenschaftliche Interesse an der Quantenphysik oder deren Zweckentfremdung (Stichwort: Quantenheilung) in digitalen Medien kann die SchülerInnen Kompetenz der Recherche und Bewertung an vielen Beispielen trainiert werden. Damit dies auf einem fachlich fundierten Niveau stattfinden kann, muss vorher der theoretische und fachliche

Input durch die Lehrkraft erfolgen. Die fachlichen Lernziele, die dafür notwendig sind, werden im folgenden Abschnitt diskutiert.

3.2. Sachkompetenzen

Die inhaltsbezogenen Sachkompetenzen der SchülerInnen sind bei diesem Thema durch die KMK Standards recht eng und klar vorgegeben. Gefordert wird ein fachlicher Umgang mit dem quantenmechanischen Weltbild hinsichtlich der Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität und Determinismus [1]. Die Begriffe der Kausalität und Lokalität können gemeinsam und in eigener Abgrenzung nur am Beispiel der Verschränkung diskutiert werden. Ein vernünftiges Lernziel für die Sachkompetenzen wäre beispielsweise der Bell Zustand von zwei polarisationsverschränkten Photonen:

$$|\psi\rangle_{\text{Bell}} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|h\rangle_1|v\rangle_2 - |v\rangle_1|h\rangle_2). \quad \{1\}$$

Ob dieser Zustand in der Dirac Notation (h steht für horizontal Polarisiert und v für vertikal) oder in einer anderen Darstellungsform besprochen wird, obliegt der Entscheidung der Lehrkraft und ist abhängig vom Mathematisierungsgrad des eigenen Unterrichts sowie dem Leistungsvermögen der SchülerInnen.

Eine Diskussion zum quantenmechanischen Weltbild kann anschließend an diesem Zustand diskutiert werden, wenn die beiden Photonen räumlich voneinander getrennt werden und zu zwei Messvorrichtungen geschickt werden, die so weit auseinander stehen, dass keine Information mit Lichtgeschwindigkeit zwischen den Messungen vom einen zum anderen gelangen kann. Eine Skizze wie in Abbildung 1 kann dies für SchülerInnen veranschaulichen. In der Regel werden die Messvorrichtungen mit zwei Forschenden assoziiert, die Alice und Bob genannt werden.

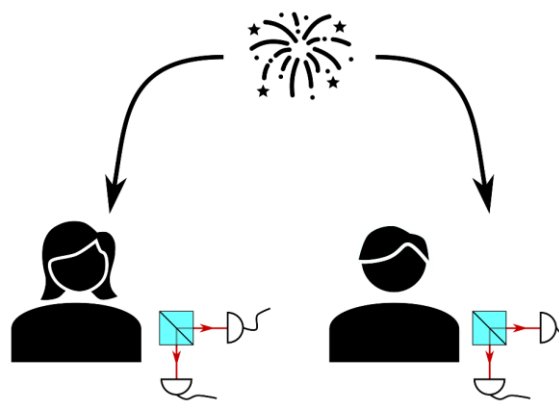


Abb. 1: Skizze für die räumliche Trennung zweier verschränkter Photonen, die zu Alice und Bob mit je einem Aufbau zur Bestimmung der Polarisation geschickt werden.

4. Lernziele für Kompetenzen der Lehrkräfte

Da die Lehrkräfte über wesentlich mehr Vorwissen verfügen und ihr Hintergrundwissen auch weiter gefasst sein muss als das der SchülerInnen, sind die Lernziele für Lehrkräfte in allen Bereichen umfangreicher.

4.1. Digitale, prozessbezogene Kompetenzen

Für die Lehrkräfte ist entscheidend, dass sie die digitalen Medien passend zu ihrem Unterricht auswählen können. Am Anfang der Einheit zum quantenmechanischen Weltbild sollte ein erstes Lernsetting für die Inhaltsvermittlung stehen. Die Lehrkräfte sollten hier über digitale Anreicherungen informiert und ermutigt werden. Dazu zählen digital unterstützte Selbstlernkurse (z.B. über Moodle), veranschaulichende Simulationen oder klassische Lehrvideos.

Nach dem ersten Lernsetting erfolgt über eine Diagnose die adaptive Zuteilung der zweiten Lern- oder Übungsphase. Diese Diagnose kann im Themenbereich der Verschränkung direkt durch die Lehrkraft erfolgen, die den bisherigen Leistungsstand und das Interesse der SchülerInnen berücksichtigt. Die Lehrkraft kann dabei durch die Methode der Peer Instruction [5] digital unterstützt werden. Durch das Abstimmverhalten vor und nach einer Peer-Diskussion, mit auf das Thema zugeschnittenen Verständnisfragen, kann der Leistungsstand der SchülerInnen objektiver ermittelt werden.

In der Phase der zweiten Lernsettings sollen die SchülerInnen verschiedene Beiträge zur quantenmechanischen Verschränkung bewerten, einordnen oder selbst neue Informationen recherchieren. Damit dies konstruktiv von statten gehen kann, müssen die Lehrkräfte selbst im Voraus Beiträge sichten und für den adaptiven Einsatz einordnen oder situativ sehr schnell in der Lage sein, die SchülerInnen bei ihrer Bewertung zu unterstützen. Positive wie negative Beispiele von digitalen Beiträgen sollten deshalb bei einer Lehrerfortbildung diskutiert werden.

4.2. Sachkompetenzen

Um das quantenmechanische Weltbild hinsichtlich der Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität und Determinismus fachlich auf einem hohen Niveau reflektieren oder diskutieren zu können, sind viele Aspekte der Quantenphysik und der Physik allgemein relevant. Darüber hinaus benötigen Lehrkräfte Hintergrundwissen zu versteckten lokalen Parametern, wie sie Einstein, Podolsky und Rosen im berühmten EPR-Paradoxon fordern [6], und dass diese keine notwendige Ergänzung der Quantenmechanik darstellen, bzw. mit den Experimenten von Clauser und Aspect widerlegt wurden [7-11] (wofür es 2022 zusammen mit Zeilinger den Physik-Nobelpreis gab). Auch von SchülerInnen werden beim Thema Verschränkung „Dinge, die wir einfach noch nicht kennen“ immer wieder aufgebracht und Lehrkräfte müssen hier adäquat reagieren können. Im Folgenden werden die Aspekte aufgezählt, die für eine umfassende Diskussion notwendig sind.

4.2.1. Wesenszüge der Quantenmechanik

Die Wesenszüge der Quantenmechanik, aus dem mlq-Kurs [12], sind inzwischen zentraler Bestandteil des Physikunterrichts und werden auch in den KMK Standards [1] eingefordert. Lehrkräfte müssen hier auf einem soliden fachlichen Fundament stehen und

die Wesenszüge mit weiterführenden Begriffen wie dem Kollaps der Wellenfunktion, der Schrödinger-Gleichung und der Unschärferelation in Relation setzen können.

4.2.2. Die mathematische Formulierung von Zuständen & Messungen

Während das Phänomen der Verschränkung auch ohne eine mathematische Formulierung beschrieben und in Ansätzen auch diskutiert werden kann, ist für den Ausschluss von versteckten lokalen Parametern ein Verständnis um die mathematischen Formulierungen essentiell. Der experimentelle „Beweis“ kann als solcher nur verstanden werden, wenn die Theorie dahinter in jedem Schritt nachvollziehbar ist. Ansonsten bleibt die Zählrate von Quanten nur eine Zahl auf einem Display.

Relevant wird ein Verständnis des Formalismus beispielsweise für den Fall eines Basiswechsels. Dabei stellt sich die Frage, was passiert, wenn die Orientierungen der Messungen von der Orientierung (z.B. Polarisation) der Präparation abweichen. Wünschenswert wäre darüber hinaus, wenn Lehrkräfte den Formalismus unabhängig von der physikalischen Umsetzung verstehen und so nicht nur mit verschränkten Photonen, sondern z.B. auch mit verschränkten Spinsystemen vertraut sind.

4.2.3. Sprachliche Elemente

Um das Phänomen der Verschränkung und seine Auswirkungen auf unser Verständnis der Natur zu verstehen, müssen Lehrkräfte über klare Definitionen der grundlegenden Begriffe verfügen. Für ein besseres Verständnis der in den KMK Standards [1] geforderten Begriffe werden diese um die Idee einer „vollständigen Theorie“ erweitert. Problematisch ist, dass auch in fachlichen Diskussionen immer wieder Vorurteile oder unsaubere Interpretationen auftauchen (vgl. [2]). Wir empfehlen daher eng an den Definitionen von Einstein, Podolsky und Rosen aus ihrem berühmten Paper zum EPR-Paradox [6] zu bleiben, diese aber als nicht allgemein gültige Definitionen kenntlich zu machen.

4.2.4. Nicht-Lokalität für zwei Quanten ohne Ungleichungen

Für den Ausschluss von versteckten lokalen Parametern sind historisch die Bell-Ungleichung [13] und die CHSH-Ungleichung [7] zu nennen. Mathematisch und physikalisch sind ihre Herleitungen aber Herausforderungen, die in der Kürze von Lehrerfortbildungen nur schwer zu meistern sind. Hardy [14] hat 1993 ein Experiment vorgeschlagen, bei dem die Nicht-Lokalität der Verschränkung mit einer einfachen Fallun-

$$|\Psi\rangle = \alpha |h\rangle_1 |h\rangle_2 - \beta |v\rangle_1 |v\rangle_2$$

$$|\Psi\rangle = N(AB |\varphi\rangle_1 |\vartheta\rangle_2 + AB |\vartheta\rangle_1 |\varphi\rangle_2 + B^2 |\vartheta\rangle_1 |\vartheta\rangle_2)$$

$$|\Psi\rangle = N(A |d_{rechts}\rangle_1 |\varphi\rangle_2 + B |d_{rechts}\rangle_1 |\vartheta\rangle_2 - A^2 A^* |d_{rechts}\rangle_1 |\varphi\rangle_2 - A^2 B |d_{links}\rangle_1 |\varphi\rangle_2)$$

$$|\Psi\rangle = N(A |\varphi\rangle_1 |d_{rechts}\rangle_2 + B |\vartheta\rangle_1 |d_{rechts}\rangle_2 - A^2 A^* |\varphi\rangle_1 |d_{rechts}\rangle_2 - A^2 B |\varphi\rangle_1 |d_{links}\rangle_2)$$

$$|\Psi\rangle = N((1 - |A|^4) |d_{rechts}\rangle_1 |d_{rechts}\rangle_2 + A^2 B A^* |d_{links}\rangle_1 |d_{rechts}\rangle_2 + A^2 A^* B |d_{rechts}\rangle_1 |d_{links}\rangle_2 - A^2 B^2 |d_{links}\rangle_1 |d_{links}\rangle_2)$$

$$A = \frac{\sqrt{\alpha\beta}}{\sqrt{1 - |\alpha\beta|}}, \quad B = \frac{|\alpha| - |\beta|}{\sqrt{1 - |\alpha\beta|}}, \quad N = \frac{1 - |\alpha\beta|}{|\alpha| - |\beta|}$$

Abb. 2: Skizze für Zustand $\{2\}$ angeben in den Basiszuständen (rot) für die Orientierung, in der Alice und Bob messen. Je nach Einstellung der Messapparaturen, links dargestellt, lassen sich so die Messkombinationen aus dem Zustand (rechts) vorhersagen. Alle Formeln rechts beschreiben dabei den selben Zustand $\{2\}$. φ und ϑ beschreiben dabei den Winkel zwischen der vertikalen Messung und der leicht gedrehten Basis und d steht für die diagonale Basis.

terscheidung von 4 verschiedenen Messkombinationen bei zwei neuen Polarisationsrichtungen hergeleitet werden kann, vergleiche Abbildung 2. Ausgangspunkt sind zwei Quanten in einem nicht vollständig verschränkten Zustand:

$$|\psi\rangle_{\text{Hardy}} = \alpha |h\rangle_1 |v\rangle_2 - \beta |v\rangle_1 |h\rangle_2. \quad \{2\}$$

Versucht man die Messergebnisse der Quantenmechanik dieser 4 Messkombinationen mit einem unbestimmten versteckten lokalen Parameter nachzuahmen, erfolgt ein Widerspruch in den Messungen. Für die vollständige Herleitung sind lediglich eine etwas aufwendigere Vektorrechnung und die Interpretation von Messwahrscheinlichkeiten notwendig.

Dieses Experiment stellt den fachlichen Höhepunkt der Lehrerfortbildung dar. Im Anschluss können weitere Theorien, die die Verschränkung beschreiben können aber darüber hinaus nicht die relativistische Quantenmechanik wie z.B. die Bohm'sche Mechanik, mit den Lehrkräften diskutiert werden.

5. Aufbau der Fortbildung und Ausblick

Es ist davon auszugehen, dass die Lehrkräfte mit sehr unterschiedlichem Vorwissen zu einer solchen Fortbildung kommen. Das Angebot sollte deshalb ebenfalls adaptiv und damit an die Bedürfnisse der einzelnen Lehrkraft anpassbar sein. Deshalb ist eine Umsetzung im blended-learning Format auf der Plattform Moodle geplant, bei der die Lehrkräfte die Möglichkeit haben grundlegendere Kurse zu überspringen, wenn sie über das entsprechende Vorwissen verfügen.

Prinzipiell ist von leistungsstarken SchülerInnen ebenfalls zu erwarten, dass sie mit der Argumentation von Hardy den Widerspruch in einer Quantenmechanik mit versteckten lokalen Parametern verstehen. In wie weit dieses Experiment eventuell auch mit Hilfe von Analogieexperimenten in den Unterricht integriert werden kann soll mit den Lehrkräften bei der Fortbildung diskutiert werden.

6. Literatur

- [1] KMK – Ständige Konferenz der Kultusminister in der Bundesrepublik Deutschland (2020): Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife: https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2020/2020_06_18-BildungsstandardsAHR_Physik.pdf (Stand 6/2024)
- [2] Lambare, Justo Pastor (2022): On the Meaning of Local Realism. In: Foundations of Physics, 52 (5), S. 98.1-98.15.
- [3] Julio Gea-Banacloche, (2022): Causality, determinism, and physics. In: American Journal of Physics, 90 (11), S. 809–816
- [4] Becker, Sebastian et al. (2020). DiKoLAN: Digitale Kompetenzen für das Lehramt in den Naturwissenschaften. Arbeitsgruppe Digitale Basiskompetenzen. <https://dikolan.de/> (Stand 6/2024)
- [5] Mazur, Eric (2017): Peer Instruction: Springer Berlin, Heidelberg
- [6] Einstein, Albert; Podolsky, Boris and Rosen, Nathen (1935): Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? In: Physical Review, 47 (10), S. 777–780
- [7] Clauser, John et al. (1969): Proposed Experiment to Test Local Hidden-Variable Theories. In: Physical Review Letter, 23 (15), S. 880–884
- [8] Freedman, Stuart and Clauser, John (1972): Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories. In: Physical Review Letter, 28 (14), S. 938–941
- [9] Aspect, Alain et al. (1981): Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell's Theorem. In: Physical Review Letter, 47 (7), S. 460–463
- [10] Aspect, Alain et al. (1982): Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of

- Bell's Inequalities. In: Physical Review Letter, 49 (2), S. 91–94
- [11] Aspect, Alain et al. (1982): Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers. In: Physical Review Letter, 49 (25), S. 1804–1807
- [12] Homepage des milq-Kurses:
<https://www.milq.info/milq-und-die-wesenszuge-der-quantenphysik/>
(Stand 6/2024)
- [13] Bell, Jonathan (1964): On the Einstein Podolsky Rosen paradox. In: Physics, 1 (3), S. 195–200
- [14] Hardy, Lucien (1993): Nonlocality for two particles without inequalities for almost all entangled states. In: Physical Review Letter, 71 (11), S. 1665–1668

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Verbundprojekts „Professionelle Netzwerke zur Förderung adaptiver, prozessbezogener, digital gestützter Innovationen in der MINT Lehrpersonenbildung (MINT-ProNed)“ von Bund und Ländern aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung im Projekt „lernen:digital“ (Förderkennzeichen 01JA23M02L) unterstützt.

Das Q-Masterstudium als wissenschaftsbasierter Quereinstieg in das Lehramt

- Ergebnisse der Begleitforschung zum Fach Physik an der FU Berlin -

Novid Ghassemi, Volkhard Nordmeier

Freie Universität Berlin, Arnimallee 14, 14195 Berlin
novid.ghassemi@fu-berlin.de, volkhard.nordmeier@fu-berlin.de

Kurzfassung

Mit dem bestehenden und für die kommenden Jahre erwarteten Mangel an grundständig qualifizierten Lehrpersonen werden weiterhin alternative Wege in das Lehramt benötigt. Ein diesbezüglich oftmals positiv hervorgehobenes Modell sind die sogenannten Quereinstiegs-Masterstudiengänge (kurz: Q-Master). Dabei wird zwar kein grundständiges Lehramtsstudium absolviert; im Gegensatz zum Quereinstieg ist dem Vorbereitungsdienst hier allerdings ein spezielles Lehramtsmasterstudium vorangestellt. Empirische Studien zu diesem alternativen Weg in den Lehrer*innenberuf deuten bislang auf günstige motivationale und kognitive Eingangsbedingungen sowie eine vergleichbare Ausprägung und Entwicklung der berufsrelevanten, professionellen Kompetenzen der Studierenden hin. Der Beitrag stellt die Ergebnisse der Begleitstudie zum Q-Masterstudiengang im Fach Physik an der Freien Universität Berlin vor und diskutiert diese hinsichtlich ihrer Implikationen für alternative Wege in den Beruf sowie die Lehrkräftebildung in Deutschland allgemein.

1. Ausgangslage

Der Lehrkräfteeinstellungsbedarf kann seit mehr als zwei Jahrzehnten nicht durch grundständig neuqualifizierte Lehrkräfte gedeckt werden (z. B. Rackles, 2020 oder - physikspezifisch - Korneck et al., 2010). Auch für die kommenden Jahre wird von einem Andauern dieser Problematik ausgegangen (z. B. KMK, 2022; Geis-Thöne, 2022; Klemm, 2021). Ein besonders großer Mangel wird für die MINT-Fächer und damit auch für das Fach Physik prognostiziert (z. B. Klemm, 2021).

Die Gründe für den Lehrkräftemangel sind vielfältig: Hohe Pensionierungsraten (Statistisches Bundesamt, 2022), hohen Studienabbruchzahlen (z. B. Güldener et al., 2020) spielen eine Rolle. Aber auch weniger berechenbare Faktoren (z. B. demografische Veränderungen, veränderte Attraktivität des Berufs) gelten als bedeutsam (z. B. Fickermann, 2020; Geis-Thöne, 2022).

1.1. Alternative Wege in den Beruf

Als eine Maßnahme, um den Mangel an grundständig neuqualifizierten Lehrkräften zu kompensieren, haben Bund und Länder in den vergangenen Jahren unterschiedliche Notprogramme aufgesetzt und alternative, nicht-grundständige Wege in den Lehrberuf geschaffen (Puderbach & Gehrman, 2020).

In Darstellungen und Diskussionen dieser alternativen Wege in den Beruf wird häufig zwischen Seiteneinstieg, Quereinstieg und qualifiziertem Quereinstieg unterschieden (vgl. z. B. Lucksnat et al., 2020; Korneck et al., 2021):

Als ‚Seiteneinsteigende‘ werden Lehrkräfte bezeichnet, „die [...] nicht [...] über die erste Lehramtsprüfung verfügen und ohne das Absolvieren des

eigentlichen Vorbereitungsdienstes in den Schuldienst eingestellt werden“ (KMK, 2019a, S. 32). Innerhalb dieser Definition kann außerdem differenziert werden zwischen dem „Seiteneinstieg MIT dem Ziel, durch Nachqualifizierung das zweite Staatsexamen nachzuholen“ (Korneck et al., 2010, S. 10) und dem Seiteneinstieg ohne dieses Ziel (ebd.).

‚Quereinsteigende‘ verfügen über kein abgeschlossenes lehramtsbasiertes Studium, absolvieren aber den schulpraktischen Teil des Bildungswegs (Vorbereitungsdienst) und schließen diesen mit der entsprechenden Staatsprüfung ab (Korneck et al., 2010, S. 9).

Eine eindeutige, inhaltlich-kriteriale Unterscheidung zwischen Quereinstieg und Seiteneinstieg ist dabei nicht immer möglich. Seiten- und Quereinstieg haben die Gemeinsamkeit, dass eine didaktische und erziehungswissenschaftliche Qualifizierung nicht vorgesehen ist bzw. kaum unter Beteiligung von (lehrkräftebildenden) Universitäten konzipiert und durchgeführt wird (Puderbach et al., 2016).

Als ‚qualifizierter Quereinstieg‘ werden Modelle bzw. Angebote bezeichnet, die einen Wechsel in einen lehramtsbezogenen Studiengang während des Studiums (meistens im Übergang vom Bachelor zum Master) ermöglichen sowie ECTS-basierte universitäre lehramtsbezogene Qualifikationsprogramme (Puderbach et al., 2016). In diese Kategorie fallen lehramtsbezogene Masterstudiengänge mit flexiblen Eingangsbedingungen bzw. mit dem ‚Profil Quereinstieg‘.

2. Determinanten und Konsequenzen professioneller Kompetenz von (nicht grundständig qualifizierten) Lehrkräften

Professionelle Kompetenzen gelten als entscheidend für die Qualität der Berufsausübung von Lehrkräften (Baumert & Kunter, 2006). Zusammenhänge zwischen der Kompetenz der Lehrkraft und dem (fachlichen) Lernen der Schüler*innen, deren motivationaler Entwicklung sowie lehrkräftebezogenen Aspekten (wie z. B. dem beruflichen Wohlbefinden) können als theoretisch etabliert bezeichnet werden und sie konnten in zentralen Studien auch nachgewiesen werden (Hill et al., 2005; Kunter et al., 2011a; Blömeke et al., 2008).

Für die Ausprägung und Entwicklung der professionellen Kompetenzen von Lehrkräften gelten angebotene formale Lerngelegenheiten und deren Nutzung sowie persönliche Voraussetzungen (u. A. kognitive und motivationale Merkmale) als entscheidend (Kunter et al., 2011b).

Auch für das Physik folgte in den vergangenen Jahren eine Vielzahl maßgeblicher Studien diesen theoretischen Annahmen und entsprechende Zusammenhänge konnten (teilweise) bestätigt werden (z. B. Cauet 2016; Kulgemeyer & Riese 2018; Riese & Reinhold, 2012; Enkrott, 2021; Schiering et al., 2021).

2.1. Forschungslage / Empirische Befunde zu alternativen Wegen

In den vergangenen Jahren wurden unterschiedliche alternative Wege ins Lehramt empirisch untersucht; dabei haben die meisten Studien Quer- und Seiteneinsteigende betrachtet und jeweils querschnittlich mit grundständig qualifizierten Lehrkräften verglichen (z. B. Korneck et al., 2021; Lucksnat et al. 2020). Hinsichtlich professionsrelevanter Merkmale und der Qualität der Ausübung des Berufs zeigen sich weniger Unterschiede im Vergleich zu grundständig qualifizierten Lehrkräften als zunächst möglicherweise zu erwarten wäre (s. Prosch, 2021 oder Lucksnat et al., 2022 sowie Ghassemi, 2024 für aktuelle Übersichten). Mehrfach nachgewiesen wurde ein geringeres pädagogisches Wissen bei nicht-grundständig qualifizierten (angehenden) Lehrkräften (z. B. Kleickmann & Anders, 2011; Kunina-Habenicht, 2013; Lucksnat et al. 2020; Korneck et al., 2021).

2.2 Forschungsdesiderate zu alternativen Wegen

Trotz erster, durchaus aussagekräftiger Studien zu alternativen Qualifikationswegen wird die große Zahl an Personen, die über die Vielzahl unterschiedlicher alternative Wege in den Lehrberuf gelangt, in der Forschungslage noch nicht angemessen abgebildet.

Insbesondere werden längsschnittliche Studien und weitere Vergleiche zu grundständig qualifizierten (angehenden) Lehrkräften benötigt (z. B. Driesner & Arndt, 2020). Auch liegen bislang kaum Erkenntnisse zum qualifizieren Quereinstieg vor.

3. Der Q-Master an der Freien Universität (FU) Berlin: Zugangsvoraussetzungen und Studieninhalte und -umfang

An der Freien Universität Berlin (FUB) wird der ‚Masterstudiengang für das Lehramt an Integrierten Sekundarschulen und Gymnasien mit dem Profil Quereinstieg‘ (kurz: Q-Master) seit 2016 als Modellversuch erprobt. Als Studienfächer im Q-Master können die Fächer Physik, Mathematik und Informatik sowie Italienisch, Französisch, Spanisch und Englisch gewählt werden (FUB, 2019a). Außerdem stehen die Fächer Deutsch und Geschichte als zweites Studienfach zur Wahl. Für eine Zulassung zum Q-Masterstudium ‚ist ein erster berufsqualifizierender nicht lehramtsrelevanter [...] Abschluss eines Hochschulstudiums [...] [Voraussetzung]‘ (FUB, 2019b, S. 179). Außerdem müssen ‚Leistungen im Umfang von 110 Leistungspunkten, davon mindestens 20 LP im zweiten Studienfach‘ (ebd., S. 179f) nachgewiesen werden können. Für den Abschluss des Studiums sind innerhalb von vier Semestern Leistungen im Umfang von 120 LP zu absolvieren:

- „1. das fachwissenschaftliche Studium im Fach 2 im Umfang von 35 LP,
2. das fachdidaktische Studium im Fach 1 und im Fach 2 im Umfang von 44 LP,
3. das erziehungswissenschaftliche Studium im Umfang von 21 LP,
4. das Modul ‚Deutsch als Zweitsprache/Sprachbildung‘ im Umfang von 5 LP und
5. die Masterarbeit im Fach 2 im Umfang von 15 LP.“ (FUB, 2019a, S. 269f)

Das Q-Masterstudium umfasst außerdem umfangreiche schulpraktische Studien („Praxissemester“) in beiden Fächern.

Für die Q-Masterstudierenden werden keine neu konzipierten Lehrveranstaltungen angeboten. Sie besuchen Lehrangebote gemeinsam mit den Studierenden des regulären Lehramtsmasters bzw. -bachelors. Daher besteht eine hohe inhaltliche und strukturelle Übereinstimmung mit den regulären Studiengängen für das Lehramt an Integrierten Sekundarschulen und Gymnasien an der FU Berlin (s. a. Ghassemi 2024). Abgeschlossen wird der Modellstudiengang mit einem Master of Education.

4. Forschungsfragen

Der Q-Masterstudiengang an der FUB wurde seit seiner Einführung wissenschaftliche-evaluativ begleitet.

Ein zentrales Ziel der Begleitforschung im Fach Physik war es, die Ausprägung und Entwicklung fachspezifischer professioneller Handlungskompetenzen der Q-Masterstudierenden im Fach Physik an der FU Berlin zu ermitteln und mit den Studierenden des regulären Lehramtsmasterstudiengangs zu vergleichen.

Der Annahme folgend, dass die professionelle Kompetenz eines Individuums aus dem Zusammenwirken individueller Eingangsvoraussetzungen sowie den formalen Lerngelegenheiten des Studiums und deren

Nutzung folgt (Kunter et al., 2011b), sollten außerdem relevante Eingangsmerkmale der Studierenden sowie Aspekte der individuellen Nutzung der Lernangebote im Q-Masterstudium betrachtet werden.

Dementsprechend wurden die folgenden Forschungsfragen formuliert (Auswahl; ausführlich s. Ghassemi, 2024):

F 1: Welche Ausprägung und Entwicklung fachspezifischer, professioneller Handlungskompetenzen besteht bei den Q-Masterstudierenden?

Ausgewählt wurden hierzu

- das fachdidaktische Wissen (FDW),
- das Fachwissen (FW) und
- die Überzeugungen zum Lehren und Lernen im Fach.

F 2: Mit welchen individuellen Eingangsvoraussetzungen nehmen die Studierenden das Q-Masterstudium auf? (Auswahl; s. o.)

F 2.1: Welche demografischen Merkmale besitzen die Q-Masterstudierenden?

F 2.2: Mit welchen kognitiven Leistungsvoraussetzungen nehmen die Q-Masterstudierenden das Studium auf?

[...]

F 3: Welchen subjektiven Nutzen haben die Lerngelegenheiten des Q-Masterstudiums für die individuelle professionelle Entwicklung der Studierenden? (Auswahl; s. o.)

[...]

F 3.2: Welche fachdidaktischen Studieninhalte nutzen die Q-Masterstudierenden zu welchen Anlässen in Praxisphasen?

F 3.3: Welche Ziele in Bezug auf ihre weitere professionelle Entwicklung haben die Q-Masterstudierenden am Ende des Studiums?

Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass auch die inhaltliche und zeitliche Ausgestaltung eines

Qualifikationsprogramms sowie die Zugangsvoraussetzungen entscheidend sind für die Ausprägung und Entwicklung der professionellen Kompetenzen der Teilnehmenden.

5. Methoden

Für die (Teil-)Forschungsfragen besteht eine unterschiedlich umfangreiche theoretische und empirische Ausgangslage. Insbesondere die Aspekte professioneller Handlungskompetenz (F1) wurden im Fach Physik wiederholt modelliert, operationalisiert und gemessen. Daher scheint es angemessen, diesen Fragen über einen quantitativ angelegten Forschungsansatz nachzugehen (vgl. Döring & Bortz, 2016, S. 184ff).

Die Forschungsfragen F2.1 und F2.2 betreffen kognitive und demografische Eingangsbedingungen der Q-Masterstudierenden. Diese können gemeinsam mit den Kompetenzen quantitativ erhoben werden.

Die Forschungsfragen F3.2 und F3.3 (subjektiven Nutzen der Lerngelegenheiten) behandeln stärker subjektive, weniger direkt beobachtbare Aspekte, zu welchen für die Teilnehmenden von Q-Masterstudiengängen bislang wenig bekannt ist. Daher scheint ein stärker exploratives Vorgehen mittels qualitativer Befragungsmethoden angemessen (vgl. Döring & Bortz, 2016, S. 184ff).

Integriert werden die unterschiedlichen methodischen Ansätze über einen Mixed-Methods-Ansatz. Zumal die Forschungsfragen jeweils angemessen über einen Ansatz (qualitativ/quantitativ) untersuchbar werden können, ist ein Vorgehen über parallele, komplementäre Teilstudien passend (Kuckartz, 2014, S. 58 & S. 71).

Den Forschungsdesideraten und Forschungsfragen entsprechend wird für die quantitative Erhebung eine längsschnittliche Erhebung zu zwei Erhebungszeitpunkten angestrebt. Aus erhebungswirtschaftlichen und studienstrukturellen Gründen werden als Zeitpunkte der Beginn des zweiten Mastersemesters

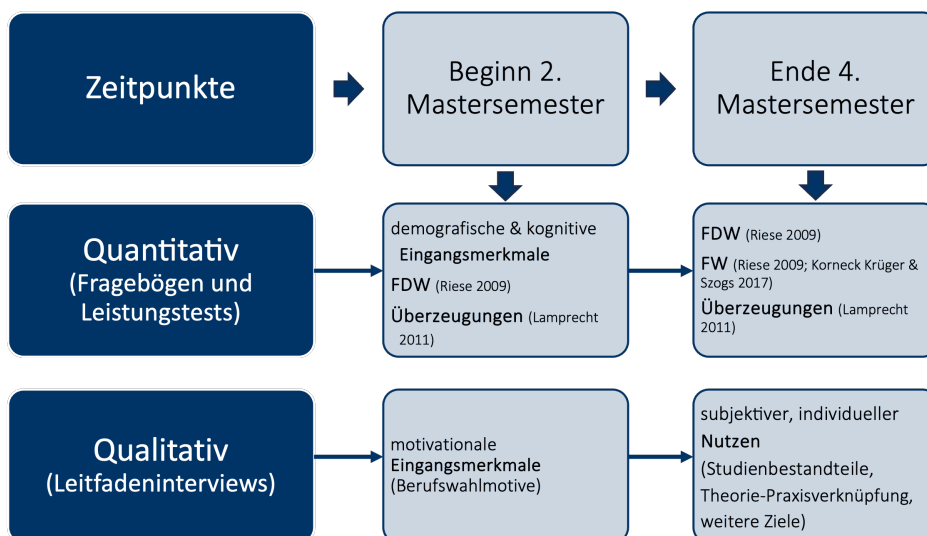


Abb. 1: Erhebungsdesign der Gesamtstudie.

sowie das Ende des vierten Mastersemesters ausgewählt. Für das FDW und FW werden die Leistungstests von Riese (2009) genutzt, für die Überzeugungen zum Lehren und Lernen im Fach (transmissives und konstruktivistisches Lernen) der geschlossene Fragebogen (Likert-Skalen) von Lamprecht (2011).

Zum subjektiven Nutzen der Lerngelegenheiten im Studium werden die Q-Masterstudierenden am Ende des vierten Mastersemesters interviewt. Hierfür wird eine Interviewleitfaden erstellt und erprobt.

Das vollständige Erhebungsdesign ist in Abb. 1 dargestellt.

6. Ergebnisse

Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse der Begleitforschung zum Fach Physik kurz dargestellt. (Für eine ausführliche Darstellung wird auf Ghassemi, 2024 verwiesen.)

Im Zuge der quantitativen Teilstudie konnten Studierende aus fünf Jahrgängen befragt werden; insgesamt 20 Q-Masterstudierende und 65 Studierende des regulären Lehramtsmasters jeweils zu Beginn des zweiten Mastersemesters. Am Ende des jeweils vierten Mastersemesters konnten 18 Q-Masterstudierenden und 45 Studierende des regulären Lehramtsmaster befragt werden. Nicht alle Datensätze sind dabei vollständig. Längsschnittlich verbunden werden konnten 14 Q-Master-Datensätze und 30 Datensätze von Studierenden des regulären Lehramtsmasters.

Im Zuge der qualitativen Teilstudie konnten zwölf Q-Masterstudierende jeweils am Ende des vierten Mastersemesters befragt werden.

6.1. Ergebnisse zu den demografischen und kognitiven Eingangsmerkmalen (F2)

Die Q-Masterstudierenden im Fach Physik sind zu Beginn des zweiten Mastersemesters durchschnittlich 31.9 (SD = 5.2) Jahre alt und damit deutlich älter als die Studierenden des regulären Lehramtsmasters (M = 26.8; SD = 3.9) ($t(76) = 4.61, p < .001, d = 1.2$).

Aus den verfügbaren Daten lässt sich nicht auf etwaige Unterschiede in der Geschlechterzusammensetzung zwischen den beiden Studiengängen schließen.

Hinsichtlich der Abiturnote (als Indikator für die kognitiven Eingangsvoraussetzungen) konnten keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden ($M_{Q-Master} = 2.0, SD_{Q-Master} = .7; M_{regulärer Master} = 2.2, SD_{regulärer Master} = .7; t(75) = -1.13, p > .1, d = -.31$).

6.2 Ergebnisse zu den professionellen Kompetenzen der Studierenden (F1)

Hervorgehoben werden sollen hier zwei Aspekte hinsichtlich der Ausprägung und Entwicklung der untersuchten Kompetenzen der Q-Masterstudierenden sowie hinsichtlich des Vergleichs mit den Studierenden des regulären Lehramtsmasterstudiengangs.

Erstens können hinsichtlich der betrachteten Kompetenzen schon zum ersten Messzeitpunkt (Beginn 2. Mastersemesters) keine Unterschiede zwischen den Q-Masterstudierenden und den Studierenden des

regulären Lehramtsmasterstudiengangs nachgewiesen werden (Tab. 1); erhoben wurden für diesen Zeitpunkt das FDW sowie die Lehr-Lern-Überzeugungen. Unter Beachtung der erreichten Trennschärfe und Sensitivität können kleine bis mittelgroße Unterschiede allerdings nicht ausgeschlossen werden.

Tab. 1: Vergleich der Kompetenzen zwischen Q-Masterstudierenden und Studierenden des regulären Lehramtsmasters zu Beginn des zweiten Mastersemesters.

	Statistik	df	p	d	(1-β)
FDW	-1.143	83	.46	-.03	.06
Transmissives Lernen	.0424	83	.43	.01	.05
Konstruktivistisches Lernen	-1.539	83	.06	-.40	.46

$N_{Q-Master} = 20; N_{regulärer Master} = 65$

Zweitens zeigt die Betrachtung der längsschnittlichen Entwicklung der Kompetenzen, dass das FDW bei den Q-Masterstudierenden im Verlauf des Masterstudiums zunimmt (Tab. 2). Auch das FDW der regulären Masterstudierenden nimmt zu. Der Zuwachs scheint aber, allein die Effektstärken betrachtend, geringer zu sein als bei den Q-Masterstudierenden. Bei den Lehr-Lern-Überzeugungen zeigt sich nur bei den Studierenden des regulären Lehramtsmasters eine Abnahme in der Zustimmung zu Aussagen, welche eine transmissive Perspektive auf das Lehren und Lernen vermitteln. Zur Einschätzung der nicht-signifikanten Ergebnisse sollten wiederum die Trennschärfe und Sensitivität miteinbezogen werden.

Tab. 2: Entwicklung professioneller Kompetenz im Zuge des Lehramtsmasterstudiums (echter Längsschnitt).

		p	d	(1-β)
FDW	Q-Master	.004	.85	.91
	regulärer Master	.03	.39	.62
Konstruktivistisches Lernen	Q-Master	.13	.31	.12
	regulärer Master	.09	.25	.37
Transmissives Lernen	Q-Master	.07	.43	.45
	regulärer Master	.03	.38	.64

$N_{Q-Master} = 14; N_{regulärer Master} = 30$

Inferenzstatistisch geprüft, kann kein signifikanter Unterschied bei der Kompetenzentwicklung zwischen den beiden Gruppen nachgewiesen werden.

Auch ein Vergleich des Fachwissens (FW) am Ende des Studiums zeigt keine Unterschiede zwischen den Studierenden der beiden Masterstudiengänge ($t(55) = .49, p > .5, d = .14$) (vgl. Ghassemi, 2024).

6.2. Ergebnisse zum subjektiven Nutzen der Lerngelegenheiten im Studium (F3)

Die Interviewstudie zum Nutzen des Studiums wurde mittels einer inhaltlich-strukturierenden Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2016) ausgewertet. Dabei wurden vorab theoriebasiert erstellte Kategoriensysteme induktiv ergänzt.

Hinsichtlich der Nutzung von Lehrinhalten in Praxisphasen (F3.2) wird die Anwendung allgemeindidaktischer Aspekte am häufigsten beschrieben (51% aller Aussagen) (Tab. 3). Beispiele für die Verwendung von Lehrinhalten in Praxisphasen können allerdings nicht alle Studierenden nennen (13,5% „kaum/nichts genutzt“).

Auf die Lehrinhalte wird dabei überwiegend für die Unterrichtsvorbereitung zurückgegriffen (65% aller Aussagen).

Tab. 3: Kategoriensystem und Anzahl zugeordneter Segmente für die Lehrinhalte und Gelegenheiten für deren Anwendung in der Praxis.

	abs. Häufigkeit	rel. Häufigkeit /%
Summe genutzte Lehrinhalte	32	86,5
Physikdidaktik spezifisch	9	24,3
allgemeindidaktische Aspekte	19	51,4
andere Studieninhalte	4	10,8
kaum/nichts genutzt*	5	13,5
Summe Gelegenheiten	34	100,0
Reflexion von Unterricht	12	35,3
Unterrichtsvorbereitung	22	64,7

* induktive Kategorie

Als Ziele für ihre weitere professionelle Entwicklung (F3.3) nennen die Q-Masterstudierenden zumeist handlungsnahe Aspekte der (fachdidaktischen) Unterrichtsvorbereitung, der Selbstwirksamkeit und Selbstregulation sowie pädagogische Aspekte des Unterrichtens (Kassenführung) (Abb. 2).

Für eine Ausführliche Darstellung und Analyse der Ergebnisse der Interviewstudie und veranschaulichende Zitate sei wiederum auf Ghassemi (2024) verwiesen.



Abb. 2: Kodewolke für die Entwicklungsziele der Q-Masterstudierenden am Ende des Studiums.

7. Diskussion

Die Ergebnisse der Studie deuten darauf hin, dass die Q-Masterstudierenden das Studium mit günstigen Eingangsbedingungen aufnehmen und die formalen Lerngelegenheiten des Studiums für den Erwerb professioneller Kompetenzen nutzen: Das FW und das FDW der Q-Masterstudierenden im Fach Physik nimmt im Verlauf des Masterstudiums (stark) zu. Im Vergleich zu den Studierenden des regulären

Lehramtsmasters an der FU Berlin zeigen sich keine signifikanten Unterschiede in Ausprägung und Entwicklung der untersuchten Kompetenzen.

Die Beschreibungen der Anwendung theoretischer Studieninhalte in unterschiedlichen Situationen in der Praxis und das Nennen realistischer Ziele für den Vorbereitungsdienst und den Berufseinstieg deuten zudem auf eine günstige individuelle Nutzung der Lernangebote des Q-Masterstudiums hin.

Für die Aussagekraft und mögliche Generalisierbarkeit dieser Ergebnisse bestehen aber auch Einschränkungen: Diese ergeben sich unter anderem aus der methodischen Herangehensweise, der kleinen Stichprobengröße (und Populationsgröße) und der Beschränkung auf ausgewählte Aspekte professioneller Kompetenz. (Für eine ausführliche Diskussion dieser Limitationen sei wiederum auf Ghassemi 2024 verwiesen.)

Unter Beachtung der Limitationen dieser Studie bestätigen die Ergebnisse die Aussagen von Raphaela Porsch, „dass die bislang vorliegenden empirischen Befunde [zum Quer- und Seiteneinstieg] die Annahme der ungünstigeren Voraussetzungen für das Lehrer*innenhandeln weitgehend nicht stützen“ (Porsch, 2021, S. 207).

Somit scheint es gerechtfertigt, sich den Folgerungen zur Evaluation des Q-Masterstudiengangs für das Grundschullehramt an der Humboldt-Universität zu Berlin anzuschließen:

„Im Sinne einer effizienten und fachlich anspruchsvollen Qualifikation bieten Q-Master-Studiengänge eine wichtige Ergänzung für das Bildungssystem, um in Zeiten des Lehrkräftemangels die Lehrkräfteversorgung bedarfsgerecht zu steuern. [...] Die Ergebnisse der Evaluation sprechen dafür, den Q-Master-Studiengang [...] beizubehalten und zu prüfen, ob ähnliche Strukturen nicht auch an anderen Hochschulen realisiert werden können.“ (Richter, Pech & Stein, 2022, S. 7).

8. Literatur

- Baumert, J. & Kunter, M. (2006). Stichwort: Professionelle Kompetenz von Lehrkräften. Zeitschrift für Erziehungswissenschaft, 9(4), 469–520.
- Blömeke, S. (Hrsg.) (2008). Professionelle Kompetenz angehender Lehrerinnen und Lehrer. Wissen, Überzeugungen und Lerngelegenheiten deutscher Mathematikstudierender und -referendare; erste Ergebnisse zur Wirksamkeit der Lehrerausbildung, Münster, New York, München, Berlin: Waxmann.
- Cauet, E. (2016). Testen wir relevantes Wissen? Zusammenhang zwischen dem Professionswissen von Physiklehrkräften und gutem und erfolgreichem Unterrichten, Berlin: Logos Verlag Berlin.
- Döring, N. & Bortz, J. (2016). Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- Driesner, I. & Arndt, M. (2020). Die Qualifizierung von Quer- und Seiteneinsteiger*innen. Konzepte und Lerngelegenheiten im bundesweiten Überblick. *DDS – Die Deutsche Schule*, 2020(4), 414–427.
- Enkrott, P. (2021). Entwicklung des fachlichen Wissens angehender Physiklehrkräfte. Dissertation. Universität Potsdam.
- Fickermann, D. (2020). "Prognosen sind schwierig, besonders wenn sie die Zukunft betreffen". Ausgewählte Ergebnisse einer Ex-Post-Evaluation der Schülerzahlvorausrechnungen der KMK. *Die deutsche Schule*, 112, 10–41.
- FUB (2019a). Studien- und Prüfungsordnung der Freien Universität Berlin für den Masterstudiengang für das Lehramt an Integrierten Sekundarschulen und Gymnasien mit dem Profil Quereinstieg. *Amtsblatt der Freien Universität Berlin*. <https://www.fu-berlin.de/service/zuvdocs/amtsblatt/2019/ab162019.pdf> (01.07.2024)
- FUB (2019b). Zugangssatzung der Freien Universität Berlin für den Masterstudiengang für das Lehramt an Integrierten Sekundarschulen und Gymnasien mit dem Profil Quereinstieg. *Amtsblatt der Freien Universität Berlin*. <https://www.fu-berlin.de/service/zuvdocs/amtsblatt/2019/ab132019.pdf>. (01.07.2024)
- Geis-Thöne, W. (2022). Lehrkräftebedarf und -angebot: Bis 2035 steigende Engpässe zu erwarten. Szenariorechnungen zum INSM-Bildungsmonitor.
- Ghassemi, N. (2024): Evaluation eines Lehramtsmasterstudiengangs mit dem Profil Quereinstieg im Fach Physik – Erkenntnisse zu Eingangsbedingungen, professionellen Kompetenzen und Aspekten individueller Angebotsnutzung, Berlin: Logos Verlag Berlin.
- Ghassemi, N., Pöx, S. & Nordmeier, V. (2022). Alternative Professionalisierungswege für das Lehramt Physik – Eine Bestandsaufnahme. In Habig, S. & van Vorst, H. (Hrsg.), *Unsicherheit als Element von naturwissenschaftsbezogenen Bildungsprozessen*. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik virtuelle Jahrestagung 2021 (S. 496–499).
- Güldener, T., Schümann, N., Driesner, I. & Arndt, M. (2020). Schwund im Lehramtsstudium. *DDS – Die Deutsche Schule*, 2020(4), 381–398.
- Hill, H.C., Rowan, B. & Ball, D.L. (2005). Effects of Teachers' Mathematical Knowledge for Teaching on Student Achievement. *American Educational Research Journal*, 42(2), 371–406.
- Kleickmann, T. & Anders, Y. (2011). Lernen an der Universität. In Kunter, M., Baumert, J., Blum, W., Klusmann, U., Krauss, S. & Neubrand, M. (Hrsg.), *Professionelle Kompetenz von Lehrkräften*. Ergebnisse des Forschungsprogramms COACTIV (S. 305–315). Münster: Waxmann.
- Klemm, K. (2021). Lehrkräftemangel in den MINT-Fächern: Kein Ende in Sicht. MINT-Lehrerbedarf und -angebot bis 2030/31 am Beispiel Nordrhein-Westfalens. die Ergebnisse für NRW im Überblick.
- KMK (2022). Lehrereinstellungsbedarf und -angebot in der Bundesrepublik Deutschland 2021 – 2030. Zusammengefasste Modellrechnungen der Länder. Statistische Veröffentlichung der Kultusministerkonferenz Nr. 233.
- Korneck, F., Lamprecht, J., Wodzinski, R. & Schecker, H. (2010). Quereinsteiger in das Lehramt Physik. Lage und Perspektiven der Physiklehrerbildung in Deutschland. Eine Studie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft e.V.
- Korneck, F., Oettinghaus, L. & Lamprecht, J. (2021). Physiklehrkräfte: Gewinnung – Professionalisierung – Kompetenzen. In Habig, S. (Hrsg.), *Naturwissenschaftlicher Unterricht und Lehrerbildung im Umbruch? Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik virtuelle Jahrestagung 2020* (S. 4–21). Universität Duisburg-Essen.
- Kuckartz (2014). *Mixed Methods: Springer Fachmedien Wiesbaden*.
- Kuckartz, U. (2016). *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung*, Weinheim: Juventa Verlag ein Imprint der Julius Beltz GmbH & Co. KG.
- Kulgemeyer, C. & Riese, J. (2018). From professional knowledge to professional performance: The impact of CK and PCK on teaching quality in explaining situations. *Journal of Research in Science Teaching*, 55(10), 1393–1418.
- Kunina-Habenicht, O. (2013). Die Bedeutung der Lerngelegenheiten im Lehramtsstudium und deren individuelle Nutzung für den Aufbau des bildungswissenschaftlichen Wissens. The significance of learning opportunities in teacher training courses and their individual use for the development of educational-scientific knowledge. In *Zeitschrift für Pädagogik* (Band 1) (S. 1–23): Beltz Juventa.
- Kunter, M., Baumert, J., Blum, W., Klusmann, U., Krauss, S. & Neubrand, M. (Hrsg.) (2011a). *Professionelle Kompetenz von Lehrkräften*. Ergebnisse des Forschungsprogramms COACTIV, Münster: Waxmann.
- Kunter, M., Kleickmann, T., Klusmann, U. & Richter, D. (2011b). Die Entwicklung professioneller Kompetenz von Lehrkräften. In Kunter, M., Baumert, J., Blum, W., Klusmann, U., Krauss, S. & Neubrand, M. (Hrsg.), *Professionelle Kompetenz von Lehrkräften*. Ergebnisse des Forschungsprogramms COACTIV (S. 55–68). Münster: Waxmann.
- Lamprecht, J. (2011). *Ausbildungswege Und Komponenten Professioneller Handlungskompetenz. Vergleich Von Quereinsteigern Mit Lehramtsabsolventen Für Gymnasien Im Fach Physik*, Berlin: Logos Verlag Berlin.

- Lucksnat, C., Richter, E., Klusmann, U., Kunter, M. & Richter, D. (2020). Unterschiedliche Wege ins Lehramt – unterschiedliche Kompetenzen? *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 1–16.
- Lucksnat, C., Richter, E., Schipolowski, S., Hoffmann, L. & Richter, D. (2022). How do traditionally and alternatively certified teachers differ? A comparison of their motives for teaching, their well-being, and their intention to stay in the profession. *Teaching and Teacher Education*, 117, 103784.
- Porsch, R. (2021). Quer- und Seiteneinsteiger*innen im Lehrer*innenberuf. Thesen in der Debatte um die Einstellung nicht traditionell ausgebildeter Lehrkräfte. In Reintjes, C., Idel, T.-S., Bellenberg, G. & Thönes, K.V. (Hrsg.), *Schulpraktische Studien und Professionalisierung: Kohärenzambitionen und alternative Zugänge zum Lehrberuf* (S. 207–222): Waxmann Verlag GmbH.
- Puderbach, R. & Gehrman, A. (2020). Quer- und Seiteneinstieg in den Lehrerinnen- und Lehrerberuf. In Cramer, C., König, J., Rothland, M. & Blömeke, S. (Hrsg.), *Handbuch Lehrerinnen- und Lehrerbildung* (S. 354–359). Bad Heilbrunn: Verlag Julius Klinkhardt.
- Puderbach, R., Stein, K. & Gehrman, A. (2016). Nicht-grundständige Wege in den Lehrerberuf in Deutschland. Eine systematisierende Bestandsaufnahme. In Rothland, M. & Pflanzl, B. (Hrsg.), *Quereinsteiger, Seiteneinsteiger, berufserfahrene Lehrpersonen. Auswahl, Qualifizierung und Bewährung im Beruf* (S. 5–30). Landau in der Pfalz: Verlag Empirische Pädagogik.
- Rackles, M. (2020). *Lehrkräftebildung 2021. Wege aus der föderalen Sackgasse*, Norderstedt: BoD – Books on Demand.
- Richter, D., Pech, D. & Stein, A. (2022). Vorwort. In , Abschlussbericht zur Evaluation des Q-Masters an der Humboldt-Universität zu Berlin (S. 7).
- Riese, J. (2009). *Professionelles Wissen und professionelle Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften*, Berlin: Logos Verlag Berlin.
- Riese, J. & Reinhold, P. (2012). Die professionelle Kompetenz angehender Physiklehrkräfte in verschiedenen Ausbildungsformen. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 15(1), 111–143.
- Schiering, D., Sorge, S. & Neumann, K. (2021). Hilft viel viel? Der Einfluss von Studienstrukturen auf das Professionswissen angehender Physiklehrkräfte. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 24(3), 545–570.

Förderung

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Vorhaben wurde im Rahmen der gemeinsamen „Qualitätsoffensive Lehrerbildung“ von Bund und Ländern mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01JA1802 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Der digitale Dozent: ChatGPT als Co-Pilot in der Lehrpersonenbildung

Jens Damköhler*, Wolfgang Lutz*, Thomas Trefzger*

*Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Universität Würzburg
jensdamkoehler@uni-wuerzburg.de

Kurzfassung

Die rasante Entwicklung künstlicher Intelligenz im vergangenen Jahr beeinflusst mittlerweile auch Diskussionen im Bildungsbereich. Während Studierende wie Lehrende grundsätzlich offen gegenüber der Nutzung von KI scheinen, sind Überlegungen zum konkreten Einsatz in der universitären Lehre häufig geprägt von Spekulationen und Unsicherheit. Im nachfolgenden Artikel werden zunächst Annahmen diskutiert, die für die Integration künstlicher Intelligenz im Bildungsbereich relevant erscheinen. Anschließend wird beschrieben, wie aufbauend auf diesen Überlegungen ein KI-Chatbot basierend auf dem bekannten Modell ChatGPT in einem Lehr-Lern-Labor-Seminar Physik an der Universität Würzburg genutzt wird, um Studierende bei der strukturierten Reflexion ihrer ersten Unterrichtserfahrungen zu begleiten und zu unterstützen.

1. Einleitung

Auch wenn die Einsatzmöglichkeiten Künstlicher Intelligenz (KI) bereits seit mehreren Jahren immer wieder diskutiert wurden, war kaum vorherzusehen, mit welcher Macht das Thema mit der Einführung von ChatGPT im Herbst 2022 in die unterschiedlichsten Fachdiskurse drängen würde. Gerade die elaborierten Sprachfähigkeiten von ChatGPT ermöglichen menschlich anmutende Dialoge – und die Entwicklung scheint noch lange nicht am Ende (van den Berg & Du Plessis, 2023). Doch auf die erste Euphorie über die begeisternden Fähigkeiten der generativen Werkzeuge, z. B. bei der Text- und Bildproduktion, folgt oft eine Reihe von Enttäuschungen, wenn bestimmte Erwartungen doch nicht erfüllt werden können (Salvagno, Taccone & Gerli, 2023). So kommt z.B. Emsley (2023, S. 2) zu dem Schluss: „Just as I would not recommend collaborating with a colleague with pseudologia fantastica, I do not recommend ChatGPT as an aid to scientific writing.“. Dennoch bieten Werkzeuge der generativen künstlichen Intelligenz besondere Möglichkeiten, die im Folgenden näher vorgestellt werden.

Mit generativer KI wird eine Klasse von Werkzeugen bezeichnet, die Deep-Learning-Modelle nutzen, um menschenähnliche („human-like“) Inhalte als Reaktion auf komplexe und vielfältige Aufforderungen zu erzeugen (Lim, Gunasekara, Pallant, Pallant & Pechenkina, 2023). Unter ihnen bilden die Large-Language-Modelle eine Teilmenge, die sich mit dem Verstehen und Erzeugen menschlicher Sprache beschäftigen (Wang et al., 2024). Diese Modelle, zu denen auch der OpenAI Chatbot ChatGPT gehört, beeindruckt durch Dialoge, die denen mit Menschen verblüffend nahe kommen und wecken Hoffnungen und Erwartungen für den Einsatz in unterschiedlichen Bereichen – auch im Bildungswesen (Kasneci et al., 2023; van den Berg & Du Plessis, 2023). Inwieweit die Fähigkeiten des Systems gewinnbringend

eingesetzt werden können, gilt es durch gezielte Forschung zu untersuchen.

An der Universität Würzburg wurde ein Projekt ins Leben gerufen, in dem die Wirkung des Einsatzes von ChatGPT als Gesprächspartner bei der Reflexion von Unterrichtserfahrungen von Studierenden in einem Lehr-Lern-Labor-Seminar (LLL-Seminar) Physik untersucht wird. Die bei der Entwicklung zugrunde liegenden Annahmen sowie das Projekt werden im Folgenden erläutert.

2. Annahmen

2.1. Wir wissen vieles über KI... ..nicht

Eines der häufig in Verbindung mit KI genannten Probleme ist das der fehlenden Erklärbarkeit der Ergebnisse und Funktionsweise von Werkzeugen, die auf künstlicher Intelligenz beruhen. Diese fehlende Erklärbarkeit fußt zum Teil auf der Komplexität der zugrunde liegenden Algorithmen, die eine Kontrolle unmöglich machen, zum Teil aber auch auf einer nicht auflösbaren prinzipiellen Undurchsichtigkeit, die auf nichtlinear interagierenden Operationen und Rückkopplungsschleifen im Rechenprozess beruht (Peters, 2023). In diesem Fall ist es sogar bei vollständiger Offenlegung des Quellcodes nicht möglich, den Weg von einer Eingabe zur zugehörigen Ausgabe nachzuvollziehen.

Zusätzlich sind entsprechende Werkzeuge, sofern sie Teil einer kommerziellen Unternehmung sind, selbst innerhalb des Möglichen oft nur schwach dokumentiert. Diese schwache Dokumentation betrifft auch die häufigen Überarbeitungen der Modelle, die sich oft erst in der Nutzung offenbaren. Dazu ist das Verhalten der KI-Systeme stark von der zum Training verwendeten Datenbasis abhängig (Leavy, O'Sullivan & Siapera, 2020). Ist diese unbekannt, führt das zu einem weiteren Unsicherheitsfaktor. Dies führt dazu, dass viele der vermeintlichen Wissensbestände und Erkenntnisse über KI unsicher und vorläufiger Natur sind, was die folgenden Beispiele illustrieren.

In einzelnen Veröffentlichungen zum Einsatz von ChatGPT bei der Literaturrecherche existierten in der Anfangszeit ein Teil der von ChatGPT aufgeführten Quellen nicht, sondern wurden vom System frei erfunden (z. B. Vogelsang, Bleher, Krupitzer, Stein & Jung, 2023). Ein Jahr später ist nicht nur das Phänomen der Halluzination weithin bekannt, es wird auch so aktiv bearbeitet, dass die Literaturrecherche mit der Folgeversion gpt4 inzwischen stark verbessert wurde.

Neuere Versionen großer Sprachmodelle sind in der Lage, auch große Textmengen als Eingaben zu verarbeiten. Dabei zeigt sich allerdings, dass Informationen zu Beginn und Ende des Textes mit höherer Sicherheit korrekt verarbeitet werden, als Informationen, die eher in der Mitte des Textes zu finden sind (Liu et al., 2024). Dieses unter dem Namen Lost-in-the-Middle bekannte Phänomen lässt sich bislang allerdings nicht zuverlässig erklären.

In der Zeit um die Veröffentlichung von ChatGPT zeigten große Sprachmodelle emergente Fähigkeiten, also Fähigkeiten, die sich nicht aus der einfachen Skalierung herkömmlicher Sprachmodelle vorhersagen ließen (Wei, Tay et al., 2022). Diese Fähigkeiten, die heute als Teil des Funktionsumfangs großer Sprachmodelle akzeptiert werden, waren zu diesem Zeitpunkt auch für Spezialisten nicht erklärbar.

Das Wissen um unser Unwissen, die Vorläufigkeit von Erkenntnissen und die kontinuierliche Weiterentwicklung bilden wichtige Grundlagen der Überlegungen für das Würzburger KI-Projekt. Auch wenn wir die im Hintergrund ablaufenden Prozesse nicht direkt kennen und verstehen können, geht es uns darum, an bisher dokumentierten Erkenntnissen anzuknüpfen und diese durch eigene Erfahrungen zu ergänzen.

2.2. Pragmatisches Prompt-Engineering

Unter einem Prompt versteht man einzelne oder eine Sammlung von Anweisungen, z. B. an große Sprachmodelle, auf deren Eingabe das Modell mit einer bestimmten Ausgabe reagiert (White et al., 2023). Unter dem Begriff des Prompt Engineerings versteht man nun eine Zusammenstellung von Techniken und Methoden, um Prompts zu formulieren, die zu tendenziell höherwertigen Ausgaben führen (Velásquez-Henao, Franco-Cardona & Cadavid-Higuaita, 2023). Während einige der vorgeschlagenen Techniken sehr einfach sind und z. B. auf Klarheit und Präzision der Anweisung, kontextbezogene Informationen, Angaben zum Antwortformat und zur gewünschten Ausführlichkeit der Antwort abzielen (Lo, 2023), warten andere mit einem komplexen Regelwerk mit durchaus ungewöhnlich anmutenden Tipps („Add ,I’m going to tip \$xxx for a better solution!““ (Bsharat, Myrzakhan & Shen, 2023, S. 5)) auf.

Dabei konnte gezeigt werden, dass einige Techniken wie das Chain-of-thought prompting, bei dem das Modell zur Begründung einzelner Schritte aufgefordert wird (Wei, Wang et al., 2022), oder das One-/Few-Shot-Prompting, bei dem dem Modell ein oder

mehrere Ausgabebeispiele in der Anweisung präsentiert werden (Brown et al., 2020), in der Praxis Erfolg versprechen können.

Im Würzburger KI-Projekt werden verschiedene Techniken des Prompt Engineering angewendet. Zudem werden in iterativen Schleifen die Prompts in simulierten Szenarien getestet, um sie anschließend zu verbessern.

2.3. Die Verantwortung bleibt beim Menschen

Die neuen und teilweise überraschenden Fähigkeiten scheinen auch die Sprache der Menschen im Zusammenhang mit künstlicher Intelligenz zu beflügeln. So wird in einer Vortragsankündigung von der geöffneten Büchse der Pandora (Gauß, 2024) gesprochen, während in einem Presseartikel von der Befreiung des Geistes aus der Flasche zu lesen ist (Sachse, 2023). Für die Implementierung in das LLL-Sem wird künstliche Intelligenz hingegen zunächst nüchtern als Werkzeug aufgefasst. Dies impliziert die Notwendigkeit der Übernahme der Verantwortung durch einen menschlichen Akteur – im Fall des Projektes durch die Dozierenden. Hiervon ist direkt das Ausmaß an eigenständiger Handlung, das einem KI-Werkzeug zugestanden wird, betroffen. Im Geiste des oben beschriebenen defensiven Vorgehens übernimmt die KI keine direkten Feedback-Aufgaben. Dabei handelt es sich aber bei diesem Beschluss um eine Momentaufnahme. So sind künftig durchaus Szenarien denkbar, in denen auch größere Aufgaben an künstliche Intelligenz ausgelagert werden können. Zum jetzigen Zeitpunkt und mit den in diesem Projekt verwendeten Werkzeugen erscheint das aber nicht angebracht.

3. Das Würzburger Lehr-Lern-Labor Physik

Das Würzburger Lehr-Lern-Labor-Seminar (LLL-sem) im Fach Physik ist eine Pflichtveranstaltung für Studierende des Lehramts an Gymnasien und Realschulen und folgt einem iterativen Aufbau (Damköhler, Elsholz & Trefzger, 2024; Elsholz & Trefzger, 2017). Der prinzipielle Ablauf ist in Abbildung 1 dargestellt.

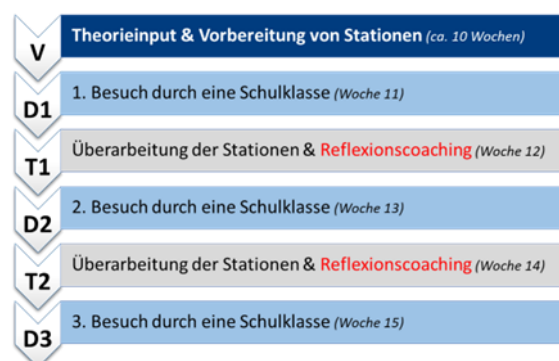


Abb. 1: Aufbau des LLL-Seminars an der Universität Würzburg

In einer mehrwöchigen Vorbereitungszeit (V) erhalten die Studierenden zunächst theoretischen Input zu relevanten Themen für das Lehren im LLL.

Daraufhin entwickeln sie unter der Betreuung von zwei Dozierenden Experimentierstationen, an denen die besuchenden Schülerinnen und Schüler während der späteren Durchführungstage (D1, D2, D3) selbstständig forschen dürfen. An den Stationen vermitteln die Studierenden innerhalb von 30 Minuten Gruppen von je rund vier bis sechs Schüler*innen physikalische Inhalte zu einem vorgegebenen Rahmenthema.

In den Wochen zwischen den Durchführungsterminen haben die Studierenden die Möglichkeit zur Überarbeitung und Weiterentwicklung ihrer Station. Dabei beziehen sie die Erfahrungen aus den vergangenen Durchführungen ein. In diesem Prozess werden sie von den Dozierenden durch Feedback und Ratschläge unterstützt. Darüber hinaus beschäftigen sich die Studierenden an diesen Tagen mit theoretischen und praktischen Inhalten, die den Umgang mit Erfahrungen, also Reflexionsprozesse selbst, in den Fokus nehmen (Damköhler, Elsholz & Trefzger, 2023). Zu diesen Inhalten gehören zum einen Reflexionsstrukturmodelle, wie das ALACT-Modell (Korthagen & Kessels, 1999) und das ERTO-Modell (Krieg & Kreis, 2014), oder das Zwiebelmodell (Korthagen, 2004), das verschiedene Determinanten des Lehrerhandelns in unterrichtlichen Situationen beleuchtet und dabei die Bedeutung der professionellen Identität der Lehrkraft betont. Zum anderen werden auch Fähigkeiten, die im Reflexionsprozess von Nutzen sind, wie z. B. die Noticingfähigkeit (van Es & Sherin, 2002) als Aspekt der professionellen Unterrichtswahrnehmung, thematisiert und eingeübt. Intensive Coaching-Gespräche zu diesen Themen können aus Zeitgründen jedoch nur in Ausnahmefällen geführt werden.

4. ChatGPT als Reflexionscoach

In der Adaption des LLL-Seminars unter Einbezug von ChatGPT soll ein Gesprächsagent (Chatbot) auf Basis von ChatGPT (gpt4) die Rolle eines Reflexionscoachs übernehmen. Für den ersten Versuch werden hierfür so genannte GPTs verwendet, Erweiterungen des ursprünglichen ChatGPT-Chatbots, die mithilfe von Prompts auf die eigenen Bedürfnisse angepasst werden können. Diese GPTs können Studierenden anschließend für eigene Chats zur Verfügung gestellt werden.

An den Überarbeitungs- und Reflexionsterminen (T1 und T2) erhalten die Studierenden zwar nach wie vor einen gewissen theoretischen Input, ein zentrales Element stellen aber nun Reflexionsgespräche mit ChatGPT dar, in denen der Chatbot die Studierenden durch einen strukturierten Reflexionsprozess begleitet. Dabei übernimmt der Chatbot die Gesprächsführung und strukturiert auf diese Weise den Prozess, bzw. wählt Betrachtungsschwerpunkte aus. Dabei sollen die Studierenden mit zwei verschiedenen Chatbots in Kontakt kommen, die, nach einer anfänglichen Phase der allgemeinen Einschätzungen, je einen unterschiedlichen Fokus haben.

Einer der Chatbots legt den Schwerpunkt auf die Analyse der vergangenen Stationsdurchführung hinsichtlich der Unterrichtsqualität mit einem besonderen Fokus auf der kognitiven Aktivierung. Als Grundlage für diese Betrachtungen wird das bereits in der Vorbereitungsphase (V) thematisierte Modell der Basisdimensionen guten Unterrichtens (Praetorius, Klieme, Herbert & Pinger, 2018) verwendet. Die Studierenden werden zu ihren Einschätzungen in Bezug auf die Erfüllung der drei Dimensionen Klassenführung, konstruktive Unterstützung und kognitive Aktivierung der Lernenden befragt und dabei im Sinne einer höheren Reflexionstiefe (vgl. hierzu Damköhler et al., 2024) um Erklärungen gebeten. Als adaptiv agierender Gesprächspartner reagiert der Chatbot hier flexibel auf Eingaben und fragt für mehr Details nach. Nach gründlicher Analyse des Verlaufs fordert der Chatbot die Studierenden auf, Vorschläge für alternative Handlungsmöglichkeiten zu nennen und die erhoffte Wirkung zu beschreiben und zu begründen. Das Gesprächsziel besteht in der Entwicklung eines konkreten Handlungsplans für die nächste Durchführung, der den identifizierten Schwächen gezielt begegnen und zur Erhöhung der Unterrichtsqualität führen soll.

Der zweite Chatbot verfolgt einen etwas anderen Ansatz. Nach einer allgemeinen Analysephase sollen die Studierenden wiederum Aspekte ihrer Stationsdurchführung identifizieren, für die sie sich Handlungsalternativen wünschen. In diesem Fall unterbreitet allerdings der Chatbot, nachdem er im Gespräch möglichst viele Details über die Stationsdurchführung und die empfundenen Schwächen dieser „eingesammelt“ hat, eine gewisse Zahl eigener Vorschläge für mögliche Handlungen bei der nächsten Durchführung. Im Sinne der Förderung eines kritischen Denkens im Umgang mit KI analysieren und bewerten die Studierenden anschließend – wiederum im Gespräch mit dem Chatbot die einzelnen Ideen und treffen eine Wahl für eine Handlungsalternative. Diese wird schließlich mit den übrigen Studierenden und den Dozierenden besprochen und das Urteil somit vor Umsetzung validiert. Im Gegensatz zum ersten Chatbot, der primär die analyse- bzw. reflexionsbezogenen Fähigkeiten der Studierenden adressiert, werden durch die Arbeit mit dem zweiten Chatbot gezielt Kompetenzen der Studierenden im Umgang mit KI-Werkzeugen angesprochen. Zudem wird eine Haltung der Studierenden gefördert, die durch ein KI-Werkzeug gelieferten Ergebnisse kritisch zu hinterfragen.

5. Erste Erkenntnisse und Ausblick

Mit dem beschriebenen Projekt wird das Ziel verfolgt, ein bestehendes Lehrveranstaltungsformat durch den Einsatz eines KI-Werkzeugs zu modifizieren und die Wirkung zu untersuchen. Der Einsatz des KI-Coaches und die gesammelten Erfahrungen sollen in einem nächsten Schritt genutzt werden, um neben der Reflexionsfähigkeit weitere unterrichtsrelevante Kom-

petenzen zu fördern, beispielsweise die experimentelle Kompetenz. Eine Anwendung von ChatGPT und die Übertragung der Erkenntnisse aus dem Projekt auf Lehrveranstaltungen anderer Fächer sind im interdisziplinär angelegten Didaktikzentrum M!ND-Center der Universität Würzburg (Völker & Trefzger, 2010) nicht nur denkbar, sondern auch gewünscht. Aus diesem Grund ist es wichtig, nicht nur Lehramtsstudierende der Physik, sondern auch aller anderen Lehrämter in Hinblick auf ihre Einstellungen zu künstlicher Intelligenz besser kennenzulernen.

Nach der Entwicklung eines ersten Konzepts wurden insgesamt 150 Studierende unterschiedlicher Fächer und Lehrämter an der Universität Würzburg zu ihren Einstellungen gegenüber künstlicher Intelligenz befragt. Hierbei wurden neben studienbezogenen Variablen auch Hoffnungen und Befürchtungen mit Bezug zum Einsatz von KI-Werkzeugen erhoben.

Dabei äußerten Studierende vor allem Sorgen, die Verluste betreffen (Abb. 2). Die Palette der Verluste reicht hierbei von Fähigkeitsverlusten – allen voran die Fähigkeit selbstständig zu denken – über Bedeutungsverluste hin zu Verlusten von Werten: Verlust von Fähigkeiten (Aufmerksamkeit, körperliche Fähigkeiten, Kreativität, Denken), Bedeutungsverlust von Menschen, Verlust von Tätigkeit, Kontrollverlust, Verlust von sozialen Beziehungen, Privatsphäre, Unabhängigkeit, Individualität, Werten, Glück, Kritikbereitschaft, Grenzen, Transparenz, Vertrauen, Persönlichkeit. Sorgen um einen missbräuchlichen Einsatz betrafen in der Mehrzahl die Prüfungsgerechtigkeit, aber auch die Befürchtung, Opfer von Desinformationskampagnen zu werden.

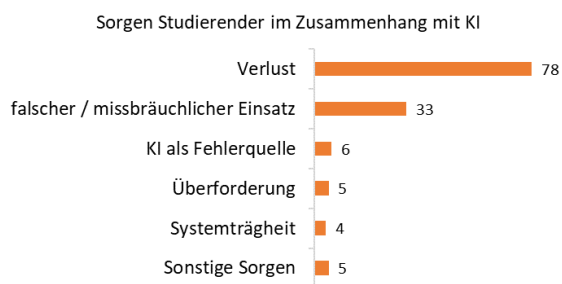


Abb. 2: Sorgen Studierender

Diesen Sorgen steht eine Reihe von genannten Hoffnungen (Abb. 3) gegenüber. So hofft die größte Zahl der Studierenden, durch den Einsatz von KI einen Produktivitätszuwachs, bzw. eine Effizienzsteigerung zu erfahren. Dieser Effizienzzuwachs betrifft vor allem Routineaufgaben aus dem Erfahrungsbereich der Studierenden. Hierzu zählen sie auch Rechercheaufgaben, schematisch ablaufende, sich wiederholende, Prozesse und sonstige Arbeitserleichterungen. Einige der Studierenden erhoffen sich allerdings auch direkte positive Auswirkungen auf ihren Unterricht, beispielsweise durch bessere Möglichkeiten zur Binnendifferenzierung oder eine abwechslungsreiche Unterrichtsgestaltung. Ein wiederum häufig genannter Aspekt betrifft die Nutzung von KI

zur Unterstützung kreativer Prozesse. Hier erkennen Studierende bereits das Potenzial der Technologie als „digitaler Kollege“ Ideen zu liefern, die sie selbst dann weiterverfolgen können. Einige Studierende benennen auch den (technologischen) Fortschritt an sich als eigenen Wert.

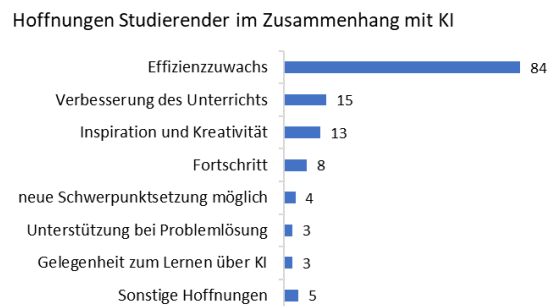


Abb. 3: Hoffnungen Studierender

Diese Studie wird durch eine zweite Erhebung mit der gleichen Zielgruppe an der Universität Würzburg ergänzt. In dieser sollen – neben Vorerfahrungen der Studierenden mit KI in Studium und Lehre – auch allgemeine Haltungen (Schepman & Rodway, 2023) und selbst eingeschätzte Fähigkeiten im Umgang mit KI (Carolus, Koch, Straka, Latoschik & Wienrich, 2023) abgefragt, sowie ein Fachtest zur Ermittlung dieser Fähigkeiten (Hornberger, Bewersdorff & Nerdel, 2023) durchgeführt werden. Die Ergebnisse dieser Erhebung können helfen, die untersuchte Gruppe der Teilnehmenden am LLL-Seminar Physik in Bezug zur Gesamtheit der Lehramtsstudierenden zu setzen.

Die Weiterentwicklung der Lehrveranstaltung knüpft bezüglich der Aspekte der Reflexionsförderung an ein Dissertationsprojekt im LLL-Seminar Physik, das sich mit der Untersuchung von Reflexionsprozessen beschäftigt, an (Damköhler et al., 2024). Daher wird, wie im Dissertationsprojekt, während der Durchführung dieses Projekts die Reflexionspraxis der Studierenden durch qualitative Erhebungen an den Durchführungstagen begleitend untersucht. Abschließend wird das Veranstaltungskonzept im Rahmen von Interviews unter den teilnehmenden Studierenden evaluiert.

Bei der Evaluation der Lehrveranstaltung, die im Sommersemester 2024 erstmalig in der beschriebenen Form stattfinden wird, stehen, neben prinzipiellen Betrachtungen zur Realisierbarkeit und konkreten Umsetzung und zur Entwicklung der Reflexionspraxis der Studierenden, vor allem Fragen zur Akzeptanz der Methode durch die Studierenden und zur Wirkung der digitalen Reflexionscoachings im Zusammenspiel mit klassischen Betreuungsgesprächen im Vordergrund. Unter anderem wird dabei untersucht, wie Studierende die Betreuung durch eine KI erleben und wie sie die mit dieser in Zusammenhang stehenden Veränderung der Betreuungsbeziehungen empfinden.

6. Literatur

- Brown, T. B., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., Kaplan, J., Dhariwal, P. et al. (2020, 28. Mai). *Language Models are Few-Shot Learners*. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/pdf/2005.14165v4>
- Bsharat, S. M., Myrzakhan, A. & Shen, Z. (2023, 26. Dezember). *Principled Instructions Are All You Need for Questioning LLaMA-1/2, GPT-3.5/4*. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/pdf/2312.16171v2>
- Carolus, A., Koch, M., Straka, S., Latoschik, M. E. & Wienrich, C. (2023). *MAILS -- Meta AI Literacy Scale: Development and Testing of an AI Literacy Questionnaire Based on Well-Founded Competency Models and Psychological Change-and Meta-Competencies*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.09319>
- Damköhler, J., Elsholz, M. & Trefzger, T. (2023). Förderung der Reflexionskompetenz im Lehr-Lern-Labor. Unterstützung der Entwicklung der Reflexionskompetenz Studierender in einem Lehr-Lern-Labor-Seminar. In H. Grötzebauch & S. Heinicke (Hrsg.), *PhyDid B, Didaktik der Physik. Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung 2023*. Bad Honnef: Fachverband Didaktik der Physik.
- Damköhler, J., Elsholz, M. & Trefzger, T. (2024). Förderung der Reflexionskompetenz angehender Physiklehrkräfte im Lehr-Lern-Labor (im Druck). In M. Jungwirth, J. Haarmann, N. Harsch, F. Haupts, J. Marks & Y. Noltensmeier (Hrsg.), *Wegmarken für eine zeitgemäße Lehrkräftebildung – Konzeptionelle Ansätze im Fokus. Tagungsband des 16. Bundeskongresses der Zentren für Lehrer*innenbildung* (Schriften zur allgemeinen Hochschuldidaktik, Bd. 9). Münster.
- Elsholz, M. & Trefzger, T. (2017). Professionalisierung durch Praxisbezug – Begleitforschung zu den Würzburger Lehr-Lern-Laboren. In C. Maurer (Hrsg.), *Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis*. (S. 488–491). Regensburg: Universität Regensburg.
- Emsley, R. (2023). ChatGPT: these are not hallucinations - they're fabrications and falsifications. *Schizophrenia (Heidelberg, Germany)*, 9(1), 52. <https://doi.org/10.1038/s41537-023-00379-4>
- Hochschule Ravensburg-Weingarten. (2024). *Künstliche Intelligenz - Die Büchse der Pandora ist geöffnet*. Weingarten.
- Hornberger, M., Bewersdorff, A. & Nerdel, C. (2023). What do university students know about Artificial Intelligence? Development and validation of an AI literacy test. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 5, 100165. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2023.100165>
- Kasneji, E., Sessler, K., Küchemann, S., Bannert, M., Dementieva, D., Fischer, F. et al. (2023). ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education. *Learning and Individual Differences*, 103, 102274. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2023.102274>
- Korthagen, F. (2004). In search of the essence of a good teacher: towards a more holistic approach in teacher education. *Teaching and Teacher Education*, 20(1), 77–97. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2003.10.002>
- Korthagen, F. & Kessels, J. P. A. M. (1999). Linking Theory and Practice: Changing the Pedagogy of Teacher Education. *Educational Researcher*, 28(4), 4–17. <https://doi.org/10.3102/0013189X028004004>
- Krieg, M. & Kreis, A. (2014). Reflexion in Mentoringgesprächen - ein Mythos? *Zeitschrift für Hochschulentwicklung*, 9(1). <https://doi.org/10.3217/zfhe-9-01/11>
- Leavy, S., O'Sullivan, B. & Siaper, E. (2020, 28. Juli). *Data, Power and Bias in Artificial Intelligence*.
- Lim, W. M., Gunasekara, A., Pallant, J. L., Pallant, J. I. & Pechenkina, E. (2023). Generative AI and the future of education: Ragnarök or reformation? A paradoxical perspective from management educators. *The International Journal of Management Education*, 21(2), 100790. <https://doi.org/10.1016/j.ijme.2023.100790>
- Liu, N. F., Lin, K., Hewitt, J., Paranjape, A., Bevilacqua, M., Petroni, F. et al. (2024). Lost in the Middle: How Language Models Use Long Contexts. *Transactions of the Association for Computational Linguistics*, 12, 157–173. https://doi.org/10.1162/tacl_a_00638
- Lo, L. S. (2023). The Art and Science of Prompt Engineering: A New Literacy in the Information Age. *Internet Reference Services Quarterly*, 27(4), 203–210. <https://doi.org/10.1080/10875301.2023.2227621>
- Peters, U. (2023). Explainable AI lacks regulative reasons: why AI and human decision-making are not equally opaque. *AI and Ethics*, 3(3), 963–974. <https://doi.org/10.1007/s43681-022-00217-w>
- Praetorius, A.-K., Klieme, E., Herbert, B. & Pinger, P. (2018). Generic dimensions of teaching quality: the German framework of Three Basic Dimensions. *ZDM – Mathematics Education*, 50(3), 407–426. <https://doi.org/10.1007/s11858-018-0918-4>
- Sachse, M. (2023, 11. Mai). Der Geist ist aus der Flasche. *Frankfurter Allgemeine Zeitung online* (Kommentar). Verfügbar unter: <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/kuenstliche-intelligenz-der-geist-ist-aus-der-flasche-18884740.html>
- Salvagno, M., Taccone, F. S. & Gerli, A. G. (2023). Artificial intelligence hallucinations. *Critical Care (London, England)*, 27(1), 180. <https://doi.org/10.1186/s13054-023-04473-y>
- Schepman, A. & Rodway, P. (2023). The General Attitudes towards Artificial Intelligence Scale (GAAIS): Confirmatory Validation and Associations with Personality, Corporate Distrust, and General Trust. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 39(13), 2724–2741. <https://doi.org/10.1080/10447318.2022.2085400>

- Van den Berg, G. & Du Plessis, E. (2023). ChatGPT and Generative AI: Possibilities for Its Contribution to Lesson Planning, Critical Thinking and Openness in Teacher Education. *Education Sciences*, 13(10), 998.
<https://doi.org/10.3390/educsci13100998>
- Van Es, E. & Sherin, M. (2002). Learning to Notice: Scaffolding New Teachers' Interpretations of Classroom Interactions. *Journal of Information Technology for Teacher Education*, 10(4), 571–596.
- Velásquez-Henao, J. D., Franco-Cardona, C. J. & Cadavid-Higuaita, L. (2023). Prompt Engineering: a methodology for optimizing interactions with AI-Language Models in the field of engineering. *DYNA*, 90(230), 9–17.
<https://doi.org/10.15446/dyna.v90n230.111700>
- Vogelsang, J., Bleher, J., Krupitzer, C., Stein, A. & Jung, R. (2023, 7. Februar). *Nutzung von ChatGPT in Lehre und Forschung – eine Einschätzung der AIDAHO-Projektgruppe*. Hohenheim: Universität Hohenheim.
- Völker, M. & Trefzger, T. (2010). Lehr-Lern-Labore zur Stärkung der universitären Lehramtsausbildung. In *Phydid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung in Hannover*. Bad Honnef: Fachverband Didaktik der Physik.
- Wang, L., Ma, C., Feng, X., Zhang, Z., Yang, H., Zhang, J. et al. (2024). A survey on large language model based autonomous agents. *Frontiers of Computer Science*, 18(6).
<https://doi.org/10.1007/s11704-024-40231-1>
- Wei, J., Tay, Y., Bommasani, R., Raffel, C., Zoph, B., Borgeaud, S. et al. (2022, 15. Juni). *Emergent Abilities of Large Language Models*. Verfügbar unter:
<http://arxiv.org/pdf/2206.07682v2>
- Wei, J., Wang, X., Schuurmans, D., Bosma, M., Ichter, B., Xia, F. et al. (2022). Chain-of-Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models. In S. Koyejo, S. Mohamed, A. Agarwal, D. Belgrave, K. Cho & A. Oh (Hrsg.), *Advances in Neural Information Processing Systems* (Bd. 35, S. 24824–24837). Curran Associates, Inc. Verfügbar unter:
https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2022/file/9d5609613524ecf4f15af0f7b31abca4-Paper-Conference.pdf
- White, J., Fu, Q., Hays, S., Sandborn, M., Olea, C., Gilbert, H. et al. (2023). *A Prompt Pattern Catalog to Enhance Prompt Engineering with ChatGPT*.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.11382>

Danksagung

Das beschriebene Projekt wird im Rahmen von WueDive gefördert. WueDive ist ein von der „Stiftung Innovation in der Hochschullehre“ gefördertes Projekt zur Weiterentwicklung digitaler Lehre an der Universität Würzburg. WueDive initiiert und koordiniert mit der Einrichtung eines Digital Higher Education Hub die Auseinandersetzung mit neuen Lernanforderungen und Lerngelegenheiten.

Transparenzhinweis

Bei der Anfertigung dieses Artikels wurden Werkzeuge der generativen KI zur Literaturrecherche und dem Übersetzen von Artikeln verwendet. Sämtliche Aktivitäten wurden durch die Autoren überwacht und überprüft, so dass sie die Verantwortung entsprechend tragen.

Fachwissenschaft für's Lehramt - 2 Beispiele und was sich daraus lernen lässt -

Andreas Schulz*, Stefan Brackertz*, Thomas Jockweg⁺

*Universität zu Köln, ⁺Gesamtschule Köln-Holweide
Andreas.Schulz@uni-koeln.de

Kurzfassung

Seit Langem, zuletzt in diesem Jahr fordert die DPG ein Lehramtsstudium sui generis inklusive eigener, auf das Lehramt zugeschnittener fachwissenschaftlicher Veranstaltungen. Allein: Trotz angeregter Debatten und pointierter Stellungnahmen ist kaum klar, was diese Veranstaltungen eigentlich ausmacht außer weniger Details, weniger Mathe und Auslassen von Inhalten. In diesem Vortrag werden exemplarisch zwei fachwissenschaftliche Veranstaltungen fürs Lehramt zur modernen Physik vorgestellt und an Hand der Konzeption dieser Veranstaltungen einige Leitideen für die Gestaltung von Lehramts-bezogenen fachwissenschaftlichen Physikveranstaltungen heraus gearbeitet.

1. Einleitung und Motivation der Veranstaltungen

Die Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG) fordert in ihrer Studie „Thesen für ein modernes Lehramtsstudium im Fach Physik“ [1] schon 2006 ein Lehramtsstudium „sui generis“ und spricht sich ausdrücklich gegen ein polyvalentes Studium aus. Die DPG und die Konferenz der Fachbereiche Physik (KFP) veröffentlichen 2023 eine weitere Studie [2] zur Situation des Lehramtsstudiums Physik in Deutschland, für die über 1000 Lehramtsstudierende und die Fachbereiche Physik von 48 Hochschulen befragt worden sind. „Auf Grundlage dieser und früherer Studien, nach Konsultation einer erweiterten Expertenrunde sowie im Licht von Erkenntnissen aus der physikdidaktischen Forschung stellt die DPG folgende Thesen auf:

- a) „Das Lehramtsstudium muss zur Priorität werden. Die Lehramtsausbildung erfährt nicht die Wertschätzung, die ihrer Bedeutung entspricht. Auf allen Ebenen – von der Politik über die Universitäten bis hin zu den Fachbereichen – muss die Lehramtsausbildung mit Vorrang behandelt werden. Insbesondere müssen die an Universitäten bestehenden forschungsorientierten Anreizsysteme zu Gunsten eines Engagements im Lehramtsstudium umgestaltet werden. (...)“
- b) Lehrer*innen müssen ein Lehramtsstudium absolvieren. Das reguläre Lehramtsstudium mit anschließendem Referendariat muss weiterhin die Grundlage für den Lehrerberuf bleiben. (...)“

Im Physik Journal heißt es dazu u.a.: „Beim ‚sui generis-Modell ist das Lehramtsstudium von Anfang an exklusiv auf die künftigen Lehrkräfte hin ausgerichtet. Am häufigsten ist das Lehramtsstudium aber in das Fachstudium eingebettet.“ [3] Weiterhin wird dort festgestellt, dass ein Wechsel zwischen Fach-

und Lehramtsstudium kaum stattfindet, dass also Lehramtsstudierende eindeutig auf den konkreten Lehrberuf hin orientiert sind. Lehramtsstudierende nehmen die fachwissenschaftlichen Anteile des Studiums als zu wenig einschlägig für die spätere Arbeit in der Schule wahr. Es wird konstatiert, dass „viele Themen, die für den Physikunterricht wichtig sind, etwa Klimaphysik oder Astrophysik, im klassischen Kanon der Fachstudiengänge Physik fehlen“ [3]. Die Studie gipfelt in dem Appell „Eigene Lehramtsstudiengänge braucht das Land“. In zwei Leserbriefen auf den Artikel von Woitzig et al. wird festgestellt „Es müssen wohl Korrekturen am gesamten System der Lehrerausbildung erfolgen.“ [4] und „Eine optimale Ausbildung verlangt für die Lehramtsstudent(inn)en ein Studium eigener Art. Sie ist kein Anhängsel an einen Fachstudiengang Physik.“ [5]. Und weiterhin heißt es „Umgesetzt wurde von diesen Forderungen fast nichts (...) Das ist ein Alarmzeichen ersten Ranges: Nicht einmal die eigene Fachgesellschaft DPG findet Gehör bei den Fachbereichen Physik.“ Und weiterhin: „Was muss denn noch geschehen, damit die Fachbereiche sich endlich mit großer Tatkraft an eine Verbesserung der Lehramtsausbildung machen?“ [5].

Zu ganz ähnlichen Ergebnissen kommt die Studie von Heinicke et al. [6]. Dort heißt es u.a.: „Die DPG hat 2006 ein Studium sui generis empfohlen als ‚moderne und zeitgemäße‘ Organisation des Lehramtsstudiums. Ressourcenbedingt resultiert hieraus in der Konsequenz eine besondere Verbindlichkeit gegenüber der Lehramtsausbildung, um auch für kleine Gruppen von Lehramtsstudierenden komplett eigenständige Veranstaltungen anzubieten.“ Im letzten Satz wird resümiert: „Eine hochschuldidaktische Reform ist nötig.“

Doch was macht eigentlich eine fachwissenschaftliche Lehramtsveranstaltung aus?

In diesem Beitrag werden zwei Vorlesungen vorgestellt, die in Bezug auf die moderne Physik speziell für das Lehramt Physik (Sekundarstufe I und II im Masterstudium) entwickelt und mehrfach durchgeführt wurden: Kern- und Elementarteilchen-Physik sowie Einführung in die Astrophysik, jeweils einsemestrig. Der Fokus liegt dabei auf der Beschreibung von Stoffauswahl und Aufbau, an denen einige zu Grunde gelegte Gestaltungsprinzipien exemplarisch erläutert werden.

Ergänzt wird dies durch einen Rückblick auf diese Veranstaltungen aus Sicht eines ehemaligen Studenten und jetzigen Lehrers.

2. Inhalte und Aufbau der Veranstaltungen

2.1. Kern- und Elementarteilchen-Physik für Lehramtsstudierende

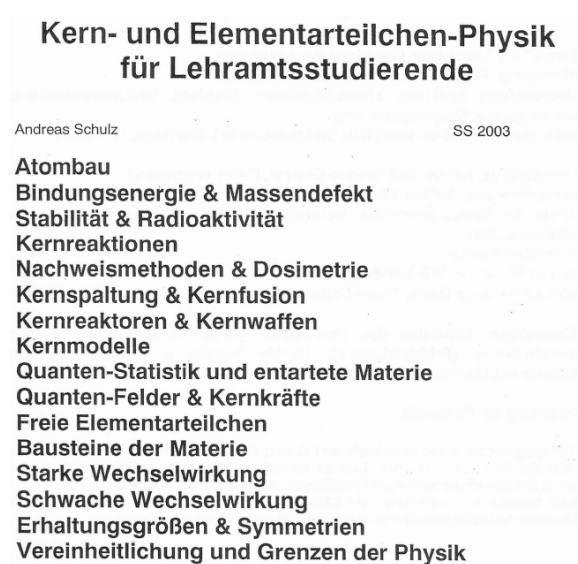


Abb. 1: Übersicht über die behandelten Themen in der Kern- und Elementarteilchenphysik

Behandelt werden die grundlegenden Themenbereiche sowohl der Kern- als auch der Elementarteilchen-Physik. Dabei stehen weniger die detaillierten Arbeitsmethoden in der Forschung (wie z.B. an einem Beschleuniger) Tätiger im Vordergrund, sondern vielmehr die grundlegenden Erkenntnisse und Zusammenhänge über den Bau und die Struktur von Materie und Feldern, sowie deren Bezug zu Vorgängen in Technik, Umwelt und Alltag.

Besonderer Wert wird dabei auf eine plastische Herausarbeitung der zentralen Begriffe und des aktuellen Weltbildes gelegt. Offene Fragen der Physik werden dabei besonders betont, gemäß dem Gestaltungsprinzip (Abbildung 2) „Spannend wird es, wo sich Verstandenes und offene wissenschaftliche Frage treffen.“

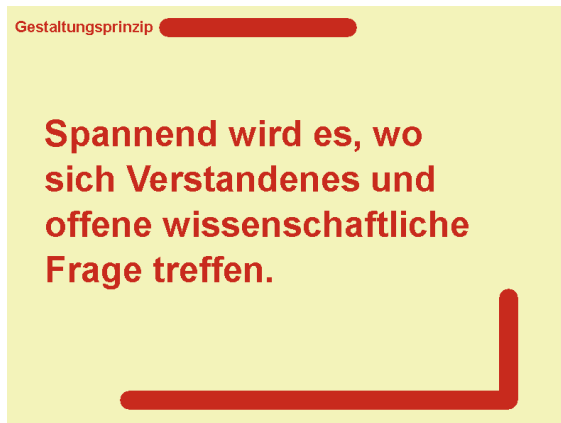


Abb. 2: Gestaltungsprinzip a

Schon länger bekannt und inzwischen empirisch umfassend belegt ist für Studierende der Natur- und Ingenieurwissenschaften in den ersten Semestern, dass sie selbst unter günstigsten Bedingungen nur einen Bruchteil des Veranstaltungsstoffes mitnehmen. [7],[8] Auch in höheren Semestern und in der Schule, insbesondere in heterogenen Kursen, dürfte im Prinzip das gleiche Problem bestehen. Angesichts dessen wurde in dieser Veranstaltung ein besonderes Augenmerk darauf gelegt, den Studierenden laufend den Wiedereinstieg in die Vorlesung zu ermöglichen, ohne alles, was vielleicht vorher nicht mitgenommen wurde, zunächst aufarbeiten zu müssen. Dafür wurde die Stabilitätskurve der Kernphysik (Abbildung 4) als zentraler Bezugspunkt der Veranstaltung gewählt, die als Ausgangs- und Endpunkt der Besprechungen fast aller Veranstaltungsthemen diente.

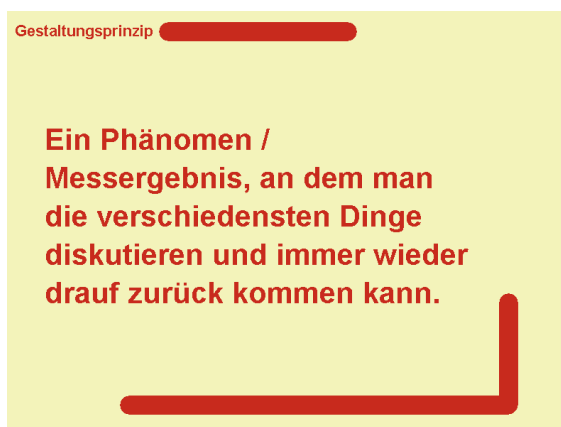


Abb. 3: Gestaltungsprinzip b

Das Gestaltungsprinzip „Ein Phänomen / Messergebnis, an dem man die verschiedensten Dinge diskutieren und immer wieder drauf zurück kommen kann.“ (Abbildung 3) wurde dabei in drei Teilen realisiert, wobei immer Exkurse zu gesellschaftlichen Debatten eingeschoben wurden. Dabei wurden die Argumente der öffentlichen Debatte in Bezug zum

erlernten Fachwissen gestellt, ohne die Position des Dozenten zu verheimlichen. Dem liegt die Auffassung zu Grunde, dass Objektivität, aber nicht Neutralität möglich ist und dass es dem Beutelsbacher Konsens [9] am ehesten gerecht wird, wenn die Position des Sprechers transparent aber nicht dominant gemacht wird.

2.1.1. Atombau und Stabilitätskurve?

Im einführenden Kapitel Atombau werden grundlegende atomare Größen wie Ordnungszahl A und Ladungszahl Z sowie atomare Massezahl der Elemente im Periodensystem und eine sinnvolle Energieeinheit (Elektronenvolt, eV) definiert. Auch die Isotopie wird hier behandelt. In Bindungsenergie & Massendefekt wird die Bindungsenergie der Atomkerne pro Nukleon in Abhängigkeit von der Ordnungszahl A behandelt. Sie steigt zunächst bis zum Eisen ($A = 56$, $Z = 26$) an um dann allmählich wieder langsam zu sinken.

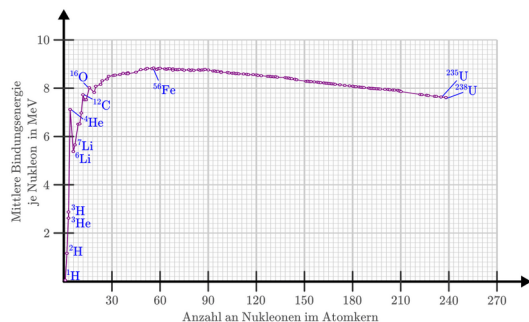


Abb. 4: Stabilitätskurve. (Quelle: Meyer, L (2023) Leserbrief zu [3]. Leserbrief in Physik Journal 23, Nr. 8 [10])

2.1.2. Was lässt sich aus der Stabilitätskurve lernen?

Diese Betrachtung führt nahtlos zum Kapitel Stabilität und Radioaktivität. Das letzte stabile Element ist Blei ($Z = 82$), danach werden die Elemente immer instabiler, ab dem Neptunium ($Z = 93$) kommen die Elemente nicht mehr natürlich auf der Erde vor, da ihre Zerfallszeit erheblich kürzer als das Alter der Erde ist. Zwei Elemente zwischendrin im Periodensystem kommen nicht natürlich vor, da sie kein stabiles Isotop besitzen (Technetium und Promethium). Die zunehmende Radioaktivität der schweren Kerne rührt von der zunehmenden Abstoßung der Protonen im Kern her, die von der Starken Kernkraft nicht mehr kompensiert werden kann. Zunächst (bis zum Blei) „schützen“ sich die Kerne, indem sie – ab dem Scandium, $Z = 21$ – mehr Neutronen als Protonen im Kern einlagern, die ja der Starken Kernkraft, nicht aber der elektrischen Abstoßung unterliegen. In die-

sem Kapitel wird auch das radioaktive Zerfallsgesetz (eine Exponentialfunktion wie alles Wachsen und Zerfallen in der Natur) hergeleitet und die Geiger-Nuttal-Regel behandelt. Radioaktivität ist im Alltag allgegenwärtig und somit ein wichtiges Schulthema. Hier werden dann auch Alpha-Zerfall, Beta-Zerfall und Gamma-Emission ausführlich diskutiert.

Im nächsten Kapitel werden Kernreaktionen behandelt, inklusive Kernspaltung, Neutroneneinfang und Kernfusion – durch letzteren Prozess werden im Universum alle Elemente jenseits von Helium bis zum Eisen ($Z = 26$) erzeugt, die viel selteneren Elemente danach durch Neutroneneinfang und anschließenden Beta-Zerfall. Hier wird auch auf den Begriff des Wirkungsquerschnitts eingegangen, ohne damit quantitativ zu arbeiten.

Das praxisnahe Kapitel Nachweismethoden und Dosimetrie ist wieder sehr schulrelevant und schließt das so wichtige Thema Strahlenschutz ein.

Das auch nach der Schließung aller Kernkraftwerke in Deutschland immer noch akute Thema Kernspaltung und Kernfusion wird uns alle noch lange in die Zukunft hinein beschäftigen. Insbesondere die Kernfusion, wie sie in der Sonne geschieht, ist wieder zunehmend in der Debatte.

Daran schließt sich nahtlos an das Kapitel Kernreaktoren und Kernwaffen. Insbesondere sollte jede(r) Schüler*in am Ende ihrer/seiner Schulzeit über Techniken und Arbeitsweisen hierzu Bescheid wissen. Angesichts der öffentlichen Debatte um diese Technologien wurde dabei besonderer Wert darauf gelegt, herauszuarbeiten, inwiefern Kernreaktoren und Kernwaffen eine gemeinsame technologische Grundlage haben.

2.1.3. Wie kommt die Stabilitätskurve zu Stande?

Im Kapitel Kernmodelle stehen zwei Modelle im Vordergrund: Das Tröpfchenmodell nach Gamow bzw. von Weizsäcker und das jüngere Schalenmodell nach Jensen bzw. Mayer-Göppert. Das Tröpfchenmodell ist geeignet, die Kernspaltung zu veranschaulichen. Das Kernschalenmodell verdeutlicht, dass – ebenso wie in der Atomhülle – auch im Kern ein Schalenbau aufgrund des Pauli-Verbots (das auch für Protonen und Neutronen gilt) vorliegt.

¹ Eine personifizierende Sprache wie hier verwendet ist durchaus umstritten, es gibt aber auch gute Gründe dafür, siehe z.B. [11] und [12]

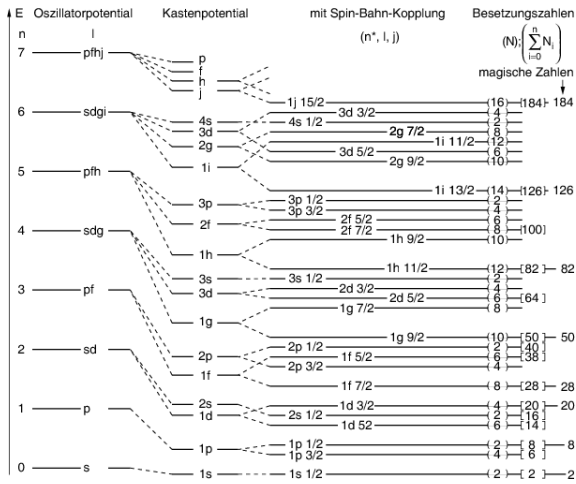


Abb. 5: Schalenmodell der Protonen. (Quelle: Demtröder, W. (2014). Kernkräfte und Kernmodelle. In: Experimentalphysik 4. Springer-Lehrbuch. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg [13]. Abbildung 5.34, Seite 135)

Nur ist der Aufbau der Schalen völlig anders als in der Atomhülle, da insbesondere im Kern die Spin-Bahn-Kopplung der Niveaus – anders als in der Hülle – extrem stark ist, womit die Hauptquantenzahlen im Kern ihre Bedeutung verlieren, vergleiche Abbildung 5. Dabei wird die Spin-Bahn-Kopplung nicht im Detail behandelt; vielmehr geht es darum, herauszuarbeiten, dass das Kernschalenmodell wie viele andere darauf beruht, dass eine Hierarchie der Wechselwirkungen angenommen wird, die nur eine Näherung ist, und man es bei Atom und Kernphysik mit demselben Modell aber entgegen gesetzten Extremfällen zu tun hat. Realisiert und diskutiert wurden dabei zwei Gestaltungsprinzipien, die auch für den Schulunterricht von Bedeutung sind: „Die Kunst der Physik ist (auch) die Kunst der Näherung – und die Näherungen sind in Atom- und Kernphysik, die sich ansonsten sehr ähnlich sind, verschieden.“ (Abbildung 6) ist ein wichtiger Aspekt der „nature of physics“, der in der Schule oft zu kurz kommt. „Vergleiche zwischen verschiedenen Gebieten der Physik herstellen: Was ist gleich / ähnlich, was verschieden?“ (Abbildung 7) ist auch für den Schulunterricht hilfreich.

Hieran anschließend wird die Quantenstatistik nach Fermi und entartete Materie durchgerechnet, ausgehend von der Boltzmann-Statistik, nun aber unter Einschluss der Tatsache, dass – anders als bei Boltzmann – hier nicht mehr unendlich viele Energieniveaus zur Besetzung zur Verfügung stehen, sondern die Anzahl der Niveaus bei sehr hohen Materiedichten beschränkt ist. Dies wird aus zwei Gründen relativ ausführlich behandelt: Es ist ein einleuchtendes Beispiel dafür, wie mit Hilfe der Statistischen Physik bereits mit sehr einfachen Annahmen und machbaren Rechnungen sehr weitreichende Ergebnisse erzielt werden können. Zudem spielt entartete Materie sowohl bei Nukleonen im Kern eine wichtige Rolle,

als auch in den Endstadien von Sternen (Weißen Zwergen, Neutronensternen, Schwarzen Löchern). Das Thema bietet somit einen Anknüpfungspunkt zur (nuklearen) Astrophysik im Sinne des bereits erwähnten Gestaltungsprinzips. (Abbildung 7)

Gestaltungsprinzip

Die Kunst der Physik ist (auch) die Kunst der Näherung – und die Näherungen sind in Atom- und Kernphysik, die sich ansonsten sehr ähnlich sind, verschieden.

Abb. 6: Gestaltungsprinzip c

Das folgende Kapitel Quanten-Felder und Kernkräfte leitet den Übergang zur Elementarteilchen-Physik ein. Es behandelt alle 4 im Kosmos vertretenen Kräfte (Wechselwirkungen) und ihre Potenziale. Dabei wird auch die Schwierigkeit betont, dass es bisher noch nicht gelungen ist, die Gravitation zu quantisieren, was zu großen theoretischen Problemen insbesondere bei sehr kleinen Längenskalen führt. Ein vorgeschlagener theoretischer Ansatz, die String-Theorie, ist noch völlig unzureichend ausgearbeitet (es sei bemerkt, dass sie statt der 4 als gesichert geltenden Dimensionen im Kosmos – siehe Allgemeine Relativitätstheorie – derer mindestens 11 benötigt, von denen sich 7 bisher einem Nachweis durch Beobachtung entziehen).

Gestaltungsprinzip

Vergleiche zwischen und Bezüge zu verschiedenen Gebieten der Physik herstellen: Was ist gleich / ähnlich, was verschieden?

Abb. 7: Gestaltungsprinzip d

Eine Wechselwirkung (Kraft) kann grundsätzlich zweierlei: Bewegungszustand ändern (also anziehen oder abstoßen) oder umwandeln. So ist z.B. die umwandelnde Wirkung der elektromagnetische Kraft die Paarerzeugung bzw. Paarvernichtung (z.B. zerstrahlen sich ein Elektron und sein Antiteilchen Po-

sitron zu zwei Gamma-Quanten, also elektromagnetischer Strahlung). Zu jeder Wechselwirkung gehört eine zugehörige Ladungseigenschaft, die elektrische, die gravitative (das ist nichts anderes als die Masse), die starke und die schwache Ladung; zu jeder Ladungsart gibt es auch eine Anti-Ladung. Kraftwirkung ist nun nicht, dass „einer am anderen zieht“, sondern dass es aufgrund der entsprechenden Ladung zum Austausch von Wechselwirkungsquanten kommt. Dieser Prozess erzeugt die Wechselwirkung. Wichtig ist, dass dabei betont wird, dass die Analogie von Gravitation und den übrigen Wechselwirkungen zu Problemen mit der Allgemeinen Relativitätstheorie führt.

Gestaltungsprinzip

Physik lebt auch von der großen Erzählung:

Hier: Wie die Physik ihre postmoderne Phase überwunden hat (Vom „Teilchenzoo“ zum Standardmodell)

Abb. 8: Gestaltungsprinzip e

Im folgenden Abschnitt geht es um die Geschichte „postmoderne Phase“ der Physik und ihre Überwindung, denn „Physik lebt auch von der großen, oft zeitgeschichtlichen Erzählung“ (Abbildung 8): Zunächst werden der Geschichte folgend phänomenologisch freie Elementarteilchen, Hadronen (die der Starken Wechselwirkung unterliegen), Leptonen (für die das nicht gilt) und Austauschteilchen (Wechselwirkungs-Quanten) unterschieden. Zu ihnen zählen die Photonen, Gluonen, Weakonen und Gravitonen – letztere sind noch nicht entdeckt, wohl aber die Gravitationsstrahlung. Zu diesen Quanten zählt auch das Higgs-Teilchen (entdeckt 2012). Die Nukleonen im Kern zählen zu den Hadronen, die Elektronen der Atomhülle zu den Leptonen. Hadronen sind Baryonen (zu denen auch die Nukleonen zählen) und Mesonen. Die Gruppe der Baryonen mit Spin $\frac{1}{2}$ wird mit ihren Multipletts vorgestellt. Im zweiten Teil dieses Abschnitts wird dann erläutert wie dieser „Teilchen-Zoo“ wenig später mit Hilfe des Standardmodells der Teilchenphysik und den elementaren Bausteinen der Physik, den Quarks und Leptonen, geordnet werden konnte: Hadronen (also Baryonen und Mesonen) sind zusammengesetzt aus Quarks (Baryonen aus 3 Quarks, Mesonen aus einem Quark-Antiquark-Paar), Leptonen sind, soweit bekannt, elementar. Es gibt 6 verschiedene Quarks (Up und Down, Charm und Strange, Top und Bot-

tom) in 3 „Generationen“, wobei nur die unterste mit Up und Down stabil ist, die beiden anderen zerfallen nach sehr kurzer Zeit. Ebenso gibt es 3 „Generationen“ von Leptonen (Elektron, elektronisches Neutrino, Myon, myonisches Neutrino, Tauon, taonisches Neutrino), auch hier ist nur die unterste stabil ist, Myon und Tauon zerfallen rasch (ob Myon-Neutrino und Tauon-Neutrino auf Dauer stabil sind, ist noch nicht gesichert). Neutrinos wechselwirken mit Materie so gut wie nicht, sie können z.B. durch den menschlichen Körper ungehindert hindurchtreten, sogar größtenteils durch die ganze Erde. Allerdings können die Neutrino-Arten ineinander oszillieren, wenn sie genügend große Strecken fliegen (z.B. durch den Erdkörper). Dies wird gemäß des Grundsatzes „Und jetzt nicht mehr nur staunen: Meldungen zu aktueller Forschung können wir jetzt selbst verstehen.“ (Abbildung 9) am berühmten Super-Kamiokande-Experiment diskutiert.

Gestaltungsprinzip

Und jetzt nicht mehr nur staunen:

Meldungen zu aktueller Forschung können wir jetzt selbst verstehen.

Abb. 9: Gestaltungsprinzip f

Im letzten Abschnitt der Vorlesung werden Starke und Schwache Wechselwirkung im Lichte des Standardmodells betrachtet und die Rolle der Symmetrie in diesem Modell besprochen:

Was die Hadronen bzw. deren Quarks zusammen hält, ist die Starke Wechselwirkung, die durch die Theorie der Quantenchromodynamik (QCD) beschrieben wird. Die starke Wechselwirkung ist besonders kompliziert. Von den starken Ladungen („rot“, „grün“, „blau“, man nennt sie auch „Farbladungen“) gibt es 3 und 3 Antiladungen. Die Kraftübertragung geschieht – wie bei den anderen Wechselwirkungen auch – durch Austausch von Wechselwirkungsquanten, das sind hier die Gluonen, die ihrerseits eine Doppel-Farbladung besitzen (eine Farbe und eine Anti-Farbe). Beim Austauschprozess „kasiert“ das Gluon über seine Antifarbe die Farbe des Quarks und gibt ihm seine Farbe als neue Quark-Farbe. Eine weitere Besonderheit ist, dass die Kraft mit dem Abstand der Quarks nicht ab-, sondern zunimmt, Quarks sind „in freier Wildbahn“ niemals frei, sondern stets aneinander gebunden (Quark-Confinement). Zieht man sie mit Gewalt auseinan-

der, so bilden sich aus den – nunmehr hochenergetischen – Gluonen neue Quarks (meist Quark-Antiquark-Paare), was bei hochenergetischen Stoßprozessen an Teilchenbeschleunigern zu beobachten ist.

Eine noch größere Herausforderung für Lehramtsstudierende für ihren künftigen Oberstufenunterricht ist die Schwache Wechselwirkung. Eine anziehende oder abstoßende Wirkung ist (noch?) nicht bekannt, aber die umwandelnde Wirkung. Dies sind u.a. die Beta-Prozesse. Diese sind fundamental wichtig für unsere Existenz als Menschen, da der erste Teilprozess der Kernfusion von 4 Wasserstoffkernen zu einem Heliumkern in der Sonne ein solcher Beta-Prozess ist, der die gesamte Energiebereitstellung für unsere Erde bestimmt. Die Schwache Wechselwirkung hat – im Gegensatz zu den anderen Wechselwirkungen – keine Inversionsymmetrie: Prozesse können nicht „gespiegelt“ werden (C-P-Verletzung), die Austauschquanten (W und Z Teilchen) sind instabil und zerfallen rasch in unsymmetrische Teilchenpaare. Ihre enorme Masse war Anstoß zur Entwicklung der Higgs-Theorie.

Erhaltungsgrößen und Symmetrien sowie Vereinheitlichung und Grenzen der Physik runden die Veranstaltung ab. Hier überschneiden sich abermals diese Vorlesung und die Astrophysik. Aus der Homogenität des Kosmos’ in der Zeit folgt die Energieerhaltung, aus der Homogenität des Kosmos bzgl. des Ortes die Impulserhaltung, aus der Richtungshomogenität die Drehimpulserhaltung. Der Urknall wird als eine Heisenbergsche Fluktuation vor 13,8 Mrd. Jahren gedeutet. Ganz heranrechnen an den Urknallzeitpunkt können wir allerdings u.a. wegen der nicht gelungenen Quantisierung der Gravitation nicht, sondern nur bis an 10^{-43} s heran (Planck-Zeit). Diese Grenzen, wie sie z.B. auch in Abbildung 11 illustriert sind, werden angesichts im Sinne des Grundsatzes „Wo und wie sieht man die Grenzen der aktuellen physikalischen Beschreibungen?“ (Abbildung 10) explizit thematisiert.

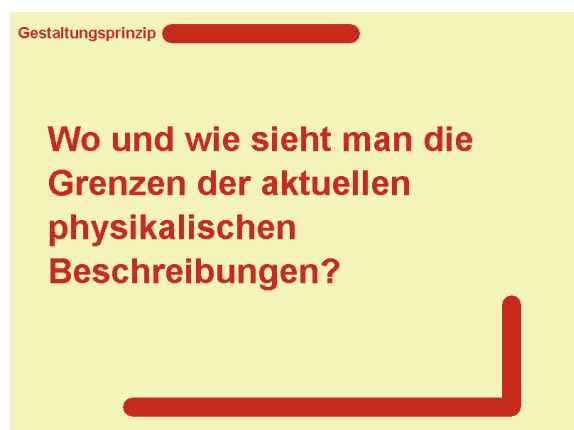


Abb. 10: Gestaltungsprinzip g

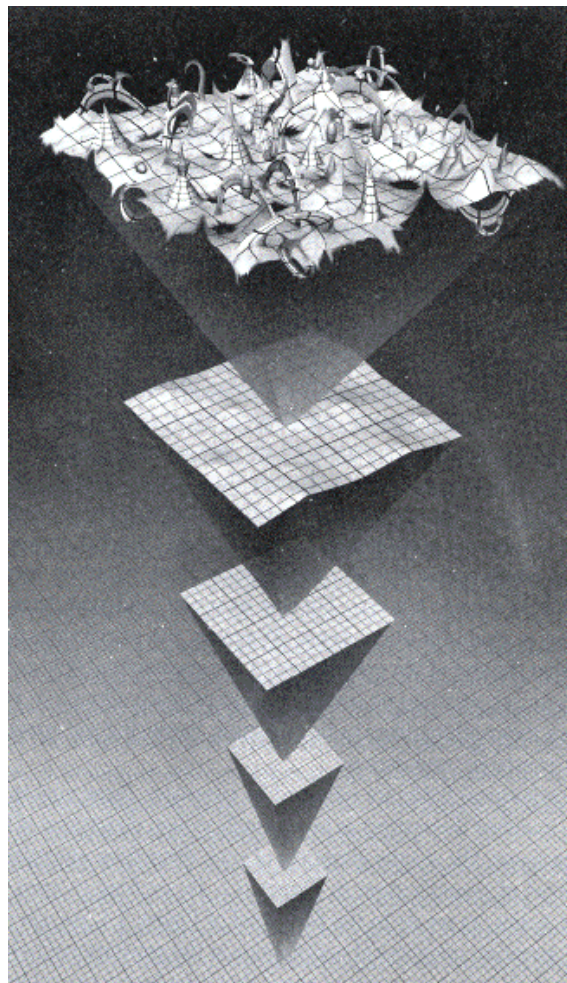


Abb. 11: Künstlerische Illustration der Quanten-Raumzeit. (Quelle: unification, spacetime foam, quantum vacuum, quantum fluctuations, <http://web.archive.org/web/20221105225045/http://abyss.uoregon.edu/~js/ast123/lectures/lec17.html> [14])

2.2. Einführung in die Astrophysik

Die Veranstaltung wendet sich an Studierende des Lehramts der Physik der Sekundarstufen. Sie entwickelt ein Bild des Universums mit den darin zu findenden Phänomenen und den physikalischen Prozessen und entwirft die derzeitigen Vorstellungen unseres modernen Weltbildes. Sie folgt damit u.a. den Empfehlungen der Kultusministerkonferenz der Länder zum Wissensstand der Schüler*innen am Abschluss der beiden Sekundarstufen der weiterführenden Schulen in Deutschland.

Es kann festgehalten werden, dass die Astronomie ein „Magnet“ für Schüler*innen allen Alters darstellt, sich für Naturwissenschaften zu interessieren, wobei astronomische Themen in gleicher Weise Jungen und Mädchen interessieren, was sich für viele andere Bereiche der Naturwissenschaften sehr unterschiedlich darstellt.[15]

Einführung in die Astrophysik

- .) „Zweck“ der Astronomie, Geschichte der Astronomie
- .) Orientierung: Koordinaten am Himmel, Zeitmessung
- .) Elektromagnet. Strahlung: Therm./nichttherm. Strahlung, Strahlungsentstehung, Strahlungsgesetze, Strahlungsmessung
- .) Geräte zur Strahlungsmessung (alle Spektralbereiche): Teleskope, Detektoren
- .) Planetenphysik, Kepler- und Newton-Gesetze, Planetenentstehung
- .) Physik der Sonne: Aufbau, Charakteristika, Kernprozesse und Sonnenevolution
- .) Physik der Sterne: Sterntypen, Sternentstehung und -entwicklung, Endstadien, Gravitationswellen
- .) Interstellare Materie
- .) Bau und Physik der Milchstraße
- .) Galaxien (reguläre Typen, Aktive Galaxien)
- .) Kosmologie: Expansion des Universums, 4-dim. Struktur, spez. u. allg. Relativitätstheorie (Feldgleichungen), Dunkle Materie und Dunkle Energie, Frühphasen des Universums, Spätphasen des Universums
- .) Verbindung zur Philosophie

Abb. 12: Übersicht über die behandelten Themen in der Astrophysik

Die Veranstaltung beginnt mit einem relativ umfangreichen astronomischen Einleitungsteil, der die Geschichte der Astronomie und ihre Beobachtungsmethoden und -geräte thematisiert. Nach dieser Einleitung folgt die eigentliche Astrophysik, die – neben einem vollständigen generellen Überblick – vier Schwerpunktbereiche, die für die Entwicklung eines modernen Weltbildes wesentlich bzw. unverzichtbar sind, thematisiert: Die Planetenphysik, die Physik der Sonne und der Sterne und die Kosmologie. Sie folgt dabei einem klassischen Aufbau von unserer unmittelbaren Umgebung bis hin zu den größten Strukturen im Kosmos.

2.2.1. Astronomische Einleitung

Das einleitende Kapitel trägt der Besonderheit der Astrophysik Rechnung, dass Experimente im Gegensatz zum Rest der Physik nicht möglich sind, sondern nur Beobachtungen. Dabei wird besonders heraus gearbeitet, wie ohne gezielte Experimente systematisch Erkenntnisse gebildet werden können, was zu einer besonderen Bedeutung der Orientierung und Kartierung am Himmel und der Instrumentierung führt.

In diesem einleitenden Kapitel wird zunächst der „Zweck“ der Astronomie betrachtet und ein Blick auf ihre Geschichte von den ersten (bekannten) Anfängen im Neolithikum bis hin zu modernsten Entwicklungen in jüngster Zeit geworfen. Sodann folgt ein Kapitel zur Orientierung in Ort (Koordinaten am Himmel) und Zeit (Zeitmessung, Kalender).

Bis in allerjüngster Zeit stand als Informationsquelle lediglich die elektromagnetische Strahlung zur Verfügung. Elektromagnetische Strahlung wird hier nun in aller Systematik behandelt: Thermische und nicht-thermische Strahlung und ihr jeweiliges Vorkommen im Kosmos, Strahlungs-Entstehungsprozesse, Strahlungsgesetze (einschließlich der Herleitung des Planck'schen Strahlungsgesetzes) sowie Strahlungsmessung. Daran schließen sich nahtlos Geräte zur Strahlungsmessung für alle Teile des elektromagnetischen Spektrums vom Radiobereich bis zum Gam-

ma-Bereich an, zunächst Teleskope für alle Bereiche, dann Detektoren und Nachweismethoden.

2.2.2. Astrophysik im engeren Sinne

Nach diesen methodischen Betrachtungen zur astronomischen Forschung kommt nun der Einstieg in die physikalischen Phänomene und Prozesse. Hier wird der „klassische“ Weg vom Nahbereich bis zu den größten bekannten Entfernungen gewählt. Eingegliedert sind in alle Kapitel auch die Methoden der Entfernungsmessung, ein historisch gesehen oft recht mühsames Unterfangen mit etlichen Irrwegen und Fehleinschätzungen.

Am Beginn steht als erstes von 3 Schwerpunktt Themen die Planetenphysik, wobei die Erde eine besondere Stellung einnimmt (Übersicht über die Physik der Oberfläche und der Atmosphäre als unser Lebensraum). Es schließt sich eine Betrachtung der anderen 7 Planeten unseres Sonnensystems an. Die 8 Planeten gliedern sich in 2 verschiedene Gruppen, die erdähnlichen und die Jupiter-ähnlichen. Erstere sind – vergleichsweise kleine – Gesteinsplaneten in der Nähe der Sonne mit fester dünner Kruste und flüssigem Aufbau im Inneren. Von ihnen ist lediglich die Erde ohne erhebliche technische Hilfsmittel bewohnbar (dies wird im Detail diskutiert). Die jupiterähnlichen Planeten werden auch als Gasplaneten bezeichnet. Sie befinden sich im Außenbereich des Sonnensystems. Sie besitzen auch einen Gesteinskern, darüber aber riesige Hüllen aus Gas, das im Inneren flüssig wird, zum größten Teil aus Wasserstoff und Helium.

Auch die Kleinkörper im Sonnensystem werden behandelt: die Kleinplaneten und Kometen. Behandelt wird auch die Entstehung der Planeten und Kleinkörper, ebenso das, was über die mehr als 5000 entdeckten Exoplaneten, also Planeten bei anderen Sternen, bekannt ist – eine „Erde 2.0“ ist allerdings noch nicht entdeckt.

Logischerweise schließt sich als zweites Schwerpunktt Thema die Physik der Sonne an: Aufbau, Charakteristika, Kernprozesse (im Wesentlichen Fusion von Wasserstoff zu Helium) und Strahlungsleistung, sowie Sonnenevolution und Konsequenzen für die Erde.

Auf der nächst größeren astrophysikalischen Skala schließt sich das dritte Schwerpunktt Thema der Veranstaltung, die Physik der Sterne, an. Darunter fällt die Behandlung und Einordnung der verschiedenen Sterntypen und deren Zusammenhang mit Sternentstehung und Sternentwicklung Beide Phänomene werden ausführlich mit den damit zusammenhängenden physikalischen Vorgängen und Gesetzmäßigkeiten behandelt inklusive der Endstadien von Sternen: Weiße Zwerge, Neutronensterne, Schwarze Löcher. Da es sich hier um Entartete Materie handelt (s. Kernphysik), wird auch in dieser Veranstaltung die Quantenstatistik hergeleitet. Im Zusammenhang mit

den Endstadien findet auch die Gravitationswellen-Astronomie Erwähnung, ein in jüngster Zeit aufkommender Forschungszeitweig zur Detektion sehr hochenergetischer Prozesse wie der Verschmelzung von Neutronensternen und Schwarzen Löchern.

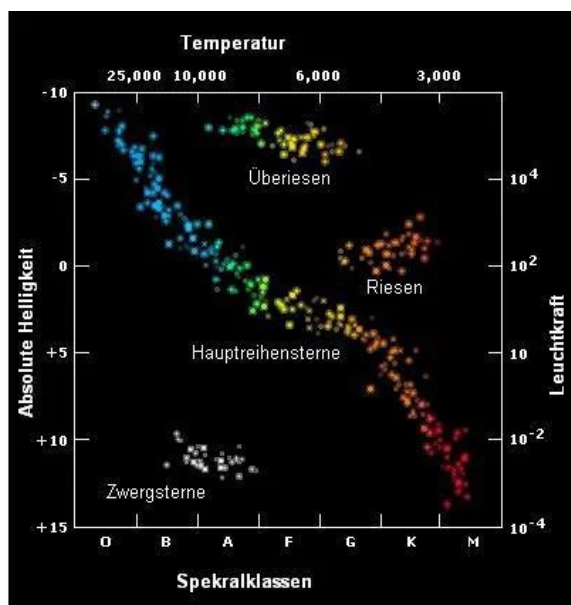


Abb. 13: Hertzsprung-Russell-Diagramm (Bild: Christoph Schneider In: Hornung, H. Stellare Klassengesellschaft. Max-Planck-Gesellschaft. <https://www.mpg.de/4628994/stellare-klassengesellschaft> [16])

Unsere Milchstraße, eine Scheiben-Galaxie (s.u.), enthält zu 80 – 90 % Sterne und 10 – 20 % Interstellare Materie, bestehend zu 99 % aus Gas und 1 % aus Staub, die großteils wolkenartig auftritt. Diese interstellaren Wolken sind die Orte von Sternentstehung, die auch heute noch auftritt. Prozesse der Heizung und Kühlung dieser Wolkenmaterie werden ausführlich erklärt, weil sie für die Sternentstehung, einen der Prozesse, die die Entwicklung des Universums maßgeblich bestimmen, von zentraler Bedeutung ist. Dabei wird heraus gearbeitet, wie universell diese Prozesse sind und wie wenige grundsätzlich verschiedene Varianten es letztlich bei Sternentstehung und -leben (Abbildung 13) und auch auf der nächst größeren Skala, den Galaxien gibt:

Ausgehend von Bau und Physik der Milchstraße werden Galaxien und ihre Entwicklung insgesamt behandelt. Die verschiedenen Typen von regulären Galaxien werden aufgezeigt (Scheibengalaxien, sehr häufig als Spiralgalaxien, elliptische Galaxien, irreguläre Galaxien – letztere treten häufig als Zwerggalaxien auf (mit jeweils erheblich geringerer Anzahl an Sternen als die großen Galaxien). Anschließend werden Aktive Galaxien behandelt, die häufig im Zentrum ein aktives Objekt besitzen, meist wohl in Form eines supermassiven Schwarzen Lochs, das intensiv mit seiner Umgebung wechselwirkt – es sei bemerkt, dass im Zentrum unserer

Milchstraße ebenfalls ein Schwarzes Loch sitzt, das gegenwärtig inaktiv zu sein scheint.

In diesem Kapitel wird auch die Dunkle Materie thematisiert, die 6-mal häufiger ist als „normale“ Materie, die sich durch Strahlung manifestiert. Woraus diese Dunkle Materie besteht, ist noch völlig unklar. Es kann keine baryonische Materie sein (die sich eben durch elektromagnetische Strahlung „verraten würde“), ihre Teilchen haben lediglich einen Arbeitsnamen: WIMP's (Weakly Interacting Massive Particles).

Zwar zeigen jüngste Ergebnisse, dass die Phänomene im Universum deutlich diverser sind und die Entwicklung des Universums auf den verschiedenen Skalen stärker miteinander zusammen hängt, als noch vor wenigen Jahren gedacht. Dennoch ist die Idee, die Natur und ihre Entwicklung auf verschiedenen Skalen zu betrachten und dort auf jeweils wenige Grundphänomene reduzieren zu können, nach wie vor valide und ein Umgang mit Komplexität, der für die Physik spezifisch ist und zu sehr weitreichenden Einsichten verhilft. Deshalb wird diese Idee explizit gemäß der Grundidee „Spezifische Denkweisen und -strategien explizit machen“ (Abbildung 14) herausgearbeitet.

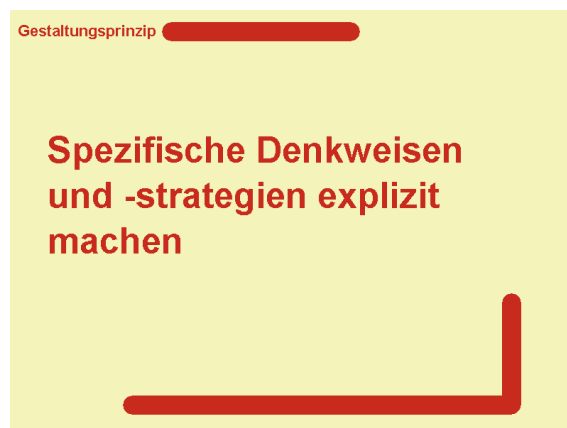


Abb. 14: Gestaltungsprinzip h

Im 4. Schwerpunktthema wird nun ausführlich die Kosmologie behandelt. Darunter fällt zunächst die Expansion des Kosmos', die zeitlich betrachtet nicht gleichmäßig voranschreitet. Sodann wird die 4-dimensionale Struktur des Kosmos' über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie eingeführt (Feldgleichungen). Im isotropen Raum reduzieren sie sich zu zwei Gleichungen, die analog zur klassischen Bewegungs- und Energiegleichung sind, und sich so leicht in Ähnlichkeiten und Unterschieden plausibel machen lassen. Auch hier spielt die Dunkle Materie eine wichtige Rolle bei der großräumigen Verteilung von Galaxien und Galaxienhaufen, die man heute in großen Modellierungsrechnungen gut reproduzieren kann. Zusätzlich tritt noch die Dunkle Energie hinzu, die ca. 70 % des Energieinhalts des

Kosmos ausmacht und über die man bisher noch überhaupt nichts weiß.

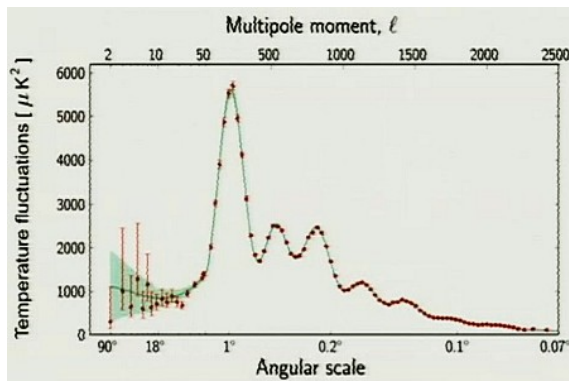


Abb. 15: Fluktuationen der Kosmischen Hintergrundstrahlung: links Sachsse-Wolfe-Effekt, Hauptpeak: Akustische Schwingungen im frühen Universum, rechts: Silk-Dämpfung. (Quelle: Fischer, D. (2013) Planck bestätigt die Standardkosmologie – aber... Auf: Skyweek Zwei Punkt Null <https://skyweek.wordpress.com/2013/03/21/planck-bestaetigt-die-standardkosmologie-aber/> [17])

Die Herausbildung von Struktur im Kosmos kann durch Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung (Abbildung 15) bei 2,7 K und Vergleiche mit Modellen bestimmt werden, wobei die abgeleiteten Parameter recht genau verifiziert werden können. Sodann wird die Frühphase des Kosmos 10^{-43} s nach dem Einsetzen des Urknalls – früher geht nach dem oben Erwähnten ja nicht, weil die Quantisierung der Gravitation nach wie vor nicht gelungen ist – sowie die Spätphase des Kosmos nach unserem heutigen Wissensstand vorgestellt. Hier erfahren wir die Grenzen der heutigen Physik, was für Schüler*innen der Oberstufe ebenso spannend wie wichtig ist – Alle Physiker*innen und auch alle Physiklehrer*innen stoßen im wahrsten Sinn des Wortes an ihre Grenzen!

Den Abschluss der Veranstaltung bilden einige Bemerkungen zum Erkenntnisprozess und zur Philosophie.

3. Zugänge

Die beschriebenen Veranstaltungen sind nicht in der heutigen Form ad hoc konzipiert, sondern über die Jahre immer weiter entwickelt worden. In diesem Abschnitt wird noch einmal zusammen gefasst, welche Spezifika dabei heraus kristallisiert wurden.

3.1. Was ist der spezifische Blick auf die Themenfelder?

a) Teilchenphysik mit dem Standardmodell der Elementarteilchen – das noch etliche Lücken und Baustellen aufweist – ist wissenschaftliche Grundlegung des atomistischen Weltbildes. Dazu gehört auch das gegenwärtige und bislang noch

mit großen „Lücken“ versehene Verständnis der 4 Grundkräfte im Kosmos.

b) Astronomie ist „weit weg“? Nein, sie bestimmt und beschreibt unseren Lebensraum, z. B. die Bewohnbarkeit unseres Planeten (und auch aller Exoplaneten), und Sterne (inklusive der Sonne) sind das wichtigste Strukturmerkmal des Kosmos' für unser Leben! Die Physik der Sterne gilt es möglichst tiefgreifend zu verstehen. Viele Objekte und Phänomene sind direkt beobachtbar, und sie müssen hinreichend systematisiert werden. Und die Frage nach dem Woher und Wohin ist eine der Kernfragen menschlichen Forschens, sie zieht sich durch alle Kulturen und alle Zeiten.

3.2. Prinzipien des Veranstaltungsaufbaus

- Es gilt, mit Phänomenen und Messergebnissen zu arbeiten, an denen man die verschiedensten Dinge diskutieren und immer wieder darauf zurück kommen kann. Auf der Basis gewonnener Ergebnisse gilt es, sich an Unbekanntes „heranzupirschen“. Dies spiegelt einerseits den Erkenntnisprozess in der Forschung wieder, bei dem es nicht nur bei Irrwegen immer wieder notwendig ist, zum Ausgangspunkt zurück zu kehren, sondern ermöglicht Schüler*innen bzw. Studierenden auch immer wieder neu Anschluss an das Lerngeschehen zu finden.
- Physik lebt auch von der „großen Erzählung“, die immer wieder zu elementaren zentralen Phänomenen zurückkehrt. Dabei kann und soll man Vergleiche zwischen verschiedenen Gebieten der Physik herstellen: Was ist gleich, ähnlich oder verschieden?
- Die Kunst der Physik ist die Kunst der Näherung. Modelle sind letztendlich immer „falsch“, weil sie von Vereinfachungen durchsetzt sind, ohne die Theorien im Chaos enden und Verstehen verdecken.
- Spezifische Denkweisen und -strategien explizit machen
- Spannend wird es, wo sich Verstandenes und offene wissenschaftliche Fragen treffen. Wo sieht man die Grenzen der aktuellen Beschreibungen?
- Woher kommen die Erkenntnisse über direkt nicht zugängliche Phänomene (wie z.B. Entstehung und Entwicklung unseres Kosmos)? Wo und wie sieht man die Grenzen der aktuellen physikalischen Beschreibungen, die es in den Blick zu nehmen gilt (z.B. vom „Teilchenzoo“ bis ca. 1973 zum Standardmodell der Elementarteilchen).
- Zuletzt gilt es, nicht mehr nur zu staunen, sondern zu versuchen, selbst zu verstehen.

4. Bedeutung für den Schulunterricht

Viele der in den Veranstaltungen behandelten Themen sind Bestandteil des aktuellen Schulcurriculums. So behandeln die Veranstaltungen nahezu alle der 25 Schlüsselexperimente im Grundkurs Physik der Oberstufe in NRW. Insbesondere Themen, die sowohl Aspekte aus der Astronomie und der Atomphysik behandeln, wie z.B. die Untersuchung von Sternspektren sind für die Schüler*innen äußerst attraktiv. In den meisten Physikgrundkursen der Qualifikationsphase an der Gesamtschule Holweide in den letzten fünf Jahren erarbeiteten sich die Schüler*innen im Rahmen des Unterrichtsvorhabens Erforschung des Mikro- und Makrokosmos im Kernlehrplan vorgesehene Kompetenzen, indem sie sich mit den Funktionsprinzipien verschiedener Weltraumteleskope und der Entstehung der detektierten Strahlung sowie mit den Objekten, die diese Strahlung emittieren, beschäftigten. Ihre Ergebnisse präsentierten sie in Form von Wandzeitungen. Die Unterrichtseinheit zeichnete sich stets durch eine hohe Beteiligung aus und erfuhr eine positive Rückmeldung von Seite der Schüler*innen. Auch in der Mittelstufe können die Inhalte der Veranstaltung als Unterrichtsinhalte dienen. So erscheint eine Implementierung der Inhalte der Vorlesung in didaktisch reduzierter Form in Inhaltsgebieten des Naturwissenschaftsunterrichts, wie z.B. den Gebieten „Lebensbedingungen auf der Erde“ (in Jahrgangsstufe 7) oder „Entstehung und Entwicklung der Erde“ (in Jahrgangsstufe 8) empfehlenswert. Themen, die über die im Curriculum vorgesehenen hinausgehen, finden im Unterricht dennoch Anwendung. Und einige Themen können im Rahmen von Facharbeiten von den Schüler*innen erarbeitet werden. Die Auswahl der Themen für Facharbeiten der Schüler*innen im Fach Physik an der Gesamtschule Holweide in den letzten fünf Jahren spiegelt dies deutlich wieder. Zwar wurden auch klassische Facharbeitsthemen wie z.B. der Magnuseffekt behandelt, die meisten Facharbeiten widmeten sich jedoch Themen aus den Bereichen Astrophysik, Atomphysik und Quantenmechanik. Beispiele für Facharbeitsthemen sind das Borexino-Experiment, Quantenverschränkung, die Rolle von Dunkler Energie und Materie in aktuellen kosmologischen Modellen, eine Betrachtung der wirtschaftlichen Aspekte von Kernfusion oder die Detektion von extrasolaren Planeten. Diese Themen üben auf Schüler*innen eine enorme Faszination aus. Vor allem Themen aus dem Bereich der Astronomie begeistern Schüler*innen und insbesondere Schülerinnen aller Jahrgangsstufen.

Um die hier vorgestellten Veranstaltungen zur modernen Physik in den Schulunterricht der Oberstufe zu integrieren, muss der Stoff geeignet didaktisch reduziert werden. Dazu enthalten die Veranstaltungen an vielen Stellen Hinweise, die an fachdidaktische Veranstaltungen anknüpfen und die natürlich in den

Veranstaltungen für den Master of Science komplett fehlen. Außerdem ist es für das Lehramt ein großer Vorteil, dass die Veranstaltungen einsemestrig stattfinden – die Lehramtsstudierenden müssen ja noch ein zweites Fach und Bildungswissenschaften studieren.

Die Unterrichtspraxis zeigt, dass die späteren Lehrenden in die Lage versetzt werden, ein ausgewogenes Verhältnis von Anschaulichkeit und quantitativer Beschreibung zu erzielen, was bewirkt, dass diese Veranstaltungen denen für den Master of Science weit voraus sind. Ferner werden die Studierenden dazu angehalten, an aktuelle Berichte aus den Medien anzuknüpfen.

Der Einklang mit den Vorgaben der KMK ist bereits betont worden.

Ein wesentliches Merkmal für den Unterricht ist es, dass Lehrende den Lernenden aufzeigen, welche riesigen Lücken im Verständnis unserer Welt bestehen und Lehrende keineswegs „allwissend“ sind, sondern die Lernenden als „Coach“ an die Hand nehmen, das bestehende Wissen Schüler*innen-gerecht zu vermitteln und die Wissensdefizite klar aufzuzeigen.

Da etliche der behandelten Themen in den beiden Veranstaltungen überlappen, sind sie sehr gut in Astronomie-Arbeitsgemeinschaften an den Schulen behandelbar. Eine solche Astro-AG befindet sich gerade in der Gesamtschule Köln Holweide durch die Autoren im Aufbau. Ein Beispiel für ein Projekt des ISA-Kurses Astronomie in der neunten Klasse ist das Erstellen eines Stop-Motion-Films zur Lebensgeschichte der Sonne. Das Thema eignete sich in diesem Kurs gut zur Binnendifferenzierung für eine recht heterogene Gruppe. Während sich alle Schüler*innen an der Erstellung eines Lernprodukts gemeinsam beteiligten und alle das Gleichgewicht von Gas- und Gravitationsdruck nachvollziehen und erklären konnten, erarbeitete sich eine Schülerin durch Lernmaterial angeleitet den Prozess der Kernfusion in der Sonne unter Berücksichtigung von Massendefekt und Kernbindungsenergie.

Um als Lehrende in die Lage versetzt zu werden, den Stoff didaktisch aufbereiten zu können, ohne dass sich Fehlvorstellungen bilden, ist eine entsprechende Ausbildung an der Universität nötig.

5. Fazit

Wir haben hier deutlich gemacht, dass Veranstaltungen speziell für das Lehramtsstudium der Physik für ein Lehramt „sui generis“ sinnvoll wenn nicht gar dringend erforderlich sind. Im Rahmen von einer Studienreform, von deren Notwendigkeit an vielen Stellen in der Literatur die Rede ist (aber bisher wenig Taten zur Folge hatte), sollten diese Gedanken konsequent umgesetzt werden.

Allerdings: Ein Blick auf die im Abschnitt 3 herausgearbeiteten Zugänge und Gestaltungsprinzipien der Vorlesungen lässt die Frage aufkommen, ob diese nicht eigentlich auch für nicht-Lehramts-Veranstaltungen sinnvoll sind. Das Lehramtsstudium sollte ganz sicher kein Anhängsel des rein fachwissenschaftlichen Studiums sein, aber vielleicht kann ja das rein fachwissenschaftliche Studium als Lehramtsstudium+ gedacht werden?

6. Literatur

- [1] Deutsche Physikalische Gesellschaft (2006), Thesen für ein modernes Lehramtsstudium im Fach Physik. Eine Studie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft e. V. Bad Honnef
- [2] Woitzik, A., Mecke, K., Düchs, G. (2023) Das Lehramtsstudium Physik in Deutschland. Eine Studie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft e. V. Bad Honnef
- [3] Woitzik, A., Mecke, K., Düchs, G. (2023) Aufbruch zu Verbesserungen. Physik Journal 22, Nr. 7
- [4] Meyer, L (2023) Leserbrief zu [3]. Leserbrief in Physik Journal 23, Nr. 8
- [5] Merzyn, G. (2023) Leserbrief zu [3]. Leserbrief in Physik Journal 23, Nr. 8
- [6] Heinicke, S., Kulgemeyer, C., Krabbe, H., Klein, P., Korneck, F., Zügge, T., Feser, M. (2023), Das „perfekte“ Lehramtsstudium. Physik Journal 22, Nr. 12
- [7] Finkelstein, Noah (2023), Educational Transformation at a Critical Time: The essential roles and promise of physicists. Plenarvortrag auf der DPG-Frühjahrstagung in Hannover 2023
- [8] Henderson, H., Beach, A., Finkelstein, N. (2011) Facilitating change in undergraduate STEM instructional practices: An analytic review of the literature. Journal of research in science teaching 2011/10, S. 952-984
- [9] Gloe, M., Oeftering, T. (2020) Didaktik der politischen Bildung. Ein Überblick über Ziele und Grundlagen inklusiver politischer Bildung. In: Externer Link: Meyer, D./Hilpert, W./Lindmeier, B. (Hrsg.): Grundlagen und Praxis inklusiver politischer Bildung. Bonn, S. 87 - 132.
- [10] Grotz, B. (2011-2022) Radioaktivität. <https://www.grund-wissen.de/physik/atomphysik/radioaktivitaet.html> abgerufen am 31.5.2024
- [11] Kattmann, Ulrich. (2005). Lernen mit anthropomorphen Vorstellungen? – Ergebnisse von Untersuchungen zur Didaktischen Rekonstruktion in der Biologie. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften. 11. 165–174.
- [12] Schmitt, R. (2011) Metaphern für Lernen und Lehren: Drei Annäherungen. In: Forum Qualitative Sozialforschung 12/2011 <https://www.qualitative-research.net/index.php/fqs/article/download/1726/3223?inline=1> abgerufen am 31.5.2024
- [13] Demtröder, W. (2014). Kernkräfte und Kernmodelle. In: Experimentalphysik 4. Springer-Lehrbuch. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21476-9_5
- [14] unification, spacetime foam, quantum vacuum, quantum fluctuations, <http://web.archive.org/web/20221105225045/http://abyss.uoregon.edu/~js/ast123/lectures/lec17.html> abgerufen am: 11.9.2024
- [15] Elster, D. (2007). Zum Interesse Jugendlicher an naturwissenschaftlichen Inhalten und Kontexten.
- [16] Hornung, H. Stellare Klassengesellschaft. Max-Planck-Gesellschaft. <https://www.mpg.de/4628994/stellare-klassengesellschaft> abgerufen am 31.5.2024
- [17] Fischer, D. (2013) Planck bestätigt die Standardkosmologie – aber... Auf: Skyweek Zwei Punkt Null <https://skyweek.wordpress.com/2013/03/21/planck-bestatigt-die-standardkosmologie-aber/> abgerufen 31.5.2024

Lernen mit (interaktiven) Experimentiervideos

- Schülerlabore als Orte der Lehrkräftefortbildungen (LFB) -

Mathias Ziegler*, Lisa Stinken-Rösner*

* Universität Bielefeld, Physik und ihre Didaktik, Universitätsstraße 25, 33615 Bielefeld
mziegler@physik.uni-bielefeld.de

Kurzfassung

Videos sind bereits seit langem fest im Physikunterricht verankert. Dabei werden immer öfters auch (interaktive) Experimentiervideos genannt, die durch ihren erhöhten Grad der Interaktivität eine konstruktivistische Verarbeitung der Inhalte ermöglichen. Diese werden von den Lehrkräften aber im Wesentlichen nur als Ersatz zum Realexperiment gesehen, die keinen zusätzlichen Mehrwert generieren. Eine Fortbildung soll Lehrkräften demonstrieren, wie Experimentiervideos gewinnbringend im Unterricht eingesetzt werden können. Die Fortbildung wird durch eine Studie im Mixed-Methods-Ansatz begleitet, in der untersucht wird, ob die Lehrkräftefortbildung zu einer Veränderung des professional knowledge (TPACK), der Technologieakzeptanz und der Selbstwirksamkeit der Teilnehmer*innen beiträgt. Darüber hinaus sollen Gelingensbedingungen sowie Implementationsbarrieren aus Sicht der Lehrkräfte herausgearbeitet werden. In der Studie werden Fragebögen im Prä-Post-Design, leitfadengestützte Gruppeninterviews, Dokumentenanalysen der entstehenden Produkte, sowie teilnehmende Beobachtungen während der Fortbildungstage durchgeführt.

1. Interaktive Experimentiervideos

Die digitale Transformation der Gesellschaft wirkt sich entscheidend auf den Schulalltag aus. So finden vermehrt digitale Lernmedien Einzug in den Unterricht, die es den Lehrkräften ermöglichen, fachliche Inhalte auf moderne Weise zu vermitteln. Es existiert eine ganze Bandbreite etablierter digitaler Medien, wie beispielsweise Erklärvideos, interaktive Bildschirmexperimente oder Simulationen mit ebenso breit gefächerten Funktionen, die sich auf unterschiedliche Art sinnstiftend in den Physikunterricht einbinden lassen (Weiler et al., 2023).

Dieses Angebot digitaler Lernmedien wurde unlängst um die Experimentiervideos erweitert. Unter Experimentiervideos versteht man Medien, die aus der Kombination der Methode des Experimentierens und dem digitalen Werkzeug der Videografie (Stinken-Rösner et al., 2023) entstehen. Es handelt sich also um videographierte Experimente, die nicht nur physikalische Fachinhalte vermitteln sollen, sondern vor allem auch das Experimentieren als Methode der Erkenntnisgewinnung in den Vordergrund stellen (Meier et al., 2022). Die Möglichkeit multimediale und interaktive Inhalte in die Experimentiervideos einzubinden sowie Einfluss auf den Versuchsausgang nehmen zu können, zeigen zudem ihren interaktiven Charakter. Die dann als interaktive Experimentiervideos bzw. Hypervideos (Ziegler & Stinken-Rösner, im Druck) bezeichneten Videos lassen sich dadurch deutlich von anderen Lernmedien, wie z.B. den Erklärvideos abgrenzen, da der Beobachter bzw. die Beobachterin bei diesen Videos in eine aktive

Nutzer*innenrolle versetzt wird. Zudem bergen sie das Potential, einen adaptierten Zugang zur Erkenntnisgewinnung zu ermöglichen, durch den individuelle, selbstgesteuerte und kognitiv aktivierende Lernprozesse (Chi & Wylie, 2014) auf Seiten der Schüler*innen initiiert werden können. Das stellt die interaktiven Experimentiervideos nicht nur in den Fokus der fachdidaktischen Forschung, sondern macht sie potenziell auch für die Lehrkräfte für den schulischen Einsatz interessant.

2. Perspektive der Lehrkräfte

Studien, in denen die Einstellung der Lehrkräfte bezüglich des Einsatzes von (interaktiven) Experimentiervideos erhoben wurde, sind rar. Eine Fragebogenstudie, die im Rahmen des VidEX-Projekts durchgeführt worden ist, kam zu dem Ergebnis, dass die Lehrkräfte dem Einsatz (interaktiver) Experimentiervideos im Mittel überwiegend positiv gegenüberstehen (Meier et al., 2022). Jedoch bestehen zum Teil auch Vorbehalte auf Seiten der Lehrkräfte. Der Einschätzung der Skeptiker*innen nach, sei das reale Experimentieren wichtiger und dürfe durch den Einsatz von Experimentiervideos nicht verloren gehen (Meier et al., 2022). Diese Einschätzung lässt sich insofern einordnen, als dass die (interaktiven) Experimentiervideos von den Skeptiker*innen nicht als Lernmedium zur Ergänzung bzw. Unterstützung des Experimentierens gesehen werden, sondern lediglich als Ersatzmedium zu den Realexperimenten wahrgenommen werden. Aus ihrer Sicht findet also lediglich eine Ersetzung der Medien ohne funktionalen Mehrwert für den

Experimentierprozess statt (vgl. SAMR-Modell nach Puentdura, 2006).

3. Lehrkräftefortbildung

Um den funktionalen Mehrwert der interaktiven Experimentiervideos zu verdeutlichen, wird im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes LFB-Labs-digital (Kirchhoff, Schwedler et al., in review) eine Lehrkräftefortbildung konzipiert, in denen die teilnehmenden Lehrkräfte inhaltlichen Input zu den Einsatzszenarien und den Gestaltungsprinzipien von interaktiven Experimentiervideos bekommen und bei der eigenständigen Produktion von Experimentiervideos begleitet werden. Das Konzept der Lehrkräftefortbildung wird im Folgenden vorgestellt.

3.1. Zielsetzung der Fortbildung

Im Zuge des digitalen Wandels im Schulbereich fordert das Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (KMK) in ihrer Digitalisierungsstrategie „Lehren und Lernen in der digitalen Welt“ eine Weiterentwicklung der Lehrkräfteprofessionalität, indem sich Lehrkräfte durch Aus-, Fort- und Weiterbildung digitale Kompetenzen aneignen (KMK, 2021). Die vorgestellte Lehrkräftefortbildung setzt an dieser Stelle an, indem ein Angebot für Lehrkräfte geschaffen wird, das digitale Lernmedium interaktives Experimentiervideo kennen zu lernen und für ihren Unterricht zu erproben. Zudem wird mit der Lehrkräftefortbildung das Ziel verfolgt, das professionelle Wissen der Lehrkräfte zu fördern. Dabei werden folgende Teillernziele verfolgt:

Z1: Die teilnehmenden Lehrkräfte kennen und beschreiben Einsatzszenarien von (interaktiven) Experimentiervideos im Physikunterricht.

Z2: Die teilnehmenden Lehrkräfte erkennen Gestaltungsprinzipien in Experimentiervideos bzw. beachten diese bei der Produktion eigener Experimentiervideos.

Z3: Die teilnehmenden Lehrkräfte binden interaktive Elemente bei der Produktion eigener interaktiver Experimentiervideos ein.

3.2. Zielgruppe

Die Lehrkräftefortbildung richtet sich primär an Physiklehrkräfte der Sekundarstufen I und II, die innovative digitale Lernmedien und aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse in ihre Unterrichtspraxis integrieren möchten, um ihren Unterricht effektiver und moderner gestalten zu können. Auch profitieren die Schüler*innen der teilnehmenden Lehrkräfte von der Fortbildung, da sich durch die erworbenen Kenntnisse die Unterrichtsqualität verbessert, wodurch auch die Lernprozesse der Schüler*innen gefördert werden und sie die Möglichkeit erhalten, die neuen Medien direkt zu erproben.

3.3. Konzeption der Fortbildung

Die Konzeption der Lehrkräftefortbildung folgt dem Design-Based Research-Ansatz (Schmiedebach &

Wegner, 2022). In einem ersten Schritt wurde die Vorprüfung durchgeführt. Hierfür wurde analysiert, wie eine Lehrkräftefortbildung zum Thema „Lernen mit (interaktiven) Experimentiervideos“ strukturiert sein muss, um eine Veränderung der Technologieakzeptanz, der Selbstwirksamkeit und des professionellen Wissens der teilnehmenden Lehrkräfte zu bewirken und gleichzeitig die in Abschnitt 3.1 ausformulierten praktischen Lernziele umzusetzen. Dafür wurde der aktuelle Forschungsstand über Videos im Physikunterricht im Allgemeinen und über Experimentiervideos im Speziellen erhoben, welcher die Grundlage für die Fortbildungsinhalte liefert. Unter ständigem Rückgriff auf den erhobenen Forschungsstand wurde im nächsten Schritt die Prototypenentwicklung durchgeführt, die Lehrkräftefortbildung also entwickelt (vgl. Abschnitt 3.4). Im dritten Schritt, der Beurteilungsphase, wird ein erster Fortbildungsdurchgang durchgeführt, die Fortbildung daraufhin evaluiert und mit Hilfe der Evaluationsergebnisse überarbeitet. Die adaptierte Fortbildung wird mehrmals durchgeführt und ggf. weiterentwickelt, so dass sich ein iterativer Prozess ergibt, wobei aktuell drei Fortbildungsdurchgänge geplant sind. Im letzten Schritt soll die finale Konzeption der Fortbildung als Best-Practice-Beispiel dienen und die anfangs genutzte theoretische Forschungsgrundlage um die neuen Erkenntnisse erweitert werden (Schmiedebach & Wegner, 2022). Eine Besonderheit der Konzeption stellt die geplante Verknüpfung mit dem Schülerlabor teutolab-physik der Universität Bielefeld dar. Schülerlabore sind ein wichtiges außerschulisches Instrument. Mit den Zielen, u.a. das Interesse der Lernenden für Naturwissenschaften und Technik zu fördern, naturwissenschaftliche Inhalte durch experimentelle Arbeitstechniken beizubringen sowie ein adäquates Bild der Naturwissenschaften zu vermitteln, entstanden in Deutschland immer mehr Schülerlabore, betrieben von Universitäten und Forschungsinstituten (Euler et al., 2015; Scharfenberg et al., 2019). Somit kommt ihnen eine große Rolle für die Motivation von Schüler*innen im außerschulischen Lernen zu. In diesem Zusammenhang nehmen auch die Lehrkräfte eine bedeutende Rolle ein. Für sie bieten Schülerlabore einen authentischen und innovativen Lernort, in denen sie ihre Schüler*innen in offenen Experimentiersettings beobachten können. Zu eben diesem Zweck sollen Teile der Lehrkräftefortbildung im Schülerlabor teutolab-physik stattfinden.

3.4. Ablauf der ersten Durchführung

Während der Fortbildung durchlaufen die Lehrkräfte drei aufeinander aufbauende Module (siehe Abb. 1). Das erste Modul erstreckt sich über einen kompletten Tag, die Module zwei und drei sind jeweils halbtägig. Im ersten Modul werden die Lehrkräfte in die verschiedenen Videoarten Dokumentarfilme, Lehrfilme, Erklärvideos und Experimentiervideos eingeführt.

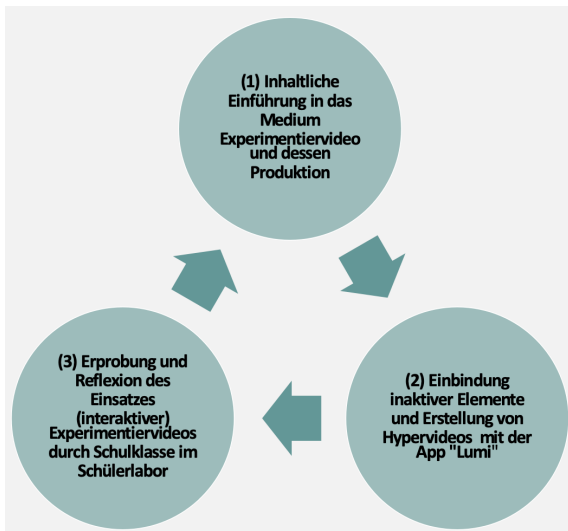


Abb. 1: Schematischer Ablauf der geplanten Lehrkräftefortbildung.

Die Einführung umfasst die Merkmale dieser Videoarten und greift im Speziellen die Begriffsklärung sowie die Unterscheidung zwischen den vorgestellten Videoarten auf.

Bei der anschließenden Fokussierung auf Experimentiervideos wird zunächst auf die Gestaltungsprinzipien für Demonstrationsexperimente (vgl. Schmidkunz, 1983) und die Multimediaanwendungen (vgl. Mayer, 2014) sowie die Abgrenzung dieses Mediums zu interaktiven Simulationen und IBES (vgl. Stinken-Rösner et al., 2023; Wilhelm, 2023) eingegangen. Anschließend werden typische Einsatzszenarien, alleinstehend oder in Kombination mit dem Realexperiment, erörtert. Mit diesem Wissen über Experimentiervideos sollen die Lehrkräfte im Anschluss eigenständig ein Experimentiervideo in der Fortbildungszeit produzieren. Sie haben dabei die Wahl zwischen verschiedenen Demonstrationsexperimenten (Flaschenzug, mechanischer Hebel, Fotoeffekt), die sie entlang der erlernten Gestaltungskriterien videografisch in Szene setzen sollen. Die produzierten Experimentiervideos werden unter den teilnehmenden Lehrkräften ausgetauscht, mit dem Auftrag, die Experimentiervideos zu vertonen (Watzka et al., 2019). In der anschließenden Reflexionsphase werden die vertonten Experimentiervideos hinsichtlich der Gestaltungsprinzipien und der Einsatzszenarien begutachtet und von den Peers ein individuelles Feedback gegeben.

Im zweiten Modul erlernen die Lehrkräfte, wie sie mit der App Lumi (Lumi; Lumi Education UG, 2024) aus den von ihnen im ersten Fortbildungsmodul produzierten Experimentiervideos interaktive Experimentiervideos bzw. Hypervideos erstellen können. Dazu binden die Lehrkräfte interaktive Elemente in ihre Experimentiervideos bzw. Videofragmente ein und, im Falle eines Hypervideos, verbinden ihre Videofragmente durch Verzweigungsfragen, so dass eine nicht-lineare Struktur entsteht. Für eine Anleitung zur Erstellung von interaktiven Experimentiervideos sei

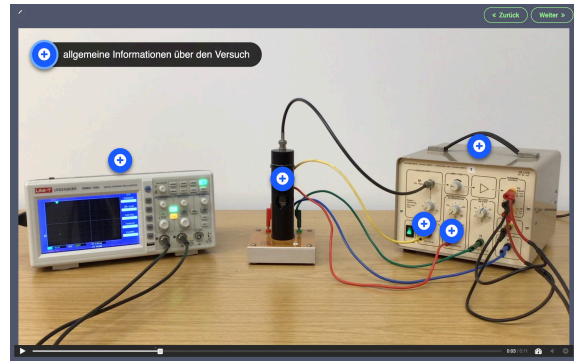


Abb. 2: Screenshot aus einem eigenproduzierten Hypervideo zum Franck-Hertz-Versuch.

auf Glatz & Erb (im Druck) bzw. zur Erstellung von Hypervideos auf Ziegler & Stinken-Rösner (im Druck) verwiesen.

Im dritten Modul erfolgt die Erprobung mit einer von einer Lehrkraft mitgebrachten Schulklasse im Schülerlabor teutolab-physik. Dazu durchlaufen die Schüler*innen mehrere Stationen, an denen sie mit verschiedenen im Vorfeld entwickelten Best-Practice-Beispielen von Experimentiervideos in Kombination mit Realexperimenten arbeiten, während die Lehrkräfte das digitale und analoge Experimentieren der Lernenden als unbeteiligte Beobachter analysieren. In einer anschließenden gemeinsamen Reflexionsphase mit den Teilnehmer*innen der Fortbildung, wird der Einsatz der (interaktiven) Experimentiervideos reflektiert und auf den Physikunterricht übertragen.

4. Evaluation der Fortbildung

Die Lehrkräftefortbildung wird durch eine Begleitstudie im Mixed-Method-Ansatz evaluiert, die im Folgenden vorgestellt wird.

4.1. Forschungsfragen

Mit der Begleitstudie wird das Ziel verfolgt, die Auswirkungen der Lehrkräftefortbildung zum Einsatz (interaktiver) Experimentiervideos auf die Akzeptanz (bezüglich neuer Technologien), die Selbstwirksamkeitserwartung und das professionelle Wissen der teilnehmenden Lehrkräfte zu untersuchen und darüber hinaus mögliche Implementationsbarrieren und Gelingensbedingungen für den Einsatz (interaktiver) Experimentiervideos im Physikunterricht zu erfassen. Daraus ergeben sich die folgenden Forschungsfragen:

FF1: Inwieweit führt die Lehrkräftefortbildung zu einer Veränderung des professionellen Wissens der teilnehmenden Lehrkräfte?

FF2: Inwiefern verändert die Lehrkräftefortbildung die Akzeptanz und die Selbstwirksamkeitserwartung der teilnehmenden Lehrkräfte gegenüber Technologien im Allgemeinen und mit speziellem Fokus auf den Einsatz (interaktiver) Experimentiervideos?

FF3: Welche Bedingungen beeinflussen die teilnehmenden Lehrkräfte bei der (potenziellen) Implementation der (interaktiven) Experimentiervideos in ihren Unterricht und welche Bedingungen führen zu einem gelungenen Einsatz?

4.2. Forschungsdesign

Zur Beantwortung der Forschungsfragen werden verschiedene quantitative und qualitative Forschungsmethoden kombiniert. Neben den fragebogengestützten Prä- und Post-Tests und den leitfadengestützten Gruppeninterviews in der gemeinsamen Reflexion (vgl. 3.4. Ablauf, Modul 3) werden die in der Lehrkräftefortbildung entstehenden Experimentiervideos durch eine Dokumentenanalyse sowie das Verhalten der teilnehmenden Lehrkräfte durch eine teilnehmende Beobachtung untersucht.

4.2.1. Fragebögen-gestützte Erhebung

Um die auftretenden Effekte der Lehrkräftefortbildung zu erfassen (FF1 & FF2), werden verschiedene Konstrukte jeweils vor der Fortbildung (Prä-Test) als auch nach der Fortbildung (Post-Test) fragebogengestützt erhoben.

Dabei sind vor allem die Technologieakzeptanz (Neyer, Felber & Gebhardt, 2021; Plageras et al., 2023), die Selbstwirksamkeitserwartung (Beierlein et al., 2012; Doll & Meyer, 2021) und das professionelle Wissen (TPACK; Stinken-Rösner, 2021; Stinken-Rösner et al., 2023) zur Erklärung des Verhaltens der Lehrkräfte von Interesse.

4.2.2. Leitfadengestützte Gruppeninterviews

Zur Ermittlung der Bedingungen, die die teilnehmenden Lehrkräfte bei einer potenziellen Implementation der (interaktiven) Experimentiervideos in ihren Unterricht beeinflussen und der Bedingungen, die zu einem gelungenen Einsatz führen (FF3), findet im dritten Block der Fortbildung eine Reflexion des Einsatzes (interaktiver) Experimentiervideos statt. Hierfür wird ein leitfadengestütztes Gruppeninterview (Döring & Bortz, 2016) mit allen teilnehmenden Lehrkräften durchgeführt. Die Leitfragen werden aus den Konstrukten, die den möglichen Implementationsbarrieren und den Gelingensbedingungen zugrunde liegen (u.a. Technologieakzeptanz und Selbstwirksamkeitserwartung) abgeleitet.

Für die Technologieakzeptanz wird das UTAUT-Modell nach Plageras et al. zugrunde gelegt. Demnach gibt es vier Prädiktoren, die auf die Verhaltensintentionen der Lehrkräfte und somit auf ihr Verhalten einwirken (Plageras et al., 2023). Im folgenden sind Prädiktoren sowie abgeleitete Fragen aufgelistet:

- Leistungserwartung (Ausmaß, in dem die Lehrkräfte glauben, dass der Einsatz von Technologie ihnen helfen wird, ihre Ziele zu erreichen): Wie können Ihrer Einschätzung nach (interaktive) Experimentiervideos dazu beitragen, Ihre persönlichen unterrichtlichen Ziele zu erreichen?
- Aufwandserwartung (Grad der Bequemlichkeit, der mit der Nutzung der Technologie verbunden ist): Wie einfach oder schwer ist es, Ihrer Einschätzung nach, (interaktive) Experimentiervideos im Physikunterricht einzusetzen?

- Sozialer Einfluss (Ausmaß, in dem eine Lehrkraft andere Lehrkräfte als wichtige Faktoren betrachtet, unabhängig von ihrer Hierarchie): Wie wichtig ist es Ihnen, dass auch Ihre Kolleg*innen (interaktive) Experimentiervideos im Physikunterricht einsetzen? Meinen Sie, dass Ihre Kolleg*innen (interaktive) Experimentiervideos in ihren Physikunterricht einsetzen würden, wenn Sie es in ihrem Unterricht vormachen?
- Erleichternde Bedingungen (Ausmaß, in dem eine Lehrkraft der Meinung ist, dass eine gut organisierte Infrastruktur für die Einführung der Technologie unerlässlich ist): Wie einfach oder schwer ist es für Sie, mit den Ihnen zur Verfügung stehenden Ressourcen (interaktive) Experimentiervideos in Ihrem Unterricht einzusetzen?

Neben der Technologieakzeptanz soll im Rahmen der Gruppeninterviews die Selbstwirksamkeitserwartung der teilnehmenden Lehrkräfte bezogen auf den Einsatz (interaktiver) Experimentiervideos im Physikunterricht erfasst werden. Unter Selbstwirksamkeitserwartung versteht man allgemein „die subjektive Gewissheit, neue oder schwierige Anforderungssituationen auf Grund eigener Kompetenz bewältigen zu können“ (Schwarzer & Jerusalem, 2002, S. 35). Diesem Konstrukt liegt also das Vertrauen in die eigenen Fähigkeiten als Prädiktor für das resultierende Verhalten zugrunde. Nach Bandura können vier Quellen für den Erwerb der Selbstwirksamkeitserwartung unterschieden werden (Schwarzer & Jerusalem, 2002). Diese werden wiederum in Interviewfragen überführt:

- Eigene Erfahrungen (Vermittlung von Erfolgen zur Stärkung der Selbstwirksamkeit): Welche Erfahrungen haben Sie selbst bezogen auf den Einsatz von (interaktiven) Experimentiervideos in der Fortbildung gemacht?
- Stellvertretende Erfahrungen durch Beobachtung von Verhaltensmodellen (Nachahmen von Personen mit ähnlichen Attributen): Welche Erfahrungen bzw. Beobachtungen bezogen auf den Einsatz von (interaktiven) Experimentiervideos konnten Sie machen, als Sie die Schulklasse im teutolabphysik beobachtet haben?
- Sprachliche Überzeugungen (Einredung, eine Person habe die notwendigen Bewältigungskompetenzen): Wie würden Sie Ihre Kompetenzen beschreiben, um digitale Lernmedien, wie (interaktive) Experimentiervideos, im Unterricht einzusetzen?
- Wahrnehmen eigener Gefühlserregung (Erregungszustand zur Beurteilung der Kompetenz nutzen): Inwiefern treten Situationen in Ihrem Schulalltag auf, in denen Sie das subjektive Empfinden haben, digitalbezogenen Anforderungen nicht gerecht zu werden?

Wie sind Sie mit diesen Situationen umgegangen?

Das Gruppeninterview wird aufgezeichnet, transkribiert und mit der Methode der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring analysiert (Mayring, 1994).

4.2.3. Teilnehmende Beobachtung und Dokumentenanalyse

Die teilnehmenden Lehrkräfte durchlaufen während der Fortbildung einen Lernprozess. Durch die unstrukturierte teilnehmende Beobachtung soll dieser Prozess dokumentiert werden. Dazu werden Audioaufnahmen der während der Videoproduktion stattfindenden Diskussionen angefertigt und die experimentellen Aufbauten der Experimentiervideos in regelmäßigen Abständen fotografiert.

Zusätzlich werden die entstehenden Experimentiervideos dahingehend untersucht, inwiefern die zuvor in der Fortbildung erarbeiteten Gestaltungsprinzipien (vgl. 3.4) bei der Videoproduktion umgesetzt worden sind.

5. Ausblick

Für die konzipierte Lehrkräftefortbildung werden drei Durchgänge im Schülerlabor teutolab-physik durchgeführt. Der erste Fortbildungsdurchgang findet aktuell statt. Der sich anschließende zweite und dritte Durchgang ist für den Herbst 2024 (2. Durchgang) und für das Frühjahr 2025 (3. Durchgang) geplant.

Die ersten (Teil-)Ergebnisse, die sich aus der Evaluation des ersten Durchgangs ergeben, sind Ende 2024 zu erwarten.

6. Literatur

- Beierlein, C., Kovaleva, A., Kemper, C. J. & Rammstedt, B. (2012). ASKU. Allgemeine Selbstwirksamkeit Kurzsкала [Verfahrensdokumentationen, Fragebogen Deutsch und Englisch]. In Leibniz-Institut für Psychologie (ZPID) (Hrsg.), *Open Test Archive*. ZPID. <https://doi.org/10.23668/psycharchives.4527>
- Chi, M. T. H. & Wylie, R. (2014). The ICAP framework: Linking cognitive engagement to active learning outcomes. *Educational Psychologist*, 49(4), 219–243. <https://doi.org/10.1080/00461520.2014.965823>
- Doll, J. & Meyer, D. (2021). SWIT. Selbstwirksamkeit von Lehrerinnen und Lehrern im Hinblick auf die unterrichtliche Integration digitaler Technologie [Verfahrensdokumentation und Fragebogen]. In Leibniz-Institut für Psychologie (ZPID) (Hrsg.), *Open Test Archive*. ZPID. <https://doi.org/10.23668/psycharchives.4872>
- Döring, N. & Bortz, J. (2016). Datenerhebung. In N. Döring & J. Bortz (Hrsg.), *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften* (S. 321–577). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41089-5_10
- Euler, M., Schüttler, T. & Hausmann, D. (2015). Schülerlabore: Lernen durch Forschen und Entwickeln. In E. Kircher, R. Girwidz & P. Häußler (Hrsg.), *Physikdidaktik* (S. 759–782). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41745-0_26
- Glatz, L. C. & Erb, R. (im Druck). Experimente als interaktive Videos – Die Einführung des Teilchenmodells interaktiv gestalten. *Naturwissenschaften im Unterricht – Physik*.
- Kirchhoff, T., Schwedler, S., Abels, S., Acher, A., Anselmetti, D., Besa, K.-S., Biehl, J., Blumberg, E., Breiter, A., Brückmann, M., Büntemeyer, D., El Tegani, M., Engelhardt, A., Grotjohann, N., Kempe, L., Kiel, C., Kleine, M., Koerber, R., Lambrecht, M., Lehmenkühler, A., ... Wilde, M. (in review). LFB-Labsdigital: Schülerlabore als Ort der Lehrkräftefortbildung in der digitalen Welt. Ein Bericht zur Konzeption eines Verbundprojektes. *PraxisForschungLehrer*innenBildung – Zeitschrift für Schul- und Professionsentwicklung*.
- Kirstein, J. & Nordmeier, V. (2023). Interaktive Bildschirmexperimente im Unterricht einsetzen. In T. Wilhelm (Hrsg.), *Digital Physik unterrichten. Grundlagen, Impulse und Perspektiven* (S. 71–96). Klett Kallmeyer.
- Lumi Education UG. (2024). *Lumi* (1.26) [App]. <https://lumi.education/de/>
- Mayer, R. E. (2014). *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (2. Aufl.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369>
- Mayring, P. (1994). Qualitative Inhaltsanalyse. In A. Boehm, A. Mengel, & T. Muhr (Hrsg.), *Texte verstehen: Konzepte, Methoden, Werkzeuge* (Bd. 14, S. 159–175). UVK Univ.-Verl..
- Meier, M., Kastaun, M. & Stinken-Rösner, L. (2022). Experimentiervideos im naturwissenschaftlichen Unterricht – Lehren und Lernen mit und durch VidEX. In E. M. Watts & C. Hoffmann (Hrsg.), *Digitale NAWigation von Inklusion. Digitale Werkzeuge für einen inklusiven Naturwissenschaftsunterricht* (S. 51–65). Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-37198-2_5
- Neyer, F. J., Felber, J. & Gebhardt, C. (2012). Entwicklung und Validierung einer Kurzsкала zur Erfassung von Technikbereitschaft. *Diagnostica*, 58(2), 87–99. <https://doi.org/10.1026/0012-1924/a000067>
- Plageras, A., Xenakis, A., Kalovrektis, K. & Vavougiou, D. (2023). An Application Study of the UTAUT Methodology for the Flipped Classroom Model Adoption by Applied Sciences and Technology Teachers. *International Journal of Emerging Technologies in Learning*, 18(02), 190–202. <https://doi.org/10.3991/ijet.v18i02.35585>
- Puentedura, R. (2006). *Transformation, Technology, and Education* [Blog post]. <http://hippasus.com/resources/tte/>

- Scharfenberg, F.-J., Möller, A., Kaufmann, K. & Bogner, F. (2019). Schülerlabore und Lehr-Lern-Labore. In J. Groß, M. Hammann, P. Schmiemann & J. Zabel (2019), *Biologiedidaktische Forschung: Erträge für die Praxis* (S. 229–249). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-58443-9_13
- Schmidkunz, H. (1983). Die Gestaltung chemischer Demonstrationsexperimente nach wahrnehmungspsychologischen Erkenntnissen. *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik, Chemie*, 31(10), 360–367.
- Schmiedebach, M. & Wegner, C. (2021). Design-Based Research als Ansatz zur Lösung praxisrelevanter Probleme in der fachdidaktischen Forschung. *Bildungsforschung*, 2, 1–10.
<https://doi.org/10.25656/01:23920>
- Schwarzer, R. & Jerusalem, M. (2002). Das Konzept der Selbstwirksamkeit. *Selbstwirksamkeit und Motivationsprozesse in Bildungsinstitutionen*, 44, 28–53. <https://doi.org/10.25656/01:3930>
- Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (KMK) (2021). *Lehren und Lernen in der digitalen Welt. Ergänzung zur Strategie der Kultusministerkonferenz „Bildung in der digitalen Welt“*.
https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2021/2021_12_09-Lehren-und-Lernen-Digi.pdf
- Stinken-Rösner, L. & Meier, M. (2023). Experimentiervideos – Mehr als ein Ersatz für Realexperimente. *Plus Lucis*, 3, 17–21.
- Stinken-Rösner, L., Weidenhiller, P., Nerdel, C., Weck, H., Kastaun, M. & Meier, M. (2023). Inklusives Experimentieren im naturwissenschaftlichen Unterricht digital unterstützen. In D. Ferencik-Lehmkuhl, I. Huynh, C. Laubmeister, L. Curie, C. Melzer, I. Schwank, H. Weck, & K. Ziemer (Hrsg.), *Inklusion Digital! Chancen und Herausforderungen inklusiver Bildung im Kontext von Digitalisierung* (S. 152–167). Julius Klinkhardt. <https://doi.org/10.35468/5990>
- Stinken-Rösner, L. (2021). Digitale Medien in der naturwissenschaftlichen Lehrkräftebildung: Integriert statt zusätzlich. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG Frühjahrstagung 2021*, 179–185.
- Stinken-Rösner, L., Hofer, E., Rodenhauser, A. & Abels, S. (2023). Technology Implementation in Pre-Service Science Teacher Education Based on the Transformative View of TPACK: Effects on Pre-Service Teachers' TPACK, Behavioral Orientations and Actions in Practice. *Education Sciences*, 13(7), 732.
<http://dx.doi.org/10.3390/educsci13070732>
- Weiler, D., Burde, J.-P., Große-Heilmann, R., Riese, J., & Schubatzky, T. (2023). Einsatzmöglichkeiten von digitalen Medien im Physikunterricht - Eine Übersicht. *Plus Lucis*, 3, 4–8.
- Watzka, B., Richtberg, S., Schweinberger, M. & Girwidz, R. (2019). Interaktives Üben mit H5P-Aufgaben. *Naturwissenschaften im Unterricht – Physik*, 203, 22–27.
- Ziegler, M. & Stinken-Rösner, L. (im Druck). Mit Hypervideos digital experimentieren. *Naturwissenschaften im Unterricht – Physik*.

Mangelnde Implementation physikdidaktischer Innovationen – Ursachen aus Sicht der Lehrkräfte

Jakub Knebloch*, Christian Hengel*, Julie Kyas*, Andreas Hansch*, Thomas Wilhelm*

Institut für Didaktik der Physik, Goethe Universität Frankfurt
knebloch@physik.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

Seit fünfzig Jahren werden in der Physikdidaktik fortlaufend neue Ideen, neue Unterrichtskonzepte und neue Unterrichtsmaterialien entwickelt. In retrospektiver Betrachtung lässt sich feststellen, dass ein Großteil der Innovationen nicht, kaum oder erst sehr spät im Klassenzimmer ankamen. Entweder blieben die Vorschläge den Lehrkräften unbekannt oder sie wurden nicht im Unterricht umgesetzt, obwohl sie bekannt waren.

Um die Ursachen zu ergründen, wurden halboffene Interviews mit Physiklehrkräften durchgeführt, in denen sie mittels vorbereiteter Leitfragen ihre Überlegungen zu den Ursachen der beschriebenen Problematik und zu Verbesserungsmöglichkeiten äußern sollten. Die Ergebnisse der Interviews werden als Ausgangspunkt für die Erstellung eines Fragebogens genutzt, der mit Experten besprochen und im nächsten Schritt pilotiert wird. In dem vorliegenden Beitrag werden die Ergebnisse der Leitfadeninterviews dargelegt.

1. Motivation

Empirische Studien und Erfahrungsberichte aus der Praxis zeigen, dass es nach wie vor eine beträchtliche Lücke zwischen Forschung, Politik und praktischer Anwendung gibt. Aus diesem Grund gewinnt die Implementationsforschung zunehmend an Bedeutung, was sich in der steigenden Zahl empirischer Studien und der intensiven konzeptionellen und methodologischen Diskussion widerspiegelt (Schrader, Hasselhorn, Hetfleisch, Goeze, 2020). Die Forschung zeigt, dass immer mehr Studien mit wissenschaftlich fundierten Interventionen zur Verringerung der bestehenden Kluft beitragen konnten. Gleichzeitig mangelt es jedoch noch an theoretisch fundierten Erkenntnissen zu den institutionellen, organisatorischen und personellen Voraussetzungen für die erfolgreiche Implementation fachdidaktischer Konzepte (ebd.).

Damit evidenzbasierte Bildungsreformen nicht bloße Fiktionen bleiben (Spiel 2009), wird seit einigen Jahren verstärkt der Einsatz von Interventions- und Implementationsstudien gefordert (Heid 2011, S. 504). Diese Studien sollen in einem umfassenderen Verständnis pädagogische Interventionen in der Praxis erproben und die Bedingungen, Prozesse sowie die Auswirkungen ihrer Implementierung untersuchen.

Die Implementationsforschung zielt darauf ab, die Prozesse bei der Umsetzung von Konzepten oder Programmen zu beschreiben und zu analysieren. Dabei sind die Wahrnehmungen, Handlungsweisen und die Entscheidungslogik der beteiligten Akteure von besonderer Bedeutung. Deshalb setzt die Implementationsforschung häufig qualitative Methoden ein, die überwiegend aus der Sozialforschung stammen. Besonders bei der Einführung neuer Programme oder

Verfahren ist die Implementationsforschung wichtig, um bereits zu Beginn eines Modellvorhabens Ungenauigkeiten, Konzeptschwächen, Fehlplanungen oder falsche Erwartungen zu erkennen und diese im Verlauf des Projekts korrigieren zu können (Petermann 2009, S. 122-128). Die Implementationsstrategien werden nach den folgenden Leitfragen analysiert: Was sind Kriterien für den Erfolg einer Implementation? Welche Erkenntnisse über fördernde und hemmende Einflussfaktoren auf die Implementation können aus den Strategien abgeleitet werden? Welche Folgerungen ergeben sich aus den Strategien für die weitere Forschung? (ebd.).

2. Halboffene explorative Interviews

Um erste Erkenntnisse zum Thema „Mangelnde Implementation physikdidaktischer Ideen in der Unterrichtspraxis“ zu gewinnen, wurden explorativ halboffene Leitfadeninterviews mit fünfzehn Lehrkräften durchgeführt. Die explorativen Leitfadeninterviews dienen der Informationsgewinnung, um ein tieferes Verständnis zu entwickeln, indem die Meinungen, Einstellungen und Perspektiven der Befragten gesammelt werden. Sie helfen der Hypothesengewinnung, die als Ausgangspunkt für weitere Forschung und für die Identifikation relevanter Themen dient. Dies kann dazu beitragen, bestehende Annahmen zu hinterfragen und neue Ideen zu generieren. Sie dienen außerdem der Erkundung neuer Perspektiven, die noch wenig erforscht wurden. Insbesondere bevor quantitative Studien durchgeführt werden, sind qualitative Studien gewinnbringend und fruchtbar, um relevante Variablen und Messinstrumente zu identifizieren, die in späteren quantitativen Studien berücksichtigt werden müssen.

Es ist zu betonen, dass der Verlauf der Interviews nicht standardisiert, sondern als ein sich frei entwickelndes Gespräch ohne das notwendige Festhalten an den Leitfragen geplant war. Während des Interviews erfolgte nach einer kurzen Vorstellung und dem Hinweis auf Anonymität zuerst eine allgemeine Einführung in die beschriebene Problematik. Der Gesprächsleitfaden umfasste die folgenden Fragen:

- a) Warum lassen sich physikdidaktische Ideen / Entwicklungen in der Unterrichtspraxis bisher oft nicht umsetzen? Was fehlt?
- b) Welche Bedingungen sind nötig, damit neue Ideen umgesetzt werden?
- c) Kennen Sie Unterrichtskonzeptionen der Physikdidaktik? Welche? Warum haben Sie diese eingesetzt bzw. nicht eingesetzt?
- d) Fallen Ihnen spontan physikdidaktische Unterrichtsmaterialien aus der Physikdidaktik ein? Welche? Warum sind diese hilfreich bzw. nicht hilfreich?
- e) Haben Sie sonst schon Unterrichtsmaterialien von anderen eingesetzt? Welche?
- f) Was muss gegeben sein, damit Sie neue Ideen ausprobieren? Was muss erfüllt sein, damit Sie Unterrichtsmaterialien von anderen verwenden?

Die Interviews wurden transkribiert und anschließend im Programm MAXQDA24 kodiert. Die Auswertung und Kodierung der Interviews folgte den Prinzipien der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2015).

3. Ergebnisse der Interviews

Nach der Durchführung der fünfzehn Interviews wurden die Gespräche in vier Oberthemen gegliedert: A. Physikdidaktische Ideen, B. Unterrichtskonzepte, C. Unterrichtsmaterialien, D. Wünsche. Im Rahmen dieses Beitrags ist das Oberthema A „Physikdidaktische Ideen“ interessant, wobei unter dem Begriff „Physikdidaktische Ideen“ in diesem Beitrag alle physikdidaktischen Konzepte, Ideen, Innovationen und Materialien verstanden werden. Hier geht es um die Sicht der Lehrkräfte auf die Ursachen von mangelnder Implementation physikdidaktischer Ideen bzw. auf die Schwierigkeiten, auf die Lehrkräfte bei der Übernahme neuer Ideen stoßen.

Es haben sich neun Oberkategorien herauskristallisiert, von denen manche wiederum in Subkategorien unterteilt werden können. Die Oberkategorien sind:

- Kat. 1: Mangel an Information und Austausch
- Kat. 2: Mangel an Vorbereitungszeit und Vorbereitungsaufwand
- Kat. 3: Mangel an Unterrichtszeit und Unterrichtsaufwand
- Kat. 4: Mangel an Ausstattungs- und Experimentiermaterial
- Kat. 5: Schülerfaktoren
- Kat. 6: Lehrkräftefaktoren
- Kat. 7: Konzepte

• Kat. 8: Institutionelle Faktoren

Die Kategorie 1 „Mangel an Information und Austausch“ betrifft Informationsbeschaffung und Fortbildungen. Zur Informationsbeschaffung sagen die Lehrkräfte, dass sie über neue Ideen nicht informiert werden und dass Informationen zu beschaffen mühevoll, komplex und zeitaufwendig ist. Über Fortbildungen werden die Lehrkräfte ebenfalls wenig informiert und manche Fortbildungen werden für die schulischen Bedingungen als nicht angemessen wahrgenommen. Die meisten Lehrkräfte sagen, ihnen fehle die Zeit für Fortbildungen.

Die Kategorie 2 „Mangel an Vorbereitungszeit und Vorbereitungsaufwand“ beinhaltet Punkte wie den hohen Zeitaufwand für die Unterrichtsplanung, die zeitintensive Einarbeitung in eine neue Idee sowie die Wahrnehmung, dass didaktische Ideen nicht für jede Schülergruppe gleichermaßen geeignet sind.

Die Kategorie 3 „Mangel an Unterrichtszeit und Unterrichtsaufwand“ umfasst Äußerungen der Befragten, in denen diese angeben, die Implementation neuer Ideen sei mit einem zu hohen Zeit- und Arbeitsaufwand während des Unterrichts verbunden – insbesondere vor dem Hintergrund der Stofffülle im Lehrplan und nicht ausreichender Unterrichtszeit.

Die Kategorie 4 „Mangel an Ausstattungs- und Experimentiermaterial“ fasst solche Aussagen zusammen, die einen wahrgenommenen Mangel an Ausstattung und an Unterrichtsmaterialien betreffen. Abgesehen von der fehlenden oder defekten Ausstattung bemängeln die Lehrkräfte, dass es entweder zu wenige oder keine Arbeitsblätter zu den bestehenden Ideen gebe. Es fehle zusätzlich an Ideen und guten Anleitungen für Experimente. Hinzu kommt, dass die Schulbücher stark kritisiert werden, weil unterschiedliche Bücher bei Erklärungen unterschiedliche Zugänge und Argumentationsstränge verfolgen. Struktur und Systematik der Schulbücher sei mangelhaft und sie beinhalteten zu wenige Aufgaben.

In der Kategorie 5 „Schüler*innenfaktoren“ sind Aussagen über die Medienkenntnisse, Kompetenzen, das Interesse und das Verhalten von Schüler*innen zusammengefasst. Manche Lehrkräfte stellen fest, dass Schüler*innen – im Widerspruch zu der oft in der Gesellschaft geteilten Meinung, Jugendliche seien technikaffin – große Schwierigkeiten in Bezug auf einen richtigen Umgang mit digitalen Medien aufweisen. Vor allem wenn es darum geht, etwas komplexere Programme für Lernzwecke zu benutzen, seien viele Schüler*innen mit der Technik überfordert. Weiterhin sehen manche Lehrkräfte die digitalen Medien als einen Nachteil, weil durch ihren Einsatz „Basisfähigkeiten“ wie Lesen, Experimentieren, „händisches Arbeiten“ etc. weniger gefördert würden, sodass sie keinen besonderen Nutzen in der Verwendung digitaler Medien sehen. Weiterhin sagen manche Lehrkräfte, dass die Kompetenzen und Voraussetzungen der Schüler*innen im Vergleich zu den vorherigen Generationen abgenommen haben. Die

Förderung von Basisfähigkeiten nehme heutzutage so viel Raum ein, dass im Physikunterricht bisweilen die Zeit für eine tiefergehende Auseinandersetzung mit Physik fehle. Viele fachdidaktische Ideen stellten nach der Meinung von Lehrkräften zu hohe Anforderungen an die Schüler*innen. Weiterhin wurde angegeben, dass die Schulphysik in der Wahrnehmung der Schüler*innen im Lebensalltag keine Anwendungen finde und somit aus ihrer Sicht keinen Nutzen für den Alltag habe, weshalb das Interesse an den Inhalten fehle. So nennt eine Lehrkraft als Beispiel: „Wir machen Schatten im Weltraum und dann gehen die nach Hause und da kann keiner erklären, wie die Mondphasen zustande kommen.“

Die Kategorie 6 „Lehrer*innenfaktoren“ fasst Äußerungen zu Lehrer*innen und deren Einstellungen zusammen. Viele Lehrkräfte sagen, dass sie einfach das nutzen, was sie in Studium und Referendariat kennengelernt haben und nicht nach neuen Ideen suchen. Eine Lehrkraft meint, der Grund dafür sei die „geringe Hürde“ des Bekannten, um derentwillen sich Ideen aus dem Studium relativ leicht umsetzen ließen. Weiterhin gebe es im Kollegium zwischen den Lehrkräften Meinungsunterschiede, ob und welche neuen Experimentiermaterialien angeschafft werden sollen.

Eine Lehrkraft sagt, es sei schwierig, aus den jahrelang bestehenden Konzepten, die sie so gut kenne und die gut funktionierten, auszubrechen und neue Ideen umzusetzen: „Ich habe ja ´was Bestehendes, was gut funktioniert, ich brauche auch gar nichts Neues“. Eine andere Lehrkraft meint, dass es von dem „Lehrertyp“ abhängt, welche Ideen von welchen Lehrkräften benutzt werden: „Und das andere ist auch einfach eine Frage, welcher Typ bin ich als Mensch? Wie will ich es vermitteln?“

Weiterhin haben Lehrkräfte unterschiedliche Einstellungen zur Physik oder zu physikdidaktischen Ideen. Eine Lehrkraft sagt, sie betrachte Physik als ihr Zweitfach. Sie lese zur Physik nichts Neues, weil ihre Leidenschaft für das erste Fach brenne. Eine andere Lehrkraft hinterfragt, ob die Digitalität im Physikunterricht gewinnbringend sei. Eine weitere Lehrkraft sagt, es gebe bereits gute Simulationen zu vielen Experimenten, sodass man die Experimente nicht unbedingt physisch nochmals durchführen müsse: „Dann muss man das natürlich so sehen, es gibt auch ausreichend oder es gibt an der einen oder anderen Stelle Simulationen, die das gleiche Experiment oder das Phänomen darstellen“. Schließlich hinterfragt wiederum eine weitere Lehrkraft die Notwendigkeit der Physikdidaktik im Allgemeinen: „Frage ist natürlich, warum man solche Modelle oder neue Methoden glaubt entwickeln zu müssen. Das Schulsystem wird schon, seit wir das kennen, reformiert und verbessert – in allen möglichen Bereichen, was das System an sich angeht oder eben auch die Didaktik. Und dann frage ich mich immer, wie kamen wir überhaupt soweit ohne das ganze Gedöns? Wie konnten so Leute wie Einstein, Heisenberg, Bohr in dieser schlechten Umgebung mit so wenig Didaktik in den 10er, 20er

Jahren des letzten Jahrhunderts solche Gedanken entwickeln? Verheben wir uns vielleicht einfach, indem wir versuchen, alle irgendwie auf ein gewisses Level zu heben und dann mit Gewalt etwas zu suchen, was die eben auch noch zu hoch bringt. Vielleicht geht es einfach nicht. Mag ja auch sein.“

Zur Kategorie 7 „Konzepte“ gehören neben Aussagen zu den Konzepten selbst auch Aussagen zu ihrer Relevanz und den Voraussetzungen, die ihre Nutzung an die Lernenden stellt. Drei Lehrkräfte sagen, dass viele Konzepte zu ambitioniert seien, indem sie umfangreiche Kenntnisse voraussetzten, aufwendig seien und hohe Anforderungen stellten. Da die moderne Physik so komplex sei, sei es schwierig, diese auf das Schüler*innenniveau herunterzubrechen. Viele Lehrkräfte sagen, viele fachdidaktische Ideen seien umfangreicher, als es der Lehrplan erlaube. Im Allgemeinen bemängeln viele, dass sie zu den physikdidaktischen Ideen keine Unterrichtsmaterialien finden. Weiterhin wird gesagt, dass im Rahmen des Abiturs die physikdidaktischen Ideen abiturrelevant sein müssten, weil man sie sonst aufgrund des Mangels an Unterrichtszeit wenn überhaupt allenfalls theoretisch, d.h. ohne Experimente, und nur kurz behandeln könne.

Die Kategorie 8 „Institutionelle Faktoren“ umfasst Aussagen zu curricularen Vorgaben, institutionellen Stolpersteinen und schulinternen Bedingungen. Eine Lehrkraft meint, dass ihr manche curricularen Vorgaben nicht helfen: „Oder man hat im Curriculum einmal Experimente, mit denen man selbst nichts anfangen kann“. Weiterhin sind sich die Lehrkräfte einig, dass das Physikcurriculum mit seinen Vorgaben überladen ist. So sagt eine Lehrkraft: „Da bleibt einem nichts anderes übrig, als manche Bereiche auch einfach nur theoretisch zu behandeln. Wenn man alles, was wünschenswert wäre, auch empirisch motivieren würde, kriegt man das vorne und hinten nicht hin mit dem Stoff“. Zu den institutionellen Stolpersteinen gehören Punkte wie Erschwernisse durch Bürokratie, Personalaufwand und hohe Stundenbelastung. So gibt eine Lehrkraft zu Bedenken, um fachdidaktische Ideen zu implementieren, könne es sogar erforderlich sein, „womöglich noch selbst etwas zu kaufen, zu besorgen, weil es über den bürokratischen Weg der Schule dann zu lange dauert.“ Eine andere Lehrkraft führt aus: „Inzwischen geht es nicht einmal mehr, dass ich in den Supermarkt gehe und sage ‚Ich kaufe schnell zehn Kerzen‘. Nein, denn ich brauche ein System, wo ich eine Rechnung bekomme. Das sind die Dinge, die schwierig sind.“ Manche Konzepte und Ideen brauchen in den Augen mancher Lehrkräfte wiederum einen Personalaufwand, der nicht realisierbar sei. Schließlich berichten alle Lehrkräfte, dass ihre Stundenbelastung zu hoch sei, sodass sie aufgrund der Arbeitsbelastung nicht mehr in der Lage seien, sich außerhalb der Schule noch mit der Physikdidaktik zu beschäftigen. Zu den schulinternen Bedingungen wurden Punkte wie „Platzmangel im Klassenzimmer“ oder „In der Schule allgemein nicht umsetzbar“ genannt. So sagt eine Lehrkraft z.B.: „Und

dann haben wir natürlich 20+ Schüler und dann eben 4-5-6 Experimentierkästen. Wir haben nicht immer den Platz, um das alles richtig aufzubauen.“

4. Ausblick

Aus den in Kapitel 3 aufgeführten Kategorien können Items für einen Fragebogen generiert werden, der an viele Lehrkräfte verteilt wird und der die Meinungen der Lehrkräfte zu den einzelnen Kategorien erfasst, sowie zu den Ursachen, weshalb neue physikdidaktische Ideen, Konzepte, Innovationen nicht in den Unterricht implementiert werden. Verschiedene Skalen im Fragebogen können genutzt werden, um die Häufigkeiten bestimmter Ursachengruppen zu beschreiben. Des Weiteren können die Lehrkräfte damit in verschiedene Typen eingeteilt werden. Denkbar wäre z.B. ein Lehrer*innentyp, der der Implementation neuer physikdidaktischer Ideen durchaus abgeschlossen gegenübersteht, auch über die erforderliche Zeit verfügt, dem aber die erforderlichen Informationen über oder der Zugang zu diesen Ideen und entsprechenden Materialien fehlt, sodass trotzdem keine neuen Ideen im Unterricht umgesetzt werden. Ein anderer Typ Lehrkraft könnte wiederum durchaus einen Zugang zu vielen physikdidaktischen Ideen haben, aber aufgrund der Arbeitsbelastung und des Mangels an Vorbereitungszeit auf die Umsetzung verzichten. Wieder andere Lehrkrafttypen könnten der Meinung sein, dass viele fachdidaktische Ideen zu viel

Unterrichtszeit rauben oder für ihre Schüler*innen aus bestimmten Gründen nicht geeignet sind und sie deshalb die Ideen nicht übernehmen. Das Ziel der statistischen Suche nach den häufigsten Erklärungsprofilen besteht letztlich in der Ermittlung der wahrgenommenen Hauptursachen, die dafür verantwortlich sind, dass Lehrkräfte physikdidaktische Ideen nicht in den Unterricht implementieren.

5. Literatur

- Heid, H. (2011). Über Bedingungen der Anwendung erziehungswissenschaftlichen Wissens. In O. Zlatkin Troitschanskaia (Hrsg.), *Stationen der Empirischen Bildungsforschung* (S. 490–508).
- Petermann, F. (2014). *Implementationsforschung: Grundbegriffe und Konzepte*. *Psychologische Rundschau*, 65 (3), 122–128. Göttingen: Hogrefe Verlag.
- Schrader, J., Hasselhorn, M., Hetfleisch, P. & Goeze, A. (2020). Stichwortbeitrag Implementationsforschung: Wie Wissenschaft zu Verbesserungen im Bildungssystem beitragen kann. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 23:9-59. Berlin: Springer.
- Spiel, C. (2009). *Evidenzbasierte Bildungspolitik und Bildungspraxis– eine Fiktion? Problemaufriss, Thesen, Anregungen*. *Psychologische Rundschau*, 60(4), 255–256. Göttingen: Hogrefe Verlag.

NOS im Fokus: Forschung zu Vorstellungen von Physiklehrkräften

Linda Zwick, Rita Wodzinski

Universität Kassel, Didaktik der Physik, Heinrich-Plett-Str. 40, 34132 Kassel
linda.zwick@uni-kassel.de

Kurzfassung

Im Kasseler SFB ELCH (Sonderforschungsbereich Extremes Licht für die Analyse und Kontrolle von molekularer Chiralität) ist ein Transferprojekt eingebunden, dessen Ziel es ist, durch den Transfer von ELCH-Aktivitäten das Wissenschaftsverständnis in Schulen zu fördern. Für Lehrkräfte findet diese Förderung in Fortbildungen zu Nature of Science (NOS) statt, bei der die folgenden drei Aspekte in besonderer Weise adressiert werden: (i) Erkenntnisgewinnung in naturwissenschaftlicher Forschung, (ii) Zusammenspiel von Theorie und Experiment in der Physik sowie (iii) Zusammenarbeit und Kollaboration unter Physiker:innen.

Basierend auf Einblicken in einzelne ELCH-Forschungsprojekte und fachdidaktischen Grundlagen zu NOS entwickeln die Lehrkräfte gemeinsam mit Physiker:innen des SFB innerhalb der Fortbildung Unterrichtsmaterialien zu den NOS-Aspekten (i) – (iii) für die Sekundarstufe II. Dabei wird aus Forschungsperspektive den Fragen nachgegangen, inwieweit sich Vorstellungsänderungen bei den Lehrkräften bezüglich der ausgewählten NOS-Aspekte im Verlauf und nach der Fortbildung nachweisen lassen sowie in welcher Art und Weise Elemente der Fortbildung darauf Einfluss nehmen.

1. Motivation

Welche Vorstellungen Lernende und angehende Lehrkräfte (Lehramtsstudierende) zu NOS sowie zu naturwissenschaftlichen Denk- und Arbeitsweisen haben, wird seit einigen Jahren erfolgreich befochten (Lederman & Lederman, 2014). Eher wenige Erkenntnisse gibt es dazu, welche Vorstellungen Lehrende in naturwissenschaftlichen Fächern zu NOS haben (Cofré, Núñez, Santibáñez, Pavez, Valencia & Vergara, 2019). Dabei besteht in den naturwissenschaftlichen Didaktiken der Konsens, dass Lehrende und Lehramtsstudierende (wie auch Lernende) „vielfach über naive und inkonsistente Ansichten über NOS“ (Müller, 2021, S. 16) verfügen. Die Vorstellungen der Lehrkräfte schlagen sich (un-)gewollt im Unterricht nieder (Höttecke, 2001), wodurch die Schüler:innen in der Schule ein verzerrtes Bild der Naturwissenschaften kennenlernen. In Konsequenz sind über die letzten Jahre NOS-Aspekte in den Neufassungen der Bildungsstandards naturwissenschaftlicher Fächer aufgenommen worden (Müller, 2021). Auch in der Lehrkräftebildung an Hochschulen findet das Thema nach und nach Einzug (Kircher & Dittmer, 2004; Müller, Gimbel, Ziepprecht & Wodzinski, 2020). Fort- oder Weiterbildungsangebote zu NOS für ausgebildete Lehrkräfte gibt es in Deutschland nur vereinzelt. An diesem Punkt setzt die hier beschriebene Studie mit Fokus auf dem Fach Physik an. Das Ziel besteht darin, Informationen über die Entwicklung von Vorstellungen bei Physiklehrkräften zu ausgewählten Merkmalen von Nature of Science (NOS) zu gewinnen.

Nach der Entwicklung einer eintägigen Lehrkräfte-

Fortbildung zu NOS geht es zentral darum herauszufinden, wie wirksam die Fortbildung ist. Dazu werden die Vorstellungen der teilnehmenden Physik-Lehrkräfte zu ausgewählten Aspekten von NOS ((i) Erkenntnisgewinnung in naturwissenschaftlicher Forschung, (ii) Zusammenspiel von Theorie und Experiment in der Physik sowie (iii) Zusammenarbeit und Kollaboration unter Physiker:innen) zu unterschiedlichen Zeitpunkten erhoben: vor, während und nach der Fortbildung. Alle gesammelten Daten werden personenspezifisch in der Auswertung trianguliert, um möglichst genau die Vorstellungsentwicklungen und die Einflüsse einzelner Fortbildungselemente darauf (= Wirksamkeit der einzelnen Fortbildungselemente) rekonstruieren zu können.

Im folgenden Beitrag wird basierend auf dem theoretischen Hintergrund zum Wissenschaftsverständnis, NOS und Lehrkräftefortbildungen das entwickelte Fortbildungskonzept vorgestellt. In Bezug auf das Forschungsziel und die Forschungsfragen wird das geplante Forschungsdesign erläutert.

2. Theoretischer Hintergrund

Unter Wissenschaftsverständnis wird nach Grygier (2005) das Metawissen über Wissenschaft verstanden. In Bezug auf die Naturwissenschaften ist die Rede von Nature of Science (NOS). Nach McComas & Clough (2020) ist „*Nature of Science [...] a description of how the scientific enterprise works. [...] NOS addresses issues such as what science is, how science works [...], how science impacts and is impacted by society, and what scientists are like in their professional and personal lives*“ (ebd., S. 5). In der

Naturwissenschaftsdidaktik gibt es viele Arten und Weisen NOS zu beschreiben (z. B. aus der Perspektive wissenschaftlicher Bezugsdisziplinen wie der Psychologie, Geschichte, Soziologie, Ethik oder Epistemologie) oder NOS zu konzeptualisieren (z. B. als Minimalkonsens in Aspektlisten (Lederman, Abd-El-Khalick, Bell & Schwartz, 2002; McComas & Olson, 1998; Osborne, Collins, Ratcliffe, Millar & Duschl, 2003), als Nature of Whole Science (Allchin, 2011), als Family Resemblance Approach (Erduran & Dagher, 2014) oder Nature of Science-in-Society (Höttecke & Allchin, 2020)). Bei der Fortbildung im Projekt geht es darum, den Lehrkräften ausgewählte Aspekte von Naturwissenschaften anhand von aktueller, authentischer wissenschaftlicher Forschung im ELCH zu verdeutlichen. Auf diese Weise soll eine Basis gelegt werden, auf deren Grundlage sie ein funktionales Wissensnetz zu NOS entwickeln können. Dies entspricht dem Kerngedanken von Matthews (2015), der in Allchins Sinne dafür plädiert, bei NOS-Elementarisierungen den Begriff „Nature“ durch „Features“ zu ersetzen (Billion-Kramer, 2020), da bei den Elementarisierungen nicht mehr die „Nature“ of Science, sondern Features of Science (FOS) abgebildet werden. Die ausgewählten Features bzw. NOS-Aspekte für die eintägige Fortbildung sind (i) Erkenntnisgewinnung in naturwissenschaftlicher Forschung, (ii) Zusammenspiel von Theorie und Experiment in der Physik sowie (iii) Zusammenarbeit und Kollaboration unter Physiker:innen.

Über NOS-Konzeptualisierungen und Konsensdiskussionen hinweg steht seit einigen Jahren auch die Vorstellungsforschung zu NOS bzw. FOS im Zentrum didaktischer Forschungsprojekte. Besonders Lederman hat sich diesem Forschungsfeld gewidmet. Ward & Heigh (2016) zitieren ein Review von Lederman, welches belegt, dass das limitierte Verständnis von Lehrkräften zu NOS empirisch bereits sehr gut dokumentiert ist. Darauf aufbauend gilt es derzeit zu untersuchen, welche wirksamen Methoden existieren, um NOS-Verständnisse und NOS-Vorstellungen sinnstiftend zu erweitern bzw. zu entwickeln und zu evaluieren (Müller, 2021; Bruns, 2009; Schumacher, 2015; Marniok, 2018; Stamer, 2019).

Bei der Gestaltung der Fortbildung war der Leitfaden von Lipowsky & Rzejak (2021) Grundlage, der Ergebnisse internationaler empirischer Professionalisierungsforschung für lernwirksame Fortbildungen zusammenfasst. In dem Leitfaden differenzieren die Autoren inhaltliche und gestalterische Qualitätsmerkmale. Anhand eines Abgleichs dieser Qualitätsmerkmale mit den Rahmenbedingungen und dem Fortbildungsziel, ist das im nachfolgenden Kapitel beschriebene Fortbildungskonzept entstanden.

3. Fortbildungskonzept

Im Forschungsprojekt wurde eine eintägige, achtstündige Fortbildung für Physik-Lehrkräfte entwickelt, die in der Oberstufe unterrichten. Die Fortbildung besteht aus einer Kombination von Input-, Diskussions-

& Erprobungsphasen, die sich im Wesentlichen durch drei Bausteine beschreiben lassen: (A) Einblicke in moderne Forschung, (B) Fachdidaktische Grundlagen zu NOS und (C) Kreativarbeit zu NOS-Aspekten - Gemeinsames Gestalten und Diskutieren von Unterrichtsideen & -materialien. Ergänzend finden vor und nach jedem der Bausteine Reflexionsphasen in Form von Concept Mapping zum Thema „Physik als Naturwissenschaft“ statt (vgl. Abb. 1).

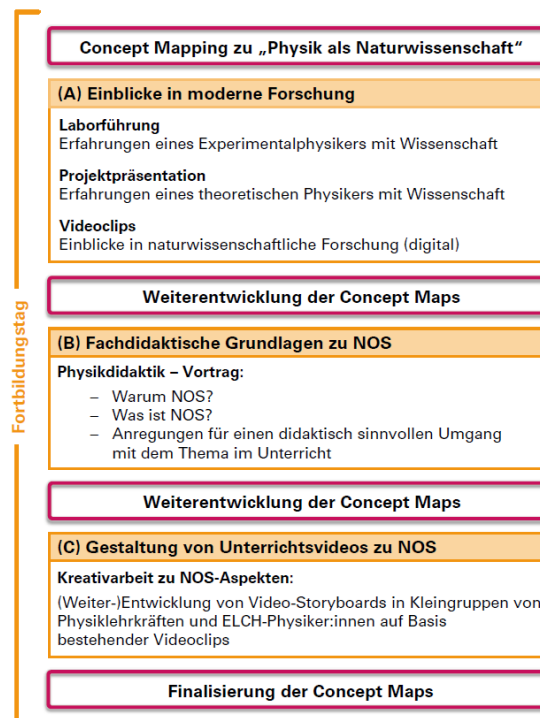


Abb. 1: Fortbildungskonzept

Im Baustein (A) erhalten die teilnehmenden Physik-Lehrkräfte Einblicke in moderne Forschung. Die Laborführung und die Projektpräsentation werden von ELCH-Physiker:innen gehalten, die ihre aktuellen Forschungsprojekte vorstellen und von einigen bisherigen Erfahrungen mit der Wissenschaft berichten. Das Hauptaugenmerk der Präsentationen liegt dabei auf den ausgewählten NOS-Aspekten (i) – (iii). Zur Erkenntnisgewinnung in naturwissenschaftlicher Forschung (NOS-Aspekt (i)) werden so zum Beispiel die erforderliche Kreativität und Vorstellungskraft betont, die in die theoretischen Modellüberlegungen und das umsetzbare Experiment-Setups investiert wurden. Ein weiterer wichtiger Aspekt stellt die Darlegung des gesamten zyklischen Projekt-Prozesses dar, der bei jeder forschenden Person individuell verläuft. Bezüglich der NOS-Aspekte (ii) Zusammenspiel von Theorie und Experiment in der Physik und (iii) Zusammenarbeit und Kollaboration unter Physiker:innen werden besonders die Projektschnittstellen und -verknüpfungen innerhalb des SFBs aufgezeigt. Nach der Laborführung und der Projektpräsentation schauen sich die Physik-Lehrkräfte Videoclips an, die teilweise schon fertig ausgearbeitet für den Unterricht sind und teilweise kurze, (un-)vertonte Einblicke in

verschiedene ELCH-Aktivitäten (wie Postersessions, Lectures, Öffentlichkeitsarbeit, Laborführungen) zeigen. Auf Reflexionsbögen zur Laborführung, Projektpräsentation und zu den Videoclips halten die Lehrkräfte Stichpunkte zu unterschiedlichen Aspekten schriftlich fest (wie z. B. Aspekte, die neu für die Lehrkräfte sind, die sie nicht verstanden haben oder die ihre Schüler:innen unbedingt lernen sollten).

Im Baustein (B) werden den Physiklehrkräften fachdidaktische Grundlagen zu NOS nähergebracht, welche die Relevanz von NOS, Konzeptualisierungen von NOS und Anregungen für einen didaktisch sinnvollen Umgang mit dem Thema im Unterricht umfassen.

Im Baustein (C) setzen sich die Lehrkräfte in Kleingruppen gemeinsam mit den Physiker:innen der Laborführung und der Projektpräsentation zusammen und erarbeiten auf Basis der gesichteten Videoclips aus Baustein (A) Storyboards zu Videos, die sie selbst im Oberstufen-Physikunterricht einsetzen würden.

Die Methode des Concept Mappings wird im Rahmen der Fortbildung für die Lehrkräfte zur kognitiven Aktivierung und zur Reflexion des Erlebten in den Bausteinen (A) bis (C) eingesetzt. Für die vorliegende Untersuchung dient diese Methode als Diagnoseinstrument (s. Kap. 5). Nach einer kurzen Instruktion zur Erstellung von Concept Maps bekommen die Lehrkräfte die Aufgabe, eine Concept Map zu dem Thema „Physik als Naturwissenschaft“ mit mindestens den folgenden Begriffen zu erstellen: Physik, Erkenntnisgewinnung, Theorie, Experiment, naturwissenschaftliche Denkweisen, naturwissenschaftliche Arbeitsweisen, Zusammenarbeit. Im Anschluss vergleichen die Fortbildungsteilnehmenden in Kleingruppen ihre erstellten Concept Maps. Anhand identifizierter Gemeinsamkeiten und Unterschiede beim Vergleichen erarbeiten sie eine gemeinsame Concept Map. Nach jedem Baustein der Fortbildung treffen sich die Lehrkräfte in ihrer Kleingruppe wieder und entwickeln ihre gemeinsam erstellte Concept Map anhand bausteinspezifischer Reflexionsfragen und ihrer schriftlichen Notizen weiter. Nach dem Baustein (C), der Gestaltung von Unterrichtsvideos zu NOS, finalisieren die Lehrkräfte ihre Concept Maps und präsentieren sie den anderen Fortbildungsteilnehmenden.

Zum Abschluss der Fortbildung wird eine Evaluation durchgeführt, die in Kapitel 5 näher erläutert wird.

4. Forschungsziel & Forschungsfragen

Das Hauptziel dieser Studie ist es, Vorstellungsentwicklungen von Physiklehrkräften zu ausgewählten Aspekten von Nature of Science (NOS) im Kontext der im vorherigen Kapitel dargestellten Lehrkräftefortbildung zu untersuchen:

- (i) Erkenntnisgewinnung in naturwissenschaftlicher Forschung
- (ii) Zusammenspiel von Theorie und Experiment in der Physik

- (iii) Zusammenarbeit und Kollaboration unter Physiker:innen

Dazu wird folgenden Forschungsfragen nachgegangen.

- (F1) Welche Vorstellungen haben Physiklehrkräfte zu den ausgewählten Aspekten (i) – (iii) von NOS?
- (F2) Welche Entwicklungen lassen sich nach der Lehrkräftefortbildung in Bezug auf die Vorstellungen von Physiklehrkräften zu den ausgewählten Aspekten von NOS feststellen?
- (F3) Welche Elemente der Lehrkräftefortbildung tragen zu den Vorstellungsentwicklungen der Physiklehrkräfte in welcher Weise bei?

5. Forschungsdesign

Abb. 2 stellt das Design der qualitativen Studie vor, bei dem folgende Daten in der in Kapitel 3 vorgestellten Fortbildung erhoben werden: (a) Einzel-Interviews mit den Fortbildungsteilnehmenden und mitdiskutierenden Naturwissenschaftler:innen (Pre, Post, Follow-Up), (b) Videos von allen Concept Mapping-Phasen, die in Kleingruppen von den Lehrkräften innerhalb der Fortbildung erarbeitet und nach jedem Fortbildungselement weiterentwickelt werden, (c) alle Concept Maps als Produkte der Concept Mapping-Phasen, (d) Videoaufnahmen der interaktiven Fortbildungs-Elemente wie der Kreativarbeit zu den Unterrichtsvideos oder dem Präsentieren und Diskutieren der finalisierten Concept Maps, (e) ein Paper-Pencil-Fragebogen, um zeiteffizient die demographischen Daten, bisherigen Teilnahmen an Fortbildungen und ersten Fortbildungseindrücke der Lehrkräfte zu ermitteln und (f) qualitative Beobachtungen der Fortbildungsorganisierenden. Zentral für die Beantwortung der Forschungsfragen F1 - F3 sind die Auswertungen der Interviews und der Concept Maps (vgl. Abb. 2).

Für die Beantwortung der Forschungsfrage F1 werden die Pre-Interviews mittels qualitativer Inhaltsanalyse nach Mayring & Fenzl (2022) im Hinblick auf die Vorstellungen der Lehrkräfte zu Beginn der Fortbildung ausgewertet. Analog wird auch mit den Post-Interviews verfahren. Der Vergleich der Vorstellungen liefert Anhaltspunkte für Vorstellungsentwicklungen (Forschungsfrage F2). Basierend auf diesen Ergebnissen werden alle weiteren erhobenen Daten fallspezifisch trianguliert. So sollte es möglich sein, fallspezifische chronologische Vorstellungsentwicklungen zu rekonstruieren, deren Ursachen mit den Fortbildungsbausteinen in Verbindung gebracht werden können. Der letzte dargestellte Aspekt entspricht dem Vorgehen zur Beantwortung von Forschungsfrage F3. Die Follow-Up-Interviews (Erhebungszeitpunkt einige Wochen nach der Fortbildung) dienen der Überprüfung, ob die Vorstellungsentwicklungen

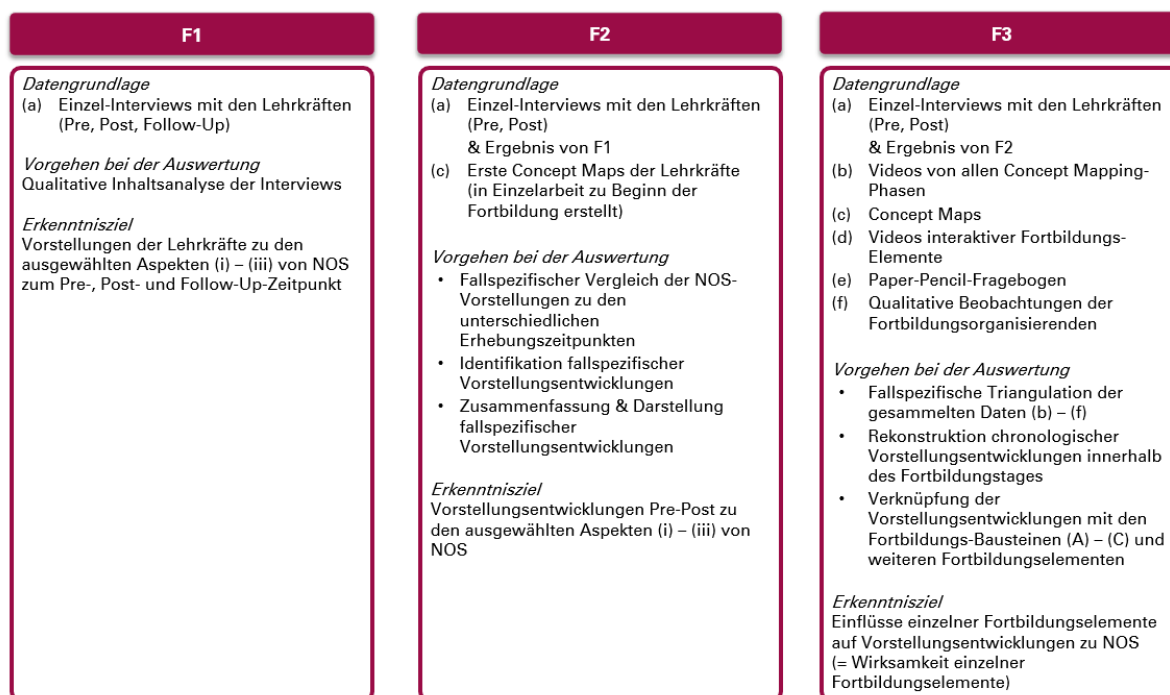


Abb. 2: Forschungsdesign – Darstellung der geplanten Herangehensweise zur Beantwortung der Forschungsfragen F1 – F3

ausschließlich situativ oder mittelfristig anhaltend sind.

Mit den gewonnen Erkenntnissen der vorgestellten Studie soll ein Beitrag zu wirksamen Methoden in der Entwicklungen von NOS-Vorstellungen bzw. NOS-Verständnissen und wirksamer Gestaltung von Lehrkräftefortbildungen zu NOS geleistet werden.

6. Literatur

- Allchin, D. (2011). Evaluating knowledge of the nature of (whole) science. In: *Science Education*, 95(3), 518–542.
- Billion-Kramer, T. (2021). *Nature of Science. Lernen über das Wesen der Naturwissenschaften*. Wiesbaden: Springer VS.
- Bruns, J. (2009). Auf dem Weg zur Förderung naturwissenschaftsspezifischer Vorstellungen von zukünftigen Chemie-Lehrenden. Chancen und Grenzen eines kombinierten theoretisch-expliziten und praktisch-reflektierten Ansatzes. Berlin: Logos.
- Cofré, H., Núñez, P., Santibáñez, D., Pavez, J. M., Valencia, M., & Vergara, C. (2019). A Critical Review of Students' and Teachers' Understandings of Nature of Science. In: *Science & Education*, 28, 205–248.
- Erduran, S. & Dagher, Z. R. (2014). Reconceptualizing the nature of science for science education: Scientific knowledge, practices and other family categories. Netherlands: Springer.
- Grygier, P. (2005). Vermittlung von Wissenschaftsverständnis im Sachunterricht der Grundschule. In: M. Götz & K. Müller (Hrsg.), *Grundschule zwischen den Ansprüchen der Individualisierung und Standardisierung*. Jahrbuch Grundschulforschung, 215–220, VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Höttecke, D. (2001). *Die Natur der Naturwissenschaften historisch verstehen: Fachdidaktische und wissenschaftshistorische Untersuchungen*. Berlin: Logos.
- Höttecke, D. & Allchin, D. (2020). Reconceptualizing nature-of-science education in the age of social media. In: *Science Education*, 104(4), 641–666.
- Kircher, E., & Dittmer, A. (2004). Lehren und lernen über die Natur der Naturwissenschaften – ein Überblick. In: C. Hößle, D. Höttecke & E. Kircher (Hrsg.), *Lernen über die Natur der Naturwissenschaften*, 2–22, Baltmannsweiler: Schneider Verlag Hohengehren.
- Lederman, N. G., Abd-El-Khalick, F., Bell, R. L., & Schwartz, R. S. (2002). Views of nature of science questionnaire: Toward valid and meaningful assessment of learners' conceptions of nature of science. In: *Journal of Research in Science Teaching*, 39(6), 497–521.
- Lederman, N. G. & Lederman, J. S. (2014). Research on Teaching and Learning of Nature of Science. In: N. G. Lederman (Hrsg.), *Handbook of Research on Science Education*, Vol. II, 600–620, Taylor and Francis.
- Lipowsky, F. & Rzejak, D. (2021). *Fortbildungen für Lehrpersonen wirksam gestalten: Ein praxisorientierter und forschungsgestützter Leitfaden*. Bertelsmann Stiftung.
- Marniok, K. (2018). *Zum Wesen von Theorien und Gesetzen in der Chemie: Begriffsanalyse und Förderung der Vorstellungen von Lehramtsstudierenden*. Berlin: Logos.

- Matthews, M. R. (2015). *Science Teaching: The Contribution of History and Philosophy of Science*. New York: Routledge.
- McComas, W. F. & Clough, M. P. (2020). Nature of Science in Science Instruction: Meaning, Advocacy, Rationales, and Recommendations. In: W. F. McComas (Hrsg.), *Nature of Science in Science Instruction. Science: Philosophy, History and Education*, 3-22, Cham: Springer.
- McComas, W. F., & Olson, J. K. (1998). The Nature of Science in International Science Education Standards Documents. In: W. F. McComas (Hrsg.), *Science & Technology Education Library: The Nature of Science in Science Education*, Vol. 5, 41-52, Dordrecht: Springer.
- Müller, M., Gimbel, K., Ziepprecht, K. & Wodzinski, R. (2020). Nature of Science im Unterricht und in Lehrerfortbildungen. *MNU-Journal*, 73(4), 276-281.
- Müller, S. (2021). *Die Vorläufigkeit und soziokulturelle Eingebundenheit naturwissenschaftlicher Erkenntnisse: Kritische Reflexion, empirische Befunde und fachdidaktische Konsequenzen für die Chemielehrer*innenbildung*. Berlin: Logos.
- Osborne, J., Collins, S., Ratcliffe, M., Millar, R. & Duschl, R. (2001). What 'ideas-about-science' should be taught in school science? A Delphi study of the expert community. *Annual Conference of the American Educational Research*.
- Schumacher, A. (2015). *Paving the Way towards Authentic Chemistry Teaching: A Contribution to Teachers' Professional Development*. Berlin: Logos.
- Stamer, I. (2019). *Authentische Vermittlung von Naturwissenschaften im Schülerlabor: Förderung der authentischen Wahrnehmung von Naturwissenschaften durch Einblicke in die Forschung des Sonderforschungsbereichs (SFB) 677 mittels Videos*.
- Ward, G. & Haigh, M. (2016). Challenges and Changes: Developing Teachers' and Initial Teacher Education Students' Understandings of the Nature of Science. In: *Research in Science Education*, 47(6), 1233-1254.

Planung von Experimenten für den Physikunterricht

Vielfalt geplanter Experimente in verschiedenen Ausbildungsphasen

Sven Levetzow*, Heidi Reinholz⁺

*Universität Rostock, Institut für Mathematik, Ulmenstraße 69, 18057 Rostock

⁺ Universität Rostock, Institut für Physik, Albert-Einstein-Straße 23, 18059 Rostock
Sven.Levetzow@uni-rostock.de

Kurzfassung

Die Planung von Unterricht und damit auch die Integration von Experimenten in den Physikunterricht ist eine wichtige Tätigkeit des alltäglichen Berufslebens einer Physik Lehrkraft. Bisherige Desiderate fokussieren zumeist die Planung von Experimenten auf Schüler:innenebene und inwieweit diese bei der Durchführung unterstützt werden können. Der Planungsprozess durch Lehrkräfte selbst wird weniger fokussiert. Jedoch sollte in Lehrkräfteausbildungen auch die Planung eines Experimentes als Unterrichtsmethode und naturwissenschaftliche Arbeitsweise thematisiert und erprobt werden. Die Gestaltung von entsprechenden Lerngelegenheiten ist derzeit nicht eindeutig geklärt. Es wird hier eine Bestandsanalyse zur Planung von Experimenten für den Physikunterricht vorgestellt, aus der Anregungen für die Gestaltung einer Lerngelegenheit in der Lehrkräfteaus- und -weiterbildung abgeleitet werden sollen. Dazu wurden die von Lehrkräften in verschiedenen Ausbildungsphasen geplanten Experimente hinsichtlich der zu fördernden Experimentierkompetenzen klassifiziert und miteinander verglichen. Es werden so erste Erkenntnisse formuliert und eine Diskussion zu Entwicklungsbedarfen von Lerngelegenheiten angeregt.

1. Forschungsfrage

Die Ausbildung von Lehramtsstudierenden hat die Entwicklung der professionellen Kompetenz als Lehrkraft zum Ziel. Dabei gilt die Planung von Unterricht als eine der zentralsten Aufgaben von Lehrkräften (Riese et al., 2022). Sie muss im Rahmen der Ausbildung eingeführt, erprobt und reflektiert werden. Für Lehramtsstudierende der Physik in der ersten und zweiten Ausbildungsphase ist die Planung und Durchführung von Experimenten dabei unerlässlich, da das Experiment eine grundlegende Erkenntnisquelle für den Unterricht darstellt (Kircher et al., 2020). Dieser Bedeutung des Experimentes und der Notwendigkeit, dieses in Planungsgesprächen umfangreich zu diskutieren, müssen sich ebenfalls Mentorinnen und Mentoren bewusst sein, da ihnen eine Schlüsselrolle bei der Professionalisierung angehenden Lehrkräfte zugesprochen wird (Gröschner & Häusler, 2014; Hascher, 2014). Jedoch zeigen Studien, „dass die alleinige Instruktion wichtiger Kriterien zu [Planungsprozessen des Experimentierens] nicht ausreichend ist, um [Studierende] beim Planungsprozess zu unterstützen“ (Seiler & Tepner, 2019). Entsprechende Desiderate mit Empfehlungen zur Gestaltung von Lerngelegenheiten für Mentoringgespräche zur Planung von Experimenten für den Physikunterricht fehlen.

Im speziellen Fokus dieses Projekts steht die Untersuchung der Betreuung und Beratung angehenden Lehrkräfte bei der Planung von Experimenten für den Physikunterricht. Für die Beschreibung der Betreu-

ungssituationen werden verschiedene Erhebungsmethoden genutzt, welche die Frage beantworten soll, wie aktuell intuitiv geführte Mentoringgespräche zur Planung von Experimenten mit angehenden Lehrpersonen ablaufen und welche Hinweise aktuelle Planungsmaterialien auf die notwendige Schwerpunktsetzung beim Mentoring geben. Die Diskussion erster Ergebnisse zur Vielfalt geplanter Experimente in verschiedenen Ausbildungsphasen eröffnet einen Ausblick auf mögliche Entwicklungsfelder im Mentoring.

2. Forschungsdesign

Für die Untersuchung der Planungsmaterialien wurden drei Gruppen ausgewählt, die sich in verschiedenen Ausbildungsphasen befinden:

Studierende des fünften Semesters führen in einem experimentellen Seminar vielfältige Experimente durch und diskutieren diese unter verschiedenen didaktischen Gesichtspunkten, wie Einsatz- und Variationsmöglichkeiten im Unterricht unter Berücksichtigung der geplanten Ziele. Im Anschluss an die Seminarsitzungen erstellen die Studierenden die Unterrichtsplanung für eines der durchgeführten Experimente. Dafür identifizieren und benennen die Studierenden die Rahmenbedingungen des Experimentes, wie Klassenstufe, Einordnung in den Rahmenplan, Funktion, Art der Durchführung. Weiterhin werden die Integration sowie die Durchführung des Experimentes im Unterrichtsverlauf beschrieben und benötigte Unterrichtsmaterialien erstellt (Abb. 1).

Studierende im neunten oder elften Semester, die

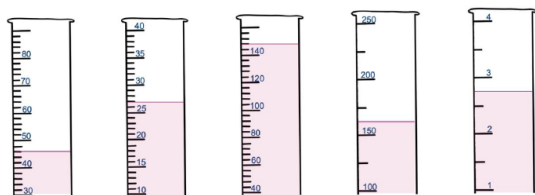
Experiment- Durchführungform, Beschreibung des Materials, Ablauf ...:

- Soll als Schülerexperiment stattfinden
- Die SuS bekommen ein AB um das Volumen zu bestimmen
- **Aufgabe 1**
 - o Die SuS sollen das Volumen einer Flüssigkeit in einem Messbecher bestimmen durch ablesen
- **Aufgabe 2**
 - o Volumen in Messbecher einzeichnen
- **Aufgabe 3**
 - o SE → bekommen eine Fragestellung
 - o Sollen Volumen eines unregelmäßig geformten Körpers bestimmen
 - o Erst schätzen und dann nachmessen
 - o Die Durchführung und die Auswertung sollen die SuS selbstständig durchführen
 - o Schätzung und gemessenen Wert miteinander vergleichen
- LP stellt für das SE eine Auswahl an verschiedenen Körpern zur Verfügung (große Schrauben, verschiedene Steine, Keramikdeckel, ...)
- SuS sollen anhand der Differenzmethode das Volumen des Körpers bestimmen
- SuS sollen eigenständig Materialien auswählen und eigenständig das Experiment durchführen und protokollieren
- LP gibt ggf. Hinweise und wertet die Lösungen im Klassenverband aus
- Schnelle SuS können auch weitere Messungen mit anderen Materialien durchführen
- LP weist bei der Auswertung darauf hin, dass es Messunsicherheiten geben kann → bei abweichenden Ergebnissen des gleichen gemessenen Körpers (Ablesegenauigkeit)

Volumen von Körpern

Aufgabe 1

Bestimme das Volumen der Flüssigkeit in jedem Messzylinder. Gib das Volumen in den Einheiten ml, cm³ und dm³ an.



V=	V=	V=	V=	V=
V=	V=	V=	V=	V=
V=	V=	V=	V=	V=

Abb. 1: Auszug aus den Planungsmaterialien eines Studierenden des fünften Semesters für ein Schüler:innenexperiment zur Messung von Volumen und Dichte in Klasse 7

kurz vor dem Abschluss ihrer universitären Lehramtsausbildung stehen, planen zu einem selbst gewählten Experiment eine Unterrichtsstunde und präsentieren ihre Planung im Rahmen eines Rollenspiels während des Seminars. Zusätzlich erstellen die Studierenden ein Portfolio zur Dokumentation ihres persönlichen und fachlichen Arbeits- und Planungsprozesses.

Als Vergleichsgruppe wurden erfahrene Lehrkräfte in die Datenerhebung einbezogen und gebeten, ihre geplanten Experimente zu reflektieren.

Im Zuge der Untersuchung reflektieren alle Befragten ihre geplanten Experimente hinsichtlich der durch das Experiment geförderten experimentellen Kompetenzen der Schüler:innen. Dazu nutzen die Befragten das Facettenmodell nach Nawrath et al. (2011), welches das Experimentieren in experimentelle Teilkompetenzen gliedert. Im Rahmen eines Experimentes kann jede Teilkompetenz in drei Niveaustufen gefördert werden. Dabei beschreibt die Stufe 0, dass die entsprechende Teilkompetenz nicht gefördert wird, während auf Stufe 2 eingeschätzte Experimente die entsprechende Teilkompetenz in besonderem Maße fördern. Nawrath et al. (2011) differenzieren die Stufungen für die einzelnen Teilkompetenzen in ihrem Artikel aus. Mit dieser Stufung geben die Studierenden

für ihr geplantes Experiment an, inwieweit die einzelnen experimentellen Kompetenzen der Schüler:innen durch das Experiment gefördert werden (Abb. 2). Es ist hervorzuheben, dass nicht jede experimentelle Teilkompetenz innerhalb jedes Experimentes gefördert werden kann bzw. soll. Auch ist die Reihenfolge der Förderung der Kompetenzen nicht von Bedeutung. Es ist vielmehr die gleichmäßige Förderung aller Kompetenzen im Verlaufe des unterrichtlichen Physikdiskurses anzustreben.

Mittels einer hierarchischen Clusteranalyse nach Ward (Schendera, 2010) werden die von den Befragten reflektierten Experimente hinsichtlich ihrer Ähnlichkeit in Bezug auf die zu fördernden Schüler:innenkompetenzen kategorisiert. Dadurch ist eine qualitative Charakterisierung von geplanten Experimenten möglich, woraufhin Beratungs- und Weiterbildungsbedarfe für Studierende und Lehrkräfte ableitbar werden könnten.

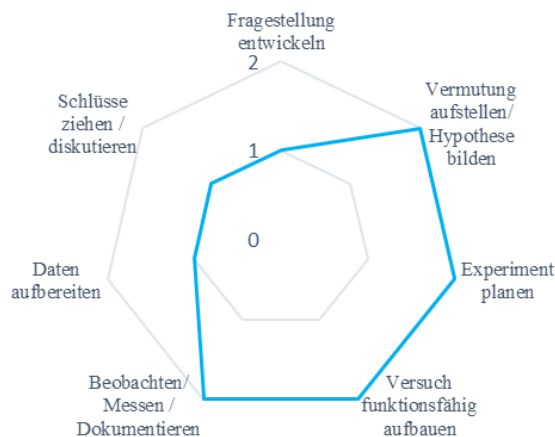


Abb. 2: Reflexion des Experiments eines Studierenden des fünften Semesters zur Messung von Volumen und Dichte mit dem Facettenmodell experimenteller Teilkompetenzen. (Maiseykenka et al., 2013; Nawrath et al., 2011)

3. Ergebnisse der hierarchischen Clusteranalyse

Die Abbildungen 3 - 5 zeigen die Zwei-Cluster-Lösung für die Befragten in den verschiedenen Ausbildungsphasen.

An der Datenerhebung des fünften Semesters nahmen 26 Studierende teil, die insgesamt N=160 Experimente planten (Abb. 3). Es ergeben sich zwei Cluster mit unterschiedlicher Ausprägung der nach dem Facettenmodell zu fördernden experimentellen Kompetenzen. Dabei enthält Cluster 2 etwa doppelt so viele Experimente wie Cluster 1.

Experimente, die dem Cluster 1 zugeordnet sind, fördern vorrangig die Kompetenzen „Vermutung aufstellen / Hypothesen formulieren“, „Beobachten, Messen, Dokumentieren“ und „Schlüsse ziehen / diskutieren“. Die experimentellen Kompetenzen „Fragestellung entwickeln“, „Experiment planen“, „Versuch funktionsfähig aufbauen“ sowie „Daten aufbereiten“ werden durch die Experimente auf einem durchschnittlichen Niveau geringer als 0,5 gefördert.

Experimente des Clusters 2 fördern vorrangig die Kompetenzen „Experiment funktionsfähig aufbauen“, „Beobachten, Messen, Dokumentieren“ und „Schlüsse ziehen / diskutieren“ mindestens auf Niveau 1,0. Hingegen wird die Ausbildung der Kompetenz „Fragestellung entwickeln“ nahezu vernachlässigt.

An der Datenerhebung zum Ende des Studiums nahmen 23 Studierende des neunten oder höheren Semesters teil, die N=27 Experimente planten und reflektierten. Mittels der Clusteranalyse ergeben sich zwei Cluster mit verschiedenen Förderungsschwerpunkten (Abb. 4). Experimente des Clusters 1 fördern die experimentellen Kompetenzen „Vermutung bilden“, „Beobachten, Messen, Dokumentieren“ und „Schlüsse ziehen“ auf einem Niveau größer als 1,0. Die Entwicklung von Fragestellungen und das Planen von Experimenten steht mit einem Niveau von weniger als 0,25 nicht im Mittelpunkt der Kompetenzförderung. Bei Cluster 2 wird das selbstständige formulieren von Fragestellungen im Durchschnitt mit einem Niveau von 0,3 gefördert. Jedoch fokussieren die Experimente aus Cluster 2 die übrigen Teilkompetenzen auf einem Niveau zwischen 1,0 und 1,7.

An der Datenerhebung nahmen sieben Lehrkräfte teil, die N=45 ihrer für den Unterricht geplanten Experimente reflektierten. Dabei gibt es zwei verschiedene Cluster, die sich in ihren Ausprägungen unterscheiden (Abb. 5). Experimente des Clusters 1 fördern vorrangig das Beobachten, Messen und Dokumentieren von Experimenten auf Niveau 1,5. Die restlichen Kompetenzen werden auf einem Niveau unter 0,9 gefördert. Es ist hier hervorzuheben, dass keine der Lehrkräfte angab, die Teilkompetenz „Fragestellung entwickeln“ zu fördern. Auch scheint die Förderung der Planung von Experimenten und die Aufbereitung aufgenommenen Daten mit einem Niveau von etwa 0,1 für Experimente dieses Clusters weniger im Fokus der zu fördernden Kompetenzen zu stehen. Bei Experimenten aus Cluster 2 werden Schüler:innen intensiver gefordert. Die Kompetenzen „Experiment funktionsfähig aufbauen“, „Beobachten / Messen / Dokumentieren“, „Daten aufbereiten“, „Schlüsse ziehen / diskutieren“ werden auf einem Niveau von über 1,2 gefördert. Die Förderung der Kompetenzen „Fragestellung entwickeln“, „Vermutung bilden / Hypothesen formulieren“ sowie „Experiment planen“ liegt auf einem durchschnittlichen Niveau zwischen 0,4 und 0,8.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sich die zwei Cluster bei der Entwicklung der experimentellen Teilkompetenzen gegenseitig weitestgehend ergänzen, sodass eine vielfältige Förderung in den Teilkompetenzen erreicht werden kann. Jedoch ist insbesondere die Entwicklung der Kompetenz „Fragestellung entwickeln“ (Niveau < 0,4) bei den geplanten Experimenten aller hier betrachteter Ausbildungsabschnitte eher gering ausgeprägt. Die Cluster 1 fokussieren jeweils die Kompetenzen „Beobachten / Mes-

sen / Dokumentieren“ und „Schlüsse ziehen / diskutieren“. Die Förderung der Kompetenz „Vermutung bilden / Hypothesen formulieren“ nimmt, bezogen auf die zunehmende Lehrerfahrung, drei Erhebungsgruppen ab.

Die Cluster 2 der verschiedenen Erhebungsgruppen unterscheiden sich insbesondere in ihrer Ausprägung der Teilkompetenzen „Experiment planen“ und „Daten aufbereiten“.

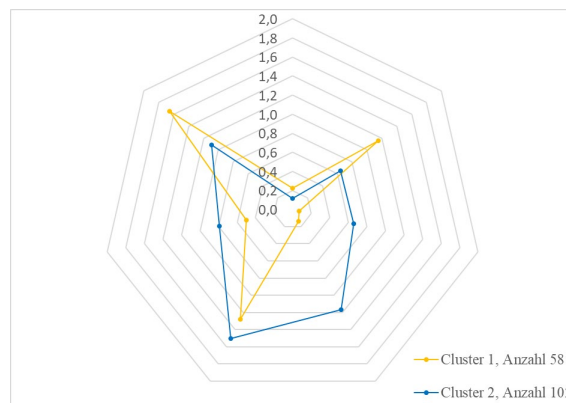


Abb. 3: Darstellung prototypisch geplanter Experimente durch Studierende des fünften Semesters.

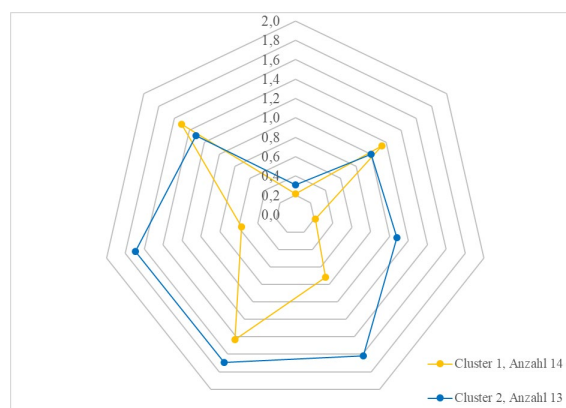


Abb. 4: Darstellung prototypisch geplanter Experimente durch Studierende des neunten Semesters.

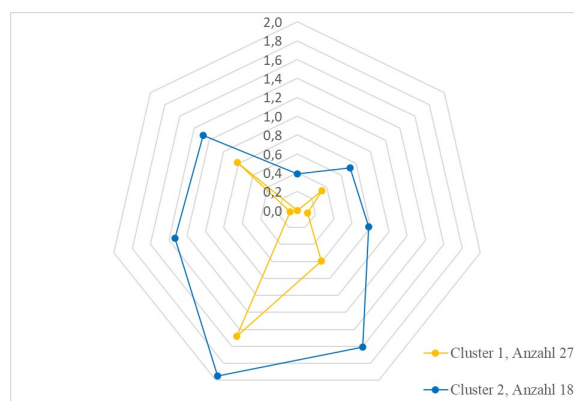


Abb. 5: Darstellung prototypisch geplanter Experimente durch Lehrkräfte.

4. Diskussion der Ergebnisse

Die Planungen der Studierenden des fünften und des neunten Semesters sowie der Lehrkräfte lassen sich jeweils in zwei prototypische Arten von Experimenten einteilen (vgl. Abb. 3 bis Abb. 5). Diese können als Demonstrationsexperiment durch die Lehrkraft (orange) oder als Schüler:innen experiment (blau) gedeutet werden.

Dabei verstehen wir unter einem Demonstrationsexperiment ein Experiment, bei dem sich die Tätigkeit der Schüler:innen auf das „Beobachten und Registrieren“ (Kircher et al., 2020) beschränkt. Nach der Einbringung einer Fragestellung in den Horizont der Schüler:innen, wird diesen ein Experimentieraufbau präsentiert, für den die Planung und die Versuchsdurchführung bereits feststehen. Die Schüler:innen nehmen eine passive Rolle bei der Durchführung ein und dokumentieren gegebenenfalls diese und die Beobachtungen. Bei einem Schüler:innenexperiment „verlagern sich dabei [die Anforderungen] zum aktiven Durchführen der experimentellen Arbeiten.“ (Kircher et al., 2020) Die Schüler:innen nehmen an der Planung des Experimentes teil und bauen dieses, gegebenenfalls geleitet, auf. Die Durchführung des Experimentes erfolgt eigenständig. Die Aufbereitung sowie die Diskussion der Beobachtung der Daten kann in beiden Experimentierarten lehrkraftgeleitet oder eigenständig durch die Schüler:innen erfolgen.

Die Cluster der drei Gruppen von Befragten ähneln einander. Sie unterscheiden sich nur in der Stärke der Ausprägung einzelner Teilkompetenzen. Studierende planen also ähnliche Experimente wie Lehrkräfte. Dies scheint die Aussage von Riese & Reinhold (2012) zu bestätigen, dass „Lehrer lehren, wie sie selbst unterrichtet wurden [...]“. In der Ausbildung von angehenden Lehrkräften genügt es daher nicht, allein auf die Praxisexpertise erfahrener Mentoren zurückzugreifen und deren Verständnis von der Durchführung von Experimenten zu übernehmen. Es bedarf zusätzlich einer intensiven und theoriegeleiteten Auseinandersetzung mit Experimenten und der Vielfalt dieser, sodass die experimentellen Kompetenzen ganz gezielt ausgewogen und vielfältig gefördert werden. Zudem ist zu erkennen, dass die Entwicklung von Fragestellungen bei allen Befragten generell deutlich vernachlässigt wird. Demnach stellt sich die Frage, inwieweit Schüler:innen Kompetenzen zur Entwicklung von Fragestellungen erlernen können. Es besteht die Gefahr, dass durch die nahezu dauerhafte Vorgabe von Fragestellungen zu vorgegebenen Phänomenen oder experimentellen Setups die Fähigkeit, Fragestellungen zu entwickeln, unterdrückt wird. Damit schwindet gleichermaßen die Lernbereitschaft von Kindern, denen „im Allgemeinen ein hohes Interesse, eine hohe Motivation oder Neugierde an Naturwissenschaften zugeschrieben“ wird (Steffensky 2017). Es wäre wünschenswert, wenn Lehrkräfte in der Lage wären, diese Kompetenz bei ihren Schüler:innen so auszubilden, dass angehende

Lehrkräfte dies wiederum in ihren geplanten Experimenten in höherem Maße fokussieren, um diese Kompetenz wiederum an ihre Schüler:innen weiterzugeben.

Eine andere Ursache für die geringe Ausprägung der Kompetenzförderung zur Entwicklung von Fragestellungen könnte an den durch den Rahmenplan und die Stundenanzahl vorgegebenen Bedingungen liegen, welche die Durchführung von offenen zeitaufwendigeren Experimenten im regulären Unterricht bedingt zulassen. Dabei verstehen wir unter offenen Experimenten von Reinhold beschriebene experimentelle Lerngelegenheiten, bei denen Lernende „zu selbst gewählten Fragestellungen Experimente [...] entwickeln und selbst durch [...] führen“ (E. Breuer et al., 1997, S. 109).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass in der Ausbildung von Mentoren und in Mentoringgesprächen vielfältige Experimente geplant und diskutiert werden sollten, die jeweils verschiedene Kompetenzen fokussieren. Insbesondere die Förderung der Teilkompetenzen „Fragestellung entwickeln“ und „Experimente planen“ bedürfen einer intensiveren Aufmerksamkeit in den Gesprächen, sodass diese Teilkompetenzen zur Förderung der Experimentierfähigkeit der Schüler:innen beitragen kann.

Die Untersuchungen sollen weiter ausgeschärft werden, indem Lehrkräfte hinsichtlich ihrer Erfahrungsjahre differenzierter betrachtet werden. Zusätzlich sollte die Datenerfassung auf die zweite Ausbildungsphase erweitert werden, um Veränderungen bei der Kompetenzentwicklung der Planung von Experimenten zu erkennen und daraus passende Weiterbildungsangebote abzuleiten.

5. Literatur

- E. Breuer, R. Erb, H. E. Fischer, P. Labudde & A. Stinner. (1997). *Handlungsorientierter Physik-Unterricht Sekundarstufe II*. https://www.researchgate.net/profile/hans-fischer/publication/270818451_handlungsorientierter_physikunterricht_sekundarstufe_ii
- Gröschner, A. & Häusler, J. (2014). Inwiefern sagen berufsbezogene Erfahrungen und individuelle Einstellungen von Mentorinnen und Mentoren die Lernbegleitung von Lehramtsstudierenden im Praktikum voraus? In K.-H. Arnold, A. Gröschner & T. Hascher (Hrsg.), *Schulpraktika in der Lehrerbildung: Theoretische Grundlagen, Konzeptionen, Prozesse und Effekte = Pedagogical field experiences in teacher education = theoretical foundations, programmes, processes, and effects*. Waxmann.
- Hascher, T. (2014). Forschung zur Wirksamkeit der Lehrerbildung. In E. Terhart, H. Bennewitz & M. Rothland (Hrsg.), *Handbuch der Forschung zum Lehrerberuf* (2., überarbeitete Auflage). Waxmann.
- Kircher, E., Girwidz, R. & Fischer, H. E. (2020). *Physikdidaktik | Grundlagen*. Springer Berlin Heidelberg.

- Nawrath, D., Maiseyenko, V. & Schecker, H. (2011). Experimentelle Kompetenz: Ein Modell für die Unterrichtspraxis. *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, 60(6), 42–48.
- Riese, J. & Reinhold, P. (2012). Die professionelle Kompetenz angehender Physiklehrkräfte in verschiedenen Ausbildungsformen. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 15(1), 111–143. <https://doi.org/10.1007/s11618-012-0259-y>
- Riese, J., Vogelsang, C., Schröder, J., Borowski, A., Kulgemeyer, C., Reinhold, P. & Schecker, H. (2022). Entwicklung von Unterrichtsplanungsfähigkeit im Fach Physik: Welchen Einfluss hat Professionswissen? *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 25(4), 843–867. <https://doi.org/10.1007/s11618-022-01112-0>
- Schendera, C. (2010). Clusteranalyse mit SPSS.
- Seiler, F. & Tepner, O. (2019). Entwicklung eines Seminarkonzepts zur Planung von Experimenten. In C. Maurer (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik* (Bd. 39, S. 858–861).
- Steffensky, Mirjam (2017): Naturwissenschaftliche Bildung in Kindertageseinrichtungen. Eine Expertise der Weiterbildungsinitiative Frühpädagogische Fachkräfte (WiFF). Unter Mitarbeit von DIPF | Leibniz-Institut für Bildungsforschung und Bildungsinformation: Deutsches Jugendinstitut : München, zuletzt geprüft am 22.05.2024.

Danksagung

Sven Levetzow dankt für die finanzielle Unterstützung durch das Verbundprojekt LEHREN in M-V der Qualitätsoffensive Lehrerbildung.

Arbeitsblattvorlagen als Mittel zur differenzierten Förderung der Variablenkontrollstrategie

Tobias Winkens*, Heidrun Heinke*

* I. Physikalisches Institut IA, RWTH Aachen University
Sommerfeldstraße 14, 52074 Aachen
winkens@physik.rwth-aachen.de, heinke@physik.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Die richtige Wahl der auftretenden Variablen beim Experimentieren ist für Schüler:innen keineswegs eine Selbstverständlichkeit. Beobachtungen zeigen vielfach unsystematische oder teilsystematische Vorgehensweisen. Einen Ansatzpunkt, um Schüler:innen individuelle Lerngelegenheiten zum Erlernen und Festigen der wichtigen Variablenkontrollstrategie (VKS) zu unterbreiten, bieten die unterschiedlichen Kompetenzfacetten und Teilfähigkeiten der VKS aufgrund der ihnen zugeordneten verschiedenen Schwierigkeitsniveaus. Damit bietet die Vermittlung der VKS einen guten Anlass zur Umsetzung einer binnendifferenzierten Förderung der Schüler:innen bezüglich ihrer experimentellen Kompetenzen. Vor diesem Hintergrund sind teilfähigkeitsspezifische Vorlagen für Arbeitsblätter entwickelt worden. Mit den Vorlagen können Lehrkräfte eigene experimentelle Settings zur Förderung der VKS einsetzen, indem sie selbstgewählte Experimente und die dort auftretenden Variablen in die Arbeitsblattvorlagen anstelle von Platzhaltern implementieren. Gleichzeitig können damit unter Nutzung von einheitlichen experimentellen Materialien Aufgaben mit unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden kreiert werden. Neben der konzeptuellen Vorstellung der Vorlagen soll der Beitrag einen Einblick in eine erste Evaluation der Materialien mit Lehramtsstudierenden geben. Der Fokus der Evaluation, bei der die Proband:innen vorgegebene Experimente in die Vorlagen implementieren, liegt vor allem auf der Usability der entwickelten Arbeitsblattvorlagen.

1. Hintergrund

Eine zunehmende Heterogenität in den Lerngruppen wird verstärkt in allen Schulformen beobachtet. Auch deshalb kommt den Lernenden mit ihren individuellen Bedürfnissen bei der Planung und dem Ablauf von Lehr-Lern-Prozessen eine wachsende Bedeutung zu. Dementsprechend stehen die Naturwissenschaften und der Physikunterricht im Speziellen vor der Herausforderung auch bei der Förderung experimenteller Kompetenzen individuelle Lernwege zu ermöglichen. Im Vorfeld der hier vorgestellten Studie wurden Lehrkräfte (N=45) mit dem Unterrichtsfach Physik befragt, um zu erkunden, wie Unterrichtsmaterialien zur Förderung experimenteller Kompetenzen für den alltäglichen Unterrichtseinsatz gestaltet sein können. Dabei ergab sich, dass eine explizite Förderung experimenteller Kompetenzen – bereits auch ohne Differenzierung – häufig nicht erfolgt, was unter anderem damit begründet wird, dass die zur Verfügung stehende Zeit bereits für die Vermittlung der fachlich-konzeptuellen Inhalte nicht immer ausreichend sei. Materialien zur expliziten Förderung experimenteller Kompetenzen seien daher nur dann für die Praxis interessant, wenn sie zu den ohnehin behandelten Inhalten passen. Diese beiden Erkenntnisse aus der Praxis dienen als Impulse zur Entwicklungsidee, Arbeitsblattvorlagen zu konzipieren, welche spezifisch die verschiedenen Teilfähigkeiten der für die Planung

von Experimenten besonders wichtigen experimentellen Kompetenz der Variablenkontrollstrategie adressieren (vgl. Schwichow et al., 2016; Chen & Klahr, 1999; Schwichow & Nehring, 2018, Winkens & Heinke, 2023).

Die Bereitstellung solcher Arbeitsblattvorlagen verfolgt damit zwei konkrete Ziele:

- Einerseits sollen die Arbeitsblattvorlagen die Lehrkräfte unterstützen und sie in die Lage versetzen, spezifische Inhalte ihres Unterrichts mit der expliziten Förderung experimenteller Kompetenzen zu verknüpfen und auf diese Weise die Kompetenzförderung im Vergleich zur Vermittlung reiner Fachinhalte stärker in den Fokus zu rücken.
- Andererseits soll Schüler:innen die Möglichkeit gegeben werden, mit dem gleichen experimentellen Material binnendifferenzierte Aufgabenstellungen auf unterschiedlichem, an ihre Fähigkeiten angepasstem individuellen Niveau zu bearbeiten.

Im Folgenden werden das Konzept und die Entwicklung teilfähigkeitsspezifischer Arbeitsblattvorlagen als Möglichkeit zur binnendifferenzierenden Förderung experimenteller Kompetenzen in der Mittelstufe vorgestellt. Außerdem werden die Ergebnisse einer ersten Evaluierung der experimentenspezifischen Anpassung der Arbeitsblattvorlagen durch Lehramtsstudierende im Hinblick auf die Usability präsentiert und diskutiert.

2. Variablenkontrollstrategie differenziert fördern

2.1. Modellierung der VKS

Die Legitimation für den Ansatz, mittels teilfähigkeitsspezifischer Arbeitsblattvorlagen die Kompetenz der Variablenkontrollstrategie differenziert zu fördern, basiert auf theoretischen und empirischen Erkenntnissen zur VKS. Die Modellierung der VKS in Form von vier Teilfähigkeiten zeigt unterschiedliche inhaltliche Schwerpunkte auf. Konkret werden die folgenden Teilfähigkeiten der VKS unterschieden (vgl. Schwichow et al., 2016; Chen & Klahr, 1999; Schwichow & Nehring, 2018):

- die Fähigkeit zur gezielten Identifizierung kontrollierter Experimente aus einer Auswahl an kontrollierten und konfundierten Experimenten (ID),
- die Fähigkeit zur Interpretation der Befunde kontrollierter Experimente (IN)
- die Fähigkeit zur Planung kontrollierter Experimente (PL)
- die Fähigkeit zum Verständnis der fehlenden Aussagekraft konfundierter Experimente (UN).

Verschiedene Studien (vgl. Brandenburger et al., 2022; Peteranderl & Edelsbrunner, 2020; Goertz, 2022; Schwichow et al., 2016; Brandenburger & Mikelskis-Seifert, 2019) zeigen in einem Vergleich dabei unterschiedliche Schwierigkeitsgrade im Hinblick auf die unterschiedlichen Teilfähigkeiten (vgl. Winkens & Heinke, 2023). Als einfachere Teilfähigkeiten lassen sich die Fähigkeiten zur Interpretation (IN) und Identifikation (ID) kontrollierter Experimente auf einem ähnlichen Niveau einordnen. Die beiden übrigen Teilfähigkeiten sind als schwieriger zu bewerten, wobei die Fähigkeit zum Verständnis der Problematik konfundierter Experimente (UN) im Vergleich zur Planung kontrollierter Experimente (PL) nochmal schwieriger erscheint. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit die VKS auf verschiedenen Verständnis-Niveaus fördern zu können.

2.2. Entwicklung teilfähigkeitsspezifischer Arbeitsblattvorlagen zur VKS

Aufbauend auf diesem Kenntnisstand kann der Grundgedanke hinter dem Konzept der Arbeitsblattvorlagen erläutert werden. Nutzt man die Möglichkeiten vorhandener Testinstrumente aus, z.B. des CVSI (Control-of-Variables Strategy Inventory) (vgl. Schwichow et al., 2016), können die Fähigkeiten von Lernenden den entsprechenden Kompetenzfacetten und -niveaus der VKS zugeordnet werden. Die teilfähigkeitsspezifischen Arbeitsblattvorlagen als Differenzierungsmaßnahme werden demnach als Antwort auf die Erkenntnisse eines geeigneten Diagnoseverfahrens eingesetzt und orientieren sich damit am Differenzierungsprinzip (vgl. Groß, 2013; Wodzinski, 2016; Wodzinski & Wodzinski, 2007).

2.2.1. Entwicklungsbasis

Die Entwicklung der Arbeitsblattvorlagen erfolgte auf Basis vorhandener Unterrichtsmaterialien zur VKS. Im Rahmen der Konzeption und Entwicklung der Plattform FLeXKom (Fördern und Lernen experimenteller Kompetenzen) sind fünf Lernzirkelstationen entwickelt worden, deren Schwerpunkt auf der Förderung der Variablenkontrollstrategie lag¹. Die Evaluation eines Lernzirkels bestehend aus diesen fünf Stationen zeigte dabei einen deutlichen Lernzuwachs ($N = 443$, $r = 0,55$ & $d = 1,17$) bei Schüler:innen der Jahrgangsstufen 7-9 (vgl. Goertz, 2022). Daher wurden diese Stationen als grundlegende Materialbasis für die Entwicklung der teilfähigkeitsspezifischen Arbeitsblattvorlagen ausgewählt.

Tab. 1: Übersicht über die genutzten Lernzirkelstationen zur VKS, die als Entwicklungsbasis für die teilfähigkeitsspezifischen Arbeitsblattvorlagen verwendet wurden.

Nr.	Themenbereich	Experiment	VKS-Teilfähigkeit
1	Mechanik	Schiefe Ebene	IN
2	Magnetismus	Elektromagnet	ID
3	Mechanik	Federpendel	PL
4	E-Lehre	Drahtwiderstand	UN
5	Mechanik	Fadenpendel	UN

Wie in Tabelle 1 zu erkennen, entstammen die Stationen den unterschiedlichen Themenfeldern Mechanik, Magnetismus sowie Elektrizitätslehre und behandeln klassische Schulexperimente, die sich auch als Schülerexperimente eignen. Bei genauerer Analyse der Stationen zeigt sich, dass die zwei Stationen zum Fadenpendel und Drahtwiderstand schwerpunktmäßig die VKS-Teilfähigkeit zum Verständnis konfundierter Experimente (UN) thematisieren, während die anderen drei Teilfähigkeiten der VKS jeweils einmal den Fokus einer Station bilden. Die genaue Zuordnung findet sich in Tabelle 1.

2.2.2. Materialentwicklung

Um die Idee von teilfähigkeitsspezifischen Arbeitsblattvorlagen zu realisieren, folgt das Vorhaben gemäß Abbildung 1 einem mehrschrittigen Ansatz.

Im ersten Schritt wurden die im Abschnitt 2.2.1 beschriebenen, vorhandenen Lernzirkelstationen analysiert. Ziel der Analyse war dabei zuzuordnen, welche VKS-Teilfähigkeit die jeweilige Station besonders fördert (s. Tabelle 1) sowie die einzelnen (Teil-)Aufgaben der zugehörigen Arbeitsblätter zu untersuchen. Der Hauptfokus der Aufgabenanalyse bestand darin, charakteristische Elemente für die Förderung der jeweiligen Teilfähigkeit herauszufiltern, um diese als Grundgerüst der zugehörigen Arbeitsblattvorlage zu verwenden.

¹ Auf der Plattform sind u.a. die hier genannten Stationen inkl. der zugehörigen Arbeitsblätter abrufbar. Die Plattform FLeXKom ist zu erreichen unter: <https://www.sciphylab.de/flexkom>

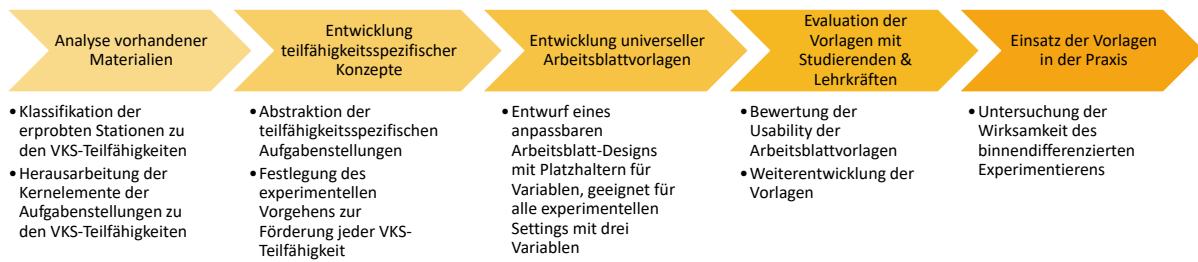


Abb. 1: Ansatz für eine differenzierte Förderung der Variablenkontrollstrategie durch die Entwicklung und Umsetzung von teilfähigkeitsspezifischen Arbeitsblattvorlagen. Aufbauend auf erprobten Materialien sind daraus verallgemeinerte Konzepte für alle vier VKS-Teilfähigkeiten entwickelt und in Form von universell einsetzbaren, teilfähigkeitsspezifischen Arbeitsblattvorlagen umgesetzt worden. Zur iterativen Weiterentwicklung werden diese mit Lehramtsstudierenden und Lehrkräften evaluiert, um sie perspektivisch in der Schulpraxis einsetzen und dort auch ihre Wirksamkeit testen zu können.

Die teilfähigkeitsspezifischen Charakteristika stellen die Grundlage für die im zweiten Schritt entwickelten Konzepte für teilfähigkeitsspezifische Aufgabenstellungen dar (vgl. Winkens et al., 2024). Wie in Abbildung 2 zu sehen, ist dabei zu jeder VKS-Teilfähigkeit ein Konzept für Aufgabenstellungen und deren Ablauf für die Förderung dieser Teilfähigkeit erstellt worden, wobei die farbliche Codierung die Schwierigkeit der Teilfähigkeit gemäß Abschnitt 2.1. von einfach (grün) nach schwer (rot) widerspiegelt.

Der Ablauf der Aufgabenstellungen in Abbildung 2 kann somit als Gerüst für Arbeitsblätter mit konkreten Arbeitsaufträgen im Rahmen von Schülerexperimenten dienen. Die vier Konzepte sind dabei vom Aufbau her synchron ausgearbeitet. Im jeweiligen oberen Teil

der vier dargestellten Konzepte sind die experimentellen Rahmenbedingungen der Arbeitsaufträge beschrieben. Dabei zeigt sich, dass beim Konzept zum Interpretieren (IN) nur kontrollierte Experimente den Lerngegenstand darstellen, während die anderen drei Teilfähigkeiten auch zusätzlich konfundierte Experimente behandeln.

Im jeweiligen mittleren und unteren Teil der vier dargestellten Konzepte sind die charakteristischen Elemente, die aus den bestehenden Stationen herausgearbeitet wurden, in verallgemeinerter Form abgebildet. Dies umfasst u.a., nach welchem Design die experimentell gestützte Vermittlung der jeweiligen VKS-Teilfähigkeit erfolgt. Elementar ist bei allen

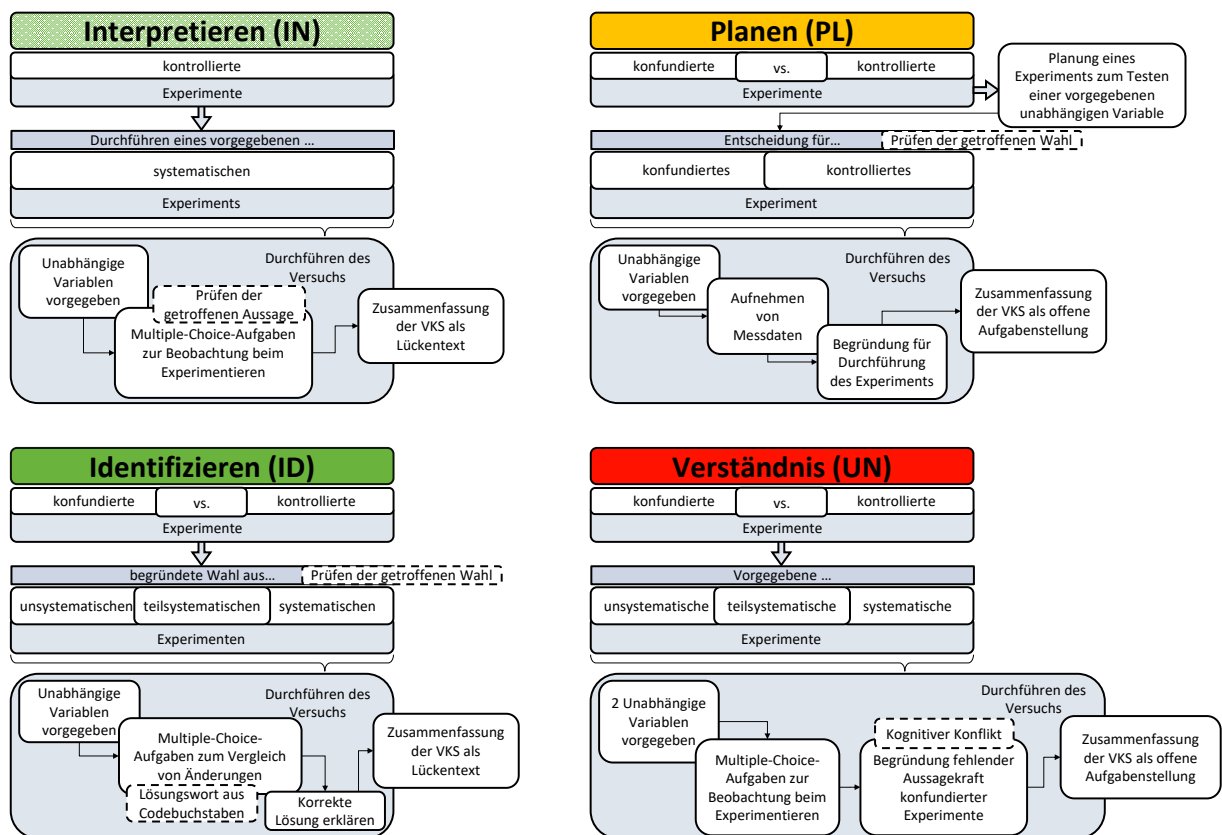


Abb. 2: Übersicht über die vier VKS-teilfähigkeitsspezifischen Konzepte für die Arbeitsblattvorlagen. Die farbliche Codierung zeigt die Schwierigkeit der Teilfähigkeit von einfach (grün) zu schwer (rot).

vier Konzepten, dass diese ein aktives Experimentieren einfordern. Innerhalb der Bearbeitungsphase des Versuchs ist bei der Teilfähigkeit UN als Besonderheit herauszuheben, dass dort auf die Konfrontation mit einem kognitiven Konflikt bei Lernenden als Auslöser eines Lernprozesses abgezielt wird. Begründet wird dieser Ansatz damit, dass tendenziell leistungsstärkere Schüler:innen das Arbeitsblatt zu dieser Teilfähigkeit bearbeiten. Im Gegensatz zu den Leistungsschwächeren kann ein kognitiver Konflikt bei Lernenden mit einem höheren Vorwissen kurzzeitig eine angeregte Leistungsbereitschaft erzeugen (vgl. Sander & Heiß, 2012; Zohar & Aharon-Kravetsky, 2005).

Jedes der vier Konzepte für die zu entwickelnden Arbeitsblätter schließt mit einer Sicherung in Form einer Zusammenfassung. Diese Sicherung berücksichtigt dabei den unterschiedlichen Schwierigkeitsgrad der Teilfähigkeiten. Während bei den einfacheren Teilfähigkeiten zum Interpretieren (IN) und Identifizieren (ID) die Sicherung in Form eines Lückentexts sowohl aus sprachlicher als auch inhaltlich-fachlicher Perspektive mit einem höheren Unterstützungsgrad erfolgt, werden diese Unterstützungsmaßnahmen bei den schwierigeren Teilfähigkeiten PL und UN nicht bereitgestellt.

Im dritten Schritt in Abbildung 1 wurden die erarbeiteten Konzepte in teilfähigkeitsspezifische Arbeitsblattvorlagen übersetzt. Die konzeptuellen Überlegungen wurden in ein einheitliches Arbeitsblattdesign transferiert und die Aufgabenstellungen so konkret wie möglich ausformuliert. Um einen experimentellen Kontext in die Vorlagen zu implementieren, wurden Platzhalter für die experimentenspezifischen Variablen und ihre Ausprägungen erstellt. Dabei ist die wichtigste Bedingung an die gewählten Experimente zur Implementierung, dass drei verschiedene unabhängige Variablen vorliegen müssen. Nur durch diese Einschränkung kann sichergestellt werden, dass alle vier VKS-Teilfähigkeiten mit dem gleichen Experiment durch die Arbeitsblattvorlagen adressiert werden können.

Gemäß Abbildung 1 folgt auf die Entwicklung der universellen Arbeitsblattvorlagen die Evaluation des Umgangs mit den erstellten Vorlagen durch verschiedene Proband:innen. Auf die Evaluation der Vorlagen mit Studierenden wird in Abschnitt 3 eingegangen. Aufbauend auf den Ergebnissen der Evaluation werden die Arbeitsblattvorlagen in einem Iterationsprozess, orientiert am Design-Based Research-Ansatz (vgl. DBRC, 2023), überarbeitet und dann mit einer Kohorte von Lehrkräften erneut evaluiert. Dies ist die Basis, um die Vorlagen perspektivisch als letzten Schritt in der Praxis einsetzen und dort auch ihre Wirksamkeit testen zu können.

2.2.3. Implementation eines experimentellen Settings in die Vorlagen

Damit verschiedene Experimente variabel in die Vorlagen implementiert werden können, müssen die Lehrkräfte an verschiedenen Stellen notwendige Anpassungen durchführen. An dieser Stelle soll genauer beschrieben werden, welche Aufgaben die Lehrkräfte zur Implementation von experimentellen Settings absolvieren müssen. Die Implementation eines Experiments wird dabei durch eine Handreichung angeleitet und unterstützt, in der die notwendigen Schritte mit Hilfen und Beispielen erläutert sind. Alle Stellen und Wörter, an denen etwas bearbeitet werden muss, sind rot markiert. Darüber hinaus finden sich Stellen mit blauer Schrift, die Lösungstexte/-infos für die Lehrkraft markieren und für die weitere Bearbeitung des Arbeitsblattes durch die Schüler:innen nach der Implementation entfernt werden müssen.

Der wichtigste Aspekt bei der Bearbeitung der Arbeitsblattvorlagen ist der Ersatz der Platzhalter durch die passenden Variablen. Das umfasst die abhängige Variable als Messgröße sowie die bis zu drei unabhängigen Variablen mit ihren verschiedenen Ausprägungen². Die Aufgabenstellungen sind im Großteil aller Fälle bereits vollständig ausformuliert. Durch das Einfügen der experimentenspezifischen Variablen und ihrer Ausprägungen kann es jedoch notwendig werden, grammatikalische Anpassungen vorzunehmen. Die weiteren Anpassungen umfassen weitere experimentenspezifische Besonderheiten wie die Ergänzung eines einführenden Satzes in den Kontext des Experiments respektive des Versuchs an sich. Bei Teilaufgaben, die das Experimentieren anleiten, müssen zudem bei Bedarf Beschreibungen zum Versuch hinzugefügt sowie Abbildungen des jeweiligen Experiments in die Arbeitsblätter integriert werden. Abschließend sollte ein aussagekräftiger Experiment- bzw. Stationstitel zum experimentellen Setting gewählt werden, der für alle vier teilfähigkeitsspezifischen Arbeitsblattvorlagen genutzt werden kann. Mit diesen fünf Aspekten können aus den Vorlagen vier Arbeitsblätter für Schüler:innen entwickelt werden, die unter Verwendung der gleichen experimentellen Hardware jeweils eine andere VKS-Teilfähigkeit fördern und damit einen anderen Schwierigkeitsanspruch haben. Darüber hinaus können weitere optionale Anpassungen durchgeführt werden, wie individuelle Codebuchstaben oder Lösungswörter oder Zusatzaufgaben zur weiteren zeitlichen Differenzierung innerhalb eines teilfähigkeitsspezifischen Arbeitsblatts.

3. Evaluation zur Adaption der Arbeitsblattvorlagen

Um die entwickelten Vorlagen in einem ersten Iterationsschritt hinsichtlich ihrer Usability und des für

² Der Ersetzungsaufwand durch die Variablenanpassung kann mithilfe der „Suchen und Ersetzen von Text“-Funktion von MS Word verringert werden.

ihre Adaption notwendigen Arbeitsaufwands zu untersuchen, wurde eine erste Evaluation mit Physik-Lehramtsstudierenden im Masterstudiengang (N = 13, 1. Fachsemester) durchgeführt. Die Durchführung und die Ergebnisse der Evaluation werden im Folgenden vorgestellt.

3.1. Ablauf der Evaluation

Die Durchführung der Evaluation mit den Lehramtsstudierenden erfolgte im Rahmen eines Vorbereitungsseminars auf das Praxissemester und war gemäß Abbildung 3 strukturiert.

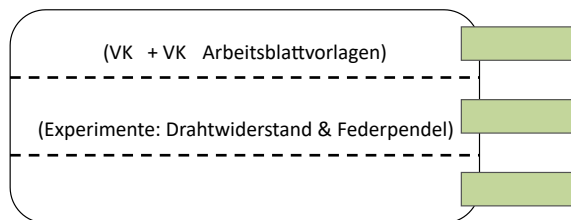


Abb. 3: Ablauf der Evaluation zur Untersuchung der Usability der teilfähigkeitsspezifischen Arbeitsblattvorlagen mit Lehramtsstudierenden im Masterstudiengang Physik.

Innerhalb der 90-minütigen Seminarsitzung haben die Studierenden eine kurze Einführung in die VKS sowie die Implementation von Experimenten in die Arbeitsblattvorlagen erhalten. Anschließend haben sie begonnen, in Einzelarbeit die Arbeitsblattvorlage zu einer VKS-Teilfähigkeit für ein vorgegebenes Experiment (Drahtwiderstand oder Federpendel) anzupassen. Dazu wurde den Studierenden eine Teilfähigkeitsvorlage sowie eines der beiden Experimente zugewiesen und die entsprechenden Vorlagen in Form einer Word-Datei zur Verfügung gestellt. Jede Kombination aus Experiment und teilfähigkeitsspezifischer Vorlage wurde dabei 1-3 Mal bearbeitet, wie in Tabelle 2 dargestellt ist. Gekennzeichnet durch die Zahl in der Klammer, haben drei Proband:innen nach der Bearbeitung einer ersten teilfähigkeitsspezifischen Vorlage auch die Vorlage zu einer zweiten Teilfähigkeit zum gleichen Experiment bearbeitet.

Tab. 2: Übersicht über die den Proband:innen zugewiesenen und bearbeiteten Kombinationen aus der Teilfähigkeit der Arbeitsblattvorlage und dem zu implementierenden Experiment. Die Zahl in der Klammer gibt an, dass Proband:innen das gleiche Experiment zusätzlich in eine Vorlage zu einer zweiten Teilfähigkeit implementiert haben.

Experiment	Teilfähigkeit der Vorlage			
	IN	ID	PL	UN
Drahtwiderstand	2	2(1)	1	1
Federpendel	2(2)	3	1(1)	1

Die Bearbeitung der Vorlagen erfolgte mit den eigenen Laptops oder Tablets der Proband:innen. Zur Feststellung der Bearbeitungsdauer wurden Smartphones genutzt. Im Abschluss an die Implementationsphase wurde, mittels eines Fragebogens mit 9 geschlossenen Items sowie 4 offenen Fragen zu Stärken

und Schwächen der Vorlagen, Feedback zu den Arbeitsblattvorlagen und zur Wahrnehmung der Studierenden bei der Implementation der Experimente in ebendiese erhoben. Die Studierenden sollten dabei auf einer vierstufigen Likert-Skala Aussagen bewerten, die in Abbildung 4 aufgeführt sind.

3.2. Ergebnisse der ersten Evaluation

Nachfolgend werden zunächst die Ergebnisse der Auswertung der geschlossenen Fragebogen-Items diskutiert, bevor abschließend das offene Feedback vorgestellt wird.

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse der Auswertung der geschlossenen Items abgebildet, wobei inhaltlich verwandte Items gleichfarbig dargestellt sind. Das blau markierte Item 1 erfragt mit der Fähigkeit zur Unterscheidung zwischen einer abhängigen und unabhängigen Variablen die Grundvoraussetzung für eine inhaltlich sinnvolle Bearbeitung der Arbeitsaufträge und ist gemäß der Antworten der Proband:innen offenbar gegeben. Die in orange dargestellten Items 2-7 geben Rückschluss über Meinungen zur Usability der Vorlagen. Diese sind im Mittel überwiegend positiv, zeigen jedoch eine deutliche Streuung der Meinungen. Dies zeigt, dass einzelne Proband:innen bei der Bearbeitung der Vorlagen Schwierigkeiten hatten. Zu konstatieren ist dies vor allem bei dem Item 5 zum Ersetzen der Platzhalter und bei dem Item 7 zu grundsätzlichen Verständnisschwierigkeiten bei den zu bearbeitenden Stellen. Auch wenn die Unterstützung durch die Handreichung als positiv wahrgenommen wurde (Item 2), müssen die beschriebenen Aspekte als Anregungen verstanden werden, um die Handreichung explizit an diesen Stellen zu präzisieren und durch Anwendungsbeispiele zu optimieren. Als positiv hervorzuheben sind dabei die Aspekte, dass die farbliche Markierung der zu bearbeitenden Stellen in den Vorlagen (Item 6) sowie die Platzhalter für die Variablen zur Ersetzung (Item 4) sehr deutlich zu erkennen sind. Als generelle Bewertung und Einschätzung des Konzepts können die grau eingefärbten Items 8 und 9 interpretiert werden. Offenbar erscheint das Konzept der Arbeitsblattvorlagen den Proband:innen mehrheitlich als sinnvoll und in vielen Fällen wurden die erstellten Arbeitsblätter als einsatzfähig für den Unterricht bewertet. Dies stützt die Entscheidung, die Materialien zur Umsetzung dieses Konzepts weiterzuentwickeln.

Für die erste Adaption einer Arbeitsblattvorlage durch die Proband:innen wurde eine durchschnittliche Bearbeitungsdauer von (39 ± 10) Minuten in der Auswertung ermittelt, wobei aufgrund technischer Probleme nur 10 der 13 Proband:innen bei dieser Auswertung berücksichtigt wurden. Drei Studierende haben zusätzlich zur zunächst vorgegebenen Teilfähigkeit eine zweite teilfähigkeitsspezifische Vorlage für das gleiche experimentelle Setting modifiziert. Auffällig war dabei, dass die Bearbeitungsdauer in den drei Fällen (14:20 Minuten, 9:40 Minuten bei

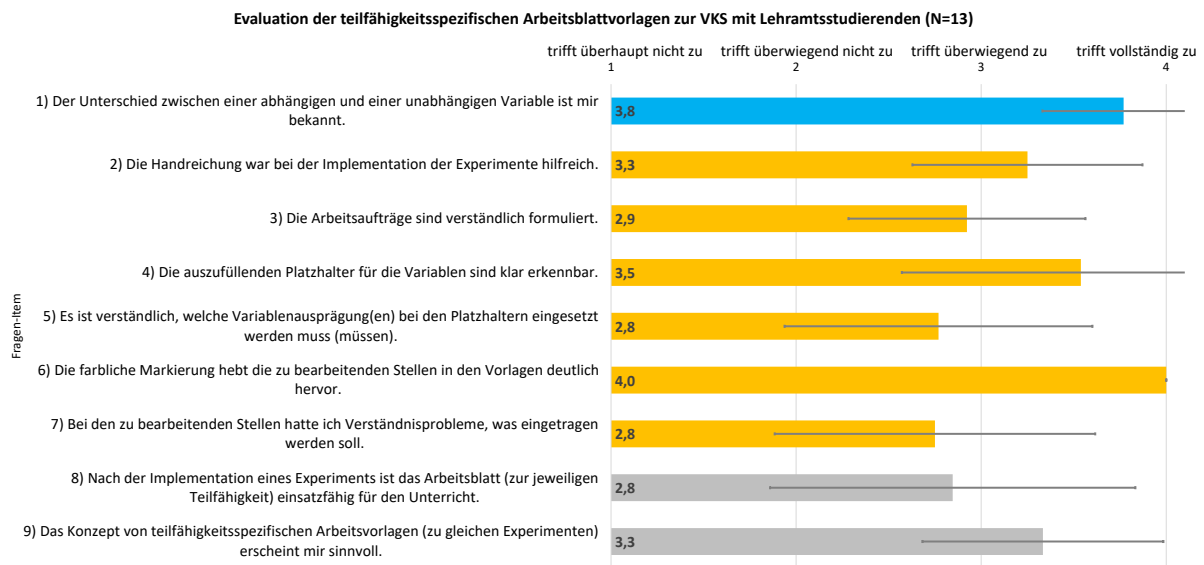


Abb. 4: Ergebnisse der Evaluation der VKS-teilfähigkeitsspezifischen Arbeitsblattvorlagen. Die Evaluation wurde mit Lehramtsstudierenden des Masterstudiengangs Physik (N = 13) in einem Vorbereitungsseminar zum Praxissemester durchgeführt.

noch fehlenden einzufügenden Skizzen und 7:50 Minuten bei einer in etwa bis zur Hälfte bearbeiteten Vorlage) deutlich unter der Dauer der ersten Bearbeitung lag. Dies deutet an, dass der Zeitaufwand bei der Bearbeitung weiterer Arbeitsblattvorlagen (mindestens zum selben Experiment) abnimmt. Gründe dafür sind möglicherweise, dass viele Elemente (bspw. Bilder und Skizzen, Stationstitel etc.) vollständig oder zu Teilen übernommen werden können. Zur Überprüfung dieser Vermutung müsste die Erprobung mit einer größeren Stichprobe und verlängerter Bearbeitungszeit der Vorlagen wiederholt werden.

Das zusätzliche offene Feedback, das im Fragebogen schriftlich eingeholt wurde, ermöglicht einen tieferen Einblick in die Bewertung der Proband:innen und kann auch weitere Verbesserungspotentiale aufzeigen. Nach Sichtung der Rückmeldungen zu den 4 offenen Fragen erschien eine individuelle Auswertung der einzelnen Fragen nicht sinnvoll. Da jeweils zwei Fragen auf positive Aspekte der Vorlagen abzielten und die anderen beiden auf negative Aspekte, wurden die Antworten der Proband:innen entsprechend den beiden Kategorien zugeordnet. Nachfolgend werden nur Aussagen mit Mehrfachnennungen diskutiert.

Der Zeitaufwand bei der Implementation eines Experiments in die erste teilfähigkeitsspezifische Vorlage wurde von den Studierenden als hoch eingeschätzt. Zur Relativierung haben die Studierenden jedoch angemerkt, dass sie ein wenig gebraucht haben, um sich an das Konzept der Arbeitsblattvorlagen zu gewöhnen. Danach fiel es ihnen nach eigener Aussage merklich einfacher und sie äußerten die Vermutung, dass die Dauer ab der Vorlage zu einer zweiten Teilfähigkeit zum gleichen Experiment abnimmt. Das stützt die oben formulierte Hypothese, die sich aus der Dauer der Bearbeitung einer zweiten Vorlage durch drei Studierende ergab.

Zur Anpassung der Platzhalter gab es dagegen gemischtes Feedback. Einerseits wurde die überschaubare Anzahl an Variablenanpassungen sowie die einfache Art der Änderung, u.a. durch die zeitsparende „Suchen und Ersetzen“-Funktion, positiv hervorgehoben. Andererseits wurde zurückgemeldet, dass die Formulierung der Platzhalter nochmal modifiziert werden sollte, um die Ersetzungsmöglichkeiten weiter zu erhöhen und damit den Zeitaufwand reduzieren zu können.

Bei der Bearbeitung mit Tablets musste festgestellt werden, dass durch einige Implementationsschritte, wie das Einfügen von Bildern bzw. Skizzen, zusätzliche Formatierungsanpassungen notwendig wurden.

Besonders positiv sind die klare Struktur und Übersichtlichkeit der Vorlagen sowie das prinzipiell fertige Arbeitsblatt-Design hervorgehoben worden. Zudem wurden Aspekte in den Vorlagen selber, wie die Angabe von erwarteten Lösungen bei den Teilaufgaben oder didaktische Kommentare, sowie die Handreichung als Orientierung in der Arbeitsphase als sinnvolle und hilfreiche Unterstützung wahrgenommen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Auswertung der geschlossenen Items. Es wurden sich für die Handreichung jedoch mehr konkrete Beispiele für die Implementation der einzelnen Teilaufgaben gewünscht oder alternativ die Idee formuliert, ein Einführungsvideo zur Handreichung zu ergänzen.

Als Schlussfolgerung aus der Evaluation sind einige Aspekte an den Materialien verbessert worden, sodass die überarbeiteten Versionen in einer zweiten Evaluationsschleife mit Lehrkräften eingesetzt werden können. Die Handreichung wurde um Beispiele für die Implementation erweitert sowie die Anleitung zum Vorgehen ausführlicher gestaltet. In den Arbeitsblattvorlagen selber wurden ergänzend zur Anleitung

in der Handreichung an einzelnen Teilaufgaben Kommentare zur Unterstützung ergänzt. Darüber hinaus wurden die Bezeichnungen der Platzhalter umgestaltet, um den Ersetzungsaufwand zu reduzieren.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Als Reaktion auf eine zunehmende Heterogenität in den Lerngruppen und auf beobachtete Defizite in der expliziten Förderung experimenteller Kompetenzen in der unterrichtlichen Praxis sind am Beispiel der Variablenkontrollstrategie Arbeitsblattvorlagen konzipiert und ihre Entwicklung vorgestellt worden. Auf Basis erprobter und wirksamer Materialien zur VKS sind für vier bekannte VKS-Teilfähigkeiten Arbeitsblattvorlagen für experimentelle Arbeitsaufträge entstanden, mit denen Schüler:innen aufgrund des unterschiedlichen Schwierigkeitsgrads der Teilfähigkeiten unter Nutzung des gleichen experimentellen Materials binnendifferenziert experimentieren können. Um die entwickelten Materialien auf ihre Usability aus Sicht von Lehrenden zu untersuchen, wurde mit Physik-Lehramtsstudierenden im Masterstudiengang (N = 13) eine erste Erprobung der Nutzung der teilfähigkeitsspezifischen Arbeitsblattvorlagen durchgeführt, bei der sie eine Vorlage für ein vorgegebenes Experiment modifiziert haben. Dabei wurde ein relativ hoher zeitlicher Aufwand bei der Adaption der ersten Teilfähigkeiten-Vorlage beobachtet, der sich jedoch bei der Bearbeitung weiterer Vorlagen deutlich reduziert. Die Idee des Konzepts sowie die allgemeine Struktur der Vorlagen wurden ähnlich positiv bewertet wie Unterstützungsmaßnahmen bei der Implementation der Experimente, z.B. in Form einer Handreichung. Im Ergebnis der Erprobung wurde die Handreichung um konkrete Beispiele erweitert und in den Arbeitsblattvorlagen wurden didaktische Kommentare als Hilfen implementiert. Die überarbeiteten Materialien werden im nächsten Schritt mit einer Kohorte von Lehrkräften erneut evaluiert, um deren Expertise aus der Unterrichtspraxis in die Gestaltung der Materialien zu integrieren. Die daraus generierten Versionen der vier teilfähigkeitsspezifischen Arbeitsblattvorlagen sollen einerseits bei der Untersuchung der Wirksamkeit dieses binnendifferenzierten Ansatzes zur Förderung experimenteller Kompetenzen genutzt werden und andererseits in einen Materialpool zur Unterstützung des binnendifferenzierten Experimentierens in der Schulpraxis einfließen.

5. Literatur

Brandenburger, M.; Mikelskis-Seifert, S. (2019). Facetten experimenteller Kompetenz in den Naturwissenschaften. In: Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Kiel 2018. Hrsg. von Christian Maurer, S. 77–80.

- Brandenburger, M.; Salim, C. A.; Schwichow, M.; Wilbers, J.; Mikelskis-Seifert, S. (2022). Modellierung der Struktur der Variablenkontrollstrategie und Abbildung von Veränderungen in der Grundschule. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 28 (5), S. 1-20.
- Chen, Z.; Klahr, D. (1999). All Other Things Being Equal: Acquisition and Transfer of the Control of Variables Strategy. In: Child Development, 70(5), S. 1098–1120.
- DBRC; The Design-Based Research Collective (2003). Design-Based Research: An Emerging Paradigm for Educational Inquiry. In: Educational Researcher, 32(1), S. 5–8.
- Goertz, S. (2022). Module und Lernzirkel der Plattform FLexKom zur Förderung experimenteller Kompetenzen in der Schulpraxis – Verlauf und Ergebnisse einer Design-Based Research Studie. Berlin: Logos Verlag.
- Groß, K. (2013). Experimente alternativ dokumentieren. Eine qualitative Studie zur Förderung der Diagnose- und Differenzierungskompetenz in der Chemielehrerbildung. Berlin: Logos Verlag.
- Peteranderl, S.; Edelsbrunner, P. A. (2020). The Predictive Value of Children's Understanding of Indeterminacy and Confounding for Later Mastery of the Control-of-Variables Strategy. In: Front. Psychol., 11, S. 1-16.
- Sander, E.; Heiß, A. (2012). Kognitiver Konflikt und Lernleistung. Untersuchungen zur Effektivität einer konfliktinduzierenden Lernsoftware. In: Psychologie in Erziehung und Unterricht, 59, S. 201-214.
- Schwichow, M.; Christoph, S.; Boone, W. J.; Härtig, H. (2016). The impact of sub-skills and item content on students' skills with regard to the control-of-variables strategy. In: International Journal of Science Education, 38(2), S. 216–237.
- Schwichow, M.; Nehring, A. (2018). Variablenkontrolle beim Experimentieren in Biologie, Chemie und Physik: Höhere Kompetenzausprägungen bei der Anwendung der Variablenkontrollstrategie durch höheres Fachwissen? Empirische Belege aus zwei Studien. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 24, S. 217–233.
- Winkens, T.; Atahan, S.; Heinke, H. (2024). Variablenkontrollstrategie: Individuelle Förderung hoch 2. In: Frühe naturwissenschaftliche Bildung. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Hamburg 2023. Hrsg. von Helena van Vorst. Duisburg-Essen.
- Winkens, T.; Heinke, H. (2023). Diagnose von Kompetenzfacetten zur Variablenkontrollstrategie. In: PhyDid B –Didaktik der Physik– Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung in Hannover, S. 177–183.

- Wodzinski R. (2016). Heterogenität im Physikunterricht. Fachdidaktische Herausforderungen. In: PLUS LUCIS, 2, S. 2-5.
- Wodzinski, C. T.; Wodzinski R. (2007). Ansätze für Differenzierung im Physikunterricht. Diagnose von Differenzen und mögliche Konsequenzen für den Unterricht. In: Naturwissenschaften im Unterricht. Physik, 18, S. 5-10.
- Zohar, A.; Aharon-Kravetsky, S. (2005). Exploring the effects of cognitive conflict and direct teaching for students of different academic levels. In: Journal of Research in Science Teaching, 42(7), S. 829-855.

eMobility for Kids - das Lernwerkstattformat für 12- bis 15-Jährige

Andreas Daberkow*, Barbara Wild⁺

*Hochschule Heilbronn, ⁺Verein Faszination Technik Heilbronn
andreas.daberkow@hs-heilbronn.de

Kurzfassung

Das elektrische Fahren leistet einen Beitrag zu einer klimaschonenden Mobilität. Viele SchülerInnen haben bislang wenig Berührung mit angewandten Lehrformaten zur Energie und Elektrizität. Dies ist die Motivation, ein praxisnahes Lehrformat zu schaffen, welches die Verbindung zu den Physik-Lehreinheiten der Schule hat. Erste Ergebnisse liegen vor und werden in diesem Beitrag vorgestellt. In 2023 wurden drei Zweitageskurse "eM4K" mit jeweils 12 SchülerInnen veranstaltet. In drei Teams baut jedes Team ein vierrädriges Elektrofahrzeug auf. Am Tag 2 des Seminars werden die selbst gebauten Fahrzeuge auf einem Geschicklichkeitsparcours selber gefahren. In begleitenden kurzen Lehreinheiten werden die Themen Fahrphysik in der Ebene (Geometrie der Kreisfahrt) sowie Elektrizität und Energie (Elektrischen Leistung und Arbeit, Praxisbezug Reichweite und Ladezeit) mit den SchülerInnen reflektiert. Das hier vorgestellte Format ist idealerweise in 2-3 Tageskurseinheiten oder 4-6 Halbtageseinheiten lehrbar. Es schlägt eine wichtige Brücke zur Anwendung "klimafreundliche Mobilität" und soll für eine Verbindung von physikalischen Grundlagen mit einer nachhaltigen Mobilität begeistern.

1. Einleitung

Das Thema Energie wurde unter dem Titel Elektrizität schon in den 70-er Jahren als Kinderbuch angeboten [1]. Neben Alltagsgeräten wie dem Elektroherd, dem Fernsehgerät oder der Batterie wird in [1] bemerkenswerterweise auch ein Beispiel zur Elektromobilität gezeigt (siehe Abb. 1).



Hier ist ein elektrischer Milchwagen. Dieser Wagen ist langsamer als normale Autos. Aber er verschmutzt die Luft nicht. Er wird über Nacht mit Elektrizität aufgeladen. Man versucht, die elektrischen Autos zu verbessern. Eines Tages werden wir nur in Elektroautos fahren.



Abb. 1: Elektromobilität im Brönnner Kinderbuch [1]

Bereits hier im Jahr 1972 wird für die Zielgruppe Kinder das elektrische Fahren als Mobilität der Zukunft beschrieben! Im Buch werden Kinder auf die Vorteile wie geringere Emissionen und das Laden über Nacht

hingewiesen aber auch auf den noch zu leistenden Entwicklungsaufwand.

Für Lehrkräfte in der Schule, im Übergang Schule-Hochschule oder auch im Prozess einer Nachwuchsgewinnung für technische Studiengänge stellt sich die Frage, wie man SchülerInnen für eine neue Mobilität begeistern kann.

1.1. Vorüberlegungen zum Lern-Lehrformat

Langjährige Erfahrungen im Autorenteam mit einer Technikausbildung für Kinder und Jugendliche zeigen, dass das eigene Ausprobieren ein erfolgreicher Weg ist, Hemmschwellen zu überwinden und sich ein Bild von der Welt der Technik zu machen. Angetriebene Fahrzeuge für Kinder weisen eine Komplexität im Aufbau und im Zusammenbau auf. Aus diesem Grund ist das Lehr-Lernformat eMobility for Kids (eM4K) bereits in der Projektgründungsphase auf den Kreis der 12- bis 15-Jährigen fokussiert (späte Kindheit mit Übergang zur Adoleszenz). Ebenso wird aus logistischen Gründen in der Startphase ein zweitägiges Format als sogenannte „Mini-Blockwoche“ in den Schulferien Baden-Württembergs beschlossen.

Gemäß den Ausführungen in [2] soll eine Vermittlung von Naturwissenschaft an die Vorstellungen anknüpfen, die die Lernenden in den Unterricht mitbringen. Ein Ziel der Lernwerkstatt ist es damit, auf den erworbenen Alltags- und Schulvorstellungen der SchülerInnen (zur Mobilität) aufzusetzen und explizit auf diesen aufzubauen, wobei die Schulbücher des Landes Baden-Württemberg hier als Referenz heran-

gezogen werden. Im Sinne eines fächerkoordinierten Unterrichts [3] ist eM4K als Praxis-Projektarbeit konzipiert mit integrierten fachlichen Unterrichtssequenzen. Die Teilnehmenden sollen für den Wert der Energie in der Mobilität sensibilisiert werden, in einer Teamarbeit Zusammenbauanleitungen selbstständig in ein Projekt „Fahrzeug“ umsetzen und erstmals mit einer praktischen und einer theoretischen Unterweisung in die Grundlagen der Fahrzeugkinematik eingewiesen werden.

Weitere Überlegungen aus den Erfahrungen der Autoren ergeben, dass ein reines Vortragsformat (Abb. 2) nur maximal zwei Stunden einer Tagesveranstaltung abdecken kann.

1.0 DAS ELEKTROAUTO – WIR FAHREN IN DIE ZUKUNFT

In einer durch Video und Exponate unterstützten Veranstaltung wird den Teilnehmern ein lebendiger Einblick in die Geschichte und in die Anwendungen der Elektromobilität gegeben. Beispiel zum Ausbau der Elektromobilität in anderen Ländern (USA, China) runden den Vortrag ab.

Lernziel <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verständnis der Geschichte der Elektromobilität ▪ Aus welchen Bauteilen besteht ein Elektroauto ▪ Was sind die Vorteile, was die Nachteile von Elektrofahrzeugen ▪ Wie kann unsere Zukunft der Mobilität aussehen 	KiGa
Veranstalter Prof. Dr. Andreas Daberkow Hochschule Heilbronn/ Verein Elektromobilität Heilbronn-Franken e.V.	Klasse 1 - 4
Termine Mai: 03./24. Sept: 11./20. Uhrzeit: 9:30 – 11:00, 11:30 – 13:00	Klasse 11 - 13

Abb. 2: Lehrformat Elektroauto für die Klassen 1-10 in schulischen Lehrveranstaltungen der Bundesgartenschau Heilbronn 2019

Selbst bei einer Integration von interaktiven Sequenzen und medialen Elementen (Videos) gelingt es den Teilnehmenden kaum länger, die Aufmerksamkeit zu bewahren, wobei sich der erlebte Alterskreis hier auf die Klassen 5 bis 10 eingependelt hat.

Alternative Formate im Computerlabor sind für den Übergang Schule-Hochschule in digitalen Physik-Aufgabenkatalogen erprobt worden [4]. Die Erfahrungen zeigen weiterhin, dass Methoden wie das forschende Lehren und Lernen eher zu Studierenden im Hochschulstudium passen. Eine Anwendung dazu als Modul in der Masterausbildung im Studiengang Elektromobilität wird in [5] beschrieben. Hier steht die Nutzung von Simulationsprogrammen zur Längsdynamik von Elektrofahrzeugen in Präsenz im Computerlabor oder im Onlineunterricht zu Hause im Vordergrund.

Als ein wichtiger Baustein im Lernwerkstattformat eM4K wird daher die Herstellung von Referenzen auf den in Schulmedien strukturierten Physikunterricht gesehen.

1.2. Lernwerkstattaufbau

Nach Vorüberlegungen wurde auf die modularen Bausätze des Herstellers infento [6] zurückgegriffen. Dieser bietet auch für den MINT-Technikunterricht

ab dem 10. Lebensjahr Bausätze für unterschiedliche Fahrzeuge an. Für die Lernwerkstatt eM4K stehen nun vier Bausätze des sogenannten elektrischen „Hot Rod Edu“ zur Verfügung (Abb. 3).



Abb. 3: Elektrofahrzeuge eM4K des Herstellers [6]

Gut erkennbar in (Abb. 3) sind beispielsweise der Rahmen, die Lenksäule sowie die Vorderachse als Baugruppen, die in den Teams parallel aufgebaut werden. Die Batterie an der Lenksäule sowie der Elektromotor am Rahmen werden in der Sequenz zum Schluss montiert. Ein Fahrzeug dient als fertiges Muster zur Orientierung während des Aufbaus und drei Fahrzeuge stehen in vorbereiteten Teileboxen als Bausätze zur Verfügung (Abb. 4).



Abb. 4: Teileboxen und Handbuch für den Fahrzeugaufbau

Erkennbar in den Teileboxen sind die Einzelkomponenten, die für SchülerInnen gut identifizierbar abgelegt sind. Ebenfalls erkennbar sind die Zusammenbauanleitungen zum baukastenorientierten Aufbau der Fahrzeuge. In drei Teams zu je vier SchülerInnen werden dann die Fahrzeuge in den zwei Tagen aufgebaut. Jedes Team wird durch drei Studierende als Mentoren unterstützt, zwei Mitarbeiter der Hochschule stehen zusätzlich für organisatorische Aufgaben zur Verfügung. Sie führen begleitende Vorlesungseinheiten im Schülerlabor durch und achten insbesondere auf die Kompetenzentwicklung der SchülerInnen in den Feldern Kommunizieren und Kooperieren als Teil einer Problemlösung. Die Lernwerkstatt wird in den Räumen der Hochschulmensa durchgeführt, welche in den ausgewählten Ferienwochen nicht vollständig belegt ist, die Probefahrten werden bei guten Wetter draußen auf dem Hochschulgelände und bei Regen im Gebäude durchgeführt.

2. Durchführung der Lernwerkstatt

Im Jahr 2023 wurde die Lernwerkstatt eM4K drei Mal durchgeführt, im Jahr 2024 sind ebenfalls drei Termine geplant. Die aktuelle Aufteilung des Formates (Tab. 1) startet am Tag 1 mit dem Aufbau der Teileboxen und des Musterfahrzeuges am Veranstaltungsort.

Tab. 1: Zeitablauf Lernwerkstatt eM4K

Nr	Zeitplanung	Aufgaben
1	8:30 Vorabtreffen Tag 1	Logistik Teileboxen, Musterfahrzeug mit Aufbau in Mensa
2	9:30 Kursbeginn Tag 1	Start Mensa, dann Wechsel Schülerlabor mit Lehrbeitrag "Geschichte der Elektromobilität"
3	10:00 Start Bau Tag 1	Gemeinsames Bauen der Baugruppen bis Mittagspause
4	12:30 Mittagspause Tag 1	Mensa
5	13:15 Vorlesung Tag 1	Schülerlabor Vorlesung "Fischertechnik + Fahrdynamik" mit Eigenbauexperiment
6	14:00 Weiter Bau Tag 1	Mensa, Fertigstellung der Baugruppen, Start Baugruppenmontage
7	15:30 Ende Tag 1	ca. Ende Tag 1
8	9:00 Vorabtreffen Tag 2	In der Mensa, Eintreffen der Schüler
9	9:30 Kursbeginn Tag 2	Wechsel Schülerlabor mit Lehrbeitrag "Antrieb, Leistung, Laden" und Eigenexperiment
10	10:15 Weiter Bau Tag 2	Gemeinsames Weiterbauen Mensa bis Mittagspause, erste Fahrzeuge sind fertig
11	12:30 Mittagspause Tag 2	Mensa
12	13:15 Bau/Fahren Tag 1	Fertigbauen aller Fahrzeuge, danach gemeinsamer Aufbau des Parcours
13	14:00 Fahren	Geschicklichkeitsparcours mit Einparken und Rückwärtsfahrt jeweils vom Team
14	15:30 Ende Tag 2	ca. Ende, ggf. gemeinsamer Abbau der Fahrzeuge, je nach Schnelligkeit der Teams

Ein wichtiger Baustein im Format ist die sogenannte Schülerwerkstatt. In diesem separaten Veranstaltungsraum findet die Einführungsvorlesung zur „Geschichte der Elektromobilität“ statt (Nr. 2), das Vorlesungselement zur vereinfachten „Fahrzeugkinematik“ (Nr. 5) sowie die Vorlesung zum Thema „Leistung, Energie und Laden“ (Nr. 9). Eine Impression zum betreuten Fahrzeugaufbau zeigt die Folgedarstellung (Abb. 5).



Abb. 5: Impressionen zum studentisch betreuten Fahrzeugaufbau

Hier betreut eine Studierende das Team von vier Teilnehmenden. Am Tag 2 werden die Fahrzeuge aus den Baugruppen fertigmontiert und mit Antrieb und Batterie versehen. Auch der Aufbau des Parcours ist eine

Aufgabe der Teams, sei es als Geschicklichkeitsparcours zum Einparken oder auch die längere Fahrmöglichkeit draußen (Abb. 6).



Abb. 6: Fahrparcours Lernwerkstattformat eM4K

Es zeigt sich, dass die SchülerInnen beim Aufbau der Fahrzeuge vor Engagement kaum zu bremsen sind. Ein Wechsel in das Schülerlabor gelingt eigentlich nur zum Start oder nach der Mittagspause.

Auch das Automobil kann in Grenzen einer Kreislaufwirtschaft zugeführt werden. Hier in der Lernwerkstatt eM4K lernen die Teilnehmenden, dass die Abfallproduktion beim Zusammenbau der Lernwerkstattfahrzeuge minimal ist. Alle Fahrzeuge können aufgrund ihrer Konstruktion und der Werkstoffe komplett zurückgebaut werden. Erlebt wurde, dass die SchülerInnen diesen Rückbau inkl. Ablage in den Teileboxen ebenfalls mit Begeisterung durchführen und so eine Kreislaufwirtschaft selbst erleben. Die Rückbauphase dient auch als zeitlicher Puffer bei Aufbauverzögerungen oder für den Transfer der Kinder aus der Hochschule.

3. Schulbuchkontext

Als Basisinformation zur Referenzierung der Lernwerkstattinhalte wird hier der im Jahr 2022 aktualisierte Bildungsplan des Landes Baden-Württemberg für Gymnasien herangezogen [7]. Dieser Bildungsplan ist auch in zugelassenen Schulbüchern [8], [9] des Landes implementiert.

3.1. Kinematik der Kreisfahrt

Im Schulbuch Universum Physik 7/8 für die Schulklassen 7 bzw. 8 findet sich angelehnt an [7] die Kompetenz, „Bewegungen verbal und mithilfe von Diagrammen zu beschreiben und zu klassifizieren (Zeitpunkt, Ort, Richtung, Form der Bahn, Geschwindigkeit)“ [7]. Hier wird eine Bewegung in der Kreisbahn nur am Rande erwähnt. Für die Klassenstufen 9/10 wird dies dann ergänzt als die in [7] definierte Fähigkeit, „gleichförmige Kreisbewegungen mit Radius und Bahngeschwindigkeit“ beschreiben zu können.

In [9] finden sich dazu ein Kapitel zur Kreisbewegung unter Erwähnung der Begriffe Bogenradius und Winkelgeschwindigkeit.

Im Zeitablauf der Lernwerkstatt behandelt die Nr. 5 einfache geometrische Zusammenhänge in der Fahrdynamik. Als Laborexperiment im Schülerlabor baut jeder Teilnehmende aus Bauteilen eine sogenannte Drehschemel-Lenkung auf, ein Lenkprinzip welches Kinder in ihrem Alltag als Handwagen in der Regel erfahren haben (Abb. 7).

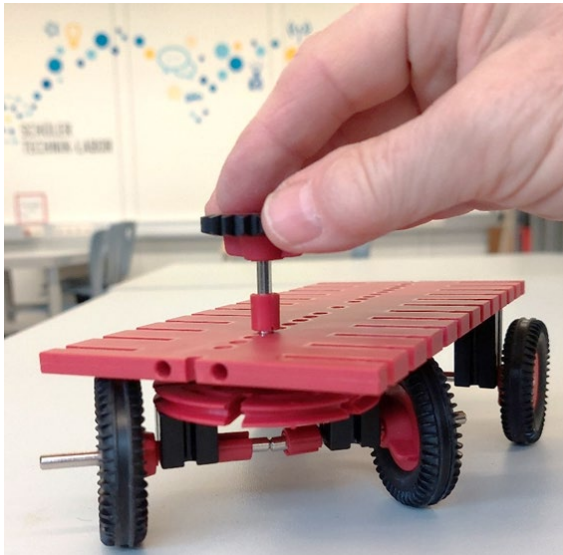


Abb. 7: Selbstbausatz zum Handwagen

Mit diesem Handwagen können die Teilnehmenden dann Kreisbögen einstellen und einfache Fahrversuche auf den Schülerlabortischen selber durchführen. Eine erste theoretische Erweiterung zum selbstgebauten vierrädrigen infento-Werkstattfahrzeug ist das sogenannte Einspurmodell der Fahrdynamik, siehe z.B. [10]. Dieses erlaubt, das einfache Lenkprinzip des Handwagens für kleine Geschwindigkeiten auf vierrädrige Fahrzeuge zu erweitern (Abb. 8).

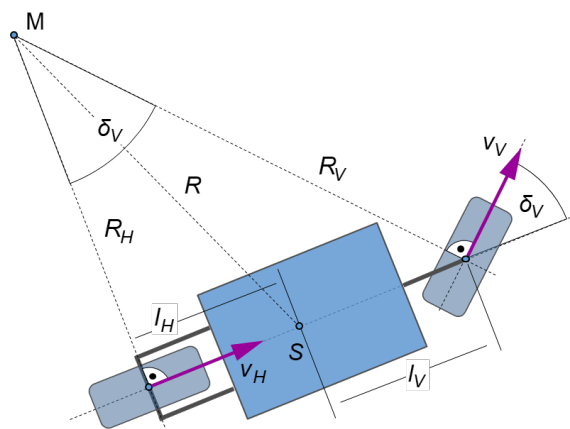


Abb. 8: Einspurmodell der Fahrzeugdynamik

Das Einspurmodell ist ein vereinfachtes ebenes Modell, in dem sowohl die Räder der gelenkten Vorderachse (Index V , Lenkwinkel δ_V) als auch die Räder der Hinterachse (Index H) jeweils zu einem Rad zusammengefasst werden. Vom Kreismittelpunkt M ergeben sich unterschiedliche Bogenradien R_H , R und R_V .

Die SchülerInnen werden daran erinnert, dass die vektoriellen Geschwindigkeiten v_V und v_H tangential zur Kreisbahn sind („Geschwindigkeitspfeil“ [9]). Über den Abstand des Fahrzeug Bezugspunktes S und die Abstände zur Vorder- und Hinterachse l_V bzw. l_H lässt sich eine Beziehung zwischen dem Lenkwinkel, den Bogenradien und der Fahrzeuggeometrie herstellen.

Erste Erfahrungen mit dieser Lerneinheit zeigen, dass SchülerInnen im Alter von 15 Jahren den Bezug auch mit der trigonometrischen Beziehung herstellen können. Die weiteren Kurse müssen zeigen, wie groß diese Gruppe der SchülerInnen sein wird. Der Bezug zwischen Lenkwinkel, Fahrzeuggeometrie und Kreisbogenradius lässt sich am selbstgebauten infento-Fahrzeug selbst mit einem Zentimetermaß übertragen.

3.2. Leistung und Energie

Im Schulbuch Universum Physik 7/8 [8] für die Schulklassen 7 bzw. 8 findet sich auch die Kompetenz, dass SchülerInnen „den Energietransport im elektrischen Stromkreis und den Zusammenhang zwischen Stromstärke, Spannung, Leistung und Energie beschreiben können“ und „physikalische Angaben auf Alltagsgeräten beschreiben können (Spannung, Stromstärke, Leistung)“. Ebenso wird erwartet, dass SchülerInnen „den formelmäßigen Zusammenhang von Energie und Leistung $P = \Delta E / \Delta t$ “ sowie „die Größenordnungen typischer Leistungen im Alltag“ beschreiben bzw. ermitteln können [7]. Das Schulbuch [8] zeigt beispielsweise einen Versuch zum Thema Leistung und Energie von Geräten (Abb. 9).



Abb. 9: Versuch zur Messung von Leistung und Energie eines Elektrogerätes aus Physik-Schulbuch [8]

Als Material wird den SchülerInnen ein Energiemessgerät, eine geeignete Steckdose und ein Elektrogerät (hier Wasserkocher) empfohlen.

Im Zeitablauf der eM4K-Lernwerkstatt wird dies durch die Nr. 9 abgebildet. Die Aufgabe in der Schülerwerkstatt ist es, aus dem zeitlichen Verlauf der gemessenen Leistung beim Laden der infento-Fahrzeugbatterie die Energie zu bestimmen (Abb. 10).

Diese Bestimmung kann grafisch erfolgen durch eine Zerlegung der Fläche in Rechtecke mit nachfolgender

Aufsummierung. Diese Aufgabe liefert dann die Erkenntnis, dass es immer eine Energieentwertung beim Laden einer Batterie gibt, diese Energieentwertung von der Qualität der Bauteile abhängt und dass diese als Wirkungsgrad in einer Gesamtenergiebilanz berücksichtigt werden muss.

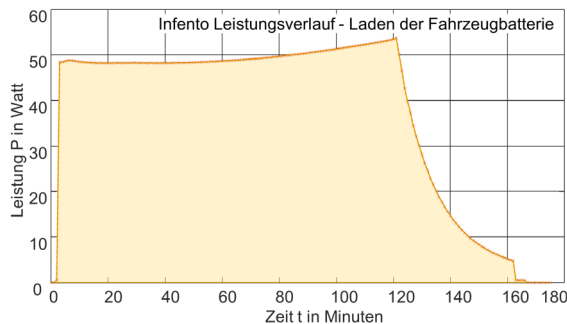


Abb. 10: Vorlage zur grafischen Bestimmung der Energie aus dem zeitlichen Verlauf der Leistung

Ebenso wird der im heutigen Mobilitätsalltag gebräuchliche Begriffe der „Ladedauer“ veranschaulicht, im Bildungsplan [7] sind die Begriffe „Reichweite“ und „Ladedauer“ nicht erwähnt.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Das Lernwerkstattformat eM4K wurde in 2023 und auch im ersten Kurs des Jahres 2024 mit Erfolg durchgeführt. Nahezu alle SchülerInnen wurden begeistert beim Aufbau der Fahrzeuge, bei den Schülerlabor-Lehreinheiten, beim Ausprobieren und beim Rückbau der Fahrzeuge erlebt. Aus der Sicht des betreuenden Hochschulteams können die Erfahrungen wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Zahl der zu betreuenden Teams mit vier Mitgliedern pro Fahrzeug wird wegen der Erhöhung des Betreuungsaufwandes nicht weiter erhöht werden (bisher drei Lernwerkstattfahrzeuge).
- Insbesondere für das Fahren der Fahrzeuge ist Platz vorzusehen, bei schlechtem Wetter auch innen. Ein weiterer Platzbedarf entsteht für das Lagern der Teileboxen zwischen den Kursen.
- Auch für betreuende Studierende ist die Werkstatt ein Erfolg, da bei diesen die Kompetenzen Kommunikation und Betreuung gefördert werden.
- Das Teilnehmeralter sollte nicht reduziert werden, um eine Überforderung zu vermeiden. Alle Teilnehmenden konnten Schraubenschlüssel, Aluminium-Profile und Normteile gut handhaben. Das Teilnehmeralter wird auch als entscheidend gesehen, um doch noch eine Studiums-Entscheidung zum Umfeld MINT zu beeinflussen.
- Die SchülerInnen fanden es besonders interessant, die Produktion, Nutzung und auch das Recycling eines Fahrzeugs im „Zeitraffer“ der zwei Tage zu erleben – alle drei Prozessschritte dauern im automobilen Produktentstehungsprozess Jahre.

Den weiteren Ausbau der Lernwerkstatt sollen die Erfahrungen in den Kursen 2024 zeigen.

Denkbar wäre beispielsweise eine Ergänzung des bisherigen aufgebauten Musterfahrzeuges durch einen sogenannten „Digitalen Zwilling“, der mit Hilfe von Computer-Aided-Design Systemen in 3D am Computer verfügbar ist. Ebenso wären Teamexperimente vorstellbar, die einen Umgang mit Kennlinien für Motormoment und Drehzahl für die elektromechanischen Begriffe von Leistung und Energie zeigen.

5. Literatur

- [1] Meine erste Bücherei - 38 Elektrizität (1972): Brönnner, Frankfurt am Main
- [2] Gebhard, Ulrich; Höttecke, Dietmar; Rehm, Markus (2017): Pädagogik der Naturwissenschaften. Springer Fachmedien, Wiesbaden
- [3] Wilhelm, Thomas; Schecker, Horst; Hopf, Martin (2021): Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht. Springer, Berlin
- [4] Daberkow, Andreas; Pitsch, Stephan; Löffler, Axel; König-Birk, Juliane; Kurz, Günther; Wegendt, Kirsten; Hehl, Karin (2024): Freie digitale Lern- und Lehrmaterialien für die Grundlagenphysik – ein Werkstattbericht. In: MNU-Journal 2024(1), S. 8-13
- [5] Daberkow, Andreas (2020): Ein exploratives Lehrformat zur Elektromobilität im Kontext des forschungsorientierten Lernens. In: Zeitschrift für Hochschulentwicklung, 2020, 15. Jg., Nr. 2, S. 209-222
- [6] Homepage der Infento B.V.: <https://www.infento.com/de/> (Stand 05/2024)
- [7] Bildungsplan Baden-Württemberg des Gymnasiums Physik - überarbeitete Fassung vom 25. März 2022: <https://www.bildungsplaene-bw.de/,Lde/LS/BP2016BW/ALLG/GYM/PH.V.2> (Stand 05/2024)
- [8] Brand, Ruben; Kasper, Lutz; Kienle, Reiner; Pardall, Carl-Julian; Rager, Bruno; Ronellenfitch, Stefan; Wienbruch, Ursula (2016): Universum Physik Baden-Württemberg 7/8. Cornelsen, Berlin
- [9] Bogenberger, Benedict; Brand, Ruben; Hasler, Werner; Kasper, Lutz; Kienle, Reiner; Küblbeck, J.; Pardall, Carl-Julian; Rager, Bruno; Ronellenfitch, Stefan; Wienbruch, Ursula (2018): Universum Physik Baden-Württemberg 9/10. Cornelsen, Berlin
- [10] Mitschke, Manfred; Wallentowitz, Henning (2004): Dynamik der Kraftfahrzeuge. Springer, Berlin

Danksagung

Das Hochschulteam dankt dem Fundraising der Hochschule Heilbronn und der Heilbronner Bürgerstiftung für die Projektunterstützung sowie dem Cornelsen Verlag für die überlassenen Schulbücher und die Genehmigung zum Abdruck der Schulbuchfotografie.

Entwicklungsvalidierung von Anleitungen zum selbstständigen Arbeiten im Physikunterricht

Roland Berger*, Maria Danzglock⁺, Martin Hänze⁺

*Universität Osnabrück, Barbarastraße 7, 49076 Osnabrück

⁺Universität Kassel, Holländische Straße 36-38, 34127 Kassel

r.berger@uos.de

Kurzfassung

Die Entwicklung von hochwertigen schriftlichen Anleitungen zum selbstständigen Arbeiten im Physikunterricht ist herausfordernd. Denn die Anleitungen sollten so gestaltet werden, dass es zu keinem Abbruch der Lernbemühungen kommt, sondern eine fokussierte Verarbeitung der Lerninhalte unterstützt wird. In einem Forschungsprojekt zum Erlernen der Dreifingerregel explorierten Schülerinnen und Schüler der 12. Jahrgangsstufe die Bewegung von Ladungsträgern in Magnetfeldern mithilfe eines Computerspiels anhand einer schriftlichen Anleitung. Die Anleitung wurde in zwei Schritten validiert. Im ersten Schritt wurden 14 Paare von Schülerinnen und Schülern beim Explorieren teilnehmend beobachtet. Dabei wurden schwierigkeiterzeugende Merkmale der Anleitung registriert, und die Anleitung auf dieser Grundlage fortlaufend weiterentwickelt. Im Rahmen einer quantitativen Studie ($N = 75$) wurde in einem zweiten Schritt gezeigt, dass die finale Form der Anleitung zum erfolgreichen Entdecken der Dreifingerregel geeignet ist. Dieser Ansatz zur Validierung von Anleitungen könnte auch in anderen Lernumgebungen hilfreich sein, die auf selbstständiger Arbeit der Lernenden basieren, zum Beispiel bei der Entwicklung von Anleitungen für Schülerversuche.

1. Hintergrund

Schriftliche Anleitungen haben große Bedeutung für das Lernen im naturwissenschaftlichen Unterricht. Hierzu gehören zum Beispiel das angeleitete Experimentieren oder das Lernen mit Computerspielen. Entscheidend für den Lernerfolg ist dabei die Qualität der schriftlichen Anleitungen. Durch sie sollte die Aufmerksamkeit der Lernenden auf die zentralen Konzepte und Prinzipien gelenkt, und so deren fokussierte Verarbeitung unterstützt werden (Renkl, 2015).

Um die Qualität von schriftlichen Anleitungen sicherzustellen, ist deren Evaluation wichtig. Der Begriff der „Entwicklungsvalidierung“ („developmental validity“) erscheint in diesem Zusammenhang hilfreich. Er ist in der Lehr-Lern-Forschung allerdings kaum gebräuchlich, wird aber in der professionellen Fortbildung und der Produktentwicklung intensiv genutzt. Dort findet man folgende Definition: „Die Entwicklungsvalidierung dient der Feststellung, ob das resultierende Produkt in der Lage ist, die Anforderungen für den festgelegten oder beabsichtigten Gebrauch zu erfüllen“ (Falk, 2017).. Der im Bereich der Sozialarbeit forschende Edwin J. Thomas erläutert den Begriff der Entwicklungsvalidierung folgendermaßen: „Interventions that have developmental validity have been evolved

by means of developmental processes that increase the likelihood that the innovations will be reliable and will not have to be redesigned to achieve the objectives of the intervention.“

Eine unterrichtsnahe Konzipierung des Begriffs der Validität im Hinblick auf Testinstrumente wird von Pellegrino, DiBello und Goldman (2016) vorgeschlagen. Das Konzept basiert auf den Arbeiten von Messick (1995) sowie Kane (1992, 2013), betont aber stärker die Wechselwirkung von Testinstrumenten mit dem Lehren und Lernen im Unterricht. Das Ausmaß an Überschneidung von unterrichtlichem Inhalt und Testinhalt ist durch das Ausmaß an Nutzung passender Lerngelegenheiten gegeben. Diese Überlegungen machen deutlich, dass Validität nicht als Eigenschaft eines Testinstruments aufgefasst werden sollte, sondern durch eine Wechselwirkung mit dem Unterricht zu beschreiben ist, in dem die entsprechenden Kompetenzen vermittelt werden sollen. In diese moderne Interpretation des Begriffs Validität kann die fachdidaktische Auffassung von „Entwicklungsvalidität“ von Unterrichtsmaterialien sinnvoll eingeordnet werden.

Pellegrino et al. fokussieren zwar auf die Validierung von Tests („assessment“). Im Sinne von „Entwicklungsvalidierung“ nutzen wir sinnvollerweise deren Begrifflichkeit aber auch für die Validierung

von Unterrichtsmaterialien wie z. B. schriftliche Anleitungen für das selbstständige Lernen. Zentrale Elemente von Validität sind nach Pellegrino et al. die kognitive Validität sowie die instruktionale Validität. Kognitive Validität meint zunächst die Übereinstimmung von im Unterricht intendierten kognitiven Prozessen mit denjenigen beim Bearbeiten von zugehörigen Testaufgaben. In Bezug auf das Lernen basierend auf schriftlichen Anleitungen erscheint es daher wichtig zu zeigen, dass die intendierten kognitiven Prozesse tatsächlich durch die Lernumgebung – z.B. einem Computerspiel mit der zugehörigen schriftlichen Anleitung – angeregt werden. Instruktionale Validität ist ein Maß dafür, inwieweit ein Testinstrument sensitiv für die unterrichtlichen Lernziele ist (Yoon & Resnick, 1998). Dem entsprechend wird dieser Aspekt von Validität oft auch als Instruktionssensitivität bezeichnet (Polikoff, 2010). Nach Polikoff basiert ein Argument für Instruktionssensitivität auf dem Befund, dass sich das Lernen mit schriftlichen Anleitungen in einer höheren Testleistung im Vergleich zu einem Vortest widerspiegelt.

Im Folgenden werden zwei Studien vorgestellt, die im Rahmen der Entwicklungsvalidierung einer schriftlichen Anleitung zum geleiteten Entdecken (guided discovery; Lavine, 2012) der Dreifingerregel mithilfe eines computerbasierten Lernspiels durchgeführt wurden. Daher soll das Computerspiel mithilfe von Abbildung 1 zunächst kurz beschrieben werden. Beim Computerspiel „E-Raser“ geht es darum, in einem Magnetfeld von einem Raumschiff aus mithilfe geladener Geschosse Meteoriten abzuschießen, welche die Erde bedrohen. Diese Spielidee soll ein qualitatives Verständnis der Lorentzkraft mithilfe der Dreifingerregel fördern.

2. Studie 1: Kognitive Validierung

Im Rahmen einer teilnehmenden Beobachtung (Schönhagen, 2021) hat der Erstautor 14 Schülerpaare beim Arbeiten mit einer Anleitung zur Entdeckung der Dreifingerregel mit dem Computerspiel beobachtet. Immer dann, wenn Schülerinnen oder Schüler beim Spielen in eine „Sackgasse“ gerieten, wurden Feldnotizen angefertigt, um die Schwierigkeit möglichst genau beschreiben zu können. Als Indikatoren für das Erreichen einer Sackgasse wurde der Abbruch der Lernbemühungen, eine entsprechende Äußerung wie „Wir wissen nicht weiter!“ oder das Beschreiten von Abwegen (z.B. die sinnlose Anwendung der Dreifingerregel auf die Bewegung parallel zum Magnetfeld) gewertet. Auf dieser Basis entstand eine tabellarische Übersicht, welche die

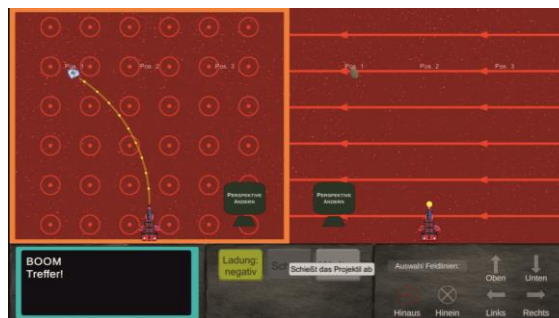


Abb. 1: Computerbasiertes Lernspiel „E-Raser“. Ziel des Spieles ist, von einem Raumschiff aus mit elektrisch geladenen Geschossen Meteoriten abzuschießen, die sich in einem Magnetfeld befinden. In der durch einen orangenen Rahmen hervorgehobenen aktiven Spielsituation links ist die Bahn des negativ geladenen Geschosses gelb dargestellt. Die Ablenkung erfolgt durch die Lorentzkraft im Magnetfeld. Das Vorzeichen der Ladung der Geschosse kann mit dem gelben Button geändert werden. Außerdem kann die Richtung des Magnetfelds rechts unten ausgewählt werden. Dies ermöglicht den Vergleich der Wirkung zweier unterschiedlich gerichteter Magnetfelder auf die Bewegung geladener Geschosse in den Spielsituationen links bzw. rechts.

Art der „Sackgasse“ und die getroffenen Schlussfolgerungen für die Überarbeitungen der Anleitung enthält (Abbildung 2).

In der linken Spalte 1 steht die Nummer des jeweils beobachteten Schülerpaares sowie das Datum der Beobachtung. In Spalte 2 ist die Version der verwendeten Anleitung zu sehen. In den Spalten 3 und 4 sind die Beschreibungen der Sackgassen sowie die Schlussfolgerungen für die Überarbeitungen der Anleitungen knapp zusammengefasst.

Zunächst war geplant, die Anleitung mit der Hälfte der Schülerpaare unverändert zu testen, und mit der zweiten Hälfte eine Revision der Anleitung. Die Art der auftretenden Schwierigkeiten hat es aber in der Regel als sinnvoll erscheinen lassen, die entsprechende Überarbeitung unverzüglich vorzunehmen, und mit dem nächsten Schülerpaar zu erproben. Insgesamt wurden somit neun verschiedene Fassungen der schriftlichen Anleitung eingesetzt, bevor die finale Version formuliert wurde. Zur Illustration werden im Folgenden einige zentrale Änderungen an der schriftlichen Anleitung beschrieben.

Bereits in der Version 2 wurde die Anleitung in zwei Teile aufgeteilt, und zeitversetzt administriert. Im ersten Schritt (Phase der Exploration) wurde die Erkundung der Bewegung von Ladungsträgern in Magnetfeldern angeregt (Abbildung 3). Die finale Form der Anleitung für den zweiten Schritt (Phase der Explanation) ist in Abbildung 4 zu sehen.

Paar (Datum)	Version Anleitung	Beschreibung der "Sackgasse"	Schlussfolgerungen für die Überarbeitung
1 (5.6.23)	V1	Funktion 3. Finger? – Hinweis auf Zuordnung der Finger	<ul style="list-style-type: none"> Am Anfang Info über Finger (welche; senkrecht)? Begriffe DFR/LK am Anfang noch nicht nennen?
2 (5.6.23)	V1	<ul style="list-style-type: none"> Völlig falscher Ansatz mit den Fingern Mit paralleler Bewegung ins Abseits 	<ul style="list-style-type: none"> Nennung DFR nicht am Anfang Anleitung in 2 Phasen aufgeteilt
3 (6.6.23)	V2	keine (da schnell richtige Finger verwendet)	
4 (6.6.23)	V2	keine	
5 (7.6.23)	V2	keine	Sollte "Senkrechtstehen" mitgeteilt werden?
6 (9.6.23)	V3	Fehlvorstellung bis zum Schluss: "je nach Richtung (wie im elektrischen Feld) mit positiven bzw. negativen Ladungen schießen"	Zuordnung der Finger unklar
7 (12.6.23)	V4	Schüler arbeiten sich an paralleler Richtung ab; mit Hilfen aus Sackgasse heraus	<ul style="list-style-type: none"> Parallele Bewegung schwierig Begriff "Richtung der Bewegung"
8 (15.6.23)	V5	keine	Nennung der drei Finger (Daumen etc.) nicht notwendig (Diskussion)
9 (18.6.23)	V6	Parallele Bewegung – kommen selbst aus Sackgasse: Regel "außer Kraft gesetzt"	
10 (16.6.23)	V 6	<ul style="list-style-type: none"> Nutzen nicht die eigenen Finger ("Hat DFR mit Fingern zu tun?); nach Hinweis spontan richtige Finger Sackgasse "Parallele Bewegung"; meine Hilfe, dass DFR dafür nicht nötig 	Parallele Bewegung war oft schwierig, daher in Anleitung V7 explizit hervorgehoben. V7 wurde nochmal wesentlich verändert und als V8 dann bei Dyade 11 eingesetzt. Hinweis auf "eigene Finger" in V10
11 (26.6.23)	V8	Lernschwierigkeiten u.a.: "Richtung der Kraft: Magnetfeld oder Bewegungsrichtung?" führt in Sackgasse –Hilfe: ich zeige Fingerhaltung	Richtung der Geschwindigkeit muss explizit und zusammenhängend geschrieben werden (in V9 umgesetzt)
12 (26.6.23)	V8	Sackgasse: „Was heißt: „stehen paarweise senkrecht aufeinander?“ –kommen nicht heraus	"senkrecht" in V10 durch "Winkel von 90 Grad" ersetzt
13 (27.6.23)	V9	Schulervorstellung: Beeinflussung des Meteoriden durch Magnetfeld (wird aber selbstständig verworfen)	keine wesentlichen Schwierigkeiten
14 (27.6.23)	V9	Begriff "senkrecht" schwierig ("Gegenteil von Waagrecht")	

Abb. 2: Überblick über die Ergebnisse der kognitiven Validierung. Insgesamt wurden 14 Paare beobachtet (Spalte 1). Die Beschreibung der „Sackgasse“ (Spalte 3), und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen für die Überarbeitungen der schriftlichen Anleitungen (Spalte 4) führten zu einer fortlaufenden Überarbeitung und Anleitungen mit zunehmender Versionsnummer (Spalte 2). Zur Farbmarkierung: Die Dreifingerregel wurde entdeckt (grün), teilweise entdeckt (gelb) bzw. nicht entdeckt (rot).

Wie bewegt sich ein Ladungsträger im Magnetfeld?

Erkunden Sie mithilfe des Lernprogramms die Bewegung von Ladungsträgern im Magnetfeld. Verändern Sie dazu systematisch die Richtung des Magnetfelds und beobachten sie jeweils den Einfluss auf die Bahn des Ladungsträgers. Notieren Sie für alle Richtungen des Magnetfelds Ihre Ergebnisse zum Beispiel in Form von „Wenn – Dann“ – Regeln oder skizzieren Sie die Feldlinien und Bahnen. Diese Aufzeichnungen können Sie später noch gebrauchen.

Sie sind fertig, wenn Sie für jede Richtung des Magnetfelds vorhersagen können, wie sich ein Ladungsträger bewegen wird. Prüfen Sie dies an einigen Beispielen.

Melden Sie sich anschließend, um weitere Informationen zu erhalten.

Abb. 3: Finale Form der Anleitung für die erste Phase (Exploration)

Wie kann man die Richtung der Kraft im Magnetfeld vorhersagen?

Wie Sie bereits wissen, wird eine Ablenkung eines Objekts von einer geraden Bahn immer durch eine Kraft verursacht. Wenn ein bewegter Ladungsträger im Magnetfeld abgelenkt wird, dann wird dies durch die so genannte „Lorentz-Kraft“ verursacht. Um die Richtung der Lorentz-Kraft vorhersagen zu können ist es nützlich, mehrere Möglichkeiten in einer gemeinsamen Regel zusammenzufassen. Diese Regel wird als „Drei-Finger-Regel“ bezeichnet.

Wir unterscheiden zwei Fälle:

1) Bewegung parallel zum Magnetfeld.

Wie Sie in Ihren Erkundungen wahrscheinlich festgestellt haben, werden Ladungsträger bei der Bewegung parallel zu den Magnetfeldlinien nicht abgelenkt. Auf diese Ladungsträger wird keine Lorentz-Kraft ausgeübt. Für die Bewegung parallel zum Magnetfeld brauchen wir also keine Regel.

2) Bewegung senkrecht zum Magnetfeld.

Finden Sie die Drei-Finger-Regel auf der Grundlage Ihrer bisherigen Erkundungen heraus. Dazu ordnen Sie drei Ihrer Finger jeweils eine der folgenden physikalischen Größen zu:

- die Richtung der momentanen Geschwindigkeit eines Ladungsträgers.
- die Richtung des Magnetfelds und
- Die Richtung der Lorentz-Kraft,

Hinweis: Diese drei Richtungen schließen paarweise einen Winkel von 90 Grad ein.

Erarbeiten Sie die „Drei-Finger-Regel“ mithilfe des Lernspiels.

Abb. 4: Finale Form der Anleitung für die zweite Phase (Explanation). Farblich markiert sind Änderungen gegenüber früheren Versionen der Anleitung. Diese sind im Text erläutert.

Um die Entwicklung der schriftlichen Anleitungen zu illustrieren, gehen wir exemplarisch auf drei ausgewählte Änderungen gegenüber Vorgängerversionen ein. Diese sind in Abbildung 4 farblich hervorgehoben.

- 1) Gelb markiert ist die explizite Trennung der Bewegungen parallel (1) bzw. senkrecht (2) zum Magnetfeld ab der Anleitungsversion V7 (vgl. Abbildung 2, Spalte 2). Hintergrund ist die Beobachtung, dass Schülerpaare intensiv versuchten, auch die Bewegung parallel zu den Magnetfeldlinien in die Regel für die ablenkende Lorentzkraft zu integrieren. Dies ist jedoch nicht sinnvoll, da bei der Bewegung parallel zum Magnetfeld keine Kraft auf Ladungsträger ausgeübt wird. Dieser Abweg führte teilweise dazu, dass das eigentliche Ziel, die Dreifingerregel für die Richtung der Kraft auf Ladungsträger bei der Bewegung senkrecht zu den Magnetfeldlinien zu finden, völlig aus dem Blick geriet.
- 2) In den ersten Anleitungsversionen wurde der Begriff der „Bewegungsrichtung“ verwendet. Dieser Begriff wurde von Schülerinnen und Schülern teilweise als „Abschussrichtung“ in-

terpretiert. Um dem zu begegnen, wurde ab Anleitungsversion V9 der etwas sperrige Begriff der „Richtung der momentanen Geschwindigkeit“ verwendet (in Abbildung 4 grün hervorgehoben). Die abschließende Diskussion mit zwei Schülerpaaren legt nahe, dass dieser Begriff wie intendiert so verstanden wird, dass sich die Richtung der Geschwindigkeit auf der Bahn fortlaufend ändert.

- 3) Als sich in Diskussionen mit Schülerpaaren herausstellte, dass der Begriff „senkrecht“ teilweise als das „Gegenteil von waagrecht“ interpretiert wird, wurde in der Anleitungsversion V9 nicht mehr die Formulierung „stehen senkrecht aufeinander“ sondern „schließen einen Winkel von 90 Grad ein“ verwendet (blau markiert in Abb. 4).

Diese drei Beispiele sollen die wichtige Funktion der kognitiven Entwicklungsvalidierung demonstrieren. In den drei Fällen gerieten zentrale Lernziele aus dem Blick, die Lernbemühungen verliefen daher auf Abwegen oder wurden sogar ganz eingestellt. Die entsprechenden Überarbeitungen führten zu einer finalen Fassung der schriftlichen Anleitung, die eine fokussierte Verarbeitung im Hinblick auf das zentra-

le Lernziel des Entdeckens der Dreifingerregel besser unterstützt (Renkl, 2015).

3. Studie 2: Instruktionale Validierung

Die auf der Basis von Studie 1 entwickelte finale Form der in zwei Schritten administrierten schriftlichen Anleitung wurde in Studie 2 zur instruktionalen Entwicklungsvalidität genutzt um zu prüfen, ob die Instruktion mithilfe des Computerspiels geeignet ist, einschlägige Testaufgaben zur Bewegung von Ladungsträgern in Magnetfeldern zu lösen – mit anderen Worten wurde die Instruktionssensitivität getestet.

75 Schülerinnen und Schüler aus vier Physik-Kursen der 12. Jahrgangsstufe bearbeiteten dazu vier Transfer-Aufgaben zur Bewegung von Ladungsträgern in Magnetfeldern aus einem Standardtest (Berger, Kulgemeyer & Lensing, 2019; Aufgaben 3c, 4b und 5a sowie einer weiteren Aufgabe zur Bewegung parallel zu einem magnetischen Feld). Diese Aufgaben dienten als Vor- und Nachtest für die Instruktion mithilfe des Computerspiels basierend auf der finalen Form der zweiphasigen schriftlichen Anleitung (vgl. Abbildungen 3 und 4). Die Instruktionssensitivität wird häufig mittels des Pretest-Posttest-Difference Index (PPDI; Polikoff, 2010) erfasst. Im Durchschnitt wurden im Vortest 6% der Aufgaben richtig gelöst und im Nachtest 36%. Der Zuwachs ist statistisch signifikant ($F(1, 73) = 62, p < .001$) bei großer Effektstärke (Cohen's $d = 1.2$). Darüber hinaus konnte etwa die Hälfte der Schülerinnen und Schüler in einer Reproduktionsaufgabe zur Dreifingerregel einem Foto der linken Hand Daumen, Zeigefinger und Mittelfinger den entsprechenden physikalischen Größen korrekt zuordnen. Diese Ergebnisse zeigen, dass die schriftliche Anleitung grundsätzlich geeignet ist, das zentrale Lernziel der Instruktion zu erreichen.

4. Diskussion

Im Beitrag wurde exemplarisch gezeigt, wie auf der Basis einer schriftlichen Anleitung zum Lernen der Dreifingerregel mithilfe eines computerbasierten Lernspiels die Entwicklung der zugehörigen schriftlichen Anleitung validiert werden kann. Dazu wurde das Konzept der „Entwicklungsvalidierung“ von Unterrichtsmaterialien zugrunde gelegt. Entsprechend des Validitätskonzepts von Messick und Kane geht es bei der Entwicklungsvalidierung grundsätzlich darum, empirische Argumente dafür zu finden, dass Unterrichtsmaterialien die intendierten Zwecke erfüllen.

In einem ersten Schritt wurde dazu die kognitive Validität der schriftlichen Anleitung im Rahmen einer qualitativen Studie mit dem Ziel geprüft, sicherzustellen, dass die intendierten kognitiven Prozesse tatsächlich stattfinden, und insbesondere Lernbemühungen durch das Erreichen von „Sackgassen“ nicht abgebrochen werden. In einer quantitativen Studie auf der Basis der finalen Form der schriftlichen Anleitung wurde in einem zweiten Schritt die Lernwirksamkeit der computerbasierten Lernumgebung nachgewiesen, und so ein Argument für die instruktionale Validität der schriftlichen Anleitung gefunden. So hat die erreichte Testleistung durch Nutzung der finalen schriftlichen Anleitung vom Vortest mit durchschnittlich 6% zum Nachtest mit durchschnittlich 36% der maximal erreichbaren Punktzahl signifikant zugenommen.

Die Frage ist allerdings, wie dieses Ergebnis zur instruktionalen Validität einzuordnen ist. Dies hängt davon ab, wie das Lernen mit dem Lernspiel in den Unterricht eingebettet werden soll. Ist es Ziel des Unterrichts, unmittelbar auf ein profundes Wissen zur Dreifingerregel im weiteren Unterricht aufzubauen, so erscheint der Lernzuwachs möglicherweise zu gering. In diesem Fall könnte die Lernumgebung um geeignete Hilfestellungen erweitert werden, zum Beispiel um gestufte Lernhilfen (Schmidt-Weigand, Franke-Braun & Hänze, 2008). Auch diese erweiterte Lernumgebung wäre einer Entwicklungsvalidierung zugänglich.

Die beiden beschriebenen Validierungsstudien dienen in einem Forschungsprojekt der DFG-Forschungsgruppe „Nachhaltiges Lernen: Kognitive Mechanismen und effektive Umsetzung im Unterricht“ zur Pilotierung der schriftlichen Anleitung für das Computerspiel. Im Hinblick auf die anstehende Hauptstudie ziehen wir den so genannten „productive failure“-Ansatz von Kapur (2012) in Betracht. Basierend auf dieser Idee geht es nicht primär darum, ein Lernziel eigenständig zu erreichen. Vielmehr dient eine initiale selbstständige Arbeitsphase vor allem dazu, a) das Vorwissen zu aktivieren, b) die Aufmerksamkeit auf kritische konzeptuelle Merkmale des Konzepts zu lenken, und c) Erklärungen und Elaborationen zu diesen Merkmalen anzuregen. In einer zweiten Phase erfolgt anschließend eine direkte Instruktion zur Dreifingerregel durch die Lehrkraft.

Da beim „productive failure“-Ansatz ein erfolgreiches Finden der Dreifingerregel nicht im Vordergrund steht, ist zu erwägen, lediglich die explorative Phase entsprechend der Anleitung in Abb. 2 einer

direkten Instruktion vorzuschalten. Im Hinblick auf zukünftige Forschung bietet es sich dazu an, die Wirkungen der beiden Teilanleitungen in den Abbildungen 2 bzw. 3 zu vergleichen. Entsprechend der Unterscheidung von Vorholzer und von Aufschnaiter (2019) bietet die Anleitung zur Exploration in Abbildung 2 eine „minimale Anleitung“, und die Anleitung zur Explanatation in Abbildung 3 eine „implizite Anleitung“. Auch könnten weitere Alternativen zum „productive failure“-Ansatz genutzt werden, um die jeweils relevanten kognitiven Mechanismen besser zu identifizieren (Trninic, Sinha & Kapur, 2022).

5. Literatur

- Berger, R., Kulgemeyer, C. & Lensing, P. (2019). Ein Multiple-Choice-Test zum konzeptuellen Verständnis der Kraftwirkung auf Ladungsträger in statischen elektrischen und magnetischen Feldern. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 25(1), 197-210.
- Falk, H. (2017). Qualität und Norm. Online: iso9001.qmb.info [20.08.2024]
- Kapur, M. (2012). Productive failure in learning the concept of variance. *Instructional Science* (40), 651-672.
- Lavine, R.A. (2012). Guided discovery learning. In N.M. Seel, (ed.), *Encyclopedia of the Sciences of Learning* (p. 1402-1403). Boston, MA: Springer.
- Pellegrino, J. W., DiBello, L. V., & Goldman, S. R. (2016). A framework for conceptualizing and evaluating the validity of instructionally relevant assessments. *Educational Psychologist*, 51, 59-
- Polikoff, M. S. (2010). Instructional sensitivity as a psychometric property of assessments. *Educational Measurement: Issues and Practice*, 29, 3-14.
- Renkl, A. (2015). Different roads lead to Rome: the case of principle-based cognitive skills. *Learning: Research and Practice* (1), 79-90.
- 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.
- Schönhagen, P. (2021): Teilnehmende Beobachtung: Datenerhebung ‘haut-nah’ am Geschehen. In H. Wagner & P. Schönhagen (Hrsg.), *Qualitative Methoden der Kommunikationswissenschaft* (S. 286-298). Baden-Baden: Nomos. <https://folia.unifr.ch/unifr/documents/303824>
- Thomas, E. J. (1985). The validity of design and development and related concepts in developmental research. *Social Work Research and Abstracts*, 21(2), 50-55.
- Trninic, D., Sinha, T., & Kapur, M. (2022). Comparing the effectiveness of preparatory activities that help undergraduate students learn from instruction. *Learning and Instruction*, 82, 101688.
- Vorholzer, A. & von Aufschnaiter, C. (2019). Guidance in inquiry-based instruction – an attempt to disentangle a manifold construct. *International Journal of Science Education*, 41 (11), 1562-1577.
- Yoon, B. & Resnick, L. B. (1998). *Instructional validity, opportunity to learn and equity: New standards examinations for the California mathematics renaissance*. Los Angeles, CA: Center for the Study of Evaluation. Online: <https://cresst.org/wp-content/uploads/TECH484.pdf> [09.02.2024]

Anhang

Wir danken den an den Studien beteiligten Schülerinnen und Schülern, deren Lehrkräften sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft für ihre Unterstützung.

Eye-Tracking-Studie zur Untersuchung von Strategien im Umgang mit Schaltplänen

Stefanie Peter*, Olaf Krey*

*Didaktik der Physik, Universität Augsburg, Universitätsstraße 1, 86159 Augsburg
stefanie.peter@physik.uni.augsburg.de

Kurzfassung

Beim Lernen, Anwenden und Kommunizieren physikalischer Konzepte spielen externe Repräsentationen eine zentrale Rolle. In der Elektrizitätslehre werden Schaltpläne genutzt, um elektrische Stromkreise auf einheitliche und übersichtliche Weise darzustellen. Der Umgang mit Schaltplänen stellt für Lernende jedoch eine Herausforderung dar. In einer Eye-Tracking-Studie untersuchen wir, inwiefern aus der visuellen Aufmerksamkeit von Lernenden beim Lösen von Aufgaben zu elektrischen Stromkreisen Strategien im Umgang mit Schaltplänen rekonstruiert werden können. Erste Ergebnisse aus der Pilotstudie zeigen Unterschiede im visuellen Verhalten der Lernenden, welche unterschiedliche Strategien im Umgang mit Schaltplänen andeuten, die im Zusammenhang mit verschiedenen Argumentationsweisen stehen.

1. Einleitung

Physikalische Konzepte und Inhalte werden mithilfe einer Vielzahl verschiedener externer Repräsentationen kommuniziert. Dazu zählen sowohl domänenübergreifende Darstellungen wie beispielsweise Liniendiagramme, als auch domänenspezifische Darstellungen wie Schaltpläne elektrischer Stromkreise. Insbesondere bei domänenspezifischen Repräsentationen, kann es zum „Representational Dilemma“ kommen: Lernende müssen ihnen unbekannte Inhalte und Konzepte mithilfe von Repräsentationen lernen, die für sie ebenfalls neu sind (Rau, 2017). Für das Lernen fachlicher Konzepte werden also auch entsprechende Kompetenzen im Umgang mit den spezifischen Repräsentationen benötigt. Elektrische Stromkreise können mithilfe von Schaltplänen auf übersichtliche und konventionalisierte Weise dargestellt werden und sind eine viel genutzte Repräsentation in der Elektrizitätslehre. Konkrete Schwierigkeiten im Umgang mit Schaltplänen stellen das Erkennen von Reihen- und Parallelschaltungen oder die Translation zwischen Schaltplänen und realen Stromkreisen dar (McDermott & Shaffer, 1992). Für die Elektrizitätslehre wurden eine Vielzahl an Lernendenvorstellungen beschrieben (Überblick bei Wilhelm and Hopf (2018)) und auch nach dem Unterricht mit aktuellen Konzeptionen sind die Leistungen der Schüler*innen nicht zufriedenstellend (Burdé & Wilhelm, 2020). Insbesondere das „lokale Denken“ und die „sequenzielle Argumentation“ deuten eine gewisse Lesart eines Schaltplans an. Obwohl gängige Schülervorstellungstest Schaltpläne als Repräsentationsform nutzen (Ivanjek et al., 2021; Rhöneck, 1986; Urban-Woldron & Hopf, 2012) und diese auch im Lernmaterial üblicherweise zur Darstellung von Stromkreisen genutzt werden, ist die konkrete Auseinandersetzung von Lernenden mit Schaltplänen noch nicht systematisch untersucht.

2. Theoretische Einordnung

Wird Lernenden Material mit Text-Bild-Kombinationen präsentiert, können die kognitiven Prozesse mithilfe der „Cognitive Theory of Multimedia Learning“ (CTML) beschrieben werden (Mayer, 2014): Bei der Verarbeitung visuell bildlicher Repräsentationen werden demnach Abbildungsaspekte durch Selektionsprozesse in das Arbeitsgedächtnis aufgenommen. Verschiedene Abbildungsaspekte werden durch Organisationsprozesse zusammen mit dem Vorwissen aus dem Langzeitgedächtnis zu einem mentalen Modell integriert. Diese kognitiven Prozesse werden in der CTML als Prozesse der Informationsverarbeitung beschrieben. Werden Lernende jedoch mit Aufgaben- und Problemlösematerial konfrontiert, gibt das Problem oder die Aufgabe ein konkretes Ziel für die Informationsverarbeitung vor. In diesem Kontext wird das Verhalten sowie die kognitiven Prozesse, die dem Erreichen des Ziels dienen, als Strategien bezeichnet (Bjorklund & Kipp Harnishfeger, 1990). Dabei können je nach Definition des Strategiebegriffs auch Prozesse eingeschlossen werden, die unbewusst ablaufen und für die Person nicht beschreibbar sind, was insbesondere dann sinnvoll erscheint, wenn durch Übung aus ursprünglich bewusste Prozessen Automatismen werden (Ashcraft, 1990). Weisen Lernende Vorwissen zu einer Repräsentation und der entsprechenden Domäne auf, hat dies Einfluss auf die verschiedenen Prozesse der Informationsverarbeitung (Gegenfurtner, 2020). In Bezug auf den Umgang mit fachspezifischen Repräsentationen eignet sich die Beschreibung des Vorwissens in Form von Repräsentationskompetenzen. Rau (2017) unterteilt diese in „konzeptuelle Kompetenzen“, „perzeptuelle Kompetenzen“ und „meta-repräsentationale Kompetenzen“. Zu den konzeptuellen Kompetenzen gehört unter anderem die Fähigkeit die Repräsentation mit Konzepten zu verknüpfen, zu den perzeptuellen

Kompetenzen das intuitive Erfassen von Repräsentationen sowie der mühelose Wechsel zwischen Repräsentationen und zu den meta-repräsentationalen Kompetenzen die Fähigkeit geeignete Repräsentationen auszuwählen (ebd.). Während bereits konkretere Formulierungen von Kompetenzen im Umgang Liniendiagrammen vorliegen (Lachmayer et al., 2007), wurden Kompetenzen im Umgang mit Schaltplänen noch nicht genauer beschrieben.

3. Eye-Tracking zur Untersuchung von Strategien

Beim Eye-Tracking handelt es sich um eine Untersuchungsmethode, bei der die Blickbewegungen von Studienteilnehmenden auf einen Stimulus untersucht werden. Diese Methode findet in der physikdidaktischen Forschung immer häufiger Anwendung (Hahn & Klein, 2022). Theoretisch begründet werden Eye-Tracking-Studien meist durch die „Eye-Mind-Assumption“ von Just und Carpenter (1980), die sich ursprünglich auf das Leseverstehen bezieht und besagt, dass Punkte der visuellen Aufmerksamkeit mit den kognitiven Prozessen in Beziehung stehen. Studien zeigen jedoch auch, dass die Eye-Mind-Assumption sich nicht allen Bereichen anwenden lässt und Blickbewegungen auch mehrdeutig sein können (Schindler & Lilienthal, 2019; Wu et al., 2021). In der physikdidaktischen Forschung kommt Eye-Tracking als Methode überwiegend in quantitativen Studien zum Einsatz (Hahn & Klein, 2022). In Nachbardisziplinen wie der mathematik- oder biologiedidaktischen Forschung finden sich jedoch auch Studien, die qualitative Ansätze verfolgen, um die Eignung der Eye-Mind-Hypothese zu testen oder konkrete Strategien und Vorgehensweise beim Lösen von Aufgaben zu rekonstruieren (Baumanns et al., 2024; Kastaun & Meier, 2022; Thomaneck et al., 2022). Beispielsweise finden Baumanns et al. (2024) verschiedene Typen der Mustererkennung durch eine qualitative Inhaltsanalyse von Eye-Trackingdaten. Bisherige Eye-Tracking-Studien, in denen die Teilnehmenden Aufgaben aus der Elektrizitätslehre bearbeiteten, deuten auf Unterschiede im Vorgehen zwischen Experten und Novizen hin, liefern allerdings keine systematische Analyse von Strategien oder Vorgehensweisen im Umgang mit Schaltplänen (Rosengrant et al., 2009; Van Gog et al., 2005).

4. Forschungsfragen

Die Elektrizitätslehre stellt Lernende vor große Herausforderungen, was sich in einer Vielzahl fachlich unzureichenden Vorstellungen auch nach dem Unterricht äußert. Obwohl der sichere Umgang mit Repräsentationen einen wichtigen Stellenwert für das Lernen physikalischer Konzepte einnimmt, wurden die zum Einsatz kommenden Strategien im Umgang mit Schaltplänen als Repräsentation elektrischer Stromkreise bisher nicht systematisch untersucht. Mit unserem Projekt sollen daher die folgenden Forschungsfragen beantwortet werden:

- 1) Inwiefern können aus der visuellen Aufmerksamkeit und den Lösungen von Aufgaben aus der Elektrizitätslehre Strategien im Umgang mit Schaltplänen rekonstruiert werden?
- 2) Welchen Einfluss hat das Vorwissen der Lernenden auf die Strategien im Umgang mit Schaltplänen?

Nachfolgend werden Methoden und ausgewählte Ergebnisse der Pilotstudie vorgestellt, mit der die Eignung des Materials und Vorgehens zur Beantwortung der Forschungsfragen geprüft wurde.

5. Methode

5.1. Stichprobe

Um insbesondere auch Strategien zu erheben, die von Lernenden mit höherer Expertise verwendet werden, wurde als Versuchsgruppe Studierende der Physik und assoziierte Studiengänge gewählt und keine Schüler*innen. Die Erhebung wurde mit N=16 Teilnehmenden (9 weiblich) durchgeführt.

Tab. 1: Studiengänge der Teilnehmenden.

Studiengang	Teilnehmende
Bachelor of Science	5
Lehramt Physik	9
Promotion Fachdidaktik Physik	2

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Studiengänge der Teilnehmenden. Es wurde eine diverse Stichprobe gewählt, um ein breites Spektrum von Strategien abzubilden. Alle Teilnehmenden haben die Einführungsvorlesung zu Elektrodynamik belegt. Die Teilnehmenden waren im Mittel „eher interessiert“ an Themen der Elektrizitätslehre (6-stufige Likert-Skala (1 - 6), $\bar{x} = 4,3$; $\sigma = 1,3$). Da die Audioaufnahme einer Person während der Erhebung abgebrochen ist, konnten diese Daten nicht in die Auswertung eingeschlossen werden

5.2. Material

Das Erhebungsmaterial kann in drei Abschnitte unterteilt werden: einen Fragebogen, Multiple-Choice-Aufgaben und offene Aufgaben. Der Fragebogen dient zum einen der Erhebung demografischer Informationen und zum anderen der Erhebung des

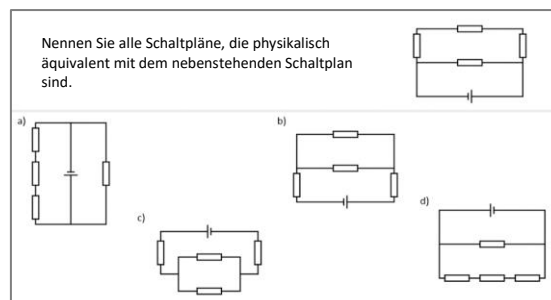


Abb. 1: Multiple-Choice-Aufgabe zur Erhebung perzeptueller Fähigkeiten

Vorwissen bezüglich der konventionellen Schaltsymbole und der grundsätzlichen Gesetzmäßigkeiten in Reihen- und Parallelschaltungen (u.a. Knoten- und Maschenregel). Dabei sind alle Gesetzmäßigkeiten und Symbole eingeschlossen, die für die Beantwortung der offenen Aufgaben notwendig sind. Mithilfe der Multiple-Choice-Aufgaben (insgesamt drei) werden die perzeptuellen Fähigkeiten der Teilnehmenden erhoben. Abb. 1 zeigt eine Beispielaufgabe. Hierbei sollen alle zu einem vorgegeben Schaltplan physikalisch äquivalenten Schaltpläne identifiziert werden. Die Teilnehmenden wurden dazu angehalten, die Aufgaben so schnell wie möglich zu bearbeiten, hatten allerdings kein vorgegebenes Zeitlimit.

In den elf offenen Aufgaben müssen die Teilnehmenden ihr Konzeptverständnis bezüglich der Größen Spannung und Stromstärke auf verschiedene durch Schaltpläne präsentierte Stromkreise anwenden. Sechs dieser Aufgaben wurden selbst entwickelt, zwei wurden in Anlehnung an Aufgaben aus einem Schülervorstellungstest (Urban-Woldron & Hopf, 2012) dem offenen Aufgabendesign angepasst und drei Aufgaben einer Unterrichtszeitschrift entnommen (Burzin, 2002). Es handelt sich ausschließlich um qualitative Aufgaben und die Teilnehmenden wurden dazu angehalten, ihre Antwort so ausführlich wie möglich zu begründen. In Abb. 3 ist exemplarisch eine der offenen Aufgaben dargestellt.

5.3. Durchführung

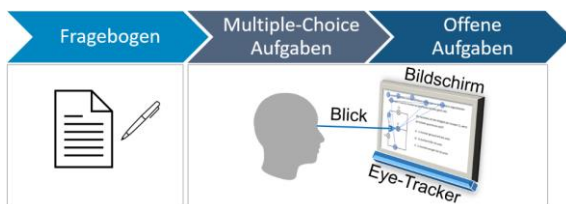


Abb. 2: Übersicht über den Ablauf der Studie und schematische Darstellung des Aufbaus für das stationäre Eye-Tracking.

Der Fragenbogen wurde in gedruckter Form ausgefüllt. Sowohl die Multiple-Choice-Aufgaben als auch die offenen Aufgaben wurden am Computer-Bildschirm bearbeitet. Das Vorgehen für die Aufgaben wurde zunächst durch die Versuchsleiterin erläutert. Für die Multiple-Choice-Aufgaben wurden die Teilnehmenden dazu angehalten, die Aufgaben so schnell wie möglich zu bearbeiten, hatten allerdings kein vorgegebenes Zeitlimit.

Für die offenen Aufgaben wurde ein dreigeteilter Ablauf gewählt: Die Aufgabe wurde präsentiert und eine Lösung sollte erarbeitet werden. Bevor geantwortet wird, bewerten die Teilnehmenden ihre Antwortssicherheit auf einer vier-Stufigen Skala (sehr sicher bis nicht sicher). Im letzten Schritt beantworten die Teilnehmenden die Aufgabe und begründen ihre Antwort. Während der gesamten Erhebung konnten die Teilnehmenden in ihrem Tempo arbeiten, indem sie sich durch Mausklücke selbstständig durch die Aufgaben navigieren. Alle Antworten wurde mit einem

Audiorekorder aufgenommen. Die Möglichkeit sich während der Bearbeitung der Aufgaben Notizen zu machen, wurde den Teilnehmenden freigestellt. Der Notizbereich wurde aus diesem Grund mit einer Videokamera aufgenommen. Die Aufgaben wurden auf einem 27 Zoll LED Bildschirm mit einer Auflösung von 1920 x 1200 Bildpunkten präsentiert. Die Blickbewegungen wurden für die Multiple-Choice-Aufgaben und für offenen Aufgaben mit einem Tobii-X3-120 mit einer Aufnahme Frequenz von 120 Hz aufgezeichnet. Für die Auswertung der Strategien wurden die Eye-Tracking-Daten während der Bearbeitung der offenen Aufgaben verwendet.

6. Auswertung

6.1. Fragebogen, Multiple Choice- und offene Aufgaben

Die Antworten für die Aufgaben des Fragebogen wurden auf Korrektheit geprüft. Bei den Multiple-Choice-Aufgaben wurde sowohl die Korrektheit der Antworten als auch die für das Erkennen der äquivalenten Schaltpläne benötigte Zeit ausgewertet. Bei den offenen Aufgaben wurde für einen Überblick über die Leistungen für jede Aufgabe jeweils bewertet, ob die Veränderung der physikalischen Größe korrekt angegeben wurde und ob eine richtige Begründung für die entsprechende Veränderung genannt wurde. Für die Rekonstruktion der Strategien wurden Fälle ausgewählt, bei denen die Teilnehmenden ausführliche Antworten gegeben haben und keine Notizen angefertigt haben, da die Eye-Tracking-Daten durch die Anfertigung von Notizen maßgeblich beeinflusst wurden. Für diese Fälle wurden in den Antworten zudem kodiert, anhand welcher physikalischer Größen argumentiert wird (Stromstärke, Spannung, Widerstand) bzw. welche Lernendenvorstellungen gegebenenfalls zu finden sind.

6.2. Eye-Tracking-Daten

Für die Auswertung der Eye-Trackingdaten werden „Areas of Interest“ (AOI) für jede Aufgabe festgelegt. Dabei handelt es sich um markierte Bereiche, für welche die weiteren Eye-Tracking-Metriken bestimmt werden. Abbildung 3 zeigt exemplarisch die festgelegten AOI für eine der Aufgaben. Für die Rekonstruktion der Strategien werden die Blickpfade betrachtet. Um diese übersichtlich darzustellen werden

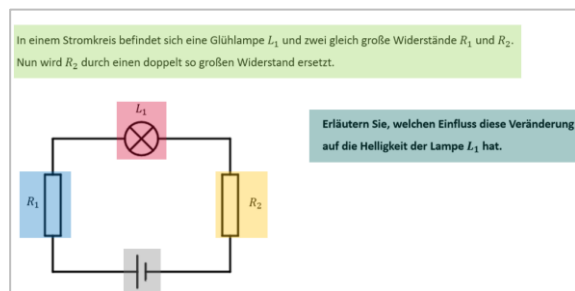


Abb. 3: Festlegung der AOI für die Aufgabe. Alle Komponenten, die Beschreibung (Hellgrün) und die Aufgabe (dunkelgrün) werden als AOI definiert. In Parallelschaltungen wurden zudem die Knotenpunkte als AOI definiert

Sequenzdiagramme geplottet. Dabei wird die Reihenfolge der Fixationen für die AOI aufgetragen. Zum einen führt dies zu einer Reduktion der Daten auf den Bereich der AOI und die Anzahl der Fixationen, zum anderen werden auf diese Weise die Blickbewegungen für die gesamte Bearbeitungsdauer in einem Diagramm sichtbar. Die Abbildung 4 verdeutlicht, wie die Daten in einem Sequenzdiagramm dargestellt werden. Zudem wurde das Fixations-Transitions-Verhältnis (R) bestimmt (Rodemer et al., 2020).

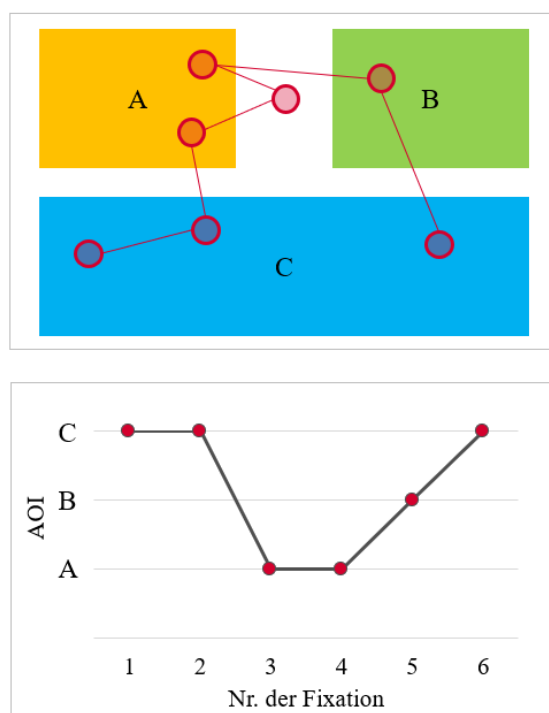


Abb. 4: Oben: Blickpfad, der die Fixationen (rote Kreise) auf die AOI (A, B, C) zeigt. Unten: Sequenzdiagramm des Blickpfades für die AOI.

7. Ausgewählte Ergebnisse

Die Ergebnisse der Leistung der Teilnehmenden können der Tabelle 2 entnommen werden. Insgesamt fällt auf, dass obwohl die Teilnehmenden die Symbole und Gesetzmäßigkeiten im Fragebogen korrekt wiedergeben können, das Wissen in den offenen Aufgaben nicht oder nur zum Teil anwenden können.

7.1. Visuelle Strategien

Im Folgenden werden die Strategien von drei Personen (P1, P2, P3) zu der Aufgabe aus Abb. 3 exemplarisch dargestellt und kontrastiert. Abb. 5 stellt die Sequenzen der Fixationen der Teilnehmenden gegenüber. Da die Teilnehmenden unterschiedlich viel Zeit für die Bearbeitung der Aufgabe benötigt haben, weisen die Diagramme in Abb. 5 unterschiedlich viele Fixationen auf. Alle drei Teilnehmenden lesen sich zunächst den Beschreibungstext durch, woraufhin der Blick zum ersten Mal auf den Schaltplan fällt. Während P2 und P3 die Komponenten von der Mitte aus beginnend in Blick nehmen (Lampe L1 in der Mitte,

Tab. 2: Überblick über den Anteil korrekter Antworten (AW) der Teilnehmenden (N) im Fragebogen (FB), den Multiple-Choice-Aufgaben (MCA) und den offenen Aufgaben (OA) in Prozent der insgesamt zu erreichenden Punkte. Für die Multiple-Choice-Aufgaben wurde zusätzlich die für die Aufgaben im Durchschnitt benötigte Zeit (\bar{t}) in Sekunden (s) und die Standardabweichung davon berechnet.

N	FB	MCA		OA	
	AW (%)	AW (%)	\bar{t} (s)	σ_t (s)	AW (%)
1	93	100	38,7	8,2	45
2	72	100	32,1	8,5	27
3	80	100	15,3	1,6	30
4	80	40	23,7	1,5	95
5	52	100	76,7	13,6	41
6	87	20	51,9	19,4	23
7	77	60	85,9	32,8	73
8	100	60	25,3	9,2	64
9	82	100	50,4	5,5	45
10	82	80	84,2	18,5	27
11	78	80	36,1	13,4	73
12	83	80	38,0	5,0	55
13	82	40	93,3	36,2	23
14	28	0	30,8	2,5	11
15	97	40	53,8	5,3	20
MW	78	67	49,1		43
SD	17	32	24,1		23

dann die Widerstände links und rechts von der Lampe), betrachtet P1 zunächst den Widerstand R2, der laut Beschreibungstext verändert wird, die Lampe und danach noch einmal den Widerstand R2. P2 und P3 kehren noch einmal zum Beschreibungstext zurück, woraufhin P2 noch einmal die Lampe fixiert und danach mehrere Fixationen nacheinander beim Widerstand R2 verharrt. Diese Überblicksphase endet für alle Teilnehmenden mit dem Lesen der Aufgabe. Danach beginnt die Aufgabenphase, in der die Aufgabe bearbeitet wird. Dabei zeichnet sich bei P1 insgesamt eine eher globale Strategie ab. Es werden alle Komponenten betrachtet und es finden viele Transitionen zwischen den Komponenten statt. P2 weist hingegen ein lokal fokussierendes Verhalten auf. Dabei werden insbesondere die für die Beantwortung der Aufgabe wichtigen Komponenten des Schaltplans mehrfach fokussiert, bevor zu einer anderen Komponente gewechselt wird. Diese beiden verschiedenen Blickverhalten spiegeln sich auch in unterschiedlichen Fixations-Transitions-Verhältnissen wider ($R_{P1} = 2,8$; $R_{P2} = 8,4$). P3 wiederum betrachtet ebenfalls alle Komponenten und weist viele Transitionen auf ($R_3 = 3$). Während bei P1 und P2 ein großer Anteil der Transitionen Verknüpfungen zwischen R2 und L1 sind (Bei P1 ~ 28 %, bei P2 ~ 36 %), welche in einer Ursache-Wirkungs-Beziehung stehen, ist der Anteil der Transitionen zwischen R2 und L1 bei P3 mit ca. 7 % im Vergleich deutlich geringer. Stattdessen ist bei P3 die Sequenz aus der Überblicksphase (L1 – R1 – R2) auch nach lesen der Aufgabe noch mehrfach zu finden. Somit wird nach der Lampe der Widerstand R1, welcher gemäß der technischen Stromrichtung „vor“ der Lampe liegt, und dann erst

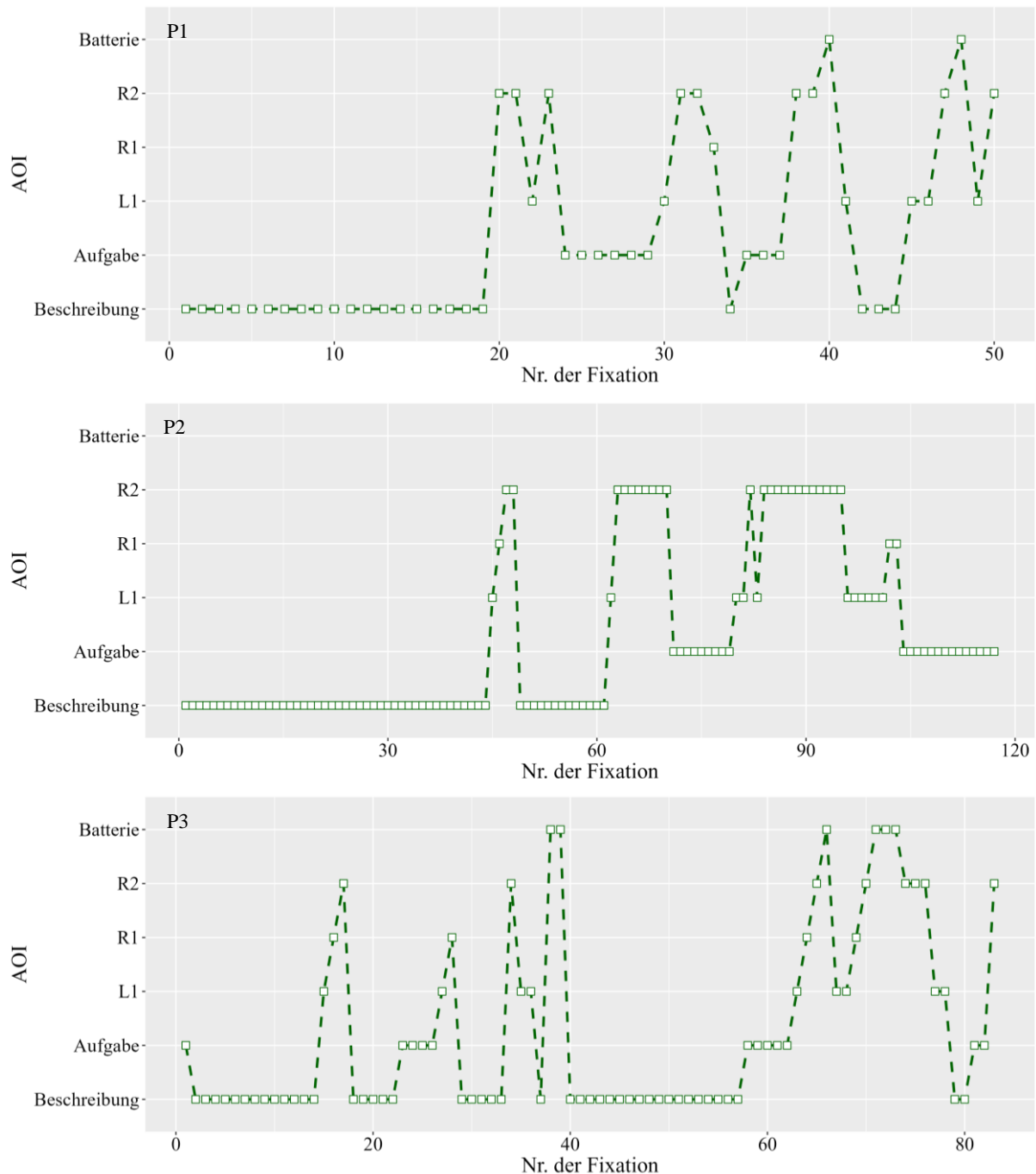


Abb. 5: Sequenzdiagramme der Teilnehmenden P1, P2 und P3 (von oben nach unten) zeigen den Verlauf der Fixationen bei der Bearbeitung der in Abb. 3 dargestellten Aufgabe. Berücksichtigt werden ausschließlich Fixationen auf die AOI.

der Widerstand R2, der gemäß technischer Stromrichtung „hinten“ der Lampe liegt. Außerdem weist P3 auch nach der Überblicksphase eine intensive Auseinandersetzung mit dem Beschreibungstext auf.

7.2. Argumentationen

Die drei vorgestellten Fälle unterscheiden sich ebenfalls in ihrer Argumentation. P1 erschließt sich korrekt, dass die Lampe durch Verdopplung des Widerstandes R2 weniger hell leuchtet. Sie argumentiert dabei über die Änderung des Gesamtwiderstandes des Systems und der entsprechenden Änderung in der Stromstärke. P2 schließt ebenfalls korrekt, dass die

Lampe weniger hell leuchtet, bezieht sich in ihrer Argumentation jedoch auf die lokale Änderung von Spannungen. P3 hingegen beantwortet die Aufgabe nicht korrekt und schließt, dass sich die Helligkeit der Lampe nicht verändert, weil die Veränderung im Stromkreis erst „nach der Lampe“ auftritt, was der Lernendenvorstellung einer sequenziellen Argumentation entspricht.

8. Diskussion der Ergebnisse

Die hier vorgestellten Fälle weisen unterschiedliche visuelle Vorgehensweisen beim Bearbeiten der

Aufgaben auf. In der Überblicksphase zeichnet sich ein Unterschied zwischen einer eher textgeleiteten Erschließung (P2) und einer eher abbildungsgeleiteten Erschließung (P3) ab oder der einer Kombination (P1, erst abbildungs- dann textgeleitet). Nach der Überblicksphase finden sich bei P1 und P2 neue Strategien bei der Auseinandersetzung mit dem Schaltplan. Während bei P1 eine eher globale Strategie verfolgt, ist bei P2 eine lokal fokussierende Strategie zu finden. Bei beiden Teilnehmenden findet jedoch eine visuelle Verknüpfung der Komponenten, die in einer Ursache-Wirkungs-Beziehung stehen, statt. Bei P3 hingegen ist die Strategie aus der Überblicksphase auch in der Aufgabenphase wiederzufinden und es ist keine deutlich Verknüpfung der Komponenten, die in einer Ursache-Wirkungsbeziehung stehen, zu finden. Die aus den visuellen Daten rekonstruierten Strategien spiegeln sich ebenfalls in den Argumentationen der Teilnehmenden wider. P1 argumentiert auf globaler System-Ebene während P2 auf einer lokalen Ebene begründet. Bei P3 findet eine sequenzielle Argumentation statt. Diese kennzeichnet sich in diesem Fall nicht durch ein striktes sequenzielles Blickverhalten, jedoch deutet das Blickverhalten auf ein Unterteilung in „vor“ und „nach“ der Lampe hin.

9. Ausblick

Insgesamt zeigt sich, dass die hier vorgestellte Methode einen vielversprechenden Ansatz darstellt, die Strategien im Umgang mit Schaltplänen zu rekonstruieren. Aus dem für die Pilotierung verwendeten Aufgabenpool konnten eine Auswahl an Aufgaben für die Haupterhebung getroffen werden, die verschiedene Arten von Schaltungs- und Aufgabentypen einschließen. Der Aufgabentyp für das Erkennen äquivalenter Schaltpläne wurde von Multiple-Choice-Aufgaben zu Ja-Nein-Fragen verändert, bei denen lediglich zwei Schaltpläne gleichzeitig präsentiert werden. Um ausreichende Argumentationen zu gewährleisten, wurde zudem den Teilnehmenden die Möglichkeit genommen eigenständig durch die Aufgaben zu navigieren. Dies übernimmt die Versuchsleiterin, sodass gegebenenfalls noch einmal nach Begründungen für die Antwort gefragt werden kann. Die veränderte Studie wird im Rahmen der Haupterhebung mit einer größeren Stichprobe durchgeführt.

10. Literatur

- Ashcraft, M. H. (1990). Strategic processing in children's mental arithmetic: a review and proposal. In D. F. Bjorklund (Ed.), *Children's Strategies: contemporary views of cognitive development* (pp. 185-211). Psychology Press.
- Baumanns, L., Pitta-Pantazi, D., Demosthenous, E., Lilienthal, A. J., Christou, C., & Schindler, M. (2024). Pattern-Recognition Processes of First-Grade Students: An Explorative Eye-Tracking Study. *International Journal of Science and Mathematics Education*. <https://doi.org/10.1007/s10763-024-10441-x>
- Bjorklund, D. F., & Kipp Harnishfeger, K. (1990). Children's strategies: Their definition and origins. In D. F. Bjorklund (Ed.), *Children's Strategies: contemporary views of cognitive development* (pp. 309-323). Psychology Press.
- Burde, J.-P., & Wilhelm, T. (2020). Teaching electric circuits with a focus on potential differences. *Physical Review Physics Education Research*, 16(2). <https://doi.org/10.1103/physrevphyseducres.16.020153>
- Burzin, S. (2002). Physikaufgaben zum Nachdenken. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 67, 28-30.
- Gegenfurtner, A. (2020). *Professional vision an visual expertise* University of Regensburg.
- Hahn, L., & Klein, P. (2022). Eye tracking in physics education research: A systematic literature review. *Physical Review Physics Education Research*, 18(1), 013102.
- Ivanjek, L., Morris, L., Schubatzky, T., Hopf, M., Burde, J.-P., Haagen-Schützenhöfer, C., Dopatka, L., Spatz, V., & Wilhelm, T. (2021). Development of a two-tier instrument on simple electric circuits. *Physical Review Physics Education Research*, 17(2). <https://doi.org/10.1103/physrevphyseducres.17.020123>
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1980). A theory of reading: from eye fixations to comprehension. *Psychological review*, 87(4), 329.
- Kastaun, M., & Meier, M. (2022). Eine qualitative Analyse von Blickdaten bei statischen und dynamischen Repräsentationen im naturwissenschaftlichen Erkenntnisprozess. In (pp. 19-39). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-63214-7_2
- Lachmayer, S., Nerdel, C., & Prechtel, H. (2007). Modellierung kognitiver Fähigkeiten beim Umgang mit Diagrammen im naturwissenschaftlichen Unterricht (Modelling of cognitive abilities regarding the handling of graphs in science education). *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 13, 161-180.
- Mayer, R. E. (2014). Cognitive Theory of Multimedia Learning. In R. E. Mayer (Ed.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (2 ed., pp. 43-71). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.005>
- 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), 994-1003. <https://doi.org/10.1119/1.17003>
- Rau, M. A. (2017). Conditions for the Effectiveness of Multiple Visual Representations in Enhancing STEM Learning. *Educational*

- Psychology Review*, 29(4), 717-761.
<https://doi.org/10.1007/s10648-016-9365-3>
- Rhöneck, C. v. (1986). Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis und zu den Begriffen Strom, Spannung und Widerstand. *Naturwissenschaften im Unterricht-Physik*, 34(13), 10-14.
- Rodemer, M., Eckhard, J., Graulich, N., & Bernholt, S. (2020). Decoding case comparisons in organic chemistry: Eye-tracking students' visual behavior. *Journal of Chemical Education*, 97(10), 3530-3539.
- Rosengrant, D., Thomson, C., Mzoughi, T., Sabella, M., Henderson, C., & Singh, C. (2009). Comparing Experts and Novices in Solving Electrical Circuit Problems with the Help of Eye-Tracking. *AIP Conference Proceedings* 5 November 2009; 1179 (1)
- Schindler, M., & Lilienthal, A. J. (2019). Domain-specific interpretation of eye tracking data: towards a refined use of the eye-mind hypothesis for the field of geometry. *Educational Studies in Mathematics*, 101(1), 123-139. <https://doi.org/10.1007/s10649-019-9878-z>
- Thomanek, A., Vollstedt, M., & Schindler, M. (2022). What can eye movements tell about students' interpretations of contextual graphs? A methodological study on the use of the eye-mind hypothesis in the domain of functions. *Frontiers in Education*, 7. <https://doi.org/10.3389/educ.2022.1003740>
- Urban-Woldron, H., & Hopf, M. (2012). Entwicklung eines Testinstruments zum Verständnis in der Elektrizitätslehre *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 18, 201-227.
- Van Gog, T., Paas, F., & Van Merriënboer, J. J. G. (2005). Uncovering expertise-related differences in troubleshooting performance: combining eye movement and concurrent verbal protocol data. *Applied Cognitive Psychology*, 19(2), 205-221. <https://doi.org/10.1002/acp.1112>
- Wilhelm, T., & Hopf, M. (2018). Schülervorstellungen zum elektrischen Stromkreis. In H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf, & R. Duit (Eds.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis* (pp. 115-138). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-57270-2_6
- Wu, C.-J., Liu, C.-Y., Yang, C.-H., & Jian, Y.-C. (2021). Eye-movements reveal children's deliberative thinking and predict performance on arithmetic word problems. *European Journal of Psychology of Education*, 36(1), 91-108. <https://doi.org/10.1007/s10212-020-00461-w>

Forscherboxen und Unterrichtsmaterial zum Thema „Farben“ im inklusiven NaWi-Unterricht

Giulia Pantiri¹, Lea Mareike Burkhardt², Thomas Wilhelm¹, Volker Wenzel², Arnim Lühken³,
Dieter Katzenbach⁴

¹Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Max von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main

²Abteilung Didaktik der Biowissenschaften, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Max von-Laue-Str. 13, 60438 Frankfurt am Main

³Institut für Didaktik der Chemie, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Max von-Laue-Str. 7, 60438 Frankfurt am Main

⁴Institut für Sonderpädagogik, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Theodor-W.-Adorno-Platz 6D, 60323 Frankfurt am Main

pantiri@physik.uni-frankfurt.de, l.burkhardt@bio.uni-frankfurt.de, wilhelm@physik.uni-frankfurt.de,
wenzel@bio.uni-frankfurt.de, luehken@chemie.uni-frankfurt.de, d.katzenbach@em.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

Im Rahmen des Design-Based Research Projektes E²piMINT wird ein inklusives und interdisziplinäres Unterrichtskonzept für die Sekundarstufe I entwickelt, getestet und evaluiert. Eine Herausforderung, die dieses Projekt angeht, besteht darin, Lehrkräften eine wirksame Unterstützung für die Unterrichtsgestaltung zu bieten. Dafür wurde ein Projekttag zum Thema „Farben“ konzipiert und in den Schülerlaboren der Goethe-Universität Frankfurt durchgeführt, an dem insgesamt 38 Schulklassen teilnahmen. Bei diesem Konzept arbeiten die Schüler*innen während des Projekttagess an Stationen, die in Form von Forscherboxen erstellt wurden, und führen Experimente zu verschiedenen Themen in den Perspektiven der drei Naturwissenschaften durch. An die Erprobung im Schülerlabor schließt sich eine zweite Phase in der Schule an, um die praktische Wirksamkeit des entwickelten Konzeptes in schulischen Lernumgebungen zu erforschen.

In diesem Artikel werden das Konzept und die erstellten Materialien zum Thema „Farben“ vorgestellt. Die Materialien umfassen sowohl das Experimentiermaterial der Boxen als auch helfende Unterrichtsmaterialien wie Anleitungen in verschiedenen Formen und Hilfekarten. Das entwickelte Unterrichtsmaterial enthält besondere inklusive Merkmale, deren praktische Wirksamkeit erprobt wurde und die im Artikel beschrieben werden.

1. Kontext

1.1. Das Projekt E²piMINT

Seit der Ratifizierung der UN-Behindertenrechtskonvention im Jahr 2009 hat sich der Beschulungsort von Schüler*innen mit sonderpädagogischem Förderbedarf (SPF) in Deutschland stark verändert. So stieg in dieser Zeit der Anteil aller Schüler*innen mit SPF, die eine allgemeinbildende Schule besuchten, von 19,8 % auf 44 % im Jahr 2020 (Kultusministerkonferenz, 2022). Den größten Anteil haben dabei Schüler*innen mit den Förderschwerpunkten „Lernen“, „Sprache“ und „emotional soziale Entwicklung“. Es besteht daher ein Bedarf, aus der Forschung konkrete Vorschläge für die Unterrichtsgestaltung zu entwickeln. Häufig werden Vorschläge nur auf die Notwendigkeit der Individualisierung des Unterrichts reduziert (Arndt & Werning, 2013; Buchhaupt et al., 2019). Eine Herausforderung besteht darin, Unterrichtsgestaltungsformate zu entwickeln, die Schü-

ler*innen mit höchst unterschiedlichen Lernvoraussetzungen eine gemeinsame Bearbeitung ermöglichen. Es muss eine Balance zwischen individualisierten und gemeinschaftlichen Handlungsmustern gefunden werden, um das „Lernen am gemeinsamen Gegenstand“ zu ermöglichen (Feuser, 1982). Dieser Anspruch ist bisher in der praktischen Arbeit nicht genügend erreicht. Ein Grund dafür wird in dem selten vorhandenen Austausch der naturwissenschaftlichen Fachdidaktiken mit der Inklusionspädagogik gesehen (Menthe & Hoffmann, 2015); Stinken-Rösner et al., 2020). Dieser Aufgabe stellt sich das „Design-Based Research“-Projekt E²piMINT („Evidenzbasierte Entwicklung praxistauglicher inklusiver MINT Vermittlungskonzepte für die Schule“), in dem Vertreter*innen aus der Didaktik der drei Naturwissenschaften mit der Sonderpädagogik zusammenarbeiten, um eine Synergie der unterschiedlichen Expertisen zu nutzen und um innovative und inklusive Vermittlungskonzepte zu entwickeln (DBR Collective, 2003; Wilhelm & Hopf, 2014).

Innerhalb des Projekts wurde ein inklusives Unterrichtskonzept entwickelt (siehe Abschnitt 1.2), das zunächst in den Schülerlaboren der Goethe-Universität Frankfurt unter kontrollierten Bedingungen erprobt wurde (Pantiri et al., 2023) und im Abschnitt 3 ausführlich beschrieben wird. Dafür wurde das Thema „Farben“ und die 5. bis 7. Jahrgangsstufen gewählt. An diese Forschungsphase schließt sich eine zweite Phase an, bei der die Wirksamkeit des Konzeptes unter Feldbedingungen, also in der Schulpraxis, geprüft wird. Außerdem werden die beiden Phasen (Labor- und Feldbedingungen) mit einem zweiten Thema „Haften und Kleben“ wiederholt, um eine andere Altersspanne zu betrachten (7. bis 9. Jgst.) und um eventuelle Zusammenhänge zu einem bestimmten Thema zu untersuchen. Der Ablaufplan des Projektes ist in Abbildung 1 dargestellt.

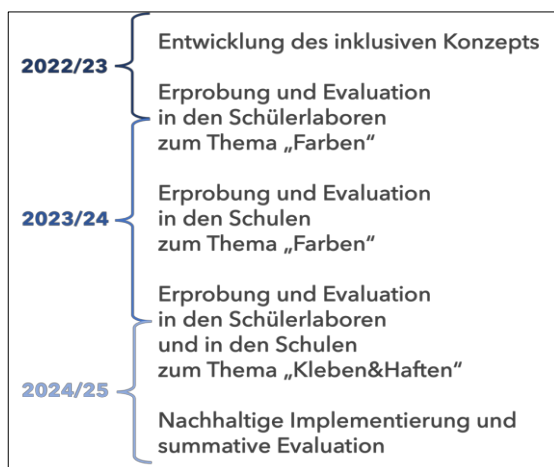


Abb. 1: Ablaufplan des Projekts E²piMINT

Als Zielgruppe wendet sich das Projekt an Schüler*innen der Sekundarstufe I aller Schulformen. Dabei sind von besonderer Bedeutsamkeit die Gesamtschulen, die sich in Hessen stark entwickelt haben: integrative Gesamtschulen (IGS) und kooperative Gesamtschulen (KGS). Bei integrativen Gesamtschulen handelt es sich um Schulen mit gemischten Klassen, in denen alle Schüler*innen unabhängig von evtl. Förderbedarf gemeinsamen unterrichtet werden, und in denen nur in einzelnen Fächern die Schüler*innen nach Leistung aufgeteilt werden. Bei kooperativen Gesamtschulen handelt es sich um Schulen, in denen es nebeneinander unterschiedliche Klassenarten gibt (Hauptschul-, Realschul-, Gymnasial- und Förderklassen), die aber miteinander kooperieren und unter dem gleichen Dach gesammelt werden. Dabei können einzelne Fächer gemeinsam unterrichtet werden (Hessisches Ministerium für Kultus, Bildung und Chancen). Aufgrund der Organisation und dem Ziel der Gesamtschulen gab es von diesen den meisten Zuspruch zum Konzept bzw. am meisten Interesse am Schülerlabor, wie in der Abbildung 2 zu sehen ist. Allerdings sind derzeit im Projekt fast alle Schulformen vertreten. Eine Stärke des Konzeptes besteht darin, dass es nicht nur für stark heterogene Klassen gut geeignet ist, sondern auch für homogenere Schulklassen.

Das Projekt E²piMINT wird mit verschiedenen Forschungsmethoden untersucht. U. a. werden das Interesse und die Selbstwirksamkeitserwartungen der Schüler*innen in den Naturwissenschaften und beim Experimentieren, das inhaltliche Verständnis der betrachteten Themen und die Einflüsse der Gruppendynamik erforscht (Pantiri et al., 2024). Die begleitende Forschung wird in diesem Artikel jedoch nicht im Detail vorgestellt.

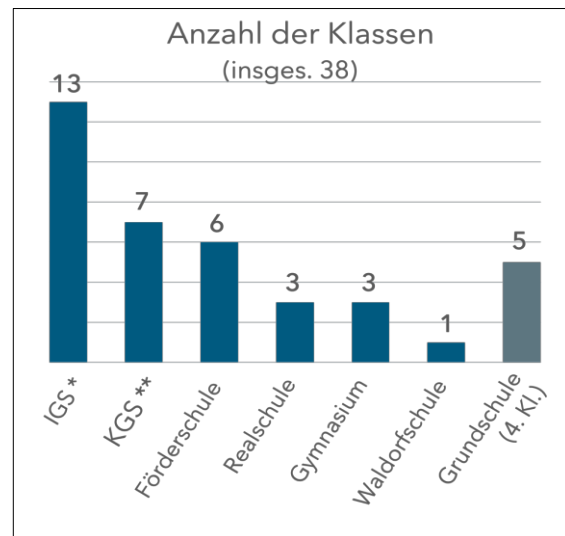


Abb. 2: Besuche des Schülerlabors „Farben“, Zeitraum 2/2023 bis 3/2024. *IGS: Integrierte Gesamtschulen, **KGS: Kooperative Gesamtschulen

1.2. Das entwickelte Unterrichtskonzept

Zentral ist die Stationenarbeit mit stark handlungsorientierten Experimenten. Die Schüler*innen arbeiten in der Regel in Vierer-Gruppen an einer Station zusammen (auch Dreier-Gruppen sind möglich) und können danach die Station wechseln. Die Stationen sind in Form von Forscherboxen konzipiert, wobei für das Thema „Farben“ sieben verschiedene Forscherboxen entwickelt wurden (siehe Abb. 3), die in Abschnitt 4 inhaltlich vorgestellt werden. Die verwendeten Anleitungen und Hilfen werden in Abschnitt 2 beschrieben.



Abb. 3: Forscherboxen zum Thema „Farben“

Die Teilnehmende im Schülerlabor waren u. a. Schüler*innen (SuS) mit individuellen Förderbedarfen in heterogenen Klassen, wobei die meisten SuS den Förderschwerpunkten „Lernen“, „Sprache“ und „emotionale und soziale Entwicklung“ zugeordnet waren. Aus diesem Grund war es eine große Herausforderung, allen eine Teilnahme zu ermöglichen, aber gleichzeitig Einzelarbeit und extreme Differenzierung zu vermeiden.

Ausgehend von der Beobachtung, dass bei Gruppenarbeit oft die Gefahr besteht, dass die Arbeit den Stärksten überlassen wird oder von diesen absichtlich übernommen wird, besteht bei dem entwickelten Konzept die Gruppenarbeit mit der Forscherbox aus zwei Hauptphasen. Jede Forscherbox enthält jeweils vier Experimente, die sich durch die Methoden oder Gegenstände voneinander unterscheiden lassen, so dass jede/r Schüler*in der Gruppe ein eigenes Experiment hat. In einer ersten Phase arbeiten die SuS allein und eigenständig an ihrem eigenen Experiment, obwohl sie trotzdem Ideen mit der Gruppe austauschen und sich gegenseitig helfen können. In der zweiten Phase geht es um die Zusammenarbeit. Die SuS bekommen eine gemeinsame Gruppenaufgabe, die im Zusammenhang mit den vier einzelnen Experimenten ihrer Forscherbox steht. Alle Gruppenmitglieder müssen mitarbeiten, um diese Gruppenaufgabe zu lösen. Auf diese Weise kann jede*r Schüler*in selbstständig an einer eigenen Aufgabe arbeiten und Ergebnisse erzielen, die sich von denen der Gruppe unterscheiden und dennoch thematisch vergleichbar sind. Dies fördert die Wertschätzung der individuellen Arbeit und gleichzeitig die Teamarbeitsfähigkeiten, was weniger Raum für die Durchsetzung einiger auf Kosten anderer lässt. Sowohl die Ergebnisse aus den Einzelversuchen als auch die von der Gruppenarbeit werden abschließend auf ein Gruppenplakat eingetragen. Das Ausfüllen des Plakats ist ein wichtiger Abschluss der Gruppenarbeit, da die Arbeit aufgeteilt wird und jede*r Schüler*in die Versuchsergebnisse der anderen wahrnehmen kann.

2. Die inklusive Gestaltung einer Forscherbox

Als besondere Inklusionsmaßnahme haben wir für die SuS unterschiedliche Zugänge zu den Experimenten entwickelt. Für jedes Experiment gibt es eine in einfacher Sprache geschriebene Experimentieranleitung in gedruckter Form. Um insbesondere SuS mit Barrieren im Bereich „Lesen“ zu unterstützen, gibt es aber auch eine äquivalente Experimentieranleitung in Form eines Lege-Videos, das mit einem Tablet angeschaut werden kann. Zusätzlich sind in jeder Forscherbox gestufte Hilfekarten vorhanden, die die SuS bei Bedarf nehmen können. Für leistungsstärkere SuS sind Zusatzaufgaben vorbereitet, sodass diese SuS noch tiefer in das Thema einsteigen können. Alle genannten Maßnahmen werden im Folgenden im Detail vorgestellt.

2.1. Schriftliche Anleitungen

Die schriftlichen Anleitungen in einfacher Sprache sind jeweils auf zwei Seiten begrenzt, wie auf den Abbildungen 4 und 5 zu sehen ist. Auf der Vorderseite befindet sich die Materialliste (mit Bildern begleitet) und wichtige Grundinformationen. Auf der Rückseite ist die ausführliche Beschreibung des Versuchs zu lesen.



Abb. 4: Beispiel einer schriftlichen Anleitung, Vorderseite

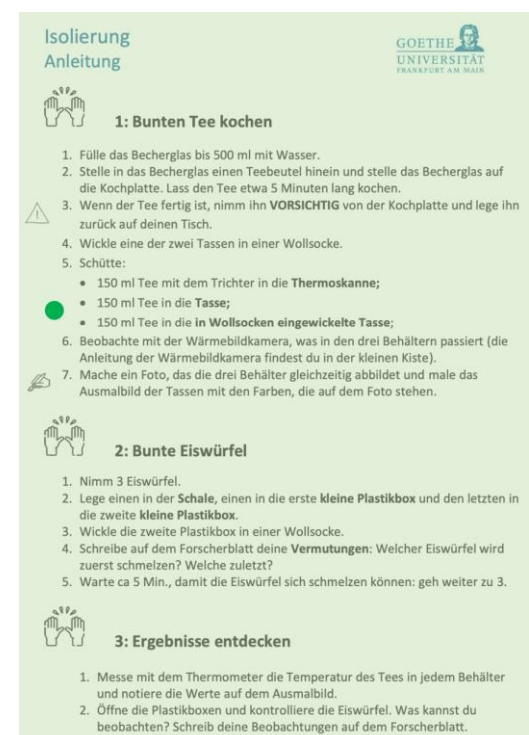


Abb. 5: Beispiel einer schriftlichen Anleitung, Rückseite

In der ersten Einzelarbeitsphase haben die SuS wenig Möglichkeit, frei zu experimentieren: Sie müssen zunächst jeden Schritt der Anleitung befolgen, die aus diesem Grund in kleinen Schritten beschrieben ist, und haben erst nach Abschluss des Experiments die Möglichkeit, freier weiter zu experimentieren. Um insbesondere SuS mit Förderbedarf zu unterstützen, werden wasserlösliche Marker bereitgestellt, mit denen die SuS die bereits erledigten Schritte durchstreichen können und so eine visuelle Hilfe für die Reihenfolge der Durchführung erhalten. Schließlich ist immer dann, wenn eine Hilfekarte existiert (siehe Abschnitt 2.3), ein Hinweis auf der Anleitung angegeben (der grüne Punkt in Abbildung 5).

2.2. Videoanleitungen

Zu jeder schriftlichen Anleitung wurde ein Video in Lege-Technik aufgenommen (siehe Abb. 6). Diese Technik wurde anderen vorgezogen (zum Beispiel Tutorien), da sie es ermöglicht, eine alternative Version der schriftlichen Anleitung zu erstellen und gleichzeitig die Ergebnisse nicht vorwegzunehmen, was die Selbständigkeit der Schüler*innen während dem Experimentieren einschränken würde.



Abb. 6: Beispiel aus einem Lege-Video

Die Videos sind alle vertont. Bei den gezeigten Bildern handelt es sich meist um Fotos der realen Gegenstände und Geräte, die die SuS im Experiment verwenden, um eventuelle Schwächen in der Visualisierung zu berücksichtigen. Die Videos können während des Betrachtens pausiert werden, falls einzelne Schritte noch einmal überprüft werden müssen und um das Arbeitstempo des Einzelnen zu berücksichtigen.

2.3. Hilfekarten



Abb. 7: Hilfekarte mit schwierigen Begriffen

Zur Förderung von verschiedenen Zugängen sind in jeder Box gestufte Hilfekarten vorhanden. Die SuS können selbst wählen, ob und wann sie diese Hilfen benutzen wollen. Für das Thema „Farben“ sind sie in zwei Stufen konzipiert: Entweder zeigen sie nur die Bedeutung einzelner Wörter, die den SuS schwierig oder unbekannt sind (siehe Abb. 7) oder sie erklären mit aufeinanderfolgenden Bildern schwierige Verfahren (siehe Abb. 8).

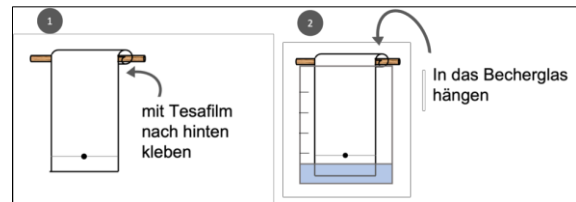


Abb. 8: Hilfekarte mit dargestelltem Verfahren

Auf die Hilfekarten wird in den Anleitungen hingewiesen. Die Entscheidung, welche Schritte oder Begriffe mit den Hilfekarten gezeigt werden sollen, wurde während der Pilotierung des Konzepts infolge der qualitativen Beobachtungen getroffen.

2.4. Zusatzaufgaben

Insbesondere beim Wechsel von Einzel- zu Gruppenarbeit kann es vorkommen, dass einige SuS schneller sind als andere und auf die anderen Gruppenmitglieder warten müssen. Um Wartezeiten zu vermeiden, befinden sich in jeder Box einige Zusatzaufgaben, die nach Interesse durchgeführt werden können. Sie nehmen in der Regel weniger Zeit in Anspruch als die Einzelversuche und können in Einzel- oder Gruppenarbeit durchgeführt werden. Bei starkem Interesse der ganzen Gruppe können sie auch als zusätzliche Gruppenarbeit durchgeführt werden. Inhaltlich bieten sie die Möglichkeit, tiefer in das Thema einzusteigen, indem sie u. a. neue Gegenstände benutzen oder eine zusätzliche Methode verwenden.

2.5. Gruppenarbeit und Gruppenplakat

Wenn alle SuS mit den einzelnen Versuchen fertig sind, kommen sie zur Gruppenarbeit zusammen. Alle einzelnen Ergebnisse sind an dieser Stelle wichtig: Es handelt sich um einen Austausch zwischen den SuS, aber auch um eine kleine Aufgabe, die sie zusammen bearbeiten sollen. Die Aufgabe endet in allen Fällen mit dem Ausfüllen eines Gruppenplakats. Die Gruppenplakate sind vorgestaltet und enthalten Verständnisfragen, die alle gemeinsam beantworten sollen, sowie Kästchen, in die die SuS ihre Ergebnisse einkleben oder hineinmalen müssen (siehe Abb. 9 als Beispiel).

In der Pilotierung und in der Hauptstudie wurde mehrmals festgestellt, dass ein Gruppenplakat besser funktioniert als einzelne Arbeitsblätter, bei denen die SuS die Fragen allein beantworten müssen. Somit werden die sozialen Kompetenzen gefördert und die Verantwortung für die Gruppenergebnisse wird von allen übernommen. Außerdem können die SuS die Ergebnisse der anderen sehen und sie mit den eigenen

vergleichen. Dies bietet auch die Möglichkeit, gemeinsam über die Experimente nachzudenken und zu reflektieren; es können neue Fragen auftauchen und die Überlegungen dazu am Ende wieder in das Plenum eingebracht werden.

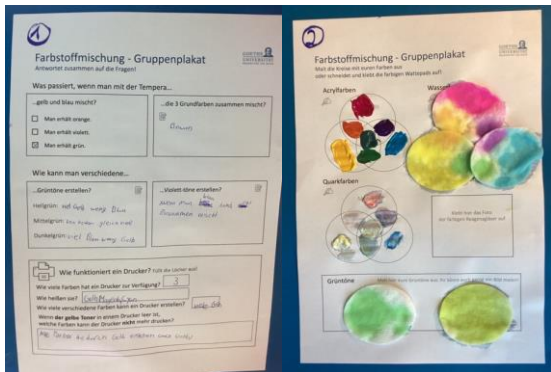


Abb. 9: Gruppenplakat (Vorder- und Rückseite)

3. Das Schülerlabor „Farben“

Um das Konzept zu testen und u. a. die Wirksamkeit der inklusiven Gestaltung zu prüfen, wurde ein Schülerlabor mit insgesamt 38 Schulklassen durchgeführt. Es fand in den Schülerlaboren der Goethe-Universität Frankfurt im Zeitraum Februar 2023 bis März 2024 statt. Jeder Schülerlabortag dauerte vier bis fünf Stunden, die wie folgt organisiert waren (siehe auch Abb. 10). Am Anfang stand eine kurze Einführungspräsentation, in der der Ablauf des Tages, die Themen der Forscherboxen und einige wichtige Hinweise erläutert wurden. Nach einer Einteilung in heterogene Gruppen (entweder durch die begleitende Lehrkraft oder durch die SuS mit der Zustimmung der Lehrkraft), wählte jede Gruppe eine Forscherbox, mit der sie anfangen wollte (keine Dopplungen möglich). Die erste Experimentierunde dauerte 40 bis 50 Minuten

und nach einer 20-minütigen Pause konnten die SuS an einer zweiten Box arbeiten. Je nach Zeit war auch eine dritte Experimentierunde möglich. Zum Schluss kamen die SuS zu einem angeleiteten Plenum zusammen, bei dem sie sich mit den Betreuenden über den Inhalt austauschten und bei dem die SuS noch neue Fragen stellen und gemeinsam über die Ergebnisse nachdenken konnten. Es wurde ihnen auch angeboten, in der Abschlussrunde die angefertigten Gruppenplakate zu Hilfe zu nehmen, die sie außerdem am Ende des Tages mit in die Schule nehmen konnten. Bemerkenswert ist ein weiterer Vorteil des Konzepts: Sowohl ab der zweiten Experimentierunde als auch in der Abschlussphase wurde die Gruppe, welche als erste an einer Box gearbeitet hatte, als Experten-Gruppe von den anderen betrachtet und konnte so die gewonnenen Erfahrungen mit der Box helfend austauschen. Damit werden einige ausgewählte Elemente eines Gruppenpuzzles übernommen (Berger & Hänze, 2004).

4. Die sieben Forscherboxen zum Thema „Farben“

Für das Thema „Farben“ wurden die folgende Forscherboxen konzipiert. Sie betrachten das Thema aus den Perspektiven der drei Naturwissenschaften Biologie, Chemie und Physik und es besteht in einigen Fällen keine scharfe Trennung zwischen den Disziplinen. Die Materialien sind in den meisten Fällen sehr alltagsnah und den SuS bereits bekannt (zum Beispiel Lebensmittel, Filzstifte und Temperafarben, Blumen und Blätter). Dies ermöglicht es den SuS einerseits, diese Materialien aus einer wissenschaftlichen Perspektive kennenzulernen und zu untersuchen, was für sie neu und ungewohnt sein kann. Andererseits erleichtert es ihnen den Zugang zu den Experimenten: Durch die Verwendung vertrauter Materialien liegt der Schwerpunkt für sie auf der Auseinandersetzung

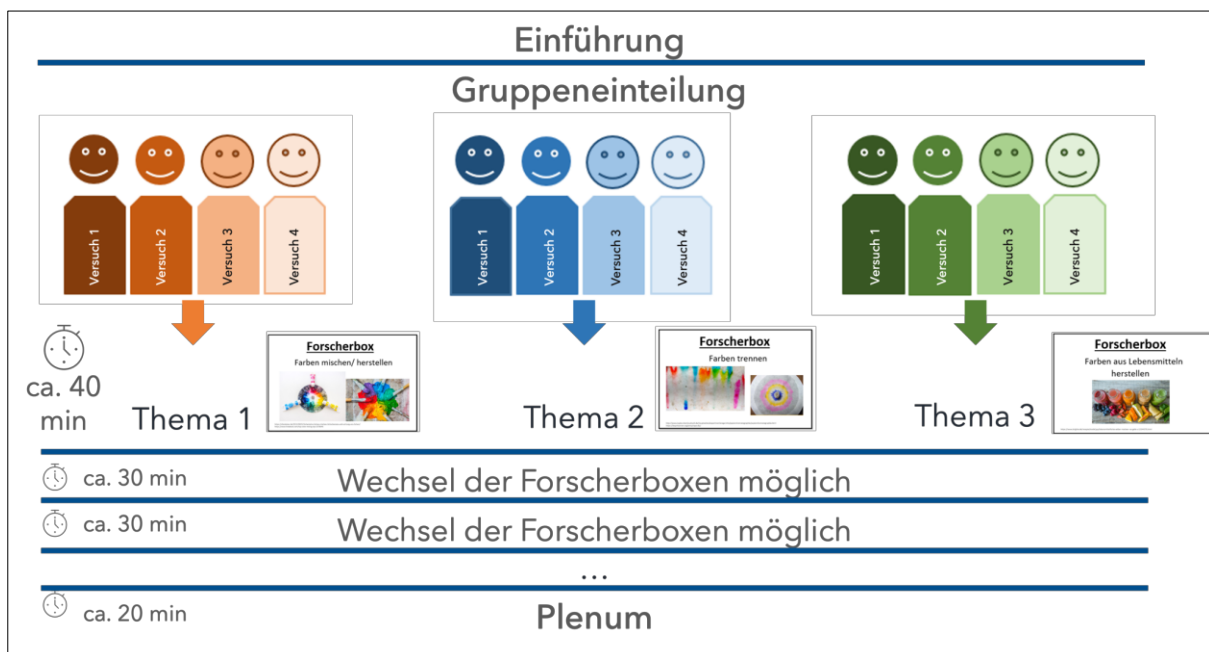


Abb. 10: Ablaufplan eines Schülerlabortages

mit neuen Laborgeräten und wissenschaftlichen Verfahren (Brigham et al., 2011).

4.1. Farben mischen

Mit der Box „Farben mischen“ werden physikalische und chemische Eigenschaften von Farbstoffen erforscht (subtraktive Farbmischung). Die SuS arbeiten nur mit den drei Grundfarben der subtraktiven Farbmischung und lernen, wie man nur aus diesen drei alle anderen Farben erhalten kann. Dabei lernen sie verschiedene Formen von Farbstoffen (Acryl- und Wasserfarben) kennen oder stellen sie selbst her (Ölfarben und gefärbtes Wasser). Diese Box lässt sich besonders gut mit der zweiten und dritten Box und zusätzlich mit dem Fach Kunstverbindung verbinden. Eine leitende Frage für die Gruppenarbeit ist es, wie ein Farbdrucker funktioniert. Dabei haben sie einen 4-Pass-Handy-Drucker zur Verfügung, um das Druckverfahren zu beobachten, zu beschreiben und zu erklären.



Abb. 11: Gefärbtes Wasser, mit Krepppapier hergestellt

4.2. Farben trennen

Beim Thema „Farben trennen“ werden verschiedene Methoden der Chromatografie verwendet, um das Farbstoffgemisch eines schwarzen Filzstiftes zu untersuchen. Es wird deutlich, dass sich das Schwarz in verschiedene Farben trennt. Es kann weiter untersucht werden, wie andere Farbstoffgemische sich trennen und entdeckt werden, dass die drei Grundfarben (der subtraktiven Farbmischung) sich nicht weiter trennen lassen. Deshalb ist diese Box mit der ersten verbunden (Goethe-Schülerlabor Chemie).



Abb. 12: Ergebnisse aus der Chromatographie mit schwarzer Filzstiftfarbe: Filterpapier-Methode (links) und Säulenchromatographie-Methode (rechts)

4.3. Farben aus Lebensmitteln herstellen

Mit Hilfe der Box „Farben aus Lebensmitteln herstellen“ werden Farbstoffe aus verschiedenen Pflanzenteilen (Früchte, Blätter, Wurzeln usw.) mit verschiedenen Methoden (Kochen, Lösen, Reiben usw.) gewonnen. Die Farbstoffe werden anschließend in verschiedenen Kombinationen gemischt und auch in diesem Fall kann das subtraktive Mischen von Farbstoffen betrachtet werden. Ein Vergleich zwischen den selbsthergestellten Farben und bereitgestellten Lebensmittelfarben ist auch möglich.



Abb. 13: Zwei Schüler*innen arbeiten mit Lebensmitteln und stellen verschiedene Farbstofflösungen her

4.4. Farben als Indikator

Mit der Box „Farben als Indikator“ wird ein Säure-Base-Farbindikator thematisiert. Die SuS bestimmen den pH-Wert verschiedener Lebensmittel oder Erdproben und stellen selbst ein einfaches pH-Meter her. Ziel ist hier nicht, den pH-Wert chemisch-mathematisch zu verstehen, sondern zu erkennen, dass die Farben in diesem Fall als „Anzeiger“ für eine Stoffeigenschaft zu betrachten sind.



Abb. 14: Bestimmung des pH-Wertes verschiedener Erdproben (oben) und Lebensmittel oder Flüssigkeiten (unten)

4.5. Farben mikroskopieren

Mit Hilfe des Mikroskops werden die in den Zellen verschiedener Pflanzenarten enthaltenen Farbstoffe untersucht. Dafür können die SuS auch kleine Stücke der Lebensmittel benutzen, die in der dritten Forscherbox verwendet werden. Die Lernenden beschäftigen sich auch mit der Frage, wie die Spurensicherung der Polizei funktioniert und können auch ihre Fingerabdrücke unter dem Mikroskop betrachten.

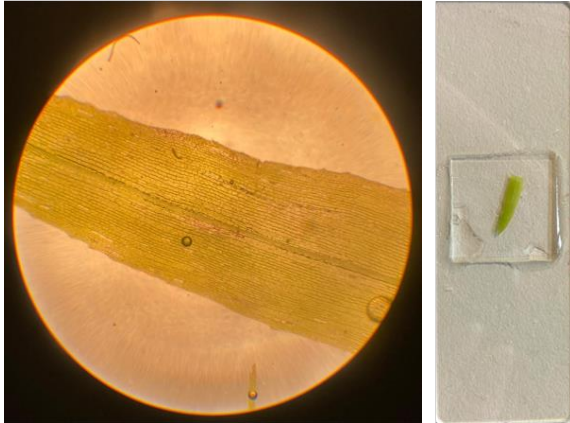


Abb. 15: Wasserpestblatt unter dem Mikroskop (links) mit dem entsprechenden Präparat (rechts)

4.6. Hat Wärme eine Farbe?

Bei der Box „Hat Wärme eine Farbe?“ wird eine Wärmebildkamera verwendet, um die Oberflächentemperatur verschiedener Gegenstände zu visualisieren. Dabei wird gezeigt, wie die physikalische Zustandsgröße Temperatur mit Hilfe eines Farbcodes für eine visuelle Wahrnehmung übersetzt werden kann (Molz et al., 2022; Vollmer, 2022; Weßnigk & Heinicke, 2017). Die Farben gelten in diesem Fall als „Darstellungsform“. Zu diesem Zweck ändern die SuS die Farbskala der Kamera (die auch in Grautönen erhältlich ist), denn ein wichtiges Ziel der Box ist es, das präkonzeptuelle Denken „heiß = rot“ und „kalt = blau“ sowie weitere Schülervorstellungen zur Wärme (Fischler & Schecker, 2018) zu verändern und zu erweitern.

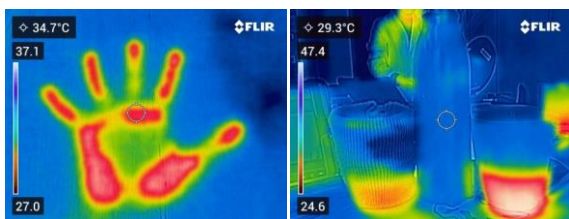


Abb. 16: Bilder der Wärmebildkamera, die während der Projekttagen gemacht wurden. Handabdruck auf dem Tisch (links); Heißer Tee in verschiedenen Behältnissen (rechts)

4.7. Bunte Flammen

Mit der Box „Bunte Flammen“ lernen die SuS wie farbige Flammen entstehen können. An dieser Stelle wird das Erlebnis von bunten Feuerwerken in Erinnerung gerufen. Eine leitende Frage ist: Wie kann man

Flammen färben und welches Salz ermöglicht welche Farbe? Die Lernenden arbeiten dabei mit einer offenen Flamme, weshalb in diesem Fall eine Betreuung notwendig ist.



Abb. 17: Experiment der Box „Bunte Flammen“

5. Ausblick

Alle Themen und Materialien zu den Themen „Farben“ und „Haften und Kleben“ werden in den Schuljahren 2023/24 und 2024/25 Lehrkräften verschiedener Schularten vorgestellt. Es werden Lehrkräftefortbildungen entwickelt und durchgeführt, um Schulen mit dem Konzept vertraut zu machen und ihnen neue Möglichkeiten der inklusiven Gestaltung anzubieten. Die Zusammenarbeit mit Schulen ist ein zentraler Punkt des E²piMINT-Projekts, um die Praxistauglichkeit der Unterrichtsmaterialien zu gewährleisten.

6. Literatur

- Arndt, A.K., Werning, R. (2013). Unterrichtsbezogene Kooperation von Regelschulen und Lehrkräften für Sonderpädagogik. Ergebnisse eines qualitativen Forschungsprojektes. In: Ann-Kathrin Arndt und Rolf Werning (Hrsg.): Inklusion: Kooperation und Unterricht entwickeln. Bad Heilbrunn: Klinkhardt, 12–40.
- Berger, R.; Hänze, M. (2004). Das Gruppenpuzzle im Physikunterricht der Sekundarstufe II – Einfluss auf Motivation, Lernen und Leistung. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 10, 205-219.
- Brigham, F.J., Scruggs, T.E. and Mastropieri, M.A. (2011). Science Education and Students with Learning Disabilities. Learning Disabilities Research & Practice, 26: 223-232. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5826.2011.00343.x>

- Buchhaupt, F., Hahn, L.; Katzenbach, D., Klein, A. et al. (2019). Evaluation der Modellregion Inklusive Bildung Frankfurt am Main. Frankfurter Beiträge zur Erziehungswissenschaft, 21. Norderstedt.
- DBR Collective (2003). Design-Based-Research: An Emerging Paradigm for Educational Inquiry. Educational Researcher, 32, 5-8.
- Feuser, G. (1982). Integration = die gemeinsame Tätigkeit (Spielen/Lernen/Arbeit) am gemeinsamen Gegenstand/Produkt in Kooperation von behinderten und nichtbehinderten Menschen. Behindertenpädagogik 21 (2), 86–105.
- Fischler, H.; Schecker, H. (2018): Schülervorstellungen zu Teilchen und Wärme. In: Horst Schecker, Thomas Wilhelm, Martin Hopf, Reinders Duit (Hrsg.). Schülervorstellungen und Physikunterricht, https://doi.org/10.1007/978-3-662-57270-2_7, 139-152.
- Hessisches Ministerium für Kultus, Bildung und Chancen, <https://kultus.hessen.de/Schulsystem/Schulformen-und-Bildungsgaenge/Gesamtschule> (Stand: 31.05.2024)
- Kultusministerkonferenz (2022). Sonderpädagogische Förderung in Förder- und Regelschulen. Statistische Veröffentlichungen der Kultusministerkonferenz, Dokumentation Nr. 223 - Februar 2020, 128-131. DOI: 10.3278/6001820hw
- Goethe-Schülerlabor Chemie. Thementage des Goethe-Schülerlabors Chemie: <https://www.uni-frankfurt.de/53459095/Thementage> (Stand: 31.05.2024)
- Menthe, J., & Hoffmann, T. (2015). Inklusiver Chemieunterricht: Chance und Herausforderung. In J. Riegert, & O. Musenberg (Hrsg.): Inklusiver Fachunterricht in der Sekundarstufe. Stuttgart: Kohlhammer, 131-140.
- Molz, A.; Wilhelm, T.; Kuhn, J. (2022). Das Unsichtbare sichtbar machen: Smartphones als Wärmebildkamera. In: Wilhelm, T.; Kuhn, J. (Hrsg.): Für alles eine App. Ideen für Physik mit dem Smartphone, Springer-Spektrum, 5, 2022, 223 – 228. https://doi.org/10.1007/978-3-662-63901-6_3
- Pantiri, G.; Burkhardt, L. M.; Wilhelm, T.; Wenzel, V.; Lühken, A.; Katzenbach, D. (2023). Entwicklung praxistauglicher, inklusiver MINT-Vermittlungskonzepte für die Schule - In: Grötzebauch, H. & Heinicke S. (Hrsg.): PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur virtuellen DPG-Frühjahrstagung 2023, 247 - 251, <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1373/1566>
- Pantiri, G.; Wilhelm, T.; Burkhardt, L. M.; Wenzel, V.; Lühken, A.; Katzenbach, D. (2024). Inklusiver NaWi-Unterricht: Erprobung von Lernstationen zu Farben – In: v. VORST, H. (Hrsg.): Frühe naturwissenschaftliche Bildung, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Hamburg 2023, Band 44, 2024, S. 470 – 473, https://gdcp-ev.de/wp-content/uploads/securepdfs/2024/06/H11_Pantiri.pdf
- Stinken-Rösner, L. et al. (2020). Thinking Inclusive Science Education from two Perspectives: inclusive Pedagogy and Science Education. RISTAL, 3, 30–45
- Vollmer, M. (2022). Infrared Cameras as Smartphone Accessory: Qualitative Visualization or Quantitative Measurement?. In: Haglund, J., Jeppsson, F., Schönborn, K.J. (eds) Thermal Cameras in Science Education. Innovations in Science Education and Technology, vol 26. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85288-7_9
- Weßnigk, S., Heinicke, S. (2017). Die Wärmebildkamera – ein Beitrag zur Sinneswahrnehmung. Unterricht Physik Nr. 159 / 160.
- Wilhelm, T.; Hopf, M. (2014). Design-Forschung. In: Dirk Krüger, Ilka Parchmann und Horst Schecker (Hrsg.): Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung. Berlin u.a: Springer Spektrum, 31–42.

Danksagung

Im Projekt E²piMINT arbeitet seit April 2023 die Masterstudentin Fatime Beka als studentische Hilfskraft. Sie hat außerdem ihre Masterarbeit im Rahmen des Schülerlabortags durchgeführt und geschrieben, im Rahmen dessen sie die siebte Box „Bunte Flammen“ vollständig entwickelt, realisiert und betreut hat. Wir möchten uns bei ihr an dieser Stelle für ihre Mitarbeit und Unterstützung bedanken.

Identität von Schüler*innen und naturwissenschaftlicher Anfangsunterricht: Ergebnisse einer Fragebogen-Studie

Lisa-Marie Christ*, Frederik Bub⁺, Olaf Krey*, Thorid Rabe⁺

*Universität Augsburg, ⁺Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
lisamarie.christ@physik.uni-augsburg.de

Kurzfassung

Im BMBF-geförderten Forschungsprojekt IdentMINT wird die Identitätsperspektive herangezogen, um über zwei Schuljahre hinweg zu untersuchen, wie sich Schüler*innen zu Naturwissenschaften positionieren und wie der naturwissenschaftliche Anfangsunterricht das Verhältnis der Schüler*innen speziell zu Physik und Chemie prägt. In der quantitativen Teilstudie werden in den Fachdidaktiken etablierte psychologische Konstrukte wie Interesse und Selbstwirksamkeitserwartungen als Indikatoren und Aspekte von Identität(en) in den Blick genommen. Das Interesse der Schüler*innen an Physik und Chemie sowie deren naturwissenschaftliche Selbstwirksamkeitserwartungen werden exemplarisch unter den Perspektiven Gender und Ausbildungsrichtung analysiert. Die Ergebnisse stützen sich auf die ersten beiden Erhebungszeitpunkte der Fragebogen-Studie, die an 15 Gymnasien in Bayern und Sachsen-Anhalt in den Klassenstufen sieben bis neun bzw. sechs und sieben durchgeführt wurden. Die ersten Befunde deuten auf genderspezifische Unterschiede und Zusammenhänge zwischen Identitätsfacetten und den gewählten Ausbildungsrichtungen hin.

1. Ausgangslage und Motivation

Um besser zu verstehen, wie sich Schüler*innen mit den Naturwissenschaften und dem naturwissenschaftlichen Anfangsunterricht, speziell in Physik und Chemie, auseinander- und in Beziehung setzen, wird Identität als eine Analyseperspektive im BMBF-geförderten Forschungsprojekt IdentMINT genutzt.

In der internationalen Forschung wird die Identitätsperspektive als ein fruchtbarer Zugang angesehen, um die Auseinandersetzung von Schüler*innen mit und die Wahrnehmung von Naturwissenschaften zu untersuchen (Brickhouse, 2001, S. 286; Brickhouse et al., 2000, S. 443; Carlone & Johnson, 2007, S. 1188). Schüler*innen berichten im Anfangsunterricht einerseits von Freude und Interesse an Naturwissenschaften und naturwissenschaftlichen Tätigkeiten, weisen diese gleichzeitig aber auch als „nichts für mich“ zurück (Archer et al., 2010, S. 636). Aus Identitätsperspektive kann diese ambivalente Beziehung zu Naturwissenschaften als ein Spannungsverhältnis zwischen „doing science“ und „being a scientist“ aufgefasst werden (Archer et al., 2010, S. 621). Jugendliche nehmen Naturwissenschaften und insbesondere Physik als männlich geprägte und schwierige Disziplin wahr, was häufig inkompatibel mit dem Selbstbild ist (Kessels et al., 2006, S. 762f.). Im Zuge der Identitätsarbeit während der Pubertät werden auch Geschlechterrollen bzw. Gender (neu) verhandelt und erprobt (Schreiner & Sjøberg, 2007). Genderidentitäten können mit weiteren Identitäten, zum Beispiel einer sich gerade entwickelnden MINT-Identität, in Konflikt treten und problematische Verläufe sind vor allem dann wahrscheinlich, wenn das Selbstbild nicht mit der Wahrnehmung von Naturwissenschaften oder naturwissenschaftlich tätigen Personen in Einklang gebracht werden kann (Brickhouse et al., 2000, S.

444; Carlone et al., 2014, S. 859; Kessels et al., 2006). Bildungswegentscheidungen können vor diesem Hintergrund als Identitätsentscheidungen interpretiert werden (Schreiner & Sjøberg, 2007). Zusätzlich sind auch das soziale Umfeld, vorwiegend bestehend aus Eltern, Lehrkräften und Peers, und die Erfahrungen aus Familie und Schule prägend für die Identitätsaushandlungen der Schüler*innen, wobei Ein- und Vorstellungen darüber „who does science“ bereits in einem frühen Alter entwickelt werden (DeWitt & Archer, 2015, S. 2187). Inwiefern auch außerschulische MINT-Erfahrungen zur Positionierung von Schüler*innen bezüglich Naturwissenschaften beitragen und Zugänge zu Naturwissenschaften ermöglichen oder beeinflussen, ist bisher noch uneindeutig (DeWitt et al., 2011; Hazari et al., 2022; Lock et al., 2019).

2. Umsetzung der Identitätsperspektive im Projekt

Identität wird im Forschungsprojekt IdentMINT als das Bild bzw. die Vorstellungen und das Wissen einer Person von sich selbst verstanden, wobei diese Selbstwahrnehmung prinzipiell nur einen Ausschnitt der Identität einer Person abbilden kann und vorläufig bleibt (Rabe & Krey, 2018). Identität weist einen prozessoralen Charakter auf und wird immer wieder neu verhandelt und hergestellt (Archer & DeWitt, 2015; Archer et al., 2010, S. 619). Infolgedessen können einem Individuum auch mehrere Identitäten zugeschrieben werden, die zum Beispiel in verschiedenen Kontexten oder durch soziale Beziehungen wirksam werden (Hazari et al., 2010, S. 983; Shanahan, 2009, S. 44).

Das Identitätskonstrukt erlaubt es klassisch verwendete psychologische Konstrukte, wie Ein- und Vorstellungen, Selbstwirksamkeitserwartungen und

Interesse, gemeinsam in den Blick zu nehmen (Rabe & Krey, 2018, S. 206, 207). In einem ersten Schritt werden diese mit Identität in Beziehung stehenden psychologischen Konstrukte als Indikatoren zu und Aspekte von Identität verstanden und sind vorläufige und potentiell veränderbare Identitätsfacetten.

2.1. Forschungsfragen und Projektstruktur

Ziel des Forschungsprojekts IdentMINT ist die Beantwortung der folgenden Forschungsfragen:

- Wie konstruieren Schülerinnen und Schüler ihre MINT-Identität(en) im Anfangsunterricht der Fächer Physik und Chemie?
- Wie verändern sich einzelne Aspekte von MINT-Identität(en), speziell in Physik und Chemie, in der Phase des Anfangsunterrichts?
- Wie werden Genderidentität(en) und (potentielle) MINT-Identität(en) aufeinander bezogen und miteinander verhandelt?

Die Forschungsfragen und das Verständnis von Identität strukturieren das Projekt und das gewählte methodische Vorgehen. Die quantitative Fragebogenerhebung nimmt die mit Identität in Verbindung stehenden psychologischen Konstrukte in den Blick (vgl. 2.2. und Abb. 2) und wird um narrative und leitfadengestützte Interviews mit einzelnen Schüler*innen ergänzt. Die qualitativen Forschungsmethoden fokussieren auf einzelne Subjekte und deren individuelle Identitätsaushandlungen, wohingegen in der Fragebogen-Studie Identitätsfacetten von Gruppen und Schüler*innen verschiedener Altersstufen betrachtet und zueinander in Beziehung gesetzt werden. Eine ausführliche Darstellung der Projektstruktur findet sich in Christ et al. (2023).

2.2. Vorstellung der Fragebogen-Studie

Die Fragebogen-Studie umfasst drei Erhebungszeitpunkte (EHZ) von denen die ersten beiden bereits abgeschlossen sind. Um den naturwissenschaftlichen Anfangsunterricht in den Fächern Physik und Chemie in den zwei beteiligten Bundesländern abzubilden, werden in Sachsen-Anhalt die Schüler*innen (SuS) in den Klassenstufen sechs und sieben befragt, in Bayern hingegen die Schüler*innen der Klassenstufen sieben und acht bzw. acht und neun (vgl. Abb. 1).

	November 2022 bis Juli 2024		
Wann	EHZ 1	EHZ 2	EHZ 3
Wer	SuS der 6. Klassenstufe (SAN)	SuS 7. Klassenstufen (SAN)	SuS der 7. Klassenstufen (SAN)
	SuS der 7. bzw. 8. Klassenstufen (BAY)	SuS der 8. bzw. 9. Klassenstufen (BAY)	SuS der 8. bzw. 9. Klassenstufen (BAY)
Was	Ausgangssituation PU	Fokus auf PU, Ausgangssituation CU	Fokus auf PU und CU

Abb. 1: Überblick über das Erhebungsdesign der Fragebogen-Studie.

In Bayern gibt es die Besonderheit, dass die Schüler*innen eine naturwissenschaftliche Ausbildungsrichtung, das sogenannte naturwissenschaftlich-technologische Gymnasium (NTG), wählen können. Wird dieser NTG-Zweig gewählt, beginnt der Chemieunterricht (CU) in der achten Klassenstufe. Wählen die Schüler*innen eine andere nicht-naturwissenschaftliche Ausbildungsrichtung, im Beitrag als n-NTG-Zweig bezeichnet, setzt der Chemieunterricht in der neunten Klassenstufe ein. Der Physikunterricht (PU) setzt für alle Schüler*innen in Bayern unabhängig von der Wahl der Ausbildungsrichtung in der siebten Jahrgangsstufe im Rahmen des Fachs Natur und Technik ein. In Sachsen-Anhalt beginnt der Physikunterricht in der sechsten Jahrgangsstufe, der Chemieunterricht in der siebten Jahrgangsstufe.

Die Fragebogen-Studie nimmt die traditionell in den Fachdidaktiken eher isoliert verwendeten psychologischen Konstrukte gemeinsam als Facetten von MINT-Identität(en) in den Blick (vgl. Abb. 2).

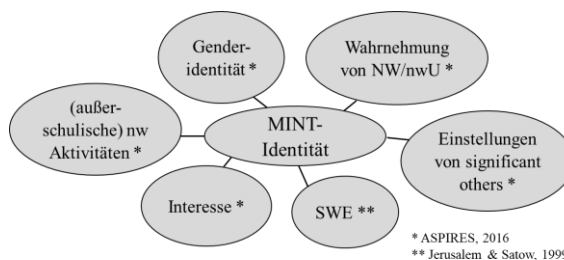


Abb. 2: Teilaspekte von MINT-Identitäten mit Quellenangaben zu den eingesetzten, zum Teil adaptierten Erhebungsinstrumenten.

Als Ausgangspunkt und Einflussfaktoren für bzw. auf Identitätsaushandlungen von Schüler*innen im naturwissenschaftlichen Anfangsunterricht werden zum ersten Erhebungszeitpunkt die Einstellungen von significant others wie Eltern und Peers und eigene schulische und außerschulische naturwissenschaftliche Aktivitäten betrachtet (SPIRES, 2016). Für einen Einblick in erste Befunde siehe Christ et al. (2023) und Bub et al. (2024). Als zentrale Aspekte und Indikatoren von bzw. zu Identität werden die naturwissenschaftlichen Interessen und Selbstwirksamkeitserwartungen zu allen drei Erhebungszeitpunkten erhoben. Ebenso beantworten die Schüler*innen zu allen drei Erhebungszeitpunkten Fragen zu ihrer Wahrnehmung der Naturwissenschaften und des naturwissenschaftlichen Fachunterrichts, wobei auch die Wahrnehmung der Fachlehrkraft durch die Schüler*innen berücksichtigt wird. Der Fokus der Fragebogenerhebung liegt zu den ersten beiden Erhebungszeitpunkten auf dem Physikunterricht. Die Wahrnehmung des Chemieunterrichts rückt ab EHZ2 ins Blickfeld (vgl. Abb. 1).

3. Einblick in die Stichprobe sowie Vorstellung der Skalen und ausgewählter Befunde

Im Folgenden werden ausgewählte Befunde zum Interesse an Physik und Chemie sowie den schulbe-

zogenen Selbstwirksamkeitserwartungen bezüglich der Fächer Physik, Biologie und Chemie vorgestellt. Die Vorstellung der Analyseergebnisse bezieht sich auf eine bundesländervergleichende Darstellung aus den ersten beiden Erhebungszeitpunkten, wobei Befunde hinsichtlich des Fachs Chemie nur zum zweiten Erhebungszeitpunkt vorliegen (vgl. Abb. 1). Die Fragebogenerhebungen wurden an insgesamt 15 Gymnasien in Halle (Saale) und im Raum Augsburg durchgeführt. Die Gesamtstichprobe umfasst zum ersten Erhebungszeitpunkt 1061 Schüler*innen (davon 53% weiblich) der Klassenstufen sechs bis acht, zum zweiten Erhebungszeitpunkt 889 Schüler*innen (davon 47% weiblich) der Klassenstufen sieben bis neun.

3.1. Überprüfung der eingesetzten Skalen

Die Konstrukte wurden mittels konfirmatorischer Faktorenanalysen mit lavaan in R für die Gesamtstichprobe und die Subgruppen sowie die einzelnen Erhebungszeitpunkte abgesichert. Für beide Erhebungszeitpunkte liegen Mehrgruppen-Analysen für die Subgruppen nach Gender (männlich, weiblich) und Klassenstufe (SAN: Klassenstufe 6 bzw. 7; BAY: Klassenstufe 7 bzw. 8 und 8 bzw. 9) vor. Für die Fit-Indizes werden robuste Schätzungen mit dem MLR-Schätzer (Mean- and Variance-adjusted Maximum Likelihood) verwendet, da bei den Skalen mehrheitlich keine multivariate Normalverteilung gegeben ist. Die Fit-Indizes werden mit den Kriterien nach Hu und Bentler (1999) bewertet. Zum Vergleich von Subgruppen werden die metrische und skalare Messinvarianz geprüft, wobei zusätzlich zum χ^2 -Test die CFI-Werte der unterschiedlich restriktiven Modelle verglichen werden und bei einem $\Delta CFI \leq .01$ die jeweilige Messinvarianz angenommen wird (Chen, 2007).

3.1.1. Interesse

Die Skala „Interesse an Physik“ (InteressePhy) bzw. „Interesse an Chemie“ (InteresseChe) entstammt der ASPIRES-Studie (2016) und besteht aus jeweils vier Items (Beispielitem: „Ich eigne mir gerne neues Wissen in ... an.“; vierstufige Likert-Skala: stimme überhaupt nicht zu=0...stimme völlig zu=3). Die Skala wurde als einfaktorielles Modell geprüft. Alle Fit-Indizes zur Skala „Interesse an Physik“ genügen zu EHZ1 den Kriterien. Ebenso besteht für die Analyseperspektive Gender in der Gesamtstichprobe und den Subgruppen skalare Messinvarianz (vgl. Tab. 1).

Zu EHZ2 ist die Güte der Skala in allen Gruppen mindestens akzeptabel, d.h. mindestens zwei Fit-Indizes genügen den Kriterien. Der Gruppenvergleich unter Gender-Perspektive kann in der Gesamtstichprobe sowie den Klassenstufen sieben und neun durchgeführt werden, in Klassenstufe acht ist die metrische Invarianz erfüllt, die skalare Invarianz ist nicht gegeben. Alle Klassenstufen können unter der Perspektive Ausbildungsrichtung miteinander verglichen werden.

Die Skala „Interesse an Chemie“ erfüllt für die Gesamtstichprobe und alle Subgruppen die Kriterien, wobei auch die skalare Messinvarianz bezüglich beider Analyseperspektiven gegeben ist.

Tab. 1: Ergebnisse der konfirmatorischen Faktorenanalysen zu den jeweiligen Skalen „Interesse“ für die Gesamtstichprobe und die ersten beiden Erhebungszeitpunkte sowie die Analyseperspektive Gender.

	EHZ1		EHZ2	
	InteressePhy	InteressePhy	InteressePhy	InteresseChe
p (χ^2)	.161	.005	.055	
CFI	.999	.994	.997	
RMSEA	.030	.078	.055	
SRMR	.008	.014	.011	
skalare Invarianz				
p (χ^2)	.032	.028	.438	
ΔCFI	.004	.004	.000	

Die Skalen weisen zu beiden Erhebungszeitpunkten eine hohe Reliabilität sowohl in der Gesamtstichprobe ($\alpha > .850$) als auch den einzelnen Subgruppen auf.

3.1.2. Selbstwirksamkeitserwartungen

Die schulbezogenen Selbstwirksamkeitserwartungen wurden für die Fächer Physik (SWEPhy), Biologie (SWEBio) und Chemie (SWEChe) nach Jerusalem und Satow (1999) erhoben (Beispielitem: „Ich kann auch die schwierigen Aufgaben in ... lösen, wenn ich mich anstreng.“; sechsstufige Likert-Skala: trifft gar nicht zu=0...trifft genau zu=5). Die Skala wurde als einfaktorielles Modell geprüft und besteht hier aus fünf Items. Die einzelnen Skalen (Gesamtstichprobe und Subgruppen) erfüllen für beide Erhebungszeitpunkte die Gütekriterien im jeweiligen Modelltest und sind in Tab. 2 exemplarisch für die Gesamtstichprobe dargestellt.

Tab. 2: Ergebnisse der konfirmatorischen Faktorenanalysen zu den jeweiligen Skalen „schulbezogene Selbstwirksamkeitserwartungen“ für die Gesamtstichprobe und die Analyseperspektive Gender.

	EHZ1		EHZ2		
	SWE Phy	SWE Bio	SWE Phy	SWE Bio	SWE Che
	p (χ^2)	.066	.470	.000	.007
CFI	.997	1.000	.987	.993	.995
RMSEA	.037	.000	.088	.056	.049
SRMR	.013	.011	.020	.017	.016
skalare Invarianz					
p (χ^2)	.001	.020	.312	.023	.002
ΔCFI	.007	.005	.000	.005	.008

Allein die Analyseperspektive Gender kann in der Subgruppe BAY-9 bezüglich der Selbstwirksamkeitserwartungen im Fach Chemie nicht herangezogen werden, da die skalare Invarianz verletzt ist. Alle

Ergebnisse des EHZ2 können unter der Analyseperspektive Ausbildungsrichtung betrachtet werden. Die Werte von Cronbachs-Alpha deuten in der Gesamtstichprobe ($\alpha > .820$) und den einzelnen Subgruppen auf eine hohe Skalensreliabilität hin.

3.2. Vorstellung und Diskussion deskriptiver Befunde zu den Analyseperspektiven

Innerhalb der Analyseperspektiven Gender¹ und Ausbildungsrichtung werden die Mittelwerte der jeweiligen Gruppen (weiblich, männlich bzw. NTG, n-NTG) verglichen. Zur Prüfung signifikanter Unterschiede zwischen den Gruppen wurden Mann-Whitney-U-Tests in SPSS durchgeführt. Als Maß der Effektstärke wird Cohens d unter Berücksichtigung der jeweiligen Stichprobengröße berichtet (Cohen, 1988).

3.2.1. Analyseperspektive Gender

Das Interesse an Physik zu EHZ1 unterscheidet sich zwischen Jungen und Mädchen signifikant ($p < .001$, $d = .40$), wobei Mädchen ($MW = 1,34$; $SD = 0,74$) im Vergleich zu Jungen ($MW = 1,64$; $SD = 0,75$) von einem geringeren Interesse an Physik berichten. Innerhalb der einzelnen Klassenstufen zeigt sich dieser signifikante Gender-Gap mit kleinem Effekt ebenso. Diese Verteilung bildet sich auch in der Betrachtung der Ergebnisse zu EHZ2 ($p < .001$, $d = .48$) und den einzelnen Klassenstufen ab. Das Interesse der Mädchen ($MW = 1,10$; $SD = 0,78$) fällt dabei im Vergleich zu dem der Jungen ($MW = 1,47$; $SD = 0,75$) noch geringer als zu EHZ1 aus, was sich auch innerhalb der einzelnen Klassenstufen zeigt (vgl. Abb. 3). Die echte längsschnittliche Auswertung inklusive der Überprüfung der Messinvarianz steht noch aus.

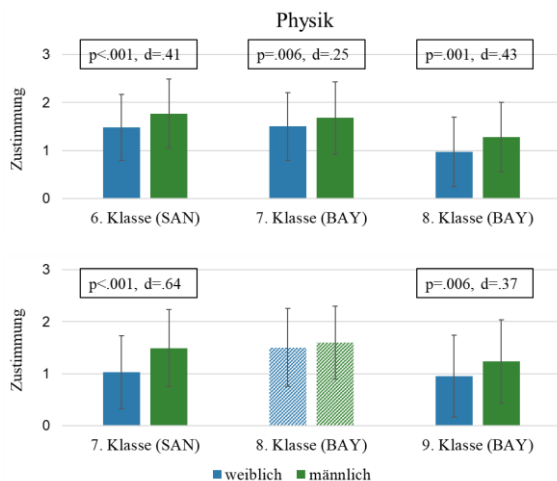


Abb. 3: Darstellung des Interesses an Physik zu EHZ1 (oben) und EHZ2 (unten) in den jeweiligen Klassenstufen unter der Analyseperspektive Gender mit Angabe von Signifikanz und Effektstärke. Die schraffierten Balken zeigen die Verletzung der skalaren Messinvarianz an.

¹ Im Beitrag werden nur binäre Unterschiede (männlich, weiblich) unter der Analyseperspektive Gender berichtet. Im Fragebogen wurden auch die Optionen divers und keine Angabe erfasst. Ein

Ein mittlerer Effekt ($p < .001$, $d = .64$) zeigt sich zu EHZ2 zwischen den Siebtklässlern ($MW = 1,49$; $SD = 0,74$) und ihren Mitschülerinnen ($MW = 1,03$; $SD = 0,70$) im Vergleich zu einem wiederum kleinen Effekt ($p = .006$, $d = .37$) zwischen den Schülerinnen ($MW = 0,95$; $SD = 0,79$) und Schülern ($MW = 1,24$; $SD = 0,80$) der neunten Klassenstufe. Möglicherweise hängt dieser mittlere Effekt mit einem nachlassenden situationalen Interesse („Neuigkeitseffekt“) im Vergleich zu EHZ1 zusammen. Ob sich dies auch in der längsschnittlichen Betrachtung zeigt oder eine Stabilisierung des Interesses an Physik in EHZ3 eintritt, kann erst in der längsschnittlichen Betrachtung beurteilt werden.

Wie im Anfangsunterricht Physik, sind genderspezifische Unterschiede auch hinsichtlich des Interesses an Chemie ($p < .001$, $d = .27$) zugunsten der Jungen ausgeprägt. Innerhalb der einzelnen Klassenstufen (vgl. Abb. 4) zeigen sich nur in der siebten Klassenstufe Unterschiede zwischen Mädchen ($MW = 1,34$; $SD = 0,73$) und Jungen ($MW = 1,63$; $SD = 0,83$) derselben Klassenstufe ($p = .002$, $d = .37$). Das Chemie-Interesse von Jungen (m) und Mädchen (w) der achten (8m: $MW = 1,76$; $SD = 0,76$; 8w: $MW = 1,79$; $SD = 0,65$) und neunten Klassenstufe (9m: $MW = 1,29$; $SD = 0,82$; 9w: $MW = 1,23$; $SD = 0,72$) ist nahezu gleich. Dies könnte mit dem Einsetzen des Fachunterrichts und einem damit einhergehenden erhöhten situationalen Interesse am neuen Fach zusammenhängen. Inwiefern aber der Faktor Gender mit einer möglicherweise altersabhängigen Wahrnehmung von Chemie in der siebten Klassenstufe in Verbindung steht, kann erst unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus EHZ3 und der Interviewdaten verstanden werden.

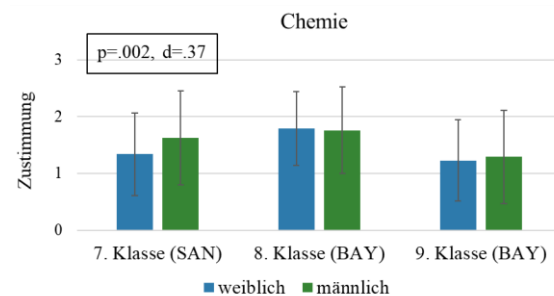


Abb. 4: Darstellung des Interesses an Chemie zu EHZ2 und in den einzelnen Klassenstufen unter der Analyseperspektive Gender mit Angabe von Signifikanz und Effektstärke.

Betrachtet man die schulbezogenen Selbstwirksamkeitserwartungen von Schülerinnen ($MW = 2,65$; $SD = 1,14$) und Schülern ($MW = 3,19$; $SD = 1,13$) zu EHZ1 ($p < .001$, $d = .48$), berichten Jungen in allen Klassenstufen von höheren Selbstwirksamkeitserwartungen im Fach Physik im Vergleich zu ihren Mitschülerinnen (vgl. Abb. 5). Der Gender-Unterschied

umfassenderer Blick auf Genderidentität(en) und „doing gender“ ist Gegenstand der Interview-Teilstudie.

ist in allen Jahrgangsstufen signifikant ($p < .001$), unterscheidet sich aber hinsichtlich der Effektstärke in den Jahrgangsstufen sechs ($d = .40$), sieben ($d = .41$) und acht ($d = .59$). Der mittlere Effekt zwischen den Achtklässlerinnen und Achtklässlern lässt sich vermutlich damit erklären, dass Mädchen während der Pubertät von tendenziell niedrigeren naturwissenschaftlichen Selbstwirksamkeitserwartungen berichten als Jungen (Schiepe-Tiska et al., 2016, S. 115), obwohl sich beide Gruppen gegen eine vertieft naturwissenschaftliche Ausbildungsrichtung entschieden haben und damit insgesamt niedrigere Selbstwirksamkeitserwartungen zu erwarten sind (vgl. 3.2.2).

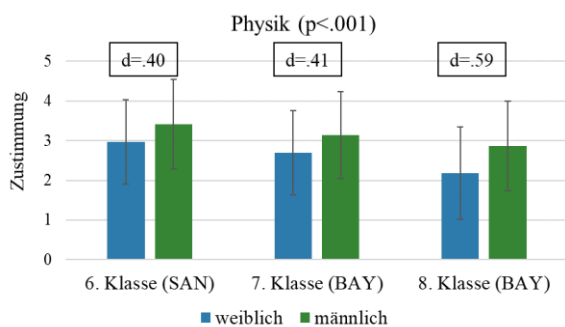


Abb. 5: Übersicht zu den Selbstwirksamkeitserwartungen der Schülerinnen und Schüler im Fach Physik zu EHZ1 in den jeweiligen Klassenstufen unter der Analyseperspektive Gender mit Angabe von Signifikanz und Effektstärke.

Die Analyseergebnisse zu EHZ2 zeigen für Mädchen zusätzlich zum Fach Physik ($p < .001$, $d = .48$), auch geringere Selbstwirksamkeitserwartungen im Fach Chemie ($p < .001$, $d = .32$). Auf Klassenstufenebene bleibt der Gender-Effekt für beide Fächer in Klassenstufe acht aus (vgl. Abb. 6), wohingegen mittlere Effekte in den Klassenstufen sieben und neun für die Selbstwirksamkeitserwartungen im Fach Physik auftreten. In Klassenstufe acht könnte dieser Befund mit der bewussten Entscheidung der Jungen und Mädchen, eine naturwissenschaftliche Ausbildungsrichtung zu wählen, einhergehen, sodass der Gender-Effekt unter diesen Bedingungen keinen Einfluss auf die Selbstwirksamkeitserwartungen der Jungen und Mädchen nimmt (vgl. 3.2.2.).

Die Selbstwirksamkeitserwartungen von Mädchen (EHZ1: $MW = 3,39$; $SD = 0,93$; EHZ2: $MW = 3,31$; $SD = 1,02$) und Jungen (EHZ1: $MW = 3,37$; $SD = 1,00$; EHZ2: $MW = 3,29$; $SD = 1,09$) unterscheiden sich für das Fach Biologie in beiden Erhebungszeitpunkten und allen Klassenstufen hingegen kaum.

Die Befunde stimmen somit mit bisherigen Forschungsbefunden überein und deuten darauf hin, dass der Faktor Gender bereits im Anfangsunterricht den Zugang von Schülerinnen und Schülern zu den Fächern Physik und Chemie beeinflusst. Ebenso scheint es, dass die Phase der Pubertät, in der auch die Auseinandersetzung mit dem (eigenen) Gender eine wichtige Rolle für Schüler*innen spielt, mit dem naturwissenschaftlichen Anfangsunterricht in den Fächern Physik und Chemie zusammenfällt, sodass die

sich entwickelnde Gender-Identität im Besonderen auf die Ausprägung der Selbstwirksamkeitserwartungen wirkt.

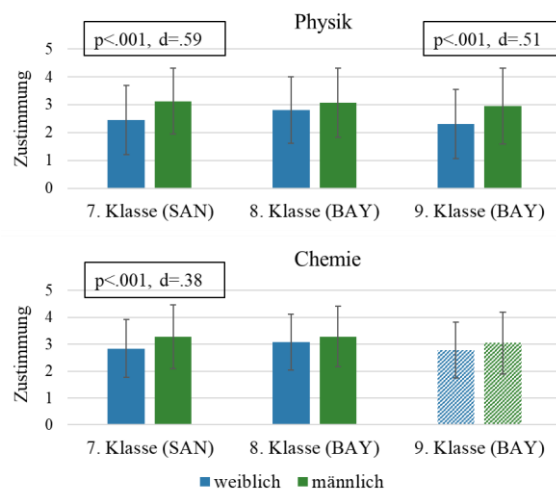


Abb. 6: Übersicht zu den schulbezogenen Selbstwirksamkeitserwartungen von Schülerinnen und Schülern zu EHZ2 für die Fächer Physik und Chemie in den jeweiligen Klassenstufen unter der Analyseperspektive Gender mit Angabe von Signifikanz und Effektstärke. Die schraffierten Bereiche zeigen die Verletzung der skalaren Invarianz an.

3.2.2. Analyseperspektive Ausbildungsrichtung

Die Analyseperspektive Ausbildungsrichtung wird zur Untersuchung der in Bayern erhobenen Daten aus EHZ2 angewandt. Eine (nicht-) naturwissenschaftliche Ausbildungsrichtung kann nur an bayerischen Gymnasien gewählt werden, sodass der Vergleich zwischen der achten (NTG-Zweig) und neunten Klassenstufe (n-NTG-Zweig) stattfindet.

Wie unter der Analyseperspektive Gender, treten signifikante Unterschiede zwischen den beiden Gruppen nur für die Selbstwirksamkeitserwartungen in den Fächern Physik ($p < .001$, $d = .35$) und Chemie ($p = .003$, $d = .28$) auf (vgl. Abb. 7).

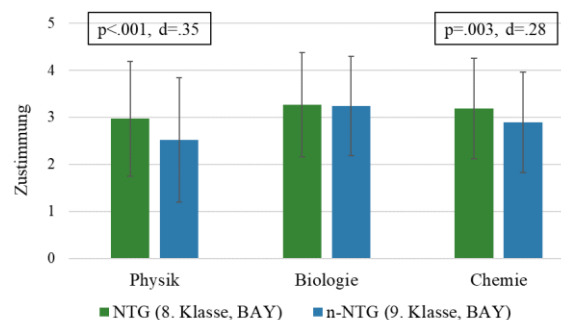


Abb. 7: Darstellung der schulbezogenen Selbstwirksamkeitserwartungen von Schüler*innen in Bayern zu EHZ2 unter der Analyseperspektive Ausbildungsrichtung mit Angabe von Signifikanz und Effektstärke.

Obwohl beide Gruppen gerade erst mit dem Chemieunterricht beginnen, berichten Schüler*innen im NTG-Zweig ($MW = 3,19$; $SD = 1,07$) von signifikant höheren Selbstwirksamkeitserwartungen als n-NTG-

wählende Schüler*innen (MW=2,89; SD=1,07). Bisher liegen noch keine Erkenntnisse dazu vor, ob zusätzlich auch die in den Fragebögen erhobene Einschätzung der eigenen Leistung und die Einschätzung des eigenen Interesses im Vergleich zu Mitschüler*innen und/oder die Wahrnehmung des Fachunterrichts ein ähnliches Muster wie die Selbstwirksamkeitserwartungen für NTG-wählende bzw. n-NTG-wählende Schüler*innen zeigen.

Betrachtet man das Interesse an Physik und Chemie, fällt das Interesse der NTG-wählenden Schüler*innen für beide Fächer signifikant höher aus als das der n-NTG-wählenden Schüler*innen (vgl. Abb. 8). Das Interesse kann unter dieser Analyseperspektive als Ausdruck einer bzw. als Hinweis auf eine MINT-Identität verstanden werden und schließt sich an den Befund, dass Bildungswegentscheidungen als Identitätsentscheidungen interpretiert werden können (vgl. Schreiner und Sjøberg (2007)), an.

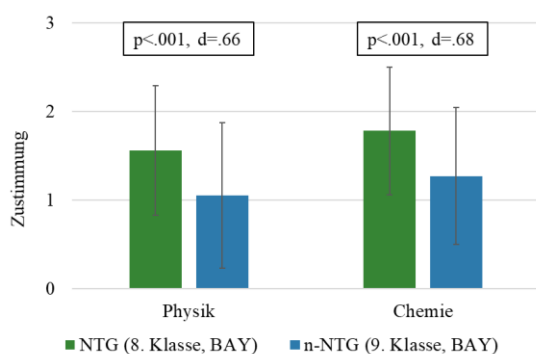


Abb. 8: Übersicht zum Interesse an Physik und Chemie von Schüler*innen in Bayern zu EHZ2 unter der Analyseperspektive Ausbildungsrichtung mit Angabe von Signifikanz und Effektstärke.

Beide Befunde sind durch die bewusst gewählte Ausbildungsrichtung und eine damit einhergehende Gruppenzugehörigkeit zu erwarten (vgl. Lewis et al. (2016)).

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der Fragebogenerhebungen bestätigen Erkenntnisse der internationalen Science Education Forschung, die von genderspezifischen Unterschieden hinsichtlich des Interesses an und der Selbstwirksamkeitserwartungen in Physik und Chemie berichten. Es wird zusätzlich deutlich, dass die Selbstwirksamkeitserwartungen in und das Interesse an Physik zwischen Jungen und Mädchen sehr ähnlich ausfallen, wenn sich beide Gruppen für eine naturwissenschaftliche Ausbildungsrichtung entschieden haben. Inwiefern sich dieser Befund auch in der längsschnittlichen Betrachtung und für das Fach Chemie zeigt, kann erst nach Abschluss von EHZ3 beurteilt werden. In der längsschnittlichen Analyse können dann auch Hypothesen aufgestellt werden, inwiefern sich der Beginn des jeweiligen Fachunterrichts auf das Interesse und die Selbstwirksamkeitserwartungen

der Schüler*innen auswirken. Ebenso scheint es, dass Bildungswegentscheidungen mit Identitätsaushandlungen in Verbindung stehen, da sich NTG-wählende Schüler*innen von nicht-NTG-wählenden Schüler*innen sowohl hinsichtlich ihrer Selbstwirksamkeitserwartungen als auch ihres Interesses bezüglich der Fächer Physik und Chemie unterscheiden.

Durch die Betrachtung weiterer Identitätsfacetten kann analysiert werden, wie Schüler*innen ihre MINT-Identität(en) im Anfangsunterricht konstruieren und wie sich diese Identität(en) und Identitätsfacetten während des Fachunterrichts entwickeln. Des Weiteren werden die quantitativen Daten mit qualitativen Daten aus den leitfadengestützten Interviews und den offenen Antworten aus dem Fragebogen trianguliert, um eine weitere Annäherung an das Identitätskonstrukt zu schaffen.

5. Literatur

- Archer, L., & DeWitt, J. (2015). Science Aspirations and Gender Identity: Lessons from the ASPIRES Project. In E. K. Henriksen, J. Dillon, & J. Ryder (Eds.), *Understanding Student Participation and Choice in Science and Technology Education* (pp. 89-102). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7793-4_6
- Archer, L., DeWitt, J., Osborne, J., Dillon, J., Willis, B., & Wong, B. (2010). "Doing" science versus "being" a scientist: Examining 10/11-year-old schoolchildren's constructions of science through the lens of identity. *Science Education*, 94(4), 617-639. <https://doi.org/10.1002/sc.20399>
- ASPIRES. (2016). Skalen aus der ASPIRES-Studie (<https://www.ucl.ac.uk/ioe/departments-and-centres/departments/education-practice-and-society/aspires-research>). *Erhalten im Rahmen einer Emailkorrespondenz mit Jennifer DeWitt, King's College London*. (13.09.2016).
- Brickhouse, N. W. (2001). Embodying science: A feminist perspective on learning. *Journal of Research in Science Teaching*, 38(3), 282-295.
- Brickhouse, N. W., Lowery, P., & Schultz, K. (2000). What Kind of a Girl Does Science? The Construction of School Science Identities. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(5), 441-458.
- Bub, F., Rabe, T., Christ, L.-M., & Krey, O. (2024). MINT-Identität im Anfangsunterricht: Eine quantitative Annäherung. In H. van Vorst (Ed.), *Frühe naturwissenschaftliche Bildung* (pp. 254-257). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Hamburg 2023. https://gdcp-ev.de/wp-content/uploads/securepdfs/2024/06/D16_Bub.pdf
- Carlone, H. B., & Johnson, A. (2007). Understanding the science experiences of successful women of color: Science identity as

- an analytic lens. *Journal of Research in Science Teaching*, 44(8), 1187-1218.
<https://doi.org/10.1002/tea.20237>
- Carlone, H. B., Scott, C. M., & Lowder, C. (2014). Becoming (less) scientific: A longitudinal study of students' identity work from elementary to middle school science. *Journal of Research in Science Teaching*, 51(7), 836-869.
<https://doi.org/10.1002/tea.21150>
- Chen, F. F. (2007). Sensitivity of Goodness of Fit Indexes to Lack of Measurement Invariance. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 14(3), 464-504.
- Christ, L.-M., Krey, O., Bub, F., & Rabe, T. (2023). Identitätsaushandlungen von Schüler*innen zu MINT im Anfangsunterricht. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, 433-437. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1343/1590>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- DeWitt, J., & Archer, L. (2015). Who Aspires to a Science Career? A comparison of survey responses from primary and secondary school students. *International Journal of Science Education*, 37(13), 2170-2192.
- DeWitt, J., Archer, L., Osborne, J., Dillon, J., Willis, B., & Wong, B. (2011). High aspirations but low progression: The science aspirations-careers paradox amongst minority ethnic students. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 9(2), 243-271.
<https://doi.org/10.1007/s10763-010-9245-0>
- Hazari, Z., Dou, R., Sonnert, G., & Sadler, P. M. (2022). Examining the relationship between informal science experiences and physics identity: Unrealized possibilities. *Physical Review Physics Education Research*, 18(1), 010107.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.18.010107>
- Hazari, Z., Sonnert, G., Sadler, P. M., & Shanahan, M.-C. (2010). Connecting high school physics experiences, outcome expectations, physics identity, and physics career choice: A gender study. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(8), 978-1003.
<https://doi.org/10.1002/tea.20363>
- Hu, L.-t., & Bentler, P. M. (1999). Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 6, 1-55.
- Jerusalem, M., & Satow, L. (1999). Schulbezogene Selbstwirksamkeitserwartung (WIRKSCHUL). In R. Schwarzer & M. Jerusalem (Eds.), *Skalen zur Erfassung von Lehrer- und Schülermerkmalen. Dokumentation der psychometrischen Verfahren im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung des Modellversuchs Selbstwirksame Schulen* (pp. 15-17). o.A.
- Kessels, U., Rau, M., & Hannover, B. (2006). What goes well with physics? Measuring and altering the image of science. *British Journal of Educational Psychology*, 76(4), 761-780.
<https://doi.org/10.1348/000709905X59961>
- Lewis, K. L., Stout, J. G., Pollock, S. J., Finkelstein, N. D., & Ito, T. A. (2016). Fitting in or opting out: A review of key social-psychological factors influencing a sense of belonging for women in physics. *Physical Review Physics Education Research*, 12(2), 020110.
<https://doi.org/10.1103/physrevphyseducres.12.020110>
- Lock, R. M., Hazari, Z., & Potvin, G. (2019). Impact of out-of-class science and engineering activities on physics identity and career intentions. *Physical Review Physics Education Research*, 15(2), 020137.
- Rabe, T., & Krey, O. (2018). Identitätskonstruktionen von Kindern und Jugendlichen in Bezug auf Physik – Das Identitätskonstrukt als Analyseperspektive für die Physikdidaktik? *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 24(1), 201-216.
<https://doi.org/10.1007/s40573-018-0083-x>
- Schiepe-Tiska, A., Simm, I., & Schmidner, S. (2016). Motivationale Orientierungen, Selbstbilder und Berufserwartungen in den Naturwissenschaften in PISA 2015. In K. Reiss, C. Sälzer, A. Schiepe-Tiska, E. Klieme, & O. Köller (Eds.), *PISA 2015. Eine Studie zwischen Kontinuität und Innovation* (pp. 99-132). Waxmann.
- Schreiner, C., & Sjøberg, S. (2007). Science education and youth's identity construction-two incompatible projects? In D. Corrigan, J. Dillon, & R. Gunstone (Eds.), *The re-emergence of values in science education* (pp. 231-247). Brill.
- Shanahan, M.-C. (2009). Identity in science learning: exploring the attention given to agency and structure in studies of identity. *Studies in science education*, 45(1), 43-64.

Förderung

Das Forschungsprojekt „Identitätsaushandlungen zu MINT im Kontext von naturwissenschaftlichem Anfangsunterricht“ (IdentMINT) wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und ist ein Verbundprojekt der Universität Augsburg und der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Die Förderkennzeichen von IdentMINT lauten: 16MF1021A und 16MF1021B.

Konzeptionelles Verständnis von Studierenden der Ingenieurwissenschaften zum elektrischen Stromkreis

Bernadette Schorn*, Alexander Voigt⁺

*Europa-Universität Flensburg, ⁺Hochschule Flensburg
Bernadette.Schorn@uni-flensburg.de

Kurzfassung

Sowohl national als auch international zeigen sich in den Studien zu Lernendenvorstellungen zum elektrischen Stromkreis bei Studierenden typische Lernendenvorstellungen und Lernschwierigkeiten, wie z. B. die Stromverbrauchsvorstellung (Burde et al. 2022, Chang & Shieh 2018, Fromme 2018, Goris & Dyrenfurth 2013). Zur Untersuchung des Verständnisses von Studierenden der Ingenieurwissenschaften zu grundlegenden Konzepten des elektrischen Stromkreises und möglichen Veränderungen des konzeptionellen Verständnisses durch Lehrveranstaltungen wurden an der Hochschule Flensburg in einem Zwei-Gruppen-Pretest-Posttest-Design Befragungen durchgeführt. Es werden erste Ergebnisse der Interventionsstudie vorgestellt.

1. Einleitung

In Untersuchungen zu Lernendenvorstellungen zum elektrischen Stromkreis zeigen sich bei Studierenden der Ingenieurwissenschaften neben der im Allgemeinen weit verbreiteten Stromverbrauchsvorstellung (Chang & Shieh, 2018; Goris & Dyrenfurth, 2013) auch weitere physikalisch nicht adäquate Konzepte, wie beispielsweise die „Als-ob-Vorstellungen“ (Schecker & Duit, 2018, S. 9), dass die elektrische Spannung eine Eigenschaft des elektrischen Stroms ist (Goris & Dyrenfurth, 2013; Sangam & Jesiek, 2012) oder dass eine Batterie eine konstante Stromquelle darstellt (Goris & Dyrenfurth, 2013; Riegler et al., 2016). Ebenso lässt sich z. B. auch die sogenannte sequenzielle Betrachtung von elektrischen Stromkreisen feststellen (Smaill et al., 2012). Mit dem Ziel, u. a. eine Aussage dazu zu ermöglichen, ob sich eine Veränderung hinsichtlich des konzeptionellen Verständnisses zu grundlegenden Konzepten des einfachen elektrischen Stromkreises durch eine Intervention feststellen lässt, wurden bei Studierenden der Ingenieurwissenschaften an der Hochschule Flensburg Befragungen durchgeführt (für weitere übergeordnete Fragestellungen und zugehörige erste Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen siehe Schorn et al., 2023). Im Folgenden werden zunächst das Erhebungsinstrument und das Untersuchungsdesign sowie im Anschluss erste Ergebnisse der Interventionsstudie vorgestellt.

2. Erhebungsinstrument und Untersuchungsdesign

Zur Datenerhebung wurde ein zweistufiger Multiple-Choice-Test zum einfachen elektrischen Stromkreis, der Two-Tier-Simple-Electric-Circuits-Test (2T-SEC-Test; Ivanjek et al. 2021) eingesetzt. Dieser Test umfasst insgesamt 25 Items zu den Konzepten „offene und geschlossene Stromkreise“, „Reihen- und Parallelschaltungen“, „elektrische Stromstärke“, „elektrischer Widerstand“ und „elektrische Spannung“ bei elektrischen Stromkreisen. Jedes Item besitzt zwei Stufen mit einer inhaltlichen Fragestellung (erste Stufe) und einer Begründung zu der in der ersten Stufe gewählten Antwortvorgabe (zweite Stufe). Die Bewertung der Items wurde auf der Grundlage des Paired-Scoring-Modells¹ vorgenommen, um insbesondere die Wahrscheinlichkeit zu reduzieren, durch Raten bei der Bearbeitung der Items einen Punkt zu erhalten und um den Schwierigkeitsgrad des für Schüler:innen in der Mittelstufe und höher entwickelten 2T-SEC-Tests im Vergleich zu einer möglichen Bewertung durch eine separate Punktevergabe für richtige Angaben auf jeder der beiden Stufen der Items zu erhöhen.

Der Interventionsstudie liegt ein Zwei-Gruppen-Pretest-Posttest-Design zugrunde: Sowohl bei der Interventionsgruppe als auch bei der Kontrollgruppe werden zu Beginn (Pretest) und am Ende (Posttest) der Vorlesungszeit das konzeptionelle Verständnis der Studierenden zu grundlegenden Konzepten des einfachen elektrischen Stromkreises erhoben. Während die

¹ Paired-Scoring-Modell: Die Antworten zu den zweistufigen Multiple-Choice-Aufgaben werden als richtig und mit einem Punkt bewertet, wenn sowohl die richtige Antwort auf der ersten Stufe als auch die richtige Begründung auf der zweiten Stufe ausgewählt

werden, andernfalls werden die Antworten mit null Punkten bewertet (siehe Ivanjek et al., 2021).

Studierenden der Interventionsgruppe im Verlauf der Vorlesungszeit Veranstaltungen zur „Elektrotechnik I“ (Vorlesung, Übung und Tutorium) sowie ein Labor zur „Elektrotechnik II“ besucht haben, u. a. mit Inhalten zum elektrischen Stromkreis und den zugehörigen physikalischen Größen, waren derartige Inhalte kein Bestandteil der Veranstaltungen der Kontrollgruppe.

3. Ergebnisse

Aus den Erhebungen im Wintersemester 2022/2023 und Sommersemester 2023 an der Hochschule Flensburg liegen von insgesamt 51 Studierenden der Ingenieurwissenschaften (Studentinnen: $N = 9$ (18%), Studenten: $N = 41$ (80%), keine bzw. nicht eindeutige Antworten zum Geschlecht: $N = 1$ (2%)) im Alter von 18–31 Jahren ($m = 21,12$; $SD = 2,66$) Daten zu Beginn und am Ende der Semester vor, die ausgewertet werden konnten². Die Stichprobe besteht zu 41% aus Proband:innen der Interventionsgruppe ($N = 21$; Studiengänge „Energiewissenschaften“ (EnWi) und „Schiffstechnik“ (ST)) und zu 59% aus Proband:innen der Kontrollgruppe ($N = 30$; Studiengänge „Maschinenbau“ (MB) und „Biotechnologie, Lebensmitteltechnologie und Verfahrenstechnik“ (BLVT)).

Zu Beginn der Vorlesungszeiten ergeben sich bei den Studierenden der Ingenieurwissenschaften die in Abb.1 dargestellten relativen mittleren erreichten Gesamtpunktzahlen zu den fünf untersuchten

grundlegenden Konzepten des einfachen elektrischen Stromkreises. Im Durchschnitt erzielten die Proband:innen im Pretest zwischen 39% und 76% der möglichen Maximalpunktzahlen. Anhand eines Vergleichs der mittleren erreichten Gesamtpunktzahlen zeigen sich die meisten Schwierigkeiten der Studierenden bei dem Konzept „elektrische Spannung“ und die wenigsten Schwierigkeiten bei dem Konzept „offene und geschlossene Stromkreise“. Im Hinblick auf die Zugehörigkeit der Proband:innen zur Interventions- bzw. Kontrollgruppe lassen sich auf einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,01$ keine statistisch signifikanten Unterschiede bezüglich der durchschnittlich erreichten Gesamtpunktzahlen feststellen³.

Für beide Erhebungszeitpunkte sind in Tab.1 die Mittelwerte (m) für die erreichten Gesamtpunktzahlen der Studierenden der Interventionsgruppe (IG) und der Kontrollgruppe (KG) jeweils für den Pretest ($m_{IG,pre}$, $m_{KG,pre}$) und Posttest ($m_{IG,post}$, $m_{KG,post}$), die erreichten Gesamtpunktzahlen gemittelt über die Gruppen für den Pre- und Posttest (m_{pre} , m_{post}) und die erreichten Gesamtpunktzahlen gemittelt über die Messzeitpunkte für die Gruppen (m_{IG} , m_{KG}) angegeben, jeweils einschließlich der zugehörigen Standardabweichungen (SD). Zur Untersuchung, ob hinsichtlich des konzeptionellen Verständnisses zu den einzelnen Konzepten (abhängige Variable) statistisch signifikante Mittelwertunterschiede sowohl in Bezug auf die Zugehörigkeit der Proband:innen zur Interventions- bzw. Kontrollgruppe als auch bezüglich der

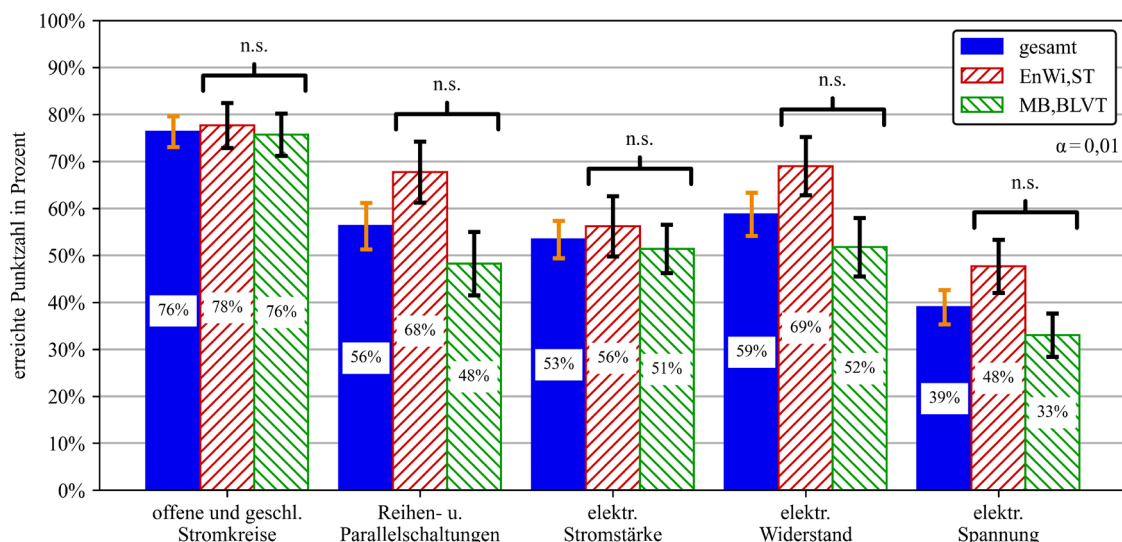


Abb.1: Mittlere erreichte Gesamtpunktzahl bei Studierenden der Ingenieurwissenschaften im Pretest für die einzelnen Konzepte. Die Unsicherheitsbalken zeigen die Standardabweichung des arithmetischen Mittelwertes (SEM).

² Um bei der Auswertung Fragebögen auszuschließen, die möglicherweise aufgrund der freiwilligen Teilnahme nicht vollständig ausgefüllt wurden, wurden nur Fragebögen berücksichtigt, bei denen jeweils mindestens 60% der zweistufigen Multiple-Choice-Aufgaben zu den in dem Testinstrument betrachteten fünf grundlegenden Konzepten des einfachen elektrischen Stromkreises bearbeitet sind.

³ Zur Untersuchung der Mittelwertunterschiede hinsichtlich der Zugehörigkeit zur Interventions- bzw. Kontrollgruppe wurde für die einzelnen Konzepte jeweils ein t-Test durchgeführt. Da davon auszugehen ist, dass die einzelnen Konzepte miteinander in Zusammenhang stehen, wurde aufgrund der α -Fehlerinflation bezüglich des Signifikanzniveaus eine Bonferroni-Korrektur durchgeführt. Daraus ergibt sich ein adjustiertes Signifikanzniveau von $\alpha = 0,01$.

Tab.1: Mittelwerte und Standardabweichungen für Proband:innen der Interventionsgruppe (IG) und Kontrollgruppe (KG) im Pre- und Posttest (Spalten 3–6), zu verschiedenen Messzeitpunkten gemittelt über die Gruppe (Spalten 7–8), sowie für die verschiedenen Gruppen gemittelt über die Messzeitpunkte (Spalten 9–10).

Konzept		IG		KG		Messzeitpunkt		Gruppe	
		pre	post	pre	post	pre	post	IG	KG
„offene u. geschl. Stromkreise“ (3 Items)	<i>m</i>	2,33	2,81	2,27	2,53	2,29	2,65	2,57	2,40
	<i>SD</i>	0,658	0,402	0,740	0,681	0,701	0,594	0,539	0,705
„Reihen- u. Parallelschaltungen“ (4 Items)	<i>m</i>	2,71	2,71	1,93	2,03	2,25	2,31	2,71	1,98
	<i>SD</i>	1,189	1,384	1,484	1,497	1,412	1,476	1,274	1,478
„elektr. Stromstärke“ (5 Items)	<i>m</i>	2,81	4,43	2,57	2,43	2,67	3,25	3,62	2,50
	<i>SD</i>	1,470	1,076	1,406	1,455	1,424	1,635	1,272	1,419
„elektr. Widerstand“ (4 Items)	<i>m</i>	2,76	3,10	2,07	2,03	2,35	2,47	2,93	2,05
	<i>SD</i>	1,136	0,995	1,363	1,273	1,309	1,270	1,055	1,308
„elektr. Spannung“ (9 Items)	<i>m</i>	4,29	5,48	2,97	3,00	3,51	4,02	4,89	2,99
	<i>SD</i>	2,327	2,358	2,266	2,533	2,361	2,731	2,314	2,383

zwei Messzeitpunkte Pretest und Posttest sowie eine Wechselwirkung dieser beiden Faktoren vorliegen, wurden für jedes Konzept eine univariate zweifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung mit dem Gruppenfaktor „Gruppe“ und dem Messwiederholungsfaktor „Messzeitpunkt“ durchgeführt.⁴ In Tab.2 sind die Ergebnisse der zweifaktoriellen ANOVAs mit Messwiederholung zu den untersuchten fünf grundlegenden Konzepten des einfachen elektrischen Stromkreises dargestellt. Aus den interpretierbaren Ergebnissen der zweifaktoriellen ANOVAs mit Messwiederholung geht unter Berücksichtigung der Mittelwerte und Standardabweichungen in Tab.2 folgendes hervor: Hinsichtlich der Konzepte „elektrische Stromstärke“, „elektrischer Widerstand“ und „elektrische Spannung“ ist die durchschnittlich erreichte Gesamtpunktzahl bei den Studierenden der Interventionsgruppe (m_{IG}) unabhängig vom Messzeitpunkt statistisch signifikant größer als bei den

Studierenden der Kontrollgruppe (m_{KG}). Bei den Konzepten „offene und geschlossene Stromkreise“ sowie „Reihen- und Parallelschaltungen“ liegen keine statistisch signifikanten Mittelwertunterschiede bezüglich der erreichten Gesamtpunktzahlen bei Studierenden der unterschiedlichen Gruppen unabhängig vom Messzeitpunkt vor. Im Hinblick auf die Konzepte „offene und geschlossene Stromkreise“ sowie „elektrische Spannung“ ist die durchschnittlich erreichte Gesamtpunktzahl der Studierenden unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit im Posttest (m_{post}) statistisch signifikant größer als im Pretest (m_{pre}); bei den Konzepten „Reihen- und Parallelschaltungen“ sowie „elektrischer Widerstand“ liegen keine statistisch signifikanten Mittelwertunterschiede bezüglich der erreichten Gesamtpunktzahlen im Pre- und Posttest unabhängig von der Zugehörigkeit der Proband:innen zur Interventions- bzw. Kontrollgruppe vor. Darüber hinaus liegt für das Konzept

Tab.2: Statistische Kennzahlen der ANOVAs mit Messwiederholung für die einzelnen Konzepte. Hervorgehoben sind die Kennzahlen der Faktoren und Wechselwirkungen, die unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen und der zugehörigen Interaktionsdiagramme interpretiert werden können.

Konzept	Gruppe (IG, KG)				Messzeitpunkt (pre, post)				Messzeitpunkt*Gruppe				Art
	<i>F</i>	<i>df</i>	<i>p</i>	η_{part}^2	<i>F</i>	<i>df</i>	<i>p</i>	η_{part}^2	<i>F</i>	<i>df</i>	<i>p</i>	η_{part}^2	
„offene u. geschl. Stromkreise“	1,240	1	,271	,025	13,305	1	<,001	,214	1,058	1	,309	,021	
„Reihen- u. Parallelschaltungen“	3,759	1	,058	,071	0,130	1	,720	,003	0,130	1	,720	,003	
„elektr. Stromstärke“	11,237	1	,002	,187	13,305	1	<,001	,214	18,510	1	<,001	,274	hybrid
„elektr. Widerstand“	9,474	1	,003	,162	0,570	1	,454	,011	0,851	1	,361	,017	
„elektr. Spannung“	8,835	1	,005	,153	7,418	1	,009	,131	6,632	1	,013	,119	

⁴ Da davon auszugehen ist, dass die einzelnen Konzepte miteinander im Zusammenhang stehen, wurde wegen der α -Fehlerinflation bezüglich des Signifikanzniveaus eine Bonferroni-Korrektur

durchgeführt. Daraus ergibt sich ein adjustiertes Signifikanzniveau von $\alpha = 0,01$.

„elektrische Stromstärke“ eine statistisch signifikante Wechselwirkung vor: Die durchschnittlich erreichte Gesamtpunktzahl der Studierenden der Interventionsgruppe ist im Posttest statistisch signifikant größer als im Pretest, d. h. $m_{IG,post} > m_{IG,pre}$. Der Anstieg der mittleren Gesamtpunktzahl der Proband:innen der Interventionsgruppe zwischen Pre- und Posttest, $m_{IG,post} - m_{IG,pre}$, ist zudem statistisch signifikant größer als die betragsmäßige Änderung der durchschnittlich erreichten Gesamtpunktzahlen der Proband:innen der Kontrollgruppe zwischen Post- und Pretest, d. h.

$$m_{IG,post} - m_{IG,pre} > |m_{KG,post} - m_{KG,pre}|. \quad \{1\}$$

Dies deutet auf die Intervention als mögliche Ursache für die statistisch signifikante Verbesserung des konzeptionellen Verständnisses hinsichtlich des Konzepts „elektrische Stromstärke“ bei den Studierenden der Interventionsgruppe hin. Betrachtet man zudem das Antwortverhalten der Proband:innen der Interventionsgruppe bezüglich der einzelnen Items des Konzepts „elektrische Stromstärke“ sowohl im Pretest als auch im Posttest, so lässt sich insbesondere eine Abnahme der Stromverbrauchsvorstellung feststellen. Hinsichtlich der Konzepte „offene und geschlossene Stromkreise“, „Reihen- und Parallelschaltungen“, „elektrischer Widerstand“ sowie „elektrische Spannung“ liegen keine statistisch signifikanten Wechselwirkungen vor.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der Interventionsstudie mit Studierenden der Ingenieurwissenschaften zeigen, dass sich das konzeptionelle Verständnis der Proband:innen der Interventionsgruppe nach der Intervention im Vergleich zum Zeitpunkt vor der Intervention ausschließlich zum Konzept „elektrische Stromstärke“ statistisch signifikant verbessert hat. Die Analyse des Antwortverhaltens der Proband:innen zu den einzelnen Items dieses Konzepts zu beiden Testzeitpunkten zeigt vor allem eine Abnahme der Stromverbrauchsvorstellung bei den Studierenden der Interventionsgruppe.

Im Weiteren ist zum einen geplant, zusätzliche Interventionsstudien mit Studierenden der Ingenieurwissenschaften durchzuführen, um statistische Analysen mit einem größeren Stichprobenumfang zu ermöglichen. Zum anderen soll eine detaillierte Analyse der Lernendenvorstellungen erfolgen, die dem konzeptionellen Verständnis der Studierenden zugrunde liegen. Im Anschluss daran sollen unter Berücksichtigung der Erkenntnisse zum konzeptionellen Verständnis der Studierenden der Ingenieurwissenschaften Lehrmaterialien entwickelt und erprobt werden.

5. Literatur

Burde, J.-P., Ivanjek, L., Wilhelm, T., Schubatzky, T., Haagen-Schützenhöfer, C., Dopatka, L., Spatz, V. & Hopf, M. (2022): Schülervorstellungen in Schule und Studium – ein Vergleich. In: S. Habig & H. van Vorst (Hrsg.), *Unsicherheit*

als Element von naturwissenschaftsbezogenen Bildungsprozessen. *Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Virtuelle Jahrestagung 2021*. (S. 372). Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Universität Duisburg-Essen.

Chang, W. & Shieh, R. S (2018): A study of the conceptual comprehension of electric circuits that engineer freshmen display. In: *European Journal of Physics*, 39 (4), 045705.

Fromme, B. (2018): Fehlvorstellungen bei Studienanfängern: Was bleibt vom Physikunterricht der Sekundarstufe I? In: *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung – Würzburg 2018*.

Goris, T. V. & Dyrenfurth, M. J. (2013): How Electrical Engineering Technology Students Understand Concepts of Electricity. Comparison of Misconceptions of Freshmen, Sophomores, and Seniors. In: *American Society for Engineering Education*. 120th ASEE Annual Conference & Exposition.

Ivanjek, L., Morris, L., Schubatzky, T., Hopf, M., Burde, J.-P., Haagen-Schützenhöfer, C., Dopatka, L., Spatz, V. & Wilhelm, T. (2021): Development of a two-tier instrument on simple electric circuits. In: *Physical Review Physics Education Research*, 17 (2).

Riegler, P., Simon, A., Prochaska, M., Kautz, C., Bierwirth, R., Hagendorf, S. & Kortemeyer, G. (2016): Using Tutorials in Introductory Physics on circuits in a German university course: observations and experiences. In: *Physics Education*, 51 (6), 065014.

Sangam, D. & Jesiek, B. K. (2012): Conceptual Understanding of Resistive Electric Circuits Among First-Year Engineering Students. In: *American Society for Engineering Education*. ASEE Annual Conference & Exposition.

Schecker, H. & Duit, R. (2018): Schülervorstellungen und Physiklernen. In: H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf, R. Duit (Hrsg.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*. Berlin: Springer-Spektrum, 1–22.

Schorn, B., Ablaß, M. & Voigt, A. (2023): Vorstellungen von Studierenden zum elektrischen Stromkreis. In: *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung – Hannover 2023*, S. 233–240.

Smaill, C. R., Rowe, G. B., Godfrey, E. & Paton, R. O. (2012): An Investigation Into the Understanding and Skills of First-Year Electrical Engineering Students. In: *IEEE Transaction on education*, 55 (1), 29–35.

Konzeption, Entwicklung und Evaluation eines Laserlabors für Schüler:innen

- Eine Projektentwicklung zur Laserphysik im Design-Based-Research Verfahren -

Roman Kuhr (geb. Gruchow)*, Heidi Reinholz*, Lukas Maczewsky*

*Universität Rostock, Institut für Physik
roman.gruchow@uni-rostock.de

Kurzfassung

Es wird ein Projekttag für SchülerInnen zur Laserphysik entwickelt. Zielsetzung ist die Konzeption, Entwicklung und Evaluation dieses Projekttags. Dabei wird das Projekt im Design-Based-Research Verfahren entwickelt. Es wird erforscht, welche Inhalte sich im Rahmen des Projekttages vermitteln lassen, indem Studierende begleitet und interviewt werden. Weiterhin wird untersucht, welche Lernschwierigkeiten und Hürden bei der Vermittlung auftreten. Evaluert wird der Projekttag durch eine Befragung der Lehrkräfte und SchülerInnen sowie mit einem Fragebogen zur intrinsischen Motivation. Die Umsetzung ist im Rahmen eines Wahlpflichtseminars angelaufen und Daten werden fortlaufend erhoben. Im Folgenden wird der aktuelle Arbeitsstand geschildert.

1. Motivation

An der Universität Rostock werden eine Vielzahl von Vermittlungskonzepten zwischen WissenschaftlerInnen, Studierenden und SchülerInnen erprobt. Eine bewährte Methode sind sogenannte Lehr-Lern-Labore (LLL), in denen Studierende selbstgestaltete Projekte für SchülerInnen in authentischer Lernumgebung mit intra- sowie extracurricularen Themen erstellen. Zudem wird die Vermittlungskompetenz von Studierenden gestärkt [1]. An der Universität Rostock ist das LLL PhySch¹ (Physik und Schule) fest etabliert und bietet eine Bandbreite von Angeboten zur Mechanik, Astronomie, Elektrizitätslehre sowie abiturrelevanten Themen Schulklassen aus dem ganzen Bundesland Mecklenburg-Vorpommern. Zur Optik gibt es einen Escape-Room für die Klassenstufe 6 bis 8. Mit dem hier vorgestellten Projekt soll ein ergänzendes Angebot für SchülerInnen der Sekundarstufe II geschaffen werden. Thematisch wird die Laserphysik im Zentrum stehen und es soll die Frage beantwortet werden: Wie funktioniert ein Laser?

Im Rahmen des selbstgestaltetes SchülerInnen-Projekt erarbeiten sich Studierende Inhalte der Laserphysik, die sie anschließend gemeinsam mit Schulklassen durchführen. Die Vorteile eines LLL liegen nahe [2]: Studierende können ihre Lehrerfahrung im sicheren Umfeld erproben sowie ihr pädagogisches Fachwissen vertiefen [3]. Zudem werden von den Studierenden ausgewählte Inhalte bearbeitet, welche später in ihrer beruflichen Zukunft im schulischen Kontext eine Wiederverwendung finden können.

Die thematische Ausrichtung zielt auf die Laserphysik, insbesondere die Grundlagen und Anwendungsgebiete von Lasern, ab. Laser sind im Rahmenplan von Mecklenburg-Vorpommern nur randständig als Empfehlung zur Vertiefung enthalten, weshalb die SchülerInnen daher kein sicheres Verständnis für komplexere Zusammenhänge über den Schulstoff hinaus aufweisen [4]. Nun sollen dementsprechend die Grundlagen in der Photonik und Laserphysik gelegt werden. Daher ist die Zielstellung des Projekttages, SchülerInnen das Besondere an Lasern, die Funktionsweise, den Aufbau und die Anwendungen näher zu bringen. Dieses Projektvorhaben wird fortan als LaserLab bezeichnet.

2. Methodik

Das Projekt wird im Design-Based-Research (DBR) Verfahren durchgeführt [5] (vgl. Abbildung 1). Das Ziel des iterativen Arbeitens im DBR-Prozess nach Anderson und Shattuck ist die Verknüpfung zwischen praktischer Entwicklung und theoriegeleiteter Forschung [6]. Im vorliegenden Fall wird eine authentische Lernumgebung an der Universität im Labor als Projekttag für SchülerInnen entwickelt und getestet. Auf Forschungsebene werden theoriegeleitet Interventionen zur Verbesserung des Lernerfolgs erprobt und somit fachdidaktische Erkenntnisse zur Vermittlung spezifischer Inhalte erworben.

In Abbildung 1 ist der DBR-Prozess für die Konzeptionierung, Entwicklung und Evaluation des LaserLabs dargestellt. Der obere Abschnitt repräsentiert die praktische Ebene, während die untere Hälfte die theoretische Ebene darstellt. Die entwickelten Lernmodule werden mit Studierenden

¹ PhySch des Instituts für Physik von der Universität Rostock: <http://web.physik.uni-rostock.de/physch/>

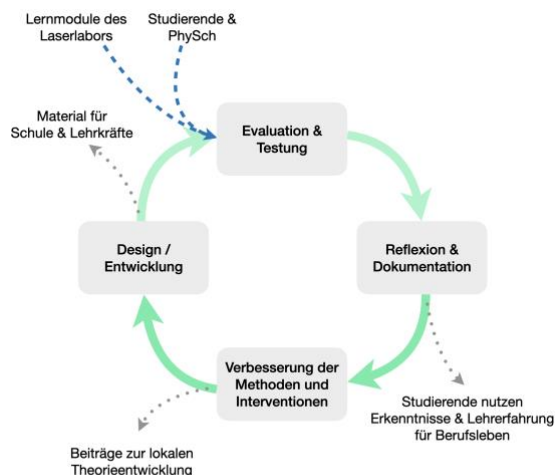


Abb. 1: Angepasster DBR-Prozess für das LaserLab

weiterentwickelt und an Schulklassen getestet. Jeder Durchführung folgen eine Dokumentation und Reflexion der Vermittlungsprozesse. Die Studierenden entwickeln dabei ihre eigenen fachdidaktischen Kenntnisse (pedagogical content knowledge, PCK) weiter und können erstellte Materialien mit in Ihr Berufsleben übernehmen [7]. Als theoretischer Schwerpunkt stehen die Interventionen im Mittelpunkt, die durchgeführt werden, um fortan den Lernerfolg zu verbessern. Dies gibt Aufschluss über themenspezifische Lernschwierigkeiten und mögliche Fehlkonzepte. Begleitet wird dieser Prozess durch schriftliche Dokumentation und einen Fragebogen. Zuletzt steht die Entwicklung bzw. das Re-Design des existierenden Projekts an, bevor der Zyklus erneut beginnt. Die Zielstellung in Bezug auf die Öffentlichkeitsarbeit ist zudem, an jeder Schnittstelle einen Mehrwert zu bieten, der über den Projekttag hinausgeht. Konkret bedeutet dies die Entwicklung von Lehrmaterial, was Lehrkräften zugänglich gemacht wird, sowie der persönliche Nutzen für Studierende und die Ableitung von Lerntheorien zu spezifischen Inhalten auf theoretischer Ebene.

Im ersten Schritt werden durch eine Inhaltsanalyse die relevanten physikalischen Konzepte zum Laser herausgestellt. Daraus werden einzelne Lernmodule abgeleitet, welche vorbereitet werden und Studierenden als Arbeitsgrundlage gegeben werden. Dies wird mit der Forschungsfrage begleitet: „Welche Inhalte über den Aufbau, die Funktionsweise und die Anwendung von Lasern können im Rahmen des Lehr-Lern-Labors vermittelt werden?“. Es wurde eine Pilotstudie in Form einer Umfrage für Physiklehrkräfte (aus Mecklenburg-

Vorpommern, N=19) durchgeführt, die die Motivation von Lehrkraft zur Teilnahme an einem außerschulischen Lernort mit ihrer Klasse erfragt. Als Grund für einen Besuch eines außerschulischen Lernorts wurde am häufigsten genannt, dass das Lernen an einem Ort außerhalb der Schule als sehr wichtig angesehen wird. Die praxisnahe Bildung und die bessere Ausstattung im Vergleich zur Schule waren die zweithäufigsten Gründe. Es werden jedoch deutlich mehr Gründe gegen die Teilnahme wie Zeitmangel, Planungsaufwand und die verbundenen Kosten genannt. Daher muss das LaserLab sowohl inhaltlich ansprechend für SchülerInnen aufbereitet sein als auch vom Angebot und der Einbeziehung in den Unterrichtskontext her für Lehrkräfte attraktiv gestaltet sein. Dem wird Rechnung getragen, indem das LaserLab inhaltlich abgeschlossen ist und thematisch äquivalente Schulstunden vollständig substituiert. In der Umfrage wurde zudem nach relevanten Inhalten aus Sicht der Lehrkräfte für die Entwicklung eines LaserLabs erfragt. Dabei war Lehrkräften besonders wichtig, den Praxis- und eigenständigen Experimentieranteil zum Aufbau, der Funktionsweise und den Anwendungen von Lasern herauszustellen.

Als Richtlinie wird der Rahmenplan des Landes Mecklenburg-Vorpommern verwendet. Es wird in der elften und zwölften Klasse vorgesehen, dass elektromagnetische Wellen, die Wechselwirkung von Licht und Materie, das Energiestufenmodell und das elektromagnetische Spektrum und Quellen unterschiedlicher Spektren behandelt werden. Zudem wird bereits zuvor in der achten, bzw. zehnten Klasse das Bohrsche Atommodell und die Erzeugung von Laserlicht qualitativ behandelt [4]. Dies sind die Anknüpfungspunkte an das Vorwissen, welche im LaserLab aufgegriffen werden und so intrinsische Motivation und einen höheren Lernerfolg gewährleisten können [8]. Um die möglichen Inhalte zu strukturieren, wurde eine Concept Map [9] erstellt und die hierarchischen Abhängigkeiten definiert. Daraus entstanden die zwei Themenbereiche der Strahlenoptik und der Atomphysik. Diese werden als zwei Lernmodule umgesetzt.

3. Lernmodule für Laserphysik

3.1. Strahlenoptik

In dem Modul zur Optik werden optische Resonatoren betrachtet. Im Rahmen der Arbeit wurde eine eigene Simulation, auf HTML und JS basierend, entwickelt². Dort kann die Funktionsweise von optischen Resonatoren und die Parameter, die den Aufbau beeinflussen, untersucht werden (s. Abbildung 2). Durch interaktive Elemente ist es möglich, SchülerInnen einen intuitiven Zugang zur

² Die Simulation wird in Kürze auf der Offenen Uni Rostock unter einem Ilias-Kurs in der Physikdidaktik zu finden sein <https://ilias.uni->

[rostock.de/ilias.php?cmd=frameset&cmdClass=ilrepositorygui&cmdNode=13k&baseClass=ilRepositoryGUI](https://ilias.uni-rostock.de/ilias.php?cmd=frameset&cmdClass=ilrepositorygui&cmdNode=13k&baseClass=ilRepositoryGUI)

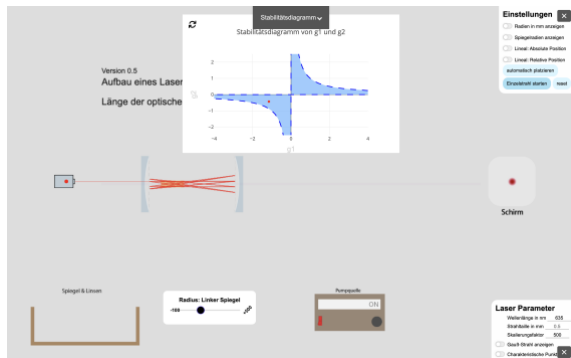


Abb. 2: Simulation zu Resonatoren und Lasern

Physik zu schaffen und der Kovariationsaspekt ermöglicht eine dynamische Betrachtungsweise der Parameter des optischen Resonators [10]. Durch die Programmierung einer Simulation ist es möglich, Inhalte des LaserLabs über das Projekt hinaus in Schulen zu transferieren und Lehrmaterialien für Lehrkräfte anzubieten. In Abbildung 2 ist ein Laseraufbau mit 2 Hohlspiegeln dargestellt, sowie das Stabilitätsdiagramm. In den rechten Ecken gibt es Einstellungsmöglichkeiten sowie die Darstellung physikalischer Parameter des vorliegenden Laserresonators.

LehrerInnen beziehen den meisten Mehrwert aus vorhandenen Materialien und geplanten Unterrichtskonzeptionen, welcher mittels der erstellten Materialien geschaffen werden soll [11]. In der zweiten Hälfte des Strahlenoptik-Moduls lernen SchülerInnen den konkreten Aufbau von typischen Lasern kennen, welcher an das Vorwissen aus der Schule anknüpft. Darüber hinaus wird der Aufbau eines Lasers mit der Funktionsweise des optischen Resonators verknüpft. Das Modul wird durch das Experimentieren am Helium-Neon-Laser abgeschlossen. Dabei werden auf einer optischen Bank das Lasermedium sowie die Spiegel für den Resonator platziert. Es wird untersucht, unter welchen Bedingungen das Lasen einsetzt. Zudem ist die praktische Realisierung im Experiment der zuvor erlernten, simulationsgestützten Inhalte zum Stabilitätsbereich sichtbar. Dies ermöglicht ein tieferes Verständnis für die Konzepte, da Inhalte multimodal repräsentiert werden [12].

3.2. Atomphysik

Im zweiten Modul wird das Laserprinzip auf atomarer Ebene erarbeitet. SchülerInnen sind bereits der Aufbau von Atomen und die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie grundlegend bekannt [4]. An diese Inhalte wird thematisch angeknüpft und durch eine Simulation von PhET zur stimulierten Emission illustriert [13]. Nach Schulmeister tragen vor allem Simulationen im modernen naturwissenschaftlichen Unterricht eine besondere Rolle, denn sie lassen sich sowohl als Werkzeuge,

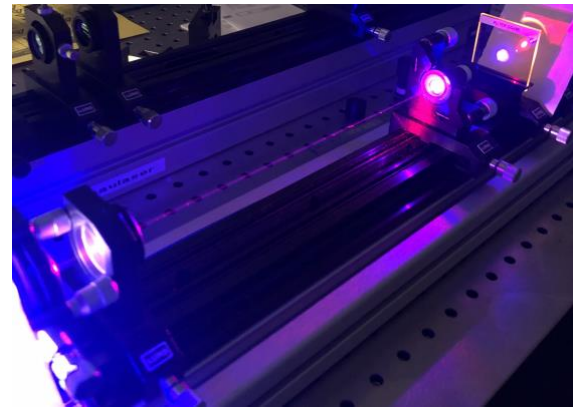


Abb. 3: Pr: YLF Laser, Pumpe @ 440nm, Lasen @ 630nm

sowie auch als Lernprogramme einsetzen [14]. Sie eignen sich hervorragend zur Analyse von Lern- und Entdeckungsprozessen [15]. SchülerInnen diskutieren, welche Prozesse die Fluoreszenz im Lasermedium auslöst und welche Bedeutung die Besetzungsinversion darstellt. Weiterhin wird halb quantitativ erörtert, warum ein Laser mit einem zwei-Niveau System nicht funktionieren kann, also zwangsläufig mehr als 2 Energieniveaus benötigt werden. Es wird ein Ausblick auf die verschiedenen Lasermedien gegeben. Abschließend untersuchen SchülerInnen an einem Festkörperlaser den Aufbau und das Lasen in verschiedenen Wellenlängen. In Abbildung 3 ist dieser Vorgang zu erkennen: Links außerhalb des Bildes sitzt der Kristall des Festkörperlaser, welcher mit blauem Licht einer Laserdiode gepumpt wird, während das Lasen im roten Wellenlängenbereich stattfindet. Besonders die Änderung der Farbe stellt ein Erkenntnismoment dar, da eine mögliche Fehlvorstellung³ sein könnte, dass der Laserbetrieb nur einfarbig und unveränderbar ist [16].

Dies beugt darüber hinaus einer weiteren Fehlvorstellung vor, nämlich dass die Farbe des Lasers erst am Ende des Laseraufbaus durch ein Farbfilter oder ähnliches entsteht. Die Untersuchung von Fehlvorstellungen wird im DBR-Prozess durch eine Befragung der Studierenden begleitet.

3.3. Anwendungen

Das dritte Modul schließt SchülerInnen aktiv in den Experimentierprozess ein. Es wird ein Michelson-Interferometer aufgebaut. Dieses historisch bedeutsame Experiment bietet die Möglichkeit, eine Vielzahl an physikalischen Phänomenen zu untersuchen. Gleichzeitig kann die historische und aktuelle Relevanz, exemplarisch bei der Gravitationswellenforschung, thematisiert werden. Dieses Experiment, mit Lochplatten und frei verstellbaren Komponenten, bietet zudem einen guten Einblick in die Praxis der ExperimentalphysikerInnen, die in sehr ähnlicher Art

³ Nach einer Umfrage mithilfe eines selbst entwickelten Fragebogens in zu Vorstellungen zu Optik, Photonik und Laserphysik

und Weise ihre Experimente aufbauen. Beim Versuch wird die Experimentierfähigkeit und -fertigkeit der SchülerInnen geschult, da sie von Grund auf den Versuch aufbauen müssen. Die flexible Erweiterbarkeit bietet die Möglichkeit einer Binnendifferenzierung, indem optional weitere Phänomene, bspw. die Umwandlung von optischen Informationen in akustische Signale [17], zu zeigen.

Im letzten (vierten) Modul werden SchülerInnen auf eine Laborführung mit thematischem Bezug Inhalten der Arbeitsgruppen des Instituts vorbereitet. Sie erlernen zunächst, wie Laser für zeitaufgelöste Absorptionsspektroskopie oder für Materialbearbeitung genutzt werden können. Eine besondere Bedeutung kommt der Erzeugung ultrakurzer Pulse mittels modengekoppelter Laser zu. SchülerInnen erfahren zunächst, wie diese Methoden funktionieren, bevor die Laborführung anschließt. Die Vorbereitung hat das Ziel, dass die SchülerInnen ein besseres Verständnis für die Physik erlangen und die Erklärungen im Labor besser nachvollziehen können. Zudem ist der cognitive load (CL) bei einer unvorbereiteten Laborführung recht groß, da die Lernenden in eine unbekannte und möglicherweise sinnlich überfordernde Umgebung geführt werden [18]. Zusätzlich spielt die Interaktion mit der WissenschaftlerIn noch in den CL mit hinein, sodass für die Physik kaum mentale Ressourcen bleiben, um einen nachhaltigen Effekt für den Wissenserwerb zu erhalten. SchülerInnen begegnen bei der Laborführung FachwissenschaftlerInnen und erhalten einen konkreten Einblick in die Arbeit von ExperimentalphysikerInnen. Als Ziel steht hierbei nicht nur die Wissensvermittlung, sondern auch das Wecken von Interesse und Studienmotivation. Dies wird mit der Forschungsfrage untersucht: Inwiefern trägt das Laserlabor zur Verbesserung der intrinsischen Motivation im Physikunterricht und einer Änderung oder Stärkung des Studieninteresses bei? Die Untersuchung wird mithilfe der Kurzsкала zur intrinsischen Motivation nach Wilde nach Beendigung des LaserLabs mit den SchülerInnen durchgeführt [19].

4. Umsetzung

Die Entwicklung des Projekts wird aktuell als Wahlpflichtmodul für Lehramtsstudierende umgesetzt. Zu Beginn des Projekts werden die Studierenden interviewt, um ihren Wissensstand zu ermitteln und mögliche Fehlvorstellungen aufzudecken. Da die Arbeitsgruppe eine heterogene Struktur (2. Semester bis 6. Semester) ausweist, ist das Vorwissen entsprechend unterschiedlich, sodass

einige Studierende nur mit Schulwissen in das Projekt starten. Der Ablauf des Seminars ist wie folgt aufgebaut: Es findet eine Einführung mit Laserschutzbelehrung statt. Weiterhin werden grundlegende didaktische Prinzipien zum Design von Lehr-Lern-Umgebungen und Unterricht dargestellt. Danach werden die erarbeiteten Freihand- und Labor-Experimente sowie Simulationen vorgestellt und von den Studierenden erkundet. Die Beobachtungs- und Selbstreflexionsaufgabe besteht darin, eigene Fragestellungen und Schlüsselerlebnisse bei der Beschäftigung mit den Experimenten zu notieren und als möglichen Einstieg für ein Modul zu implementieren. Dies schult zudem die Reflexionsfähigkeit der Studierenden. Im Anschluss erhalten die Studierenden eine Schulung⁴ sowie selbstständige Leseaufträge, um sich mit der Laserphysik näher vertraut zu machen. Die Studierenden befassen sich zudem mit dem Rahmenplan und dem Vorwissen, was für das Projekt vorausgesetzt werden kann.

Das entwickelte LaserLab-Projekt wird von den Studierenden mit Schulklassen mehrfach durchgeführt. Bei jeder Iteration wird der oben in Abbildung 1 beschriebene Prozess durchlaufen. Es erfolgt die schriftliche Dokumentation im Entwicklungs- und Reflexionsprozess. Damit sollen sowohl Lernschwierigkeiten als auch in der Vermittlung herausfordernde Inhalte der Laserphysik ermittelt werden. Die Lehrkräfte und SchülerInnen erhalten nach der Durchführung einen Feedback-Fragebogen sowie die Kurzsкала zur intrinsischen Motivation.

5. Ausblick

Aktuell läuft die Entwicklung mit den Studierenden zum LaserLab. Es zeigt sich, dass das Vorhaben aus zweierlei Gründen herausfordernd ist: Zum einen bringen die SchülerInnen wenig Vorwissen zum Projekttag mit, sodass alle Grundlagen geschaffen werden müssen, bevor mit den eigentlichen Inhalten zur Laserphysik und entsprechenden Experimenten gestartet werden kann. Außerdem ist das Vorwissen der Studierenden selbst heterogen, sodass in der Wahlpflichtveranstaltung eine umfassende inhaltliche Schulung nötig ist, mit der ein zeitlicher Engpass einhergeht. Es bleibt folglich offen, wie weit die angedachten Lernmodule und Konzepte unter den gegebenen Rahmenbedingungen umgesetzt werden können. Zudem steht die Durchführung noch aus. Dementsprechend ist die Evaluation des LaserLabs noch nicht abgeschlossen und es bleibt abzuwarten, wie sich die intrinsische Motivation und das

⁴ Die Inhalte werden in zwei Veranstaltungen je 90 Minuten vermittelt. Folgende Aspekte werden behandelt: Geschichte des Lasers, Grundlagen der Elektrodynamik, Allgemeine Lasereigenschaften, Funktionsprinzip und Einstein-Koeffizienten, Fabry-Perot, Linienverbreiterung, Stabilität &

Resonatordesign, ABCD-Formalismus & Strahlpropagation, Gaußstrahlen, Transversale Elektromagnetische Moden (TEM), Anschwingen; Lebensdauer angeregter Zustände; Sättigung, Nicht-Lineare Optik & Frequenzverdoppelung, Lasertypen

Studieninteresse durch den Besuch verändern werden.

6. Literatur

- [1] RÖLLKE, KERSTIN: Was kann ein Schülerlabor leisten? Konzeptionierung des Schülerlabors teutolab-biotechnologie als Lehr-Lern-Labor mit Angeboten zur Breiten- und zur Begabtenförderung von Schülerinnen und Schülern, Universität Bielefeld (2019), S. 15570028 bytes
- [2] PRIEMER, B. ; ROTH, J. (Hrsg.): *Lehr-Lern-Labore: Konzepte und deren Wirksamkeit in der MINT-Lehrpersonenbildung*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2020 — ISBN 978-3-662-58912-0
- [3] PREDIGER, SUSANNE ; LINK, MICHAEL ; HINZ, RENATE ; HUßMANN, STEPHAN ; THIELE, JÖRG ; RALLE, BERND: Lehr-Lernprozesse initiieren und erforschen –
- [4] MINISTERIUM FÜR BILDUNG UND KINDERTAGESFÖRDERUNG: <https://www.bildung-mv.de/schueler/schule-und-unterricht/faecher-und-rahmenplaene/rahmenplaene-an-allgemeinbildenden-schulen/physik/> (Stand: 12/2023)
- [5] THE DESIGN-BASED RESEARCH COLLECTIVE: Design-Based Research: An Emerging Paradigm for Educational Inquiry. In: *Educational Researcher* Bd. 32 (2003), Nr. 1, S. 5–8
- [6] ANDERSON, TERRY ; SHATTUCK, JULIE: Design-Based Research: A Decade of Progress in Education Research? In: *Educational Researcher* Bd. 41 (2012), Nr. 1, S. 16–25
- [7] BROMME, RAINER: Was ist „pedagogical content knowledge“? Kritische Anmerkungen zu einem fruchtbaren Forschungsprogramm, Beltz : Weinheim u.a. (1995) — ISBN 9783407411341
- [8] GROß, CHRISTIAN: *Die Bedeutung von Vorwissen für den Lernerfolg*. Heppenheim : Grin, 2013 — ISBN 978-3-656-61403-6
- [9] GOWIN, D. BOB ; NOVAK, JOSEPH D.: *Learning How to Learn*. Cambridge : Cambridge University Press, 1984 — ISBN 978-0-521-31926-3
- [10] ROLFES, TOBIAS ; ROTH, JÜRGEN ; SCHNOTZ, WOLFGANG: Der Kovariationsaspekt in der Sekundarstufe I [The aspect of covariance in secondary school]. In: , 2013 — ISBN 978-3-942197-33-5, S. 834–837
- [11] BREUER, JUDITH: *Implementierung fachdidaktischer Innovationen durch das Angebot materialgestützter Unterrichtskonzeptionen. Fallanalysen zum Nutzungsverhalten von Lehrkräften am Beispiel des Münchener Lehrgangs zur Quantenmechanik*. Berlin : Logos Verlag Berlin, 2021 — ISBN 978-3-8325-5293-0
- [12] MAYER, RICHARD E.: *Multimedia Learning*. 2. Aufl. Cambridge : Cambridge University Press, 2009 — ISBN 978-0-521-73535-3
- [13] *PhET Interactive Simulations*. URL <https://phet.colorado.edu/>. - abgerufen am 2023-12-12. — PhET
- [14] SCHULMEISTER, R.: *Grundlagen hypermedialer Lernsysteme: Theorie - Didaktik - Design* : Oldenbourg, 2002 — ISBN 978-3-486-25864-6
- [15] LANGLEY, PAT ; SIMON, HERBERT A. ; BRADSHAW, GARY L. ; ZYTKOW, JAN M.: *Scientific discovery: Computational explorations of the creative processes., Scientific discovery: Computational explorations of the creative processes.* Cambridge, MA, US : The MIT Press, 1987 — ISBN 0-262-12116-6
- [16] KIRCHER, E. ; GIRWIDZ, R. ; FISCHER, H. E. (Hrsg.): *Physikdidaktik / Grundlagen*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2020 — ISBN 978-3-662-59489-6
- [17] BOHL, T. ; BÖNSCH, M. ; TRAUTMANN, M. ; WISCHER, B. (Hrsg.): *Binnendifferenzierung. Teil 1*. 1. Aufl. : Verlag Barbara Budrich, 2012 — ISBN 978-3-934575-59-2
- [18] SKULMOWSKI, ALEXANDER ; REY, GÜNTER DANIEL: Subjective cognitive load surveys lead to divergent results for interactive learning media. In: *Human Behavior and Emerging Technologies* Bd. 2, John Wiley & Sons, Ltd (2020), Nr. 2, S. 149–157
- [19] WILDE, MATTHIAS ; BÄTZ, KATRIN ; KOVALEVA, ANASTASSIYA ; URHAHNE, DETLEF: Überprüfung einer Kurzskala intrinsischer Motivation (KIM). In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*.

Danksagung

Die Arbeit wird durch das TP Ö des DFG-Sonderforschungsbereichs SFB 1477: Licht-Materie-Wechselwirkung an Grenzflächen (LiMatI) am Institut für Physik der Universität Rostock gefördert.

Modelle des einfachen Stromkreises in der Sekundarstufe I in Baden-Württemberg

Katharina Leibfarth, Benedikt Gottschlich, Jan-Philipp Burde

Eberhard Karls Universität Tübingen, AG Didaktik der Physik, Auf der Morgenstelle 14, 72076 Tübingen
katharina.leibfarth@uni-tuebingen.de

Kurzfassung

Die einfachen Stromkreise stellen entgegen ihrer Bezeichnung ein schwieriges und unanschauliches Thema des Physikunterrichts dar. Die zugrundeliegenden physikalischen Größen in Stromkreisen sowie deren Zusammenhänge entziehen sich der direkten Wahrnehmung, sodass es naheliegt, diese mit Modellen bzw. Analogien zu veranschaulichen. Bislang ist jedoch kaum erhoben worden, welche Modelle im Anfangselektrizitätsunterricht der Sekundarstufe I überhaupt eingesetzt werden. Daher wurde anhand von Unterrichtstagebüchern, in denen Physiklehrkräfte ihren Unterricht dokumentierten, der Modelleinsatz von 17 Lehrkräften aus Baden-Württemberg analysiert. Dabei wurde untersucht, wie viele und welche Stromkreismodelle Lehrkräfte nutzen und für welche physikalischen Inhalte diese eingesetzt werden. Die Ergebnisse zeigen ein sehr heterogenes Bild des Modelleinsatzes: Zwar gaben alle Lehrkräfte an, in ihrem Unterricht Modelle des elektrischen Stromkreises zu nutzen; während manche Lehrkräfte jedoch lediglich ein Modell einsetzen, nutzen andere bis zu fünf Modelle in ihrem Unterricht. Weiterhin zeigt sich, dass das Modell eines Verkehrs- oder Menschenstroms, welches 71 % der Lehrkräfte einsetzen, das am häufigsten verwendete Modell darstellt, gefolgt vom ebenen geschlossenen Wasserkreislauf, der von knapp zwei Dritteln der teilnehmenden Lehrpersonen genutzt wird. Das Fahrradketten- oder das Elektronengasmodell werden hingegen kaum eingesetzt. Zur Art und Weise, wie Modelle im Unterricht zur einfachen Elektrizitätslehre Einsatz finden, lässt sich ein uneinheitliches Bild beobachten. Dies ist ein Befund, der auch auf gängige Schulbücher zutrifft.

1. Hintergrund und Motivation

Die Elektrizitätslehre stellt ein komplexes Thema des Physikunterrichts dar. Insbesondere zeigt sich, dass viele Schülerinnen und Schüler auch nach dem Unterricht noch große konzeptionelle Verständnisschwierigkeiten haben (Burde, 2018; von Rhöneck, 1986). Dabei sind diese Schwierigkeiten nicht auf Schülerinnen und Schüler in Deutschland beschränkt (Shipstone et al., 1988). Ein Grund für diese Verständnisschwierigkeiten wird in der Unanschaulichkeit der den elektrischen Stromkreisen zugrundeliegenden physikalischen Größen und Prozessen gesehen (Burde & Wilhelm, 2017). Um Schülerinnen und Schülern das Verständnis elektrischer Stromkreise vor diesem Hintergrund zu erleichtern, liegt es nahe, diese mit Modellen bzw. Analogien zu veranschaulichen (Burde & Wilhelm, 2017).

Nach Mikelskis-Seifert (2006, S. 128) kann ein Modell als Objekt bzw. Konstrukt beschrieben werden, das Analogien zu Größen, Eigenschaften und Beziehungen eines anderen Objekts aufweist. Das Modell als „Ausgangs- bzw. Modellbereich“ wird über eine Analogie mit dem „primären Lernbereich“ oder „Zielbereich“, beispielsweise dem elektrischen Stromkreis, verbunden. Die Analogie stellt somit eine partielle Isomorphie zwischen beiden Bereichen dar, wie in Abbildung 1 dargestellt. Neben analogen Größen und Beziehungen in Modell- und Zielbereich beinhaltet dies Größen und Beziehungen beider

Bereiche, die keine isomorphe Struktur aufweisen und somit Grenzen des Modells darstellen (Mikelskis-Seifert, 2006).

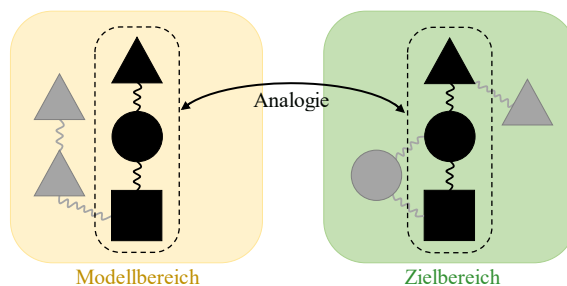


Abb. 1: Analogie zwischen Objekten und Beziehungen des Modell- und des Zielbereichs (in Anlehnung an Burde, 2018, S. 56)

1.1. Analogien der elektrischen Spannung

Ein Ausgangspunkt für die Betrachtung und Vermittlung der einfachen Stromkreise bildet das elektrische Potential. Im Gegensatz zur komplexeren, daraus resultierenden Differenzgröße der elektrischen Spannung bezieht sich das Potential auf einen Punkt im Raum, was eine Stärke des Potentialansatzes darstellt (Herrmann & Schmälzle, 1984; Gleixner, 1998; Burde, 2018).

Ausgehend von diesen Überlegungen besteht eine Möglichkeit, die schulischen Modelle zu klassifizieren in der Betrachtung der verwendeten analogen

Größe zum Potenzial bzw. zur elektrischen Spannung. So kann die Spannung beispielsweise als Wasser- bzw. Blutdruckdifferenz konzeptionalisiert werden, wie dies im ebenen geschlossenen Wasserkreislauf (Schwedes & Dudeck, 1993) bzw. Blutkreislaufmodell der Fall ist, oder auch als Luftdruckdifferenz wie im Elektronengasmodell (Burde, 2018). Eine andere Möglichkeit besteht in der Konzeptionalisierung der elektrischen Spannung als Höhendifferenz, wie man sie beispielsweise im offenen Wasserkreislaufmodell oder auch im Skilift-, Rutschen- und Stäbchenmodell sowie weiteren Höhenmodellen findet (Gleixner, 1998; Koller et al., 2008; Bodensiek et al., 2019; Burde & Gottschlich, 2022; Müller & Mandler, 2022). Eine dritte Möglichkeit der Konzeptionalisierung der Spannung als Potentialdifferenz ist im Fahrradkettenmodell über den Unterschied der Straffheit der Kette realisiert (Kahnt, 2022). Demgegenüber wählt das Rucksack-, Hütchen- oder auch Bienenmodell einen anderen Ansatz, die Spannung zu konzeptionalisieren: Die Vorstellung von Personen bzw. Bienen als Ladungsträgern, welche z. B. in ihren Rucksäcken Energieportionen transportieren, entspricht der Definition $U = \Delta E/q$ (Wilhelm, 2015). Im Modell des Menschenstroms kann die Kraft, mit welcher beispielsweise Schülerinnen und Schüler durch die Tür ins Klassenzimmer drücken, mit der elektrischen Spannung als Antrieb verknüpft werden (Gentner & Gentner, 1983).

1.2. Exemplarische Modellgrenzen

Während Modelle einerseits als Anschauungshilfen zum Verständnis beitragen können, weisen die Modelle und deren Analogien zum primären Lernbereich des elektrischen Stromkreises auch Grenzen auf. Ein Beispiel wird in der Darstellung des Energietransports im Rucksackmodell ersichtlich: Die Vorstellung von Personen als Ladungsträgern, die Energieportionen als Rucksackfüllungen von der Batterie bekommen und am Lämpchen abgeben, ist fachlich kritikwürdig (vgl. Härtel, 2012; Wodzinski, 2013; Wilhelm, 2015; Burde & Wilhelm, 2017). Ein weiteres Beispiel einer Modellgrenze ist die Unterbrechung des Stromkreises im Modell des Wasserkreislaufs mit Höhendifferenz. Wird der Kreislauf unterbrochen, ist davon auszugehen, dass das Wasser zunächst weiterhin nach unten fließt und der Wasserstrom erst zeitverzögert zum Erliegen kommt (Burde & Wilhelm, 2017).

Darüber hinaus ist eine physikalisch korrekte Analogie zwischen Ausgangs- und Zielbereich noch keine hinreichende Bedingung für einen hilfreichen Modelleinsatz: Während beispielsweise der ebene geschlossene Wasserkreislauf aufgrund seiner umfassenden Analogie zum elektrischen Stromkreis rein fachlich gesehen sehr weittragend ist, haben Lernende häufig Schwierigkeiten mit den Größen und Zusammenhängen innerhalb des Modells (Burde & Wilhelm, 2016; Schwedes & Schilling, 1983). Dies ist insofern problematisch, als dass ein fundiertes Verständnis des Ausgangsbereichs (hier des ebenen

geschlossenen Wasserkreislaufs) Voraussetzung für dessen lernwirksamen Einsatz ist (Schwedes & Dudeck, 1993). Das Problem beim ebenen, geschlossenen Wasserkreislauf besteht insbesondere darin, dass Lernende, sogar Hochschulabsolventinnen und -absolventen, häufig kein physikalisch korrektes Verständnis der Vorgänge in geschlossenen Wasserkreisläufen haben, z. B. mit Blick auf den Wasserdruck in ebenen geschlossenen Rohrsystemen (Schwedes, Dudeck & Seibel, 1995; Gentner & Gentner, 1983). Dabei weisen die Vorstellungen der Lernenden zum ebenen geschlossenen Wasserkreislauf viele Parallelen zu den Lernenden-Vorstellungen des elektrischen Stromkreises auf (Schwedes & Schilling, 1983). Liegt im Modellbereich jedoch kein ausreichendes Verständnis bei Lernenden vor, ist fraglich, inwiefern ein solches Modell das konzeptionelle Verständnis im Zielbereich fördern kann.

2. Fragestellung

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, welche Modelle des elektrischen Stromkreises in der unterrichtlichen Praxis eingesetzt werden. Konkret soll den folgenden Fragestellungen nachgegangen werden:

- I) Welche Stromkreismodelle nutzen Lehrkräfte im Unterricht?
- II) Für welche physikalischen Inhalte setzen Lehrkräfte die Modelle ein?
- III) Welche Modelle finden sich in Schulbüchern?

3. Methodik

3.1. Lehrkräfte

Die Untersuchung des traditionellen Unterrichts basiert auf der Analyse von Unterrichtstagebüchern. Im Rahmen des EPo-EKo-Projekts (Dopatka et al., 2018) dokumentierten 17 Lehrkräfte in Baden-Württemberg ihren traditionellen Anfangsunterricht der einfachen Elektrizitätslehre. Untersucht wurde der Unterricht, der vor allem im Schuljahr 2021/22, aber auch den angrenzenden Schulhalbjahren stattfand, anhand eines bereitgestellten Unterrichtstagebuchs. Der Fokus lag dabei auf den Schlüsselinhalt der einzelnen Stunden sowie den eingesetzten Modellen.

Die von den Lehrkräften angegebenen Modelle wurden einer Kategorisierung unterzogen, welche die nachfolgenden Modelle umfasst:

1. Fahrradkettenmodell
2. Stäbchen-/ Höhenmodell
3. offenes Wasserkreislaufmodell mit Höhenunterschied
4. ebenes geschlossenes Wasserkreislaufmodell
5. Elektronengasmodell
6. Rucksackmodell
7. Skilift-/ Rutschenmodell
8. Verkehrs-/ Menschenstrom

9. Blutkreislaufmodell

10. Luftstrom

Neben den Modellen geben die Unterrichtstagebücher Aufschluss über die physikalischen Konzepte, die die zentralen Inhalte der einzelnen Physikstunden darstellten.

3.2. Schulbücher

Für die Antwort auf die Frage, welche Stromkreismodelle in Schulbüchern eingesetzt werden, wurden die Kapitel zur Elektrizitätslehre der aktuellen Ausgaben der in Baden-Württemberg zugelassenen (Zentrum für Schulqualität und Lehrerbildung, 2022) analogen Schulbücher Dorn Bader Physik 7/8 Baden-Württemberg (Beckert et al., 2017), Fokus Physik 7/8 Baden-Württemberg (Burzin et al., 2016), Impulse Physik 7/8 Baden-Württemberg (Bredthauer et al., 2017), Spektrum Physik 7/8 Baden-Württemberg (Appel et al., 2017) und Universum Physik 7/8 Gymnasium Baden-Württemberg (Brand et al., 2016) untersucht.

4. Ergebnisse

4.1. Lehrkräfte

Die Unterrichtseinheiten zu einfachen Stromkreisen umfassten durchschnittlich 24.1 Schulstunden ($SD = 7.1$). Die Schülerinnen und Schüler der untersuchten 8. (und einer 9.) Klassen, die von durchschnittlich 23.8 Schülerinnen und Schülern ($SD = 3.2$) besucht wurden, wurden zum ersten Mal zur Elektrizitätslehre unterrichtet.

Alle unterrichtenden Lehrkräfte setzten in ihrem Unterricht mindestens ein Stromkreismodell ein. Die Anzahl der verwendeten Modelle variiert zwischen einem und fünf, wobei im Durchschnitt 2.7 ($SD = 1.0$) verschiedene Modelle zum Einsatz

kamen. Beim Einsatz mehrerer Modelle in der gesamten Unterrichtseinheit ist keine Kombinationsstruktur lehrkräfteübergreifend erkennbar.

In Hinblick auf die Inhalte des elektrischen Stroms und der elektrischen Spannung, welche von allen untersuchten Lehrkräften unterrichtet werden, zeigt sich, dass 77.8 % der Lehrpersonen zuerst den elektrischen Strom und anschließend die elektrische Spannung einführen. 16.7 % wählen die umgekehrte Reihenfolge, während eine Person beide Größen gemeinsam einführt. Außerdem thematisiert über die Hälfte der Lehrkräfte (55.6 %) das elektrische Potential, was im Kontrast zu früheren Arbeiten (Herrmann & Schmälzle, 1984; Schubatzky, 2020) einen nennenswerten Anteil darstellt.

4.1.1. Modelleinsatz nach Lehrkräften

In Bezug auf die Fragestellung, welche Stromkreismodelle Lehrkräfte im Unterricht nutzen (I), zeigt Abbildung 2 die prozentualen Anteile der Lehrkräfte, die das jeweilige Stromkreismodell im Unterricht in mindestens einer Unterrichtsstunde einsetzten. Die Analogie zu einem Verkehrs- oder Menschenstrom stellt mit 70.6 % das von den meisten Lehrpersonen genutzte Modell dar. Weiter nutzen mit 62.7 % annähernd zwei Drittel der Lehrkräfte das ebene geschlossene Wasserkreislaufmodell, über die Hälfte (54.9 %) verwendet in ihrem Unterricht das offene Wasserkreislaufmodell mit Höhendifferenz. Das Rucksackmodell wird von circa einem Viertel der Lehrkräfte (23.5 %) genutzt, während 17.6 % das Stäbchenmodell bzw. ein sonstiges Höhenmodell nennen. Zudem verwenden 11.8 % der Lehrkräfte das Luftstrom-, Blutkreislauf- und Elektronengasmodell, was jeweils zwei Personen entspricht. Das Skilift- und Fahrradkettenmodell wird von je einer Person (5.9 %) verwendet.

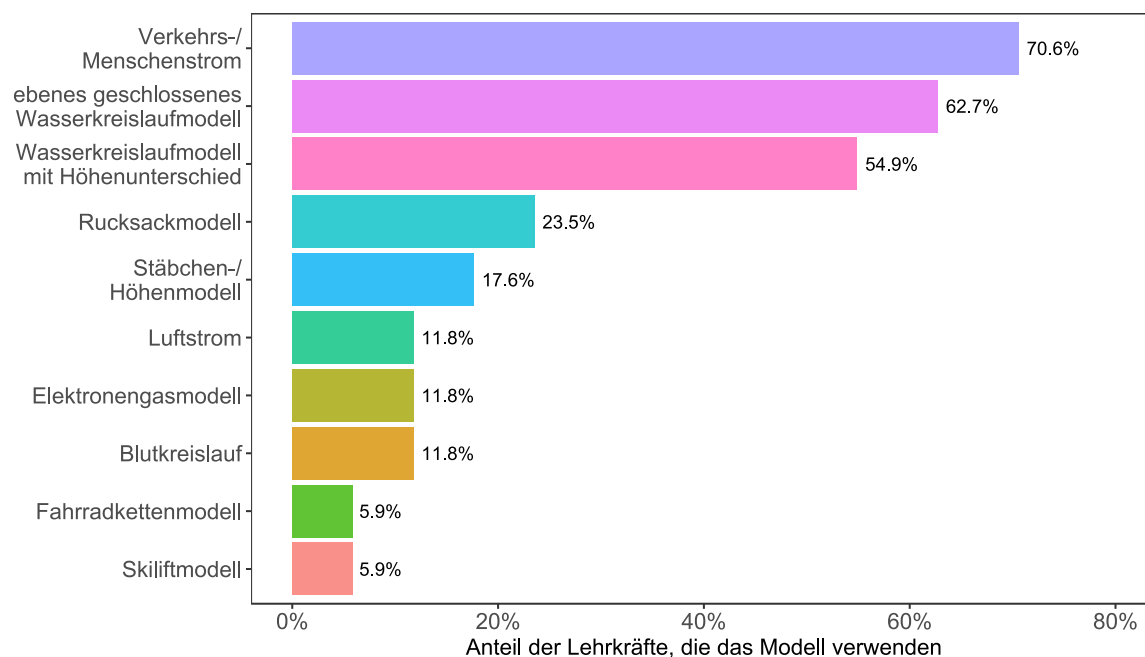


Abb. 2: Prozentuale Anteile der Lehrkräfte, die die verschiedenen Stromkreismodelle einsetzten (Mehrfachnennung möglich)

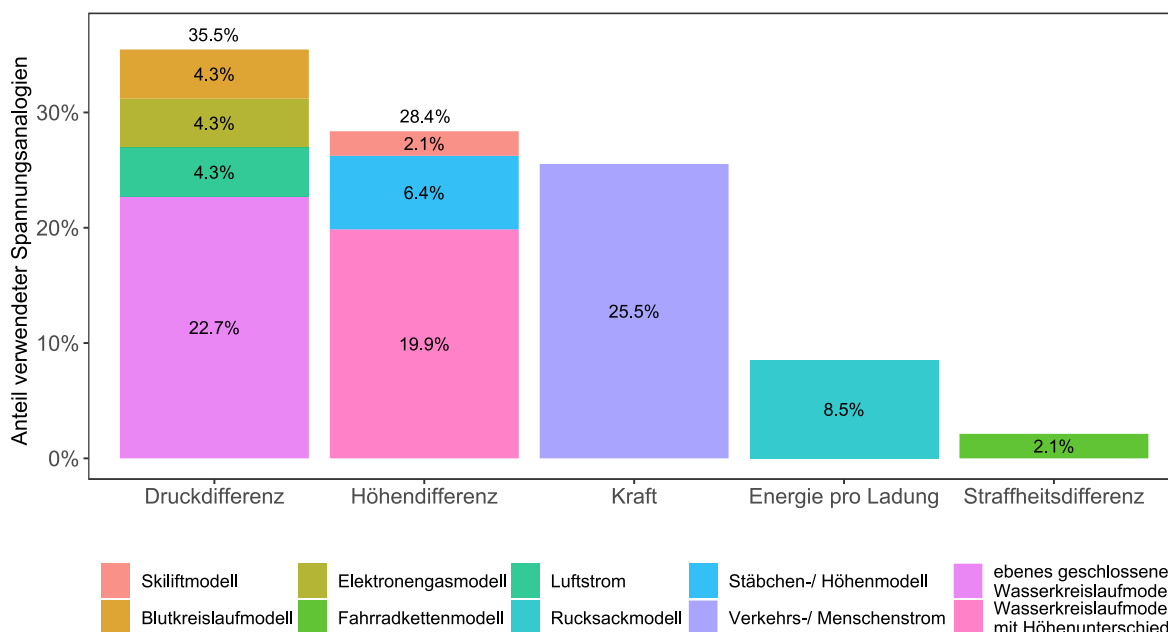


Abb. 3: Prozentuale Anteile der von den Lehrkräften eingesetzten Stromkreismodelle, kategorisiert nach verwendeter Analogie zur elektrischen Spannung

verwendet. Vier der Lehrpersonen, aus deren Unterrichtstagebüchern nicht eindeutig hervorging, welches Wasserkreislaufmodell sie verwendeten, wurden gemäß dem Verhältnis, in welchem die beiden Wasserkreislaufmodelle in den weiteren Daten vorkamen, auf den ebenen geschlossenen und den Wasserkreislauf mit Höhenunterschied aufgeteilt.

4.1.2. Modelleinsatz nach Spannungsanalogie

Im Folgenden werden die betrachteten Modelle danach klassifiziert, welche Spannungsanalogie ihnen zugrunde liegt. Dabei werden das Skilliftmodell, das Stäbchenmodell und das Wasserkreislaufmodell mit Höhenunterschied über die Darstellung der Spannung als Höhendifferenz zusammengefasst, während das Elektronengas- und Luftdruckmodell, der ebene geschlossene Wasserkreislauf sowie die Analogie zum Blutkreislauf und zum Luftstrom die Spannung als Druckdifferenz konzeptionalisieren. Abbildung 3 zeigt die Anteile der den verschiedenen Stromkreismodellen zugrundeliegenden Analogien. Die am häufigsten auftretende Spannungsanalogie ist mit 35.5% die Druckdifferenz, gefolgt von der Spannung als Höhendifferenz mit 28.4%.

4.1.3. Modelleinsatz nach physikalischen Inhalten

Neben der Frage, welche Modelle die Lehrkräfte in ihrem Unterricht verwenden, ist auch von Interesse, für welche physikalischen Inhalte diese eingesetzt werden (II). Bei den am häufigsten verwendeten Modellen, den beiden Wasserkreislaufmodellen sowie dem Verkehrs- bzw. Menschenstrom, sind in Hinblick auf die Grundgrößen Stromstärke und Spannung Unterschiede erkennbar.

Das Modell des Verkehrs- bzw. Menschenstroms wird von den Lehrkräften vor allem eingesetzt, um den elektrischen Strom zu veranschaulichen, wie in

Abbildung 4 dargestellt. Hingegen wird dieses Modell nicht zur Thematisierung der elektrischen Spannung oder des Potentials genutzt.

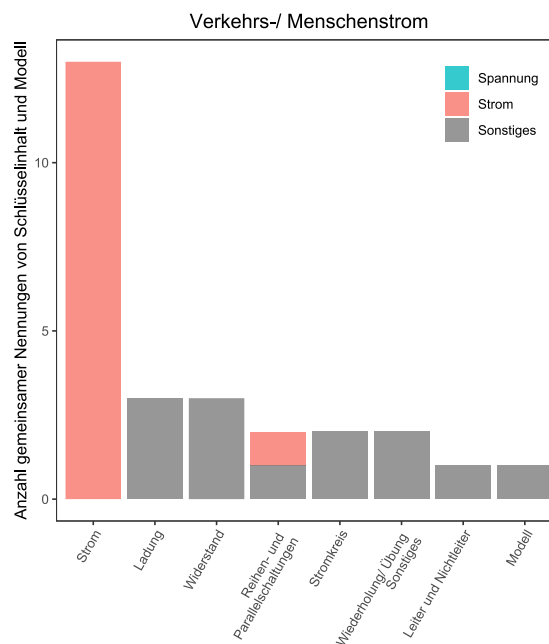


Abb. 4: Anzahl gemeinsamer Nennungen der Schlüsselinhalte der Unterrichtsstunde mit dem Verkehrs-/ Menschenstrommodell mit farblicher Hervorhebung von Strom und Spannung

Der ebene geschlossene Wasserkreislauf wird am häufigsten dafür genutzt, um den Modellcharakter zu erläutern, d. h. das Modell als solches mit Vorteilen und Grenzen zu thematisieren. In Hinblick auf die Inhalte Strom und Potential(-differenz) findet das Modell tendenziell ähnlich häufig Anwendung: Das

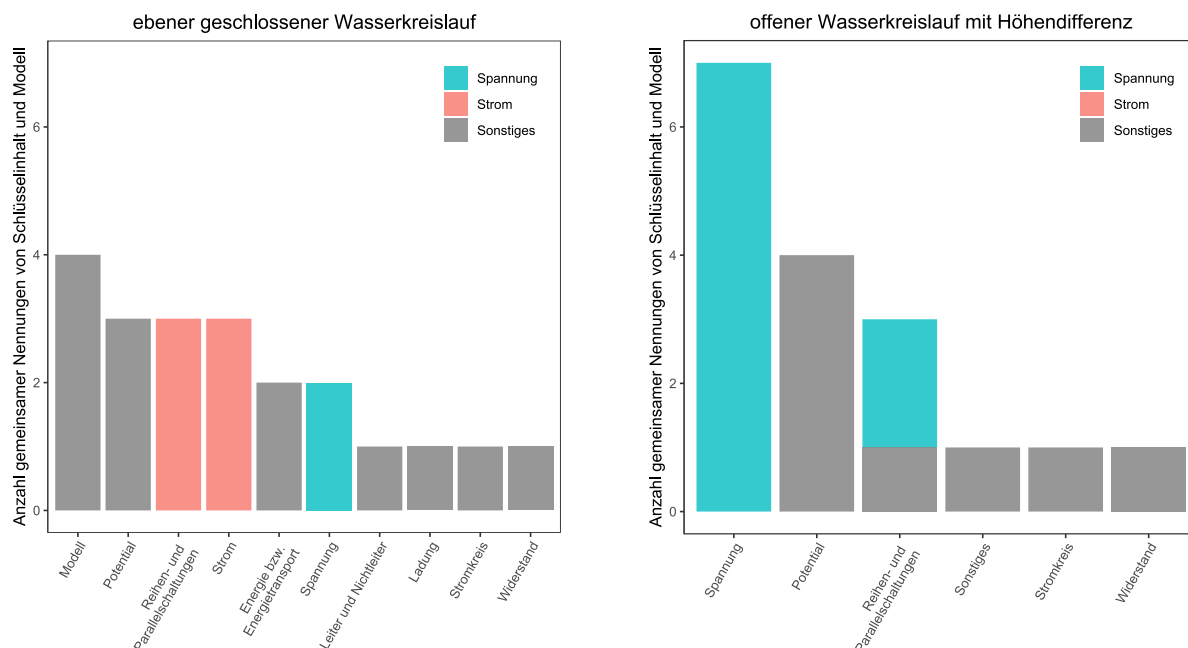


Abb. 5: Anzahl gemeinsamer Nennungen der Schlüsselinhalt der Unterrichtsstunden mit dem ebenen geschlossenen Wasserkreislauf bzw. dem offenen Wasserkreislauf mit Höhendifferenz mit farblicher Hervorhebung von Strom und Spannung

Modell wird dreimal in Kombination mit dem elektrischen Strom sowie dreimal für Parallel- und Reihenschaltungen eingesetzt. Bei den Schaltungen wurde jeweils der Bezug zur Stromstärke deutlich. Gleichzeitig wird von drei bzw. zwei Lehrpersonen das Modell gemeinsam mit dem Potential bzw. der Spannung genannt (vgl. Abbildung 5).

Das Wasserkreislaufmodell mit Höhendifferenz wird von den Lehrkräften nicht zur Vermittlung der Stromstärke genutzt, sondern um den Schülerinnen und Schülern das Konzept der elektrischen Spannung (7 Nennungen) bzw. des elektrischen Potentials (6 Nennungen) näher zu bringen. Dies gilt auch für Reihen- und Parallelschaltungen, sofern diese mit Hilfe des Wasserkreislaufmodells mit Höhendifferenz unterrichtet wurden (vgl. Abbildung 5).

Insgesamt zeigt der Vergleich beider Wasserkreisläufe in Bezug auf die Größen Stromstärke und Spannung die Tendenz, dass der Wasserkreislauf mit Höhenunterschied eher für die Spannung und der ebene geschlossene Wasserkreislauf sowohl für die Spannung als auch den Strom genutzt wird, wobei auf die geringe Anzahl der Nennungen insgesamt hingewiesen sei.

4.2. Schulbücher

Eine Übersicht der Stromkreismodelle, die sich in den Schulbüchern wiederfinden, ist in Tabelle 1 dargestellt. Die analysierten Schulbücher unterscheiden sich sowohl bei der Anzahl als auch der Auswahl der Stromkreismodelle stark. Beispielsweise nutzt Fokus ausschließlich das Fahrradkettenmodell und setzt dieses für verschiedene physikalische Inhalte ein, während in den anderen Schulbüchern jeweils mehrere

Modelle zum Einsatz kommen. Das heterogene Bild des Modelleinsatzes wird in der Anzahl der genutzten Modelle und der Art und Weise des Modelleinsatzes in den unterschiedlichen Werken fortgeführt.

Ein Zusammenhang zwischen den von den Lehrkräften genutzten Schulbüchern und den im Unterricht verwendeten Modellen zeigte sich im Rahmen der Auswertung der Daten hingegen nicht.

5. Diskussion

Eine ähnliche Untersuchung mit Lehrkräften in Bayern, Hessen und Österreich zeigt ebenfalls Unterschiede im Modelleinsatz (Schubatzky, 2020). Dabei setzten 78 % der Lehrpersonen in ihrem Unterricht mindestens ein Stromkreismodell ein, wobei durchschnittlich 1.4 Modelle eingesetzt wurden. Während es auch Lehrkräfte gab, die in ihrem Unterricht kein einziges Modell nutzten, verwendeten manche Lehrkräfte bis zu vier unterschiedliche Modelle (Schubatzky, 2020). Dabei ist das Modell des ebenen geschlossenen Wasserkreislaufs, das ähnlich häufig wie bei den beschriebenen Lehrkräften Baden-Württembergs Einsatz findet, dominierend (Schubatzky et al., 2020).

In den vorliegenden Unterrichtstagebüchern stellt die Einführung des elektrischen Stroms vor der Spannung, die sich ebenfalls in allen betrachteten Schulbüchern wiederfindet, den vielfach präferierten Weg dar. Hingegen werden in der Untersuchung Schubatzkys (2020) die drei Möglichkeiten Strom vor Spannung, Spannung vor Strom und die gemeinsame Einführung beider Größen von den Lehrpersonen ähnlich häufig gewählt.

Tab.1: Stromkreismodelle in den Schulbüchern

		Schulbuch				
		Dorn Bader	Univer- sum	Fokus	Spektrum	Impulse
Stromkreismodell	Verkehrs-/ Menschenstrom	✓	✓			✓
	Ebener geschlossener Wasserkreislauf	✓*	✓		✓	✓**
	Wasserkreislauf mit Höhendifferenz		✓		✓	
	Höhenmodell		✓			
	Fahrradkettenmodell			✓	✓	✓
	Rutschenmodell	✓				

* zusätzlich ebener geschlossener Wasserkreislauf mit Doppelwassersäule

** zugrundeliegende Analogie uneindeutig, d.h. Mischung von Höhen- und Druckanalogie

Da der Stichprobenumfang von 17 Lehrpersonen relativ gering ist, stellt die Analyse lediglich einen deskriptiven Einblick in den Modelleinsatz der Lehrkräfte in Baden-Württemberg dar.

6. Ausblick

Insgesamt spiegelt der Einsatz von Modellen des elektrischen Stromkreises im Anfangselekttrizitätslehreunterricht ein sehr heterogenes Bild in der Modellauswahl, deren Anzahl sowie deren Anwendung wider. Dieses uneinheitliche Bild wird durch den häufigen Einsatz des ebenen geschlossenen Wasserkreislaufs, der aus fachdidaktischer Sicht kritikwürdig ist, ergänzt. Demgegenüber haben sich in bisherigen physikdidaktischen Arbeiten Höhenmodelle, das Fahrradketten- und Elektronengasmodell bewährt. Gleichzeitig wurden die verschiedenen Stromkreismodelle bisher kaum empirisch miteinander verglichen (Hindrisken et al., 2023). Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, inwieweit diese Modelle gleichermaßen geeignet sind bzw. inwiefern sich diese Modelle darin unterscheiden, die Lernenden beim Aufbau eines physikalisch korrekten Konzeptverständnisses zu unterstützen. In einem nächsten Schritt sollen daher mit Hilfe von Lernendenbefragungen das Konzeptverständnis sowie Verständnisschwierigkeiten der Schülerinnen und Schüler zu den verschiedenen Modellen des elektrischen Stromkreises genauer untersucht werden.

7. Literatur

- Appel, Thomas, Bühler, Bernd, Kastner, R., May, L.-P., Mandler, J., Petersen, B., & Wolf, T. (2017). *Spektrum Physik 7/8 Baden-Württemberg*. Schroedel Westermann.
- Becker, M., Burak, D., Drehmann, P., Gleixner, C., Nürnberger, M., Pippig, R., & Runge, B.-U. (2017). *Dorn.Bader Physik 7/8 Baden-Württemberg*. Schroedel Westermann.
- Bodensiek, O., Sonntag, D. A., Glawe, I., & Müller, R. (2019). 3D-printable height models for dc circuits. *Journal of Physics: Conference Series*, 1286(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1286/1/012010>
- Brand, R., Kasper, L., Kienle, R., Küblbeck, J., Rager, B., Ronellenfitsch, S., Pardall, C.-J., & Wienbruch, U. (2016). *Universum Physik 7/8 Gymnasium Baden-Württemberg*. Cornelsen Verlag.
- Bredthauer, W., Bruns, K. G., Burmeister, O., Donat, M., Eberhard, D., Fechtig, O., Feldmann, C., Grote, M., Janzen, U., Jordan, W., Kleischmann, J., Kohl, R., Köhnck, H., Märkl, P., Riekert, M., Schell, N., Schlobinski-Voigt, U., Stötzer, S., Wächter, C., ... Zimmerschied, F. (2017). *Impulse Physik 7/8 Baden-Württemberg*. Ernst Klett Verlag.
- Burde, J.-P. (2018). *Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells*. Logos Verlag Berlin. <https://doi.org/10.30819/4726>
- Burde, J.-P., & Gottschlich, B. (2022). Höhenmodelle mit Stromanalogon—Lernhilfe oder Lernhindernis? *MNU-Journal*, 75(4), 332–338.
- Burde, J.-P., & Wilhelm, T. (2016). Moment mal ... (22): Hilft die Wasserkreislaufanalogie? *Praxis der Naturwissenschaften Physik in der Schule*, 65(1), 46–49.
- Burde, J.-P., & Wilhelm, T. (2017). Modelle in der Elektrizitätslehre. Ein didaktischer Vergleich verbreiteter Stromkreismodelle. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 28(157), 8–13.
- Burzin, S., Kahnt, M., Moussa, A., Müller, W., Nawrath, D., & Rutscher, C. (2016). *Fokus Physik 7/8 Baden-Württemberg*. Cornelsen Verlag.

- Dopatka, L., Spatz, V., Burde, J.-P., Wilhelm, T., Ivanjek, L., Hopf, M., Schubatzky, T. & Haagen-Schützenhöfer, C. (2018). Design-Based Research: Elektrizitätslehre mit Potenzial und Kontexten EPo-Eko. *PhyDidB - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydidb/article/view/852>
- Gentner, D., & Gentner, D. R. (1983). Flowing Waters or Teeming the Crowds: Mental Models of Electricity. In D. Gentner & A. L. Stevens (Hrsg.), *Mental models* (S. 99–129). Lawrence Erlbaum Associates Inc.
- Gleixner, C. (1998). *Einleuchtende Elektrizitätslehre mit Potential: Untersuchungen zu Lernprozessen in der elementaren Elektrizitätslehre*. Ludwig-Maximilians-Universität.
- Härtel, H. (2012). Der alles andere als einfache elektrische Stromkreis. *Praxis der Naturwissenschaften Physik in der Schule*, 61(5), 17–24.
- Herrmann, F., & Schmälzle, P. (1984). Das elektrische Potential im Unterricht der Sekundarstufe I. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 37(8), 476–482.
- Hindrisken, A., Kahnt, M., & Berger, R. (2023). Lernwirksamkeit von Analogiemodellen zum elektrischen Potential. *PhyDidB – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydidb/article/view/1340>
- Kahnt, M. (2022). Die Fahrradkette als durchgängige Vorstellungshilfe im Elektrizitätslehreunterricht der Sekundarstufe I. *plusLucis*, 2, 14–21.
- Koller, D., Waltner, C., & Wiesner, H. (2008). Zur Einführung von Stromstärke und Spannung. *Praxis der Naturwissenschaften-Physik in der Schule*, 57(6), 6–18.
- Mikelskis-Seifert, S. (2006). Modellmethode als epistemologisches und didaktisches Konzept. In H. F. Mikelskis (Hrsg.), *Physik-Didaktik: Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II* (S. 120–138). Cornelsen Scriptor.
- Müller, R., & Mandler, J. (2022). Stromkreise besser verstehen mit Potenzial und Bikepark-Analogie. *plusLucis*, 2, 8–13.
- Schubatzky, T. (2020). *Das Amalgam Anfangs-Elektrizitätslehreunterricht: Eine multiperspektivische Betrachtung in Deutschland und Österreich: Bd. v. 299*. Logos Verlag Berlin. <https://doi.org/10.30819/5159>
- Schubatzky, T., Haagen-Schützenhöfer, C., Burde, J.-P., Wilhelm, T., Ivanjek, L., Hopf, M., Dopatka, L., & Spatz, V. (2020). Das Amalgam Anfangs-Elektrizitätslehreunterricht. In Sebastian Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen* (S. 503–506).
- Schwedes, H., & Dudeck, W.-G. (1993). Lernen mit der Wasseranalogie: Eine Einführung in die elementare Elektrizitätslehre. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 4(16), 16–23.
- Schwedes, H., Dudeck, W.-G., & Seibel, C. (1995). Elektrizitätslehre mit Wassermodellen: Erfahrungen mit analogie-orientiertem Unterricht—Motto: „Im Wasser war’s einfacher, da sieht man das doch“. *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, 44(2), 28–36.
- Schwedes, H., & Schilling, P. (1983). Schülervorstellungen zu Wasserstromkreisen. *physica didactica*, 10(3/4), 172–183.
- Shiptone, D. M., von Rhöneck, C., Jung, W., Kärrqvist, C., Dupin, J.-J., Johsua, S., & Licht, P. (1988). A study of students’ understanding of electricity in five European countries. *International Journal of Science Education*, 10(3), 303–316. <https://doi.org/10.1080/0950069880100306>
- von Rhöneck, C. (1986). Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 34(13), 10–14.
- Wilhelm, T. (2015). Moment mal ... (18): Elektronen als Energieträger? *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, 64(6), 47–49.
- Wodzinski, R. (2013). Lernhilfe oder Lernhinderer?: Modelle von Leitungsvorgängen in Stromkreisen unter der Lupe. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 23(133), 12–16.
- Zentrum für Schulqualität und Lehrerbildung. (2022). *Liste der zugelassenen Schulbücher Allgemein bildendes Gymnasium: Zulassungen auf der Basis des Bildungsplans 2016*. https://www.schule-bw.de/service-und-tools/listen-der-zugelassenen-schulbuecher/schulbuchliste_gy_bp2016.pdf

Transfer bei analogen Problemsituationen

- Eine Replikationsstudie -

Marco Seiter*, Heiko Krabbe*

*AG Didaktik der Physik, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstr. 150, 44801 Bochum
marco.seiter@rub.de

Kurzfassung

In dieser Studie wurde untersucht, ob die Ergebnisse aus der vielzitierten Studie von Gick & Holyoak (1980) zum Analogietransfer bei Analogien im physikalisch-technischen Bereich reproduziert werden können. Den ProbandInnen wurde zunächst eine fiktive Problemsituation ohne physikalischen Bezug mit einer Lösung vorgestellt. Im Anschluss wurde eine zur ersten Situation analoge Problemsituation mit physikalischem Alltagsbezug gestellt, zu der so viele Lösungen wie möglich generiert werden sollten. Es wurde der Hinweis gegeben, die erste Situation als Hilfe zu verwenden. Drei Interventionsgruppen (jeweils $n = 10$) erhielten zur ersten Problemsituation je eine unterschiedliche Lösung, die Kontrollgruppe ($n = 10$) löste nur das zweite Problem. Jede Lösung zum ersten Problem enthielt eine Kernidee, welche auch auf das Zielproblem übertragen werden konnte. Zur Auswertung wurden die Lösungen der Probanden nach den enthaltenen Kernideen kodiert. Die Ergebnisse aus der Studie von Gick & Holyoak (1980) konnten in dieser Studie nicht reproduziert werden. Die Gruppenzugehörigkeit der Probanden und die verwendeten Kernideen sind unabhängig voneinander.

1. Einleitung

Unter Analogietransfer (Analogical Transfer) versteht man die Verwendung von Analogien oder Metaphern, um eine neue Problemstellung in Analogie zu einem bereits gelösten Problem zu bewältigen (vgl. Schmid, 2006; Gick & Holyoak, 1983). Der Transfer bei analog formulierten Problemsituationen bezieht sich dabei nicht auf direkt vergleichbare Oberflächenmerkmale, sondern auf strukturelle Ähnlichkeiten zwischen den Problemen (Schmid, 2006). Der Transfer einer analogen Problemsituation erfolgt nicht unmittelbar durch die Gegenüberstellung und das Herstellen von Verbindung zwischen den Situationen. Jede Ähnlichkeit führt vielmehr zu einer Regel oder Folgerung über strukturelle und kausale Zusammenhänge. Diese Reihe von Regeln oder Folgerungen wird in einem iterativen Prozess auf die neue Situation angewendet. Im Laufe des Prozesses bilden sich zunehmend abstrakte „Makrostruktur“-Repräsentationen aus (Kintsch & Van Dijk, 1978). Diese abstrakten Makrostrukturen können z.B. allgemeinen Lösungsprinzipien oder Strategien sein.

In ihrer vielzitierten Studie (4157 Zitate auf Google Scholar und 1320 auf Web of Science, Stand 15.05.2024) weisen Gick & Holyoak (1980) in fünf Experimenten den positiven Effekt von Analogical Transfer nach. Dieser wird nicht nur im Bereich der Psychology zitiert, sondern unter anderem auch in den Bereichen der Bildungsforschung, Informatik, Ingenieurwissenschaft, Betriebswirtschaft, Linguistik, Neurowissenschaft, Sozialwissenschaft und auch

der Naturwissenschaft als gegebene Grundlage angenommen wird (Analyse in Web of Science). Nach unserer Recherche findet sich bisher noch keine entsprechende Reproduktionsstudie.

Die Studie von Gick & Holyoak (1980) wurde nur mit Psychologie-Studierenden im Studium durchgeführt. Reproduktions-Studien sind uns nicht bekannt. An dieser Stelle lässt sich die Frage stellen, ob die positiven Ergebnisse auf andere Fachgebiete oder die Schule übertragen werden können. Um einen Beitrag zur Beantwortung dieser Frage zu liefern, wurde in der folgenden Studie versucht, die Ergebnisse aus der Studie von Gick & Holyoak (1980) mit anderen Analogien und insbesondere einem Physikbezug zu reproduzieren. Dabei beschränken wir uns auf das erste, grundlegende Experiment von Gick & Holyoak (1980), zu dem diese noch ergänzende Untersuchungen in der Publikation berichten.

2. Erstes Experiment aus der Studie von Gick & Holyoak (1980)

Die Stichprobe aus der Studie von Gick & Holyoak (1980) setzte sich aus 40 Psychologie-Studierenden zusammen, welche sich gleichmäßig auf drei Experimentalgruppen und eine Kontrollgruppe aufteilten, so dass jede Gruppe aus 10 ProbandInnen bestand. Als Erhebungsmethode wurden Interviews mit lautem Denken geführt. Zur Gewöhnung an das laute Denken wurde zunächst von den ProbandInnen ein Einstiegsproblem ohne Analogie zu den weiteren Problem gelöst.

Die drei Experimentalgruppen erhielten anschließend ein Problem mit einer vorgegeben Lösung, wobei sich die Lösungen zwischen den Experimentalgruppen unterschieden. In dem Problem sollte eine Festung durch einen General erobert werden. Die Zugänge zur Festung waren allerdings vermint, so dass bei einem Angriff über einen einzelnen Zugang zu viele Soldaten gestorben wären. Es wurde aber die gesamte Armee für die Eroberung der Festung benötigt. Dies wird im Weiteren als das „Militär-Problem“ bezeichnet. Die Geschichte und die Lösung wurden gelesen und anschließend mündlich zusammengefasst. Im Anschluss an das erste Problem wurde dann den ProbandInnen ein analoges Problem gestellt, welche sie selbstständig lösen sollten. In diesem Problem sollte mit Hilfe von Strahlung ein Tumor zerstört werden, weshalb es im Weiteren als „Medizin-Problem“ bezeichnet wird. Die ProbandInnen wurden aufgefordert so viele Lösungen wie möglich zu nennen. Es wurde der Hinweis gegeben, das Militär-Problem für die Lösung des Medizin-Problems heranzuziehen. Das Militär-Problem durfte jederzeit wieder gelesen werden. Zur Förderung des Prozesses wurden Prompts durch die Interviewer gegeben. Allen ProbandInnen war das Medizin-Problem zuvor unbekannt. Die Kontrollgruppe löste nur das Medizin-Problem und erhielt ersatzweise auch kein irrelevantes Problem. Auch in der Kontrollgruppe sollten so viele Lösungen wie möglich formuliert werden, währenddessen Prompts durch die Interviewer gegeben wurden. Alle Lösungen wurden anschließend anhand der enthaltenden Strategien kodiert.

Bei dem Design der Problemstellung wurde darauf geachtet, das Militär- und das Medizin-Problem möglichst analog zu formulieren. Die Analogie zum ersten Problem bestand darin, dass nicht nur ein Weg für die Bestrahlung gewählt werden konnte, da ansonsten zu viel gesundes Gewebe beschädigt werden würde. Es war dennoch eine entsprechend hohe Intensität der Strahlung nötig, um den Tumor zu zerstören. Bei der Formulierung der Lösungen zum Militär-Problem wurde darauf geachtet, dass eine strukturelle Analogie zum Medizin-Problem möglich ist und dass die vorgegebene Lösung jeweils eine nur eine Strategie enthielt:

1. Die Truppen zur Eroberung der Festung wurden auf verschiedene Zugänge zur Festung aufgeteilt, um die Verluste durch die Minen zu minimieren. In Analogie wird der Tumor im Medizin-Problem von mehrere Seiten mit geringer Intensität bestrahlt, in dem Sinne wird die Intensität auch aufgeteilt.
2. Es wurde eine offene Versorgungsrouten ausgedacht, welche nicht vermint ist, so dass es zu keinen Verlusten der Truppen kommt. Im

Medizin-Problem würde dies einem offenen Zugang zum Tumor entsprechen, bei dem kein gesundes Gewebe beschädigt wird.

3. Es wurde ein Tunnel unter dem Minenfeld hindurch gegraben, so dass es zu keinen Verlusten der Truppen kommt. Im Medizin-Problem kann dies mit einer (minimalinvasiven) Operation gleichgesetzt werden, um an den Tumor zu gelangen und dabei möglichst wenig gesundes Gewebe zu beschädigen.

Bei der Kodierung der Lösungen der ProbandInnen konnten auch genau die drei oben genannten Strategien zur Lösung des Medizin-Problems identifiziert werden. In der Auswertung wurde dann geschaut, wie sich genannten Strategien auf die vier Gruppen verteilen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tab. 1: Prozentualer Anteil der Probanden in den verschiedenen Gruppen die entsprechende Lösungen für das Medizin-Problem vorgeschlagen haben (siehe Gick & Holyoak, 1980, S. 321)

Lösung \ Gruppe	Aufteilung	Offener Zugang	Operation
Aufteilung des Angriffs	100	10	30
Offene Versorgungsrouten	10	70	50
Tunnel	20	30	80
Kontroll	0	20	50

Die Verletzung der Nullhypothese (Unabhängigkeit der Variablen Gruppe und Lösung) wurde in der Veröffentlichung von Gick & Holyoak (1980, S. 320f) in Bezug auf die gesamte Kreuztabelle nicht untersucht. Stattdessen wurden G^2 -Tests für den Vergleich von einzelnen Zeilen und Spalten berechnet, welche alle auf signifikante Unterschiede in den Verteilungen hinweisen. Um auch eine Aussage über die gesamte Verteilung zu machen, wird an dieser Stelle ein zweiseitiger exakter Test nach Fisher¹ (Pearson-Chi-Quadrat-Test) ergänzt. Der Test zeigt einen statistisch höchst signifikanten Zusammenhang zwischen der Gruppenzugehörigkeit und den genannten Lösungen $\chi^2(6) = 23.42, p < .001, \phi = .71$. Dies entspricht nach Cohen (1988) einem großen Effekt.

In allen drei Experimentalgruppen lag jeweils der Anteil der ProbandInnen, die eine entsprechende Lösung vorgeschlagen haben, für die in der Militär-Geschichte enthaltende Strategie am höchsten. So nannten zum Beispiel alle ProbandInnen, die die Aufteilungs-Strategie beim Angriff gelesen hatten, die

¹ Es wurde ein exakter Test nach Fisher verwendet, da die erwartete Häufigkeit in mindestens einer Zelle der Kreuztabelle kleiner als 5 ist.

Aufteilungslösung in Bezug auf das Medizin-Problem. Entsprechend war der Anteil der ProbandInnen, die zur Lösung des Medizin-Problems einen offenen Zugang vorgeschlagen haben (70 %), in der Experimentalgruppe „Offene Versorgungsrouten“ am größten. Gleiches gilt für die Experimentalgruppe „Tunnel“ in der mit 80 % am häufigsten die Lösung der Operation vorgeschlagen wurde. Vergleicht man für jede Experimentalgruppe den Anteil der ProbandInnen, die eine entsprechende Lösung analog zur Militär-Geschichte vorgeschlagen haben mit der Kontrollgruppe, fällt in der Kontrollgruppe der Anteil stets niedriger aus. Alle sieben genannten Unterschiede in den Anteilen zwischen den Experimental- und Kontrollgruppen sind nach Gick & Holyoak (1980, S. 320ff) mittels G^2 -Tests signifikant.

Gick & Holyoak (1980, S. 346ff) interpretieren ihre Ergebnisse zusammen mit denen der anderen Experimente so, dass die Verwendung von Analogien zwischen Problemen das kreative Problemlösen fördern kann und es so zu Analogical Transfer in Bezug auf die Lösungen kommt. Die Häufigkeit der genannten Lösungsstrategien hängt dabei positiv mit dem Grad der Analogie zwischen den Problemstellungen und den Lösungen zusammen. Es ist also wahrscheinlicher, dass ProbandInnen bei analogen Problemstellungen die Analogie auch auf die Lösungen übertragen.

In unserer Studie wurde versucht, die Ergebnisse aus der Studie von Gick & Holyoak (1980) in einer Problemsituation mit Physikbezug zu reproduzieren. Damit ergibt sich folgende Forschungsfrage bzw. Hypothese:

3. Forschungsfrage & Hypothese

FF: Inwiefern beeinflusst eine vorgegebene Problemsituation (ohne Physikbezug) inkl. Lösung mit einer bestimmten Strategie das Lösungsverhalten von Probanden in einer analogen Problemsituation mit Physikbezug?

Wir haben folgende zwei Hypothesen aufgrund der Ergebnisse von Gick & Holyoak (1980):

H1: Der Anteil der ProbandInnen, die eine entsprechende Lösungsstrategie vorschlagen, liegt für die in der vorgegebenen Problemsituation enthaltene analoge Strategie am höchsten.

H2: Für jede der drei Experimentalgruppen liegt der Anteil der ProbandInnen, die eine entsprechende Lösung analog zur ersten Problemsituation vorgeschlagen, höher als in der Kontrollgruppe.

4. Design

Die Datenerhebung fand im Gegensatz zur Studie von Gick & Holyoak (1980) nicht mittels Interviews mit lautem Denken, sondern in Form von schriftlichen Testheften statt.

Die Stichprobe bestand aus 40 ProbandInnen, welche sowohl Studenten, Berufstätige als auch Rentner

umfasste und daher als sehr divers eingestuft werden kann, um die bisherigen Ergebnisse in Bezug zu einer eher breiten Stichprobe setzen zu können. Die ProbandInnen waren im Durchschnitt 35.1 Jahre alt ($\sigma = 15.98$, Min. = 17, Max. = 68), wobei 30 % weiblich waren.

Den ProbandInnen wurde in drei Experimentalgruppen (jeweils $n = 10$) zunächst eine fiktive Problemsituation mit einem Geldschmuggelproblem (ohne physikalischen Bezug) mit einer Lösung vorgestellt (s. Tab. 2). In dem Problem sollte Geld über eine Grenze geschmuggelt werden, wobei die alten Routen nicht weiterverwendet werden konnten. Die Lösung unterschied sich in den drei Gruppen, wobei die Lösung jeweils genau eine Strategie enthielt, welche auch auf die zweite Problemstellung übertragen werden konnte. Die Problemstellung inklusive der Lösungen sollte zunächst von den ProbandInnen schriftlich zusammengefasst werden. Das Schmuggelproblem und die drei verschiedenen Lösungen können der linken Spalte von Tabelle 2 entnommen werden. Die Geldschmuggler hatten als erste Strategie das Geld in einen anderen Wert(-Träger) umzuwandeln, der mit Verlusten wieder zurück umgewandelt werden kann. Die zweite Strategie beinhaltete das Erschließen einer neuen Route, welche zuvor noch nicht existierte. Bei der dritten Strategie ging es um die gleichzeitige Verwendung der alten Routen durch Aufteilung des Transportguts, ohne die Routen zu verändern.

Im Anschluss wurde eine zur ersten Situation analoge Situation mit einem Energieversorgungsproblem (physikalischem Alltagsbezug) gestellt. Die Analogie bestand darin, dass nun Strom (Energie) transportiert werden musste, wobei die bestehenden Stromleitungen nicht verwendet werden konnten. Zu dieser zweiten Problemsituation sollten die ProbandInnen so viele Lösungen wie möglich generieren. Eine Kontrollgruppe ($n = 10$) löste nur das zweite Problem. Das Energieversorgungsproblem kann der rechten Spalte in Tabelle 2 entnommen werden. Die Analogien zwischen den beiden Situationen wird anhand der Zeilen in der Tabelle veranschaulicht. Es wurde der schriftliche Hinweis gegeben, die erste Situation als Hilfe zu verwenden. Die ProbandInnen durften jederzeit im Testheft zurückblättern und sich die ersten Problemsituation inkl. der Lösung erneut durchlesen. Dies wurde explizit als Hinweis bei der Testinstruktion gegeben und zusätzlich schriftlich im Testheft vermerkt.

Die Lösungen des Energieversorgungsproblems in der rechten Spalte von Tabelle 2 entsprechen keinen direkten Lösungen der ProbandInnen. Diese dienen lediglich der Veranschaulichung, dass die Strategien aus dem Schmuggelproblem ebenfalls analog auf das Energieversorgungsproblem angewendet werden können.

In Anschluss wurden die ProbandInnen noch gefragt, ob Ihnen das Energieversorgungsproblem bereits bekannt war und falls ja, ob ihnen bereits Lösungen

Tab. 2: Gegenüberstellung des Ausgangs- und Zielproblems mit den drei Lösungsvarianten

Das Schmuggelproblem	Das Energieversorgungsproblem
Eine Gruppe von Verbrechern wollte eine große Menge an Bargeld aus den Verkäufen von Drogen über die Grenze ins Nachbarland schmuggeln, da sie es dort leichter „waschen“ können.	Aufgrund der Wende zu erneuerbaren Energien wird immer mehr Strom an der Nordsee mit Hilfe von Windkraftanlagen produziert, der anschließend in den Süden Deutschlands transportiert werden muss, da dort bisher nicht genügend erneuerbarer Strom erzeugt wird.
Die Polizei gründete allerdings eine Sonderkommission und setzte Spürhunde an den Grenzen ein.	Die Leitungen des Stromnetzes sind allerdings nicht für diese hohe Belastung ausgelegt.
Das Auffliegen des Geldschmuggels würde große Verluste und schwere Konsequenzen für die Verbrecher bedeuten.	Durch zu hohe Belastungen könnte es zu Beschädigung und Stromausfällen kommen.
Somit kann das Bargeld nicht über die bisher etablierten Schmuggelrouten transportiert werden.	Somit kann der Strom nicht über die momentanen Stromleitungen transportiert werden.

Die Verbrecher hatten aber eine Idee ...	Die Energieversorger hatten aber eine Idee ...
1) Umwandlungslösung	
Sie kauften von dem Bargeld Schmuck, welchen sie im Nachbarland wieder verkaufen konnten, da die Spürhunde nur nach Bargeld suchten.	Sie wandelten den Strom in eine andere Energieform um, die besser transportiert werden konnte und die nach dem Transport wieder umgewandelt werden konnte.
Die Verluste aufgrund der Differenzen beim An- und Verkauf des Schmucks waren besser, als erwischt zu werden.	Die Verluste aufgrund des Energieverlust bei den Umwandlungsprozessen waren besser, als Beschädigung des Stromnetzes oder Stromausfälle.
2) Neue Routen / Neue Leitungen – Lösung	
Da der Polizei die bisherigen Schmuggelrouten über die Grenze bekannt waren, kundschafteten sie eine neue, der Polizei unbekannt Route aus.	Sie bauten eine neue Leitung vom Norden in den Süden über die, der gesamte Strom transportiert werden konnte.
Die Verluste aufgrund des zusätzlichen Aufwandes waren besser, als erwischt zu werden.	Die Verluste aufgrund der zusätzlichen Baukosten waren besser, als Beschädigung des Stromnetzes oder Stromausfälle.
3) Aufteilungslösung	
Sie setzten zusätzliche Fahrzeuge auf den alten Schmuggelrouten ein, um diese gleichzeitig befahren zu können.	Sie teilten den Strom auf möglichst viele verschiedene Leitungen des bestehenden Stromnetzes auf.
Der Verlust einzelner aufgegriffener Fahrzeuge würde dabei in Kauf genommen werden.	Der Verlust einzelner beschädigter Leitung und Ausfälle würde dabei in Kauf genommen werden.
... Auf diese Weise konnten die Verbrecher die Geldsumme über die Grenze schmuggeln.	... Auf diese Weise konnten die Energieversorger den Strom in den Süden transportieren.

bekannt waren (Likert-Skala: ja, teilweise & nein). Die ProbandInnen der drei Experimentalgruppen wurden abschließend noch gefragt, wie hilfreich sie die das Geldschmuggelproblem inkl. Lösungen für die Lösung des Energieversorgungsproblems fanden (Likert-Skala: sehr hilfreich, etwas hilfreich, nicht hilfreich). Die Angabe sollte zusätzlich noch kurz schriftlich begründet werden.

5. Ergebnisse

Die Lösungen der ProbandInnen zum Energieversorgungsproblem lassen sich anhand einer typen-

bildenden qualitativen Inhaltsanalyse (Kuckartz, 2018) in vier verschiedenen Strategien unterscheiden:

1. Umwandlung der elektrischen Energie in eine andere Energieform, welche dann transportiert und später wieder zurück umgewandelt wird (entspricht der vorgegebenen Strategie 1).
2. Neue Leitungen verlegen, wobei die Energiemenge unverändert bleibt (entspricht der vorgegebenen 2).
3. Aufteilung der elektrischen Energie bzw. Zwischenspeicherung, ohne Veränderung an den Leitungen (entspricht der vorgegebenen Strategie 3).

4. Optimierung der vorhandenen Leitungen (entspricht keiner der vorgegeben Strategien)

Es wurden dabei nur die Lösungen in der Auswertung berücksichtigt, welche das eigentliche Transportproblem der Energie gelöst haben. Lösungen, die das Transport-Problem umgangen (z.B. durch Stromsparmaßnahmen oder politische Regelungen) oder gar nicht gelöst haben, wurden nicht weiter kodiert.

In einer ersten Auswertung wurden die ProbandInnen anhand der von ihnen verwendeten Strategien zur Lösung des Energieproblems kodiert. Dabei war es möglich das ein/eine Proband/Probandin mehrfach kodiert wurde, falls auch mehrere Strategien verwendet wurden. In Tabelle 3 befindet sich eine Kreuztabelle, welche die Anzahl der ProbandInnen aus den Experimental- und Kontrollgruppen darstellt, die jeweils eine der oben genannten Strategien verwendet haben. In Klammern ist jeweils die erwartete Anzahl für den Fall dargestellt, dass die beiden Parameter Gruppe und Strategien unabhängig voneinander wären.

Tab. 3: Verteilung der Strategien zur Lösung des Energieproblems auf die verschiedenen Gruppen (in Klammern steht jeweils die erwartete Verteilung bei unabhängig der Variablen)

Strategie \ Gruppe	Umwandlung	Neue Leitung	Aufteilung	Optimierung	Gesamt
Umwandlung	6 (4.9)	7 (7.1)	1 (3.2)	5 (3.9)	19
Neue Route	6 (5.4)	7 (7.8)	3 (3.5)	5 (4.3)	21
Aufteilung	3 (4.9)	7 (7.1)	6 (3.2)	3 (3.9)	19
Kontroll	5 (4.9)	8 (7.1)	3 (3.2)	3 (3.9)	19
Gesamt	20	29	13	16	78

Ein zweiseitiger exakter Test nach Fisher (Pearson-Chi-Quadrat-Test) wurden zwischen der Gruppenzugehörigkeit und den verwendeten Strategien durchgeführt. Es zeigt sich kein statistischer Zusammenhang zwischen der Gruppenzugehörigkeit und den verwendeten Strategien $\chi^2(9) = 6.20, p = .739, \phi = .28$.

In einer zweiten Auswertung wurde für jeden/jede Probanden/Probandin nur die als erstes genannte Strategie kodiert, so dass für jeden/jede Probanden/Probandin immer nur eine Strategie kodiert wurde (falls das Problem auch gelöst wurde). In Tabelle 4 befindet sich eine Kreuztabelle, welche die Anzahl der ProbandInnen aus den Experimental- und Kontrollgruppen darstellt, die jeweils eine der oben genannten Strategien als erstes genannt haben. In Klammern ist jeweils wieder die erwartete Anzahl für den Fall der Unabhängigkeit dargestellt.

Auch hier liefert ein zweiseitiger exakter Test nach Fisher keinen statistischen Zusammenhang zwischen der Gruppenzugehörigkeit und der zuerst genannten Strategie der ProbandInnen $\chi^2(9) = 5.48, p = .829, \phi = .39$. Der Effekt wird im Vergleich zu oben zwar größer bleibt aber weiterhin nicht signifikant.

Tab. 4: Verteilung der zuerst genannten Strategie zur Lösung des Energieproblems auf die verschiedenen Gruppen (in Klammern steht jeweils die erwartete Verteilung bei unabhängig der Variablen)

Strategie \ Gruppe	Umwandlung	Neue Leitung	Aufteilung	Optimierung	Gesamt
Umwandlung	3 (1.8)	4 (4.0)	0 (1.5)	2 (1.8)	9
Neue Route	2 (1.6)	3 (3.6)	1 (1.3)	2 (1.6)	8
Aufteilung	1 (1.9)	4 (4.4)	3 (1.7)	2 (1.9)	10
Kontroll	1 (1.8)	5 (4.0)	2 (1.5)	1 (1.8)	9
Gesamt	7	16	6	7	36

Insgesamt gaben 24 der 40 ProbandInnen an, dass ihnen das Energieversorgungsproblem bereits bekannt war. Von diesen 24 ProbandInnen gaben 5 bzw. 15 ProbandInnen an, dass Ihnen auch bereits vollständig bzw. teilweise eine Lösung des Problems bekannt war. Abschließend empfanden aus den drei Experimentalgruppen ein/eine Proband/in die erste Geschichte als „sehr hilfreich“, 22 als „etwas hilfreich“ und 7 als „nicht hilfreich“.

In einem letzten Auswertungsschritt wurden nur die ProbandInnen berücksichtigt, denen das Energieversorgungsproblem noch nicht bekannt war und/oder die zweite Geschichte als mindestens „etwas hilfreich“ empfunden wurde. In allen Fällen zeigen sich keine statistischen Zusammenhänge zwischen der Gruppenzugehörigkeit und den verwendeten Strategien.

6. Diskussion

In allen aufgeführten Auswertungen konnte kein statistischer Zusammenhang zwischen der Gruppenzugehörigkeit und der verwendeten Strategien nachgewiesen werden. Die in der analogen Problemsituation vorgegeben Lösungsstrategien hatten also keinen Einfluss auf das Lösungsverhalten der ProbandInnen bezogen auf Energieversorgungsproblem. Somit konnten die Ergebnisse aus der Studie von Gick & Holyoak (1980) in dieser Studie nicht reproduziert werden, da die aufgestellten Hypothesen, welche anhand der Ergebnisse aus der Studie von Gick &

Holyoak (1980) formuliert wurden, in dieser Studie nicht zutreffen.

Eine mögliche Ursache für dieses Ergebnis könnte darin bestehen, dass das Energieversorgungsproblem (bewusst) sehr alltagsnah war und den ProbandInnen durch Medien (z.B. Zeitung oder Nachrichten) sowohl das Problem bereits bekannt war als auch bereits Lösungen. In diesen Fällen war potenziell keine Transferleistung nötig, da das Problem eigenständig gelöst werden konnte. Unterstützen lässt sich diese Annahme mit dem Blick auf die Strategie *Neue Leitungen*, welche in beiden Auswertungsmethoden am häufigsten genannt wurde. Der Bau einer neuen Nord-Süd-Stromtrasse entspricht nämlich genau der aktuell politisch angestrebten Lösung des Energieversorgungsproblem (BMWK, 2024). In der Studie von Gick & Holyoak (1980) war das Medizin-Problem allen ProbandInnen nach eigenen Angaben unbekannt, weshalb ein Transfer zur Lösung wahrscheinlicher war.

Des Weiteren bestand in dieser Studie ein Unterschied zur Ausgangsstudie darin, dass ein schriftlicher Bogen ausgefüllt und keine Interviews geführt wurden. Es ist daher ungeklärt, welchen Einfluss die InterviewerInnen auf die Lösungen genommen haben. Dies wäre in ergänzenden Studien zu klären.

Ein weitere Erklärungsansatz, warum keine Transferleistung festgestellt werden konnte, besteht in dem Einnehmen einer anderen Perspektive auf Transfer. In dieser Studie wurde Transfer aus der Perspektive der Forscher gesehen, indem bei der Formulierung der Lösungen zur ersten Problemstellung festgelegt wurde, welche Strategie transferiert werden soll. Eine alternative Perspektive bietet das Actor-Oriented Model of Transfer (Lobato, 2003), welchen in diesem Fall die ProbandInnen in den Mittelpunkt des Transferprozesses setzt. Jede/r Proband/In bringt unterschiedliche Vorerfahrungen mit und reagiert potenziell anders auf einen neuen Input. Aus dieser Perspektive kann es sein, dass bei den ProbandInnen zwar ein Transfer stattgefunden hat, dieser sich aber nicht mit der erwarteten Übertragung aus der Sicht der Forscher in dieser Studie deckt. Der Blick auf Transfer wurde in dem Sinne zuvor selbst beschränkt. Als alternative müssten die ProbandInnen befragt werden, welche Ähnlichkeiten sie wahrgenommen haben, und was genau schließlich transferiert wurde.

7. Fazit

Da die Ergebnisse aus der Studie von Gick & Holyoak (1980) hier nicht bestätigt werden konnten, bietet die Studie einen kritischen Beitrag zum Analogical Transfer in Bezug auf Problemlösungen. Ähnlich wie bei Gick & Holyoak (1980) sind ergänzenden Studien notwendig sind, um mögliche Einflüsse aufzuklären. Die Erkenntnisse aus der Studie von Gick & Holyoak (1980) lassen sich also nicht ohne weiteres auf andere Bereiche und Personengruppen übertragen.

8. Literatur

- BMWK (2024). Ein Stromnetz für die Energiewende. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/netze-und-netzausbau.html>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Hillsdale, N.J.: L. Erlbaum Associates.
- Kintsch, W. & Van Dijk, T. A. (1978). Toward a model of text comprehension and production. *Psychological Review*, 85, 363-394.
- Kuckartz, U. (2018). *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung* (4. Aufl.). Weinheim, Basel: Beltz Juventa.
- Lobato, J. E. (2003). How design experiments can inform a rethinking of transfer and vice versa. *Educational Researcher*, 32(1), 17-20.
- Gick, M. L. & Holyoak, K. J. (1980). Analogical problem solving. *Cognitive Psychology*, 12, 306-365.
- Gick, M. L. & Holyoak, K. J. (1983). Schema induction and analogical transfer. *Cognitive Psychology*, 15, 1-38.
- Schmid, C. (2006). *Lernen und Transfer: Kritik der didaktischen Steuerung*. Bern: hep-Verlag.

Wirksamkeit aktivierender Lehrmethoden in einführenden Physikmodulen – Ein exemplarischer Vergleich zwischen der Schweiz und Deutschland –

Andreas Johannes Modler

Berliner Hochschule für Technik, Luxemburger Straße 10, 13353 Berlin
Andreas.Modler@bht-berlin.de

Kurzfassung

In einführenden Physikmodulen zur Mechanik wurden als aktivierende Lehrmethoden Peer Instruction (PI), Just-in-Time-Teaching (JiTT) und Tutorials der Physik eingesetzt. Die Wirksamkeit der Lehrmethoden wurde mittels des Force Concept Inventory (FCI) gemessen, der als Vor- und Nachtest zu Beginn und Ende der Lehrveranstaltungen durchgeführt wurde. Als Maß für den Lernzuwachs und damit für die Wirksamkeit der Lehrmethoden wurde der Zuwachs nach Hake und die individuelle Änderung bestimmt. Es werden die in den Studiengängen Maschinen-, Verfahrens- und Systemtechnik an der der Züricher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) aus den Jahren 2012 – 2015 erhobenen Daten mit jenen an der Berliner Hochschule für Technik (BHT) im Studiengang Physikalische Technik und Medizinphysik aus den Zeitraum 2016 – 2022 verglichen. Bei signifikant unterschiedlichen Ergebnissen im Vor- und Nachtest der Schweizer Kohorte im Vergleich zur deutschen Kohorte der Studierenden ergeben sich miteinander verträgliche Lernzuwächse. Diese sind charakteristisch für aktivierende Lehrmethoden, wobei der zeitliche Umfang der eingesetzten aktivierenden Lehrmethoden bei der deutschen Kohorte etwa doppelt so groß wie bei der Schweizer Kohorte war. Spezifische Unterschiede zwischen den beiden Kohorten werden als mögliche Einflussfaktoren diskutiert.

1. Einleitung/Aktivierende Lehre

Die tradierte Form der Lehre an Universitäten stellt seit fast einem Jahrtausend die Vorlesung dar. Dabei stellt der Lehrende die zu vermittelnden Inhalte vor und erläutert diese. Die Zuhörerschaft folgt den Ausführungen und nimmt Notizen, so dass sie mit dem Material vertraut gemacht wird. Dadurch wurde früher sichergestellt, dass die Inhalte von einer Generation zur nächsten übertragen wurden (Ridder-Symoens, 1991), wozu durch Bibliotheken und die freie Verfügbarkeit jeglicher Informationen über das Internet keine Notwendigkeit mehr besteht. In dem Lehr- lernszenario der traditionellen Vorlesung nimmt der Studierende eine passive Rolle ein, seine Aktivitäten sind auf die Mitschrift und das gelegentliche Stellen von unaufgeforderten Fragen beschränkt. Systematische Studien und Metastudien zeigen, dass aktivierende Lehrmethoden, die den Studierenden zu aktivem Lernen bewegen, im Vergleich zu traditionellen Vorlesungen zu besseren Prüfungsleistungen und geringeren Durchfallraten führen. (Freeman et al., 2014). Aktives Lernen wird dabei durch eine Arbeitsdefinition festgelegt: „Aktives Lernen bezieht die Studierenden in den Lernprozess durch Aktivitäten und/oder Diskussionen in der Lehrveranstaltung ein, im Gegensatz zum passiven Zuhören eines Experten. Es betont höherwertiges Denken und beinhaltet oft Gruppenarbeiten“ (Freeman et al., 2014).

Peer Instruction (PI) stellt eine aktivierende Lehrmethode dar, die sowohl in kleinen Lehrveranstaltung als auch in Großveranstaltungen mit mehreren hundert Studierenden eingesetzt werden kann (Mazur, 1997). Dabei wird ein zu vermittelndes Konzept in

Form einer Mehrfach- oder Einfachantwortfrage problematisiert und den Studierenden zur individuellen Beantwortung gestellt. Die Antworten werden mit speziellen Abstimmgeräten - sogenannten Klickern - oder einer App über die Smartphones der Studierenden gesammelt. Der Lehrende entscheidet anhand des Abstimmungsbildes, das er in Form eines Histogramms angezeigt bekommt, ob er die Diskussion der Frage in kleinen Gruppen mit den unmittelbaren Nachbarn – die Phase des PI – eröffnet (Mazur, 2017). Gegen Ende der Gruppendiskussionen wird dieselbe Frage wieder zur individuellen Abstimmung gestellt. In einer anschließenden Plenumsdiskussion werden die Abstimmungsergebnisse den Studierenden widergespiegelt und das korrekte Ergebnis erläutert. Die Studierenden lernen aktiv, da sie ihre Antwort bewusst auswählen und Argumente für Ihre Entscheidungen in der Gruppendiskussion austauschen (Mazur, 2017).

Bei den Tutorials der Physik handelt es sich um Arbeitsblätter, die in kleinen Überlegungsschritten wesentliche Konzepte entwickeln (McDermott und Shaffer, 2008). Die Arbeitsblätter sind so gestaltet, dass sie typische Fehlvorstellungen und Denkfehler hervorlocken und die Studierenden mit diesen konfrontieren. Sie werden in kleinen Gruppen mit üblicherweise 3-7 Studierenden bearbeitet. Die Gruppendiskussionen werden von Lehrenden bzw. Assistenten begleitet, wodurch das Auflösen der Fehlvorstellungen und die kohärente Verankerung der Konzepte gewährleistet wird (McDermott, 2001).

Die zu vermittelnden Inhalte werden beim Just-in-Time-Teaching (JiTT) den Studierenden vor der be-

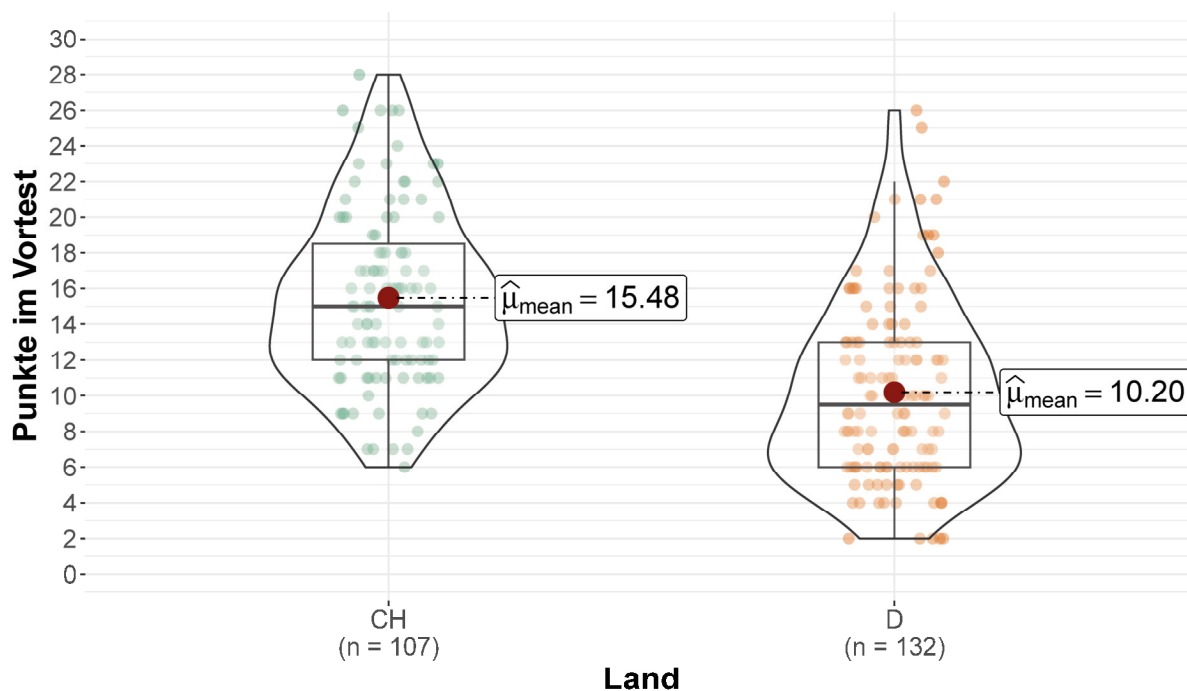


Abb. 1: Vergleich der Ergebnisse im Vortest des FCI zwischen den Studierenden an der ZHAW in der Schweiz (CH) und an der BHT in Deutschland (D) in einem Violinplot. Die Teilnehmerzahl n am Vortest betrug in CH 107 und in D 132. Die erreichte mittlere Punktzahl $\hat{\mu}_{mean}$ im Vortest ist jeweils durch einen roten Punkt markiert. Sie beträgt 15,48 in CH und 10,20 in D. Die Boxen umschließen jeweils den Bereich, in dem die mittleren 50% der Daten liegen. Sie werden durch das untere und obere Quartil begrenzt und geben so den Interquartilsbereich an. Der horizontale Strich markiert den Median, der 15 für CH und 9,5 für D beträgt. Die Ergebnisse der einzelnen Teilnehmer sind als halbtransparente Kreise (CH in grüner Farbe bzw. D in roter Farbe) dargestellt, welche durch eine einhüllende Kurve und deren vertikalen Spiegelung umschlossen werden. Die jeweilige einhüllende Kurve stellt die geglättete Wahrscheinlichkeitsdichte der Vortestpunktzahl für CH bzw. D dar.

treffenden Unterrichtseinheit zur Verfügung gestellt (Novak et al., 1999). Sie bereiten sich auf die Lehrveranstaltung durch Auszüge aus Lehrbüchern, Skripten, Simulationen und Lehrvideos vor, die über ein Lernmanagementsystem bereitgestellt werden. Die Bearbeitung der Materialien wird über kleine Tests bzw. Quizze sichergestellt, die in den Leistungsnachweis einfließen können. Sie enthalten offene Fragen mit deren Beantwortung die Studierenden dem Lehrenden Rückmeldung über ihr Verständnis und ihre Probleme mit den Inhalten und den Materialien zur Vorbereitung geben. Dadurch kann der Lehrende gerade rechtzeitig (just in time) vor den zugehörigen synchronen Unterrichtseinheiten deren Didaktik und Ablauf optimal auf die Bedürfnisse der Studierenden zuschneiden und anpassen. Das aktive Lernen der Studierenden besteht dabei in der Selbstreflexion des Verständnisses der Inhalte und Materialien mit der Formulierung einer entsprechend qualifizierten Rückmeldung an den Lehrenden.

Die Lehrmethoden wurden in einführenden Physikmodulen zur Mechanik in verschiedenen Ingenieursstudiengängen in der Schweiz (CH) an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) und in Deutschland (D) an der Berliner Hochschule für Technik (BHT) angewandt.

Die Wirksamkeit der in den Kursen eingesetzten Lehrmethoden wurde mit dem Force Concept Inventory (FCI) gemessen (Hestenes et al., 1992).

Der Beitrag ist im Weiteren folgendermaßen gestaltet. Im Abschnitt 2 werden den Institutionen und die Kurse und deren Aufbau erläutert, an denen die Daten erhoben wurden. Es werden die Metriken zur Bestimmung des Lernzuwachses mit dem FCI vorgestellt.

Die Ergebnisse im Vor- und Nachtest des FCI und die sich daraus ergebenden Lernzuwächse werden in Abschnitt 3 dargestellt und im Vergleich zu den in der Literatur gefundenen Werten eingeordnet. Abschnitt 4 dient der Diskussion der Ergebnisse in Bezug zu den Besonderheiten der Studierendenkohorten aus der Schweiz und Deutschland. Ein Fazit mit Ausblick wird im abschließenden Abschnitt 6 gegeben.

2. Methodik und Datenbasis

Der FCI umfasst 30 Einzelauswahlfragen mit jeweils fünf Antwortmöglichkeiten, die das Konzeptverständnis der Newtonschen Mechanik überprüfen. Die Distraktoren sind dabei so gewählt, dass sie typische Fehlvorstellungen Lernender abbilden (Hestenes et al., 1992). Der FCI wurde zu Beginn der Kurse als Vortest und am Ende der Kurse bzw. zu Beginn der

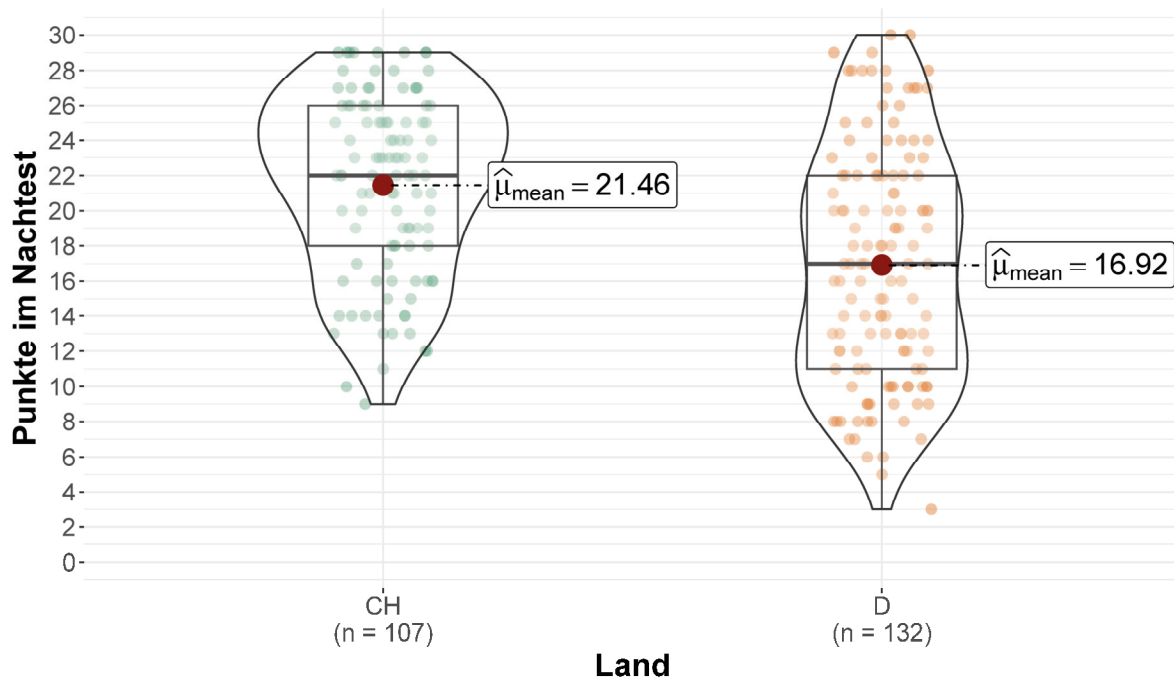


Abb. 2: Violinplot der Ergebnisse im Nachtest des FCI der Studierenden aus CH und D. Die Teilnehmerzahl n am Nachtest betrug in CH 107 und in D 132. Die erreichte mittlere Punktzahl $\hat{\mu}_{mean}$ im Nachtest ist jeweils durch einen roten Punkt markiert. Sie beträgt 21,46 in CH und 16,92 in D. Die Boxen umschließen jeweils den Bereich, in dem die mittleren 50% der Daten liegen. Sie werden durch das untere und obere Quartil begrenzt und geben so den Interquartilsbereich an. Der horizontale Strich markiert den Median, der 22 für CH und 17 für D beträgt. Die Ergebnisse der einzelnen Teilnehmer sind als halbdurchsichtige Kreise (CH in grüner Farbe bzw. D in roter Farbe) dargestellt, welche jeweils durch eine einhüllende Kurve und deren vertikalen Spiegelung umschlossen werden. Die jeweilige einhüllende Kurve stellt die geglättete Wahrscheinlichkeitsdichte der Nachtestpunktzahl für CH bzw. D dar.

anschließenden Kurse in der zweiten Hälfte der Vorlesungszeit als Nachtest durchgeführt. Ein Maß für den Lernzuwachs nach Hake g_{Hake} ist gegeben durch

$$g_{Hake} = \frac{\langle P_N \rangle - \langle P_V \rangle}{30 - \langle P_V \rangle} \quad \{1\},$$

wobei $\langle P_V \rangle$ die mittlere Punktzahl im Vortest und $\langle P_N \rangle$ die mittlere Punktzahl im Nachtest sind und durch den maximal möglichen Punktezuwachs im Nenner normiert wird (Hake, 1998). Die individuelle Änderung c_i und deren Mittelwert stellen alternative Maße für den Lernzuwachs dar

$$c_i = \begin{cases} \frac{P_N - P_V}{30 - P_V} \geq 0 \text{ für } P_N \geq P_V \\ \frac{P_N - P_V}{P_V} < 0 \text{ für } P_N < P_V \end{cases} \quad \{2\},$$

wobei bei geringerer Punktzahl P_N im Nachtest als im Vortest sinnvollerweise durch die Punktzahl P_V im Vortest normiert wird. Die mittlere individuelle Änderung c berechnet sich dann bei n Teilnehmern am Vor- und Nachtest als der Mittelwert der n individuellen Änderungen (Marx und Cummings, 2007). Die Definition der mittleren individuellen Änderung

gestattet in natürlicher Weise die Standardabweichung (SD) der zugrundeliegenden Verteilung zur Bestimmung deren Unsicherheit zu verwenden.

In allen betrachteten Kursen sollten vergleichbare Lernziele erreicht und Kompetenzen vermittelt werden. Die Studierenden sollten an Fragestellungen der Mechanik exemplarisch die physikalische Denk- und Arbeitsweise als Teil des modernen technischen Ingenieurdenkens kennen und anwenden lernen. Sie sollten in die Lage sein, die Richtigkeit von Modellresultaten durch Grenzfallüberlegungen, Beurteilung der Plausibilität, Überschlagsrechnungen, Vergleich mit Erfahrungswerten aus Technik und Alltag prinzipiell zu beurteilen und zu kontrollieren. Die Kurse in CH wurden in den Jahren 2012-2015 an der School of Engineering der ZHAW in den Studiengängen Maschinentechnik, Maschinenverfahrenstechnik und Systemtechnik durchgeführt. In den 5 Kursen waren 119 Studierende eingeschrieben, wovon 107 an dem Vor- und Nachtest des FCI teilnahmen. Die Kurse waren mit 4 European Credit Transfer System Punkten (ECTS) bewertet. Sie wurden über 14 Wochen abgehalten mit wöchentlich 2 Semesterwochenstunden (SWS) seminaristischen Unterricht für den ganzen Kurs bei einer Kursgröße von ca. 25 Teilnehmern und 2 SWS Übungen mit dem halben Kurs.

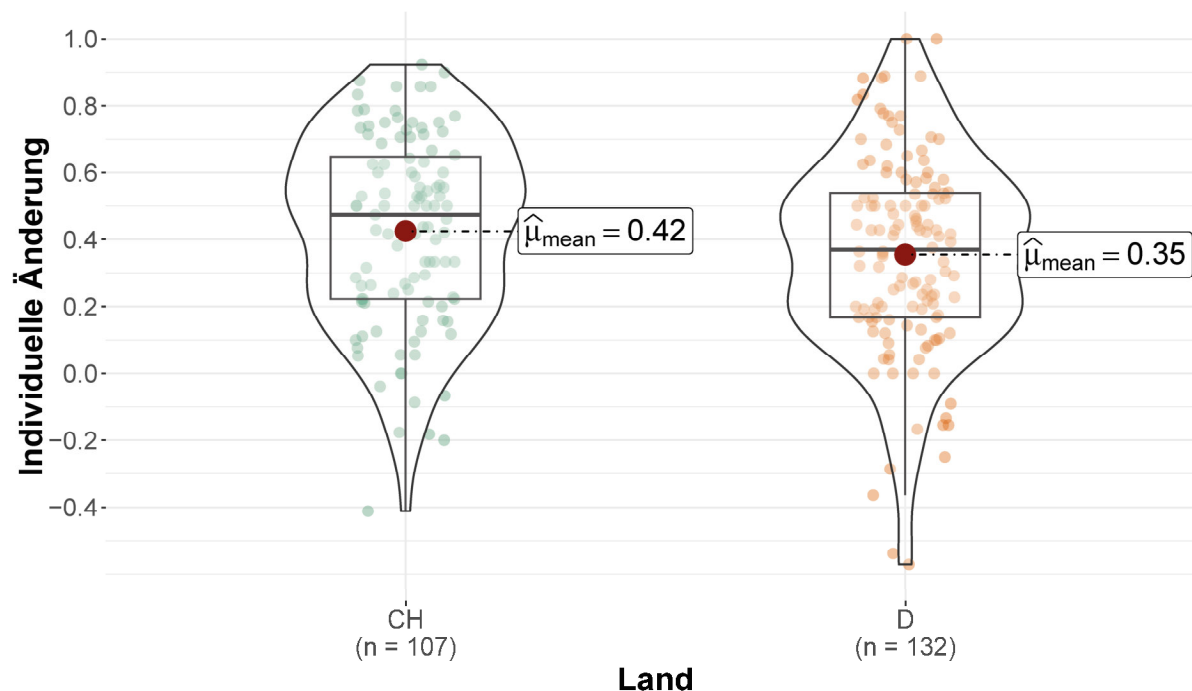


Abb. 3: Vergleich des Lernzuwachs der Studierenden aus CH und D gemessen durch die individuelle Änderung anhand der Ergebnisse im Vor- und Nachtest des FCI mittels eines Violinplots. Die Teilnehmerzahl n an beiden Tests betrug in CH 107 und in D 132. Die mittlere individuelle Änderung $\hat{\mu}_{mean}$ im Nachtest ist jeweils durch einen roten Punkt markiert. Sie beträgt 0,42 in CH und 0,35 in D. Die Boxen umschließen jeweils den Bereich, in dem die mittleren 50% der Daten liegen. Sie werden durch das untere und obere Quartil begrenzt und geben so den Interquartilsbereich an. Der horizontale Strich markiert den Median, der 0,47 für CH und 0,37 für D beträgt. Die individuellen Änderungen der einzelnen Teilnehmer sind als halbttransparente Kreise (CH in grüner Farbe bzw. D in roter Farbe) dargestellt, welche jeweils durch eine einhüllende Kurve und deren vertikalen Spiegelung umschlossen werden. Die jeweilige einhüllende Kurve stellt die geglättete Wahrscheinlichkeitsdichte der individuellen Änderung für CH bzw. D dar.

Als aktivierende Lehrmethoden wurden PI im seminaristischen Unterricht im Umfang von ca. 1 SWS und Tutorials in der Hälfte aller Übungen eingesetzt, so dass sich der Umfang der aktivierenden Lehrmethoden auf ca. 21 h bei einer gesamten Kontaktzeit von 42 h belief. Die Kurse in D wurden am Fachbereich Mathematik, Physik und Chemie der BHT im Studiengang Physikalische Technik / Medizinphysik in den Jahren 2016 – 2022 durchgeführt. Die insgesamt 8 Kurse hatten 376 Studierende belegt, wovon 132 sowohl am Vor- als auch am Nachtest teilnahmen. Die Kurse waren mit jeweils 5 ECTS bewertet. Sie wurden über 9 Wochen in der ersten Semesterhälfte abgehalten mit 6 SWS seminaristischen Unterricht zu drei Blöcken à 90 min an unterschiedlichen Wochentagen jeweils mit dem ganzen Kurs bei einer Plangröße von 44 Teilnehmenden und 2 SWS Übungen mit jeweils einer Kurshälfte. Als aktivierende Lehrmethoden wurden JiTT und PI im seminaristischen Unterricht im Umfang von 4 SWS eingesetzt. Die Tutorials wurden in allen Übungen verwendet, so dass der Umfang der aktivierenden Lehrmethoden insgesamt ca. 41 h bei einer gesamten Kontaktzeit von 54 h betrug.

3. Ergebnisse und deren Einordnung

Die Ergebnisse der Kohorten aus D und CH im Vortest sind in Abbildung 1 in vergleichender Form als

Violinplot dargestellt (Hintze und Nelson, 1998).

Tab. 1: Ergebnisse im Vortest des FCI verschiedener Studienkohorten mit n Testteilnehmern in unterschiedlichen Kursformaten gemäß folgender Studien: ¹(Wilhelm, 2005), ²(Hopf, 2009), ³(Junker et al., 2017), ⁴(Hake, 1998).

Kurse	n	$\hat{\mu}_{mean}$
11. Klassen Gymnasium im-Schuljahr 2003/04 in Bayern ¹	258	8,0
Uni Wien: Erstsemester Physik im WS2008/09 ²	172	13,6
HS Rosenheim Erstsemester verschiedener Studiengängen WS13/14 – WS2015/16 ³	1'375	11,9 ± 5,4
HS Esslingen, HS Mannheim, Uni Würzburg im WS2001/02 ³	1'125	13,6 ± 6,4
14 US High School Kurse ⁴	1'113	8,4
16 US College Kurse ⁴	597	11,7
32 US Universitätskurse ⁴	4'832	14,4

Im Mittel wurden in CH 15,5 (Median 22) im Vergleich zu 10,2 (Median 9,5) Punkten in D erzielt. Dieser Unterschied ist mit einem p-Wert von 2×10^{-13} im Wilcoxon-Rangsummentest statistisch hochsignifikant. Die mittlere Punktzahl im Vortest von 10,2 in D liegt im unteren Spektrum der Punktzahlen, das durch

Kurse an Bayrischen Gymnasien, US High Schools und US Colleges markiert wird, wie der Tabelle 1 entnommen werden kann. Die 15,5 Punkte in CH übertreffen dabei die höchsten Punktzahlen, die in einführenden Physikkursen an US Universitäten im Mittel erzielt werden (s. h. Tabelle 1). Die Ergebnisse der Nachtests sind in Abbildung 2 dargestellt. Die Studierenden aus CH erreichen eine mittlere Punktzahl von 21,5 (Median 22) im Vergleich zu 16,9 (Median 17) Punkten der deutschen Studierenden. Dieser Unterschied ist mit einem p-Wert von 1×10^{-7} im Wilcoxon-Rangsummentest statistisch hochsignifikant. Die Schweizer Studierenden befinden sich damit im Bereich für beginnendes Verständnis der Newtonschen Mechanik, der zwischen 18 und 24 postuliert wurde. Die deutschen Studierenden sind an der Schwelle dazu. Der Bereich für vertieftes Verständnis der Newtonschen Mechanik wurde über 24 Punkte festgelegt (Hopf, 2009). Die sich aus Abbildungen 1 und 2 ergebenden individuellen Änderungen gemäß Gleichung {2} sind in Abbildung 3 dargestellt. In wenigen Fällen weisen diese auch negative Werte auf. Die sich daraus ergebenden mittleren Änderungen c sowie der Lernzuwachs nach Hake g_{Hake} (Gleichung {1}) sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tab. 2: Bestimmte Lernzuwächse aus den Vor- und Nachtestergebnissen in Abbildungen 1 und 2. Die Unsicherheiten für die mittlere Änderungen c wurden berechnet als Quotient der Standardabweichung und der Wurzel des Teilnehmerzahl n (Standardmessunsicherheit SE).

Maß für den Lernzuwachs	g_{Hake}	c
CH	0,41	$0,42 \pm 0,03$
D	0,34	$0,35 \pm 0,03$

Der Unterschied der mittleren Änderung c mit 0,42 für die Schweizer und mit 0,35 für die deutschen Studierenden ist mit einem p-Wert von 0,06 im Wilcoxon-Rangsummentest insignifikant, weswegen die Lernzuwächse für beide Kohorten im Weiteren als verträglich miteinander erachtet werden, obwohl die durch die Standardunsicherheiten (SE) definierten Intervalle knapp nicht mehr überlappen.

Die Werte für den Lernzuwachs nach Hake g_{Hake} liegen mit 0,34 für D und 0,41 für CH im Bereich für aktivierende Lehrformen, wie sie in der Metastudie von Hake (Hake, 1998) gemessen und später in einer fünfzigtausend Studierende umfassenden Metastudie (Von Korff et al., 2016) bestätigt wurden. Die Werte für traditionelle Lehrformen mit 0,23 (Hake, 1998) bzw. 0,22 (Von Korff et al., 2016) liegen deutlich unterhalb dieser Werten, wie aus Tabelle 3 ersichtlich ist.

Tab. 3: Referenzwerte für Lernzuwächse aus den Studien von ¹(Hake, 1998), ²(Von Korff et al., 2016) und ³(Stanzel et al., 2017). Die Teilnehmerzahlen am FCI sind durch die Werte für n gegeben. Als Maß für den Lernzuwachs ist jeweils g_{Hake} angegeben (s. h. Gleichung {1}). SE = SD/\sqrt{n} .

Studie	n	g_{Hake} für Lehrmethode:	
		Traditionell	Aktivierend
Metastudie von Hake ¹	6'542	$0,23 \pm 0,04$ (SD)	$0,48 \pm 0,14$ (SD)
50k-Studie ²	31'000	$0,22 \pm 0,01$ (SE)	$0,39 \pm 0,01$ (SE)
HS Rosenheim ³	778	$0,17 \pm 0,07$ (SD)	$0,26 \pm 0,07$ (SD)

4. Diskussion

Die mit PI und Tutorials erreichten Lernzuwächse in CH und jene mit PI, JiTT und Tutorials in D sind gut (s. h. Tabelle 2) und liegen im zu erwartenden Bereich für aktivierende Lehrmethoden (s. h. Tabelle 3).

Ausgehend von im Mittel hohen Punktzahlen von 15,5 (Abbildung 1) im Vortest reichen die mittleren individuellen Änderungen in CH mit $0,42 \pm 0,03$ (s. h. Tabelle 2) dazu aus, um beginnendes Verständnis für die Newtonsche Mechanik am Ende der Kurse zu erreichen, was mit im Mittel 21,5 Punkten im Nachtest demonstriert wird (Hopf, 2009). Die vergleichbaren Lernzuwächse mit $0,35 \pm 0,03$ in D (s. h. Tabelle 2) führen aufgrund des signifikant niedrigeren Ausgangsniveaus von 10,2 Punkten (Abbildung 1) nicht dazu, dieses Verständnis im Bereich über 18 Punkten mit den 16,9 erreichten Punkten im Nachtest verlässlich zu erzeugen (s. h. Abbildung 2).

Der Unterschied im Ausgangsniveau der Schweizer und der deutschen Kohorten wird im Zugang zu einer Hochschule für Angewandte Wissenschaften vermutet. In CH ist dazu der Abschluss der Sekundarstufe I, eine abgeschlossene Berufsausbildung mit betrieblichen und berufsschulischen Anteilen sowie eine Berufsmaturität notwendig. Physikunterricht muss dabei in allen drei Abschnitten verpflichtend absolviert werden. 95% der Schweizer Teilnehmer hatten eine Berufsausbildung und eine Berufsmatura absolviert und verfügten über eine nicht unerhebliche Berufserfahrung. Der Altersdurchschnitt war folglich über 20 Jahre. Die deutschen Studierenden hatten zu über 75% nur Abitur. Die weiteren 25% verfügten über eine Berufsausbildung neben dem Abitur, Fachabitur bzw. in seltenen Fällen der Fachhochschulreife. Die deutschen Studierenden waren im Mittel daher jünger als 20 Jahre. Die schulische Vorbildung im Fach Physik in D im Vergleich zu CH wird als geringer eingeschätzt, wodurch die signifikant geringeren Punktzahlen im Vortest erklärt werden könnten.

Der Umfang aktivierender Lehrmethoden mit PI, JiTT und Tutorials betrug 41 h der gesamten Kontaktzeit von 54 h in D. Er war damit doppelt so groß, wie

die mit PI und Tutorials verbrachten 21 h Kontaktzeit bei einer gesamten synchronen Unterrichtszeit von 42 h in CH, wodurch gerade noch vergleichbare Lernzuwächse erzielt werden konnten (s. h. Tabelle 2). Dies legt zunächst den scheinbaren Widerspruch nahe, dass ein geringerer Umfang an aktivierenden Lehrmethoden zu höheren Lernzuwächsen führen würde. Der Grenzfall für einen verschwindenden Umfang an aktivierenden Lehrmethoden ist allerdings durch den Wert für traditionelle Lehrmethoden gegeben und fällt im Bereich zwischen 0,17-0,23 am niedrigsten aus (s. h. Tabelle 3). Wenn eine stetige Abhängigkeit des Lernzuwachs vom Umfang der aktivierenden Lehrmethoden unterstellt wird, müsste diese Funktion ein Maximum durchlaufen. In Analogie zu Dosis-Wirkungsbeziehung aus der Pharmakologie (Holford und Sheiner, 1981) und Psychotherapie (Howard et al., 1986) würde allerdings ein stetiger Anstieg mit einem anschließenden Übergang in einen Sättigungsbereich erwartet werden, so dass ein Verlauf mit einem Maximum zumindest als ungewöhnlich zu bewerten wäre. Ein erster einfacher Erklärungsansatz ergibt sich durch die Einbeziehung der durchschnittlichen Anwesenheit der Studierenden in die Betrachtung. Die Anwesenheit der Schweizer Studierenden war sehr hoch und kann mit über 95% an allen Unterrichtseinheiten in Präsenz abgeschätzt werden, was durch die Teilnahmen am Vortest mit 97% (115 von 119 Studierenden) und am Nachtest mit 91% (108 von 119 Studierenden) gestützt wird. Der Besuch der Lehrveranstaltungen der deutschen Studierenden fiel über die Semesterwochen in den Kursen ab. Am Vortest nahmen 75% und am Nachtest 41% der eingeschriebenen Studierenden teil, so dass die durchschnittliche Anwesenheit der Kursteilnehmer grob mit 50% während der Kurszeiträume in D abgeschätzt werden kann. Die Auflösung des scheinbaren Widerspruchs bezüglich des Lernzuwachs aktivierender Lehrmethoden ergibt sich durch die Annahme eines einfachen multiplikativen Modells zwischen Umfang aktivierender Lehrmethoden und Anwesenheit der Studierenden. Die doppelte Dosis aktivierender Lehrmethoden mit 41 h führt bei halber Wahrnehmung des Angebots (50% Anwesenheit) in D zu einem knapp vergleichbaren Effekt wie für die Schweizer Kohorte (s. h. Tabelle 2). Die Ursachen für die hohe Anwesenheitsquote in CH werden im höheren Durchschnittsalter der Studierenden, der Berufsausbildung und Berufserfahrung und der damit einhergehenden ausgeprägteren Arbeitsdisziplin und höheren Reife vermutet.

5. Fazit und Ausblick

Mit den in den Kursen verwendeten Lehrmethoden PI, JiTT und Tutorials konnten gute Lernzuwächse erzielt werden, die charakteristisch für die Ergebnisse aktiven Lernens Studierender sind. Der zeitliche Umfang der Lehrmethoden in den Kursen und die Voraussetzungen der Studierenden waren dabei zwi-

schden den beiden Kohorten aus D und CH sehr unterschiedlich. Fragen zu der Dosis-Wirkungsbeziehung aktivierender Lehrmethoden konnten nur angerissen werden. Weiterführende Studien sollten sich deren Charakterisierung widmen. Welche Lehrmethoden am effektivsten sind oder was die beste Mischung aus aktivierenden und traditionellen Lehrmethoden ist, sind offene Fragen, die auf Klärungen warten (Martella et al., 2024). Wie können die grundlegenden Voraussetzungen und Rahmenbedingungen für aktivierende Lehrmethoden beeinflusst und gestaltet werden, ist eine weitere entscheidende Frage. Denn aktivierende Lehrmethoden können nur wirken, wenn auch jemand zum Aktivieren da und zum aktiven Lernen bereit ist.

6. Literatur

- Freeman, S., Eddy, S.L., McDonough, M., Smith, M.K., Okoroafor, N., Jordt, H., Wenderoth, M.P., 2014. Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111, 8410. <https://doi.org/10.1073/pnas.1319030111>
- Hake, R.R., 1998. Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. *Am. J. Phys.* 66, 64–74. <https://doi.org/10.1119/1.18809>
- Hestenes, D., Wells, M., Swackhamer, G., 1992. Force concept inventory. *Phys. Teach.* 30, 141–158. <https://doi.org/10.1119/1.2343497>
- Hintze, J.L., Nelson, R.D., 1998. Violin Plots: A Box Plot-Density Trace Synergism. *Am. Stat.* 52, 181–184.
- Holford, N.H.G., Sheiner, L.B., 1981. Understanding the Dose-Effect Relationship. *Clin. Pharmacokinet.* 6, 429–453. <https://doi.org/10.2165/00003088-198106060-00002>
- Hopf, M., 2009. Physikdidaktik als nutzerorientierte Grundlagenforschung. *PLUS LUCIS* 1–2.
- Howard, K.I., Kopta, S.M., Krause, M.S., Orlinsky, D.E., 1986. The dose-effect relationship in psychotherapy. *Am. Psychol.* 41, 159–164. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.41.2.159>
- Junker, E., Schäfle, C., Stanzel, S., 2017. Die Heterogenität der Studienanfänger in den Ingenieurstudiengängen: Messungen mit dem „Force Concept Inventory“. *DiNa, Aktivierung in heterogenen Gruppen: Was MINT-Lehre bewirken kann.* 2017, 13–23.
- Martella, A.M., Schneider, D.W., O’Day, G.M., Karpicke, J.D., 2024. Investigating the intensity and integration of active learning and lecture. *J. Appl. Res. Mem. Cogn.* <https://doi.org/10.1037/mac000160>

- Marx, J.D., Cummings, K., 2007. Normalized change. *Am. J. Phys.* 75, 87–91.
<https://doi.org/10.1119/1.2372468>
- Mazur, E., 2017. *Peer Instruction: Interaktive Lehre praktisch umgesetzt*. Springer Spektrum.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-54377-1>
- Mazur, E., 1997. *Peer instruction : a user's manual*. Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall, [1997] ©1997.
- McDermott, L.C., 2001. Oersted Medal Lecture 2001: “Physics Education Research—The Key to Student Learning.” *Am. J. Phys.* 69, 1127–1137.
<https://doi.org/10.1119/1.1389280>
- McDermott, L.C., Shaffer, P.S., 2008. *Tutorien zur Physik*, 1. Edition. ed. Pearson Studium, München.
- Novak, G.M., Patterson, E.T., Garvin, A.D., Christian, W., 1999. *Just-In-Time Teaching: Blending Active Learning With Web Technology*, 1. Edition. ed. Pearson, Upper Saddle River, NJ.
- Ridder-Symoens, H. de (Ed.), 1991. *A History of the University in Europe: Volume 1: Universities in the Middle Ages*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Stanzel, S., Junker, E., Schäfle, C., 2017. Lernzuwachs in Mechanik: Messungen mit dem „Force Concept Inventory“. *DiNa, Aktivierung in heterogenen Gruppen: Was MINT-Lehre bewirken kann*. 2017, 24–38.
- Von Korff, J., Archibeque, B., Gomez, K.A., Heckendorf, T., McKagan, S.B., Sayre, E.C., Schenk, E.W., Shepherd, C., Sorell, L., 2016. Secondary analysis of teaching methods in introductory physics: A 50 k-student study. *Am. J. Phys.* 84, 969–974.
<https://doi.org/10.1119/1.4964354>
- Wilhelm, T., 2005. Verständnis der Newtonschen Mechanik bei bayerischen Elftklässlern - Ergebnisse beim Test “Force Concept Inventory” in herkömmlichen Klassen und im Würzburger Kinematik-/Dynamikunterricht. *PhyDid - Phys. Didakt. Sch. Hochsch.* 2, 47–56.

Danksagung

Mein Dank gilt den Studierenden für ihre Teilnahme und Bearbeitung des FCI, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Zum Einfluss der Nutzung von Modellanalogien auf das Konzeptwissen

-Bericht zum Leistungsstand gymnasialer Mittelstufenschüler*innen in der Elektrizitätslehre-

Florian Frank, Thomas Trefzger

Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik
florian.frank@uni-wuerzburg.de

Kurzfassung

Zur Vermittlung der grundlegenden Konzepte der Elektrizität werden häufig Modelle zum elektrischen Stromkreis verwendet. Diese Modelle basieren meist auf Analogien zu den Schüler*innen bekannten Objekten oder Konzepten, wie einer Fahrradkette oder dem Luftdruck. Durch die Nutzung der Modellvorstellungen wird versucht, zwischen den bekannten Objekten (z.B. den Gliedern einer Fahrradkette) und den Fachinhalten (z.B. den sich in einem Stromkreis bewegendem Elektronen) Verknüpfungen herzustellen. Diese Verknüpfungen sollen den Schüler*innen dabei helfen, ein Grundverständnis von den Konzepten der Elektrizität zu entwickeln. In den Schuljahren 2022/23 und 2023/24 wurden an bayerischen Gymnasien Daten zur Nutzung von Modellvorstellungen im Elektrizitätslehre-Unterricht und zum Konzeptwissen von Mittelstufen-Schüler*innen erhoben. In allen befragten Klassen wurde mindestens eine analogiebasierte Modellvorstellung zur Vermittlung genutzt, hauptsächlich das Fahrradkettenmodell oder eine Druck- oder Höhendifferenzbasierte Modellvorstellung. Im Konzeptwissen zur Elektrizität zeigen sich Unterschiede zwischen vertieft unterrichteten und nicht vertieft unterrichteten Schüler*innen. Zusätzlich ergibt sich für nicht vertieft unterrichtete Schüler*innen ein positiver Einfluss auf das Konzeptwissen, wenn zur Vermittlung verschiedene Modellvorstellungen unterschiedlicher Analogiebasen genutzt werden.

1. Einleitung

Die Vermittlung der Elektrizität innerhalb des Physikunterrichts kann als höchst komplex bezeichnet werden. Auf Seite der Schüler*innen zeichnet sich das in aktuellen Forschungsergebnissen zum Konzeptwissen der Elektrizität im Aufkommen fehlerhafter Vorstellungen ab: So kann beispielsweise nach Ende des einführenden Unterrichts in die Thematik (in welchem die Konzepte der Stromstärke, der Spannung und des elektrischen Widerstands sowie Gesetze für Schaltkreise mit Reihen- und Parallelschaltungen gelehrt werden) noch bei mehr als der Hälfte der Schüler*innen nachgewiesen werden, dass sie die Spannung als Eigenschaft des Stroms missverstehen (Burde, 2018). Insgesamt differenzieren in der Altersstufe ungefähr zwei von drei Schüler*innen fehlerhaft zwischen den Konzepten der Stromstärke und Spannung (Ivanjek et al., 2021). Leider verbessert sich das Aufkommen fehlerhafter Vorstellungen im Laufe der Schulzeit nicht gänzlich. Selbst bei Studienanfänger*innen sind diese weiterhin nachweisbar (Burde et al., 2022; Fromme, 2018; Rahmawati et al., 2023). Ähnliche Befunde zeigen sich auch in älteren Veröffentlichungen zur Thematik (zusammengefasst z.B. von Fromme, 2018).

Von Seiten der Physikdidaktik und der Lehrpersonen wurden daher über die Jahrzehnte hinweg eine Vielzahl von Unterrichtskonzeptionen entwickelt, die die Vermittlung der E-Lehre als Ziel haben (Wilhelm et al., 2021; Burde, 2018). Viele dieser Konzeptionen

eint die Verwendung von Modellvorstellungen auf Analogiebasis. Mit der Nutzung dieser wird versucht, die den Schüler*innen neuen und aus der eigenen Erfahrungswelt nicht bekannten Konzepte der Elektrizität (z.B. die Spannung) auf bekannte Konzepte (z.B. einen Höhenunterschied) zurückzuführen. Die Verwendung von solchen analogiebasierten Modellvorstellungen kann zu einem tieferen Konzeptverständnis beitragen (Duit et al., 2001), wobei der tatsächliche Einfluss abhängig ist von der verwendeten Modellvorstellung und der Implementation derselben in der Unterrichtskonzeption.

Im Rahmen eines Forschungsprojekts zur Verwendung digitaler Technologien zur Unterstützung der Vermittlung der E-Lehre (Frank et al., 2023) wurden unter anderem Daten zur Nutzung von analogiebasierten Modellvorstellungen im Physikunterricht von bayerischen Gymnasialklassen der 8. Jahrgangsstufe und Ausprägung des Konzeptwissens der Schüler*innen nach dem Unterrichtsgang zur Elektrizität gesammelt. Anhand dieser Daten wurde ermittelt, welche Modellvorstellungen in der Unterrichtspraxis genutzt werden und welchen Einfluss die Nutzung der unterschiedlichen Modellvorstellungen auf das Konzeptwissen der Schüler*innen hatte.

2. Modellvorstellungen zur Elektrizität

2.1. Klassifikation der Modellvorstellungen

Die für die Vermittlung entwickelten Modelle können nach ihrer Analogiebasis kategorisiert werden. Einem

Vorschlag von Burde und Wilhelm (2017) folgend wird hier eine Differenzierung ausgewählter Modellvorstellungen nach der zur Erklärung der Spannung verwendeten Analogie vorgestellt.

Ein möglicher Ansatz ist die Versinnbildlichung der Spannung als Höhenunterschied. Ebenso wie eine Spannung in einem geschlossenen Stromkreis für eine Ladungsbewegung nötig ist, ist ein Höhenunterschied für die Bewegung von Materie nötig. Mögliche Analogiegegenstände bzw. -konzepte sind hier die Murbelbahn, Rutschen oder Skipisten, häufig wird auch ein Wasserfall-System bzw. ein offener Wasserkreislauf zur Vermittlung genutzt (Mogstad & Bungum, 2020). Im offenen Wasserkreislauf wird beispielsweise durch eine Pumpe Wasser aus einem niedrigen Reservoir in ein hohes Reservoir gepumpt, von dort fließt es über ein System von Rohren (als Analogie zu den in Stromkreis verwendeten Kabeln) ins niedrigere Reservoir zurück.

Davon zu differenzieren ist der geschlossene (oder ebene) Wasserkreislauf. Obwohl viele der Analogiegegenstände ähnlich sind (Wasserrohre als Kabel, Ventile als Schalter, u.ä.), unterscheiden sich die Modellvorstellungen in der Art der Spannungsvermittlung. Im geschlossenen Wasserkreislauf sorgt eine Pumpe für einen Druckunterschied in den angrenzenden Rohren, welcher durch einen Wasserstrom vom Überdruck- zum Unterdruckbereich ausgeglichen wird. Eine Versinnbildlichung der Spannung als Druckdifferenz ist auch Basis des Elektronengasmodells. Hier sorgt ebenso eine Pumpe für einen Druckunterschied in den angrenzenden Bereichen, der primäre Unterschied zwischen beiden Modellen liegt im gepumpten Medium, dem Elektronengas (Burde, 2018).

Die elektrische Spannung als Antriebskraft ist die Basis des Fahrradkettenmodells (Kahnt, 2022). Dieses betont durch die starren Kettenglieder der Kette als Analogie zu einem starren Elektronenring in den Leitern den Kreislaufcharakter des Stromkreises.

Eine vielleicht kindernähere Art, die Vorgänge in einfachen Stromkreisen zu erklären, ist das Energiehutmodell (Schmid & Kraus, 2017). In diesem bewegen sich kleine Männchen mit Hut von einer Quelle aus zu einem Energieverbraucher, wo sie ihren Energiehut absetzen und wieder zur Quelle zurücklaufen, um sich erneut einen solchen aufzusetzen. Die Spannung wird hier als transportierte Energie pro Ladung interpretiert, also z.B. als die Größe des Hutes.

2.2. Einsatz von Modellvorstellungen an bayerischen Gymnasien

Im Zeitraum von Dezember 2022 bis Februar 2024 wurden Physik-Lehrpersonen aus 19 Gymnasialklassen der 8. Jahrgangsstufe zu den von ihnen im Unterricht verwendeten Modellvorstellungen befragt. Alle Lehrpersonen gaben an, für die Vermittlung Modellvorstellungen zu benutzen, die auf Analogien basieren. Kategorisiert nach der Analogiebasis wurde in 13 Klassen im Unterricht eine Druckdifferenzanalogie,

in 11 Klassen eine Höhendifferenzanalogie und in 9 Klassen eine Antriebskraftanalogie genutzt (siehe für eine Feindifferenzierung auch Tab. 1). Nur in einer Klasse wurde für die Vermittlung auf das Energiehutmodell zurückgegriffen, während eine andere Lehrperson einen Vermittlungsansatz wählte, der als „Tischtennisbälle in Schülerhänden“ bezeichnet wurde. Auf Nachfrage wurde spezifiziert, dass dafür die Schüler*innen einen Kreis bilden, in dem die Bälle von einer Person zur nächsten gereicht werden. Durch die Eigenerfahrung soll dadurch der System- und Kreislaufcharakter stärker verinnerlicht werden.

Tab. 1: Modellnutzung in den befragten Klassen (differenziert nach Analogiebasis und Analogieobjekt)

		<i>In ... von 19 Klassen</i>	
Druckdifferenz	Geschl. Wasserkreislauf	7	13
	Elektronengas	6	
Höhen-differenz	Murbelbahn	7	11
	Rutschen	5	
	Offener Wasserkreislauf	4	
	Skipisten	1	
Antriebskraft	Achterbahn	1	9
	Fahrradkette	9	
	Erbsen in Schlauch	1	
Energie-transport	Energiehut	1	1
Selbst-erfahrung	TT-Bälle in Schülerhänden	1	1

Die befragten Lehrpersonen gaben zudem an, dass in 6 der 19 Klassen in der Vermittlung der Elektrizität auf die Verwendung einer einzelnen Modellvorstellung zurückgegriffen wurde, in den anderen 13 Klassen wurden mindestens zwei, in einzelnen Fällen bis zu vier verschiedene Modellvorstellungen genutzt (siehe für eine Feindifferenzierung auch Tab. 2). Interessant ist hier zudem, dass in insgesamt 10 Klassen Modellvorstellungen mit unterschiedlichen Analogiebasen (also z.B. das Elektronengasmodell, ein Druckdifferenzmodell, und das Fahrradkettenmodell, ein Antriebskraftmodell) für die Vermittlung genutzt wurden.

Tab. 2: Zahl der genutzten Modelle und Differenzierung nach Analogiebasis

		<i>In ... von 19 Klassen</i>
Anzahl der genutzten Modelle	Ein Modell	6
	Zwei Modelle	6
	Drei Modelle	3
	Vier Modelle	4
Modelle aus vers. Analogiebasen	bekannt	10
	nicht bekannt	9

3. Konzeptwissen

3.1. Erhebungsinstrument

Zusätzlich zur Erhebung der für die Vermittlung genutzten Modellvorstellungen wurde das Konzeptwissen der Schulklassen gemessen. Da im Rahmen des Forschungsprojekts einige der Schulklassen vor Ende des regulären Schulunterrichts zur Elektrizität den Konzeptwissenstest ausgefüllt haben, wird hier nur über eine Teilstichprobe der 19 Klassen berichtet. Zum Zeitpunkt der Erhebung hatten 14 Klassen den regulären Unterricht beendet, insgesamt liegen damit den folgenden Analysen Daten von $N = 291$ Schüler*innen zugrunde.

Die Daten zum Konzeptwissen wurde innerhalb einer regulären Schulstunde papierbasiert erhoben, mittels des 2T-SEC-Tests (Ivanjek et al., 2021). Die insgesamt 25 Items des 2T-SEC-Tests lassen sich dabei fünf zentralen Themen der Elektrizitätslehre zuordnen: den offenen und geschlossenen Stromkreisen, der Stromstärke, der Spannung, dem elektrischen Widerstand, und den Parallel- und Reihenschaltungen. Alle Items sind nach demselben Prinzip aufgebaut: Nach einem kurzen Einleitungstext werden einer oder mehrere Schaltkreise dargestellt, zu denen eine Frage beantwortet werden muss (z.B. „Welche Spannung liegt zwischen den Punkten 1 und 2 sowie 2 und 3 an?“). Aus drei bis sieben Antwortmöglichkeiten muss für die erste Stufe der Beantwortung die richtige ausgesucht werden. Im Anschluss wird mit „Warum?“ explizit nach einer Begründung der Antwort der ersten Stufe gefragt. Erneut kann aus drei bis sechs Antwortmöglichkeiten gewählt werden. Ein Item zählt nur dann als korrekt gelöst, wenn sowohl die erste als auch die zweite Stufe richtig beantwortet wurde.

Im Fragebogen, der im Rahmen des Forschungsprojekts zur Erhebung verwendet wurde, wurden 23 der 25 originalen Items verwendet. Zwei Items wurden aus Passungsgründen (die Inhalte der Items werden im bayerischen Lehrplan nicht vermittelt) entfernt.

3.2. Datenaufbereitung

Die Daten wurde nach der probabilistischen Testtheorie (siehe z.B. Neumann, 2014) für die Auswertung aufbereitet. Im Rahmen dieser Aufbereitung wird jeder Beantwortung (also jeder Person) ein Fähigkeitswert zugeordnet und jedem Item eine Schwierigkeit. Ist der Fähigkeitswert einer Person gleich der Schwierigkeit eines Items, so besteht eine Wahrscheinlichkeit von 50%, dass die Person ein Item dieser Schwierigkeit korrekt beantwortet. Ist der Fähigkeitswert geringer, so verringert sich die Wahrscheinlichkeit der korrekten Beantwortung, ist der Fähigkeitswert höher, steigt sie. Zusammenfassen kann man die Ergebnisse der Datenaufbereitung in einer Wright-Map (siehe Abb. 1). Auf der linken Seite derselben ist ein Histogramm der Personenfähigkeiten dargestellt, auf der rechten Seite die Einzelitems mit ihren jeweiligen Schwierigkeiten. Beide werden in derselben, am rechten Rand aufgetragenen Skalierung präsentiert.

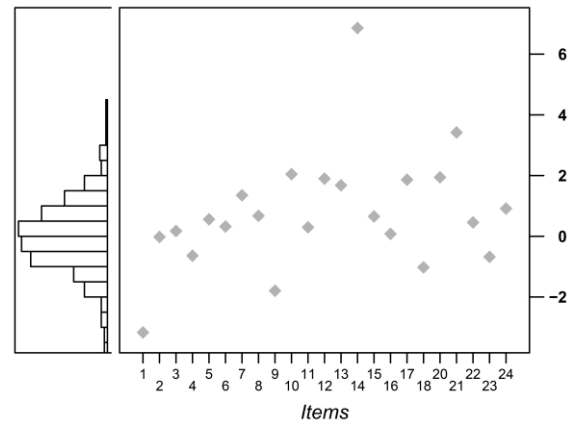


Abb. 1: Wright-Map der Personenfähigkeiten (links) und Itemschwierigkeiten (rechts) aus dem Konzeptwissenstest

Der Großteil der Itemschwierigkeiten und Personenfähigkeiten liegt im Bereich zwischen -2 und 2 , der Test eignet sich damit grundlegend gut für eine Differenzierung der Schüler*innen-Stichprobe nach ihren Personenfähigkeiten. Zusätzlich kann man erkennen, dass einzelne Items deutlich zu leicht (im Falle von Item 1) oder zu schwer (im Falle von Items 14 und 21) für die untersuchte Zielgruppe sind. Das spiegelt auch der Prozentsatz der korrekten Beantwortungen: Item 1 wurde von 93,5 % der Schüler*innen richtig bearbeitet, Item 14 von 6,3 % und Item 21 von 9,6 %.

3.3. Analyse der Itemschwierigkeit

Die Zuordnung der Items zu den Themengebieten erlaubt eine Aussage über die durchschnittliche Schwierigkeit der Themengebiete und damit darüber, welche Konzepte für die Schüler*innen einfacher zu verstehen sind und welche schwieriger (siehe Abb. 2).

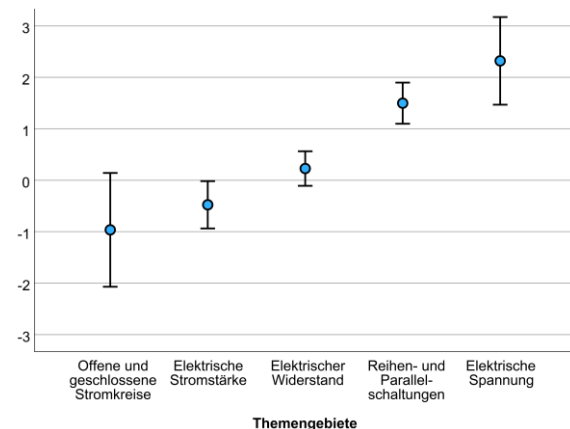


Abb. 2: Durchschnittliche Itemschwierigkeiten

Aufgaben aus dem Themenbereich „Offene und geschlossene Stromkreise“ (Items 1, 2 & 11) werden von den Schüler*innen im Schnitt am besten bearbeitet, wobei hier auch das sehr einfache Item 1 stark zum niedrigen Durchschnitt der Itemschwierigkeit beiträgt.

Fragestellungen zur elektrischen Stromstärke (Items 9, 15, 18, 22 & 23) und zum elektrischen Widerstand (Items 4, 5, 16 & 24) bilden den unteren bis mittleren

Schwierigkeitsbereich, wobei die der elektrischen Stromstärke zugeordneten Items 9, 18 & 23 nach Item 1 die leichtesten Items sind.

Aufgaben, die sich um Identifizierung von Reihen- und Parallelschaltungen drehen (Items 6, 10, 13 & 20), stellen die Schüler*innen vor größere Herausforderungen. Erstmals hat hier das leichteste Item des Themengebiete (Item 6) eine positive Schwierigkeit, wurde also von weniger als der Hälfte der Schüler*innen korrekt bearbeitet. Bei allen Aufgaben des Themengebiete zeigt sich außerdem ein Muster im Antwortverhalten: Konsistent wird bei den zweistufigen Items die erste Stufe besser bearbeitet als die zweite. Der durchschnittliche Prozentsatz korrekter Antworten der ersten Stufe liegt bei 56,25 %, während die zweite Stufe nur in durchschnittlich 27,6 % der Fälle korrekt gelöst wird. Damit erkennen die Schüler*innen häufig korrekt, um was für eine Art von Schaltung es sich handelt, können aber für ihre korrekte Entscheidung nicht die passende Begründung identifizieren. Woher dieses Phänomen kommt, kann mit den vorliegenden Daten nicht genauer untersucht werden. Eine mögliche Interpretation wäre, dass im Unterricht eine Begründung der Identifizierung selten verlangt wird und daher diese Argumentationsfähigkeit nicht trainiert wird.

Der Aufgabenbereich zur elektrischen Spannung (Items 3, 7, 8, 12, 14, 17 & 21) ist der für die Schüler*innen komplexeste. Durch die beiden sehr schweren Items 14 und 21 ist der Mittelwert der Itemschwierigkeiten dieses Aufgabenbereichs größer als 2 und damit eigentlich für die Stichprobe insgesamt nicht angemessen. Für die Interpretation muss angemerkt werden, dass im bayerischen Lehrplan für Gymnasien im Unterrichtsfach Physik nach dem Prinzip des Spiralcurriculums vorgegangen wird: Die elektrische Spannung wird in der 8. Jahrgangsstufe erstmalig eingeführt und dabei zunächst im Rahmen eines „Modell des elektrischen Stromkreises [...] als Antrieb für den elektrischen Strom“ verstanden (ISB, 2024). Erst in der darauffolgenden 9. Jahrgangsstufe wird eine „Präzisierung der Spannung als Potentialdifferenz“ vollzogen (ISB, 2024). Dass die Schüler*innen der 8. Jahrgangsstufe die Aufgaben zu Spannung daher schlechter bearbeiten als die Aufgaben zu den Inhalten der Elektrizitätslehre, die bereits in der 8. Jahrgangsstufe vollumfänglich unterrichtet werden, ist damit wenig verwunderlich. Trotzdem ist hinsichtlich anderer Forschungsergebnisse zur Komplexität der elektrischen Spannung (siehe z.B. Burde, 2018; Ivanjek et al., 2021) fraglich, inwieweit sich die Bearbeitung der Aufgaben dieses Themenblocks nach dem Unterricht zur Elektrizitätslehre der 9. Jahrgangsstufe verbessert.

3.4. Analyse der Konzeptwissensunterschiede nach Zweigzugehörigkeit

Im bayerischen Gymnasialschulsystem ist in der 7. Jahrgangsstufe die Wahl einer Ausbildungsrichtung vorgesehen, dafür entscheiden die Schüler*innen,

welche Schulfächer sie in den kommenden Jahrgangsstufen vertieft besuchen wollen. Gewählt werden kann zwischen insgesamt sechs sogenannten Zweigen, davon wird in nur einem Zweig, dem naturwissenschaftlich-technologischen (NTG), das Fach Physik vertieft unterrichtet. Ein vertiefter Unterricht resultiert in einem erhöhten Stundenkontingent, also mehr Unterrichtszeit, die sowohl für die Vertiefung der Inhalte des Kerncurriculums als auch für die Erarbeitung von darüber hinausgehenden Inhalten verwendet werden kann. Eine Analyse von Merzyn (2010) ergab für die Kurswahl in der Oberstufe (bei der die Schüler*innen eine ähnliche Wahl für bzw. gegen naturwissenschaftliche Fächer treffen können), dass sich vor allem die Schüler*innen mit großem Fachinteresse, hohem Leistungsniveau und hoher fachlicher Selbsteinschätzung in den Naturwissenschaften für diese Kurse entscheiden. Für die Wahl des Zweiges an bayerischen Gymnasien berichten Lutz et al. (2023) von einem signifikant höheren Interesse an Physik bei Schüler*innen, die den NTG-Zweig wählen, im Vergleich zu denen, die sich gegen den NTG-Zweig entscheiden.

Für die im Rahmen des Forschungsprojekts befragten Klassen wurde erhoben, ob diese vertieft unterrichtet werden (im NTG-Zweig) oder nicht (in Nicht-NTG-Zweigen). Mittels eines t-Test für unabhängige Stichproben wurde der Einfluss des Zweigs auf das Konzeptwissen der Schüler*innen untersucht. Dieser ergab einen signifikanten Unterschied im Konzeptwissen der Schüler*innen des NTG-Zweigs ($M = 0.209$, $SE = 0.114$) und der Schüler*innen der Nicht-NTG-Zweige ($M = -0.119$; $SD = 0.080$); $t(289) = 2.434$, $p = 0.016$, $d = 0.288$ (siehe Abb. 3).

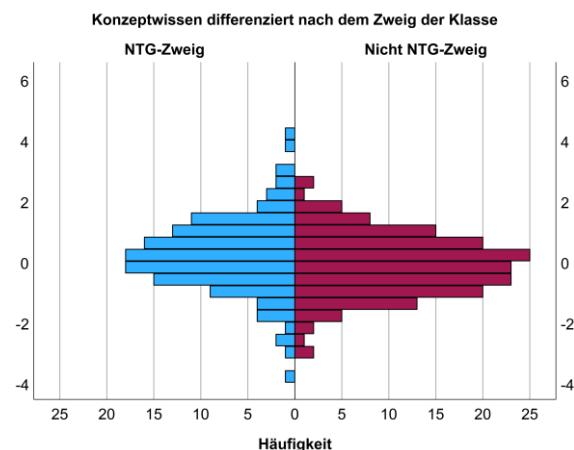


Abb. 3: Vergleich der Konzeptwissensverteilung in den Zweigen

Die zusätzlichen Unterrichtsstunden und die tiefere Beschäftigung mit den Inhalten der Elektrizitätslehre im Rahmen des NTG-Zweigs sind vermutlich ein maßgeblicher Faktor für diesen signifikanten Unterschied, aber auch die Interessens- und daraus resultierenden Motivationsunterschiede tragen wahrscheinlich zu diesem bei. In den weiteren Analysen werden die Schüler*innen des NTG-

Zweigs und die Schüler*innen der Nicht-NTG-Zweige getrennt betrachtet.

4. Ergebnisse zur Interaktion von zur Vermittlung genutzten Modellen und Konzeptwissen

Im Rahmen der Datenauswertung sollte geprüft werden, inwiefern die Art der Nutzung von auf Analogien basierenden Modellvorstellungen im Unterricht einen Einfluss auf das ausgebildete Konzeptwissen der Schüler*innen hat. Eine Auswertung nach Analogiebasis oder Feinanalogie ist ob der geringen Anzahl von Klassen pro Gruppe nicht sinnvoll. Überprüft wurde stattdessen, ob die Anzahl der in der Vermittlung genutzten Modelle oder die Nutzung von Modellen unterschiedlicher Analogiebasen einen Einfluss auf das Konzeptwissen haben.

Für die Untersuchung des Einflusses der Anzahl der für die Vermittlung genutzten Modelle wurden die Schüler*innen nach Zweig und Anzahl der ihnen bekannten Modellvorstellungen aufgeteilt. Für die Anzahl der Modellvorstellungen wurden zwei Gruppen gebildet: Gruppe 1 wurde die Elektrizitätslehre mit exakt einer Modellvorstellung vermittelt, während Gruppe 2 zwei oder mehr Modellvorstellungen im Unterricht präsentiert bekam. Mittels t-Tests für unabhängige Stichproben wurde der Einfluss der Gruppenzugehörigkeit auf das Konzeptwissen der Schüler*innen untersucht. Für die im NTG-Zweig unterrichteten Schüler*innen ergab sich kein signifikanter Unterschied im Konzeptwissen bei der Nutzung eines Modells ($M = 0.317$, $SE = 0.196$) und bei der Nutzung von mehr als einem Modell ($M = 0.147$; $SD = 0.139$); $t(124) = 0.718$, $p = 0.474$, $d = 0.133$. Für die nicht im NTG-Zweig unterrichteten Schüler*innen ergab sich ein signifikanter Unterschied im Konzeptwissen bei der Nutzung eines Modells ($M = -0.351$, $SE = 0.133$) und bei der Nutzung von mehr als einem Modell ($M = 0.028$; $SD = 0.097$); $t(163) = 2.344$, $p = 0.020$, $d = 0.375$.

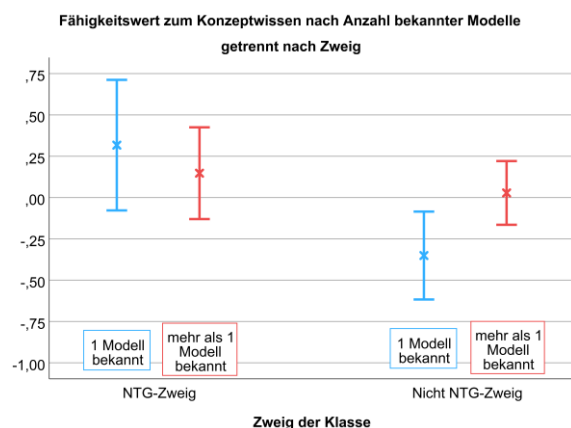


Abb. 4: Durchschnittliches Konzeptwissen nach Zweigzugehörigkeit und Anzahl der bekannten Modelle

Für die Untersuchung, ob die Kenntnis von Modellvorstellungen unterschiedlicher Analogiebasen einen Einfluss auf das Konzeptwissen hat, wurde ähnlich vorgegangen. Die Schüler*innen wurden nach Zweig

und Bekanntheit unterschiedlicher Analogiebasen aufgeteilt. Es wurde mittels t-Tests für unabhängige Stichproben untersucht, ob die Schüler*innen, denen Modelle unterschiedlicher Analogiebasen bekannt sind, sich von denen, die nur Modelle einer Analogiebasis kennen, unterscheiden.

Für die im NTG-Zweig unterrichteten Schüler*innen ergab sich kein signifikanter Unterschied im Konzeptwissen durch die Kenntnis unterschiedlicher Analogiebasen ($M = 0.147$, $SE = 0.139$) bzw. Unkenntnis unterschiedlicher Analogiebasen ($M = 0.317$; $SD = 0.196$); $t(124) = 0.718$, $p = 0.474$, $d = 0.133$. Für die nicht im NTG-Zweig unterrichteten Schüler*innen ergab sich ein signifikanter Unterschied im Konzeptwissen durch die Kenntnis unterschiedlicher Analogiebasen ($M = 0.041$, $SE = 0.109$) bzw. Unkenntnis unterschiedlicher Analogiebasen ($M = -0.302$; $SD = 0.115$); $t(163) = 2.173$, $p = 0.031$, $d = 0.339$.

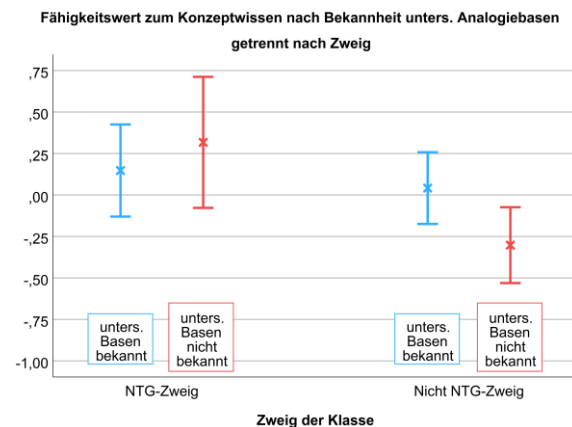


Abb. 5: Durchschnittliches Konzeptwissen nach Zweigzugehörigkeit und Bekanntheit unters. Analogiebasen

Damit zeigte sich insgesamt für Schüler*innen des NTG-Zweigs, dass weder die Anzahl der bekannten Modellvorstellungen noch die Kenntnis von Modellen unterschiedlicher Analogiebasen einen Einfluss auf das Konzeptwissen haben, während Schüler*innen der Nicht-NTG-Zweige in Bezug auf ihr Konzeptwissen sowohl davon profitieren, mehrere Modellvorstellungen kennenzulernen als auch davon, Modellvorstellungen aus unterschiedlichen Analogiebasen zu kennen.

Ziel des Elektrizitätslehreunterrichts ist die Vermittlung derselben und die Ausbildung eines adäquaten Konzeptwissens. Die verschiedenen Modellvorstellungen stellen in diesem Kontext damit unterschiedliche Zugänge zum selben Thema dar. Unsere Ergebnisse legen nahe, dass es für die (vermutlich interessierteren, leistungsfähigeren und naturwissenschaftlich begabteren) Schüler*innen des NTG-Zweigs ausreicht, einen einzelnen solchen Zugang präsentiert zu bekommen. Möglicherweise sind bei diesen Schüler*innen entweder das naturwissenschaftliche Grundverständnis oder die Motivation, sich mit dem Thema auseinanderzusetzen, hoch genug, sodass bei jeder beliebigen Art der Vermittlung ein ähnlich

hohes Konzeptwissen ausgebildet werden kann. Im Gegensatz dazu profitieren die (vermutlich weniger interessierten, leistungsfähigen und naturwissenschaftlich begabten) Schüler*innen der Nicht-NTG-Zweige davon, im Unterricht mehrere Zugänge zur Elektrizitätslehre kennenzulernen, die sich auch in der Grundlage der Vermittlung (der Analogiebasis) unterscheiden. Die Schüler*innen haben dann die Möglichkeit, den Zugang, der für sie am besten verständlich ist, zu nutzen und sich darüber ihr Konzeptwissen auszubilden. Wird nur eine Modellvorstellung im Unterricht genutzt, finden manche Schüler*innen über diese (eventuell aufgrund des vergleichsweise niedrigeren naturwissenschaftlichen Grundverständnisses) keinen Zugang zum Thema und erarbeiten sich den Zugang (eventuell aufgrund einer niedrigeren Motivation) auch nicht auf anderen Wegen.

5. Zusammenfassung

Der vorgestellte Einblick in die Unterrichtspraxis an bayerischen Gymnasien ergab für die frühe Elektrizitätslehre, dass alle befragten Lehrpersonen in ihrem Unterricht für die Vermittlung der Elektrizität auf analogiebasierte Modellvorstellungen zurückgreifen. Es gibt hier anscheinend einen forschungs- und praxisweiten Konsens über die Sinnhaftigkeit der Vermittlung mittels Modellvorstellungen, allerdings nicht über die dafür zu nutzende Modellvorstellung bzw. nutzenden Modellvorstellungen. Es zeigte sich hier in der Praxis eine breite Methodenvielfalt, in 19 befragten Klassen wurden insgesamt 11 verschiedene Modellvorstellungen von 5 unterschiedlichen Analogiebasen genutzt. Ebenso variierte die Anzahl der im Unterricht genutzten Modellvorstellungen stark, während in manchen Klassen fokussiert auf Basis einer Modellvorstellung unterrichtet wurde, wurden in anderen Klassen bis zu vier verschiedene Modellvorstellungen im Unterricht besprochen. Eine Auswertung des in den teilnehmenden Klassen erhobenen Konzeptwissens zur Elektrizität ergab, dass für vertieft unterrichtete Schüler*innen dabei kein Einfluss der Vermittlungsmethodik auf die Ausbildung des Konzeptwissens besteht. Für weniger physik-affine Schüler*innen, die sich für einen nicht vertieften Unterricht entschieden hatten, zeigte sich im Gegensatz dazu ein Vorteil der Vermittlung mit mehreren, in ihrer Analogiebasis variierenden Modellvorstellungen. Diese Gruppe profitiert anscheinend davon, mehrere Zugänge zur Elektrizität aufgezeigt zu bekommen und ist nicht, wie vielleicht zunächst vermutet, von der Vielzahl verschiedener Modellvorstellungen überfordert.

6. Literatur

Burde, J.-P. (2018). Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells. Logos Verlag Berlin.

Burde, J.-P., Ivanjek, L., Wilhelm, T., Schubatzky, T., Haagen-Schützenhöfer, C., Dopatka, L.,

Spatz, V., & Hopf, M. (2022). Schülervorstellungen in Schule und Studium – ein Vergleich. In S. Habig & H. van Vorst (Hrsg.), *Unsicherheit als Element von naturwissenschaftsbezogenen Bildungsprozessen—Beiträge zur Jahrestagung der GDGP* (Bd. 42).

Burde, J.-P., & Wilhelm, T. (2017). Modelle in der Elektrizitätslehre. Ein didaktischer Vergleich verbreiteter Stromkreismodelle. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 157.

Duit, R., Roth, W.-M., Komorek, M., & Wilbers, J. (2001). Fostering conceptual change by analogies—Between Scylla and Charybdis. *Learning and Instruction*, 11(4–5), 283–303. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959475200000347>

Frank, F., Stolzenberger, C., & Trefzger, T. (2023). Schülerlaborstudie zum Einsatz von Augmented Reality in der Elektrizitätslehre. In H. Grötzebauch & S. Heinicke (Hrsg.), *PhyDid B - Didaktik der Physik—Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.

Fromme, B. (2018). Fehlvorstellungen von Studienanfängern – Was bleibt vom Physikunterricht der Sekundarstufe I. In V. Nordmeier & H. Grötzebauch (Hrsg.), *PhyDid B - Didaktik der Physik—Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.

ISB (Hrsg.). (2024). *LehrplanPLUS - Gymnasium—Physik—Fachlehrpläne*. <https://www.lehrplanplus.bayern.de/schulart/gymnasium/fach/physik/inhalt/fachlehrplaene>

Ivanjek, L., Morris, L., Schubatzky, T., Hopf, M., Burde, J.-P., Haagen-Schützenhöfer, C., Dopatka, L., Spatz, V., & Wilhelm, T. (2021). Development of a two-tier instrument on simple electric circuits. *Physical Review Physics Education Research*, 17(2), 020123. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.020123>

Kahnt, M. (2022). Die Fahrradkette als durchgängige Vorstellungshilfe im Elektrizitätslehreunterricht der Sekundarstufe I. *plus Lucis*, 2.

Lutz, W., Elsholz, M., Haase, S., Burde, J.-P., Wilhelm, T., & Trefzger, T. (2023). Flipped Classroom im Physikunterricht der Sekundarstufe I – Auswirkungen auf die Veränderung des individuellen Interesses im Bereich der E-Lehre. In J. Roth, M. Baum, K. Eilerts, G. Hornung, & T. Trefzger (Hrsg.), *Die Zukunft des MINT-Lernens – Band 2* (S. 35–49). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-66133-8_3

Merzyn, G. (2010). Kurswahlen in der gymnasialen Oberstufe. *Leistungskurs Physik, Chemie, Mathematik. PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung. DPG-Frühjahrstagung, Hannover*.

- Mogstad, E., & Bungum, B. (2020). Ski lifts, bowling balls, pipe system or waterfall? Lower secondary students' understanding of analogies for electric circuits. *Nordic Studies in Science Education*, 16(1), 37–51.
<https://doi.org/10.5617/nordina.6882>
- Neumann, K. (2014). Rasch-Analyse naturwissenschaftsbezogener Leistungstests. In D. Krüger, I. Parchmann, & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 355–369). Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-37827-0_28
- Rahmawati, R., Widiasih, W., Marisda, D. H., & Riskawati, R. (2023). Using Four-Tier Test to Identify Prospective Elementary Teacher Students' Misconception on Electricity Topic. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9(10), 7793–7802.
<https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i10.3272>
- Schmid, L., & Kraus, E. M. (2017). Vier konkurrierende Stromkreismodelle. Ein Gruppenpuzzle. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 157.
- Wilhelm, T., Schecker, H., & Hopf, M. (Hrsg.). (2021). *Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*. Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-63053-2>

Förderung

Die Julius-Maximilians-Universität Würzburg und das Projekt „Connected Teacher Education“ wurde im Rahmen der gemeinsamen „Qualitätsoffensive Lehrerbildung“ von Bund und Ländern aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert.

Klimabildung – schulisch und außerschulisch vernetzt

Jonas Tischer*, Elena Vetter[†], Ina de Buhr[†], Michael Komorek*

*Didaktik der Physik und Wissenschaftskommunikation an der Universität Oldenburg,

[†]Neues Gymnasium Wilhelmshaven

jonas.tischer@uni-oldenburg.de

Kurzfassung

Komplexe gesellschaftliche Herausforderungen wie den Klimawandel zu verstehen und ihn anzugehen, erfordert das Zusammenspiel vieler disziplinärer Zugänge. Schule ist hierbei oft überfordert, weil separierte Fächer in ihren Angeboten unterkomplex bleiben. Im Projekt ReBiS (Regionales MINT-Bildungsökosystem) werden daher außerschulische Lernangebote, die meist multidisziplinär strukturiert sind, in mehrere Schulfächer eingebettet. Dadurch entsteht zum komplexen Thema Klimawandel ein neues Lernangebot, an dem mehrere Fächer und außerschulische Lernorte beteiligt sind. Es weist eine dem Thema angemessene Komplexität auf, ohne Lehrkräfte und Schüler:innen zu überfordern. ReBiS wird von der Deutschen Telekom Stiftung gefördert; im Raum Wilhelmshaven/Friesland/Oldenburg wirken sechs außerschulische Lernorte und vier Schulen mit vielfältigen Fächerkombinationen mit. Die Schulklassen wählen einen Problemkontext, den sie aus unterschiedlichen Fächern heraus und über mindestens ein Schuljahr lang bearbeiten. Im Beitrag stellen wir einen konkreten Zugang vernetzter außerschulischer und schulischer Bildung im Kontext ‚Herausforderung Leben im Klimawandel‘ vor, wie er am Neuen Gymnasiums in Wilhelmshaven (NGW) umgesetzt wird.

1. Schulische und außerschulische Bildung zum Umgang mit komplexen Kontexten vernetzen

Komplexe Kontexte wie der Klimawandel, eine nachhaltige Energieversorgung, Digitalisierung und Automation, Globalisierung und Gerechtigkeit erfordern eine multiperspektivische Betrachtung, damit Schüler:innen Dilemmata in diesen Kontexten verstehen, diese ausschärfen und sich Lösungen annähern können. Bildung muss Schüler:innen darauf vorbereiten, sich in den komplexen Kontexten zurechtzufinden, weshalb Bildungseinrichtungen die Möglichkeit bieten müssen, komplexe Kontexte zu bearbeiten (Ohl, 2018). Gleichzeitig kann die Betrachtung komplexer Kontexte auch Interesse und Motivation von Schüler:innen fördern (Lewalter & Geyer, 2009). Dafür wird aber mehr als eine Perspektive eines Schulfachs benötigt, sondern die unterschiedlichen Zugänge verschiedener Schulfächer, die systematisch aufeinander bezogen werden müssen. Schule stößt dabei aufgrund enger Fächergrenzen oft an Grenzen.

In dieser Situation bieten außerschulische Lernorte ein großes Potenzial, Fächerverbindungen zu unterstützen, da dort interdisziplinäre Ansätze verfolgt werden und sie nicht an fachsortierte Curricula gebunden sind. Sie sind zudem auch durch Personal und Ausstattung spezialisiert, um besondere Aspekte komplexer Problemkontexte zu thematisieren. Damit können außerschulische Lernangebote eine Bereicherung für Schulfächer darstellen, die sich verbinden wollen (Tal, 2012).

Singuläre Besuche außerschulischer Angebote stehen allerdings in der Kritik, keine nachhaltigen Effekte hinsichtlich fachlichen Lernens aufzuweisen (z. B. Scharfenberg, 2005; Guderian, 2006; Klees &

Tillmann, 2015). Es stellt sich somit die Frage, wie das Potenzial mehrperspektivischer außerschulischer Lernangebote mit dem grundständigen Lernangebot verschiedener Schulfächer so verknüpft werden kann, dass Schüler:innen einen tiefgreifenden und nachhaltigen Zugang zu komplexen Problemkontexten bekommen.

Im von der Deutschen Telekom Stiftung geförderten Projekt ReBiS (Regionales MINT-Bildungsökosystem) wird eine Antwort auf diese Frage entwickelt und erprobt. Mehrere außerschulische Lernorte und mehrere Schulfächer entwickeln gemeinsame Bildungsangebote, indem die außerschulischen Angebote untereinander (siehe Abschnitt 1.1.) und mit schulischen Angeboten der Fächer vernetzt werden (siehe Abschnitt 1.2.). Diese Vernetzung findet komplementär statt, d. h. die Lernangebote ergänzen einander oder stehen in einem absichtlichen Kontrast zueinander (Tischer, Sajons & Komorek, 2023).

1.1. Mit außerschulischen Lernangeboten komplexe Problemkontexte erschließen

Bei ReBiS wählen die mitwirkenden Schulklassen zum Schuljahresbeginn einen komplexen Problemkontext, der ihrem Interesse entspricht und einen Bezug zu den Curricula der Klassenstufe hat. Gemeinsam mit den beteiligten außerschulischen Lernorten wird dann überlegt, welches der vorhandenen Lernangebote der Lernorte zum Problemkontexte passt oder adaptiert werden kann. Die Schulklassen besuchen dann aus jedem der beteiligten Schulfächer heraus einen der außerschulischen Lernorte. Dabei besteht in den Fächern die Aufgabe, das jeweilige außerschulische Lernangebot einzubetten, also den Besuch inhaltlich vor- und dann auch nachzubereiten.

Neben Kontexten wie der ‚Herausforderung Leben im Klimawandel‘ (s. Abschnitt 2) werden bei ReBiS weitere Problemkontexte thematisiert. Im Problemkontext ‚Kunststoffe – Fluch und Segen‘ geht es um die Ambivalenz, die Kunststoffe mit sich bringen, indem sie in vielen Bereichen wie der Medizin weder wegzudenken noch ersetzbar sind, indem sie aber als Kunststoffmüll oder Mikroplastik große Probleme für Umwelt und Nahrungsketten hervorrufen.

Der Kontext ‚Nachhaltige Nutzung von Rohstoffen‘ thematisiert in ähnlicher Weise die Dilemmata, die Rohstoffe als Energieträger (Öl, Gas) oder etwa als Baustoffe mit sich bringen, insbesondere weil sie oft negativ auf die CO₂-Bilanz wirken, während insbesondere Industriegesellschaften von vielen Rohstoffen, teilweise sogar zunehmend abhängig sind. Stärker auf die Verantwortung des Einzelnen fokussiert der bei ReBiS aufgearbeitete Problemkontext ‚Konsum und seine Folgen‘.

Sechs außerschulische Lernorte wirken bei ReBiS mit: Das Regionale Umweltbildungszentrum (RUZ) in Schortens, die Wilhelmshavener Lernorte Küstenmuseum, Wattenmeer Besucherzentrum, Lernort Technik und Natur (Schülerlabor) und der Botanische Garten mit dem Verein grün&bunt sowie das Oldenburger Lehr-Lern-Labor physiXS an der Universität. Nicht jeder dieser Lernorte kann zu jedem der ausgewählten Problemkontext beisteuern, so dass die Lehrkräfte und die Vertretenden der Lernorte als Team zunächst Passungen herausarbeiten. Da die ReBiS-Lernorte ein großes Spektrum an Zugängen und Ausrichtungen bieten, sind nicht nur physikalische oder allgemein naturwissenschaftliche Perspektiven nutzbar, sondern auch gesellschaftswissenschaftliche Perspektiven.

Das Projekt zeichnet aus, dass sich Pädagogen der beteiligten Lernorte und die Lehrkräfte der beteiligten Schulen in Teams austauschen. Als Schulen wirken bei ReBiS das Neue Gymnasium Wilhelmshaven, die Integrierte Gesamtschule Wilhelmshaven, die Oberschule Wilhelmshaven Mitte und die Oberschule Varel mit. Die Teams haben sich in der ersten Projektphase intensiv mit den jeweiligen außerschulischen Lernangeboten auseinandergesetzt und dabei Bezüge zwischen diesen außerschulischen Lernangeboten und den schulischen Lernangeboten der Schulfächer, herausgearbeitet (analytische Phase).

Auf dieser Grundlage werden die komplementären schulischen und außerschulischen Lernangebote komplementär vernetzt (konstruktive Phase) (Sajons & Komorek, 2020). Es entsteht für die Teams ein multiperspektivisches Bild des komplexen Problemkontexts. Ob das entstandene vernetzte Angebot auch auf Seiten der Schüler:innen dazu führt, den Problemkontext besser zu erfassen und zu verstehen, und sich motiviert mit dem Problemkontext zu befassen, ist dann die Hypothese, die es bei ReBiS zu untersuchen gilt. Die Hypothese lautet verkürzt formuliert, dass auch trotz der nun komplexen Angebotsstruktur eine

vielschichtiges, facettenreiches Verständnis auf Seiten der Schüler:innen hervorgeht.

Eine erste Erprobung innerhalb einer Projektwoche im Jahr 2019 (Tischer, 2020) konnte zeigen, dass es den Schüler:innen schon im kurzen intensiven Zeitraum der Projektwoche gelang, die verschiedenen Perspektiven der außerschulischen Lernorte aufeinander zu beziehen und als zusammenhängend wahrzunehmen. Bei ReBiS sollte über die Kurzfristigkeit hinausgegangen werden, um den Schüler:innen mehr Zeit für die herausfordernden kognitiven Prozesse zu gewähren und um die Schulfächer stärker mit einzubeziehen (Abschnitt 3.).

1.2. Außerschulische Lernangebote in den Fachunterricht einbetten

Grundsätzlich besteht in Hinblick auf außerschulische Lernangebote das Problem, wie diese in den Unterricht eingebettet werden können, um sie für die Ziele des Unterrichts zu instrumentalisieren. Zwar muss nicht jede Exkursion im Dienst des Schulunterrichts stehen, da mit ihr auch generell pädagogische Absichten verfolgt werden können wie die soziale Festigung der Lerngruppe oder die affektive Anreicherung des Schullebens. Aber wenn das kognitive Potenzial genutzt werden soll, dann besteht die Aufgabe, das singuläre Ereignis der Exkursion mit dem Schulunterricht inhaltlich zu verknüpfen, es in die Lernlogik des Fachunterrichts einzubetten, was sich positiv auf den langfristigen Wissenserwerb (Klees & Tillmann, 2015) und Kompetenzaufbau sowie auf Interesse und Motivation (Guderian, 2006; Glowinski, 2007; Streller, 2015) auswirken.

Bei ReBiS werden die Exkursionen systematisch in den Unterricht verschiedener Fächer eingebettet. Wird beispielsweise im Problemkontext der ‚Küstenveränderung‘ aus dem Geschichtsunterricht heraus das Küstenmuseum Wilhelmshaven besucht, damit die Schüler:innen die historische Entwicklung der Küstenregion kennenlernen, so wird nachfolgend aus dem Physikunterricht heraus das Schülerlabor Lernort Technik und Natur besucht, um zu erkunden, wie die Gewinnung von Windenergie funktioniert und wie sich die Küste durch den Ausbau von Windparks verändert. Beide Besuche tragen trotz ihrer Unterschiedlichkeit aus verschiedenen Perspektiven zum Problemkontext bei. Und zudem gelingt die Verbindung zweier Fächer, die ansonsten eine relative Ferne zueinander aufweisen.

Als wirksames methodisches Mittel hat es sich bei ReBiS erwiesen, ‚cliff hanger‘ einzusetzen, um die Stärken der außerschulischen, aber auch der schulischen Angebote herauszustellen: Im vorbereitenden Unterricht wird darauf hingearbeitet, dass man bestimmte Fragestellungen innerhalb des Unterrichts nicht weiter bearbeiten kann, z. B. weil authentisches Anschauungsmaterial fehlt. Es wird auf den Bedarf fokussiert, die Schule zu verlassen, einen außerschulischen Lernort aufzusuchen, an dem z. B. authentische Materialien (wie im Museum) und wo auch die

fehlende Expertise durch Spezialisten (z. B. Museumspädagog:innen) vorhanden sind. Gegen Ende des Lernortbesuchs wird wiederum ein cliff hanger eingesetzt, denn jetzt wird darauf verwiesen, dass man in den Unterricht zurückmüsse, bestimmte Fragen systematischer, z. B. in längerfristigen Experimenten zu untersuchen oder auch bestimmte Produkte zu erstellen, wofür der kurze Lernortbesuch nicht ausreicht.

Zusammenfassend sind die ReBiS-Bildungsangebote durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- Pro teilnehmender Schulklasse bearbeiten die Schüler:innen einen Problemkontext über mindestens ein Schuljahr in verschiedenen Schulfächern.
- Pro mitwirkendem Schulfach pro Schulklasse wird im Zeitraum von ca. einem Monat ein außerschulisches Lernangebot wie beschrieben eingebettet.
- Die außerschulischen Lernangebote weisen eine inhaltliche Vernetzung bezogen auf den Problemkontext der Schulklasse auf. Dazu arbeiten die Pädagogen an den Lernorten Anknüpfungspunkte heraus, die sie beim Besuch der Schulklasse aufgreifen.
- Die beteiligten Schulfächer stellen eine Verbindung untereinander her, indem sie den gemeinsamen Problemkontext aufgreifen.
- Oft arbeiten die Schüler:innen auch an einem längerfristigen Produkt, das die Vernetzung der verschiedenen Bildungsanteile widerspiegelt. Dies kann eine Internetseite sein, die im Projekt wächst und den Prozess der Schulklasse repräsentiert, oder eine Vitrine, in der die Stationen durch Objekte und Schülerarbeiten repräsentiert sind.

2. Klimawandels multiperspektivisch betrachten – der Ansatz des Neuen Gymnasiums Wilhelmshaven

Die dargestellte Konzeption des Projekts ReBiS wird am Neuen Gymnasium in Wilhelmshaven (NGW) auf den Problemkontext ‚Herausforderung Leben im Klimawandel‘ angewendet. Dieser Kontext wurde vom Team der Lehrkräfte mit Unterstützung der Pädagog:innen der außerschulischen Lernorte ausgewählt. Ziel ist es, mit den Schüler:innen nicht nur Begrifflichkeiten wie Wetter, Klima und Klimawandel zu klären, sondern auch die Frage zu untersuchen, wie der Mensch mit den Folgen des Klimawandels umgehen kann und wie gehandelt werden kann, um sich als Individuum und Gesellschaft einem weitergehenden Klimawandel entgegenzustellen.

2.1. Konzeption am NGW

Die Umsetzung des ReBiS-Konzepts am NGW ist zunächst für Schüler:innen des siebten Jahrgangs über einen Zeitraum von zwei Schuljahren (dann achter Jahrgang) geplant. Für vier Schulhalbjahre (HJ) war vorgesehen, je eine außerschulische Lernangebote in eines der mitwirkenden Schulfächer einzubetten (Abb. 1).

Abbildung 1 zeigt die Abfolge der außerschulischen Lernangebote und die Fächer, in die sie eingebettet wurden. Im Problemkontext ‚Herausforderung Leben im Klimawandel‘ wurde zunächst ein Angebot zur Planung eines Windparks vom Schülerlabor ‚Lernort Technik und Natur‘ in Wilhelmshaven in den Physikunterricht eingebettet. Es folgten die Besuche des Klimahauses in Bremerhaven aus dem Erdkundeunterricht heraus und wiederum eingebettet in den Physikunterricht der Besuch des universitären Schülerlabors physiXS mit einem Experimentierangebot zum Thema der nachhaltigen Elektrizität. Der Besuch des Küstenmuseums Wilhelmshaven mit dem Fokus auf den Küstenschutz unter den Bedingungen des



Abb. 1: Lernortbesuche der Projektklassen je Schulhalbjahr am Neuen Gymnasium Wilhelmshaven.

Klimawandels – erneut eingebettet in den Erdkundeunterricht – schließt das vernetzte Angebot ab.

Eine Einbettung der Besuche erfolgt am NGW in den Fächern Physik und Erdkunde. Sie wurden ausgewählt, da die Inhalte der Curricula sehr gut zum ausgewählten Problemkontext passen: In Erdkunde ist beispielsweise das Themenfeld der Klimazonen Teil des Curriculums, während im Fach Physik Energien und Strom festgeschrieben sind, welche sich hinsichtlich der Aufgabe der Energiewende hervorragend im Sinne des Problemkontextes eingliedern lassen.

Als Produkt, dass die Schüler:innen während des Schuljahres kontinuierlich erstellen und kontinuierlich weiterentwickeln, um ihren Prozess zu vergegenwärtigen, haben Sie ein alte Glasvitrine zum Leben erweckt (2.2.).

Nachfolgend werden die einzelnen außerschulischen Lernangebote und ihre Einbettung in den jeweiligen Fachunterricht dargestellt. Zwei Schulklassen nehmen teil.

2.1.1. ‚Wir planen einen Windpark‘ – Angebot des Schülerlabors ‚Lernort Technik und Natur‘

Als erster außerschulischer Besuch im ersten Halbjahr des siebten Jahrgangs hat ein Angebot des Schülerlabors ‚Lernorts Technik und Natur‘ in Wilhelmshaven stattgefunden. Hier wurde das Angebot ‚Wir planen einen Windpark‘ (Hamade, 2020; Lernort Technik und Natur, 2024) besucht. An verschiedenen Stationen lernen die Schüler:innen dabei Aspekte der Konstruktion von Windkraftanlagen und Strukturen von Windparks kennen. Bezüglich der Konstruktion von Windkraftanlagen experimentieren die Schüler:innen zu Form, Anstellwinkel und Anzahl von Rotorblättern. Als Standortfaktoren für Windparks werden die Anordnung und der Abstand von Windkraftanlagen zueinander sowie der Vogelschutz thematisiert. Insgesamt ist das Angebot so strukturiert, dass die Schüler:innen anhand ihrer Experimente Argumente für eine Diskussion im Stadtrat sammeln sollen: Bürgermeister:in, Naturschützer:innen, Industrie und weitere Gruppen überlegen dort gemeinsam, wie eine nachhaltige (und zuverlässige) Energieversorgung der Stadt gestaltet werden kann.

Im Problemkontext ‚Herausforderung Leben im Klimawandel‘ trägt der Besuch zu einer bestimmten technischen Perspektive auf die Energiewende bei. Es wird herausgestellt, welche Bedingungen und Herausforderungen bestehen, um Städte mit nachhaltiger Energie zu versorgen. Zudem wird ein Dilemma zwischen Klima- und Umweltschutz verdeutlicht, nämlich dass der Bau eines Windparks mit bestimmten baulichen Maßnahmen verbunden ist, die im Kontrast zu den Zielen des regionalen Umweltschutzes und des Naturschutzes stehen.

Die Einbettung des Angebots am NGW erfolgte im Physikunterricht; die Vorbereitung bezog sich sowohl auf Aspekte des Naturschutzes als auch auf Energieumwandlungsprozesse, die entsprechend für verschiedene Kraftwerkstypen betrachtet wurden. Es

wurde die Frage nach einer nachhaltigen Energieversorgung aufgeworfen, die jedoch im Unterricht nicht weiter verfolgt werden konnte, weshalb der Besuch des Lernorts Technik und Natur notwendig war (Cliffhanger). Nachbereitend analysierten die Schüler:innen den Besuch sowohl im Rahmen des Problemkontexts, wie man sich also den Herausforderung des Klimawandels mithilfe von Windenergie annehmen kann, als auch unter physikalisch-technischen Aspekten von Windkraftanlagen.

2.1.2. ‚Klimareise‘ im Klimahaus Bremerhaven

Ein Besuch des Klimahauses ist generell im Schulcurriculum des NGW für den siebten Jahrgang im Fach Erdkunde vorgesehen. Eine Nutzung des Angebots auch im Rahmen des Problemkontextes Klimawandel war daher naheliegend.

Das Klimahaus ist eine Erlebnisort, an dem Besucher:innen für die Klimazonen der Erde sensibilisiert werden. Entsprechend klimatisierte und ausgestattete Räume, Gänge und Hallen sowie Menschen der Klimazonen, die auf Bildschirmen von ihrem Alltag im Klimawandel sprechen, sollen einen authentischen Eindruck von den Auswirkungen des globalen Klimawandels geben. Im Lernangebot ‚Die Reise‘ erreichen die Schüler:innen acht Stationen, die entlang des 8. Längengrads Ost liegen. Dabei lernen sie nicht nur die Länder selbst, sondern ebenso deren Kulturen kennen. Im besonderen Fokus sind die Klimazonen, durch die die Schüler:innen in den Stationen geleitet werden (Klimahaus Bremerhaven, 2024).

Im Unterrichtsfach Erdkunde ist die Betrachtung der Klimazonen im Curriculum vorgesehen. Im Klimahaus und im einbettenden Erdkundeunterricht lernen die Schüler:innen daher klimatologische Grundlagen kennen und den Kampf und die Herausforderungen, denen Menschen in ihren Klimazonen und Habitaten gegenüberstehen.

Die Klimazonen stellen auch den Anknüpfungspunkt im Projekt ReBiS dar. Denn zum einen wird Wissen über die Klimazonen und Wirkmechanismen im Klima aufgebaut. Zum anderen sind die Klimazonen im Sinne des Problemkontexts auch spannend, da der Klimawandel in unterschiedlichen Regionen der Welt unterschiedlich wirkt und Menschen unterschiedliche Strategien entwickelt haben, damit umzugehen.

Ein Zusammenhang mit dem zuvor besuchten Schülerlabor ‚Lernort Technik und Natur‘ (2.1.1.) ergibt sich dadurch, dass die Schüler:innen das Klima und die Auswirkungen des Klimawandels am Klimahaus emotional auffassen können, sie können einen Bezug herstellen, wie z. B. Windparks eine Möglichkeit besteht, zur Eindämmung des Klimawandels beizutragen.

2.1.3. ‚Nachhaltige Elektrizität‘ im Schülerlabor physiXS

Das Schülerlabor ‚physiXS‘ ist als Lehr-Lern-Labor in der Physikdidaktik der Universität Oldenburg angesiedelt. Durch die Einbettung des Schülerlabors in

die Lehrkräftebildung besteht die Möglichkeit, außerschulische Angebote neu zu planen und zu erproben. Das Angebot ‚nachhaltige Elektrizität‘ wurde im Rahmen eines Moduls von Studierenden eigens für das ReBiS-Projekt entwickelt und mit den beiden teilnehmenden siebten Klassen des NGW eingesetzt.

Anknüpfend an den Besuch des Schülerlabors ‚Lernort Technik und Natur‘ mit dem Angebot zu Windparks werden bei physiXS vertiefend Phänomene und physikalische Zusammenhänge der nachhaltige Stromproduktion, der Speicherung elektrischer Energie und Fragen der effizienten Stromnutzung thematisiert und mittels Experimenten erschlossen. Die Schüler:innen untersuchen an Stationen die Gewinnung elektrischen Stroms durch Windkraftanlagen und Photovoltaik, die Speicherung von elektrischer Energie in Pumpspeicherkraftwerken und die Produktion von Wasserstoff mithilfe elektrischen Stroms. Auch das Thema der Stromnetze und die Herausforderungen durch eine Dezentralisierung des Stromnetzes werden von den Schüler:innen erarbeitet. Die Studierenden entwickelten dafür insgesamt neun Experimentierstationen, von denen jede:r Schüler:in drei bis vier auswählen konnte.

Herausfordernd für die Einbettung in den Physikunterricht war, dass nicht alle Schüler:innen alle Stationen erkunden konnten. Insgesamt jedoch liegt es hier in den Händen der Lehrkräfte, die einzelnen Experimente in der Nachbereitung für alle Schüler:innen nachvollziehbar zu machen, indem sich die Schüler:innen gegenseitig von ihren Erkenntnissen berichten.

Die Einbettung in den Fachunterricht wurde dadurch unterstützt, da die Elektrizitätslehre als Teil des Curriculums im Physikunterricht sowieso behandelt werden musste. Experimente, die im Schülerlabor kennengelernt wurden, konnten in der Schule noch vertieft werden. Die Anknüpfung an den Problemkontext Klimawandel war möglich, weil die nachhaltige Versorgung mit Elektrizität eine der großen Chancen, aber auch Herausforderungen hinsichtlich des Lebens im Klimawandel darstellen.

2.1.4. ‚Leben an der Küste‘ am Küstenmuseum Wilhelmshaven

Im vierten Halbjahr fand der Besuch des Küstenmuseums statt. Die Herausforderungen des Klimawandels werden hier auf das Leben an der Küste fokussiert (Küstenmuseum Wilhelmshaven, 2024).

Die Auswirkungen des Klimawandels zeigen sich unter anderem im Anstieg des Meeresspiegels und der Zunahme von Extremwetterereignissen, welche einem stärkeren Schutz der Küste erfordern. Die Entwicklung der Küste durch klimatische Veränderungen sowie durch die Einwirkung des Menschen wird im Angebot des Küstenmuseums aufgegriffen. Damit kommt eine historische Perspektive auf den Problemkontext hinzu; zudem werden regionale Herausforderungen, die der Klimawandel mit sich bringt, angesprochen. Im Küstenmuseum beschäftigen sich die

Schüler:innen unter anderem mit dem Küstenschutz im Klimawandel, z.B. mit der Struktur und Konstruktion von Deichen. Neben historischen Zugängen durch Exponate im Museum werden hier auch Experimente zu Aufbau und Stabilität der Deiche durchgeführt.

Eine Einbettung des Besuchs ist wiederum im Unterrichtsfach Erdkunde geplant. Thematischer Anknüpfungspunkt im Unterrichtsfach sind hier die Weltmeere als Ökosysteme, deren Bedrohung, sowie ihre Nutzungsformen durch den Menschen. Das Küstenmuseum knüpft in seinem Angebot an, indem Aspekte des Klimawandels mit einem lokalhistorischen Ansatz auf das Wattenmeer in der Nordsee bezogen wird. Die wirtschaftliche Nutzung der Nordsee spielt in Wilhelmshaven und deshalb auch im Angebot ebenso wie der Küstenschutz eine zentrale Rolle. In der Einbettung wird ebenso daran angeknüpft, dass das Meer hinsichtlich erneuerbarer Energien (z.B. Offshore-Windparks) wichtiger Ort nachhaltiger Wirtschaft ist.

Im Zusammenspiel mit den vorherigen Besuchen und Perspektiven aus den Unterrichten ergibt sich durch den Besuch des Küstenmuseums eine neue Perspektive, die sich insbesondere durch den starken historischen und lokal auf die Stadt Wilhelmshaven bezogenen Ansatz auszeichnet. Damit schließt das Angebot auch an den ersten Schülerlaborbesuch an, welches stark auf die Stadt Wilhelmshaven kontextualisiert war.

2.2. Gestaltung einer Vitrine als übergeordnete Vernetzungsaufgabe

Herausfordernd für die Schüler:innen und auch für die Lehrkräfte ist das Wachhalten des Problemkontextes über den langen Zeitraum von mindestens einem Schuljahr. Bei ReBiS besteht die Idee, dass die Schüler:innen parallel zu den Unterrichtsaktionen, die ja mit ihren außerschulischen Einbettungen den Problemkontext immer wieder aufgreifen, zusätzlich an einer übergreifenden Aufgabe bzw. einem Produkt arbeiten. Diese Aufgabe soll die mentale



Abb. 2: Vitrine der Vernetzung. Am NGW wurde eine zuvor ungenutzte Vitrine zum Schaufenster des Projekts. Foto: Ina de Buhr.

Verknüpfung auf Seiten der Schüler:innen unterstützen (Tischer & Komorek, 2023). Denkbar sind hier analoge oder digitale Wandzeitungen, die die Projektarbeit für die Schüler:innen der beteiligten Klassen wachhalten. Auch können andere Klassen der Schule über das Projekt informiert werden.

Für das Neue Gymnasium ist die Idee entstanden, eine Vitrine vor dem Physikraum (Abb. 2) zu nutzen, um die Materialien, die die Schüler:innen z. B. an den außerschulischen Lernorten erstellt haben, zu präsentieren. Hierbei gab es für die Gestaltung der Vitrine keine Beschränkungen. Die Vitrine wurde zum Schaufenster für die bei ReBiS beteiligten Klassen und auch andere Schüler:innen der Schule. Die Vitrine sorgte für einiges Interesse am Projekt ReBiS. Projektintern hatte die Vitrine die Funktion, die Vor- und Nachbereitung des nächsten außerschulischen Einsatzes zu unterstützen. Die Dokumentation der Besuche in der Nachbereitung hatte dann auch die Funktion, einen Beitrag für die Vitrine zu gestalten.

2.3. Die Rolle von ReBiS hinsichtlich einer Bildung für nachhaltige Entwicklung

Das Projekt ist mit dem Ziel der Vernetzung schulischer und außerschulischer Bildungsangebote gestartet (Tischer, Sajons & Komorek, 2023). Darüber hinaus zeigte sich jedoch, dass die komplexen Problemkontexte auch Aspekte einer Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) tangieren, indem insbesondere Dilemma, Konflikte oder sogenannte Nachhaltigkeitsthemen wie Energie, Klima, Umweltschutz zentrale Rollen spielen. Auch die beteiligten Lehrkräfte haben in ReBiS eine Möglichkeit gesehen, der Forderung des niedersächsischen ‚BNE-Erlasses‘ (Niedersächsisches Kultusministerium, 2021), nachzukommen, in der Schule eine Bildung für nachhaltige Entwicklung zu installieren.

In der Tat gibt es große Schnittmengen zwischen dem Umgang mit komplexen Problemkontexten, wie es ReBiS anzielt, und einer Bildung für Nachhaltigkeit. In beiden Fällen werden die Schüler:innen mit Komplexität konfrontiert und mit Ideen, wie man in den komplexen Problemkontexten agiert bzw. sich positioniert, was sie im Umgang mit komplexen Situationen und Kontexten unterstützt (vgl. Ohl, 2018). In beiden Fällen wird den Schüler:innen auch ein multidisziplinärer Zugang geboten, der über die fachlichen Perspektiven der Schulunterrichte hinausgeht. Dabei werden Dilemmata ausgeschärft und Ansätze herausgearbeitet, die Herausforderungen der Gesellschaft anzunehmen.

3. Begleitforschung und Forschungsfragen

Dass das komplexe Bildungsangebot bei ReBiS bei den Schüler:innen ein tieferes und vielseitiges Verständnis der Problemkontexte hervorruft, ist zunächst eine Hypothese, die es zu untersuchen gilt. Auch ist zu klären, inwieweit die beteiligten Lehrkräfte und Pädagog:innen an den außerschulischen Lernorten den Mehrwert des Projektansatzes und die generelle

Umsetzbarkeit einschätzen bzw. welche Gelingensbedingungen und Herausforderungen sie erkennen. Eine empirische Begleitstudie hat sich somit mit den Schüler:innen, den Lehrkräfte und den außerschulische Pädagog:innen zu befassen.

Auf Seiten der Schüler:innen interessieren Handlungen und Kognitionen hinsichtlich der Übernahme von Perspektiven und der Frage, inwiefern der komplexe Problemkontext erfasst wird und dabei zu einem tieferen Verständnis führt.

Auf Seiten der Lehrkräfte stehen deren Erwartungen hinsichtlich der Prozesse auf Seiten der Schüler:innen und deren subjektive Überzeugungen zur Bedeutung außerschulischen Lernens und der Bedeutung komplexer Kontexte im Fokus. Entsprechend interessieren auch die Überzeugungen der außerschulischen Pädagog:innen hinsichtlich der Einschätzung des Beitrags ihrer eigenen Angebote zum Problemkontext und zur Einbettung ihrer Angebote in den Fachunterricht.

In der Auswertung sollen alle Daten aufeinander bezogen und die Einschätzungen sollen miteinander verglichen werden (Triangulation). Ziel ist es, Gelingensbedingungen für die Vernetzung der Angebotsanteile herauszuarbeiten, um die Angebote im ReBiS-Projekt zu optimieren. Zudem soll generalisiertes Wissen erarbeitet werden, das über ReBiS hinausgeht, um Leitlinien auch für andere Standorte zu formulieren.

3.1. Forschungsdesign

Als Erhebungsinstrumente werden Fragebögen und leitfadengestützte Interviews eingesetzt. Zudem werden vielfältige Feldnotizen an den außerschulischen Lernorten und teilweise auch im einbettenden Unterricht aufgenommen.

Die Schüler:innen werden mit einem Fragebogen gegen Ende des Schuljahres zu ihrer Wahrnehmung der Einbettung der außerschulischen Lernangebote und der Vernetzungen der Lernangebote und der Schulfächer befragt. Zudem werden einige der Schüler:innen vor und nach dem Besuch der außerschulischer Lernorte mittels qualitativer leitfadengestützter Interviews befragt.

Die ReBiS-Lehrkräfte werden zu Projektbeginn mit einem Fragebogen und einem anschließenden Leitfadeninterview befragt. Ziel ist es zu erfahren, wie sie den Projektansatz und den möglichen Nutzen für die Schüler:innen einschätzen. Nach ungefähr einem Jahr werden sie ein zweites Mal befragt, um herauszufinden, ob sich ihre Einschätzung verändert, ausdifferenziert oder ins Gegenteil verwandelt hat, nachdem sie Erfahrungen mit dem Projekt gesammelt haben. Auch ist von Interessen, inwiefern sich das Projekt in schulinternen Strukturen niedergeschlagen hat und welche Probleme es bei der unterrichtlichen Umsetzung gegeben hat. Dabei werden die Lehrkräfte auch mit ihren Aussagen aus der ersten Befragung konfrontiert, zu denen sie mit zeitlichem Abstand Stellung

beziehen sollen. Ähnlich ist das Vorgehen bei den außerschulischen Pädagog:innen.

Zudem werden außerschulische Angebote und deren Einbettung in die Fachunterrichte fortwährend beobachtet und mittels theoriegeleiteten Feldnotizen dokumentiert.

Die Interviewdaten werden mittels qualitativer Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2018) ausgewertet, indem deduktive und induktive Kategorien auf Basis des Interviewmaterials und der Antworten in den Fragebögen gebildet werden. Wichtiger Auswerteschritt ist die Triangulation der Ergebnisse hinsichtlich der drei Akteursgruppen.

3.2. Erste Erkenntnisse

Zwar ist die Datenaufnahme weitgehend abgeschlossen, aber die Auswertungen laufen noch, sodass hier nur vorläufige Aussagen möglich sind.

Wie bereits in der Pilotstudie (Tischer, 2020) so zeichnet sich auch in der vorliegenden Studie ab, dass es den Schüler:innen im ReBiS-Ansatz gelingt, Verknüpfungen zwischen den Inhalten des einbettenden Unterrichts und den außerschulischen Lernangeboten herzustellen. So berichtet eine Schülerin:

„Also die Themen, die wir halt in Erdkunde haben, hingen zwar sehr viel mit dem Klimahaus zusammen. Weil, wir hatten auch die Subtropen, wir haben davor alles gelernt. Denn wenn wir ins Klimahaus gehen und wenn wir dann gar nichts davon wissen, wäre das auch nicht so gut.“ [Schüler:in einer ReBiS-Schulklasse].

Zwar wird hier in erster Linie auf der organisatorischen Ebene argumentiert, dennoch wird ein inhaltlicher Bezug hergestellt. In vielen Fällen zeigt sich, dass die Schüler:innen die angebotenen Dilemmata nachvollziehen können, was folgende Aussage illustriert:

„... wir haben auch herausgefunden, wie viele Windräder es überhaupt in Deutschland gibt. Und es gibt halt auch Leute, die Windräder nicht haben wollen, aber viele Leute schon. Und was die Probleme von den Windrädern sind, aber auch die positiven Sachen.“ [Schüler:in einer ReBiS-Schulklasse].

In der Auswertung bleibt weiterhin die Aufgabe zu klären, inwieweit die vernetzten Angebote tatsächlich eine kognitive, begriffliche Verknüpfung auf Schülerseite unterstützt, die über die das Erinnern auf der Handlungsebene hinausgeht.

Organisatorische Aspekte erschweren die Umsetzung des ReBiS-Ansatzes: Es hat sich als herausfordernd erwiesen, dass Besonderheiten in den Schulen, z. B. das Aufteilen von Klassen aufgrund bilingualen Unterrichts zu Schwierigkeiten bei Umsetzung der Vernetzungsidee führen. Ebenso stellt sich die Terminierung der Angebote als herausfordernd dar: Durch eine hohe Auslastung der außerschulischen Lernorte sind Terminwünsche der ReBiS-Schulen nicht immer zu den Zeiten zu realisieren, zu denen sie von der unterrichtlichen Einbettung her notwendig wären.

Zudem ergeben sich weitere Schwierigkeiten durch schulische Realitäten wie Unterrichtsausfall durch Krankheiten der Lehrkräfte, durch Ferien oder Klausuren. Der idealtypische Dreischritt aus vorbereitendem Unterricht, Lernortbesuch und nachbereitendem Unterricht kann in den ReBiS-Klassen nicht immer gewährleistet werden. Dadurch ergaben sich nach Aussage beteiligter Lehrkräfte zusätzliche Hürden für den Lernprozess der Schüler:innen. Es wird bei der Formulierung von Leitlinien für andere Standorte, die den ReBiS-Ansatz übernehmen wollen, die Herausforderung, solche Vorschläge zu machen, die robust sind gegenüber den üblichen schulischen Störungen.

Ein großer Nutzen des eingebetteten außerschulischen Lernens wird von allen Beteiligten gesehen und geäußert. Lehrkräfte stellen ebenso wie die außerschulischen Pädagog:innen den potenziell besonderen Kompetenzerwerb in den Vordergrund, der durch die andersartige außerschulische Lernumgebung gegeben ist. Als herausfordernd stellt sich die deutlich größere Häufigkeit von Lernortbesuchen wegen des logistischen und finanziellen Aufwands dar. Es zeigt zudem, dass in der Schulrealität die oft gewünschte Fächerverbindung nach wie vor keine Selbstverständlichkeit ist. Schulfächer aufeinander abzustimmen, die bislang wenig Verknüpfungen hatten und deren Lehrkräfte die Verbindung bisher nicht durchdacht hatten, erzeugt einen neuen Aufwand, aber gleichzeitig eine wichtige Chance für Schule.

4. Fazit

Als ein Beispiel komplementärer Vernetzung schulischer und außerschulischer Bildung wurde in diesem Beitrag die Umsetzung skizziert, wie sie am Neuen Gymnasium in Wilhelmshaven stattfindet. Es zeigt sich, dass die Umsetzung herausfordernd ist, da Lehrkräfte auf eine Weise kooperieren müssen, wie sie es nicht gewohnt sind. Zudem ergeben sich im komplexen System Schule vielfältige Hürden. Das ReBiS-Projekt weist aber viele Erfolgsmomente auf und führt mit seiner komplementären Vernetzung zu einem Bildungsangebot, dass Schüler:innen die Möglichkeit bietet, sind mit den komplexen Herausforderungen unserer Zeit nicht unterkomplex zu nähern, wie es oft im isolierten Fachunterricht der Fall ist.

5. Literatur

- Glowinski, I. (2007). Schülerlabore im Themenbereich Molekularbiologie als Interesse Fördernde Lernumgebungen.
- Guderian, P. (2007). Wirksamkeitsanalyse außerschulischer Lernorte Der Einfluss mehrmaliger Besuche eines Schülerlabors auf die Entwicklung des Interesses an Physik. Dissertation. Berlin: Humboldt-Universität.
- Hamade, D. (2020). Bildung für nachhaltige Entwicklung am Lernort Technik und Natur – Entwicklung eines Schülerlaborangebots zu Windkraftanlagen. Universität Oldenburg: Bachelorarbeit.

- Klees, G. & Tillmann, A. (2015). Design-Based Research als Forschungsansatz in der Fachdidaktik Biologie. In *Journal für Didaktik der Biowissenschaften* 6, S. 991-110.
- Klimahaus Bremerhaven (2024). Ausstellung: Die Reise. <https://www.klimahaus-bremerhaven.de/die-reise/> [Zuletzt abgerufen am 16.04.2024]
- Kuckartz, U. (2018). *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. Weinheim: Beltz Juventa.
- Küstenmuseum Wilhelmshaven (2024). Mit Ihrer Klasse im Küstenmuseum. <https://www.kuestenmuseum.de/veranstaltungen/angebote-fuerschulen-und-kindergaerten> [Zuletzt abgerufen am 16.04.2024]
- Lernort Technik und Natur (2024). Themengebiete. <https://lernort-whv.de/themengebiete> [Zuletzt abgerufen am 16.04.2024]
- Lewalter, D. & Geyer, C. (2009). Motivationale Aspekte von schulischen Besuchen in naturwissenschaftlich-technischen Museen. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft* 12, 28-44.
- Niedersächsisches Kultusministerium (2024). Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) an öffentlichen allgemeinbildenden und berufsbildenden Schulen sowie Schulen in freier Trägerschaft.
- Ohl, U. (2018). Herausforderung und Wege eines systematischen Umgangs mit komplexen Themen in der schulischen Nachhaltigkeitsbildung. In T. Pyhel (Hrsg.): *Zwischen Ohnmacht und Zuversicht? Vom Umgang mit Komplexität in der Nachhaltigkeitskommunikation*, S. 131-146. München: Oekom Verlag.
- Richter, C., Sajons, C., Gorr, C., Michelsen, C. & Komorek, M. (2018). Vernetzung außerschulischer GINT-Lernorte. In C. Maurer (Hrsg.), *Qualitäts-voller Chemie - und Physikunterricht - normative und empirische Dimensionen* GDCP-Jahrestagung Regensburg 2017 (S. 648-651). Universität Regensburg.
- Sajons, C. & Komorek, M. (2020). Complementary networking of out-of-school learning environments. In O. Levrini & G. Tasquier (Eds.), *Electronic Proceedings of the ESERA 2019 Conference. The beauty and pleasure of understanding: engaging with contemporary challenges through science education, Part 9 (coed. J. Dillon & A. Zeyer)* (pp. 1072-1078). Bologna: Alma Mater Studiorum – University of Bologna.
- Scharfenberg, F.-J. (2005). Experimenteller Biologieunterricht zu Aspekten der Gentechnik im Lernort Labor: empirische Untersuchung zu Akzeptanz, Wissenserwerb und Interesse.
- Streller, M. (2015). The educational effects of pre and post-work in out-of-school laboratories.
- Tal, T. (2012). Out-of-School: Learning Experiences, Teaching and Students' Learning. In: B. J. Fraser, K. Tobin & C. J. McRobbie (Eds.) *Second International Handbook of Science Education*. (1109-1122) Heidelberg: Springer.
- Tischer, J. (2020). Schülerkognitionen in einer komplexer vernetzten außerschulischen Lernumgebung – Die Projektwoche „Herausforderung Leben im Klimawandel“. Masterarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Tischer, J., Sajons, C. & Komorek, M. (2023). Komplementäre vernetzte formale und non-formale MINT-Bildung. In H. van Vorst (Hrsg.) *Lernen, Lehren und Forschen in einer digital geprägten Welt. Tagungsband zur Jahrestagung der GDCP 2022*. Aachen: GDCP.

Project Find & Link

- ein Gesellschaftsspiel zum Vertiefen und Vernetzen physikalischer Fachbegriffe -

Ramona Schauer-Bollig, Maria Hinkelmann, Heidrun Heinke

RWTH Aachen University, I. Physikalisches Institut IA, Sommerfeldstraße 16, 52074 Aachen
schauer-bollig@physik.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Die Fachsprache und insbesondere der Fachwortschatz sind von hoher Relevanz im naturwissenschaftlichen Unterricht und damit auch im Physikunterricht. Den natürlichen Drang des Spielens ausnutzend sowie der langen Tradition von Lernspielen folgend, wurde im Sinne der Gamification ein kooperatives und kommunikatives Gesellschaftsspiel entwickelt und evaluiert, um mit dessen Hilfe Fachbegriffe im Physikunterricht der Sekundarstufe I zu vertiefen und zu vernetzen. Dabei wurden Erkenntnisse aus Fachdidaktik, Lernpsychologie und die Bildungsstandards zur Ableitung der Ziele und zur Konzipierung des Spiels herangezogen. Insbesondere der Einsatz von Spielen in kooperativen Lernsettings verspricht eine besonders lohnende Kombination zu sein, um kognitive, motivationale, soziale und emotionale Lernziele zu erreichen. Das Modell der didaktischen Rekonstruktion bildete den theoretischen und methodischen Rahmen sowohl bei der Entwicklung als auch bei der Evaluation des Spiels. Unter Nutzung erprobter Spielmechaniken des existierenden Gesellschaftsspiels „Codenames“ erfolgte die Umsetzung der Gamification in Form des neu entwickelten Spiels. Das entwickelte Gesellschaftsspiel und erste Erfahrungen zu seinem Einsatz werden in diesem Beitrag vorgestellt.

1. Motivation

Sowohl für den Einzelnen als auch für die Menschheit im Ganzen ist Spielen die Grundlage des Menschen, um sich weiterzuentwickeln (vgl. Hütter & Quarch, 2016, S. 10-12). Folglich lässt sich vermuten, dass Spielen und Spiele ebenso lange existieren wie Menschen selbst (vgl. Warwitz & Rudolf, 2021, S. 8). Auch die Geschichte der Lernspiele reicht weit zurück. Von der Antike bis in die heutige Zeit gibt es Bestrebungen, Spiele und Spielzeuge zu pädagogischen Zwecken zu nutzen, um Kinder auf ihr zukünftiges Leben und Handeln vorzubereiten (vgl. Retter, 1979, S. 98 und S. 136). Dieser Einsatz erscheint sinnvoll, da er zwei positive Aspekte des Lebens verbindet, den Spaß beim Spielen und den Wissenserwerb. Lernpsychologisch wird der spielerische Erkundungsprozess als selbstorganisiertes, intrinsisch gesteuertes Lernen bezeichnet (vgl. Hütter & Quarch, 2016, S. 11).

Aktuell erfreut sich das Konzept der Gamification großer Beliebtheit, da es als besonders aussichtsreich erachtet wird (vgl. Fuchs, 2020, S. 47; Fischer & Reichmuth, 2020, S. 7). Beleg dafür sind Studien zur Effektivität von Lernspielen, die aufzeigen, dass der Einsatz von Spielen förderlich sein kann, um kognitive, motivationale, soziale und emotionale Lernziele zu erreichen (vgl. Forkel, 2009, S. 135). Kooperative Lernformen werden ebenfalls als förderlich zum Erreichen kognitiver, emotionaler und sozialer Lernziele angesehen (vgl. Traub, 2004, S. 23). Somit verspricht der Einsatz von Spielen in kooperativen Lernsettings eine aussichtsreiche Kombination zu sein.

Ein zentraler Bestandteil des naturwissenschaftlichen Unterrichts ist die Fachsprache, respektive der Fachwortschatz (vgl. Schroeter-Brauss et al., 2018, S. 16 und S. 25). Sie dient zum einen als Mittel und ist zum anderen der Zweck bzw. das Lernziel selbst (vgl. Schroeter-Brauss et al., 2018, S. 34). Der Lernprozess des Vertiefens und Vernetzens des Wissens ist aus lernpsychologischer und fachdidaktischer Perspektive dabei von großer Bedeutung. Eine effektive und langfristige Speicherung von neuen Inhalten im Gedächtnis kann nur gelingen, wenn sie mit dem Vorwissen verknüpft und die Zusammenhänge von den Lernenden selbst durch schlussfolgerndes Denken hergestellt werden (vgl. Wisniewski, 2019, S. 137 und S. 147). Dabei müssen die Lernenden das angebotene Wissen aktiv in ihre vorhandene Wissensstruktur, durch Kommunikation begleitet und in sozialen Gefügen verortet, integrieren (vgl. Krabbe et al., 2015, S. 11).

Basierend auf der Idee, die positiven motivationalen, kognitiven, emotionalen und sozialen Effekte des Spielens und kooperativer Methoden lernförderlich umzusetzen, ist im Rahmen einer Masterarbeit das Gesellschaftsspiel „Project Find & Link“ entwickelt und evaluiert worden. Ziel des Spiels ist es, die Lernenden zur Kommunikation und Kooperation anzuregen und das Vertiefen und Vernetzen von Fachbegriffen im Physikunterricht zu fördern. Zielgruppe sind Schüler:innen der Sekundarstufe I an Gymnasien und Gesamtschulen.

2. Theoretische Grundlagen

Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion hat den theoretischen und methodischen Rahmen für die Ent-

wicklung und Evaluation des Gesellschaftsspiels gebildet. Nach dem Modell bedingen eine Balance aus fachlicher Klärung und Lernendenperspektive die didaktische Strukturierung, welche wiederum die Lernwege und Vorstellungen der Lernenden und die Auswahl und Vermittlung der fachlichen Inhalte beeinflusst (vgl. Kattmann et al. 1997, S. 3-13).

Als weitere Grundlage dienten verschiedene Bildungsstandards und insbesondere die Kernlehrpläne des Faches Physik der Sekundarstufe I an Gymnasien sowie Gesamtschulen in Nordrhein-Westfalen. Die Lernziele des entwickelten Spiels beziehen sich auf die dort formulierten Kompetenzbereiche „Umgang mit Fachwissen“ und „Kommunikation“ (vgl. Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen [MSB NRW], 2019, S. 14-15 und S. 30-32; Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2013, S. 20-24). Thematisch ist das entwickelte Spiel an den elf Inhaltsfeldern des Faches Physik gemäß dem Kernlehrplan für Gymnasien orientiert (vgl. MSB NRW, 2019, S. 15-22).

2.1. Spiele als Lerngelegenheit

Im engeren Sinne sind Spielzeuge hergestellte Gegenstände, die zum Spielen veranlassen (vgl. Brockhaus, 1993, S. 660). Der Begriff Spielmittel schließt neben Spielzeugen auch andere Objekte mit ein, die Spielimpulse geben (vgl. Retter, 1979, S. 207). Als Lernmittel, auch Arbeitsmittel genannt, werden alle Gegenstände und Materialien bezeichnet, die mit einer eindeutigen didaktischen Absicht konzipiert wurden (vgl. Retter, 2003, S. 140). Lernspiele sind Lern- und Spielmittel zugleich, wodurch sie eine Zwischenstellung einnehmen (vgl. Retter, 2003, S. 141).

Unter Gamification ist der Einsatz spieltypischer Elemente in nicht-spielerischen Kontexten zu verstehen (vgl. Fischer & Reichmuth, 2020, S. 11). Begrifflich ist Gamification von Game-based Learning (auf Spielen basierendes, meist digitales Lernen) und Serious Games (ernsthaften Spielen) abzugrenzen, die beide häufig synonym verwendet werden (vgl. Fischer & Reichmuth, 2020, S. 11). Lernspiele sind dem Bereich Serious Games zuzuordnen. Die Grenze zwischen gamifizierten Elementen (Gamification) und einem kompletten Spiel ist nicht eindeutig und obliegt der individuellen Einschätzung (vgl. Fischer & Reichmuth, 2020, S. 12).

2.2. Kernprozess des Vertiefens durch Üben und Vernetzen

Zur Festigung von erworbenem sowie systematisiertem Wissen und Können dient der Kernprozess des Vertiefens (vgl. Barzel et al., 2011, S. 73). Unverzichtbar sind die Phasen des produktiven und kognitiv aktivierenden Übens, der Transfer auf andere Kontexte und die Vernetzung mit anderen Themen (vgl. Barzel et al., 2011, S. 73-74). Auch wenn die individuelle Aktivierung und Tätigkeit in dieser Phase des Lernens höhere Priorität als Kooperation haben, kann insbesondere die Kommunikation zur

Auseinandersetzung mit den zu festigenden Begriffen und Verfahren anregen und beitragen, z. B. bei der angemessenen Verwendung von Begriffen oder deren Erklärungen (vgl. Barzel et al., 2022, S. 39).

In Phasen des Übens, Vertiefens und Wiederholens werden für das Festigen von Begriffen verschiedene Methoden empfohlen, wie „Passt! - Passt nicht!“ oder „Was bin ich?“, die sich besonders eignen (vgl. Barzel et al., 2022, S. 253). Bei der Methode „Passt! - Passt nicht!“ werden Gegenstände nach bestimmten Eigenschaften von einer Person sortiert und die anderen müssen die Regel herausfinden (vgl. Barzel et al., 2022, S. 148). „Was bin ich?“ ist angelehnt an die gleichnamige Fernsehshow: Eine Person verkörpert dabei ein Objekt und die anderen müssen dieses erraten (vgl. Barzel et al., 2022, S. 238).

3. Das Gesellschaftsspiel „Project Find & Link“

3.1. Entwicklung des Gesellschaftsspiels

Die Entwicklung des Spiels „Project Find & Link“ erfolgte in vier Stufen, die jeweils in mehrere Schritte unterteilt waren.

In der ersten Stufe wurde zunächst ein Gesellschaftsspiel ausgewählt, um als Grundlage erprobte Spielmechaniken nutzen zu können. Dabei wurden folgende Aspekte berücksichtigt:

- Begrenzter Zeitrahmen im Unterricht
- Weitgehende Chancengleichheit trotz heterogener Lerngruppen
- Eignung für große Lerngruppen und geringer Materialaufwand
- Angebotene Lerngelegenheit(en) durch das Spiel
- Möglichkeit der Kooperation und Kommunikation unter den Spieler:innen

Daraus ergaben sich die Forderungen an das Spiel:

- Begrenzte Spielzeit und einfache Regeln
- Zufallselemente
- Möglichkeit des Spielens in Teams (Ergänzung von Potentialen, kooperativ oder semi-kooperativ)
- Möglichkeit einer großen Spieleranzahl
- Wissens- oder Assoziationsspiel
- Übertragbarkeit des Spiels auf Fachinhalte
- Hoher vermuteter Lernzuwachs

In die engere Auswahl kamen die Spiele „Trivial Pursuit“, „Codenames“, „Outburst“, „Tabu“, „So klee-ker“ und „Just One“. Nach dem Vergleich dieser Gesellschaftsspiele hinsichtlich der zuvor genannten Kriterien fiel die Wahl schließlich auf das Spiel „Codenames“ (vgl. Czech Games Edition, n. D.).

In der zweiten Stufe wurde der Prototyp entwickelt. Im ersten Schritt dieser Stufe wurden die Lernziele festgelegt. Diese wurden im Sinne der fachlichen Klärung aus Bildungsstandards abgeleitet (s. Abschnitt 2). Die Ziele des Spiels „Project Find & Link“ sind dabei zweigeteilt: Das Spiel soll einerseits

Schüler:innen zu Kommunikation und Kooperation anregen sowie andererseits durch Üben und Vernetzen das Vertiefen von Fachbegriffen ermöglichen.

Im nächsten Schritt wurden die Spielmechaniken des Spiels „Codenames“ analysiert. Auszumachen sind die Mechaniken Wörter, Assoziation, Deduktion (vgl. Czech Games Edition, n. D.), Kommunikationsgrenzen, Zufall (vgl. BoardGameGeek, 2023) sowie Kooperation, Wettbewerb und Herausforderung (vgl. Fischer & Reichmuth, 2020, S. 24). Daraus ergeben sich die Lernspiel-Typen Wörter-, Diskussions-, Assoziations- und Kooperationspiel, deren Lerneffekte im Bereich Wortschatz, sprachliche Fähigkeiten, Austausch von Wissen und Argumentieren sowie soziale Kompetenz anzusiedeln sind (vgl. Cornelsen, 2023). Darüber hinaus weist das Spiel Parallelen zu den Methoden „Passt! – Passt nicht!“ sowie „Was bin ich?“ (s. Abschnitt 2.2) auf und eignet sich somit potenziell zum Üben, Vertiefen, Wiederholen und Festigen von Begriffen.

Die grundlegenden Mechaniken wurden für das entwickelte Spiel übernommen, die Begriffe des Spiels wurden jedoch durch eine Mischung aus allgemeinen Begriffen und Fachbegriffen aus der Physik der Sekundarstufe I ausgetauscht. Die Auswahl der Fachbegriffe erfolgte gemäß dem Modell der didaktischen Rekonstruktion, wobei sowohl Fachliteratur zu Rate gezogen als auch eine Befragung von Lehrkräften durchgeführt wurde. Das Ergebnis dieser Umfrage hatte in zweierlei Hinsicht Einfluss auf die im Spiel genutzten Begriffe: einerseits auf die generelle Auswahl der im Spiel verwendeten Begriffe und andererseits auf die Festlegung von Begriffen, die zusätzlich in der Anleitung des Spiels erklärt werden. Um die Lernendenperspektive ebenfalls zu berücksichtigen, wurde zusätzlich eine Befragung von Schüler:innen durchgeführt. Deren Ergebnisse hatten keinen Einfluss auf die Auswahl der physikalischen Fachbegriffe, lieferten aber weitere Begriffe, die eine Erklärung in der Spielanleitung erhalten haben.

Anschließend wurden die bestehenden Regeln bezüglich der neuen Spielkarten und der sich daraus ergebenden Änderungen erweitert. Das Spiel- und Begleitmaterial sowie der Spielablauf werden in den Abschnitten 3.2 und 3.3 vorgestellt.

In der dritten Stufe wurde das Spiel in zwei, teils parallel laufenden Testreihen evaluiert. In der ersten Testreihe wurde das entwickelte Spiel mit Schüler:innen der Mittelstufe an Gymnasien und Gesamtschulen getestet. In der zweiten Testreihe bestanden die Proband:innen aus Expert:innen. Die Ziele der Erprobung waren:

- Ausbalancierung des Spiels
- Überprüfung der Anschaulichkeit und Handhabung des Spiel- und Begleitmaterials
- Fokussierung der Lernziele
- Berücksichtigung der Perspektiven von Expertinnen und Lernenden

Eine ausführlichere Beschreibung der Evaluation ist in Abschnitt 4 zu finden.

In der vierten und vorerst letzten Stufe wurden das Spiel und das Begleitmaterial auf Grundlage der Erkenntnisse aus der Evaluation überarbeitet. Das Design wurde marginal angepasst und die endgültigen Spielregeln wurden festgelegt.

3.2. Material, Aufbau und Einsatzmöglichkeiten¹

Das entwickelte Gesellschaftsspiel „Project Find & Link“ besteht aus 467 Karten² und einem Kartenhalter. Im Einzelnen sind das ([Zahlen] beziehen sich auf Abb. 1):

- 8 rote Agentenkarten [1]
- 8 blaue Agentenkarten [2]
- 1 Karte mit Doppelagenten [3]
- 7 Karten mit unbeteiligten Zuschauern [4]
- 1 Karte mit Attentäter [5]
- 22 Codierkarten [6]
- 140 Wortkarten mit Decknamen „allgemeine Begriffe“ [7]
- 280 Wortkarten mit Decknamen „Fachbegriffe Physik“, unterteilt in 13 Themensets (s. Tab. 1) [8]
- 1 Kartenhalter für die Codierkarte [9]

Zudem gibt es eine schriftliche Anleitung³ sowie eine ausführliche Videoanleitung⁴ und eine kurze Version⁵ für diejenigen, die das Spiel „Codenames“ bereits kennen. Der Spielaufbau und das Design der neu entwickelten Wortkarten sind in Abb. 1 dargestellt.

Die Wortkarten für allgemeine und physikalische Begriffe sind ähnlich aufgebaut (s. Abb. 1 links). Auf der Vorderseite der Karten sind die jeweiligen Begriffe zweimal mit unterschiedlichen Farben, Schriftgrößen und Leserichtungen geschrieben. Dadurch soll es allen Spielenden ermöglicht werden, die Begriffe unabhängig von ihrer Position am Spielfeld gut lesen zu können (vgl. Wenzel, 2016). Die Figur soll einerseits das Design auflockern und andererseits über die Position des Bildes die Art der Wortkarte identifizieren. Für Fachbegriffe ist die Figur links vor und für allgemeine Begriffe rechts hinter dem Wort in Leserichtung abgebildet. Fachbegriffe, die in der Anleitung erklärt werden, sind an einer Glühbirne am rechten Rand der Karte zu erkennen. Anhand der

¹ Für das Spielmaterial wurde das generische Maskulinum genutzt.

² Druckvorlage: <https://mundo.schule/details/SODIX-0001111429>

³ Schriftliche Anleitung: <https://free.gr1.at/l/me-dia?f=f10f2bdc9f5133e84b95b2b643bc6c0b&sid=8186997>

⁴ Ausführliche Videoanleitung: <https://youtu.be/Er09LqDUvQ>

⁵ Kurze Videoanleitung: https://youtu.be/7BBZ_1evL_Q

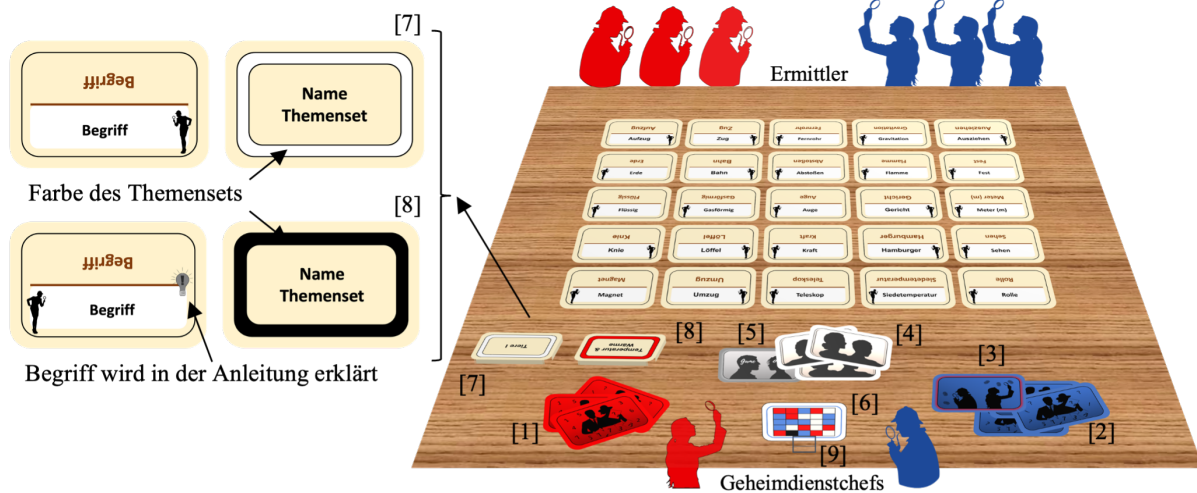


Abb. 1: Design der neu entwickelten Wortkarten (links) und Aufbau des Spiels „Project „Find & Link“ (rechts): Links dargestellt sind die Vorder- und Rückseiten der Wortkarten mit allgemeinen Begriffen (links oben) und mit physikalischen Fachbegriffen (links unten). Auf der Vorderseite der Karten stehen die jeweiligen Begriffe. Fachbegriffe, die in der Anleitung erklärt werden, erkennt man an der Glühbirne auf der rechten Seite der Karte. Auf den Rückseiten der Karten befinden sich die Namen der verschiedenen Themensets und eine farbcodierte Umrandung. Rechts dargestellt ist der Spielaufbau. Die Spielenden verteilen sich gemäß ihrer Aufgabe an verschiedenen Seiten des Tisches, sodass die Ermittler beider Teams den beiden Geheimdienstchefs gegenüber sitzen. In der Tischmitte wird das 5-mal-5-Raster aus den 25 Wortkarten mit allgemeinen und physikalischen Begriffen ausgelegt. Die restlichen Karten werden entsprechend ihrer Funktion bereitgelegt. Die Codierkarte wird so aufgestellt, dass nur die Geheimdienstchefs sie einsehen können.

Rückseite einer Karte kann man das zugehörige Themenset erkennen und so variabel auswählen und einsetzen. Zum einen ist der entsprechende Name aufgeführt und zum anderen ist die Umrandung farblich codiert (s. Tab. 1). Allgemeine Begriffe sind an einem weißen Rand zu erkennen.

Tab. 1: Übersicht und Farbcodierung der Themensets mit Fachbegriffen aus der Physik: „Project Find & Link“ besitzt 13 Themensets mit Fachbegriffen aus der Physik. Davon sind 11 Themensets an die Inhaltsfelder des Kernlehrplans Physik für Gymnasien und Gesamtschulen in NRW angelehnt. Zusätzlich sind zwei weitere Themensets „Wissenschaftler“ und „Experimente“ enthalten. Die Farbcodierung entspricht den Farben auf den Rückseiten der Karten. Darüber können die Themensets zur Physik variabel ausgewählt und eingesetzt werden.

Fachbegriffe aus der Physik	
Farbe	Themenset
Rot	Temperatur und Wärme
Grün	Elektrischer Strom und Magnetismus
Magenta	Schall
Gelb	Licht
Orange	Optische Instrumente
Dunkelblau	Sterne und Weltall
Blau	Bewegung, Kraft und Energie
Hellblau	Druck und Auftrieb
Grün	Elektrizität
Violett	Ionisierende Strahlung und Kernenergie
Lila	Energieversorgung
Schwarz	Experimente
Grün	Wissenschaftler

Vor Spielbeginn wird entschieden, welche Themensets (s. Tab. 1) zum Einsatz kommen. Ziel des Spiels ist es, bereits bekannte Begriffe durch Wiederholen und Vernetzen mit anderen Begriffen zu vertiefen. Deswegen wird empfohlen, nur mit Themensets der Inhaltsfelder zu spielen, die bereits im Unterricht behandelt wurden. Die zwei weiteren Themensets „Experimente“ und „Wissenschaftler“ können unabhängig von der Jahrgangsstufe eingesetzt werden.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten das Spiel einzusetzen. Es eignet sich sowohl zum Üben und Wiederholen am Ende einer Unterrichtseinheit oder eines Schuljahres als auch zum Aktivieren vorhandenen Wissens am Anfang einer Reihe oder eines Schuljahres. Je nach Anlass kann situationsgerecht entschieden werden, welche und wie viele Themensets zum Spielen ausgewählt werden.

Das Spiel ist für vier bis beliebig viele Spielende ausgelegt. Empfohlen werden sechs bis acht Teilnehmende. Die Spielenden werden möglichst gleichmäßig auf zwei Teams verteilt. Jedes Team wählt einen Geheimdienstchef, der später die Hinweise zu den verdeckten Agenten (Wortkarten) gibt. Die restlichen Spielenden sind Ermittler und müssen die Identitäten ihrer Agenten mit Hilfe dieser Tipps aufspionieren machen. Die Geheimdienstchefs beider Teams sollten auf der gleichen Seite des Tisches sitzen und ihnen gegenüber sollten alle Ermittler Platz nehmen (s. Abb. 1).

Die ausgewählten Wortkarten sowie die Agenten-, Personen- und Codierkarten werden sortiert und auf dem Tisch bereitgelegt. Von den Wortkarten werden insgesamt 25 zufällige gezogen und in einem 5-mal-

5-Raster auf dem Tisch ausgelegt. Diese Wortkarten bestehen aus einer Mischung aus Fachwörtern und allgemeinen Begriffen. Die Aufteilung der 25 Karten ist verhandelbar. Empfehlungen für sinnvolle Verteilungen sind in den Anleitungen enthalten. Die restlichen Wortkarten werden in zwei getrennten Stapeln für allgemeine und physikalische Begriffe an der Seite platziert. Die Agentenkarten, die Karten mit unbeteiligten Zuschauern sowie der Attentäter werden bereitgelegt (s. Abb. 1).

Anschließend stellen die Geheimdienstchefs eine Codierkarte im Kartenhalter so vor sich auf, dass nur sie beide den Code sehen können. Der Code auf der Karte legt die Geheimidentitäten der Wortkarten (verdeckte Agenten) auf dem Tisch fest. Blau steht für die Begriffe, die das blaue Team erraten muss, rot sind die Begriffe des roten Teams, beige sind die unbeteiligten Zuschauer (neutrale Begriffe) und schwarz ist der Attentäter (s. Abb. 1).

3.3. Spielablauf

Zu Spielbeginn sollen die Spielenden die 25 ausliegenden Begriffe einmal laut vorlesen und alle unbekannten Begriffe klären. Dazu können z. B. die Erklärungen in der Anleitung genutzt werden. Jede Runde besteht aus zwei Phasen. Abb. 2 gibt einen kurzen Überblick über den Spielablauf.

In der ersten Phase gibt der Geheimdienstchef eines Teams seinen Ermittlern einen Hinweis, der nur aus einem einzigen Wort besteht. Zusätzlich gibt der Chef die Anzahl an, auf wie viele Wortkarten er mit dem jeweiligen Hinweis verweisen möchte, z. B. „Anziehung: 2“ für „Gravitation“ und „Magnet“. Dieser Tipp kann und soll sich möglichst auf mehrere Wortkarten beziehen. Je mehr Begriffe mit einem Hinweis umschrieben werden, desto schneller kann ein Team gewinnen. Die ausführlichen Spielregeln mit weiteren expliziten Regeln für erlaubte und verbotene Hinweise sind in der Spielanleitung³ zu finden.

In Phase zwei müssen die Ermittler die Begriffe finden, die zu ihrem Team gehören. Finden Sie dabei eine Agentenkarte des eigenen Teams, dürfen die Ermittler weiterraten. Solange die Ermittler nur auf Begriffe in ihrer Teamfarbe tippen, dauert Phase zwei und damit die Runde an. Der Geheimdienstchef darf in dieser Runde aber keinen neuen Hinweis geben. Tippen die Ermittler auf eine Agentenkarte des gegnerischen Teams oder einen unbeteiligten Zuschauer, endet die Runde und das andere Team ist am Zug. Wird der Attentäter aufgedeckt, endet das Spiel sofort und das Team, welches falsch geraten hat, verliert das Spiel. Das Team, das als erstes alle seine Begriffe gefunden hat, gewinnt das Spiel.

4. Evaluation des Gesellschaftsspiels „Project Find & Link“

In der dritten Stufe des Entwicklungsprozesses des Gesellschaftsspiels (s. Abschnitt 3.1) wurde der Prototyp des Spiels in zwei Testreihen erprobt und evaluiert. In der ersten Testreihe wurde das Spiel mit

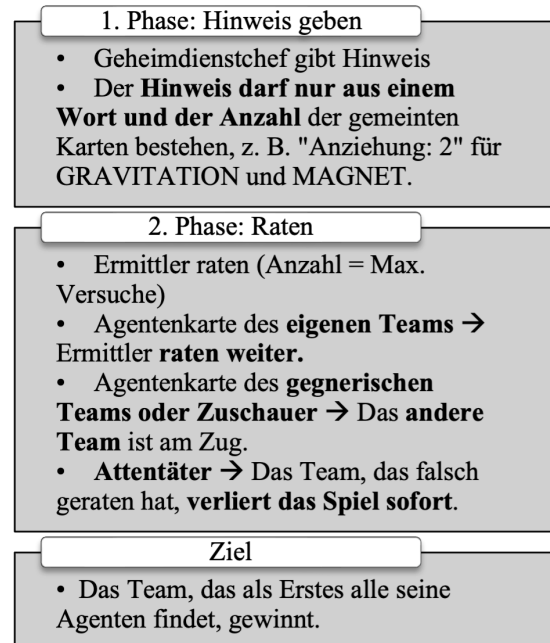


Abb. 2: Spielablauf des Spiels "Project Find & Link": eine Runde besteht aus zwei Phasen. In der ersten Phase gibt der Geheimdienstchef eines Teams seinen Ermittlern einen Hinweis, der aus einem Wort und der Anzahl der Karten besteht, die er damit beschreibt. In der zweiten Phase raten die Ermittler, welche Begriffe mit dem Tipp gemeint sind. Solange das Team richtig rät, geht die Runde weiter. Sobald sie eine Wortkarte des anderen Teams oder einen unbeteiligten Zuschauer aufdecken, endet die Runde und das andere Team ist am Zug. Wird auf den Attentäter getippt, endet das Spiel sofort und das ratende Team hat verloren. Ansonsten endet das Spiel, sobald ein Team als erstes alle seine Begriffe gefunden hat. Dieses Team gewinnt.

Schüler:innen getestet und in der zweiten Testreihe bestanden die Teilnehmenden aus Expert:innen. Damit wird den Forderungen des Modells der Didaktischen Rekonstruktion nach einer Evaluation des entwickelten Materials sowie der Einbeziehung der Perspektiven von Expert:innen und Lernenden entsprochen.

4.1. Forschungsfragen

Das entwickelte Gesellschaftsspiel wurde sowohl hinsichtlich der Umsetzung, der Gestaltung, des Vorwissens, der Spielmechanik, der intendierten Lernziele und der Wahrnehmung getestet (s. Abschnitt 3.1 und 3.2). Dabei wurden grundlegend folgende Fragestellungen verfolgt:

- F1: Inwiefern ermöglicht das entwickelte Gesellschaftsspiel einen reibungsfreien Spielablauf?
- F2: Wie ist die Wahrnehmung des Spiels durch die Spieler:innen? Gibt es einen Unterschied in der Wahrnehmung durch Schüler:innen und Expert:innen?
- F3: Inwiefern leistet das Spiel einen Beitrag zu den intendierten Lernzielen?

Frage eins befasst sich mit der Möglichkeit eines reibungsfreien Spielablaufs. Das entwickelte Material, insbesondere das Einführen neuer Wortkarten mit Fachbegriffen aus der Physik erforderte eine Anpassung der Regeln, die den Spielfluss beeinflussen könnten. Untersucht wurden, welche und wie viele Begriffe den Schüler:innen bekannt waren, ein geeignetes Mischverhältnis von physikalischen und allgemeinen Begriffen, die Vollständigkeit und Verständlichkeit der Regeln in den verschiedenen Anleitungen sowie die Eignung der Gestaltung des Materials.

Der Wahrnehmung des entwickelten Spiels wird in der zweiten Frage nachgegangen. Eine positive Wahrnehmung kann das Erreichen der intendierten Lernziele durch seine motivationalen Effekte unterstützen. Es wurde zum einen untersucht, ob das Spiel als interessant empfunden und gerne gespielt wurde, und zum anderen, welche Aspekte des Spiels die Proband:innen als besonders positiv oder negativ wahrnahmen.

Die Eignung des Spiels zum Erreichen der anvisierten Lernziele ist Gegenstand der dritten Frage. Hier wurde überprüft, inwieweit das Spiel einen Lernzuwachs bewirken kann bzw. wie das lernförderliche Potential des Spiels eingeschätzt wird.

4.2. Rahmenbedingungen der Erprobung

Die Erprobung bestand aus zwei Testreihen. Das Vorgehen war für alle Gruppen ähnlich. In beiden Testreihen wurden die Proband:innen innerhalb der verschiedenen Gruppen zu je vier bis acht Spielenden aufgeteilt, das Spielmaterial (Prototyp des Spiels mit sechs der 13 vorgegebenen Themensets, QR-Code für die schriftliche Anleitung und je ein Fragebogen pro Spielendem) verteilt und die Videoanleitung entweder im Plenum gemeinsam oder einzeln in den Gruppen am Tablet angesehen. Je nach Gruppe standen 45-90 min für die Testung zur Verfügung. Nach der Erprobung bewerteten die Proband:innen das entwickelte Spiel anhand eines Fragebogens. Die in den beiden Testreihen eingesetzten Fragebögen unterschieden sich lediglich in den persönlichen Angaben. Testreihe 1 (T1) wurde im Frühjahr 2023 in der StädteRegion Aachen in sechs Klassen bzw. Arbeitsgemeinschaften (AGs) an drei Gymnasien und zwei Gesamtschulen durchgeführt. Die 132 Teilnehmenden (92 Gymnasium, 40 Gesamtschule) waren Schüler:innen der Mittelstufe und der Unterstufe.

Die Testreihe mit Expert:innen (T2) lief ebenfalls im Frühling 2023 im Kreis Aachen. Als Expert:innen werden Lehrkräfte für Physik, Technik und Naturwissenschaften sowie Personen mit einer Ausbildung, einem Studium oder einem Beruf im naturwissenschaftlichen bzw. technischen Bereich bezeichnet. An dieser Testreihe nahmen insgesamt 20 verschiedene Proband:innen in vier Gruppen teil. Eine Probandin testete das Spiel in zwei dieser Gruppen und in drei Gruppen spielte die Testleitung selbst mit.

4.3. Ergebnisse der Erprobung

Die Auswertung der Ergebnisse der Erprobung bezieht sich hauptsächlich auf die ausgefüllten Fragebögen. Zusätzlich wurden Tonaufnahmen in einigen Gruppen aufgenommen, die aber noch nicht vollständig ausgewertet werden konnten. Erste Erkenntnisse daraus und aus den Beobachtungen der Testleitung ergänzen punktuell die Ergebnisse der Umfragen.

F1: Inwiefern ermöglicht das entwickelte Gesellschaftsspiel einen reibungsfreien Spielablauf?

In die Beantwortung dieser Frage fließen die Ergebnisse derjenigen Fragebogen-Items ein, die sich auf die Umsetzung und Gestaltung des Spiels, die Spieldynamik und das Vorwissen der Spielenden beziehen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Erprobung sowie die Beobachtungen während der Testreihen, dass bei den meisten Gruppen ein reibungsloser Spielablauf möglich war. Dazu beigetragen hat die übersichtliche und verständliche Gestaltung der Spielkarten sowie die Tatsache, dass die meisten Begriffe bekannt waren. Dennoch gab es auch einige Schwierigkeiten und Verbesserungsmöglichkeiten. Die meiste Kritik galt der Unverständlichkeit der Videoanleitung. Die überarbeitete Videoanleitung soll in Zukunft dazu beitragen, den Spielablauf noch reibungsärmer zu gestalten. Außerdem sollten nach den Erfahrungen der ersten Testreihe nur Themensets genutzt werden, deren Inhalte bereits im Unterricht behandelt wurden.

F2: Wie ist die Wahrnehmung des Spiels durch die Spieler:innen? Gibt es einen Unterschied in der Wahrnehmung durch Schüler:innen und Expert:innen?

Zur Beantwortung dieser Frage werden vor allem die Erkenntnisse aus der Fragenkategorie Wahrnehmung herangezogen.

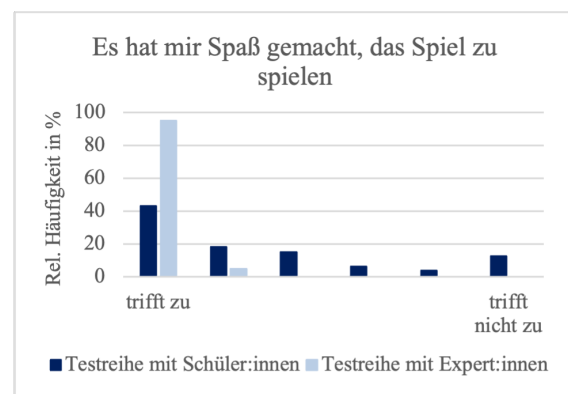


Abb. 3: Ergebnisse der Evaluation zum entwickelten Spiel in relativen Häufigkeiten: Es hat mir Spaß gemacht, das Spiel zu spielen ($n_{ges} = 145$, $n_{T1} = 125$, $n_{T2} = 20$)

Insgesamt wurde das Spiel von der Mehrheit der Proband:innen als positiv wahrgenommen (s. Abb. 3). Dabei fielen die Zustimmungswerte der Expert:innen noch wesentlich besser aus als die der Schüler:innen. Das Spiel als solches gefiel den Proband:innen aller

Testgruppen ebenso wie der Fakt, dass die Fachinhalte spielerisch gelernt werden. Während die Schüler:innen die Kommunikation und Kooperation besonders positiv hervorhoben, betonten die Expert:innen das zugrundeliegende Spielprinzip, die Herausforderung und den kompetitiven Gedanken des semi-kooperativen Spiels sowie die Gestaltung. Verbesserungspotential sahen alle Proband:innen in der Verständlichkeit und Gestaltung der Videoanleitung. In Testreihe 1 wurden darüber hinaus der in einigen Gruppen kurze Zeitraum zum Testen, die lange Spieldauer, die anfänglich schwer zu verstehenden Regeln sowie die teilweise negative Spielatmosphäre kritisiert. Daraufhin wurde die Videoanleitung überarbeitet und als Zeitrahmen zum (ersten) Spielen werden mindestens 90 min empfohlen. Wenn die Lernenden das Spiel „Codenames“ nicht kennen, empfiehlt es sich, die Videoanleitung im Plenum anzusehen und aufkommende Fragen vor Spielbeginn gemeinsam zu klären. Einer langen Spieldauer kann durch das Einführen eines Zeitlimits pro Runde entgegengewirkt werden.

F3: Inwiefern leistet das Spiel einen Beitrag zu den intendierten Lernzielen?

Um diese Frage zu beantworten, wurden die Items der Kategorie Lernziele näher betrachtet. Die übergeordneten Ziele des entwickelten Spiels sind die Anregung zur Kommunikation und Kooperation unter den Spielenden und die Ermöglichung des Vertiefens von Fachbegriffen durch Vernetzen und Üben.

Die Erkenntnisse aus der Erprobung haben gezeigt, dass das Spiel einen förderlichen Beitrag zu diesen intendierten Lernzielen leistet. Insbesondere wird das Potential durch die Probanden als hoch eingeschätzt. Es wird vermutet, dass eine häufigere oder sogar regelmäßige Verwendung des Spiels noch bessere Resultate erzielen würde, was bisher nicht getestet werden konnte.

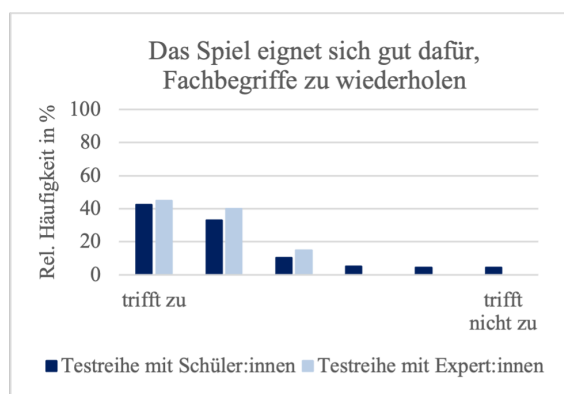


Abb. 4: Ergebnisse der Evaluation zum entwickelten Spiel in relativen Häufigkeiten: Das Spiel eignet sich gut dafür, Fachbegriffe zu wiederholen ($n_{\text{ges}} = 135$, $n_{T1} = 115$, $n_{T2} = 20$)

Sowohl bei den Expert:innen als auch den Schüler:innen wird das größte Potential des Spiel im Wiederholen von Fachbegriffen gesehen (s. Abb. 4). Darüber hinaus kann das Spiel zu Kommunikation und Kooperation unter den Spielenden anregen (s. Abb. 5), indem Diskussionen angestoßen werden, fachlich argumentiert wird, auf diese Argumente überwiegend konstruktiv und respektvoll eingegangen wird und gemeinsame Entscheidungen getroffen werden. Im kurzen Rahmen der für die Proband:innen im Regelfall einmaligen Erprobung (45-90 min) haben die Schüler:innen ihre Vorstellungen von Fachbegriffen aber nur geringfügig erweitern können. Trotzdem bewerten sie das Potential des Spiels dahingehend als positiv und gaben an, dass ihnen das Verknüpfen von Begriffen nach dem Spielen leichter fiel.

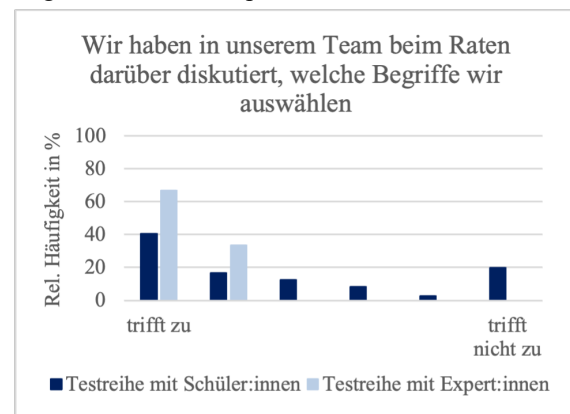


Abb. 5: Ergebnisse der Evaluation zum entwickelten Spiel in relativen Häufigkeiten: Wir haben in unserem Team beim Raten darüber diskutiert, welche Begriffe wir auswählen ($n_{\text{ges}} = 131$, $n_{T1} = 117$, $n_{T2} = 14$)

5. Fazit und Ausblick

Mit „Project Find & Link“ ist ein kooperatives und kommunikatives Gesellschaftsspiel entstanden, das nach ersten Erprobungen in Schulen und mit Expert:innen von den Proband:innen als geeignet zum Vertiefen und Vernetzen von Fachbegriffen im Physikunterricht der Sekundarstufe I eingeschätzt wird. Als besonders nützlich wird das Spiel beim Wiederholen von Fachbegriffen empfunden. Das Spiel ermöglicht in der aktuellen Ausgestaltung einen reibungsarmen Spielablauf und wird als überwiegend positiv von den Spielenden wahrgenommen.

Durch verschiedene Themensets ist das Spiel flexibel einsetzbar und sowohl zum Wiederholen bereits eingeführter Fachbegriffe vor einem neuen Thema als auch am Ende einer Unterrichtseinheit zum Festigen neuer Begriffe geeignet. Die Ergebnisse der Testreihen haben die zugrundeliegende Idee, dass sich die positiven motivationalen, emotionalen, kognitiven und sozialen Effekte des Spielens lernförderlich nutzen lassen, bestätigt.

Auch wenn die ersten Ergebnisse der Erprobungen zeigen, dass das entwickelte Spiel zum Erreichen der intendierten Ziele geeignet ist, gibt es Potential für

Verbesserungen und Freiraum für Varianten und Erweiterungen. Das Spiel könnte durch weitere Erklärungen sowie Bilder und Skizzen ergänzt werden. Das Einführen eines Zeitlimits pro Runde kann Anwendungen unter engen zeitlichen Rahmenbedingungen erleichtern. Die Erstellung weiterer Themensets ist möglich, z. B. für die Oberstufe oder andere naturwissenschaftliche Fächer. Auch eine Orientierung an den Kernlehrplänen anderer Schultypen oder Bundesländer ist denkbar.

In jedem Fall sollte das Spiel noch ausgiebiger getestet werden, um zu überprüfen, ob sich die positiven Ergebnisse reproduzieren lassen und inwiefern sich durch wiederholtes und regelmäßiges Spielen die positiven Resultate noch steigern lassen. Die nach den ersten Erprobungen umgesetzten Änderungen sollten ebenfalls auf ihre Effektivität getestet werden. Darüber hinaus sollten die bisher noch nicht erprobten Themensets zum Einsatz kommen. Durch ausführlichere Testungen lassen sich möglicherweise besonders kompatible Kombinationen von Themensets ausmachen und weitere Begriffe ausfindig machen, die den Schüler:innen Probleme bereiten und in der Anleitung erklärt werden sollten. Zur Entlastung des kognitiven Loads könnte der Kontext der Geheimagenten weggelassen werden. Es wäre zu untersuchen, ob diese Variante zur besseren Verständlichkeit des Spiels und seiner Regeln beiträgt. Weitere interessante zu untersuchende Variablen für den Einsatz des Spiels wären der Schultyp, die Jahrgangsstufe und unterschiedliche Klassen der gleichen Schule.

Darüber hinaus darf erwartet werden, dass die Auswertung von Tonaufnahmen von Testungen helfen kann, die (Selbst-)Einschätzungen aus den Fragebögen und Beobachtungen detaillierter zu verstehen.

6. Literatur

- Barzel, B., Prediger, S., Leuders, T. & Hussmann, S. (2011). Kontexte und Kernprozesse – Aspekte eines theoriegeleiteten und praxiserprobten Schulbuchkonzepts. In H. Reinhold & L. Holzäpfel (Hrsg.), *Beiträge zum Mathematikunterricht 2011* (S. 71-74). WTM.
- Barzel, B., Büchter, A. & Leuders, T. (2022). *Mathematik Methodik. Handbuch für die Sekundarstufe I und II* (11. Aufl.). Cornelsen.
- BoardGameGeek (2023). *Codenames*. Spieldatenbank BoardGameGeek. <https://boardgamegeek.com/boardgame/178900/codenames>. 15. Mai 2023.
- Brockhaus, F. A. (Hrsg.) (1993). *Brockhaus Enzyklopädie in vierundzwanzig Bänden. Zwanzigster Band Sci - Sq* (19. Aufl.). Brockhaus.
- Cornelsen (2023). *Lernspiele. Spielerisch lernen mit Cornelsen*. Cornelsen. <https://www.cornelsen.de/empfehlungen/lernspiele>. 11. Juli 2023.
- Czech Games Edition (n. D.). *Codenames*. Czech Games Edition. <https://czechgames.com/en/codenames/>. 11. Juli 2023.
- Fischer, S. & Reichmuth, A. (2020). *Gamification - Spielend lernen*. hep.
- Forkel, A. (2009). *Entdeckendes Lernen mit Lernspielen in Unterricht der Sekundarstufe I: Konzeptionelle Grundlegung, Entwicklung und Erprobung*. [Dissertation]. Universität zu Köln. Köln.
- Fuchs, P. (2020). *Die Bedeutung des Gesellschaftsspiels*. Spielecafé der Generationen. <https://www.jungundaltspielt.de/wp-content/uploads/2020/08/Spielen.pdf>. 15. Mai 2023.
- Hüther, G. & Quarch, C. (2016). *Rettet das Spiel! Weil Leben mehr als Funktionieren ist*. Carl Hanser Verlag.
- Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H. & Komorek, M. (1997). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion – Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 3(3), 3-18.
- Krabbe, H., Zander, S. & Fischer, H. (2015). *Lernprozessorientierte Gestaltung von Physikunterricht. Materialien zur Lehrerfortbildung*. Waxmann.
- Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen [MSB NRW] (Hrsg.) (2019). *Kernlehrplan für die Sekundarstufe I Gymnasium in Nordrhein-Westfalen Physik*.
- Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2013). *Kernlehrplan für die Gesamtschule - Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen Physik*.
- Retter, H. (1979). *Spielzeug. Handbuch zur Geschichte und Pädagogik der Spielmittel*. Beltz.
- Retter, H. (2003). *Einführung in die Pädagogik des Spiels*. [Basistext zur Lehrveranstaltung]. Technische Universität Braunschweig. https://www.tu-braunschweig.de/fileadmin/Redaktionsgruppen/Institute_Fakultaet_6/Allg-Paed/paed-ret/spiel98-03.pdf
- Schroeter-Brauss, S., Wecker, V. & Henrici, L. (2018). *Sprache im naturwissenschaftlichen Unterricht*. Waxmann.
- Traub, S. (2004). *Unterricht kooperativ gestalten*. Julius Klinkhardt.
- Warwitz, S., & Rudolf, A. (2021). *Vom Sinn des Spielens. Reflexionen und Spielideen* (5. Aufl.). Schneider Verlag.
- Wenzel, S. (2016). *Der Codenames-Übersetzer*. kulturgutspiel.de. <https://kulturgutspiel.de/feuilleton/der-codenames-uebersetzer/>. 27. April 2023.
- Wisniewski, B. (2019). *Psychologie für die Lehrerbildung* (3. Aufl.). Julius Klinkhardt.

Digitale Messwerterfassung beim zentralen elastischen Stoß unter Einbeziehung von Reibungseffekten

- Eine präzise Analyse von Erhaltungsgrößen -

Saskia Riedel*, Frank Stallmach*

*Universität Leipzig, Institut für Didaktik der Physik, Vor dem Hospitalore 1, 04317 Leipzig
saskia.riedel@uni-leipzig.de; stallmac@physik.uni-leipzig.de

Kurzfassung

Lehrkräfte stellen sich täglich den Herausforderungen des digitalen Wandels im Bildungssystem. Um sie bei der Erweiterung ihrer digitalen Kompetenzen und Implementierung digitaler Medien in den Physikunterricht zu unterstützen, sollten ihnen digitale Lehr-Lern-Settings zur Verfügung gestellt werden. In diesem Artikel stellen wir einen klassischen Schulversuch vor, in dem die Erhaltungsgrößen Impuls und Energie bei Stoßprozessen mit einem digitalen Messwerterfassungssystem untersucht werden. Dabei diskutieren wir die Notwendigkeit detaillierter Unterstützung von Lehrkräften beim digitalen Wandel und die Vorteile multimedialer Lernsettings mit digitalen Sensoren. Außerdem stellen wir die Durchführung und Auswertung des digitalen Schulversuches vor und ordnen abschließend dessen Einbettung im Unterricht didaktisch ein.

1. Einleitung

Spätestens seit dem 2016 vorgelegten Strategiepapier der Kultusministerkonferenz findet eine Verankerung von digitalen Medien in den Bildungsplänen statt (Kultusministerkonferenz, 08.12.2016). Fächerübergreifende und fachbezogene digitale Kompetenzen sind damit ein wesentlicher Bestandteil der curricularen Bildung an Schulen in Deutschland. Die Medien-erziehung und -bildung ist nunmehr von allen Lehrkräften im Fachunterricht umzusetzen. Aufgabe der Schulen und Universitäten ist es daher, die Lehrkräfte und Lehramtsstudierenden im Umgang mit digitalen Medien zu professionalisieren, damit diese didaktisch sinnvoll und inhaltlich reflektiert im Unterricht eingesetzt werden (Kultusministerkonferenz, 08.12.2016).

1.1. Einsatz von digitalen Medien im Unterricht

Die Unterrichtsgestaltung zur Erfüllung des Erziehungs- und Bildungsauftrages wird u.a. durch die Einstellung und lerntheoretischen Überzeugungen der Lehrenden bestimmt (Baumert & Kunter, 2006). Viele Lehrkräfte sehen die Vorteile von digitalen Medien für die Vor- und Nachbereitung sowie Durchführung des Unterrichts und sind gegenüber der Digitalisierung des Bildungssystems positiv eingestellt (Bicak, Hattermann, & Hübner, 2023), (Kurth, Walpert, & Wodzinski, 2019), (Waffner, 2020). Dennoch wird das Potential digitaler Bildung in der unterrichtlichen Praxis von Lehrenden in Deutschland nur teilweise ausgeschöpft. Dies ergaben verschiedene Studien und Lehrerbefragungen zur Verfügbarkeit, Nutzung und Selbstkompetenz von Lehrkräften in Bezug auf digitale Medien (Ikeda, 2020) (Lorenz, Yotyodying, Eickelmann, & Endberg, 2022), (Thoms & Girwidz, 2021), (Kurth, Walpert, & Wodzinski,

2019). Anhand von Interviews und Umfragen wurde festgestellt, dass eine positive Einstellung zum Einsatz digitaler Medien im (naturwissenschaftlichen) Unterricht mit den Rahmenbedingungen wie Verfügbarkeit digitaler Endgeräte und zeitlichen Ressourcen korrelieren sowie von den technischen, fachdidaktischen und medienpädagogischen Kompetenzen der Lehrenden abhängen (Härtig, H., Ostermann, A., Ropohl, M. et al., 2021), (Kurth, Walpert, & Wodzinski, 2019), (Schmechtig, Puderbach, Schellhammer, & Gehrman, 2020). Besonders signifikant für den Medieneinsatz ist die Überzeugung von Lehrpersonen, ob digitale Medien die Lernprozesse von Lernenden fördern oder deren Kompetenzerwerb hemmen (Waffner, 2020), (Kurth, Walpert, & Wodzinski, 2019). Es ist daher zielführend Lehrkräfte mittels Fortbildungen bei der Erweiterung ihrer medienpädagogischen Kompetenzen und durch die Bereitstellung von bausteinartig einsetzbaren, digitalen Lehr-Lern-Sequenzen bei der Umsetzung eines modernen Physikunterrichts zu unterstützen.

1.2. Multimediales Lernen im Physikunterricht

Digitale Medien sind aus lerntheoretischer Sicht wichtige Elemente zur Unterstützung von Lernprozessen von Schülerinnen und Schülern. Diese ermöglichen den Lernenden einen multimedialen Zugang zum Lerngegenstand, sodass zwei voneinander getrennte Sinneskanäle gleichzeitig bei der Informationsverarbeitung angesprochen werden (Mayer, 2014). Auditive/verbale und visuelle/bildliche Reize werden z.B. bei der digitalen Messwerterfassung synchron angesteuert, da ein reales Experiment beobachtet und zeitgleich die Änderung von physikalischen Größen numerisch oder graphisch veranschaulicht wird. Um eine Überlastung des Arbeitszeitgedächtnisses zu vermeiden, müssen bei der Entwicklung von

digitalen Lehr-Lern-Sequenzen die Gestaltungsprinzipien von multimedialen Lernangeboten berücksichtigt werden (Mayer, 2014) (Sweller, 1988). Die Lernwirksamkeit multimedialer Lehr-Lern-Settings konnte z.B. beim experimentellen Einsatz von Smartphones in der Anfangsphase des Physik-Lehramtsstudiums (Kaps, Splith, & Stallmach, 2021) oder von Tablet-PC-gestützter Videoanalyse im Mechanikunterricht der Sekundarstufe II nachgewiesen werden (Becker, Klein, Göbbling, & Kuhn, 2019).

1.3. Chancen digitaler Lernangebote

Werden digitale Lernangebote gemäß multimedialer Gestaltungsprinzipien entwickelt, können auch im Physikunterricht komplexere Themen wie Erhaltungsgrößen bei Stoßprozessen unter Berücksichtigung von Reibungseffekten präzise analysiert werden. Im Vergleich zu konventionellen Schulversuchen mittels Videoanalyse oder Gabellichtschranken lassen sich mit digitalen Messwerterfassungssystemen Stoßprozesse recht einfach und zeiteffektiv analysieren, sodass die kognitiven Ressourcen der Lernenden überwiegend für die computergestützte Auswertung der Messdaten und die Verknüpfung ihres Vorwissens mit neuen Lerninhalten zur Verfügung stehen (Lück & Wilhelm, 2023). Somit können zentrale Basiskonzepte wie Energie- und Impulserhaltung an Stoßprozessen empirisch untersucht und leichter in die bestehende physikalisch-mathematische Wissensstruktur im Bereich der Kinematik und Dynamik integriert werden. Neben einer vertieften fachlichen Betrachtung von Stoßprozessen werden auch die digitalen Handlungskompetenzen der Lernenden gefördert, da ein reflektierter und sinnhafter Umgang mit digitalen Endgeräten im Rahmen einer computergestützten Auswertung und graphischen Darstellung der Messwerte ermöglicht wird.

Eine Experimentiermethode zur präzisen Analyse eines zentralen elastischen Stoßes mittels digitaler Messwerterfassung, welche die Reibungseffekte einbezieht, stellen wir nachfolgend vor und diskutieren deren Integrationsmöglichkeiten in den Physikunterricht. Dabei werden die Erhaltungsgrößen Energie und Impuls sowie der Zusammenhang zwischen Kraftstoß und Impulsänderung untersucht und die Ergebnisse mit Angabe der Messunsicherheiten vorgestellt.

2. Physikalische Grundlagen

In einem abgeschlossenen System mit n Körpern bleiben im reibungsfreien Fall der Gesamtimpuls \vec{p} und die Gesamtenergie E erhalten.

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^n \vec{p}_i = \text{const} \quad \text{bzw.} \quad \frac{d}{dt} \vec{p} = 0 \quad \{1\}$$

$$E = \sum_{i=1}^n E_i = \text{const} \quad \text{bzw.} \quad \frac{d}{dt} E = 0 \quad \{2\}$$

Dabei lassen sich Impuls und kinetische Energie eines Körpers gemäß Gleichung 3 und 4 berechnen.

$$\vec{p}_i = m_i \cdot \vec{v}_i \quad \{3\}$$

$$E_{i,kin} = \frac{m_i}{2} v_i^2 \quad \{4\}$$

Da der zentrale elastische Stoß zweier Körper eine eindimensionale Bewegung ist, kann zur didaktischen Reduktion auf die Vektordarstellung verzichtet werden. Somit folgen aus den Gleichungen 1 bis 4 für die Wechselwirkung von zwei Körpern in einem abgeschlossenen System die nachfolgenden Gleichungen, wobei u für die Geschwindigkeiten vor dem Stoß und v für jene nach dem Stoß stehen:

$$m_1 \cdot u_1 + m_2 \cdot u_2 = m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 \quad \{5\}$$

$$\frac{m_1}{2} \cdot u_1^2 + \frac{m_2}{2} \cdot u_2^2 = \frac{m_1}{2} \cdot v_1^2 + \frac{m_2}{2} \cdot v_2^2 \quad \{6\}$$

Bei der Wechselwirkung von zwei aufeinanderstoßenden Körpern findet ein Kraftstoß statt. Die dabei wirkenden Kräfte sind gemäß des 3. Newtonschen Axioms betragsmäßig gleich groß, zeigen aber in entgegengesetzter Richtung. Durch Integration der Kraft F nach der Zeit t erhält man den Kraftstoß I , welcher der Impulsänderung Δp_i jedes Körpers entspricht.

$$\int F_i dt = I_i \quad \Delta p_i = I_i \quad \{7\}$$

Ein Kraftstoß findet bei realen Bewegungsvorgängen auch aufgrund der Reibung statt, weshalb die Geschwindigkeiten von Körpern bei Stoßprozessen zeitabhängig sind. Bei einer Rollbewegung auf gerader Fahrbahn sind die Reibungskräfte mit ausreichender Genauigkeit als konstant anzunehmen und wirken in entgegengesetzter Richtung zur momentanen Bewegung. Die Stoßpartner erfahren demnach eine konstante Beschleunigung von $-a_r$ und es gilt das folgende Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz für beide Wagen.

$$v(t) = -a_r \cdot t + v_0 \quad \{8\}$$

3. Vorstellung der Experimentiermethode

Digitale Messwerterfassungssysteme wie die Smart Carts (PASCO Scientific Inc., USA) oder die Digi-Carts (PHYWE Systeme GmbH & Co. KG, Deutschland) besitzen kabellose Sensoren, mit denen mehrere physikalische Größen zeitgleich aufgenommen und graphisch dargestellt werden. So können in einem Schulversuch zum zentralen elastischen Stoß zweier massegleicher Wagen die Impuls- und Energieerhaltung sowie der Zusammenhang zwischen Kraftstoß und Impulsänderung untersucht werden. Der Versuchsaufbau mit zwei massegleichen Rollwagen ist in Abbildung 1 dargestellt.



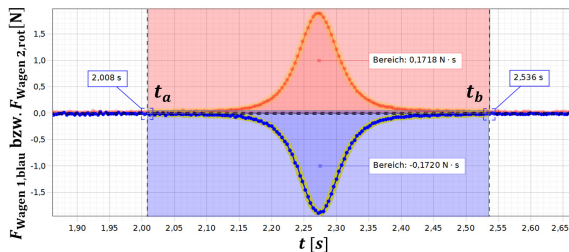
Abb. 1: Versuchsaufbau zum zentralen elastischen Stoß mit zwei massegleichen Rollwagen und Rollbahn

Die Rollwagen, an welchen sich Permanentmagnet-Puffer befinden, stehen sich mit den Kraftsensoren gegenüber. Die zeitsynchrone Datenaufzeichnung für die Kraft- und Positionssensoren wird gestartet und Wagen 1 in Bewegung versetzt, sodass er auf den in Ruhe befindlichen Wagen 2 stößt. Mit den Positionssensoren werden die Geschwindigkeiten der Rollwagen und mit deren Kraftsensoren die beim Stoß auf sie wirkenden Kräfte zeitsynchron und mit hoher zeitlicher Auflösung gemessen. Die während des Experiments aufgezeichneten Daten werden unmittelbar am Computer mit der zu den Rollwagen gehörigen Software (PASCO Capstone) graphisch dargestellt. Abbildung 2 zeigt das aufgenommene Kraft-Zeit-Diagramm beider Wagen. Die aus dem Positionssensor durch numerische Differentiation berechneten Geschwindigkeits-Zeitkurven sind in Abbildung 3 bzw. 4 dargestellt. Im Folgenden werden diese Messdaten ausgewertet und diskutiert.

4. Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

4.1. Kraftstoß

Beginn und Ende des Stoßprozesses können mit dem $F(t)$ - und dem $v(t)$ -Diagramm identifiziert werden. Gemäß Abbildung 2 beginnt die Wechselwirkung beider Wagen bei $t_a = 2,008$ s und endet bei $t_b = 2,536$ s.



$$I_i = \int_{t_a}^{t_b} F_i(t) dt$$

$$I_1 = (-0,1720 \pm 0,009) \text{ N} \cdot \text{s}$$

$$I_2 = (0,1718 \pm 0,009) \text{ N} \cdot \text{s}$$

$$I_1 = -I_2$$

Abb. 2: Auswertung des $F(t)$ -Diagrammes des zentralen elastischen Stoßes der beiden massegleichen Rollwagen

Zur Bestimmung der Kraftstöße I_1 und I_2 erfolgt eine numerische Integration der $F(t)$ -Graphen im Zeitintervall von t_a bis t_b . Die Kraftstöße sind im Rahmen der Messunsicherheiten betragsmäßig gleich groß, haben jedoch unterschiedliche Vorzeichen (vgl. Abbildung 2). Dies entspricht den Erwartungen aus dem 3. Newtonschen Axiom zu Richtung und Betrag der Wechselwirkungskräfte zweier Stoßpartner.

4.2. Einbezug von Reibungseffekten

Beide Rollwagen unterliegen der Rollreibung, welche zu einer geringen, aber nicht vernachlässigbaren Geschwindigkeitsänderung auch außerhalb des Zeit-

intervalls des Kraftstoßes führt (siehe farbig markierte Bereiche in Abbildung 3).

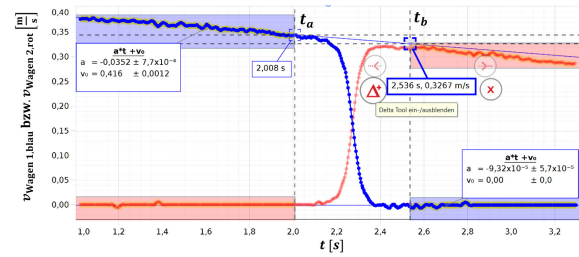
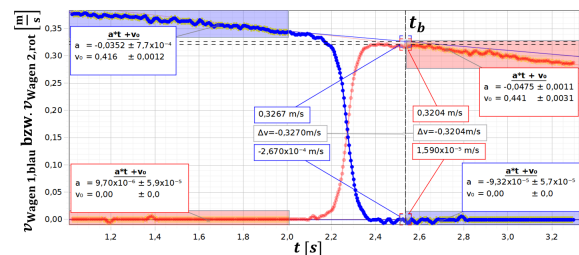


Abb. 3: $v(t)$ -Diagramm des Stoßprozesses und lineare Extrapolation der Datenpunkte für Wagen 1

Eine konstante Rollreibung führt für den jeweils in Bewegung befindlichen Wagen zu einer gleichmäßig verzögerten Bewegung, weshalb eine lineare Geschwindigkeitsabnahme im experimentell aufgenommenen $v(t)$ -Diagramm (siehe Abbildung 3) erkennbar ist. Da die Rollreibungskräfte auch während der Wechselwirkung der Wagen untereinander wirken, werden die jeweiligen Geschwindigkeiten beider Wagen vor dem Stoß gemäß Gleichung 8 über lineare Extrapolation der Datenpunkte für $t < t_a$ bis zum Ende des Stoßprozesses t_b bestimmt. Analog erfolgt die Bestimmung der Geschwindigkeiten beider Wagen zum Ende des Stoßes bei $t = t_b$, wobei hier jeweils die Datenpunkte für $t > t_b$ zur Extrapolation herangezogen werden.

4.3. Impulsänderung und Kraftstoß

Während des Kraftstoßes im Zeitintervall von t_a bis t_b erfahren beide Wagen aufgrund ihrer Wechselwirkung untereinander eine abrupte Geschwindigkeitsänderung. Diese wird jeweils aus den Differenzen der extrapolierten Geschwindigkeiten jedes Wagens zum Zeitpunkt t_b ermittelt (siehe Abbildung 4).



$$t = t_b \quad m_1 = 0,52600 \text{ kg} \quad m_2 = 0,52603 \text{ kg}$$

$$\Delta p_i = \Delta v_i \cdot m_i \quad I_i = \Delta p_i$$

$$\Delta p_1 = (-0,1720 \pm 0,0015) \text{ N} \cdot \text{s} \quad I_1 = (-0,1720 \pm 0,009) \text{ N} \cdot \text{s}$$

$$\Delta p_2 = (0,1687 \pm 0,0022) \text{ N} \cdot \text{s} \quad I_2 = (0,1718 \pm 0,009) \text{ N} \cdot \text{s}$$

$$E_{kin,1} + E_{kin,2} = E_{kin,1}' + E_{kin,2}'$$

$$(0,0281 \pm 0,0005) \text{ J} = (0,0270 \pm 0,0007) \text{ J}$$

$$p_1 + p_2 = p_1' + p_2'$$

$$(0,1719 \pm 0,0016) \text{ N} \cdot \text{s} = (0,1684 \pm 0,0022) \text{ N} \cdot \text{s}$$

Abb. 4: Auswertung des $v(t)$ -Diagrammes des zentralen elastischen Stoßes der beiden massegleichen Rollwagen

Die Geschwindigkeitsänderungen beider Wagen sind im Rahmen der Messunsicherheiten entgegengesetzt gleich groß (vgl. Abbildung 4). Es gilt:

$$\Delta v_1 = -\Delta v_2 \quad \{9\}$$

Mit Gleichung 3 lassen sich aus den Geschwindigkeitsänderungen und Massen m_i beider Wagen (siehe Abbildung 4) die Impulsänderungen Δp_i berechnen. Weil die Massen beider Wagen fast identisch sind, gilt analog zu Gleichung 9 für die Impulsänderungen:

$$\Delta p_1 = -\Delta p_2 \quad \{10\}$$

Dies entspricht der Erwartung aus dem Impulserhaltungssatz für ein abgeschlossenes System aus zwei Körpern, die nur untereinander in Wechselwirkung stehen.

Die aus dem $F(t)$ -Diagramm ermittelten Werte der Kraftstöße stimmen mit hoher Genauigkeit auch mit den berechneten Impulsänderungen überein (vgl. Abbildung 2 und 4). Der Zusammenhang zwischen Kraftstoß und Impulsänderung (Gleichung 7) wurden daher mit hoher Präzision verifiziert und die Gültigkeit des 2. Newtonschen Axioms über das Zeitintervall des Stoßes überprüft.

4.4. Erhaltungsgrößen Energie und Impuls

Mit den Gleichungen 5 und 6, den extrapolierten Momentangeschwindigkeiten und den Wagenmassen können Gesamtimpuls und die kinetische Gesamtenergie zum Zeitpunkt t_b berechnet werden (siehe Abbildung 4). Im Rahmen der Messunsicherheiten sind sowohl der Gesamtimpuls als auch die kinetischen Gesamtenergien vor und nach dem Stoß zum Zeitpunkt t_b gleich groß und bleiben somit erhalten (vgl. Abbildung 4).

Die Impulserhaltung gilt bei einem abgeschlossenen System zu jedem Zeitpunkt der Wechselwirkung zwischen den beiden Körpern. Um dies zu prüfen, wurden in Abbildung 5 die Impulse p_1 (blau) und p_2 (rot) beider Wagen zum Gesamtimpuls (violett) des Systems addiert und in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt.

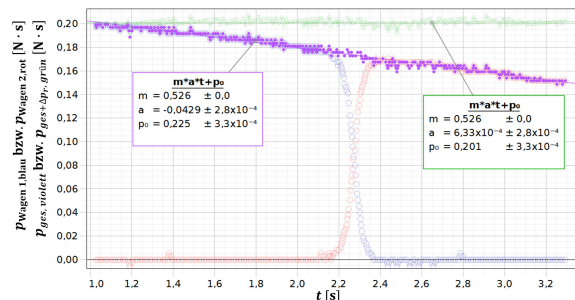


Abb. 5: $p(t)$ -Diagramm eines zentralen elastischen Stoßes der beiden massegleichen Rollwagen

Man erkennt in Abbildung 5, dass der Gesamtimpuls über den gesamten Bewegungszeitraum linear abnimmt. Interessant ist, dass diese lineare Abnahme auch in dem Bereich beobachtbar ist, in dem der Kraftstoß stattfindet, der aus der Wechselwirkung beider Wagen untereinander resultiert. Ursache für diese lineare Abnahme ist die Rollreibung, wodurch auf das abgeschlossene System konstante äußere Kräfte entgegen der Bewegungsrichtung der Wagen

wirken. Aufgrund dieser Reibung findet ein Kraftstoß statt, der zu einer Impulsänderung führt.

$$I_r = \int F_r dt \quad \{11\}$$

$$\Delta p_r = m \cdot a_r \cdot \Delta t \quad \{12\}$$

Mittels linearer Regression wurde eine mittlere Beschleunigung $a_r = -0,0429 \frac{m}{s^2}$ für das System aus den beiden Wagen ermittelt. Addiert man zu jedem Zeitpunkt die Impulsänderung Δp_r zum Gesamtimpuls p_{gesamt} des abgeschlossenen Systems erhält man den grünen Graphenverlauf in Abbildung 5.

$$p_{gesamt} = p_1 + p_2 + \Delta p_r \quad \{13\}$$

Dieser Verlauf entspricht den Erwartungen an ein reibungsfreies abgeschlossenes System.

5. Integration in den Physikunterricht

Die digitale Messwerterfassung ermöglicht es den zentralen elastischen Stoß zweier massegleicher Körper mit kabellosen Sensoren und computergestützter Auswertung präzise zu analysieren. Die Datenerfassung erfolgt mit hoher zeitlicher Auflösung sowie Genauigkeit und spiegelt den aktuellen Stand ähnlicher Messverfahren in Wissenschaft und Technik wider. Lernende können zeitgleich den Stoßprozess der Wagen und den zeitlichen Verlauf mehrerer physikalischer Größen in Diagrammen beobachten und erhalten dadurch einen multimedialen Zugang zum Lerngegenstand. Die zeiteffektive und vergleichsweise einfache Datenerfassung sowie die computergestützte Auswertung ermöglichen den Lernenden eine intensivere physikalisch-mathematische Auseinandersetzung mit den experimentellen Daten.

5.1. Schulversuch als Demonstrationsexperiment

Dieser Versuch eignet sich als Demonstrationsexperiment zur Erarbeitung der physikalischen Größen Impuls und Kraftstoß sowie der Impulserhaltung. Die präzise Analyse des Stoßprozesses aktiviert das Vorwissen der Lernenden über gleichmäßig beschleunigte Bewegungen, Kräfte und Energie. Dabei werden Grundlagen wie die Newtonschen Axiome und das Prinzip der Energieerhaltung gefestigt und mit den neuen Lerninhalten verknüpft. Durch den multimedialen Zugang zum Experiment wird das physikalische Verständnis der Lernenden bezüglich der Erhaltungsgrößen Energie und Impuls, der Bewegung von Körpern sowie der Wechselwirkungen zwischen Körpern gefestigt und erweitert.

Die Integration des Experiments in den Physikunterricht ist individuell an das Lern- und Leistungsniveau der Schülerinnen und Schüler anpassbar. Lehrende können das Experiment vorführen und die gewonnenen Daten gemeinsam mit den Lernenden arbeitsteilig in Gruppenarbeit oder in Einzelarbeit auswerten und anschließend im Plenum besprechen.

Je nach Leistungsniveau und Softwarekenntnissen können die neuen physikalischen Größen Impuls und Kraftstoß bzw. die Impulserhaltung auch selbstständig erarbeitet werden. Für eine schülerzentrierte Lehr-Lern-Sequenz ist die Bereitstellung von gestuften Hilfen sinnvoll. Denkbar wären Tipps zur Analyse der Bewegung der Wagen, methodische Anleitungen zur Software- und Datenauswertung sowie zu bekannten physikalischen Gesetzen. Diese unterstützen die Lernenden dabei, ihr Vorwissen zu aktivieren, die experimentellen Daten selbstständig zu analysieren und in ihre Wissensstruktur zu integrieren.

Prinzipiell kann die Einführung des Kraftstoßes und der Impulsänderung durch deduktives Ableiten aus dem 2. Newtonschen Axiom und der Definition der Beschleunigung oder durch deskriptive Festlegung erfolgen. In beiden Fällen dient der Schulversuch zur experimentellen Verifizierung des Zusammenhangs. Ebenso kann die Impulserhaltung deduktiv abgeleitet oder deskriptiv vorgegeben werden. Jedoch bietet sich für die Überprüfung der Impulserhaltung auch ein induktives Vorgehen an, denn Impuls und kinetische Energie sind Zustandsgrößen, welche beide durch die gleichen physikalischen Größen – Masse und Geschwindigkeit – definiert werden. Eine Hypothese zur Erhaltung des Impulses analog zur Energieerhaltung ist daher naheliegend und mit diesem Schulversuch nachweisbar. Dabei ist auch eine genauere Betrachtung des physikalischen Systembegriffs sinnvoll, um diesen und die Bedeutung eines abgeschlossenen System an einem Beispiel zu vertiefen.

5.2. Differenzierung

Neben der bereits aufgezeigten Differenzierung hinsichtlich der Unterrichtsmethode und Sozialform sowie der Binnendifferenzierung zur Berücksichtigung der individuellen Lernvoraussetzungen aber auch der individuellen Unterrichtsvorbereitung durch die Lehrperson, kann dieser Schulversuch ebenso inhaltlich variiert werden. So lässt sich das Experiment mit verschiedenen Massen und Anfangsgeschwindigkeiten der Wagen oder als unelastischer Stoß durchführen. Zudem sind die Reibungskräfte und die verrichtete Reibungsarbeit über die ermittelten Beschleunigungen bestimmbar. Diese und weitere Variationen könnten in Übungsphasen zur Festigung der fachlichen und digitalen Kompetenzen dienen.

5.3. Experimentelle Leistungskontrolle

Der vorgestellte oder eine Variation dieses Schulversuches sind auch als Experiment im Rahmen des physikalischen Praktikums z.B. in der Sekundarstufe II durchführbar. Voraussetzungen für eine Einbettung in den Leistungsraum sind, dass die Lernenden den Umgang mit der Messwerterfassungssoftware und den Auswertungstools beherrschen und die neuen theoretischen Grundlagen von Impuls, Kraftstoß und Impulserhaltung zuvor ausreichend gefestigt wurden. Dies kann in vorherigen Übungs- und

Anwendungseinheiten und durch die verschiedenen Variationsmöglichkeiten des Versuchs erreicht werden.

6. Ausblick

Wir konnten zeigen, dass mit dem verwendeten Messwerterfassungssystem eine präzise Analyse der Erhaltungsgrößen mit Berücksichtigung von Reibungseffekten zeiteffektiv und vergleichsweise einfach möglich ist. Dazu werden wir nun konkrete Lehr-Lern-Sequenzen als Handreichungen für den Physikunterricht erstellen. Diese sollten aus individuell nutzbaren Bausteinen bestehen, welche sowohl Aufgabenstellungen mit gestuften Hilfen und Hinweise zur Durchführung, Auswertung und Bestimmung der Messunsicherheiten als auch verschiedene Varianten des didaktisch-methodischen Vorgehens enthalten. Diese Lehr-Lern-Settings werden anschließend im Unterricht erprobt und deren Einsatz sowie Lernwirksamkeit evaluiert. Die angesprochenen inhaltlichen Variationsmöglichkeiten des Schulversuches, z.B. die Analyse von inelastischen Stößen, sollen ebenfalls mit der vorgestellten Methode durchgeführt und ausgewertet werden, um diese anschließend zu erproben.

7. Literatur

- Baumert, J., & Kunter, M. (01. 12. 2006). Stichwort: Professionelle Kompetenz von Lehrkräften. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 9. Jahrg., S. 469-520. doi:<https://doi.org/10.1007/s11618-006-0165-2>
- Becker, S., Klein, P., Gößling, A., & Kuhn, J. (05. 02. 2019). Förderung von Konzeptverständnis und Repräsentationskompetenz durch Tablet-PC-gestützte Videoanalyse. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 25, S. 1-24. doi:<https://doi.org/10.1007/s40573-019-00089-4>
- Bicak, B., Hattermann, M., & Hübner, C. (2023). Einsatz digitaler Medien im Unterricht vor und während der Coronapandemie. In F. Förster, T. Fritzlar, & B. Rott (Hrsg.), *Probleme sind zum Lösen da* (S. 41-58). Münster: WTM Verlag für wissenschaftliche Texte und Medien.
- Härtig, H., Ostermann, A., Ropohl, M. et al. (18. 06. 2021). Gibt es einen fachspezifischen Medieneinsatz im naturwissenschaftlichen Fachunterricht? Ergebnisse einer Fragebogenerhebung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*(27), S. 139-154.
- Ikeda, M. (2020). Were schools equipped to teach – and were students ready to learn – remotely? *PISA in Focus*(108). doi:<https://doi.org/10.1787/4bcd7938-en>

- Kaps, A., Splith, T., & Stallmach, F. (11. 02. 2021). Implementation of smartphone-based experimental exercises for physics courses at universities. *Physics Education*, 56(3). doi:<https://doi.org/10.1088/1361-6552/abdee2>
- Kultusministerkonferenz. (08.12.2016). Bildung in der digitalen Welt. In Sekretariat der Kultusministerkonferenz (Hrsg.), *Strategie der Kultusministerkonferenz*. Berlin: KMK.
- Kurth, C., Walpert, D., & Wodzinski, R. (2019). Digitale Messwerterfassung im Kontext digitaler Bildung - Einstellungen von Physiklehrkräften. *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.
- Lorenz, R., Yotyodying, S., Eickelmann, B., & Endberg, M. (Hrsg.). (2022). *Schule digital – der Länderindikator 2021. Lehren und Lernen mit digitalen Medien in der Sekundarstufe I in Deutschland im Bundesländervergleich und im Trend seit 2017*. Münster; New York: Waxmann.
- Lück, S., & Wilhelm, T. (2023). Warum die Messwerte digital erfassen? In T. Wilhelm (Hrsg.), *Digital Physik unterrichten* (S. 15-17). Hannover: Kallmeyer in Verbindung mit Klett Friedrich Verlag GmbH.
- Mayer, R. E. (2014). Cognitive Theory of Multimedia Learning. In *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (S. 43-71). Cambridge University Press.
- Schmechtig, N., Puderbach, R., Schellhammer, S., & Gehrman, A. (2020). *Einsatz von und Umgang mit digitalen Medien und Inhalten in Unterricht und Schule. Befunde einer Lehrkräftebefragung zu beruflichen Erfahrungen und Überzeugungen von Lehrerinnen und Lehrern in Sachsen 2019*. Dresden: TU Dresden, Zentrum für Lehrerbildung, Schul- und Berufsbildungsforschung (ZLSB).
- Sweller, J. (April 1988). Cognitive Load During Problem Solving: Effects on Learning. *COGNITIVE SCIENCE*(12(2)), S. 257-285.
- Thoms, L.-J., & Girwidz, R. (2021). Eine Lehrerbefragung zum Einsatz digitaler Tools im Physikunterricht. *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.
- Waffner, B. (2020). Unterrichtspraktiken, Erfahrungen und Einstellungen von Lehrpersonen zu digitalen Medien in der Schule. In A. Wilmers, C. Anda, C. Keller, & M. Rittberger (Hrsg.), *Bildung im digitalen Wandel* (Bd. 1, S. 57-102). Münster; New York: Waxmann.

Danksagung

Wir bedanken uns für die kollegialen Hinweise und Diskussionen zum Einsatz digitaler Messwerterfassung im Physikunterricht nach der Vorstellung dieses Vorhabens auf der DPG-Frühjahrstagung in Greifswald.

Dem Sächsischen Staatsministerium für Kultus gilt unser Dank für die Abordnung von Saskia Riedel als Lehrkraft im Hochschuldienst an die Universität Leipzig und der damit verbundenen Unterstützung ihres Promotionsvorhabens zu Aspekten der Digitalisierung des Physikunterrichts.

Erfassung von großräumigen zweidimensionalen Bewegungen mit GPS

Thomas Wilhelm*, Patrick Zeder*, Lukas Schauer*

*Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main
wilhelm@physik.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

Zunehmend mehr Lehrpläne schreiben vor, dass die Einführung in die Mechanik in der Sekundarstufe I anhand zweidimensionaler Bewegungen erfolgen soll. Die Videoanalyse von Bewegungen hat sich hier als Messwerterfassungsmöglichkeit bewährt. Es kann aber durchaus attraktiv sein, auch einmal großräumigere Bewegungen zu erfassen. Dazu eignet sich das GPS-System.

Im ersten Teil des Artikels werden sechs verschiedene Apps für Smartphones aufgezeigt, die als GPS-Tracker verwendet werden können, sowie drei Möglichkeiten der Datenauswertung und Darstellung. Außerdem werden Beispiele aufgenommener Bewegungen gezeigt.

Im zweiten Teil des Artikels wird aufgezeigt, dass Onlinedienste die GPS-Position von Flugzeugen in Echtzeit darstellen können, wie zum Beispiel „Flightradar24.com“. Wird hier von einem Flugzeug ein Bildschirmvideo aufgenommen, kann dieses mit Hilfe eines Videoanalyseprogrammes analysiert werden. Beispiele aufgenommener Bewegungen werden gezeigt.

1. Zweidimensionale Bewegungen

Traditionell geschieht die Behandlung der Kinematik und der Newton'schen Dynamik anhand geradliniger Bewegungen und erst sehr spät werden Wurf- und Kreisbewegungen betrachtet. Aus physikdidaktischer Sicht ist es jedoch sinnvoll, die physikalischen Größen der Kinematik anhand allgemeiner zweidimensionaler Bewegungen einzuführen; dazu liegen auch verschiedene Unterrichtskonzeptionen vor [1]. Selbst die Einführung der Kraft und die Dynamik kann anhand allgemeiner zweidimensionaler Bewegungen geschehen [2+3]. Entsprechend diesen Forschungsergebnissen fordern auch einige Lehrpläne, die Einführung in die Mechanik anhand mehrdimensionaler, zumindest zweidimensionaler Bewegungen von Objekten zu behandeln. Beispiele sind der Gymnasiallehrplan von Bayern [4], von Hamburg [5] und von Österreich [6].

Als Messwerterfassungssystem für ein- und zweidimensionale Bewegungen von Objekten hat sich die Videoanalyse bewährt [7]. Damit können Bewegungen im Klassenzimmer oder in der Sporthalle schnell analysiert werden. Möchte man auch großräumigere Bewegungen in der Ebene, wie von Fahrrädern, Autos oder Flugzeugen analysieren, ist dies mit der reinen Videoanalyse nicht mehr möglich. Hierfür wurde bereits mehrfach die Messung mit GPS vorgeschlagen [8+9]. Mittlerweile gibt es andere Möglichkeiten, GPS-Werte zu verwenden. Zum einen gibt es diverse Apps für Smartphones, zum anderen gibt es Webseiten, die die per GPS ermittelten Positionen von Flugzeugen in Karten und als Videos auf Webseiten darstellen.

2. Apps zur Erfassung und Auswertung von GPS-Daten

GPS-Empfänger werden im privaten Gebrauch seit Jahren verwendet und Schülerinnen und Schüler haben bereits Erfahrungen im Umgang mit „Google Maps“ oder Navigationsgeräten in Autos sammeln können. Zudem kann davon ausgegangen werden, dass alle Schülerinnen und Schüler ein GPS-fähiges Smartphone besitzen.

2.1. GPS-Tracker für Smartphones im Vergleich

Im Folgenden werden sechs kostenfreie Apps für Smartphones zur Erfassung der GPS-Positionen vorgestellt [10].

Die bekannte App „phyphox“ ist sowohl für Android als auch für iOS verfügbar und bietet die Möglichkeit, viele Sensoren für verschiedene Experimente zu nutzen. Von Nachteil ist jedoch, dass die GPS-Daten nicht als gpx-Datei, sondern nur als xls- und csv-Datei exportiert werden können, man keine Einstellungsmöglichkeiten hat und das Smartphone während der Aufzeichnung nicht gesperrt sein darf.

Die App „Komoot“ ist ebenfalls für beide Plattformen verfügbar. Ein Export als gpx-Datei ist zwar möglich, aber der Datenexport ist umständlich. Leider sind auch keine Einstellungen möglich.

Die App „Geo-Tracker“ erlaubt den Export in verschiedene Dateiformate, hat eine übersichtliche Oberfläche und viele Möglichkeiten der Einstellung der Aufzeichnung. Allerdings gibt es sie nur für Android.

Die App „GPX-Tracker“ hat eine einfache Oberfläche, erlaubt den Export als gpx-Datei und hat keine Werbung und keine InApp-Käufe. Allerdings ist der

Datenexport umständlich und es gibt die App nur für iOS.

Bei der App „GPS-Tracker“ ist es möglich, vor Beginn der Messung verschiedene Einstellungen vorzunehmen und nach der Messung die Daten in verschiedene Dateiformate zu exportieren. Allerdings müssen die Einstellungen für jede Aufnahme einzeln geändert werden und es gibt die App nur für iOS.

Die App „GPS-Tracks“, die es nur für iOS gibt, erlaubt einen Export der Daten nur in der kostenpflichtigen PRO-Version. In der kostenfreien Version ist aber eine Anzeige in einer Karte und ein Diagramm des Geschwindigkeitsbetrages möglich.

Alle in diesem Artikel gezeigte Beispiele wurden mit der Android-App „Geo-Tracker“ aufgezeichnet und unterschiedlich ausgewertet [10].

2.2. Datenauswertung und Darstellung

Eine Möglichkeit für die Darstellung von aufgezeichneten Bewegungen ermöglicht die kostenlose Software „Google Earth“. Man kann Daten im gpx-Format per Drag and Drop einlesen und in Luftbildkarten der Erdoberfläche darstellen. Darüber hinaus bietet „Google Earth“ die Möglichkeit, den Geschwindigkeitsbetrag und die Höhe anzuzeigen. Darin kann der jeweilige Geschwindigkeitsbetrag an verschiedenen Messpunkten abgelesen werden und gleichzeitig zeigt ein Pfeil auf der Karte den zugehörigen Ort auf der Bahnkurve an. Durch Markieren eines Bereiches im Diagramm kann dieser in der Karte hervorgehoben werden. Abbildung 1 zeigt im oberen Teil die Bahnkurve einer Zugfahrt und im unteren Teil das Zeitdiagramm des Geschwindigkeitsbetrages sowie die Höhe. In beiden Teilen ist der mittlere Abschnitt zwischen zwei Bahnhöfen rot markiert.



Abb. 1: Karte mit Bahnkurve einer Zugfahrt von Gelnhausen nach Offenbach in „Google Earth“ mit einem Zeitdiagramm von Höhe und Geschwindigkeitsbetrag (Kartendaten ©2024 GeoBasis-DE/BKG (©2009) dl-de/by-2-0 (Daten verändert) (2024) Bilder ©2024 TerraMetrics)

Der Geschwindigkeitsbetrag zwischen den ersten beiden Bahnhöfen im ersten Drittel des Diagramms wurde zusätzlich in Excel dargestellt (siehe Abb. 2). Im Vergleich erkennt man, dass es sich bei „Google Earth“ um geglättete Daten handelt. Außerdem kann man sehen, dass der Zug beim Anfahren und Abbremsen je eine relativ konstante tangentielle Beschleunigung hat und dazwischen ein relativ konstantes Tempo.

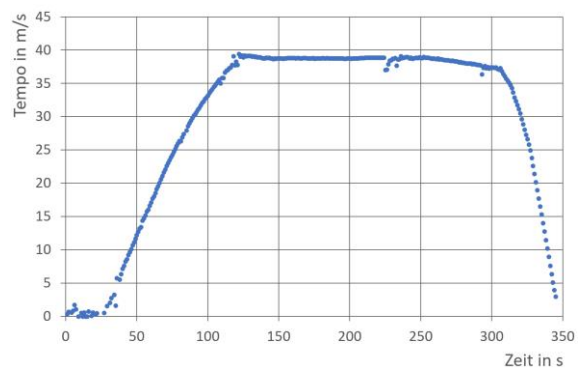


Abb. 2: Geschwindigkeitsbetrag einer Zugfahrt, dargestellt in Excel

Die Anzeige von gpx-Daten ist auch auf speziellen Webseiten möglich. Bei der Webseite von Jürgen Berkemeier kann eine gpx-Datei per Drag and Drop hineingezogen werden (<https://www.jberkemeier.de/ShowGPX.html>). Neben einer Routendarstellung auf einer Karte können ein Ort-Höhe-Diagramm, ein Ort-Geschwindigkeitsbetrag-Diagramm und ein Geschwindigkeitsbetrag-Höhe-Diagramm dargestellt werden.

Für weitere Datenmanipulationen bzw. das gleichzeitige Anzeigen und Vergleichen von verschiedenen Messungen bietet „Microsoft Excel“ zahlreiche Möglichkeiten. Entsprechende Excel-Vorlagen-Dateien für eigene Messwerte sind downloadbar unter <http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Smartphone-GPS.htm>.

2.3. Beispiele

Zur Einführung der GPS-Messung und zur Eintübung der gewählten Software können Schülerinnen und Schüler versuchen, GPS-Bilder zu zeichnen (siehe Abb. 3).



Abb. 3: gelaufene Bahnkurve in der Form eines Autos, aufgenommen mit „Geo-Tracker“ und dargestellt in „Google Earth“ (Kartendaten ©2024 GeoBasis-DE/BKG (©2009) dl-de/by-2-0 (Daten verändert) Bilder ©2024 AeroWest, GeoBasis-DE/BKG, Maxar Technologies)

Vor dem Versuchsbeginn sollten sich die Schülerinnen und Schüler ein Motiv überlegen, welches sich möglichst in einem Zug auf einer Fläche zeichnen lässt. Dieses Motiv laufen sie im Anschluss auf einer großen Fläche wie dem Schulhof oder dem Sportplatz ab. Vor Aufzeichnungsbeginn sollten die Genauigkeitseinstellungen der Geräte überprüft werden, damit es keine Sprünge in den Aufnahmen gibt. Nach

erfolgreichen Versuchen kann auch mit einer zwischenzeitlichen Pausierung der Aufnahme experimentiert werden, um komplexere Bilder zu zeichnen. Zur Behandlung von geradlinigen Bewegungen mit näherungsweise konstanter Geschwindigkeit (gleichförmige Bewegung) eignen sich verschiedene 100 m-Läufe mit jeweils konstantem Tempo (Messabstände in „Geo-Tracker“: 1 s). In „Google Earth“ erscheinen dann in der Karte je nach Tempo unterschiedlich viele Messpunkte im gleichen Streckenabschnitt. Eine genauere Analyse ist in Excel möglich (siehe Abb. 4).

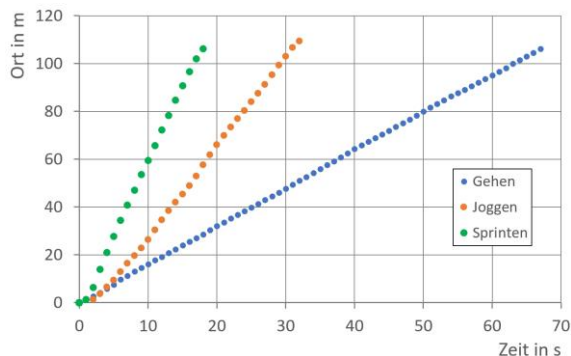


Abb. 4: Zeit-Ort-Diagramm eines 100 m-Laufes in „Excel“ für Gehen, Joggen und Sprinten

Zur Behandlung von geradlinigen Bewegungen mit näherungsweise konstanter Beschleunigung (gleichmäßig beschleunigte Bewegung) ließ sich eine Person auf einem Fahrrad einen Hang mit einem gleichmäßigen Gefälle ($\alpha = 5,79^\circ$) hinunterrollen. Abbildung 5 zeigt die Bahnkurve in „Google Earth“ und die Orte, die stets in einem zeitlichen Abstand von einer Sekunde gemessen wurden. An den zunehmenden Abständen zwischen den Messpunkten erkennt man eine Beschleunigung.



Abb. 5: Zeit-Ort-Marken eines bergab rollenden Fahrrades (Kartendaten ©2024 GeoBasis-DE/BKG (©2009) dld/by-2-0 (Daten verändert) Bilder ©2024 AeroWest, GeoBasis-DE/BKG, Maxar Technologies)

Eine weitere Auswertung in „Excel“ (siehe Abb. 6) zeigt eine konstante Beschleunigung mit $0,54 \text{ m/s}^2$, was nur etwa halb so groß ist, wie aufgrund der Hangabtriebskraft zu erwarten wäre ($0,99 \text{ m/s}^2$), was vor allem an der Rollreibung liegt.

Zur Aufnahme einer gleichmäßigen Kreisbewegung steht eine Person in der Mitte eines Kreises und hält das Ende eines Maßbands fest. Eine zweite Person hält in der einen Hand das andere Ende des Maßbandes und in der anderen Hand das Smartphone, um einen Kreis mit möglichst konstantem Tempo abzulaufen. Alternativ können Kreise auch vorher mit Seil und Kreide auf den Boden gezeichnet werden. Die

Größe der Radien sollte nicht zu gering gewählt werden; hier wurde ein Radius von circa 15 m gewählt. In „Excel“ ist es nun mit einem Makro möglich, Geschwindigkeits- und Beschleunigungspfeile in einem x-y-Diagramm an die aufgenommene Bahnkurve zu zeichnen (siehe Abb. 7). Man sieht, dass sich die Geschwindigkeit permanent ändert und dies eine Beschleunigung zum Kreisinneren ergibt. Eine entsprechende Excel-Vorlage gibt es unter <http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Smartphone-GPS.htm>.

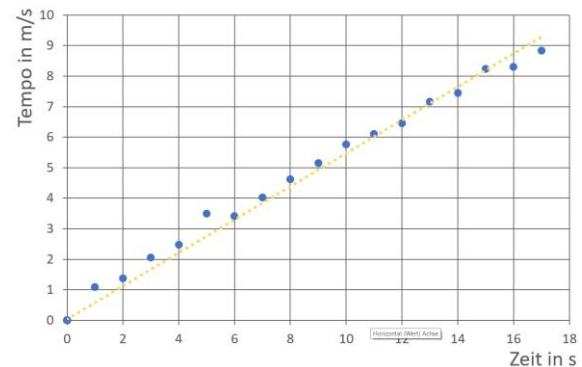


Abb. 6: Zeit-Geschwindigkeitsbetrag-Diagramm eines bergab rollenden Fahrrades

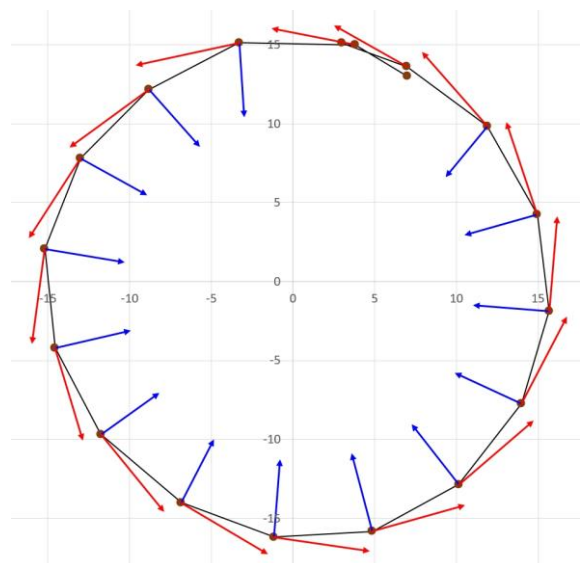


Abb. 7: x-y-Diagramm eines gelaufenen Kreises mit Geschwindigkeitspfeilen (rot) und Beschleunigungspfeilen (blau)

3. GPS-Positionen von Flugzeugen

3.1. Erfassen von Flugbewegungen für den Physikunterricht

Flugzeuge lassen sich täglich am Himmel beobachten. Es gibt heutzutage verschiedene Onlinedienste, die die GPS-Position von Flugzeugen in Echtzeit darstellen, z.B. „ADS-B Exchange“, „AirNav“ und „Flightradar24.com“. Bis auf wenige Ausnahmen senden alle modernen Verkehrsflugzeuge der zivilen Luftfahrt Signale über ADS-B-Sender (80 % in Europa und 60 % in den USA). Die Signale enthalten

unter anderem die GPS-Positionsdaten des Flugzeugs, aber auch zusätzliche Informationen wie Flugzeugtyp, Geschwindigkeitsbetrag, Höhe und Außen-temperatur. Diese Daten können von entsprechenden Empfängern empfangen und via Internet übertragen werden (Radarspotting).

Nach eigenen Angaben hat „Flightradar24“ weltweit über 20.000 ADS-B-Empfänger. Dadurch sind die meisten Regionen der Welt größtenteils und Europa und USA sogar komplett abgedeckt. Die ADS-B-Daten werden in Echtzeit ins Internet eingespeist – ausgenommen sind jedoch Daten der Federal Flight Administration, die aufgrund amerikanischer Regularien erst mit fünf Minuten Verzögerung angezeigt werden. Das betrifft aber hauptsächlich den nordamerikanischen Flugraum.

Von „Flightradar24“ existiert neben der Webanwendung zusätzlich eine App für Android und iOS. Die Basisversion der Anwendung, die für diese Anwendung ausreicht, ist kostenfrei, für zusätzliche Features kann ein Abo abgeschlossen werden.

So kann man mit „Flightradar24“ Flugbewegungen in Echtzeit am Bildschirm verfolgen. Macht man davon ein Bildschirmvideo, kann man dieses gut mit einer Videoanalysesoftware auswerten. Zum Aufnehmen von Bildschirmvideos gibt es viele Möglichkeiten. Das 2012 entstandene „Open Broadcaster Software Studio“ (OBS-Studio) ist Open Source und kostenlos erhältlich sowie auf den Plattformen Windows, MacOS, Linux und FreeBSD anwendbar. Mit dem Screen-Recorder lassen sich Desktopaufnahmen mit frei wählbarer Auflösung, Framerate und Formatausgabe erstellen.

Die entstandenen Videoaufnahmen werden mit einer Videoanalysesoftware analysiert und die Ergebnisse dargestellt. Auch wenn die Geschwindigkeit von Flugzeugen hoch ist, wirkt die Bewegung auf der Karte relativ langsam. Deshalb ist es sinnvoll, das Bildschirmvideo mit sehr geringer Framerate aufzunehmen und eine Videoanalysesoftware zu verwenden, die diese Framerate erkennt oder einstellen lässt. Hilfreich ist es auch, wenn man in der Videoanalysesoftware das Abspieltempo erhöhen kann oder einstellen kann, dass nur jede n-te Frame angezeigt wird. Optimal ist die Kombination von geringer Framerate und Anzeige jedes n-ten Frames. Hier wurde die Software „measure dynamics“ verwendet.

3.2. Beispiele

Für das erste Beispiel [11] wurde die Playback-Funktion von „Flightradar24“ genutzt, mit der sich bereits vergangene Flüge abspielen lassen. Somit ist bereits eine Bahnkurve sichtbar, an der ein kleines gelbes Flugzeug entlang fliegt (siehe Abb. 8). In Wirklichkeit handelt es sich hier um eine zweimotorige Piper PA31T Cheyenne II. Da die Bewegung von „Flightradar24“ bei der Playbackfunktion im Zeitraffer abgespielt wird, erhält man zu hohe Werte für Geschwindigkeit und Beschleunigung und kann die Videoanalyse nur noch qualitativ nutzen.

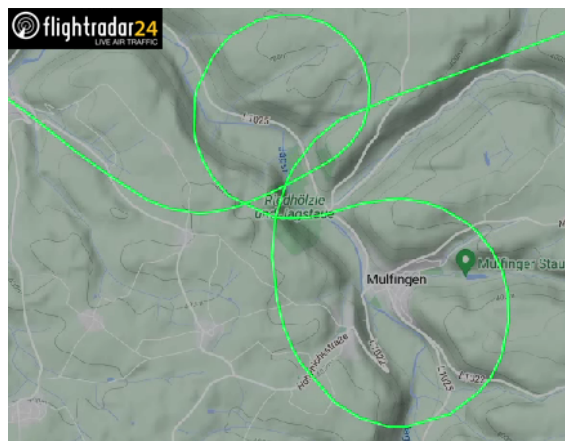


Abb. 8: Im Bildschirmvideo ist schon die exakte Bahnkurve eingezeichnet (mit freundlicher Genehmigung von [Flightradar24.com](https://www.flightradar24.com), Map data ©2024 GeoBasis-DE/BKG (©2009) dl-de/by-2-0 (Daten verändert))

Für die Abbildung 9 wurden in der Videoanalysesoftware in gewissen Abständen Ort und Geschwindigkeit berechnet. Schließlich wurden an jeden zweiten erfassten Ort orange Kreise als Zeit-Ort-Marken und blaue Pfeile als Geschwindigkeiten eingezeichnet. Die Geschwindigkeitspfeile zeigen damit die Bewegungsrichtung und das Tempo des Flugzeugs an. Man sieht, dass das Flugzeug mit hohem Tempo ankam und vor Beginn der Kurve langsamer wurde.

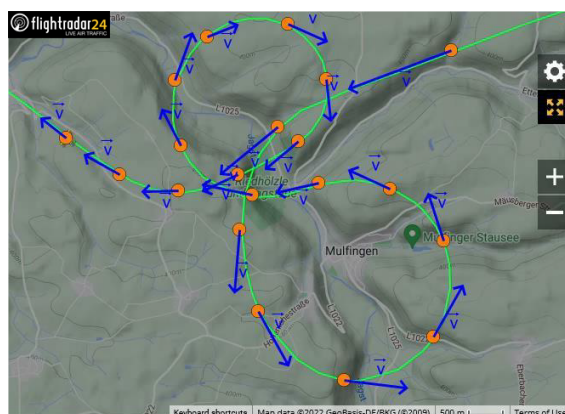


Abb. 9: Geschwindigkeitspfeile zeigen die Bewegungsrichtung und das Tempo des Flugzeugs (mit freundlicher Genehmigung von [Flightradar24.com](https://www.flightradar24.com), Map data ©2024 GeoBasis-DE/BKG (©2009) dl-de/by-2-0 (Daten verändert))

Die Abbildung 10 zeigt nun, wie an jedem Zeitpunkt aus der alten Geschwindigkeit (grün) des letzten Zeitpunktes und der aktuellen Geschwindigkeit (blau) die Geschwindigkeitsänderung (rot) berechnet wird, so dass gilt: $\vec{v} = \vec{v}_{alt} + \Delta\vec{v}$. Der Geschwindigkeitsänderungspfeil wurde zusätzlich noch ein zweites Mal direkt an die Zeit-Ort-Marke gezeichnet.

Abbildung 11 zeigt die Geschwindigkeit und die Beschleunigung bei diesem Flugmanöver.

Geradlinige beschleunigte Bewegungen von Flugzeugen findet man beim Start und bei der Landung. In Abbildung 12 sind die Geschwindigkeitspfeile und

Beschleunigungspfeile beim Start eines Flugzeugs im Abstand von zehn Sekunden eingezeichnet. Man erahnt, dass es sich in etwa um eine konstante Beschleunigung handelt.

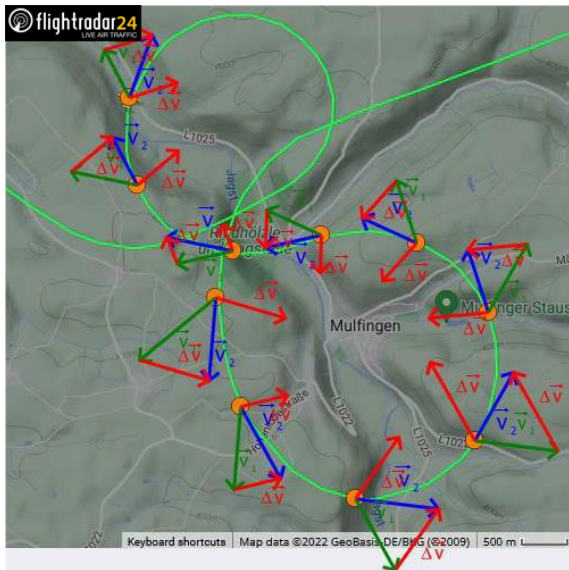


Abb. 10: Darstellung zur Erzeugung von Geschwindigkeitsänderungsvektoren (mit freundlicher Genehmigung von [Flightradar24.com](https://flightradar24.com), Map data ©2024 GeoBasis-DE/BKG (©2009) dl-de/by-2-0 (Daten verändert))

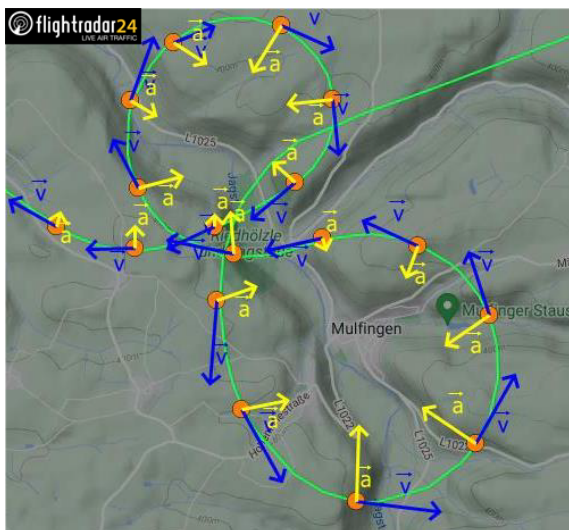


Abb. 11: Geschwindigkeitspfeile (blau) und Beschleunigungspfeile (gelb) der Bewegung des Flugzeugs (mit freundlicher Genehmigung von [Flightradar24.com](https://flightradar24.com), Map data ©2024 GeoBasis-DE/BKG (©2009) dl-de/by-2-0 (Daten verändert))

Abbildung 13 zeigt, wie der Geschwindigkeitsbetrag zunimmt. Allerdings ist der Wert unrealistisch, da Verkehrsflugzeuge mit einem Tempo zwischen 250 km/h = 70 m/s und 345 km/h = 96 m/s starten. Laut „Flightradar24.com“ handelt es sich um einen Airbus A320 214, der mit ca. 270 km/h = 75 m/s abhebt.

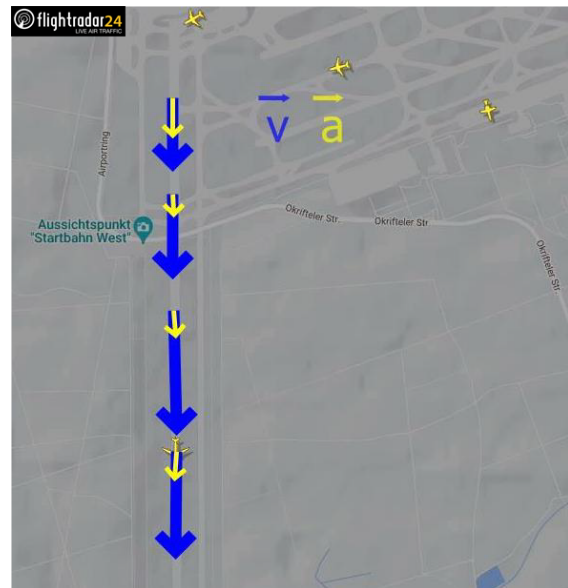


Abb. 12: Geschwindigkeitspfeile (blau) und Beschleunigungspfeile (gelb) beim Start eines Flugzeugs (mit freundlicher Genehmigung von [Flightradar24.com](https://flightradar24.com), Map data ©2024 GeoBasis-DE/BKG (©2009) dl-de/by-2-0 (Daten verändert))

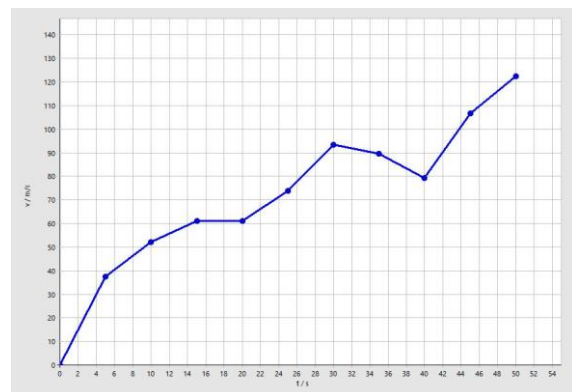


Abb. 13: Tempo beim Start eines Flugzeugs

In Abbildung 14 sind die Geschwindigkeitspfeile und Beschleunigungspfeile bei der Landung eines Flugzeugs eingezeichnet. Man sieht, wie das Tempo abnimmt und man kann vermuten, dass eine annähernd konstante Beschleunigung vorliegt.

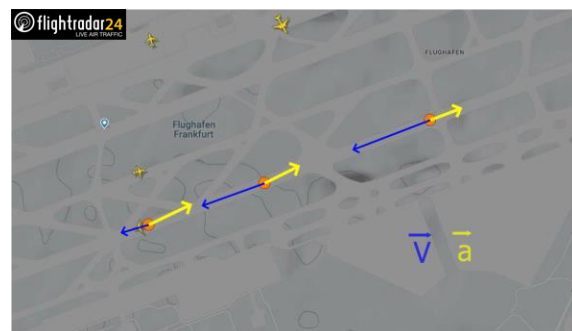


Abb. 14: Geschwindigkeitspfeile (blau)- und Beschleunigungspfeile (gelb) bei der Landung eines Flugzeugs (mit freundlicher Genehmigung von [Flightradar24.com](https://flightradar24.com), Map data ©2024 GeoBasis-DE/BKG (©2009) dl-de/by-2-0 (Daten verändert))

4. Fazit

Mit den heute zur Verfügung stehenden Apps und Programmen kann man großräumige Bewegungen aufzeichnen und im Physikunterricht auswerten, um so attraktive Bewegungen anschaulich zu analysieren. Eine Möglichkeit ist die Aufzeichnung eigener Bewegungen mit Apps auf dem eigenen Smartphone, eine andere Möglichkeit ist die Nutzung der aufgezeichneten Positionen von Flugzeugen. Leider gibt es aber noch keine App, in der die Datenaufnahme, Datenauswertung und Datendarstellung in der gleichen App so möglich ist, wie man das gerne für den Physikunterricht hätte.

5. Literatur

- [1] Wilhelm, Thomas (2021): Unterrichtskonzeptionen zur Kinematik. In: Wilhelm, Thomas; Schecker, Horst; Hopf, Martin (Hrsg.): Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht, Springer-Spektrum, S. 51 – 80, <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-63053-2>
- [2] Wilhelm, Thomas; Tobias, Verena; Waltner, Christine; Hopf, Martin; Wiesner, Hartmut (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 Grundlegungen, Fachdidaktische Forschungen, Band 2, Waxmann, Münster/New York/München/Berlin, S. 237 - 258
- [3] Spatz, Verena; Hopf, Martin; Wilhelm, Thomas; Waltner, Christine; Wiesner, Hartmut (2018): Eine Einführung in die Mechanik über die zweidimensionale Dynamik. Die Wirksamkeit des Design-Based Research Ansatzes, Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, Volume 24, Issue 1, S. 1 – 12, <https://rdcu.be/RwyO>
- [4] Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München (o.J.): LehrplanPLUS Bayern Gymnasium, <https://www.lehrplanplus.bayern.de/fachlehrplan/gymnasium/8/physik>
- [5] Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Schule und Berufsbildung (2023): Bildungsplan Gymnasium Sekundarstufe I Physik, <https://www.hamburg.de/re-source/blob/798534/4cf0047ad61ef-facd1ff7e6ad819fa41/physik-data.pdf>
- [6] Bundesministerium Bildung, Wissenschaft und Forschung (2023): Lehrplan der Allgemeinbildenden höheren Schule, https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblAuth/BGBLA_2023_II_1/Anlagen_0012_E1BFCE6_7E8B_4ACF_AEFD_3EC8_71222138.pdf
- [7] Gößling, A.; Becker, S.; Wilhelm, T.; Kuhn, J. (2023): Bewegungen analysieren mittels digitaler Videoanalyse. In: Wilhelm, T. (Hrsg.): Digital Physik unterrichten. Grundlagen, Impulse, Perspektiven, Klett Kallmeyer, Hannover, S. 40 – 70
- [8] Braun, M.; Wilhelm, T. (2008): Das GPS-System im Unterricht. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 57, Nr. 4, S. 20 - 27
- [9] Schüttler, M.; Wilhelm, T. (2011): Physik im Freizeitpark – Möglichkeiten und Vergleich von Beschleunigungs- und GPS-Messung sowie Videoanalyse. In: PhyDid-B - Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/238/410>
- [10] Zeder, Patrick (2023): Bewegungsaufnahmen mit GPS im Physikunterricht, Staatsexamensarbeit Goethe-Universität Frankfurt am Main, <http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Smartphone-GPS.htm>
- [11] Schauer, Lukas (2022): Analyse von Flugbewegungen mit Flightradar24, Staatsexamensarbeit Goethe-Universität Frankfurt am Main, <http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/flightradar24.htm>

Konzipierung und Erprobung einer Einführung in das Experimentieren mit der App phyphox

Marija Herdt*, Maria Hinkelmann*, Heidrun Heinke*

*I. Physikalisches Institut IA, RWTH Aachen University
Sommerfeldstraße 16, 52074 Aachen
herdt@physik.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Die App phyphox dient als mobiles Messinstrument und wird vermehrt in der Lehre eingesetzt. Sie findet aber auch bei außerschulischen MINT-Aktivitäten vielfältige Anwendungen. Im Rahmen einer Masterarbeit wurde ein vierwöchiger Kurs für eine MINT-AG im außerschulischen Bereich konzipiert, welcher in insgesamt sechs Stunden einen Einstieg in das Experimentieren mit phyphox bietet. Dieser Kurs soll möglichst motivierend und niederschwellig gestaltet sein und richtet sich an Schüler:innen der Jahrgangsstufen 7-10. Jeder der vier Bausteine fokussiert ein anderes Thema, das mit phyphox-Experimenten untersucht wird. Der erste Baustein besteht aus einem modularen Lernzirkel mit sechs Stationen und liefert Einblicke in die verschiedenen Sensoren des Smartphones und deren Nutzbarkeit in physikalischen Experimenten. In weiteren Bausteinen werden das Inhaltsfeld Akustik am Beispiel einer Flaschen-Panflöte behandelt und das Fadenpendel untersucht. Bei der Erprobung mit ca. 250 Schüler:innen hat sich gezeigt, dass insbesondere die 90-minütige einführende Lerneinheit auch im regulären Physikunterricht breite Einsatzmöglichkeiten finden kann. Die Konzeption der Kurs-Bausteine, ihre Erprobung und Weiterentwicklung im Rahmen des Design-Based Research-Ansatzes werden im Beitrag vorgestellt.

1. Motivation

Kinder und Jugendliche wachsen in einer Welt mit voranschreitender Digitalisierung auf und mobile Endgeräte sind aus ihrem Alltag nicht mehr wegzudenken: 99% der 12- bis 19-jährigen Jugendlichen haben in ihrem Haushalt Zugang zu einem Smartphone, 96% besitzen sogar ein eigenes Gerät, welches von 98% täglich oder mehrmals pro Woche genutzt wird (vgl. JIM¹-Studie 2023, S. 5, S. 7, S. 13).

Diese Entwicklung hat auch die schulische Lehre erreicht: Bereits an 44% der Gymnasien wird ein Tablet und an 39% ein Smartphone täglich oder mehrmals pro Woche im Unterricht eingesetzt (vgl. ebd., S. 59). Mit dem Einsatz von mobilen Endgeräten kann die Medienkompetenz und dabei speziell der reflektierte und zielgerichtete Umgang mit verschiedenen digitalen Werkzeugen geschult werden (vgl. Medienberatung NRW 2020).

Der MINT²-Bereich kann besonders von dieser Entwicklung profitieren, da das schwindende Interesse an den MINT-Fächern (vgl. Anger et al. 2023, S. 4), das oft in der Mittelstufe zu beobachten ist, durch das vorhandene Interesse an den erweiterten Möglichkeiten digitaler Medien gemindert oder aufgefangen werden kann.

Als digitales Werkzeug für das Experimentieren in physikalischen Kontexten bietet sich die App phyphox an, welche die Messdaten der in Smartphones integrierten Sensoren ausliest und verarbeitet (vgl.

Staacks 2018a, Staacks 2018b). Die Nutzung eines Alltagsgegenstandes in authentischen Kontexten aus der Lebensrealität von Kindern und Jugendlichen in naturwissenschaftlichen Experimenten kann sie dazu motivieren, sich mit den Inhalten auseinanderzusetzen. Vor diesem Hintergrund ist ein Kurs mit einer niederschweligen Einführung in die App phyphox im Rahmen eines außerschulischen Projekts namens „Labs on Tour“ (vgl. Hinkelmann et al. 2023) für MINT-interessierte Schüler:innen vorrangig aus den Jahrgangsstufen 7 bis 9 entwickelt worden (vgl. Herdt 2023).

2. Die App „phyphox“

phyphox steht für „physical phone experiments“ und ist eine kostenfreie App für Android und iOS zur flexiblen Messwertaufnahme mit Smartphones und Tablets. Sie nimmt Daten mit den Sensoren des Geräts (Beschleunigungssensor, Magnetometer, Gyroskop etc.) auf und macht diese durch numerische und graphische Auswertungen für vielfältige Experimente nutzbar. Dabei kann einerseits auf die Rohdaten der Sensoren zugegriffen werden, es ist aber auch möglich, vorgefertigte Experimentkonfigurationen z. B. zu einem Federpendel durchzuführen und dabei spezielle Abhängigkeiten zu untersuchen. Außerdem können neue Experimentkonfigurationen selbst erstellt oder bestehende angepasst werden. Über ein zweites Endgerät kann das Experiment auch mittels Fernzugriff gesteuert werden (vgl. Staacks et al.

¹ JIM – Jugend, Information, Medien

² MINT – Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften, Technik

2018b, S. 36). Die App wird seit 2016 im universitären Lehrbetrieb eingesetzt und wurde später auch auf den schulischen Kontext ausgeweitet. Sie soll den Lernenden einen einfacheren Zugang zum wissenschaftlichen Arbeiten bieten, aber auch ihre Motivation für die Auseinandersetzung mit naturwissenschaftlichen Inhalten steigern.

Die App phyphox kann dabei nicht nur auf die Daten der geräteinternen Sensoren von Smartphones und Tablets zugreifen, sondern auch die Messdaten externer Sensormodule über Bluetooth Low Energy in Experimente einbinden. Dies bietet verschiedene Vorteile, die z.B. den Zugang zu neuen Messgrößen, zu präziseren Messdaten oder eine kompaktere und/oder robustere Messsensorik umfassen (vgl. Dorsel 2020, Dorsel 2022). An der RWTH Aachen sind diverse externe Sensorboxen (vgl. Dorsel 2023) entwickelt worden. Hierzu gehört ein Sensormodul, das als sogenannte „Satellitenbox“ im Wesentlichen über vergleichbare Sensoren wie viele Smartphones verfügt, jedoch robuster ist und besser in Versuchsaufbauten integriert werden kann. Zusätzlich können Sensoren wie der Luftdrucksensor verwendet werden, welche nicht in allen Smartphones und Tablets verbaut sind. Weitere Sensormodule sind eine E-Lehre-Box, eine Wärmelehre-Box, eine Distanz-Box zur Messung von Entfernungen oder eine Messmodul zur Ermittlung der CO₂-Konzentration, wobei Letzteres als Selbstbausatz entwickelt wurde und von Schüler:innen ab Jahrgangsstufe 6 erfolgreich zusammengebaut und in Betrieb genommen wurde (vgl. Dorsel 2022, Dorsel 2023). Wie oben bereits erwähnt, lassen sich alle diese Sensorboxen einfach über die Bluetooth Low Energy Schnittstelle mit einem mobilen Endgerät mit der App phyphox verbinden.

3. Das Projekt „Labs on Tour“

„Labs on Tour“ ist Teil eines Verbundprojekts der RWTH Aachen University mit der StädteRegion Aachen und den Vereinigten Unternehmerverbänden (VUV) Aachen zur MINT-Interessenförderung von Jugendlichen im Freizeit- und Nachmittagsbereich (Hinkelmann et al. 2023). Dabei werden an verschiedenen Schulen in der Städteregion Aachen MINT-

AGs³ angeboten, die ihren Fokus nicht auf die Vermittlung von fachlichem Wissen, sondern auf die Steigerung der Motivation von Schüler:innen für MINT-Themen, den Abbau von Hemmschwellen und die Vermittlung von Freude an Naturwissenschaften legen (vgl. Hinkelmann et al. 2023, S. 439).

Das Angebot besteht aus drei thematisch verschiedenen Kursen pro Schulhalbjahr. Jeder Kurs beinhaltet vier 90-minütige Einheiten, die innerhalb eines sechswöchigen Zeitslots stattfinden und meist auf den Inhalten von Angeboten von Schülerlaboren der RWTH Aachen basieren und sich somit vom Schulunterricht unterscheiden. Eine Übersicht über das Konzept von „Labs on Tour“ ist in Abbildung 1 dargestellt. Die AG richtet sich im Regelfall an MINT-interessierte Schüler:innen der Jahrgangsstufen 7 bis 9, in Ausnahmen auch an die Jahrgangsstufe 10. Die Gruppenzusammensetzung ist dabei klassen- und auch jahrgangsstufenübergreifend, was sich auf die Gruppendynamik auswirkt und eine breite Heterogenität bedeutet. Bei der Konzipierung eines Kurses für „Labs on Tour“ ist darauf zu achten, dass „alle Aktivitäten möglichst zum Mitmachen und Ausprobieren anregen“ (ebd., S. 441). Besonders selbstständige und freie Arbeit, in der eigene Projekte zum Mitnehmen entwickelt werden können, wird von Schüler:innen willkommen geheißen. Auf dieser Grundlage ist für „Labs on Tour“ ein einsteigsfreundlicher Kurs zur App phyphox und zu ihren verschiedenen Anwendungen konzipiert worden, welcher den Schüler:innen besonders Möglichkeiten zum Nachmachen und weiteren Erforschen und Entdecken physikalischer Phänomene in ihrem Alltag bietet.

4 Inhalte des konzipierten Kurses

Ziel des Kurses ist es, Schüler:innen insbesondere im Bereich Physik mit Hilfe der App phyphox zum Experimentieren zu motivieren und ihr Interesse daran zu stärken.

Jede der vier Einheiten folgt der selben grundlegenden Struktur: Nach einem ca. 30-minütigen interaktiven Theorieteil, der gestützt durch eine Präsentation als Einführung in den behandelten Themenbereich dient, erfolgt eine praktische Phase, in der die Schü-

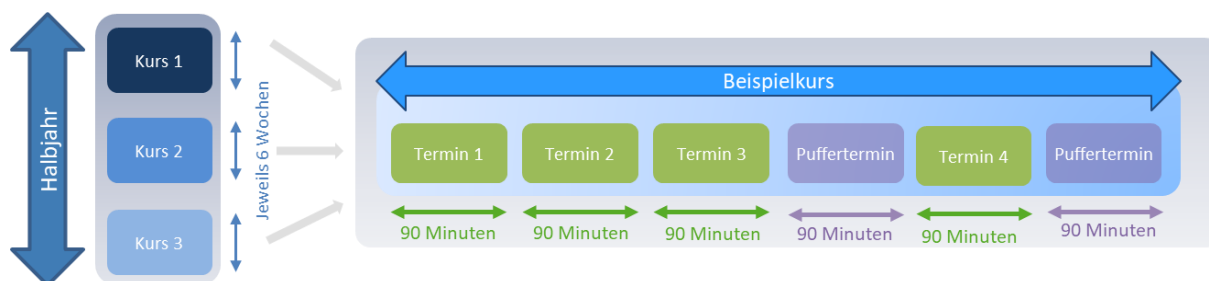


Abb. 1: Konzept der MINT-AG und ausgewählte Beispielpurse von Labs on Tour mit Inhalten aus den Schülerlaboren. Innerhalb von einem Halbjahr werden 3 Kurse aus verschiedenen Fachgebieten angeboten, die in einem Zeitraum von jeweils sechs Wochen mit vier Terminen zu je 90 Minuten stattfinden. Quelle: Abbildung nach Hinkelmann et al. 2023, S. 441.

³ AG – Arbeitsgemeinschaft

ler:innen in etwa 45 min verschiedene, teils selbst gewählte Versuche durchführen. Dadurch können die Schüler:innen in einem großen Anteil der Kurszeit aktiv und selbstständig arbeiten. Teilweise findet zum Schluss eine Sicherung mit einer Dauer von ungefähr 15 min statt. Außerdem werden den Schüler:innen am Ende weiterführende Aufgaben als sogenannte „Challenges“ präsentiert, die sie dazu animieren sollen, sich mit der App phyphox und damit zugänglichen physikalischen Fragestellungen im Alltag weiter auseinanderzusetzen und ihre Umwelt zu erforschen.

Die einzelnen Einheiten werden als Kurs-Bausteine bezeichnet, da ihre Reihenfolge, bis auf den ersten Baustein A, beliebig gewählt werden kann. Bisher sind drei Bausteine vollständig konzipiert und bereits erprobt worden, die in dem Beitrag beschrieben werden. Darüber hinaus gibt es einige Ideen für weitere Bausteine, die ebenfalls nachfolgend skizziert werden.

4.1 Baustein A: phyphox und die nutzbaren Sensoren

Im ersten Baustein erfolgt in Form eines modularen Lernzirkels eine Einführung in die App phyphox und in eine Auswahl von Sensoren, die von der App ausgelesen werden können.



Abb. 2: Lokalisierung des Magnetfeldsensors im Smartphone.

Der Baustein beginnt mit der Demonstration verschiedener Möglichkeiten, wie phyphox eingesetzt werden kann, und dem Sammeln von in Smartphones integrierten Sensoren in der Schülergruppe. Am Beispiel des Magnetfeldsensors wird anschließend der Umgang mit der App präsentiert, indem die Schüler:innen den Sensor in ihrem Endgerät mit Hilfe eines Magneten und eines Eisennagels lokalisieren (s. Abb. 2). Diese Einführung findet in der gesamten Gruppe von bis zu 30 Schüler:innen statt und dauert ca. 30 min. Danach begeben sich die Schüler:innen in Kleingruppen zu bis zu sechs zur Verfügung stehenden Stationen, die sie zur Bearbeitung frei wählen.

Die Stationen behandeln unterschiedliche Inhalte und greifen auf verschiedene Sensoren der Smartphones zu. So können die Schüler:innen die Geschwindigkeit

eines Aufzugs messen, die Drehgeschwindigkeit eines Fidget-Spinners bestimmen, Magnetfelder in ihrer Umgebung untersuchen oder ihren eigenen Puls sowie ihren Hörbereich mit dem Smartphone bestimmen. In diesem Baustein liegt der Fokus darauf, einen ersten Einblick in die App zu gewähren und den Umgang mit ihr zu üben. Im Sinne der Selbstbestimmungstheorie nach Deci und Ryan (vgl. Deci & Ryan 1993) werden zur Steigerung der Motivation der Schüler:innen an den Stationen einfache, gleichwohl fordernde Aufgaben bearbeitet (Kompetenzerleben). Außerdem suchen sich die Schüler:innen als Kleingruppe (soziale Zugehörigkeit) die Stationen, die sie bearbeiten möchten, selbst aus (Autonomie). Aus diesem Grund wurde auf eine gemeinsame Sicherung verzichtet. Jedoch werden den Schüler:innen am Ende weiterführende Aufgaben (Challenges) für zu Hause präsentiert, die diese bei Interesse bis zum nächsten AG-Termin bearbeiten können.

4.2 Baustein B: phyphox und Musik

Im Baustein B wird Physik mit Musik verbunden, indem die Schüler:innen eine „Flaschen-Panflöte“ (s. Abb. 3), bei ersten Durchführungen „Flaschen-Xylophon“ genannt, als Musikinstrument mit Hilfe von phyphox stimmen und als Gruppe ein Musikstück einüben.



Abb. 3: Eine Flaschen-Panflöte.

Zu Beginn wird als Vorbereitung auf den praktischen Teil eine Einführung zum Thema Akustik gegeben. Hier werden die Schallentstehung und -ausbreitung behandelt sowie das Verständnis hinter den unterschiedlichen Tonhöhen und Frequenzen wiederholt. Letzteres wird mit Hilfe eines kurzen Schülerversuchs beim Schwingen unterschiedlich langer Lineale verdeutlicht. Der physikalische Hintergrund wird anschließend durch einen musikalischen Input bezüglich der Noten und ihrer Benennungen ergänzt.

Mit diesen Grundlagen sollen die Schüler:innen dann unter Nutzung von phyphox die Flaschen-Panflöte erstellen, welche aus mehreren Flaschen mit unterschiedlichen Füllständen besteht. Beim Pusten über den Flaschenhals entsteht ein Ton, dessen Frequenz mit Hilfe der App bestimmt werden kann. Als Kleingruppe studieren die Schüler:innen schließlich ein bekanntes Lied auf ihrer Flaschen-Panflöte ein, welches

sie den anderen Kleingruppen vorspielen. Diese müssen das Lied erraten. Erneut schließt die Einheit mit zusätzlich vorgestellten Challenges, hier im Bereich Akustik, ab.

4.3 Baustein C: phyphox und die Schaukel

Baustein C behandelt die Untersuchung von Einflüssen auf die Schwingung eines Fadenpendels im Kontext einer Schaukel.



Abb. 4: Ein Fadenpendel mit einem Smartphone als schwingende Masse.

Zuerst werden Beispiele verschiedener Fadenpendel aus dem Alltag der Schüler:innen gesammelt. Danach wird besprochen, wie ein Pendel physikalisch beschrieben werden kann, wobei besonders auf die Periodendauer eingegangen wird. In der praktischen Phase stellen die Schüler:innen Hypothesen auf, welche Faktoren einen Einfluss auf die Periodendauer einer Schaukel haben, und untersuchen anschließend experimentell die Abhängigkeiten der Periodendauer von der Masse, der Fadlänge und der Größe der Auslenkung (s. Abb. 4). Ihre Ergebnisse werden gemeinsam in der Sicherung besprochen und Schlüsse zu den Ausgangshypothesen gezogen. Zum Schluss werden die Schüler:innen dazu aufgefordert, eine reale Schaukel auf einem Spielplatz in ihrer Freizeit mit phyphox zu untersuchen.

4.4 Weitere mögliche Bausteine

Es sind bereits drei Kurs-Bausteine ausgearbeitet worden. Obgleich für die Ausgestaltung eines Moduls von „Labs on Tour“ nur vier Bausteine notwendig wären, soll mit einer größeren Vielfalt von Bausteinen für Betreuer:innen und/oder die Schüler:innen der Freiraum geschaffen werden, aus einem Material-Pool je nach Bedarf, Interesse und Kenntnisstand der Schüler:innen eine Auswahl treffen zu können. Es wird erwartet, dass diese Vorgehensweise motivationsförderlich wirkt.

So können beispielsweise in Anlehnung an Bouquet et al. (vgl. Bouquet et al. 2020) unterschiedliche Wege zur Bestimmung einer Höhe oder analog der Erdbeschleunigung behandelt werden. Damit soll

aufgezeigt werden, wie vielfältige Wege bei der Lösung eines experimentellen Problems gewählt werden können. Gleichzeitig werden physikalisches Wissen vermittelt sowie insbesondere die Kreativität der Schüler:innen bei der Planung und Durchführung von Experimenten gefördert.

Analog zu Baustein C ist auch die Untersuchung der Einflüsse verschiedener Größen auf die Periodendauer eines Federpendels umsetzbar. Hier können Alltagsgegenstände wie ein Haargummi als Federpendel zum Einsatz kommen, um den Alltagsbezug der physikalischen Phänomene noch sichtbarer zu machen. Ein Baustein zum Federpendel kann entweder ergänzend zum Baustein C zum Fadenpendel eingesetzt werden, so dass man auf gemeinsame physikalische Grundlagen zurückgreifen kann. Beide Bausteine können aber auch alternativ den Schüler:innen im Sinne der Möglichkeit der autonomen Entscheidung der Lernendengruppe und damit der Motivationsförderung zur Wahl gestellt werden.

phyphox bietet zudem durch die in Abschnitt 2 beschriebene Möglichkeit des Einsatzes externer Sensorboxen weitere vielfältige Zugänge zu Schülerexperimenten. Deshalb kann eine Einführung in solche externen Sensormodule in Kombination mit der Behandlung spezieller Themen passend zu einem gewählten Sensormodul eine Vielzahl an Möglichkeiten zu neuen Kurs-Bausteinen eröffnen. Insbesondere lässt sich so auch ein fächerübergreifender Baustein konzipieren, der beispielsweise Inhalte der Physik und Biologie oder aus dem Bereich Sport miteinander verbindet.

5. Einsatz und Evaluation

5.1 Rahmenbedingungen der Erprobung

Der gesamte Kurs bzw. Teile davon wurde(n) in unterschiedlichen Lernsettings erprobt. Baustein A ist mit 13 Gruppen von insgesamt 259 Schüler:innen der Jahrgangsstufen 7 bis 10 erprobt worden: Drei Erprobungen haben dabei im Rahmen von „Labs on Tour“ stattgefunden, zwei Durchführungen fanden in Ferienangeboten statt, während acht Gruppen den Baustein im unterrichtlichen Kontext bearbeitet haben. Auf diesen Baustein ist in der Erprobung ein Fokus gesetzt worden, da dieser die Grundlage des Kurses darstellt und besonders wichtig für eine Einführung in das Experimentieren mit der App phyphox darstellt. In dieser Erprobung hat sich auch ergeben, dass der Baustein A nach Meinung der involvierten Lehrkräfte ebenso breite Einsatzmöglichkeiten im Physikunterricht bietet.

Baustein B ist in 2 Gruppen (1x „Labs on Tour“, 1x Ferienangebot) mit 16 Schüler:innen durchgeführt worden. Baustein C wurde bisher in einer Gruppe von 9 Schüler:innen im Rahmen von „Labs on Tour“ eingesetzt.

Nach jedem Termin wurde ein Feedback-Bogen mit den offenen Fragen „Was hat dir an diesem Termin (nicht) gut gefallen?“ ausgefüllt und mit Hilfe der

qualitativen Inhaltsanalyse nach Kuckartz untersucht (vgl. Kuckartz 2016). Aus den Antworten sind induktiv Kategorien gebildet worden, denen die einzelnen Codiersegmente zugeordnet wurden. Ausgehend von der Anzahl an Codiersegmenten je Kategorie konnten so Schlüsse aus den Erprobungen gezogen werden. Diese Schlüsse sind in die Weiterentwicklung der Kurs-Bausteine in mehreren Überarbeitungszyklen nach dem Design-Based Research-Ansatz (vgl. Reinmann 2017) eingeflossen.

5.2 Erkenntnisse aus der Erprobung

Aus den Erprobungen konnten vielfältige Erkenntnisse besonders zum Baustein A gezogen werden. Aufgrund der geringen Stichprobe bei der Erprobung der Bausteine B und C sind Ergebnisse hierzu mit Bedacht zu betrachten.

Insgesamt war das Feedback zu den Kurs-Bausteinen positiv. Dies wird unter anderem an der mittleren Anzahl an geschriebenen Wörtern im Feedback deutlich, die für das positive Feedback deutlich höher ist als für das negative (je nach Baustein liegt der Faktor zwischen 1,7 und 3). Es besteht insbesondere ein hohes Interesse seitens der Schüler:innen an den vorgestellten Inhalten. In einem Projekt oder Ferienangebot, das sich an MINT-interessierte Schüler:innen richtet und den Fokus auf Interessenförderung legt, ist ein eher positives Feedback diesbezüglich zu erwarten gewesen. Da aber insbesondere der Kurs-Baustein A nicht nur im außerschulischen Bereich durchgeführt wurde, sondern zum Großteil im unterrichtlichen Kontext mit sehr heterogenen Klassen, ist diese Erkenntnis besonders bemerkenswert. Hier kann davon ausgegangen werden, dass zu einem gewissen Grad eine Motivierung stattgefunden hat, sodass es vielversprechend erscheint, mindestens diesen Kurs-Baustein genauso umfassend im Unterricht einzusetzen. Auch von den Lehrkräften kam eine positive Resonanz bezüglich eines möglichen Einsatzes im Unterricht.

Von den Schüler:innen wurden zudem der hohe Grad der Selbstständigkeit im Kurs und der hohe Anteil an praktischer Arbeit positiv bewertet, genauso wie die Vielfalt der gewählten Themen und Experimente.

Teilweise traten jedoch (Verständnis-)Probleme auf und ein hoher Schwierigkeitsgrad ist zurückgemeldet worden. Dieses Feedback wurde in die neuen Versionen der Arbeitsblätter eingearbeitet.

Des Weiteren wurde ein Wunsch nach einer Sicherung geäußert. Deshalb wurden Lösungsblätter zu den einzelnen Stationen des Kurs-Bausteins A erstellt.

Schließlich wurde das Flaschen-Xylophon aufgrund der irreführenden Namensgebung bezüglich der vorgesehenen Spielweise des Musikinstruments in Flaschen-Panflöte umbenannt.

6. Ausblick

Der konzipierte Kurs, der als Einführung in das Experimentieren mit phyphox dienen soll, hat sich mit

seinen einzelnen Bausteinen nicht nur im außerschulischen, sondern auch im unterrichtlichen Kontext als erfolgreich erwiesen. Aus diesem Grund wird insbesondere der Kurs-Baustein A in Zukunft genauer ausgearbeitet und sein Einsatz untersucht. Der Baustein bietet durch die freie Wahl der Stationen und das Arbeiten in Kleingruppen ein hohes Maß an Selbstbestimmung und sozialer Zugehörigkeit, was eine positive Wirkung auf die Motivation bei Schüler:innen im Physikunterricht erwarten lässt. Inwiefern diese Erwartung erfüllt wird, soll in Zukunft gezielt untersucht werden. Deshalb wird der modulare Lernzirkel mit zusätzlichen Stationen erweitert, sodass den Schüler:innen eine größere Auswahl zur Verfügung steht, und es werden weitere Erprobungen folgen.

Außerdem sollen zukünftig Lehrkräfte bezüglich ihrer Einstellung zu Smartphone-Experimenten im Unterricht vor und nach einer derartig niederschweligen Einführung befragt werden. Dabei interessiert insbesondere, ob das Erleben des Lernzirkels und der damit verbundenen Vielfalt von Smartphone-Experimenten zu einem möglichen Wandel in der Akzeptanz solcher Experimente führen kann. In Verbindung damit lässt sich nach dem unterrichtlichen Einsatz der Einführung in Smartphone-Experimente die Häufigkeit der Nutzung von Smartphone-gestützten Experimenten im Verlauf eines Schuljahres festhalten.

7. Literatur

- Anger, C; Betz, J. & Plünnecke, A. (2023). MINT-Frühjahrsreport 2023. MINT-Bildung stärken, Potenziale von Frauen, Älteren und Zuwandernden heben. Gutachten für BDA, Gesamtmetall und MINT Zukunft schaffen. Köln: Institut der deutschen Wirtschaft.
- Bouquet, F.; Bobroff, J.; Kolli, A. & Organtini, G. (2020). 61 ways to measure the height of a building: an introduction to experimental practices. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.11606>.
- Deci, E. L. & Ryan, R. M. (1993). Die Selbstbestimmungstheorie der Motivation und ihre Bedeutung für die Pädagogik. In: Zeitschrift für Pädagogik, 39 (2), S. 223-238. Weinheim/Basel: Beltz Juventa. DOI: <https://doi.org/10.25656/01:11173>.
- Dorsel, D.; Krampe, A.; Staacks, S.; Heinke, H. & Stampfer, C. (2020). phyphox als Visualisierungstool für Sensordaten aus Arduino-gestützten Messmodulen. PhyDid B - Didaktik Der Physik - Beiträge Zur DPG-Frühjahrstagung, 1, S. 305-308. Abgerufen am 22.05.2024 von <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1051>.
- Dorsel, D.; Staacks, S.; Heinke, H.; Stampfer, C.; Kuhn, J. & Wilhelm, T. (2022). Visualisierung von Messdaten eigener Sensormodule mit phyphox. In: Physik in unserer Zeit, 53 (3), S. 151-152. DOI: <https://doi.org/10.1002/piuz.202270310>.

- Dorsel, D. (2023). Entwicklung der Nutzbarkeit externer Sensoren bei Smartphone-Experimenten und deren Einsatz in naturwissenschaftlichen Experimenten. Dissertation. II. Physikalisches Institut IIA der RWTH Aachen University.
- Herdt, M. (2023). Konzipierung und Erprobung eines Kurses mit phyphox-Experimenten im außerschulischen Bereich. Masterarbeit. I. Physikalisches Institut IA der RWTH Aachen University.
- Hinkelmann, M.; Heinke, H. & Winkens, T. (2023). Labs on Tour. MINT-Angebote im Nachmittags- und Freizeitbereich. *PhyDid B - Didaktik Der Physik - Beiträge Zur DPG-Frühjahrstagung*, 1(1), S. 439-444. Abgerufen am 22.05.2024 von <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1394>.
- JIM-Studie; Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest (2023). JIM-Studie 2023 - Jugend, Information, Medien. Abgerufen am 11.12.2023 von https://www.mpfs.de/fileadmin/files/Studien/JIM/2022/JIM_2023_web_final_kor.pdf.
- Kuckartz, U. (2016). *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. Weinheim und Basel: Beltz Juventa.
- Medienberatung NRW (2020). *Medienkompetenzrahmen NRW*. Abgerufen am 18.12.2023 von https://medienkompetenzrahmen.nrw/fileadmin/pdf/LVR_ZMB_MKR_Rahmen_A4_2020_03_Final.pdf.
- Reinmann, G. (2017). Design-based Research. In: Schemme, D. & Novak, H. (Hrsg.). *Gestaltungsorientierte Forschung – Basis für soziale Innovationen. Erprobte Ansätze im Zusammenwirken von Wissenschaft und Praxis*, S. 49-61. Bielefeld: Bertelsmann.
- Staacks, S.; Hütz, S.; Heinke, H. & Stampfer, C. (2018a). Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox. In: *Physics Education*, 53. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aac05e>.
- Staacks, S.; Heinke, H. & Stampfer, C. (2018b). Smarte Experimente. In: *Physik Journal*, 17 (11), S. 35-38. Weinheim: WILEY-VCH.

phyphox: Eine Sensorkette als DIY-Projekt – orts aufgelöste Messung von Beschleunigung und Temperatur

- Vorstellung und Ergebnisse erster Tests -

Johannes Schlaf*, Dominik Dorsel⁺, Sebastian Staacks⁺, Heidrun Heinke*

*I. Physikalisches Institut IA, RWTH Aachen University

⁺II. Physikalisches Institut A, RWTH Aachen University

schlaf@physik.rwth-aachen.de, dorsel@physik.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Mithilfe der Smartphone-App phyphox wird das eigene Smartphone über die internen Sensoren zum mobilen Messinstrument. Zudem können über Bluetooth Low Energy externe Sensoren verbunden und in Echtzeit ausgelesen werden. Um auch eine orts aufgelöste Messung physikalischer Größen zu ermöglichen, wurde eine an phyphox koppelbare Sensorkette entworfen und erfolgreich getestet. Für jede mit der Kette messbare Größe existiert ein designiertes, hinsichtlich der Darstellung der Messdaten optimiertes phyphox-Experiment. Aktuell sind orts aufgelöste Messungen von Beschleunigung und Temperatur möglich, wofür erste Anwendungsbeispiele (Schwingung einer Slackline, Temperaturgradient) präsentiert werden. Die Einbindung weiterer Sensoren ist geplant. Die Kette ist als DIY-Projekt mit 3D-druckbaren Gehäusen konzipiert, wobei die zugehörige Bauanleitung so ausgelegt ist, dass sie auch für Anfänger im 3D-Druck und im Programmieren leicht zugänglich ist.

1. Hintergrund

1.1. Allgemeines zu phyphox

Smartphones verfügen über verschiedene interne Sensoren, welche von entsprechenden Apps wie z.B. phyphox ausgelesen werden können [1][2][3]. Kombiniert mit ihrer kompakten Größe bieten sie daher vielfältige Möglichkeiten zum Experimentieren. So kann z.B. die Zentripetalbeschleunigung in einer Salatschleuder gemessen werden oder durch die gleichzeitige Verwendung von Lautsprecher und Mikrofon ein Sonar simuliert werden [4]. Im Unterricht bieten Smartphones zudem den Vorteil, dass etwa 96 % aller Jugendlichen zwischen zwölf und 19 Jahren über ein solches Gerät und somit über ihr eigenes mobiles Messinstrument verfügen [5].

Die App phyphox wird an der RWTH Aachen entwickelt. Neben der Bereitstellung und der graphischen Auftragung der Rohdaten bietet sie auch kontextspezifische Experimente, wie z.B. die Bestimmung der Frequenz eines Federpendels [4]. Zudem können über Bluetooth Low Energy (BLE) externe Sensormodule an phyphox gekoppelt werden [6]. Dies bietet den Vorteil, Sensoren auch in Aufbauten zu integrieren, welche für Smartphones nicht geeignet sind. Entsprechende Module können mit etwas Programmierfahrung unter Einsatz der hierfür bereitgestellten Arduino-Bibliothek phyphoxBLE auch selbst kreiert werden. Dies bietet die interessante Option, externe Sensoren als DIY-Projekt (DIY = do it yourself) im naturwissenschaftlichen Unterricht einzusetzen [7]. Dies ist in der Regel preisgünstiger als vergleichbare Instrumente von Lehr-

mittelherstellern, zumal auch ggf. notwendige Reparaturen selbst durchgeführt werden können. Die SuS (Schülerinnen und Schüler) können im Rahmen des Zusammenbaus der Sensormodule an Formgebungsverfahren wie den 3D-Druck sowie an die Programmierung von Mikrocontrollern herangeführt werden. Der Zusammenbau dürfte sich als aktiv-handwerkliche Tätigkeit zudem positiv auf das Schülerinteresse auswirken [8].

1.2. Entwicklung der Sensorkette

Die Idee zur Entwicklung einer Sensorkette entstammt einer Kooperation des phyphox-Teams mit dem Deutschen Museum München, in Zuge derer ein an phyphox koppelbares Instrument zur simultanen Messung der Transversalschwingung an verschiedenen Orten entlang der Längsachse eines Exponats einer Brückenausstellung entwickelt werden sollte. Um die technische Umsetzung möglichst einfach zu halten und gleichzeitig eine zuverlässige Synchronisation der orts aufgelösten Messdaten in phyphox zu erreichen, wurde statt des Einsatzes mehrerer separat gekoppelter Sensoreinheiten der Einsatz einer Sensorkette mit einer zentralen Schnittstelle favorisiert.

Da derzeit kein Lehrmittelhersteller ein ähnliches Produkt anbietet, bot es sich hiervon ausgehend an, die Sensorkette als modulares, mit weiteren Sensoren versehenes System für den Einsatz im Schulunterricht weiterzuentwickeln. Dieses kann orts aufgelöste Messungen verschiedener physikalischer Größen wie Beschleunigung, Temperatur, Druck und Licht sowie von Schallwellen durch das Sammeln der Messdaten

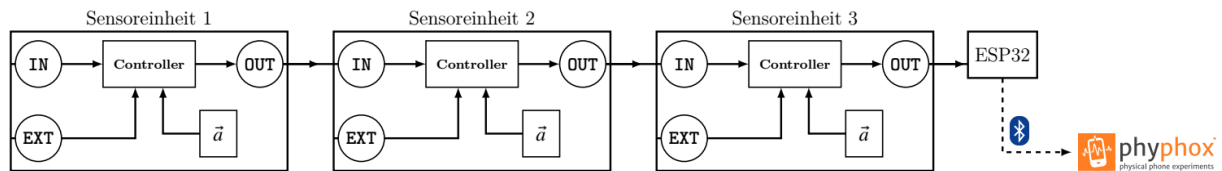


Abb. 1: Datenfluss in der Sensorkette (exemplarisch für drei angeschlossene Sensoreinheiten).

an einer einzigen Schnittstelle und die Visualisierung der Daten auf dem Smartphone der SuS erheblich vereinfachen.

Die Entwicklung des in diesem Beitrag vorgestellten Prototypen geschah im Rahmen einer Masterarbeit. Die Bauanleitung für den Prototypen ist auf Github verfügbar [9].

2. Umsetzung

2.1. Grundlegende Funktionsweise

Die Sensorkette setzt sich aus mehreren sogenannten Sensoreinheiten zusammen, welche wiederum aus einem Mikrocontroller und einem oder mehreren Sensoren bestehen (siehe auch Kapitel 2.4). Jede Sensoreinheit besitzt jeweils einen Dateneingang und einen Datenausgang. Es können bis zu zehn Sensoreinheiten zu einer Kette zusammengeschaltet werden. Am Ende der Kette (d.h. am unbelegten Datenausgang) befindet sich ein einzelner BLE-fähiger ESP32-Mikrocontroller (BLE = Bluetooth Low Energy), der sowohl die Spannungsversorgung als auch die Übertragung der Messdaten an phyphox übernimmt (siehe Abb. 1).

Wird die Sensorkette durch das Anschließen einer Spannungsversorgung eingeschaltet, prüft der Mikrocontroller jeder Sensoreinheit zunächst, ob eine Sensoreinheit am Dateneingang vorgeschaltet ist. Hierbei können zwei Fälle auftreten:

- Die Sensoreinheit befindet sich am Kopf der Kette. Der Mikrocontroller übernimmt dann die Taktung, d.h. Messdaten werden mit einer einprogrammierten Frequenz (50 Hz für die Beschleunigungsmessung, 1 Hz für die Temperaturmessung) aus dem entsprechenden Sensor gelesen und an die nächste Sensoreinheit weitergegeben.
- Die Sensoreinheit befindet sich nicht am Kopf der Kette. Der Mikrocontroller liest dann einen Messwert aus dem entsprechenden Sensor aus und wartet auf ein Datenpaket von der vorgeschalteten Sensoreinheit. Der Mikrocontroller hängt den Messwert an das Datenpaket an und gibt dieses an die nächste Sensoreinheit weiter. Anschließend wird ein weiterer Messwert ausgelesen und auf das nächste Datenpaket gewartet.

Der Mikrocontroller am Ende der Kette gibt die Daten über BLE an phyphox weiter.

2.2. Auslegung aus DIY-Projekt

Da die meisten der bisher vom phyphox-Team entwickelten externen Sensormodule nur ausgeliehen und nicht käuflich erworben werden können, wurde die Sensorkette als DIY-Projekt ausgelegt. Die zuge-

hörige Bauanleitung sowie der für die Programmierung notwendige Code stehen online kostenlos zur Verfügung. Kombiniert mit der passenden Komponentenwahl (siehe Kapitel 2.4) sorgt dies für eine hohe Verfügbarkeit und einen vergleichsweise niedrigen Preis (siehe Kapitel 4.1). Zudem besteht die Möglichkeit, die Sensorkette im Rahmen eines Unterrichtsprojekts zusammenzubauen und den SuS somit die Chance zu geben, sich näher mit Programmierung und 3D-Druck (siehe nächstes Unterkapitel) zu befassen.

2.3. Designentscheidungen

Das Projekt verfolgt das Ziel eines möglichst einfachen, auch für (programmier-)technisch weniger versierte SuS und Lehrkräfte machbaren Zusammenbaus. Zudem soll der Wartungsaufwand möglichst geringgehalten werden. Daher wurde ein Design entwickelt, welches durch die Verwendung von Entwicklerplatinen und Steckbrückenkabeln den Löt Aufwand minimiert und den schnellen Austausch von Bauteilen erleichtert (siehe Abb. 2). Zudem erfolgt die Bauteilfixierung ausschließlich durch Schraub- oder Steckverbindungen (siehe Abb. 3).

Zur Signal- und Spannungsweitergabe zwischen den Boxen werden Klinkenkabel (\varnothing 3,5 mm) verwendet. Diese bieten den Vorteil eines schnellen Auf- und

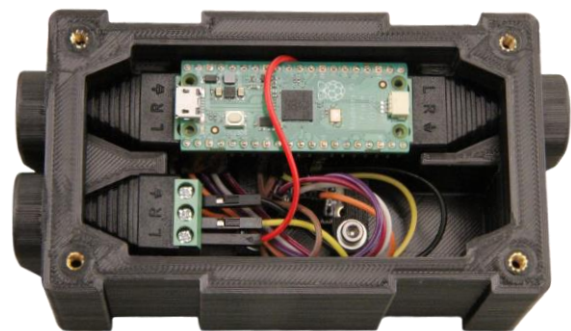


Abb. 2: Sicht von oben auf die offene Sensorbox.

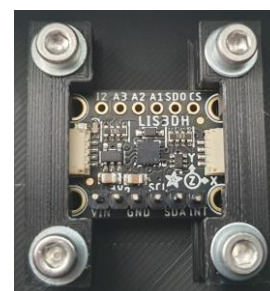


Abb. 3: Befestigung des Beschleunigungssensors durch 3D-gedruckte Schraubklemmen.

Abbaus der Sensorkette und sowohl Kabel, Buchsen als auch anlötbare Stecker (siehe Kapitel 3.2) sind einfach verfügbar.

Um die nachträgliche Anbindung von Sensoren für die Sensorkette zu ermöglichen, wurden die einzelnen Sensoreinheiten mit einer Schnittstelle für externe Sensoren versehen (siehe Abb. 1 und 3). Zudem können auf diese Weise auch Sensoren angebunden werden, deren Unterbringung innerhalb des Gehäuses wenig sinnvoll wäre (z.B. Temperatursensoren). Die Signalweitergabe erfolgt auch hier über Klinkenkabel. Der in der Sensoreinheit verbauter Mikrocontroller erkennt automatisch die Anbindung eines externen Sensors und passt die Datenrate der Messung entsprechend an.

Das Gehäuse der einzelnen Sensoreinheiten („Sensorbox“) wurde als 3D-Druck konzipiert, da mit diesem Verfahren die auf die einzelnen Komponenten angepassten Geometrien zur Realisierung der Steckverbindungen in einem Druck generiert werden können. Zudem weist der 3D-Druck im Schulkontext eine zunehmende Relevanz auf, was beispielsweise von der Herausgabe einer diesbezüglichen Handreichung durch das Landesinstitut für Schule des Landes Nordrhein-Westfalen unterstrichen wird [10].

2.4. Verwendete Komponenten

Bei der Wahl der Komponenten wurde auf eine breite und möglichst beständige Verfügbarkeit geachtet:

Als Spannungsversorgung und Bluetooth-Schnittstelle wurde ein in Arduino programmierbarer ESP32-Mikrocontroller gewählt, da für Arduino bereits eine passende Bibliothek zur Anbindung an phyphox existiert. Als Mikrocontroller für die Sensorboxen wird ein Raspberry Pi Pico genutzt.

Zur Beschleunigungsmessung kommt ein Triaxial-Beschleunigungssensor des Typs LIS3DH zum Einsatz, welcher innerhalb der Sensorboxen verbaut wird. Zur Temperaturmessung wird der TC-9445340-Temperatursensor von Tru Components verwendet. Hierzu muss an den Sensor lediglich ein Klinkenstecker sowie ein Widerstand angelötet werden. Er ist dann als externer Sensor nutzbar.

2.5. Umsetzung in phyphox

Die Ansteuerung der Sensorkette erfolgt über sensor-spezifische phyphox-Experimente. Diese rechnen die über BLE erhaltenen Messdaten von Bits in die jeweilige physikalische Einheit um und visualisieren die Messdaten in messgrößenspezifischen Darstellungen unterschiedlicher Komplexitätsgrade. Letzteres erfolgt mit dem Ziel, die graphische Darstellung für möglichst viele Alters- und Erfahrungsstufen sowohl zugänglich als auch interessant zu gestalten.

2.5.1. Laterale Darstellung

In dieser Darstellung werden die aktuellen Messwerte über der Sensorposition in der Kette (Zahl von 1-10) aufgetragen (siehe Abb. 4). Die favorisierte Darstellungsweise ist hierbei ein Scatterplot, was allerdings für die Darstellung von sich typischerweise schnell

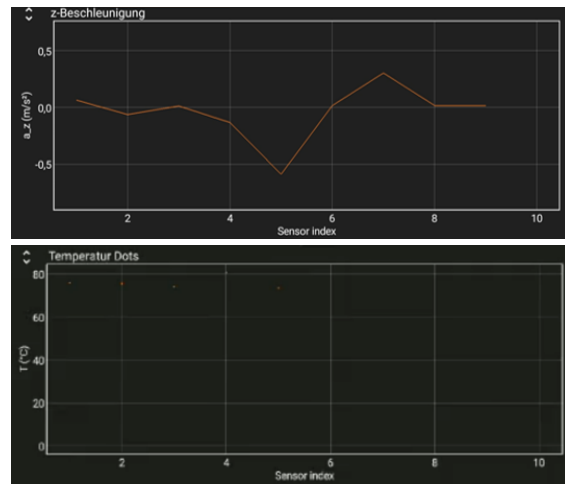


Abb. 4: Laterale Darstellung von Messdaten für Beschleunigung (oben) und Temperatur (unten).

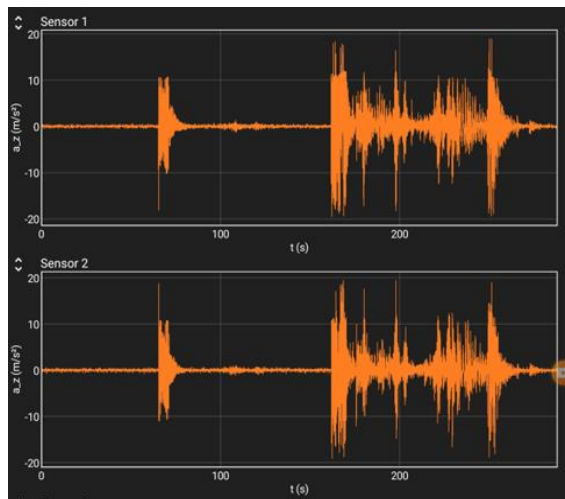


Abb. 5: Zeitliche Darstellung einer Beschleunigungsmessung.

ändernden Signalen (wie bei der Schwingung einer Slackline) unpraktikabel ist. Daher werden die Messpunkte bei der Auftragung von Beschleunigungswerten verbunden.

2.5.2. Zeitliche Darstellung

In dieser Darstellung wird der zeitliche Verlauf der Messdaten jeder Sensoreinheit separat aufgetragen (siehe Abb. 5). Aus Gründen einer besseren Übersicht werden auch hier die Messpunkte miteinander verbunden.

2.5.3. Falschfarbendarstellung

In dieser Darstellung werden die laterale und die zeitliche Darstellung kombiniert. Hierbei wird auf der horizontalen Achse die Sensorposition und auf der vertikalen Achse die Zeit aufgetragen. Der jeweilige Messwert wird anhand einer Farbskala aufgetragen.

Die Standard-Farbskala in phyphox besteht aus einem Schwarz-Orange-Weiß-Verlauf (siehe Abb. 6). Aufgrund der Helligkeitsunterschiede entlang der Skala ist dieser auch für Farbenblinde zugänglich. Für die Darstellung von Temperaturverläufen wurde in dem

entsprechenden phyphox-Experiment zusätzlich eine Darstellung mit dem typischen Blau-Grün-Gelb-Rot-Farbverlauf sowie eine Darstellung im IBM-Farbschema implementiert (siehe Abb. 7). Letztere bietet auch für blau-, grün- und rotblinde Personen einen Verlauf von kühleren zu wärmeren Farbtönen [11].

3. Anwendungen

3.1. Beschleunigungsmessung

Die Sensorkette ist hinsichtlich der Programmierung und des Sensorboxdesigns auf die Messung von Schwingungen passender Objekte optimiert:

Anhand der Messwerte entlang aller drei Raumachsen wird die Ausrichtung des Sensors zur vertikalen Achse (d.h. zur Richtung der Erdbeschleunigung) ermittelt. Anschließend wird von der Beschleunigungskomponente entlang dieser Achse die Erdbeschleunigung abgezogen und das Ergebnis als Messwert an die nächste Sensoreinheit bzw. den ESP32 weitergegeben. So lassen sich Transversalschwingungen von entlang der vertikalen Achse auslenkenden Objekten zuverlässig messen, ohne eine exakte Ausrichtung der Sensoreinheiten vornehmen zu müssen.

Ein Beispiel für ein solches Objekt ist eine Slackline, für deren Anwendungsfall die Sensorboxen optimiert wurden. Jede Box verfügt über zwei Aufnahmen für Klettbänder, mit welchen sie an der Slackline befestigt werden kann (siehe Abb. 8). Zudem werden die Klinkenstecker durch Ausstülpungen vor einem Abknicken unter Belastung geschützt.

3.2. Temperaturmessung

Mit dem verwendeten Sensor sind ortsaufgelöste Temperaturmessungen zwischen -50°C und $+125^{\circ}\text{C}$ möglich. Hierbei können z.B. Messungen zur Wärmekapazität durch die simultane Aufnahme von Abkühlkurven bei unterschiedlichen Füllhöhen in Bechergläsern durchgeführt werden (siehe Abb. 9). Eine weitere Anwendungsmöglichkeit sind Messungen zur Wärmeleitfähigkeit durch Positionierung der Temperatursensoren entlang eines einseitig erhitzten langen Gegenstandes mit guter Wärmeleitung.

3.3. Geplante Anwendungen

Die Einbindung weiterer externer Sensoren ist in Planung. Denkbar wäre beispielsweise der Einsatz von Lichtsensoren, Mikrofonen und Drucksensoren:

Mit Lichtsensoren könnten Lichtschranken-Ketten aufgebaut werden, um z.B. die Stokes-Reibung einer fallenden Kugel zu messen. Mikrofone könnten für ortsaufgelöste Messungen zur Ermittlung der Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Medien genutzt werden. Ein Beispiel für die Anwendung von Drucksensoren in der Sensorkette wäre die Untersuchung von stehenden Wellen im offenen Rohr.

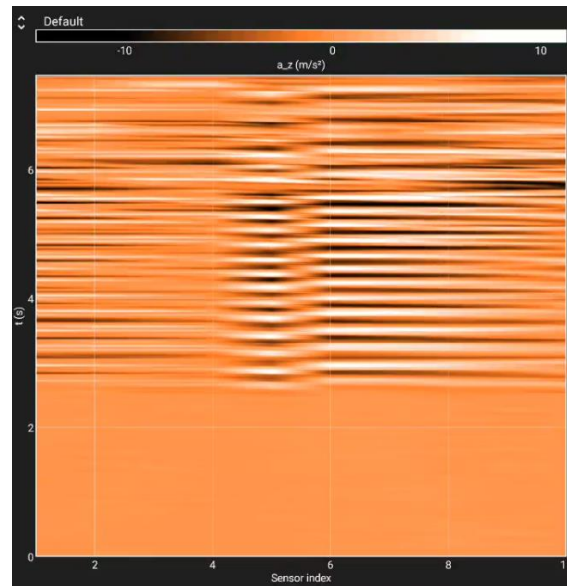


Abb. 6: Falschfarbendarstellung einer Beschleunigungsmessung im Standardfarbschema von phyphox.

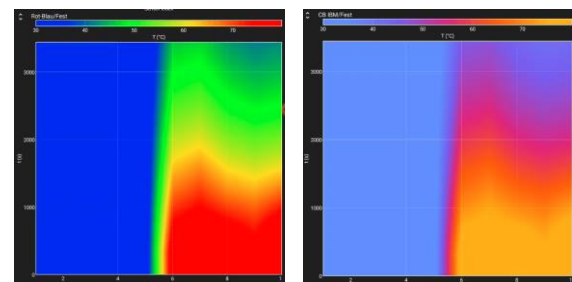


Abb. 7: Darstellung eines Temperaturverlaufs im Rot-Blau-Schema (links) und im IBM-Farbschema (rechts).



Abb. 8: An einer Slackline mit Klettbändern befestigte Sensorbox.

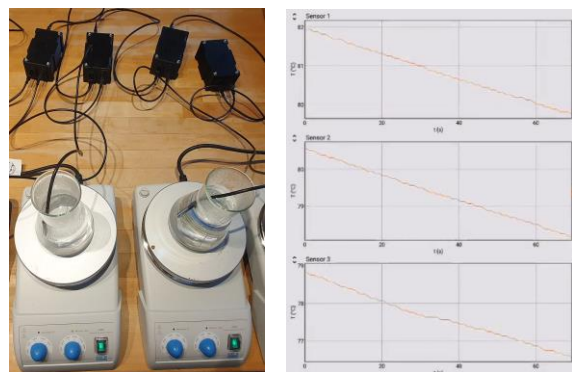


Abb. 9: Aufnahme von füllstandspezifischen Abkühlkurven. Links: Aufbau. Rechts: Exemplarische Darstellung von Messdaten.

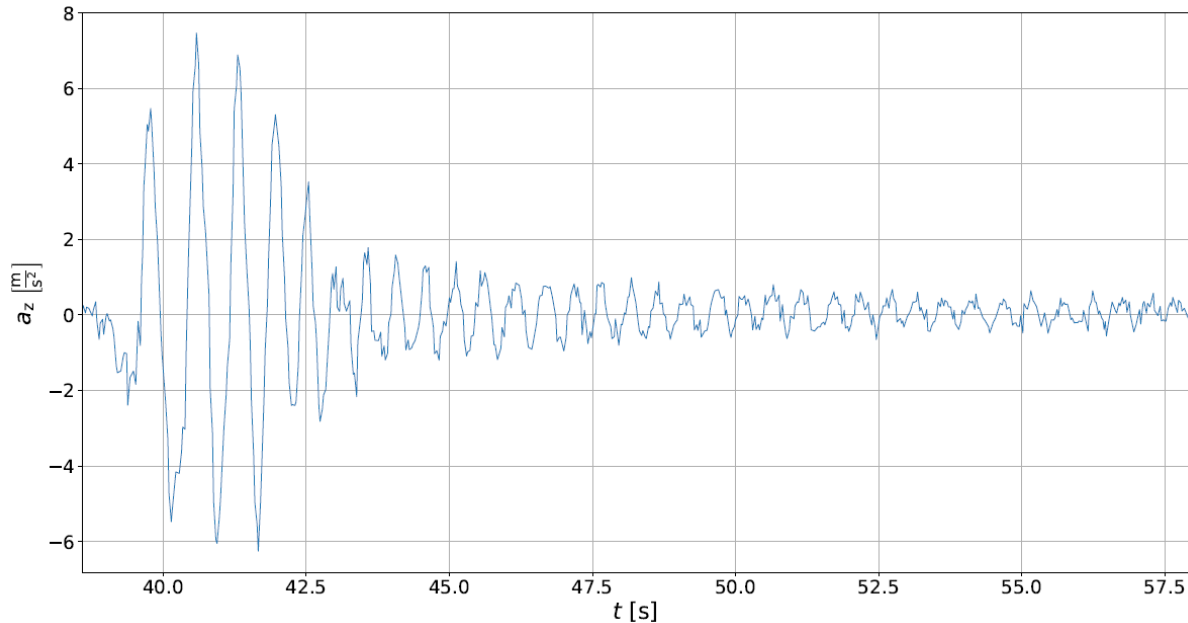


Abb. 10: Typisches Signal einer Schwingungsmessung mit der Sensorkette.

4. Fazit zum entwickelten Prototyp

4.1. Eckdaten

Der Preis für den im August 2023 fertiggestellten Prototypen mit zehn Sensoreinheiten lag inklusive der Materialkosten für die Gehäuse bei etwa 320 €. Mit zehn externen Temperatursensoren erhöht sich der Preis auf etwa 440 €, was für ein zur orts aufgelösten Messung von Beschleunigung und Temperatur fähiges Messinstrument einen annehmbaren Preis darstellen dürfte. Eine nach Komponenten aufgeschlüsselte Kostenauflistung findet sich in der in Kapitel 1 verlinkten Bauanleitung.

Die Sensorboxen sind mit den Maßen $113 \times 64 \times 50$ mm kompakt und auch für kleinere Hände gut zu greifen und haben eine Masse von jeweils etwa 165 g. Die Sensorkette sollte daher mit einem Gesamtgewicht von unter 2 kg auch von Schülern im physikalischen Anfangsunterricht ohne Weiteres transportierbar sein.

4.2. Zeitaufwand bei Druck und Bau

Der Zeitaufwand beim Druck des Gehäuses einer Sensoreinheit ist stark von dem verwendeten 3D-Drucker abhängig. Aktuell sind bereits Drucker für unter 1000 € auf dem Markt, die den Druck in weniger als fünf Stunden schaffen. Mit einem solchen Drucker lassen sich parallel zum regulären Schulbetrieb bis zu zehn Gehäuse pro Woche drucken, d.h. die maximal mögliche Anzahl für eine Sensorkette. Der für die Vorbereitung des Drucks aufzubringende Zeitaufwand beträgt je nach Drucker und individueller Erfahrung schätzungsweise zwischen fünf und 20 Minuten.

Der Zusammenbau der einzelnen Sensoreinheiten führt aufgrund der zahlreichen Bauschritte zu einem zusätzlichen deutlichen Zeitaufwand. Erste Tests der in Kapitel 1.2 erwähnten Bauanleitung ergaben pro

Sensoreinheit zunächst einen Zeitbedarf zwischen 90 und 180 Minuten, welcher sich aber nach mehreren erstellten Boxen auf unter 30 Minuten reduzieren ließ. Unter der Annahme eines affinen Zusammenhangs zwischen der Zahl zusammengebaute Boxen und dem jeweiligen Zeitbedarf beträgt die Obergrenze der für den Bau von zehn Sensorboxen benötigten Zeit 17,5 Stunden. Inwiefern und in welchem Rahmen der Zusammenbau der Sensorkette in den Schulalltag integrierbar ist, muss die interessierte Lehrkraft anhand dieser Daten selbst entscheiden.

4.3. Beschleunigungsmessung

Es wurden erste Testmessungen an einer Slackline vorgenommen. Währenddessen wurde die Zuverlässigkeit der Steckverbindungen innerhalb der Sensorboxen sowie die Zuverlässigkeit der Befestigung der Sensorboxen an der Slackline überprüft: Die Steckverbindungen haben bei geschlossenem Deckel kein Spiel und halten die Komponenten zuverlässig an ihrem Platz. Während sämtlicher Test kam es zudem nur einziges Mal dazu, dass sich ein Steckbrückenkabel von einem Kontakt löste. Die Befestigung an der Slackline bewährte sich ebenfalls in den Tests. Die Fixierung mit Klettbändern verhindert ein Verutschen der Boxen während der Messungen, lässt aber genug Spiel, um die Boxen zwischen zwei Messungen entlang der Slackline zu repositionieren.

Während der Testmessungen wurde zudem die Güte der Messdaten überprüft. Die gewählte Abtastfrequenz von 50 Hz erwies sich für Messungen an der Slackline grundsätzlich als ausreichend. Die Schwingungsfrequenz lässt sich klar aus den Daten ablesen und deutlich abgeschnittene Peaks treten nur vereinzelt auf. In Abb. 10 ist ein typisches Beispiel einer Schwingungsmessung dargestellt.

4.4. Temperaturmessung

Auch mit den externen Temperatursensoren wurden erste Testmessungen durchgeführt. Hierfür wurden mehrere Abkühlkurven sowie Temperaturverläufe entlang einer einseitig erhitzten Kupferplatte aufgenommen (vgl. Kapitel 3.2). Für die Messung erwies sich die gewählte Abtastfrequenz von 1 Hz als vollkommen ausreichend.

Die Falschfarbendarstellungen erwiesen sich in beiden zusätzlichen Farbschemata als gut ablesbar (siehe Abb. 7).

4.5. Aufgetretene Schwierigkeiten

4.5.1. Verformungen der Sensorboxen

Während der Tests kam es bei einigen direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzten Sensorboxen zu Verformungen. Diese wirkten sich allerdings nicht auf die Funktion der Sensoreinheiten aus. Insbesondere ließen sich die Komponenten der Sensoreinheiten weiterhin problemlos austauschen.

Für den Druck der Sensorboxen wurde aufgrund der Einsteigerfreundlichkeit das Filament PLA verwendet. Dieses ist bis zu einer Temperatur von etwa 60°C wärmeformbeständig [12], welche offenbar innerhalb der Füllstruktur der Wände erreicht wurde. Um Verformungen vorzubeugen, kann stattdessen das Filament PETG verwendet werden, welches ähnlich einsteigerfreundlich ist, aber eine Erweichungstemperatur von 80-90°C aufweist [12].

4.5.2. Kurzschluss in den Temperatursensoren

Während der Tests kam es im angelöteten Klinkenstecker eines Temperatursensors zu einem Kurzschluss. Da in den Klinkenstecker ein Widerstand eingelötet werden muss, laufen die drei Kontakte des Steckers bei nicht hinreichender Isolierung Gefahr, kurzgeschlossen zu werden. Auf entsprechende Kontaktstellen muss während des Zusammenbaus geachtet werden.

4.5.3. Ausfälle von Sensoreinheiten

Während der Tests fielen mehrere Sensoreinheiten aus und ließen sich auch durch einen Austausch von Kabeln und Klinkenadaptern nicht wieder funktionsfähig machen. Eine Messung der Ausgangssignale der betroffenen Boxen mit einem Oszilloskop lässt auf einen Defekt der Mikrocontroller schließen. Derzeit ist noch nicht geklärt, was diesen Defekt verursacht.

5. Ausblick

Zunächst gilt es, die Ursache der Ausfälle der Sensoreinheiten zu finden und zu beheben. Anschließend kann eine Weiterentwicklung des Projekts in drei Richtungen stattfinden:

a) Technische Optimierung der Sensorkette: Hierzu wird zukünftig der BLE-fähige Raspberry Pi Pico W zum Einsatz kommen, der dann gleichzeitig als Mikrocontroller einer Sensoreinheit und als BLE-Schnittstelle fungiert. So kann der ESP32 eingespart werden, der im Augenblick das einzige nicht

fixierbare Element der Sensorkette darstellt. Zudem resultiert dieser Austausch in einer Vereinfachung der Programmierung.

- b) Anbindung weiterer externer Sensoren: Die bereits angedachten Sensoren sind in Kapitel 3.3 näher beschrieben. Die Erweiterung des Portfolios externer Sensoren setzt die vorherige Schaffung einer Möglichkeit der manuellen Auswahl der Sensorart oder zumindest der gewünschten Abtastrate voraus. Denkbar wäre die Entwicklung eines an den Kopf der Sensorkette anschließbaren Schalters.
- c) Entwicklung von Experimenten und Arbeitsblättern: Zu den einzelnen Sensoren können noch weitere Experimente entwickelt und passende Arbeitsblätter erstellt werden. Anschließend kann die Sensorkette erstmalig im Schulunterricht getestet und evaluiert werden.

6. Literatur

- [1] Dorsel, Dominik: Entwicklung der Nutzbarkeit externer Sensoren bei Smartphone-Experimenten und deren Einsatz in naturwissenschaftlichen Experimenten, Dissertation, RWTH Aachen University (2023), S. 7-8. Verfügbar unter: <https://www.institut-1a.physik.rwth-aachen.de/go/id/huji/lidx/1/file/964136>.
- [2] Staacks, Sebastian; Hütz, Simon; Heinke, Heidrun; Stampfer, Christoph: Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox. In: Physics Education 53 (2018), Nr. 4. Verfügbar unter: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/aac05e>
- [3] Staacks, Sebastian; Heinke, Heidrun; Stampfer, Christoph: Smarte Experimente. In: Physik Journal 17 (2018), Nr. 11.
- [4] Phyphox: Experimente (Stand 05/2024). URL: <https://phyphox.org/de/experimente/>.
- [5] Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest: JIM-Studie 2023: Jugend, Information, Medien (2023). Verfügbar unter: <https://www.mpfs.de/studien/jim-studie/2023/>.
- [6] Phyphox: Bluetooth Low Energy (Stand 05/2024). URL: <https://phyphox.org/de/ble-de/>.
- [7] Siehe hierzu auch: Dorsel, Dominik; Staacks, Sebastian; Heinke, Heidrun; Stampfer, Christoph; Kuhn, Jochen; Wilhelm, Thomas: Visualisierung von Messdaten eigener Sensormodule mit phyphox. In: Physik unserer Zeit 53 (2023), Nr. 3, S. 151-152.
- [8] Herbst, Markus; Fürtbauer, Eva-Maria; Strahl, Alexander: Interesse an Physik. DPG-Frühjahrstagung, Hannover (2016).
- [9] Phyphox: Bau- und Bedienungsanleitung für die phyphox-Sensorkette (Stand 05/2024). Verfügbar unter:

<https://github.com/johannesschlaf/phyphox-Sensor-Chain>.

- [10] Qualitäts- und UnterstützungsAgentur – Landesinstitut für Schule: 3-D-Druck in der Schule: Informationen und Orientierung für den Einstieg in den Unterricht (Stand 05/2024). Verfügbar unter: <https://www.schulentwicklung.nrw.de/cms/faecher/faecheruebergreifend/3d-druck-in-der-schule.html/>.
- [11] Zur Veranschaulichung sei an dieser Stelle verwiesen auf: Nichols, David: Coloring for Colorblindness: We see colors differently (Stand 05/2024). URL: <https://davidmathlogic.com/colorblind/#%23D81B60-%231E88E5-%23FFC107-%23004D40/>.
- [12] Rewex GmbH: Materialien für den 3D-Druck (Stand 05/2024). URL: <https://rewex.de/materialien/>.

PUMA : Optiklabor - Eine webbasierte AR-Simulation für die Sekundarstufe I

Stefan Kraus, Thomas Trefzger

Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Julius-Maximilians-Universität Würzburg
stefan.kraus@physik.uni-wuerzburg.de

Kurzfassung

Ein kostenloser Optik-Experimentierkasten, den man Schülerinnen und Schülern mit nach Hause geben kann, der jederzeit zum Experimentieren einlädt, der haptische und virtuelle Elemente verbindet, bei dem man nichts beschädigen, aber über die Grenzen der realen Welt hinaus experimentiert werden kann. Diesen Anspruch verfolgt das PUMA : Optiklabor. **Physikunterricht mit Augmentierung** – dieses Projekt des Lehrstuhls für Physik und ihre Didaktik der Universität Würzburg widmet sich in verschiedenen Teilgebieten der Physik den Möglichkeiten, die Augmented Reality (AR) bieten kann. Das Optiklabor besteht aus einer webbasierten AR-Simulation, bei der über Karten, die auf den Tisch gelegt werden, Laser und Gegenstände wie Spiegel und Linsen eingeblendet werden. Diese betrachten die Schülerinnen und Schüler durch ihr Smartphone oder Tablet-PC, auf dem sie lediglich eine Website öffnen, jedoch keine App installieren müssen. Die Applikation wird im Rahmen eines Design-Based-Research- Projekts entwickelt, das in zwei Phasen den Einsatz durch die Lehrkräfte und die Nutzung durch die Jugendlichen im Anfangsunterricht der Sekundarstufe I evaluiert. Parallel steht die technische Eignung für den Unterricht im Studieninteresse. Der Vortrag stellt die Applikation und das Studiendesign vor und lädt zum Ausprobieren und konstruktiven Austausch ein.

1. Ausgangssituation

Experimente sind ein fester und wichtiger Bestandteil des Physikunterrichts. Das zunehmende Angebot von Schülerexperimentiersets erleichtert es den Lehrkräften, Experimente durch die Lernenden selbst durchführen zu lassen. So stehen ausgesuchte Materialien mitsamt Anleitungen zur Durchführung in Kleingruppen zur Verfügung und sind auch nach dem Versuch übersichtlich aufgeräumt. Diesen Möglichkeiten steht in der Realität allerdings oft das mangelnde Budget zur Ausstattung der Physiksammlung entgegen. So werden oft nur die wichtigsten Kästen beschafft, eine Mitgabe nach Hause erscheint bei Preisen von einigen hundert Euro pro Stück absolut unrealistisch.

Neben dem Kostenfaktor spielt im Unterricht oftmals auch die Zeit eine entscheidende Rolle. Die Bereitstellung und das Aufräumen der Gerätschaften erfordert Ressourcen, die sich durch ein Demonstrationsexperiment einsparen lassen. Auch dies reduziert die Anzahl durchgeführter Schülerexperimente.

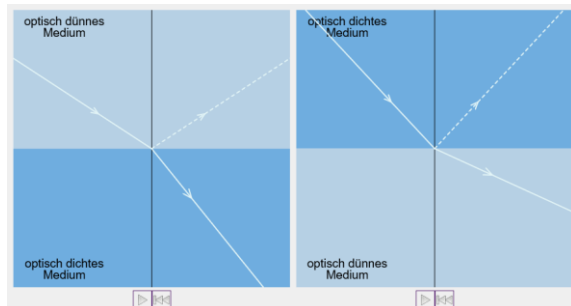


Abb. 1: Bildschirmsimulation zur Lichtbrechung [1]

Alternativ gibt es Bildschirmsimulationen, die einen bestimmten Sachverhalt abdecken. Der Abstraktionsgrad ist allerdings häufig so hoch, dass den Jugendlichen der Transfer auf die Realität schwerfällt. Zudem lassen sich meist nur wenige Dimensionen des Experiments steuern, was den Immersionsgrad weiter senkt.

2. Konzept

Die hier vorgestellte Applikation versucht eine weitere Art der Simulation zur Verfügung zu stellen, welche näher am echten Experiment sein soll, ohne dessen Nachteile zu vorzuweisen. Ziel dabei soll keinesfalls sein, das echte Experiment zu ersetzen, sondern neue Gelegenheiten des Experimentierens zu erschließen.

Kernidee ist das Schaffen haptischer Erfahrung trotz der Durchführung eines rein digitalen Experiments. Hierbei soll keine größere Einarbeitung notwendig sein, die mit der Bedienung einer Software und ihrer Eigenheiten einhergehen. Dadurch konzentrieren sich die Kinder auf den Versuch als solches ohne Ablenkungen, die mit dem eigentlichen Experiment nichts zu tun haben. Die Simulation umfasst dabei die Physik hinter dem Experiment, so dass die Schülerinnen und Schüler nicht auf einen bestimmten Versuchsaufbau beschränkt sind. Dies lädt zum freien Experimentieren und Ausprobieren ein.

Größtmöglicher Immersionsgrad wird durch den Einsatz von Augmented Reality (AR) erreicht. Die einzige, notwendige Hardware beschränkt sich auf „Marker“ zum Preis eines Blattes Papier. Die Applikation läuft plattformunabhängig auf Smartphones

und Tablet-PCs aller Betriebssysteme. Sie ist aus dem Stegreif einsetzbar und steht sowohl in der Schule wie auch im häuslichen Umfeld kostenlos zur Verfügung. Ein weiterer Mehrwert des digitalen Experiments ist die Möglichkeit, Grenzen der Physik zu verschieben. Im Gegensatz zur Realität kann hier während des Versuchs beispielsweise die Brennweite einer Linse oder der Brechungsindex eines Wasserbeckens beliebig im realistischen, wie auch im unrealistischen Bereich angepasst werden.

3. Die Applikation

Die Schülerinnen und Schüler erhalten Kärtchen (sogenannte „Marker“), die von einer webbasierten Applikation erkannt werden. Darüber blendet die App Gegenstände wie Laser, Linsen etc. ein. Diese interagieren miteinander, so dass das Experiment rein virtuell stattfindet. Dadurch, dass die Marker auf dem Tisch hin- und hergeschoben werden können, erfährt die Nutzung eine haptische Komponente, die den Immersionsgrad immens fördert. Je nach Objekt stehen werden Buttons eingeblendet, die die Manipulation weiterer Parameter ermöglichen.



Abb. 2: Marker & Übungskarten (in Entwicklung)

4. Technische Umsetzung

Die WebAR-Applikation ist in HTML und JavaScript implementiert. Die Virtual-Reality-Funktionalität wird durch das Framework A-FRAME zur Verfügung gestellt [2]. Die Erweiterung auf Augmented-Reality erfolgt durch den Einsatz des JavaScript-Frameworks AR.js [3]. Dieses verknüpft das Kamerabild und die darin enthaltenen Marker mit den Positionen im virtuellen Raum. Die Darstellung von 3D-Objekten erfolgt durch das JavaScript-Framework Three.js, welches Zugriff auf die WebGL-Schnittstelle hat [4].

5. Elemente

Zum Experimentieren wurde eine Reihe von ausdrucksfähigen Markern entwickelt, auf denen Elemente eingeblendet werden. Der aktuelle Entwicklungsstand (März 2024, noch in Entstehung) umfasst folgende virtuelle Elemente:

5.1 Kerzen

Erste völlig ungefährliche Schattenversuche lassen sich mit Kerzen durchführen, deren Helligkeit und Flammenfarbe während des Versuchs einstellbar sind. Die eingestellte Flammenfarbe verknüpft zugleich interdisziplinäre Kenntnisse der aus der

Chemie charakteristische Flammenfärbung durch bestimmte Elemente.

5.2 Sonne, Erde & Mond

Sonnenauf-, Sonnenuntergang, Mondphasen, Sonnen- und Mondfinsternis sind Beispiele aus der Lebenswelt der Kinder, die eine willkommene Anwendung des Gelernten aus dem Bereich Lichtquellen und Schatten anbieten. Die Animation des Mondes um die Erde kann pausiert werden, um die Phänomene genauer zu analysieren. Die Größenverhältnisse sind nicht maßstabsgetreu, ein solcher Modus als spätere Erweiterung aber denkbar.

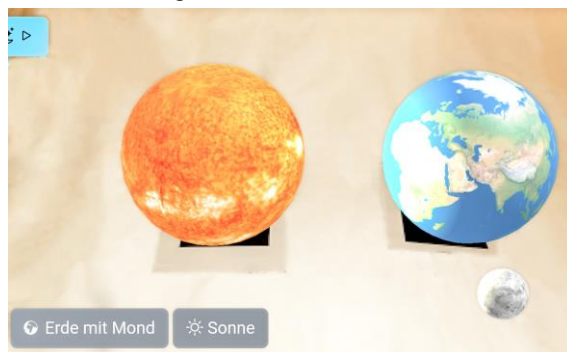


Abb. 3: Marker Sonne & Erde mit Mond

5.3 Zylinder

Der Zylinder stellt ein Hindernis für Schattenexperimente mit ein oder mehreren Kerzen und deren Kern- und Halbschatten dar.

5.4 Schirm

Auf den Schirm werden beleuchteten und verschatteten Bereiche sichtbar. Für viele Schülerinnen und Schüler überraschend sind dabei die Halbschatten bei Versuchen mit Kerzen verschiedener Farben.

5.5 Laserbox

Grundversuche der geometrischen Strahlenoptik benötigten einen Laserstrahl. Dieser ist in dieser Simulation auch ohne Nebel durchgehend sichtbar. Es lassen sich ein, drei oder fünf parallele Laserstrahlen einblenden. Die Laserstrahlen können in ihrer Farbe verändert werden. Insbesondere steht weißes Licht kontinuierlichen Spektrums wie bei einer Glühlampe zur Auswahl.

5.6 Spiegel

Ebenso steht ein einfacher Spiegel bereit, der an beliebigen Stellen in den Strahlenverlauf positioniert werden kann. In Planung ist die zusätzliche Einblendung von Einfallslot und Winkelscheibe.

5.7 Quader

Ebene Flächen erleichtern den Einstieg in die Lichtbrechung, bevor es an komplexere Systeme wie Linsen geht. In der Grundkonfiguration handelt es sich hierbei um einen Glasquader, wobei dessen Materialeigenschaften verändert werden können. Ebenso kann beeinflusst werden, ob sowohl Brechung als auch Reflexion angezeigt werden sollen oder nur eins

dieser Phänomene. Die Anzeige des Einfallslotes sowie eine virtuelle Winkelscheibe sind auch hierbei in Planung.

5.8 Linsen

Auch eine Sammel- und Zerstreuungslinse liegt dem virtuellen Experimentierkasten bei. Wie bereits beschrieben lässt sich die Brennweite während des Versuchs verändern.

5.9 Prisma

Neben dem Quader stellt das Prisma ein interessantes Objekt zur Strahlmanipulation dar. Eine unterschiedliche Brechung je nach Wellenlänge des Einfallstrahls, sowie insbesondere die Aufteilung weißen Lichts ist in Planung.

5.10 Wasserbecken & Luftlinse

Die meisten Experimente im Schulkontext betrachten das Verhalten eines Lichtstrahls von Luft kommend in einem Körper höherer optischer Dichte. Ein Wasserbecken mit einer Luftlinse dreht dies um und erzeugt kognitive Konflikte, die zu einer weiteren Vertiefung des physikalischen Verständnisses führen sollen.

5.11 Auge, Objekt & Brille

Eine weitere lebensnahe Anwendung des Gelernten ist die Abbildung im Auge. Ein Marker stellt ein halbes Auge dar, der andere Marker einen kleinen Baum, der zusätzlich ins Auge projiziert wird. Des Weiteren lässt sich eine Fehlsichtigkeit simulieren, die den Augapfel verlängert oder verkürzt. Durch eine zuschaltbare Brille und variabel einstellbare Brennweite der Brille können die Schülerinnen und Schüler die Fehlsichtigkeit korrigieren und die Projektionsebene wieder auf die Netzhaut legen.

6. Übungsaufgaben

Durchführung größerer Experimente mit Messreihen und dem Erlernen ausführlicher Dokumentation ist nicht der Anspruch dieser spontan einsetzbaren Simulation. Daher werden Übungsaufgaben in Form von Karten entwickelt, auf deren Vorderseite eine Kurzanleitung und Rückseite Lösungshinweise gegeben sind. Über den aufgedruckten QR-Code gelangt man zur WebAR-Applikation. Die benötigten Marker sind leicht erkennbar. Die Karten im DIN-A5 oder DIN-A6-Format zur Verfügung gestellt oder direkt online abgerufen werden.

Die Themen reichen dabei von Schatten über die Anwendung bei Mondphasen,

7. Studie

Die Entwicklung des digitalen Schülerexperimentierkastens erfolgt nach dem Schema des Design-Based-Research [5]. Um wissenschaftlich fundierte Daten zu erhalten, erfolgt eine Erprobung in 8. Klassen des bayerischen Gymnasiums und 7. & 8. Klassen der bayerischen Realschule (je nach Zweigwahl) und begleitet das dort im Lehrplan verankerte Thema Optik. Die Studie wurde jüngst durch das Bayerische

Staatsministerium für Unterricht und Kultus genehmigt und beforscht sowohl die Erfahrungen der Lehrkräfte, wie auch der Lernenden. Bei den Jugendlichen wird zudem der Einfluss auf affektive Faktoren und Schülervorstellungen beleuchtet. Die gewonnenen Kenntnisse werden in zwei Iterationen zur Weiterentwicklung der Materialien genutzt. [6]

8. Kontext: PUMA

Der Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik der Universität Würzburg unter Prof. Dr. Thomas Trefzger widmet sich in mehreren Projekten der Augmentierung von Physikunterricht. [7] Dabei steht der Einfluss von Augmented Reality auf die Lernenden im Vordergrund. So werden neben dem Optiklabor auch ein Magnetlabor [8] und ein Spannungslabor [9] entwickelt, die sich bereits in weiter entwickelten Stadien befinden. Bei diesen Projekten wurden native Applikationen mittels Unity implementiert, die Realexperimente graphisch und mit Zusatzinformationen unterstützen.

9. Ausblick

Die nächsten Schritte stellen die Fertigstellung der Hauptmerkmale der Applikation und das Angebot von Lehrkräftefortbildungen dar. Dabei soll nicht nur der Dialog mit Lehrkräften gesucht und das Optiklabor bekannt gemacht, sondern auch Studienteilnehmerinnen und -teilnehmer akquiriert werden. Noch im Schuljahr 2023/24 erfolgt dann die Pilotierung mit einer kleineren Stichprobe. Die Hauptstudie mit bereits erstmals überarbeiteten Materialien findet im Schuljahr 2024/2025 statt.

10. Literatur

- [1] LEIFIPHYSIK: *Bildschirmssimulation zur Lichtbrechung* <https://www.leifiphysik.de/optik/lichtbrechung/grundwissen/lichtbrechung-einfuehrung> (Stand 3/2024)
- [2] *A-Frame : A web framework for building 3D/AR/VR experiences.* <https://aframe.io/> (Stand 3/2024)
- [3] *AR.js : Augmented Reality on the Web.* <https://ar-js-org.github.io/AR.js-Docs/> (Stand 3/2024)
- [4] *Three.js.* <https://threejs.org/> (Stand 3/2024)
- [5] REINMANN, Gabi: *Innovation ohne Forschung? Ein Plädoyer für den Design-Based Research-Ansatz in der Lehr-Lernforschung.* In: *Unterrichtswissenschaft* 33 (2005), S. 52–69
- [6] KRAUS, Stefan ; TREFZGER, Thomas: PUMA : Optiklabor - eine WebAR-Anwendung zur Unterstützung der Optiklehre. In: VORST, Helena van (Hrsg.): *Frühe naturwissenschaftliche Bildung : Tagungsband der 50. Jahrestagung der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP)*, 2024, S. 865-868 <https://gdcp-ev.de/tagungsbaende/tagungsband-2023-band-43> (Stand 7/2024)

- [7] FLORIAN FRANK ; STEFAN KRAUS ; ANNIKA KREIKENBOHM ; HAGEN SCHWANKE ; CHRISTOPH STOLZENBERGER ; THOMAS TREFZGER: *Das Projekt PUMA (Physik-Unterricht Mit Augmentierung)*. Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG), Hannover, 2023, S. 277-279 <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1407/1605> (Stand 7/2024)
- [8] SCHWANKE, Hagen ; TREFZGER, Thomas: Augmented Reality in Schülerversuchen – Entwicklung und Evaluierung der Applikation PUMA: Magnetlabor. In: ROTH, Jürgen; BAUM, Michael; EILERTS, Katja; HORNUNG, Gabriele; TREFZGER, Thomas (Hrsg.): *DIE ZUKUNFT DES MINT-LERNENS : Digitale Tools und Methoden für das Lehren und Lernen*. Berlin, Heidelberg : Springer Spektrum, 2023, S. 77–91
- [9] STOLZENBERGER, Christoph ; FRANK, Florian ; TREFZGER, Thomas ; WILHELM, Thomas ; KUHN, Jochen: *Spannung mit PUMA : Spannungslabor*. In: *Physik in unserer Zeit* 54 (2023), Nr. 1, S. 44–45

Videoanalyse in die Praxis bringen

Bewegungsvideos direkt zum Ausgangspunkt des Lernens machen

Julie Kyas*, Christian Hengel*, Jakob Knebloch*, Andreas Hansch*, Thomas Wilhelm*

*Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt
julie.kyas@tso-ffm.de

Kurzfassung

Die Implementation neuer Lehr- und Lernkonzepte oder Medien im Unterricht ist erfahrungsgemäß schwierig. Das Kooperationsprojekt mit dem hessischen Kultusministerium „Videoanalyse in die Praxis bringen“ hat deshalb zum Ziel, die Hürden für den Einsatz von Videoanalyse von Bewegungen im Physikunterricht zu senken. Unterrichtsmaterialien, denen die Ergebnisse von Videoanalysen zugrunde liegen oder die auf die Durchführung von Videoanalysen durch die Lernenden zielen, stehen zum Download bereit. Sie sollen es Physiklehrer*innen erleichtern, die Potentiale von Videoanalyse zu erkennen und für ihren Unterricht zu nutzen.

1. Ausgangspunkt

Seit den Anfangstagen der Videoanalyse von Bewegungen im Physikunterricht sind mehr als dreißig Jahre vergangen. In verschiedenen Publikationen sind die unterschiedlichen Möglichkeiten von Videoanalyse für den Begriffserwerb in der Bewegungslehre erörtert worden (z.B. [1+2]). Trotzdem und obwohl sich aktuelle Videoanalyse-Apps intuitiv bedienen lassen, ohne dass eine längere Einarbeitung erforderlich wäre, wird von diesen Möglichkeiten in der Unterrichtspraxis verhältnismäßig wenig Gebrauch gemacht. Das liegt zum Teil an den curricularen Vorgaben, die in allen Bundesländern in der Oberstufe auf einen vorwiegend kalkülhaften Zugang zur Kinematik ausgerichtet sind, mit unmittelbaren Auswirkungen auf den Unterricht der Sekundarstufe I, in dem man – in der Absicht, die Schüler*innen bestmöglich auf die Oberstufe vorzubereiten – diesen Zugang direkt auf die Mittelstufe überträgt. Nur in einzelnen Bundesländern ist ein stärker auf den Aufbau qualitativer Grundvorstellungen ausgerichteter, zweidimensionaler Zugang zur Bewegungslehre vorgesehen. Zum Teil sind die Gründe für die zurückhaltende Nutzung von Videoanalyse auch in der mangelnden Akzeptanz der Methode bei den Physiklehrer*innen zu suchen: Eine Erhebung im Rahmen von leitfadengestützten, explorativen Interviews mit Physiklehrkräften [3] konnte dabei folgende Ursachen für die mangelnde Akzeptanz feststellen:

- Die fehlende technische Ausstattung der Schule (es fehlen entweder iPads oder Stative oder beides),
- technische Probleme (Installation der Software nur durch Administratoren möglich; Übertragung von Dokumenten zwischen den Endgeräten; Bedienung der Apps für Videoanalyse),
- mangelndes Wissen darüber, welche Apps für Videoanalyse verfügbar sind und welche Ein-

satzmöglichkeiten diese jeweils bieten,

- vermeintlich größerer Aufwand gegenüber anderen möglichen Schülerexperimenten und
- vermeintlich ungünstiges Verhältnis zwischen Aufwand und Lernertrag.

Das Kooperationsprojekt „Videoanalyse in die Praxis bringen“ zwischen der Goethe-Universität Frankfurt und dem hessischen Kultusministerium soll dazu beitragen, diese Hürden abzubauen, damit die mit Videoanalyse verbundenen Vorteile und Möglichkeiten öfter zur Entfaltung kommen können. Statt erneut abstrakt über die didaktischen Möglichkeiten von Videoanalyse zu informieren, sollen exemplarisch bereitgestellte Unterrichtsmaterialien Physiklehrkräften zeigen, wie man Videoanalyse für den Unterricht konkret einsetzen kann – im Unterricht selbst oder auch bei der Erstellung von Unterrichtsmaterialien.

Außerdem werden einfache Anleitungen und Tutorials für die Hand der Lehrer*innen und der Schüler*innen zur Verfügung gestellt, die helfen sollen, die technischen Hürden abzubauen und die einfache Handhabung der Programme zu verdeutlichen.

2. Die verwendeten Apps: NewtonDV und Viana 2

Anleitungen, Tutorials, Arbeitsblätter und Unterrichtsvorschläge, die in dem Kooperationsprojekt erstellt werden, beziehen sich ausschließlich auf die Videoanalyse mit iPads und den beiden Apps NewtonDV [4] und Viana 2 [5], die aktuell die beiden wichtigsten Apps für die Videoanalyse mit iPads sind. Für das Android-Betriebssystem gibt es momentan kein vergleichbares Angebot. Der Funktionsumfang von NewtonDV und Viana 2 ist zwar gegenüber mächtigeren Programmen für Windows oder macOS eingeschränkt. Vorteilhaft ist aber, dass sich beide Apps intuitiv bedienen lassen und man schnell zu qualitativ guten, optisch ansprechenden Ergebnissen gelangt. Der Funktionsumfang der beiden Apps

überschneidet sich insoweit, als beide aus den aus dem Video entnommenen Zeit-Positions-Daten alle gewünschten Bewegungsdiagramme erzeugen können. Während nur Viana 2 eine automatische und damit zeitsparende Objektverfolgung im Video bietet, ermöglicht es NewtonDV, Ausgleichskurven in Graphen einzufügen, Serien- und Stroboskopbilder zu erzeugen und gröbeneinstellbare Geschwindigkeits- und Beschleunigungspfeile als Repräsentation dieser vektoriellen Größen in die Serien- oder Stroboskopbilder einzufügen. Des Weiteren ist das Layout der Diagramme bei NewtonDV auch ansprechender als bei Viana 2.

3. Materialien für die Praxis – Steinbruch und Ideenkiste

3.1. Geschwindigkeit und Tempo

Um zu vermeiden, dass der Physikunterricht mit fragwürdigen Formulierungen wie „Die Geschwindigkeit gibt die pro Zeiteinheit zurückgelegte Strecke an“ selbst begriffliche Unschärfen bei den Schüler*innen induziert, hat es sich als hilfreich erwiesen, die Geschwindigkeit von Beginn an als Positionsänderung pro Zeiteinheit einzuführen und sorgfältig zwischen Geschwindigkeit und Tempo bzw. Betrag der Geschwindigkeit zu unterscheiden. Die Positionsänderung in zwei Dimensionen lässt sich im Video untersuchen. An Stroboskopbildern, die aus den Videos gewonnen werden können, können Schüler*innen die Bestimmung von Position, Positionsänderung und Geschwindigkeit sowie die Unterscheidung zwischen Tempo und Geschwindigkeit einüben (siehe

Arbeitsblatt im Anhang). Pfeildarstellungen der vektoriellen Größen Geschwindigkeit und Beschleunigung, wie sie sich mit NewtonDV herstellen lassen, können dabei das Verstehen der vektoriellen Eigenschaft unterstützen.

3.2. Beschleunigung

Jede Änderung der Geschwindigkeit mit der Zeit bezeichnet man als Beschleunigung. Eine Beschleunigung liegt also vor, wenn ein Körper schneller wird, langsamer wird oder sich seine Bewegungsrichtung ändert. Findet eine Beschleunigung parallel zur momentanen Bewegungsrichtung statt, ändert sich nur das Tempo. Findet die Beschleunigung senkrecht zur Bewegungsrichtung statt, ändert sich nur die Richtung, das Tempo bleibt gleich. Mit den Pfeildarstellungen, die in NewtonDV erstellt werden können, lässt sich das gut untersuchen (siehe Abb. 2).

3.3. Arbeit mit Bewegungsdiagrammen

Zum Erschließen der Bedeutung des Zeit-Positionsdiagramms kann man die Lernenden beispielsweise Serienbilder von Bewegungen den mit Viana 2 oder NewtonDV erzeugten t - x -Diagrammen zuordnen und die Zuordnung begründen lassen (siehe Abb. 1). Man kann auch die Videoclips selbst den Serienbildern und Diagrammen zuordnen lassen. Für diese Aktivitäten eignen sich z.B. abschnittsweise gleichförmige Bewegungen. Mit Hilfe des Materials können die Lernenden erkennen, dass Intervalle, in denen die Geschwindigkeit konstant ist, sich im t - x -Diagramm durch eine gleichbleibende Steigung auszeichnen. Diese Einsicht wird durch die eingefügten

Abschnittsweise gleichförmigen Bewegungen
 Ein Wagen fährt auf der Fahrbahn hin und her.

- 1.) Ordnen Sie dem Serienbild das dazugehörige t - x - und t - v -Diagramme zu und begründen Sie die Zuordnung.
- 2.) Entscheiden und begründen Sie, inwieweit die Bezeichnung „abschnittsweise gleichförmig“ auf die Bewegung zutrifft.

A

1

B

2

C

Abb. 1: Ein Arbeitsblatt mit Zuordnungsübungen, die beim Erschließen der Diagramme helfen.

262

Geschwindigkeitspfeile unterstützt. Im Vergleich mit dem aus dem Mathematikunterricht bekannten Differenzenquotienten zur Berechnung der Steigung einer Geraden erkennen sie, dass die Definition der Geschwindigkeit als Positionsänderung in einem Zeitintervall in einem t - x -Diagramm gleichzeitig auch die Steigung einer Geraden angibt und gelangen zu der Einsicht, dass die Steigung im t - x -Diagramm direkt der Definition der Geschwindigkeit entspricht.

Wann ändert sich das Tempo, wann die Richtung?
 Ob sich bei einer Kräfteinwirkung Tempo, Bewegungsrichtung oder beides ändern, hängt davon ab, welcher Anteil der Kraft in Bewegungsrichtung wirkt und welcher quer dazu.

Aufgaben

- Untersuche die Abbildungen

Abb.	Die Richtung ändert sich	Das Tempo ändert sich
Kraft / Beschleunigung parallel zur Geschwindigkeit		
Kraft / Beschleunigung senkrecht zur Geschwindigkeit		
Kraft / Beschleunigung schräg zur Geschwindigkeit		
- Nenne die Voraussetzung dafür, dass sich
 - die Bewegungsrichtung ändert.
 - das Tempo ändert.
 - beides ändert.
- Trage in der Abbildung von der Bewegung der Schaukel die Kraftpfeile ein (Geodreieck).

Abb. 2: Ein Arbeitsblatt mit Screenshots aus NewtonDV. Mit den Pfeildarstellungen lassen sich Aufgaben zum Aufbau von Grundvorstellungen zum Beschleunigungsbegriff erstellen.

Eine weitere Aktivität für den Unterricht zur Festigung der Fertigkeit, das Zeit-Positions-Diagramm zu interpretieren, ist die Übung „Graphen laufen“ (siehe Arbeitsblatt im Anhang). Dabei sollen die Schüler*innen aus dem Verlauf eines vorgegebenen t - x -Diagramms die dazugehörige Bewegung selbst „nachspielen“, indem sie sich nach der Maßgabe des Diagramms entlang einer Achse hin und her bewegen. Dabei werden sie gefilmt und anschließend wird mit Viana 2 überprüft, inwieweit die „gelaufene Bewegung“ dem vorgegebenen Diagramm entspricht.

Auch bei der Erarbeitung der Bewegungsgesetze für die gleichmäßig beschleunigte Bewegung kann die Videoanalyse den Begriffserwerb unterstützen. Gleichmäßig beschleunigt ist eine eindimensionale Bewegung dann, wenn sich die Geschwindigkeit pro Zeiteinheit um den gleichen Betrag ändert, d.h. erhöht oder verringert. Daraus ergibt sich direkt, dass das Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm einer solchen Bewegung eine steigende (oder fallende) Gerade erkennen lassen muss, deren Steigung die Beschleunigung ist. Das kann mit Hilfe von Videoanalyse-Apps direkt geprüft und der Wert der Beschleunigung aus den

Graphen bestimmt werden (siehe Abb. 3). Der freie Fall, Bewegungen auf der schiefen Ebene oder Propellerfahrzeuge sind geeignete Beispiele. Das Feature, manuelle Ausgleichsgeraden und -kurven in die Bewegungsdiagramme einzuzeichnen, das NewtonDV bietet, ist in diesem Zusammenhang besonders nützlich.

Zeit- Geschwindigkeits-Diagramm (t-v-Diagramm)

- Unterteilen Sie das t - v -Diagramm in Intervalle, in denen dieselbe Art der Bewegung beobachtet werden kann.
- Begründen Sie wieso im Intervall 2 von einer gleichmäßigen Beschleunigung ausgegangen werden kann.
- Berechnen Sie den Wert der Beschleunigung.
- Beschreiben Sie den zeitlichen Verlauf der Geschwindigkeit im letzten Zeitabschnitt. Begründen Sie wieso keine exakt konstante Geschwindigkeit gemessen werden konnte.

Abb. 3: Ein Ausschnitt aus einem Arbeitsblatt. Mit der Videoanalyse lässt sich überprüfen, ob eine Bewegung gleichmäßig beschleunigt ist.

Auf dem Weg zum Zeit-Positions-Gesetz für gleichmäßig beschleunigte Bewegungen kann man unterschiedliche Wege einschlagen – je nach Jahrgangsstufe, in der man sich bewegt und abhängig von der Disposition der jeweiligen Lerngruppe. Videoanalyse-Apps erlauben es, den parabelförmigen Verlauf im t - x - bzw. t - y -Diagramm zügig induktiv entdeckend zu gewinnen. Man stärkt das Verständnis für die Zusammenhänge jedoch auch, wenn man stattdessen mit den Lernenden das Zeit-Positions-gesetz zunächst herleitet, um die sich daraus ergebende Hypothese dann mit der Videoanalyse zu überprüfen.

3.4. Prüfung der Tragweite abstrakter Modelle in der Lebenswelt

Eine weitere Einsatzmöglichkeit für Videoanalyse besteht in der Überprüfung der Tragweite der abstrakten Modelle „(abschnittsweise) gleichförmige

Bewegung“ und „gleichmäßig beschleunigte Bewegung“. An unterschiedlichen Alltagsbewegungen kann in der Videoanalyse gezeigt werden, dass sie zumindest über eingeschränkte Zeiträume hinweg gut durch diese Modelle beschrieben werden können. In der Regel lässt sich z.B. beim Anfahren (siehe Abb. 4) oder Abbremsen eines Autos, Fahrrads,

Elektrorollers oder einer Bahn zeigen, dass das Zeit-Positions-Diagramm anfangs gut durch eine Parabel angenähert werden kann. Auch bei einem Sprint lässt sich diese Beschleunigungsphase identifizieren, die dann i.d.R. in eine Phase annähernd gleichförmiger Bewegung übergeht.

Auto an der Ampel:

Inwieweit trägt die gleichmäßig beschleunigte Bewegung als Beschreibungsmodell?

Wie groß ist eine typische Beschleunigung eines Autos im Stadtverkehr?

Messdaten:

t in s	0	0,33	0,67	1	1,33	1,67	2
x in m	0	0,08	0,33	0,77	1,43	2,28	3,4

1. Prüfen Sie, inwieweit die Messdaten durch $s(t) = \frac{1}{2}at^2$ wiedergegeben werden.
2. Beschreiben Sie Ihr Vorgehen.
3. Zeichnen Sie die theoretische Kurve mit dem für die Beschleunigung ermittelten Wert ein.
4. Bestimmen Sie die Intervallgeschwindigkeiten, tragen Sie sie in das t-v-Diagramm ein und prüfen Sie, ob eine gleichmäßige Beschleunigung vorliegt. Passt der Wert zum oben ermittelten Wert?

Geschwindigkeiten:

t in s	0						
v in $\frac{m}{s}$	0						

Abb. 4: Ein Arbeitsblatt zur gleichmäßig beschleunigten Bewegung. Mit den Ergebnissen einer Videoanalyse soll überprüft werden, inwieweit die gleichmäßig beschleunigte Bewegung ein geeignetes Beschreibungsmodell für das Anfahren eines Autos an der Ampel ist.

3.5. Untersuchung komplexerer Bewegungen: Würfe, Kreisbewegungen und Bewegungen mit Reibung.

Wurfbewegungen lassen sich sehr gut mit Videoanalyse untersuchen. Im Schülerlabor der Goethe-Universität untersuchen beispielsweise Lernende der Sekundarstufe I die Beschleunigung, die ein Auto erfährt, das eine gekrümmte Rampe hinunterfährt und dann waagrecht abgeworfen wird (siehe Abb. 5) oder auch die Beschleunigungen, die in einem Looping auftreten (siehe Abb. 6).

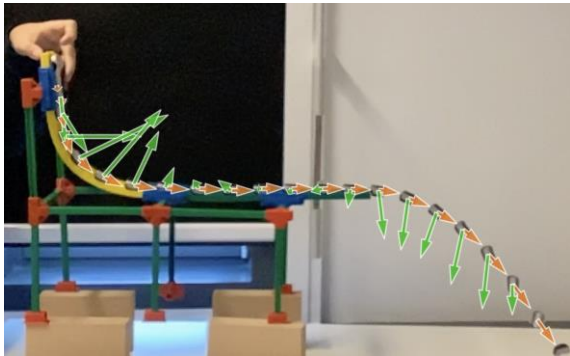


Abb. 5: Arbeitsergebnis einer Gruppe von Schüler*innen aus dem Schülerlabor der Goethe-Universität. Untersucht wird die Beschleunigung, die ein Spielzeugauto erfährt, das eine gekrümmte Rampe hinunterfährt und dann waagrecht abgeworfen wird.

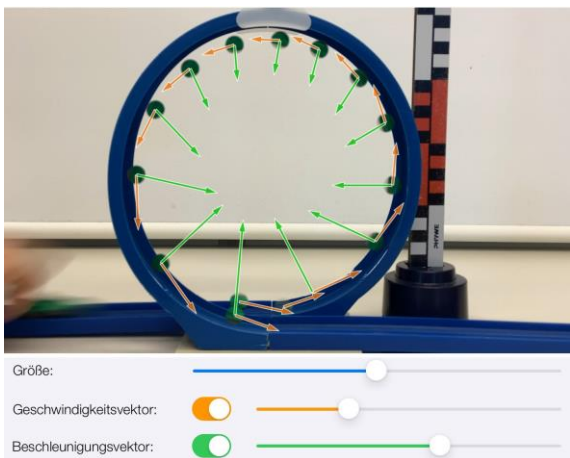


Abb. 6: Arbeitsergebnis einer Gruppe von Schüler*innen aus dem Schülerlabor der Goethe-Universität. Untersucht wird die Beschleunigung, die ein Spielzeugauto beim Durchfahren eines Loopings erfährt

Auch Bewegungen, bei denen Reibung eine Rolle spielt, werden mit Videoanalyse zugänglich. Fallende Backförmchen sind erstaunlich gute Modelle für einen fallenden Fallschirm [6]. In den Zeit-Positions-Diagrammen sind sowohl die Beschleunigungsphase als auch die sich einstellende konstante Endgeschwindigkeit zu erkennen (siehe Abb. 7). Durch das Ineinanderstecken unterschiedlicher Zahlen an Backförmchen kann man die fallende Masse variieren, ohne die geometrische Form nennenswert zu verändern. Aus der Abhängigkeit der Endgeschwindigkeit von der Masse kann man dann auf die quadratische

Abhängigkeit der Luftwiderstandskraft von der Geschwindigkeit schließen. Auch ein Luftballon, der, um Trudelbewegungen zu minimieren, mit einer Büroklammer beschwert ist, ist ein geeignetes Untersuchungsobjekt.

4. Hilfestellungen für die Durchführung von Videoanalysen im Unterricht

Um Lehrkräften den Einsatz von Videoanalyse-Apps im eigenen Unterricht zu erleichtern, werden Anleitungsblätter für die Schülerhand erstellt und Video-Tutorials angefertigt. In den Tutorials wird die Bedienung von NewtonDV und Viana 2 erklärt. Außerdem gibt es ein Tutorial, das erklärt, worauf man grundsätzlich bei der Anfertigung von Bewegungsvideos achten sollte, damit die anschließende Analyse gut und ohne Schwierigkeiten gelingt. Außerdem wurde ein Programm für Windows und macOS entwickelt, mit dem man Videos vorbereitend bearbeiten kann, indem man ein Koordinatensystem und / oder einen Zeitstempel einfügt [7]. Es werden also viele Materialien für den Unterricht zur freien Verwendung und in editierbarer Form zum Download zur Verfügung gestellt. Diese können unverändert genutzt werden oder an die eigenen Bedürfnisse angepasst werden.

5. Literatur

- [1] Suleder, M. (2010): Videoanalyse und Physikunterricht: Technik - Didaktik – Unterrichtspraxis, Aulis Verlag in Friedrich Verlag GmbH, Hannover
- [2] Gößling, A.; Becker, S.; Wilhelm, T.; Kuhn, J. (2023): Bewegungen analysieren mittels digitaler Videoanalyse - In: Wilhelm, T. (Hrsg.): Digital Physik unterrichten. Grundlagen, Impulse, Perspektiven, Klett Kallmeyer, Hannover, S. 40 - 70
- [3] Knebloch, J.; Hengel, C.; Kyas, J.; Hansch, A.; Wilhelm, T.: Mangelnde Implementation physikdidaktischer Innovationen - Ursachen aus Sicht der Lehrkräfte – In: Grötzebauch, H.; Heinicke, S. (Hrsg.): PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung in Greifswald 2024, 2024
- [4] Wejner, R.: NewtonDV; <http://www.descartes-media.de/newtondv/index.html>
- [5] Didaktik der Physik der FU Berlin (2022): <http://www.physik.fu-berlin.de/einrichtungen/ag/ag-nordmeier/forschung/laufende/viana/index.html>
- [6] Becker, S., Klein, P., & Kuhn, J. (2016). Video analysis on tablet computers to investigate effects of air resistance. The Physics Teacher, 54(7), 440-441. <https://doi.org/10.1119/1.4962788>
- [7] Hengel, C.; Kyas, J.; Knebloch, J.; Hansch, A.; Wilhelm, T.: Videos von Bewegungen für den Unterricht vorbereiten. Bewegungsvideos direkt zum Ausgangspunkt des Lernens machen – In: Grötzebauch, H.; Heinicke, S. (Hrsg.): PhyDid

Anhang

Im Anhang folgen zwei Arbeitsblätter. Im ersten Arbeitsblatt geht es um den Aufbau des Geschwindig-

Fall eines Backförmchens – Modell für einen Fallschirmspringer

In dem Serienbild sieht man, wie ein Backförmchen zu Boden fällt. Eingezeichnet sind die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren.

Darunter finden sich das zugehörige t - y -Diagramm, sowie das t - v_y -Diagramm.

Aufgabe:

Untersuchen Sie, inwieweit sich die Vorüberlegungen verifizieren lassen. Gehen Sie dabei auf folgende Aspekte ein:

- Analysieren Sie die Entwicklung der Beschleunigung mit der Zeit. Setzen Sie diese in Bezug zur wirkenden resultierenden Kraft.
- Analysieren Sie den Verlauf der Diagramme: An welchen Merkmalen lässt sich jeweils erkennen, dass eine Grenzgeschwindigkeit erreicht wird?
- Bestimmen Sie aus beiden Graphen die Endgeschwindigkeit. Zeichnen Sie jeweils Ausgleichsgeraden ein.

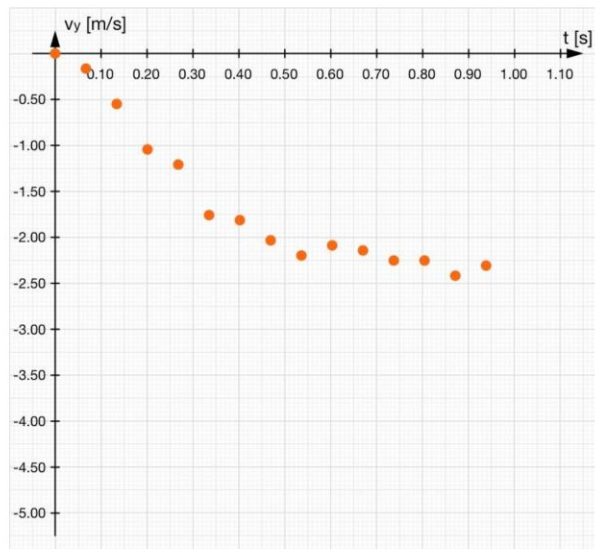
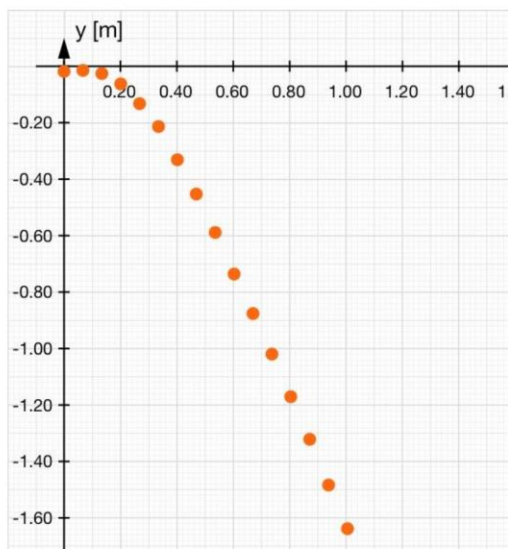
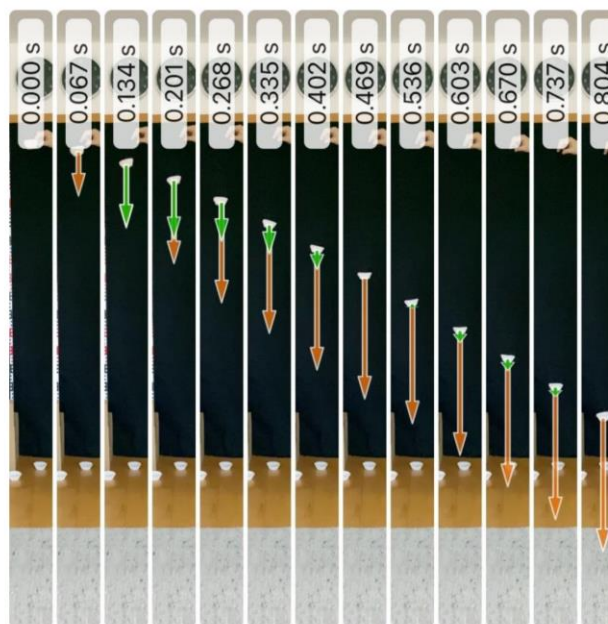
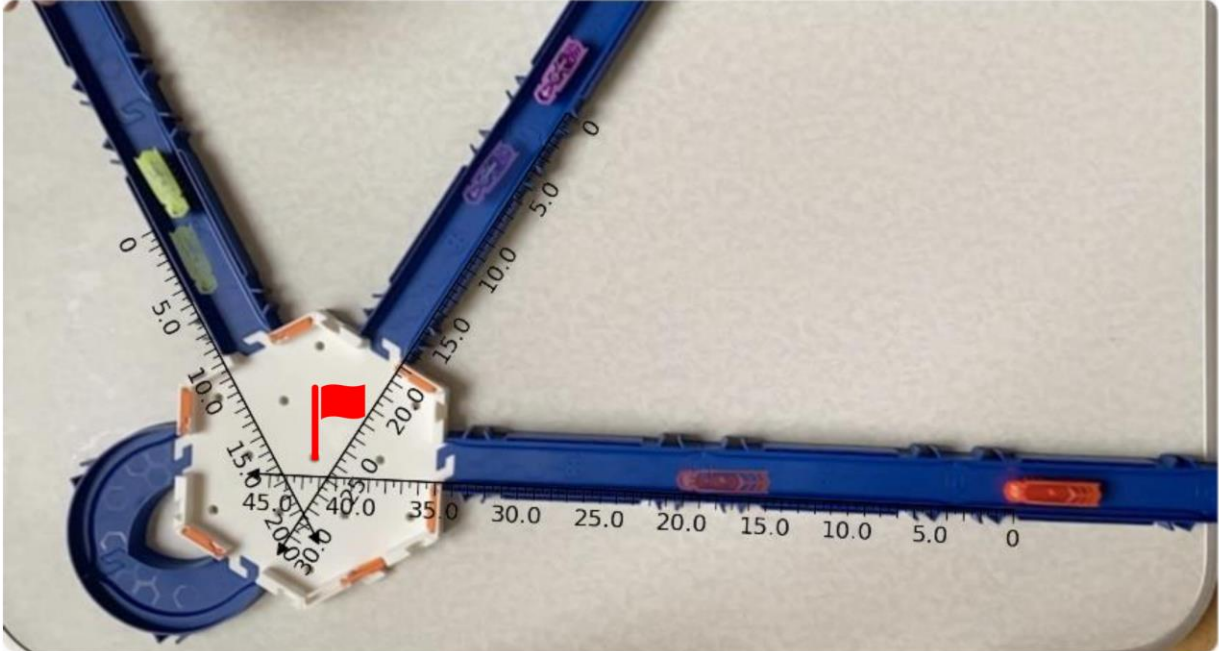


Abb. 7: Arbeitsblatt zur Untersuchung des freien Falls mit Luftwiderstand am Beispiel eines fallenden Backförmchens. Zu dem Aufgabenblatt gehört ein weiteres Blatt, auf dem Vorüberlegungen zu den wirkenden Kräften angeregt werden.

Hexbugs auf Kollisionskurs

Das Stroboskopbild zeigt 3 Hexbugs, die sich aufeinander zu bewegen. Die Skalen sind in cm eingeteilt. Zwischen den beiden Positionen sind 0,416s vergangen.



Aufgaben

1. Untersuche die Geschwindigkeiten der Hexbugs:
 - a. Erkläre, woran man im Bild die Unterschiede der Geschwindigkeiten der Hexbugs erkennt. Berücksichtige dabei Tempo und Richtung.
 - b. Markiere die Positionen der Hexbugs zu den Zeiten $t=0,8\text{s}$ und $t=1,2\text{s}$.
 - c. Berechne das Tempo, mit dem sich die Hexbugs bewegen.
 - d. Zeichne Geschwindigkeitspfeile ein. (Maßstab: $1\text{cm} \hat{=} 10 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$).

2. Welcher Hexbug kommt zuerst im Ziel an?
 - a. Schätze die Ankunftszeiten der Hexbugs aus den Ergebnissen von Aufgabe 1 ab.
 - b. Berechne die genauen Ankunftszeiten und überprüfe deine Vorhersage im Video.
 - c. Begründe, warum es zu Unterschieden zwischen der vorhergesagten und der tatsächlichen Ankunftszeit kommt.



„Graphen laufen“

1. Aufgabenstellung

Die abgebildeten Ort-Zeit-Diagramme sollen nachgestellt und mithilfe der Videoanalyse App Viana 2 aufgezeichnet werden.:

1. Jedes Gruppenmitglied sucht sich ein Diagramm aus, das es nachstellen möchte.
2. Die Gruppe sucht sich einen geeigneten Hintergrund auf dem Schulhof/Flur/Aula und stellt das Ipad mit einem ausreichenden Abstand auf. Achtet darauf, dass der Hintergrund einen guten Kontrast liefert und nicht zu unruhig ist.
3. Der Reihe nach stellt jedes Gruppenmitglied sein ausgesuchtes Diagramm nach.
4. Direkt im Anschluss wertet die Gruppe die mit der Videoapp aufgezeichneten Diagramme aus.
Wenn einzelne Aspekte des Diagramms fehlen oder falsch dargestellt werden, wird die Simulation wiederholt und verbessert.

Diagramm A

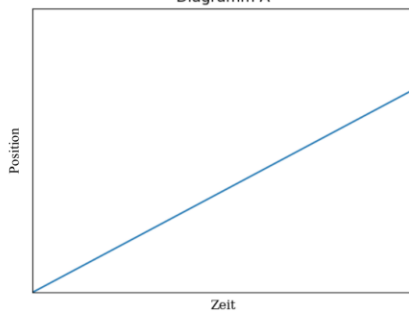


Diagramm B

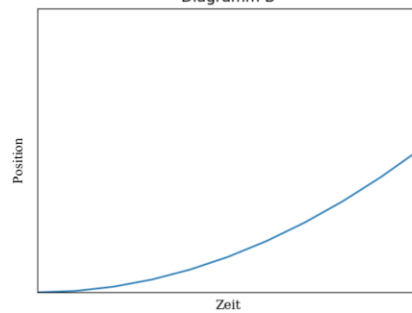


Diagramm C

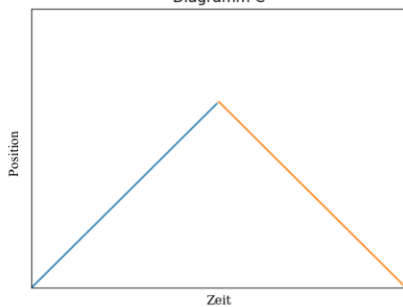
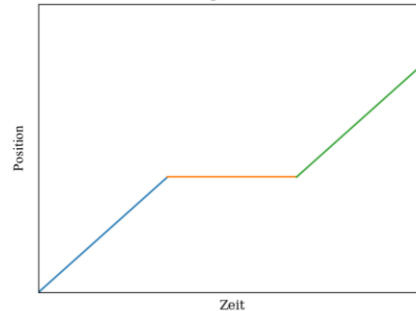


Diagramm D



Videos von Bewegungen für den Unterricht vorbereiten

Bewegungsvideos direkt zum Ausgangspunkt des Lernens machen

Christian Hengel*, Julie Kyas*, Jakub Knebloch*, Andreas Hansch*, Thomas Wilhelm*

*Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt
c.hengel@t-online.de

Kurzfassung

Gerade am Anfang des Konzeptaufbaus ist der schnelle Weg zu fertigen Diagrammen, den Videoanalyse-Apps bieten, für das Verständnis eher hinderlich. Eine Videoanalyse zu Fuß, bei der die Schüler*innen einem Video in regelmäßigen Zeitabständen die Position eines Objekts entnehmen und die gewonnenen Daten auswerten, ist eher für einen ersten Zugang zur quantitativen Betrachtung kinematischer Größen geeignet. Dafür ist es erforderlich, im Video die Zeit und die Position eines Objekts bestimmen zu können.

Im Rahmen des Kooperationsprojekts „Videoanalyse in die Praxis bringen“ zwischen der Goethe-Universität Frankfurt und dem Hessischen Kultusministerium wurde hierfür eine App für Windows und MacOS entwickelt, mit der man Videos mit einem zweidimensionalen Koordinatensystem, einer eindimensionalen Positionsskala oder einem Polarkoordinatensystem bzw. einer Winkelskala versehen und einen Zeitstempel zu jedem Frame hinzufügen kann.

Die App erleichtert es damit auch, mit Hilfe von Videoanalyse-Apps Stroboskopbilder oder Serienbilder für Aufgaben zu erzeugen, in denen die Positionen des Objekts und der dazugehörige Zeitpunkt im Bewegungsverlauf gut abzulesen sind. Wenn in einem Video der Maßstab oder die Uhr im Bild fehlt, kann man sie auf diese Weise nachträglich hinzufügen.

1. Ausgangspunkt

Die Idee, Videos von Bewegungen im Rahmen der Kinematik und Dynamik für Unterrichtszwecke zu nutzen, ist nicht neu. Die gefilmten Bewegungen können dabei sowohl direkt im Unterricht zum Durcharbeiten und Üben eingesetzt werden, als auch als Grundlage für die Erstellung von Unterrichtsmaterial verwendet werden. Für verschiedene Aufgabentypen kommt es dabei darauf an, dass entweder dem Video selbst oder einem damit erstellten Stroboskop- oder Serienbild gut zu entnehmen ist, zu welcher Zeit sich ein Objekt an welcher Position bzw. an welchem Ort befunden hat. Bei linearen Bewegungen kann man das dadurch erreichen, dass man eine Stoppuhr (Smartphone) und einen Maßstab parallel zur Bewegungsrichtung ins Bild stellt. Es ist aber gar nicht so selten, dass die Videoqualität ein genaues Ablesen des Maßstabs nicht zulässt oder die Position der Uhr im Bild dann doch nicht zum gewünschten Zuschnitt im Serienbild passt. Manchmal würde man auch gerne ein bestehendes Video verwenden, ohne die Aufnahme wiederholen zu müssen, oder vielleicht sogar eine kurze Sequenz aus einem Spielfilm für diesen Zweck nutzen.

2. Die Goethe-Video-Suite

Für diese Fälle wurden im Rahmen des Kooperationsprojekts mit dem Hessischen Kultusministerium „Videoanalyse in den Unterricht bringen“ die Goethe-Video-Suite entwickelt. Die App läuft unter Windows

und MacOS. Sie erlaubt es, in bestehende Videos ein kartesisches Koordinatensystem einzufügen (siehe Abb. 1), eine einzelne Skalen-Achse (skaliert in Längeneinheiten) (siehe Abb. 2) oder auch ein Polarkoordinatensystem (skaliert mit Winkeln in Grad oder Radiant) (siehe Abb. 3, Seite 3). Auch eine kreisförmige Skala, die in Längeneinheiten skaliert, ist möglich (siehe Abb. 4, Seite 3). Die Längeneinheit wird dabei durch zwei Punkte im Bild festgelegt, deren Abstand bekannt ist. Das Koordinatensystem kann flexibel positioniert und orientiert werden.

Man kann außerdem einen Zeitstempel einfügen, dessen Größe, Orientierung und Position im Bild frei festgelegt werden kann (siehe Abb. 5). Dabei kann man den Frame festlegen, für den $t = 0$ sein soll oder einem beliebigen Frame eine beliebige Zeit zuordnen. Der Zeitschritt zwischen zwei Einzelbildern wird durch die Framerate bestimmt, die man in der App allerdings auch nachträglich korrigieren kann. Das ist wichtig, weil die im Header der Videodateien hinterlegten Frameraten nicht immer der wahren Framerate bei der Aufnahme entsprechen.

Die bearbeiteten Videos werden im *.mp4-Format gespeichert. Sie können für den Export auf wesentliche Bildbereiche zugeschnitten werden und der erste und letzte Frame kann jeweils festgelegt werden. Die erzeugten Koordinatensysteme können außerdem als Leerdigramme im *.png-Format exportiert werden, um sie bei der Erstellung von Aufgaben zu

verwenden. Beispiele für Ergebnisse, die mit der Goethe-Video-Suite erstellt wurden, zeigen die hier dargestellten Abbildungen. Die zugehörigen Videos können unter <https://t1p.de/GVS> betrachtet und heruntergeladen werden. Dort steht auch die aktuelle Version der Goethe-Video-Suite zum Download bereit.

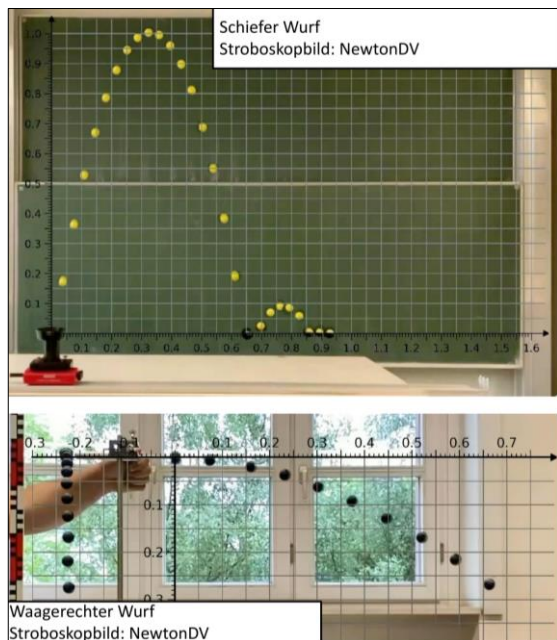


Abb. 1: Zwei Bilder aus Videos klassischer Demonstrations-Experimente, bei denen mit der Goethe-Video-Suite ein kartesisches Koordinatensystem in das Video eingefügt wurde. Die beiden Stroboskopbilder wurden mit der iOS-App NewtonDV aus dem Video erstellt.

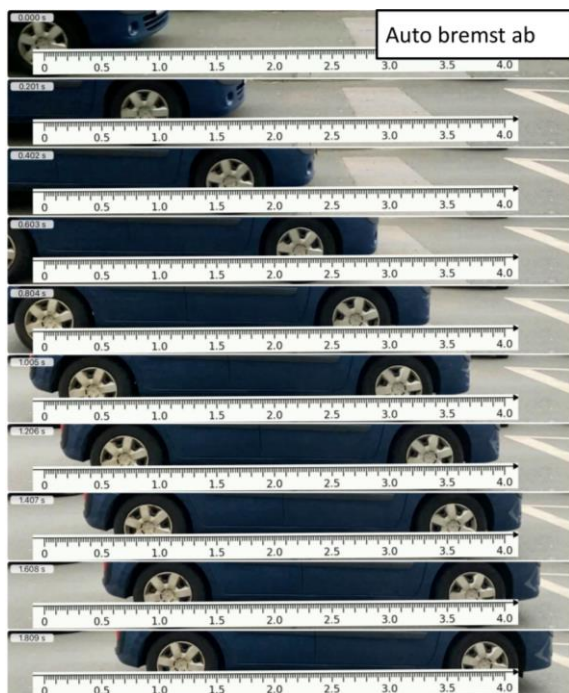


Abb. 2: Das Serienbild eines abbremsenden Autos aus der iOS-App NewtonDV, wobei eine Skalen-Achse in das Video eingefügt wurde.

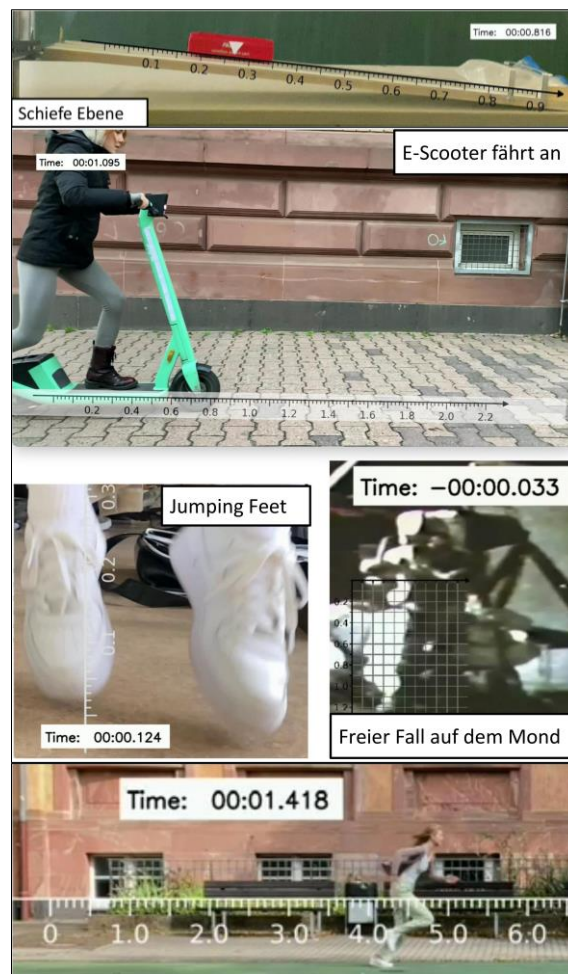


Abb. 5: Beispiele für Videos von, bei denen mit der Goethe-Video-Suite nachträglich ein Zeitstempel (und eine Skalen-Achse) eingefügt wurde (Quelle des Mond-Videos: [1]).

3. Assistent für konstante Beschleunigungen

Ein besonderes Feature ist der Assistent für gleichmäßig beschleunigte Bewegungen. Er erlaubt es, für diesen Bewegungstyp möglichst genau den Frame zu finden, für den die Bewegung aus der Ruhe beginnt, also z.B. den Moment, in dem eine Kugel losgelassen wird. Dazu markiert man, nachdem man Ursprung und Orientierung des Koordinatensystems festgelegt hat, die Position des Objekts zu zwei verschiedenen Zeitpunkten. Den Rest erledigt dann die App.

Dieses Feature ist dann wichtig, wenn im Unterricht mit dem Video z.B. die Gültigkeit des Zeit-Positions-Gesetzes für gleichmäßig beschleunigte Bewegungen aus der Ruhe geprüft werden soll. Denn wenn man dazu für alle Zeit-Positions-Paare den Wert der Beschleunigung gemäß $a = 2s/t^2$ bestimmt und dabei $t = 0$ der falschen Position zuordnet – kurz vor oder kurz nach dem eigentlichen Beginn der Bewegung, ergibt sich ein systematischer Fehler, der gerade für t nahe Null zu großen Abweichungen der ermittelten Beschleunigung vom wahren Wert führt und es außerdem so erscheint, als nähme die Beschleunigung über den Verlauf der Bewegung hinweg zu oder ab,

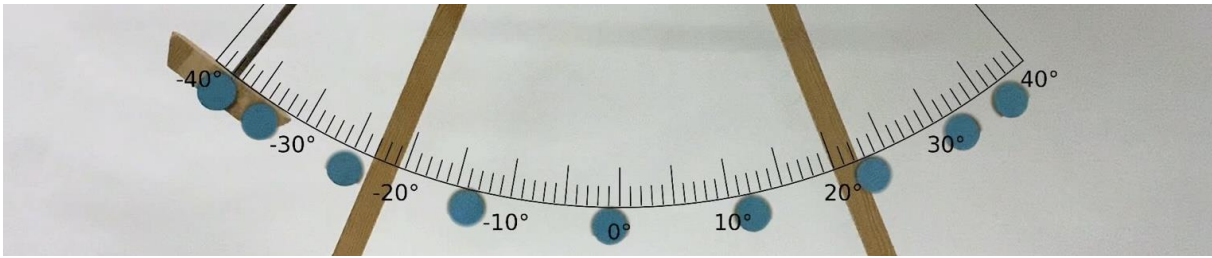


Abb. 3: Ein Beispiel für ein Video einer Schaukel, bei dem mit der Goethe-Video-Suite eine Winkel-Skala eingeführt wurde.

obwohl man ja gerade zeigen will, dass sie konstant ist. In Tabelle 1 ist zur Illustration für den freien Fall simuliert, wie es sich bei Aufnahmezeiten von 30 fps und 240 fps auf den ermittelten Beschleunigungswert auswirkt, wenn man die Zeit $t = 0$ dem Frame direkt vor dem wahren „ $t = 0$ “-Frame zuordnet.

Der ermittelte Wert der Beschleunigung ist in dem Beispiel bei 30 fps anfangs fast doppelt so groß wie der wahre Wert, bei 240 fps beträgt die Abweichung anfangs noch 8,5 %. Auch bei 240 fps entsteht noch der Eindruck, die Beschleunigung nähme mit der Zeit systematisch ab, wenn man bei der Zuordnung von $t = 0$ nur um einen Frame neben dem wahren „ $t = 0$ “-Frame liegt. Solche Ergebnisse sind im Unterricht kaum geeignet, das Vertrauen der Schüler*innen in die Wirkmächtigkeit der Physik zu stärken. Sie machen eine intensive Auseinandersetzung mit dem

Messverfahren und eben diesem systematischen Fehler erforderlich. Auch wenn die Diskussion von Messfehlern selbstverständlich Gegenstand des Physikunterrichts sein soll, sind die Stunden, in denen Begriffe erworben und konsolidiert werden sollen, dafür der falsche Zeitpunkt. Aus der Simulation der Tabelle 1 kann man zwei Schlüsse ziehen: Erstens ist man gut beraten, für derartige quantitative Analysevorhaben eine hohe Framerate zu verwenden. Zweitens ist es dann wichtig, den Frame, in dem die Bewegung beginnt, möglichst genau aufzufinden. Dabei kann der Assistent in der Goethe-Video-Suite helfen.

Zusätzlich zum Auffinden des Frames mit $t = 0$ kann man auch den Maßstab automatisch so anpassen lassen, dass er im Zusammenspiel mit der Bildrate zu einer bestimmten Beschleunigung passt, z.B. der

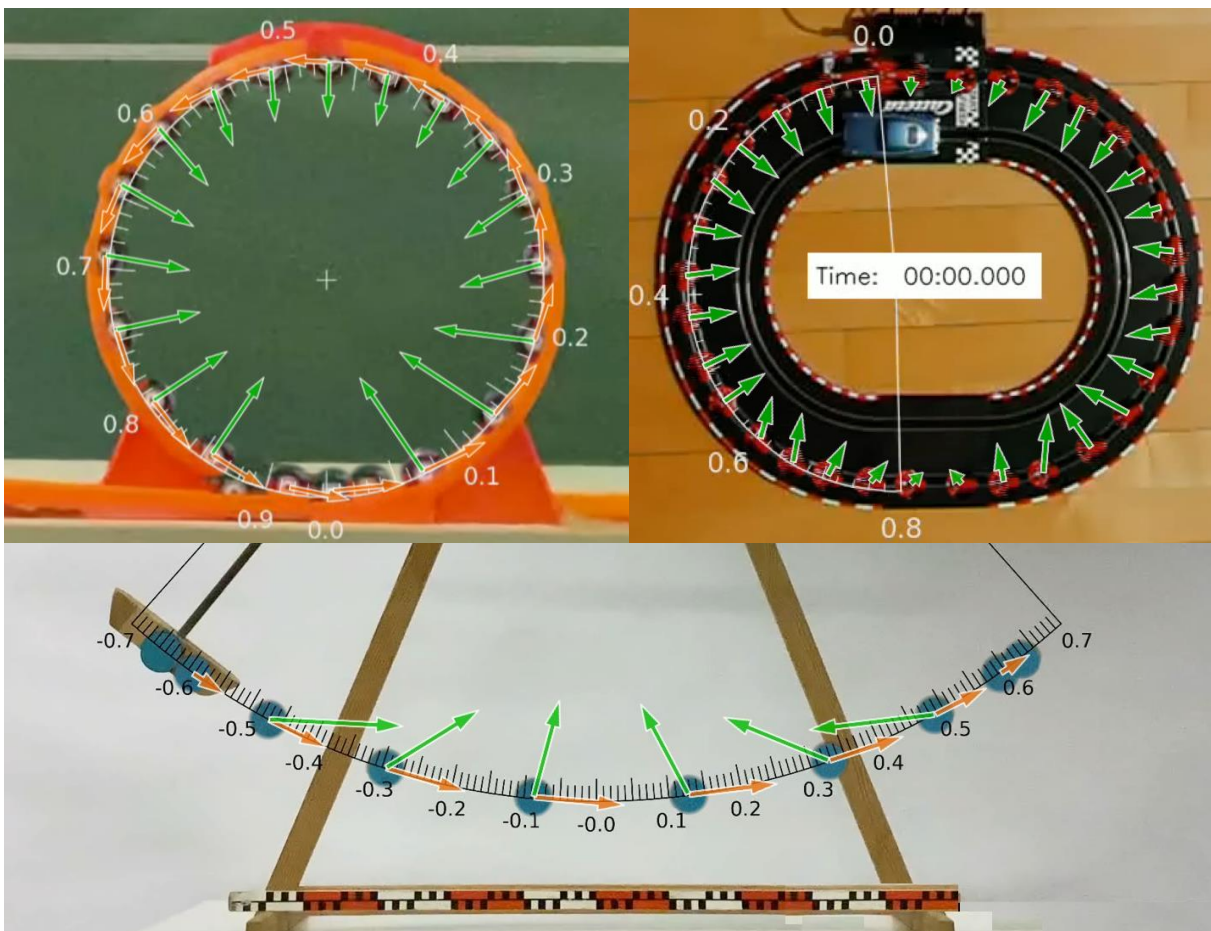


Abb. 4: Drei Beispiele für Videos, bei denen mit der Goethe-Video-Suite eine kreisförmige Skala eingeführt wurde, die in Längeneinheiten skaliert ist (Looping, Carrera-Bahn, Schiffschaukel).

Tab. 1: Aus $a = 2s/t^2$ ermittelte Beschleunigungswerte für den einen idealen freien Fall, wenn $t = 0$ dem Frame vor dem wahren „ $t = 0$ “-Frame zugeordnet wird (Simulation).

30 fps			
wahre Zeit in s	Zeit im Video in s	s in m	$a = 2s/t^2$ in m/s^2
0,133	0,1	0,087	17,44
0,233	0,2	0,267	13,35
0,333	0,3	0,545	12,11
0,433	0,4	0,921	11,51
0,533	0,5	1,395	11,16
0,633	0,6	1,967	10,93
0,733	0,7	2,638	10,77
0,833	0,8	3,406	10,64
0,933	0,9	4,273	10,55
1,033	1,0	5,237	10,47

240 fps			
wahre Zeit in s	Zeit im Video in s	s in m	$a = 2s/t^2$ in m/s^2
0,104	0,1	0,05	10,64
0,204	0,2	0,20	10,22
0,304	0,3	0,45	10,08
0,404	0,4	0,80	10,02
0,504	0,5	1,25	9,97
0,604	0,6	1,79	9,95
0,704	0,7	2,43	9,93
0,804	0,8	3,17	9,91
0,904	0,9	4,01	9,90
1,004	1,0	4,95	9,89

Erdbeschleunigung, was gerade bei fehlenden Referenzlängen eine Hilfe ist.

4. Einsatzmöglichkeiten

Mit Zeitstempeln und Koordinatensystemen vorbereitete Bewegungsvideos eignen sich vor allem, um im Zusammenspiel mit geeigneten Aufgabenstellungen ein operatives Durcharbeiten der kinematischen Größen zu initiieren – in dem Sinne, wie Hans Aebli es in seinen Überlegungen zum Begriffserwerb beschrieben hat [2]. Dazu gehören das Ausloten der Bedeutung eines Begriffs und seiner Teilbegriffe (hier etwa „Geschwindigkeit“ und „Positionsänderung“ in einem „Zeitintervall“), ihrer Beziehung untereinander, der Beziehungen zu verwandten Begriffen (Ähnlichkeiten und Unterschiede; hier z.B. „Geschwindigkeit“ ist etwas anderes als „Tempo“). Dies kann durch geeignete Problemstellungen im Unterricht angestoßen werden. Durch die Nutzung aufgezeichneter Bewegungen als Ausgangspunkt kann man dabei die Beschäftigung mit den kinematischen Größen zunächst von der Auseinandersetzung mit den Schwierigkeiten des Messprozess abkoppeln, so dass die Aufmerksamkeit nicht auf zwei Schwerpunkte verteilt werden muss.

Ein Aufgabenformat, das sich für das Ausloten von Begriffsbedeutung und -umfang eignet, ist die „Videoanalyse zu Fuß“, bei der die Schüler*innen die Analyseschritte selbst durchführen müssen, angefangen von der Entnahme und Übertragung der Zeit-Positions-Daten in ein Diagramm, über die Bestimmung von Intervallgeschwindigkeiten bis hin zur Bestimmung von Beschleunigungen. Dies soll aber nicht im Sinne eines Abarbeitens vorgegebener Rechenwege geschehen, sondern vielmehr unter Aufgabenstellungen der Art „Was müssen wir tun, um aus den uns vorliegenden Daten möglichst genau die Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit zu bestimmen?“ Es muss darum gehen, dass die kinematischen

Größen für die Lernenden durch die Bearbeitung der Aufgaben zu den Videos mit Bedeutung aufgeladen werden und ihre Beziehungen untereinander für sie geklärt werden.

Für die Erfassung der Beziehung zwischen Position und Geschwindigkeit ist es hilfreich, auch mit der umgekehrten Aufgabe zu arbeiten, indem man die Schüler*innen ausgehend von einem Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm einer etwa abschnittsweise gleichförmigen Bewegung das Zeit-Positionsdiagramm rekonstruieren und das Ergebnis mit einem Video überprüfen lässt.

Der Begriffsaufbau erstreckt sich neben der Erfassung von Begriffsbedeutung und -umfang auf das Kennenlernen der Anwendbarkeit eines Begriffs. Klassische Übungsaufgaben lassen erkennen, welche Arten von Problemen und Fragestellungen sich mit den kinematischen Größen und den sie verbindenden Gesetzmäßigkeiten angehen lassen. Auch solche Aufgaben lassen sich mit vorbereiteten Videos umrahmen. Als Beispiel seien Begegnungs- oder Überholaufgaben angeführt. In einem Clip sehen die Schüler*innen zwei sich bewegende Wagen oder Personen mit der Aufgabe, den Zeitpunkt des Zusammentreffens vorherzusagen. Mit dem vollständigen Video kann die Vorhersage dann überprüft werden. Zum Ausloten der Anwendbarkeit eines Begriffs gehört es auch, die verschiedenen Kontexte kennenzulernen, in denen er Anwendung findet. Dazu können mit Hilfe vorbereiteter Videos Abläufe alltäglicher Bewegungen in den Unterricht integriert werden, um an ihnen etwa die Reichweite der idealisierenden Modelle „(abschnittsweise) gleichförmige Bewegung“ und „gleichmäßig beschleunigte Bewegung“ zu untersuchen.

Weitere Aktivitäten für ein operatives Durcharbeiten der kinematischen Größen sind beispielweise:

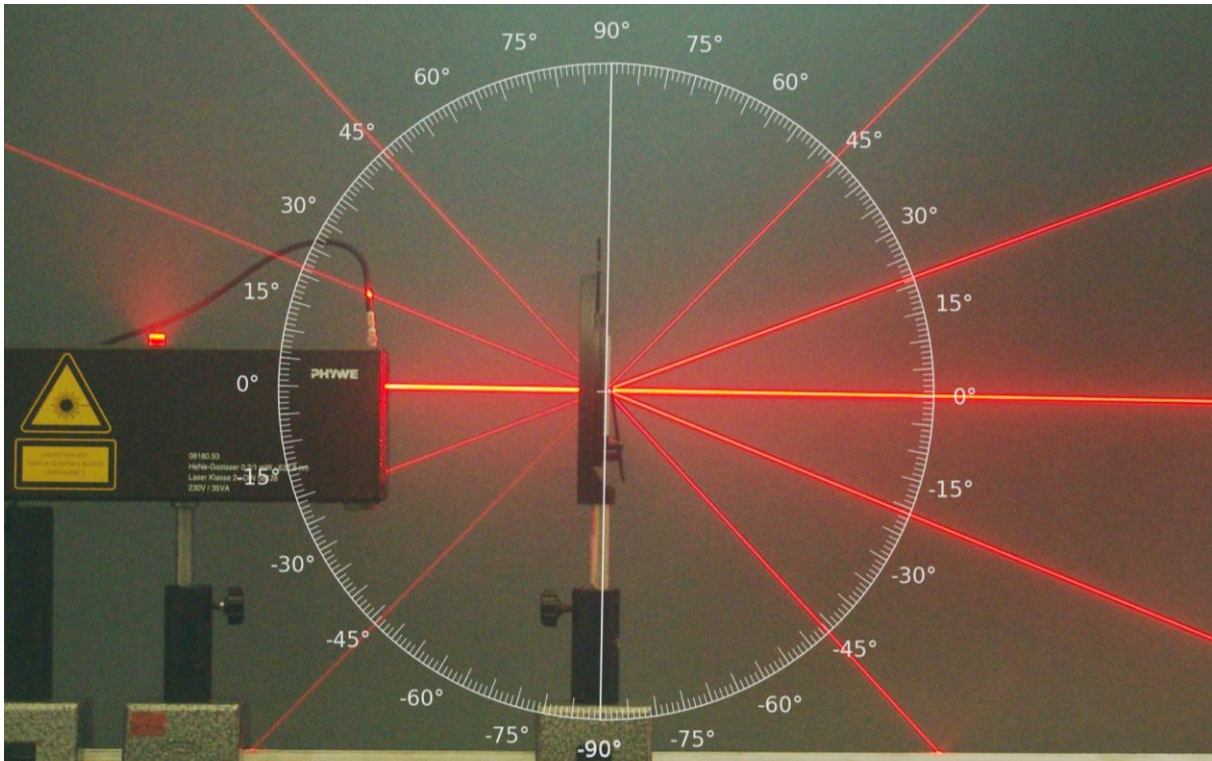


Abb. 6: Ein Gitter wurde in einem Raum, der mit Nebel einer Disco-Nebelmaschine erfüllt war, beleuchtet [3]. Das Foto von den Maxima der Beugung am Gitter wurde mit einer Winkel-Skala versehen, so dass die Beugungswinkel abgelesen werden können.

- Bewegungsvideos werden im Klassenverband gemeinsam angeschaut. Dabei werden die Positionsänderungen in gleichen Zeitabständen betrachtet. So kann ein Überblick über die Merkmale einer Bewegung geschaffen werden.
- Die Gültigkeit der (zuvor erarbeiteten) Gesetze der gleichmäßig beschleunigten Bewegung (vgl. Abschnitt 3) wird am Beispiel von Bewegungen überprüft, bei denen konstante Kräfte wirken (schiefe Ebene, freier Fall, Propellerfahrzeug).
- Die Beschleunigung wird schnell aus verschiedenen t - s -Wertepaaren einer geradlinigen Bewegung bestimmt und die Konstanz der Beschleunigung überprüft.
- Zeit-Positionsdiagramme werden einer Auswahl von Bewegungsvideos begründet zugeordnet.
- Eine Art „Stroboskopbilder“ wird „zu Fuß“ erstellt, indem die Position eines Objekts in regelmäßigen Zeitabständen abgelesen und in ein x - y -Diagramm übertragen wird. Dies ist insbesondere für zweidimensionale Bewegungen geeignet.
- Stroboskop- und Serienbildern werden als Unterrichtsmaterial mit gut ablesbarer Skala und Zeitstempeln mit Videoanalyseapps erstellt.

5. Einsatz außerhalb der Mechanik

Mit der Goethe-Video-Suite können auch auf Einzelbildern Koordinatensysteme und Skalen angebracht werden. Das erweitert die Nutzbarkeit der App über den Bereich der Mechanik hinaus. So können z.B. Fotos von Maxima bei der Beugung am Gitter mit einer Skala versehen werden (siehe Abb. 6+7). In einer Aufnahme von einer im Feld eines Plattenkondensators aufgehängten Kugel kann eine Winkelskala eingefügt werden, so dass man den Ablenkwinkel unter der Einwirkung des Feldes gut ablesen kann.

6. Ausblick

Im Rahmen des Kooperationsprojekts „Videoanalyse in die Praxis bringen“ [4] werden Unterrichtsmaterialien entwickelt, die den Einsatz von Videoanalyse in der Unterrichtspraxis erleichtern soll. Die Materialien umfassen u.a. Beispiele, die die Einsatzmöglichkeiten der Goethe-Video-Suite konkretisieren. Des Weiteren gibt es Video-Tutorials, Vorschläge für Bewegungen, die sich für eine Videoanalyse eignen, fertige Videos und passende Arbeitsblätter.



Abb. 7: Das Beugungsbild an einem Gitter wurde mit einer Skalen-Achse versehen. Die Abstände der Maxima vom nullten Maximum können nun abgelesen und für Berechnungen verwendet werden.

7. Literatur

- [1] NASA (August 1971). In: Wikipedia - Die freie Enzyklopädie.
https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Apollo_15_feather_and_hammer_drop.ogg, abgerufen am 28.05.2024
- [2] Aebli, H. (1983). *Zwölf Grundformen des Lehrens*. Stuttgart: Klett-Cotta.
- [3] Wilhelm, T. (2010). Laserstrahlen mit der Nebelmaschine sichtbar machen. *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, S. 14-16.
- [4] Kyas, J., Hengel, C., Knebloch, J., Hansch, A., & Wilhelm, T. (2024). Videoanalyse in die Praxis bringen - Bewegungsvideos direkt zum Ausgangspunkt des Lernens machen. In: *Grötzebauch, H.; Heinicke, S. (Hrsg.): PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung 2024*.

Visualisierung von Elektronen in Stromkreisen mithilfe der App PUMA : Spannungslabor

Lisa Nebel, Christoph Stolzenberger, Florian Frank, Thomas Trefzger

Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik
Christoph.stolzenberger@uni-wuerzburg.de

Kurzfassung

Elektronen werden meistens als Kugeln visualisiert. Inwiefern dieses Bild bei Schüler*innen fehlerhafte Vorstellungen hervorruft bzw. der Natur dieser Elementarteilchen gerecht wird, bleibt dabei unklar. Da es keine wissenschaftliche Empfehlung zur Verwendung bestimmter Elektronendarstellungen gibt, findet man in gängigen Schulbüchern recht uneinheitlich verschiedene Visualisierungen. Diese beschränken sich in niedrigeren Klassen v.a. auf Teilchendarstellungen, welche zur Sekundarstufe II hin langsam in Richtung einer Wellen- oder Wahrscheinlichkeitsvorstellung erweitert werden. Die Applikation „PUMA : Spannungslabor“ erlaubt die Darstellung von Analogie-Modellvorstellungen zu elektrischen Stromkreisen und visualisiert dabei auch die sich im Stromkreis bewegenden Elektronen. Mithilfe einer systematischen Literaturrecherche wurden die gängigsten Elektronendarstellungen identifiziert (z.B. Kugel, Minuszeichen, Wolke, Wellenpaket) und in die App implementiert. Im Rahmen einer Akzeptanzbefragung erhielten Physik-Lehrpersonen die Möglichkeit, die verschiedenen Darstellungen hinsichtlich des Einsatzes im Physikunterricht zu bewerten. In diesem Beitrag werden die Literaturrecherche, die Umsetzung in der Applikation sowie die Ergebnisse der Akzeptanzbefragung vorgestellt.

1. Einleitung

Visualisierungen im Physikunterricht bieten eine Möglichkeit, fachlich abstrakte Sachverhalte zu vereinfachen und Schüler*innen gegebenenfalls eine Orientierung zu bieten. Daher sind sie vor allem in der E-Lehre, in welcher experimentelle Effekte meist nur indirekt durch Messgeräte gezeigt werden können, besonders wichtig. Die Visualisierung des elektrischen Potentials kommt dabei ohne eine explizite Darstellung der Elektronen aus. Sie verwendet je nach gewählter Analogie z.B. eine Einfärbung oder eine Höhenverschiebung der Leiterstücke, um das entsprechende elektrische Potential anzugeben (vgl. [1]). Im Gegensatz dazu fordert die Visualisierung der Stromstärke eine explizite Darstellung sich bewegender Teilchen. Welche Teilchen dies sind, ist dabei jedoch zunächst nicht vorgegeben und wird gegebenenfalls durch die Wahl der Analogie bestimmt. In einer Wasserkreis-Analogie sind die sich bewegenden Teilchen Wassermoleküle, verwendet man die Fahrradketten-Analogie, bewegen sich entsprechend Kettenglieder. Da jeder elektrische Stromfluss sich bewegende elektrisch geladene Teilchen beinhaltet, ist es natürlich auch möglich auf eine analoge Darstellung zu verzichten und diese direkt zu visualisieren. In den meisten Fällen sind die elektrisch negativ geladenen Elektronen die Ursache des Stromflusses. Möchte man diese Elektronen auch zur Visualisierung des elektrischen Stroms verwenden, stellt sich zwangsläufig die Frage nach deren expliziter Darstellung. In Fachbüchern wird diese jedoch meist nicht extra the-

matisiert, da vermutlich weniger das Objekt als vielmehr seine Eigenschaften (Träger einer negativen Ladung, Welle-Teilchen-Dualismus, Lepton, etc.) physikalische Relevanz besitzen (vgl. [2]). Für eine wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Darstellung von Elektronen wurde eine Literaturrecherche durchgeführt.

2. Literaturrecherche zur Elektronendarstellung

Die Recherche wurde zum einen als systematische Literaturrecherche (SLR) wissenschaftlicher Veröffentlichungen und zum anderen in aktuellen Schulbüchern durchgeführt. Die SLR besteht aus einer systematischen Datenbanksuche, welche mit grauer Literatur aus Lehrbüchern und Fachzeitschriften erweitert wurde. Ihr Ziel war es, mögliche Empfehlungen der Wissenschaft bezüglich der vielfältigen Darstellungsweise von Elektronen zu identifizieren. Mithilfe der Schulbuchrecherche wurden die tatsächlich im Unterrichtskontext verwendeten Elektronenvisualisierungen ermittelt.

2.1. Systematische Literaturrecherche

Für die systematische Literaturrecherche (vgl. [3]) wurden vier umfangreiche Datenbanken durchsucht: Scopus, Web of Science, BASE und Google Scholar. In diesen wurde nach den folgenden Schlagwörtern und ihren Synonymen und englischen Übersetzungen gesucht:

- Elektronendarstellung*
- Elektronenvisualisierung*
- Elektronenrepräsentation*

- Quantenobjektdarstellung*
- Quantenobjektvisualisierung*
- Quantenobjektrepräsentation*

Da Elektronen häufig mit kugelartigen Strukturen gleichgesetzt werden, wurde auch gezielt nach Darstellungen von Quantenobjekten gesucht. Das Ziel war es, Suchergebnisse zu generieren, welche nicht primär auf einer Teilchendarstellung basieren, sondern welche z.B. auch die quantenmechanische Natur der Elektronen berücksichtigen (z.B. Wellenpaket).

Durch die Wahl der Suchmaschinen und Schlagwörter wurde versucht, eine möglichst breite Abdeckung der bestehenden Forschungsliteratur zu gewährleisten. Insgesamt wurden in diesem ersten Schritt 1.613 Veröffentlichungen identifiziert. Durch den Zusatz „AND Student“ wurden diejenigen Veröffentlichungen aussortiert, welche sich nicht mit Schüler*innen befassen, was den Schluss nahe legt, dass es sich bei diesen um rein fachwissenschaftliche Arbeiten gehandelt hat. Diese Einschränkung reduzierte die Ergebnisse auf 959 Treffer, welche anschließend einem dreistufigen Verfahren unterzogen wurden: Zuerst wurden die Titel (Screening 1) und anschließend die Abstracts der Veröffentlichungen (Screening 2) analysiert und auf ihre Relevanz für die SLR hin beurteilt. Abschließend wurden die Volltexte auf ihre Eignung hinsichtlich der Fragestellung geprüft (siehe Abb. 1). Es stellte sich heraus, dass keine der 1.613 Veröffentlichungen sich mit dem Thema der Elektronenvisualisierung in einem didaktischen Kontext befasst.

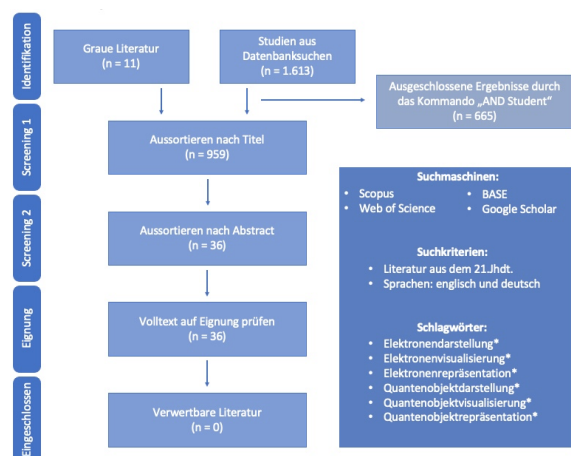


Abb. 1: Ablauf der systematischen Literaturrecherche

Für eine Einschätzung, inwieweit Darstellungsweisen von Elektronen im physikdidaktischen Diskurs vertreten sind, wurden zusätzlich elf Ressourcen aus der grauen Literatur, darunter sowohl bekannte Grundlagenbücher der Physikdidaktik (z.B. [4][5]) als auch einschlägige Fachzeitschriften (darunter z.B. die Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften), nach möglichen Visualisierungsempfehlungen durchsucht. Wie zuvor in der Datenbankrecherche wurde in keiner dieser Quellen das Thema Elektronendarstellung thematisiert.

2.2. Schulbuchrecherche

Für die Schulbuchrecherche wurden 25 bayerische Physik-Schulbücher der Jahrgangsstufen 7 bis 12 betrachtet, welche speziell für den neuen G9-Lehrplan verfasst wurden und somit die darin verwendeten Standards nicht älter als fünf Jahre sind. In diesen Schulbüchern wurden die darin benutzten Visualisierungen elektrischer Ladungen ermittelt.

Das Grundlagenwissen für Stromkreise und somit auch bildliche Darstellungen von sich bewegenden Elektronen wird vertieft in der 8. Klasse behandelt, in den darauf folgenden Jahrgangsstufen werden Stromkreise häufiger in Form von Schaltkreisen dargestellt. Deshalb wurde der Fokus der Untersuchung auf die Schulbücher der 8. Klasse gelegt und in den anderen Jahrgangsstufen auch generelle Darstellungen von Ladungen (z. B. in der Elektrostatik) mit einbezogen. In Abbildung 2 werden die Ergebnisse der ermittelten Visualisierungen graphisch wiedergegeben. Es stellte sich heraus, dass Elektronen am häufigsten als Kugeln oder Kreise dargestellt und speziell bei elektrischen Stromkreisen vorrangig mehrere Kugeln verwendet werden. Weniger formgebende Symbole, welche das Aussehen von Elektronen nicht vorprägen würden, wie „e-“ oder „-“, werden seltener bis kaum abgebildet. Ebenfalls selten und wenn, dann nicht in Stromkreisen, werden Darstellungsweisen, welche die quantenmechanische Natur des Elektrons verdeutlichen würden, dargestellt. Diese wurden durch ein „Wellenpaket“, eine „3D-Wolke“ oder einen „Wellenzug“ visualisiert.

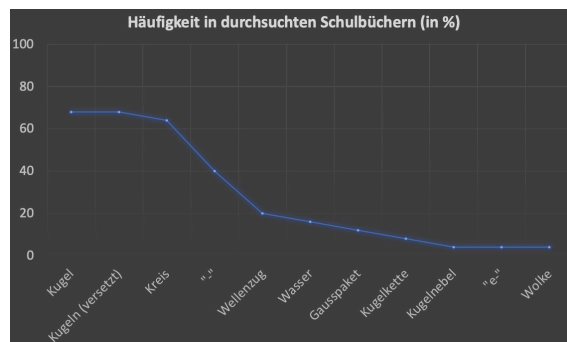


Abb. 2: Ergebnisse der Schulbuchrecherche

2.3. Zusammenfassendes Ergebnis der Literaturrecherche

Im Rahmen der systematischen Literaturrecherche wurden keine Veröffentlichungen gefunden, welche sich mit der Visualisierung von Elektronen in einem schulbezogenen Kontext auseinandersetzen, wodurch sich keine Empfehlung ableiten lässt. Trotzdem oder auch aufgrund mangelnder Vorschläge seitens wissenschaftlicher Quellen werden viele Visualisierungsmöglichkeiten in Schulbüchern genutzt. Hauptsächlich werden hierbei formgebende Darstellungsformen gewählt, wie zum Beispiel Kugeln oder Kreise, welche besonders die Teilchenvorstellung fördern. Unklar ist dabei, welchen Einfluss diese vorgeprägte Vorstellung des Elektrons als Teilchen für

die Oberstufe hat, da in dieser quantenmechanische Grundlagen vermittelt werden sollen.

3. Implementierung verschiedener Elektronen-Darstellungen in der App „PUMA : Spannungslabor“

Die Augmented Reality-Applikation „PUMA : Spannungslabor“ [6] visualisiert am Realexperiment für beliebig gesteckte Stromkreise das elektrische Potential im Rahmen des Elektronengasmodells [7] bzw. einer Höhenanalogie [1]. Die Stromstärke wird durch sich bewegende Elektronen dargestellt, der elektrische Widerstand verschiedener Bauteile kann mithilfe einer Stoßanalogie verstanden werden. Durch Nutzung einer Bluetooth Low Energy – Messbox [8] können zusätzlich am realen Stromkreis gemessene Daten angezeigt werden.

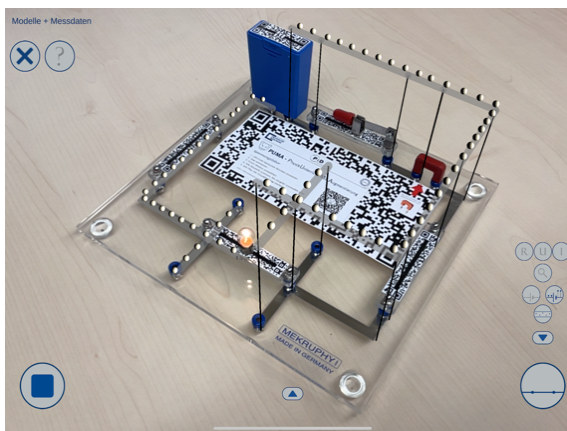


Abb. 3: Visualisierung des elektrischen Potentials gemäß einer Höhenanalogie mit sich bewegenden Kugeln als Elektronenvisualisierung

Ziel der Applikation ist die Visualisierung der grundlegenden elektrischen Konzepte, indem diese virtuell über einen experimentellen Aufbau gelegt werden. Die App ermöglicht dadurch Beobachtungen am Realexperiment, welche über Veränderungen in der Helligkeit von Glühlampen oder von Zahlen auf Messgeräten hinausgehen. Dies ermöglicht den Lernenden eine räumlich und zeitlich direkte Verknüpfung des Realexperiments mit entsprechenden theoretischen Modellvorstellungen (vgl. Abb. 3). Die explizite Darstellung der sich bei Stromfluss bewegenden Elektronen ist ein elementarer Baustein der Visualisierung. Auf Grundlage der bereits beschriebenen Literaturrecherche wurden verschiedene Elektronen-Darstellungen in die Applikation implementiert. Die App beinhaltet daher verschiedene Kugel-, Symbol- und Textdarstellungen (vgl. Abb.4).



Abb. 4: Kugel- und Textdarstellungen der Elektronen in der Applikation

Dies ermöglicht es, für jedes Anwendungsgebiet eine passende Darstellung der Elektronen zu wählen. Möchte man z.B. explizit den geschlossenen Stromkreis thematisieren, bietet sich die Darstellung „Kugelkette“ an. Möchte man in den Vordergrund stellen, dass das Elektron elektrisch geladen ist, wählt man z.B. die Darstellung „e-“ aus. Die Möglichkeit in der Applikation die „Erscheinungsform“ der Elektronen zu ändern, erlaubt – unabhängig von der konkret gewählten Form – auch eine Diskussion über den Modellcharakter der verschiedenen Visualisierungen.

4. Akzeptanzbefragung zu den Darstellungen der Elektronen

Um herauszufinden, wie Physiklehrkräfte die verschiedenen Elektronendarstellungen bewerten, wurde eine Akzeptanzbefragung durchgeführt. Teilgenommen haben 17 bayerische Lehrpersonen weiterführender Schulen mit Unterrichtsfach Physik. Die Lehrpersonen wurden hierfür um die Einschätzung gebeten, ob sie die Grundidee der verschiedenen Visualisierung sinnvoll finden. Zusätzlich sollte auch die jeweilige Umsetzung in der App bewertet werden. Hintergrund der zweiten Frage ist die Überlegung, dass eine in der App schlecht umgesetzte Visualisierung durchaus physikalisch bzw. didaktisch sinnvoll sein kann. Die Bewertung erfolgte auf einer 6-stufigen Likert-Skala, welche den Grad der Zustimmung ausdrückt (0 = gar nicht, 5 = sehr). Zusätzlich war es möglich in einer freien Antwort Probleme oder Vorteile der Visualisierung zu thematisieren.

Es fällt auf, dass die Verwendung von Kugeldarstellungen (Kugel, Kugeln (versetzt), Kugelkette) generell recht positiv eingeschätzt wurde (vgl. Abb. 5). Dabei wurde die Darstellung einer nicht-singulären Kugel als realistischer, eine zu große Zahl an Kugeln jedoch als unübersichtlich eingeschätzt.

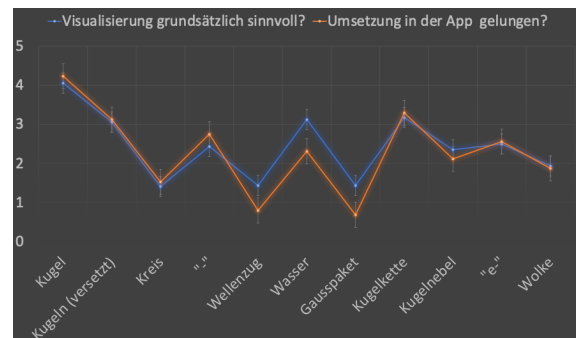


Abb. 5: Einschätzung der Lehrpersonen zur grundlegenden Sinnhaftigkeit (blau) und Umsetzung (orange) der Visualisierungen

Textdarstellungen („-“, „e-“) landen im Mittelfeld der Bewertung. Ihr Vorteil ist, dass sie kein „Aussehen“ der Elektronen suggerieren und zusätzlich noch das Vorhandensein einer elektrischen Ladung darstellen. Die Darstellung von fließendem Wasser erhält eine recht gute Bewertung, da diese gemäß der befragten Lehrpersonen gut an die Erfahrungswelt der Schü-

ler*innen anknüpft. Darstellungen, welche den Wellencharakter oder die Nicht-Lokalität der Elektronen betonen, erhalten eher schlechte Bewertungen. Dies liegt daran, dass viele Lehrpersonen diese Thematik erst später in der Schule sehen und bei der Elektrizitätslehre eher auf gängige Darstellungen der Elektronen setzen. Noch am besten bewertet wird die Darstellung als „Wolke“, da diese ebenso einfach verständlich wie eine Kugel ist, jedoch als physikalisch korrekter angesehen werden kann.

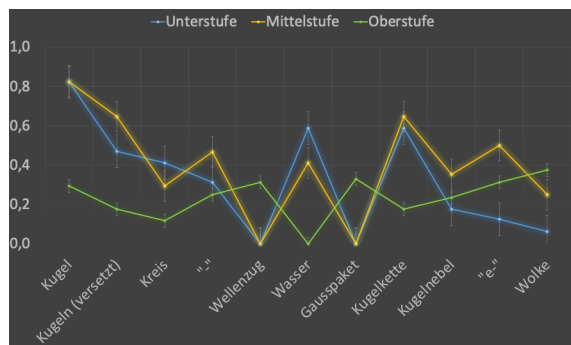


Abb. 6: Einschätzung der Lehrpersonen zum Einsatzgebiet der Visualisierungen

Eine weitere Frage (vgl. Abb. 6) zielte darauf ab, in welcher Jahrgangsstufe (Unter-, Mittel- oder Oberstufe) die jeweiligen Visualisierungen aus Sicht der Lehrperson eingesetzt werden sollten (dichotome Items, 0 = nein, 1 = ja). Für den Einsatz in Unter- und Mittelstufe ergibt sich dabei ein ähnliches Bild, welches v.a. durch den Einsatz von Kugel- und Textdarstellungen geprägt ist. Für die Oberstufe erhalten schließlich auch Visualisierungen positive Werte, welche stärker nicht-klassische Konzepte thematisieren. Die abschließende offene Frage, ob die Lehrpersonen grundsätzlich den Einsatz verschiedener Visualisierungen als positiv erachten, wird weitestgehend bejaht. Mehrere Darstellungen sind nach Meinung der Befragten sinnvoll, wenn man bei einer „Haupt-Visualisierung“ bleibt (v.a. für schwache Schüler*innen) und nicht zu viele Darstellungen anbietet. Positiv hervorgehoben wird auch die Möglichkeit (bei Anwesenheit mehrerer Darstellungen) überhaupt über das Thema Visualisierungen reden zu können und deren jeweiligen Modellcharakter zu verdeutlichen.

5. Ausblick

Visualisierungen sind ein wichtiger und unverzichtbarer Bestandteil des Physikunterrichts, in der E-Lehre sogar eine Notwendigkeit, um den Schüler*innen ein Verständnis für den Sachverhalt zu vermitteln. Von wissenschaftlicher Seite aus wurde sich daher viel mit passenden Modellen für die E-Lehre zur Verdeutlichung von Stromstärke und der für Schüler*innen schwer verständlichen elektrischen Spannung beschäftigt. Aus der systematischen Literaturrecherche erhalten wir jedoch keine Empfehlung wie Elektronen in Leitern ohne weitere Modellvorstellung aussehen sollten. Aufgrund dessen wurden die

aus der Schulbuchrecherche ermittelten Darstellungsformen in die Applikation „PUMA : Spannungslabor“ implementiert. Auf diese Weise können Lehrpersonen selbst entscheiden, welche Darstellungsform sie als am geeignetsten empfinden. Zusätzlich erhalten sie damit überhaupt erst die Gelegenheit mit den Schüler*innen darüber zu sprechen, dass jeder Visualisierung ein Modell zugrunde liegt, welches eben nur ein Modell und nicht die Realität selbst ist.

6. Literatur

- [1] Wilhelm, T., Schecker, H., & Hopf, M. (Hrsg.). (2021). Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis. S. 261 – 268. Springer Berlin Heidelberg.
- [2] Tipler, P. A., & Mosca, G. (2015). Physik: Für Wissenschaftler und Ingenieure (J. Wagner, Hrsg.). Springer Berlin Heidelberg.
- [3] Wetterich, C., & Plänitz, E. (2021). Systematische Literaturanalysen in den Sozialwissenschaften: Eine praxisorientierte Einführung. S. 49. Verlag Barbara Budrich.
- [4] Kircher, E., Girwidz, R., & Häußler, P. (Hrsg.). (2015). Physikdidaktik: Theorie und Praxis. Springer Berlin Heidelberg.
- [5] Kircher, E., Girwidz, R., & Fischer, H. E. (Hrsg.). (2020). Physikdidaktik | Methoden und Inhalte. Springer Berlin Heidelberg.
- [6] Stolzenberger, C., Frank, F., & Trefzger, T. (2022). Experiments for students with built-in theory: ‘PUMA: Spannungslabor’ – an augmented reality app for studying electricity. *Physics Education*, 57(4), 045024.
- [7] Burde, J.-P. (2018). Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells. Logos Verlag Berlin.
- [8] Kirwald, D., Dorsel, D., Staacks, S., Noritzsch, J., Stampfer, C., & Heinke, H. (2022). phyphox: Neue und verbesserte Experimente mit Hilfe externer Sensoren. Poster, GDCCP-Jahrestagung 2022, Aachen.

Eine Box, viele Möglichkeiten: Experimentieren im Kontext Klima

Christopher Jörgens*, Cornelia Geller*, Hendrik Härtig*

*Universität Duisburg-Essen, Didaktik der Physik
christopher.joergens@uni-due.de

Kurzfassung

Wie der Physikunterricht entscheidend zur Klimabildung beitragen kann, ist ein wichtiger Bestandteil physikdidaktischer Forschung geworden, da die komplexen Zusammenhänge im Kontext Klima durch geeignete Lernmaterialien zugänglich gemacht werden müssen. Mit dem Ziel, mit Lernmaterialien in diesem Kontext vor allem fachliche Kompetenzen zu fördern, haben wir ein Klimamodell in einer Box entwickelt. Dieses soll die komplexen Einflüsse verschiedener Klimafaktoren - wie z.B. den Sonnenstand, die Albedo oder den Anteil des Kohlenstoffdioxids - auf die Temperaturentwicklung simulieren. Die Variation entsprechender Klimafaktoren kann dabei einzeln und in Kombinationen erfolgen. Die Box liefert mittels mehrerer Sensoren Messdaten, die mit Hilfe der Phyphox-App graphisch dargestellt werden. In einer ersten Entwicklungsphase wurde das Klimamodell auf die Abbildung der Temperatureinflüsse der Erde getestet und zusätzlich in einer Erprobung mit Studierenden auf Nutzbarkeit, Verständlichkeit und auf einen Effekt der Motivation der Probanden untersucht.

1. Einleitung

Das Thema Klima und vor allem der Klimawandel hat in unserer Gesellschaft eine unbestrittene Bedeutung. Durch das Integrieren in die Curricula einiger Bundesländer ist es auch Teil einer allgemeinen physikalischen Grundbildung geworden (vgl. KMK, 2020; KLP NRW, 2019; Kerncurriculum Niedersachsen, 2022). Somit ist es eine Aufgabe des Physikunterrichts, Klimazusammenhänge zu erläutern und mit der Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler (SuS) zu verknüpfen. Es gibt jedoch erst wenige Lerngelegenheiten für Klimabildung (vgl. Feierabend und Eilks 2013). Zusätzlich werden die experimentellen Zugänge von Lerngelegenheiten eher auf einzelne Einflussfaktoren beschränkt (vgl. Kapitel 2). Wir haben daher eine Lerngelegenheit entwickelt, welche die experimentelle Untersuchung verschiedener Faktoren in einem Modell erlaubt und mit einfachen Mitteln von Lehrkräften nachzubauen ist.

Diese Klimabox soll nicht nur dem Fachwissenserwerb dienen, sondern insbesondere motivationssteigernd für SuS wirken. Aufgrund der großen Bedeutung für die nächsten Generationen gehen wir von einem hohen Interesse der SuS an diesem Kontext aus. (vgl. Höhnle, Velling, & Schubert, 2023). Im Gegensatz dazu, ist jedoch das allgemeine Physikinteresse von SuS im Mittel eher niedrig (vgl. Krapp, 1998; Möller, 2014). Die thematische Verbindung von Klima und Physik könnte also eine Gelegenheit darstellen, um Physikinteresse und Fachwissen zu fördern. Hierzu werden in dem Forschungsprojekt insbesondere affektive Merkmale fokussiert.

2. Unterrichtliche Zugänge im Kontext Klima

Für den Physikunterricht zum Kontext Klima haben Schubatzky et al. (2021) sechs zentrale Konzepte herausgearbeitet: Unsere Atmosphäre, den Unterschied zwischen Wetter und Klima, das Klima als System, den Treibhauseffekt, den Kohlenstoffkreislauf sowie das Wesen der Klimawissenschaften. Zu einigen dieser Konzepte sind bereits elaborierte Unterrichtsmaterialien mit experimentellen Zugängen entwickelt worden, die im Folgenden kurz umrissen werden.

2.1. Zugänge zum Treibhauseffekt

In der Unterrichtseinheit von Stinken-Rösner (2021) können durch einzelne Experimente zu verschiedenen Einflussfaktoren sowohl der natürliche als auch der anthropogene Treibhauseffekt erschlossen werden. Dabei wird beispielsweise ein Versuch zur terrestrischen Strahlung mit dem Vergleich von Leuchtmitteln sichtbarer und infraroter Ausstrahlung mit einer Infrarotkamera durchgeführt. Außerdem gibt es Versuche zum Reflexionsgrad von Licht an verschiedenen Oberflächen, zur Wärmeaufnahme von verschiedenen Oberflächenmaterialien und zur Aufnahme von Wärmestrahlung durch CO₂.

2.2. Zugänge zu mehreren Konzepten

Der Klimakoffer von der LMU-München nutzt ebenfalls einzelne Experimente zum Zeigen von verschiedenen Effekten des Klimawandels (vgl. Toczowski, Wiczorek, Scorza, Strähle, 2022; Scorza, Lesch, Strähle, Sörgel, 2022). Beispielsweise werden Experimente zur Meeresspiegelerhöhung durch die Schmelzung von Landeis und Meereis, zur

Oberflächenalbedo durch den Vergleich der Wärmeaufnahme verschieden farbiger Oberflächen, zum Winkel der Bestrahlung durch die Sonne oder zur Wärmeaufnahme durch CO₂ durchgeführt. Im Gegensatz zur vorherigen Herangehensweise werden auch Modelle zur Erläuterung von Effekten herangezogen.

2.3. Zugänge zum Kohlenstoffkreislauf

In einer weiteren Experimentanleitung werden acht Experimente zur Verdeutlichung der Versauerung der Meere durch den anthropogenen Treibhauseffekt vorgestellt (vgl. Bioacid, (2012)). Unter anderem ein Experiment zur Erhöhung des Versauerungsgrades durch einen erhöhten Kohlenstoffdioxidpartialdruck in der Luft, indem eine Brausetablette in einem Reagenzglas gelöst und die Luft in ein anderes Reagenzglas eingeleitet wird. Außerdem werden weitere Experimente beispielweise zum Effekt der Grenzschichtversauerung oder dem Einfluss der Temperatur auf die Löslichkeit von CO₂ vorgestellt.

2.4. Zusammenfassung

Wie hier nur beispielhaft gezeigt, sind im Kontext Klima bereits einige experimentelle Zugänge erprobt worden und für den Unterrichtseinsatz zugänglich. Hierbei wird jedoch überwiegend auf Einzelexperimente zurückgegriffen; es mangelt an Vorschlägen, wie die Komplexität der Wechselwirkungen, also das Klima als System, für unterrichtliche Ziele in einem modellhaften System experimentell zugänglich gemacht werden kann (vgl. Schubatzky et al., 2021).

3. Entwicklung von Experimentiermaterial zu „Klima als System“

Dieses Desiderat wird in unserem Entwicklungsprojekt bearbeitet, mit dem Ziel, in einem System Zusammenhänge mehrerer möglicher Variablen gleichermaßen untersuchen zu können. Zusätzlich soll es eine kostengünstige Lernumgebung für den Einsatz in der Universität und der Schule sein, die eine verständliche Handhabung erlaubt und mit wenig Aufwand realisier- und anpassbar ist.

Die Messdatenaufnahme erfolgt digital, um eine einfache Handhabung und Kontrolle vieler Variablen zu ermöglichen. Auf Basis von Messdaten zur Temperaturentwicklung als abhängige Variable sollen sich so Schlussfolgerungen ziehen lassen, in welche Richtung mögliche Faktoren die Temperaturentwicklung beeinflussen. Ein quantitativer Vergleich der Effekte zwischen Faktoren wird nicht angestrebt.

3.1. Aufbau der Klimabox

Der Grundaufbau (vgl. Abb. 1) repräsentiert mit einer Strahlungsquelle und einer Plastikbox die Erde mit einem Teil der Atmosphäre unter dem Einfluss der Sonnenstrahlung (Bergmann, 2023). Die Plastikbox hat ein Volumen von etwa 9 Liter und eine Maße von 30 cm x 23 cm x 18,5 cm, sie lässt sich mit einem abnehmbaren Deckel luftdicht abschließen.



Abb. 1: Klimabox

Die Klimabox beschränkt sich auf die Simulation des untersten Teils der Atmosphäre, in welchem sich die meisten wetterbildenden Prozesse abspielen. Anders als bei der Erde, die sich mit ihrer Atmosphäre im Strahlungsgleichgewicht mit der Sonne befindet, wird bei der Klimabox kein Gleichgewichtszustand anvisiert, sondern der Prozess der Erwärmung untersucht.

Diese grundsätzliche Entscheidung zu den Grenzen des Modellexperiments wurde getroffen, um lange Wartezeiten bei der Messwertaufnahme zu vermeiden. Im Inneren der Klimabox nehmen Messsensoren Daten auf und senden diese über Bluetooth an die Phyphox-App.

3.2. Simulation der Sonnenstrahlung

Zur Simulation der Sonneneinstrahlung wird eine Rotlichtlampe von 100W (Herstellerangabe) verwendet, deren Spektrum in Abb. 2 dargestellt ist. Damit unterscheidet sich das Spektrum der Strahlungsquelle deutlich von dem der Sonne und ähnelt eher dem terrestrischen Spektrum. Dies stellt eine Einschränkung des Modellexperiments dar, weil so ein wesentlicher Teil des Treibhauseffektes mit der Klimabox nicht abgebildet wird. So ist für den Treibhauseffekt entscheidend, dass sich Solarstrahlung und terrestrische Strahlung hinsichtlich ihres Spektrums unterscheiden und damit von der Atmosphäre unterschiedlich stark absorbiert werden (Brönnimann, 2018). Durch den Verzicht auf diesen Modellaspekt können mit dem erhöhten Infrarotanteil aber schnellere Effekte auf die Lufttemperatur erzielt werden.

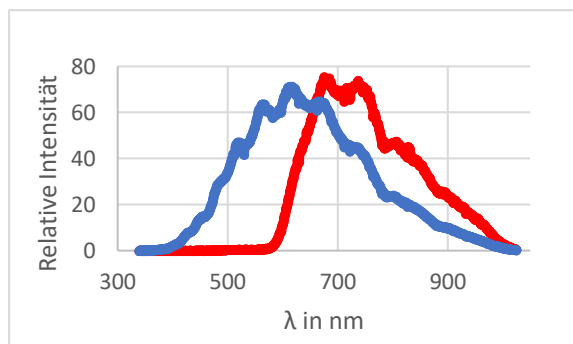


Abb. 2: Vergleich der Spektren der Infrarotlampe (rot) und einer 100W Glühlampe (blau). Es handelt sich um unkalibrierte Messungen, die nicht den gesamten Infrarotbereich umfassen.

3.3. Simulation der Strahlungsintensität

Die Strahlungsintensität nimmt mit dem Quadrat der Entfernung von der Sonne ab und hängt außerdem vom Einstrahlwinkel ab, was mit dem Lambert'schen Gesetz beschrieben werden kann (Kuttler 2013). Um diese Faktoren zu simulieren, können der Abstand der Lichtquelle und deren Ausrichtung zur Box variiert werden. Dazu dienen Schrauben an der Haltestange, die eine Veränderung des Abstandes zwischen 20 cm und 50 cm zur Mitte der Box erlauben. Der Einstrahlwinkel kann bis zu einem Wert von 40 Grad verringert werden, wenn die Einstrahlung überwiegend durch den Deckel und nicht die Seitenwände der Box erfolgen soll.

3.4. Simulation der planetaren Albedo

Die planetarische Albedo, also das Verhältnis von reflektierter zu einfallender Strahlung, beträgt für die Solarstrahlung auf die Erde ca. 30% und ist dabei größtenteils durch die Atmosphäre bedingt. Ist der Himmel bewölkt, dann wird gegenüber einem wolkenlosen Himmel bis zu 75% weniger Strahlung an der Erdoberfläche absorbiert und die planetare Albedo steigt um bis zu 50% (Hupfer und Kuttler 2005). Um diese Veränderung zu simulieren, kann der Deckel der Box durch einen Deckel mit angebrachtem Brotpapier ausgetauscht werden (vgl. Abb. 3a). Dieser führt bei der hier verwendeten Strahlungsquelle zu einer Reduktion der Ein- und Ausstrahlung von etwa 50%, wobei keine Zwischenstufen einstellbar sind. Zu beachten ist, dass bei dieser Umsetzung nur der Effekt der Albedo, nicht aber weitere relevante Effekte von Wolken (wie etwa die Kondensation des Wasserdampfs) für den Energiehaushalt der Erde berücksichtigt werden.

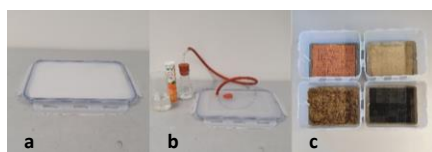


Abb. 3: Übersicht der Einflussfaktoren, a Bewölkung, b Kohlenstoffdioxidgehalt, c Erdoberflächen

3.5. Simulation des CO₂ Anteils der Atmosphäre

Durch die Absorption infraroter Strahlung haben in der Atmosphäre enthaltene Spurengase wie Wasserdampf (H₂O), Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Methan (CH₄) einen großen Effekt auf die Temperatur der Erde. Dies liegt daran, dass diese infrarote Strahlung überwiegend von der Erde kommt und so teilweise wieder zurückgestrahlt wird. Je größer der Anteil dieser Spurengase, desto größer ist der Anteil der Strahlungsintensität, die zusätzlich zur Solarstrahlung auf die Erdoberfläche trifft. Dieser Zusammenhang soll in der Klimabox simuliert werden, indem der Kohlenstoffdioxidgehalt der in der Box eingeschlossenen Luft erhöht wird. Dazu kann durch die Auflösung einer Brausetablette in Wasser in einem Kolben CO₂ erzeugt (vgl. z.B. Kap. 2.3) und über ein Loch im Deckel mit einem Schlauch vom Kolben in die Box eingeleitet werden (vgl. Abb. 3b). Das Loch wird anschließend mit Knete verschlossen, um wieder ein geschlossenes System zu erhalten. Die eingebrachte Menge wird dabei durch die Einfüllzeit reguliert, so generiert eine typische Einfüllzeit von ca. 4 Sekunden einen Wert von etwa 1500 ppm CO₂ in der Box. Die Grenzen des Modellexperiments liegen hier also zum einen in einem deutlich höheren (und nicht exakt einstellbaren) Wert des CO₂-Anteils, da Messunterschiede in der Temperatur erst ab Werten von etwa 1000 ppm zu erkennen sind. Zum anderen weist die Strahlungsquelle der Klimabox bereits einen hohen Anteil im infraroten Spektrum auf, so dass sich die schnellere Erhöhung der Temperatur nicht über eine größere Abstrahlung des Bodens, sondern über eine schnellere Erwärmung der Luftschicht durch die höhere Absorptionsrate erklären lässt.

3.6. Simulation der der Oberflächenalbedo

Zwar wird die meiste Energie (etwa 51%), die auf die Erdoberfläche trifft, von dieser absorbiert und nicht reflektiert (Kappas 2009), der genaue Wert ist aber stark oberflächenabhängig. So kann die Oberflächenalbedo von $\alpha = 3\%$ für Wasser bis zu etwa $\alpha = 74\%$ für Schnee variieren (Hupfer und Kuttler 2005). Um diese Unterschiede zu simulieren, können vier unterschiedliche Bodenbeläge in die Kunststoff-Box eingesetzt werden (vgl. Abb. 3c). Die Bodenbeläge bestehen aus einem Einsatz aus Schaumstoff und Kabelbindern zum leichteren Herausnehmen. Auf diesen Einsätzen befindet sich jeweils eine Schicht Moos, Sand, Ziegelsteine oder schwarzer Klemmbausteine. Im Modellexperiment wird somit durch die Änderung des Bodenbelags nicht nur die Oberflächenalbedo verändert, sondern mit der Materialänderung auch die spezifische Wärmekapazität des Bodens.

3.7. Digitale Messwerterfassung

Für eine mögliche Verwendung der Klimabox in der Schule, wurde die Klimabox mit der Nutzung einer Arduino Messstation und der Phyphox-App entwickelt.

Die Arduino Messstation besteht aus einem 3D-gedrucktem Gehäuse mit einer „Arduino Nano 33 BLE Sense Rev.2“ Plattform, einem zusätzlichen CO₂-Sensor und einer Powerbank als Energieversorgung (vgl. Abb. 4). Die Einplatinen-Computer-Plattform des Arduino Nano 33 BLE Sense beinhaltet bereits eine größere Anzahl von Sensoren, wie z.B. einen Temperatur-, Druck- oder einen Lichtsensor; sie ist durch eine umfassende Software-Bibliothek und einem vorhandenen Bluetooth-Modul bereits mit der Phyphox-App kompatibel. Ergänzt wurde nur ein kostengünstiger CO₂-Sensor. Die Sensoren sind zum Boden gewandt und werden von einem Gehäuse vor direkt eintreffender Strahlung und Wärme geschützt, um die Lichtreflexion des Boden und die Lufttemperatur im Schatten zu erfassen. Die Temperaturmessung erfolgt mit einer Messgenauigkeit von ± 0.1 °C und die CO₂-Messung mit einer Messgenauigkeit von ± 50 ppm. Die Lichtintensität wird sensorbedingt nicht in Lux gemessen, sondern gibt nur einen Richtwert an.

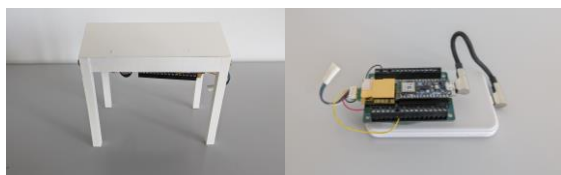


Abb. 4: Messstation mit Gehäuse (links) und ohne Gehäuse (rechts)

Die Phyphox-App wurde an der RWTH Aachen entwickelt (Pusch 2023); mit dem Phyphox-Editor wurde ein individuelles Profil für die Klimabox erstellt. Dieses erlaubt die Darstellung der Messdaten für jede Variable in einem eigenen Reiter, um eine bessere Übersicht zu gewährleisten und eine Bildschirmverschiebung zu vermeiden (vgl. Abb. 5). Jeder Messwert der Sensoren wird im Experiment zuerst als Zahlenwert und anschließend als Graph über die Zeit dargestellt.

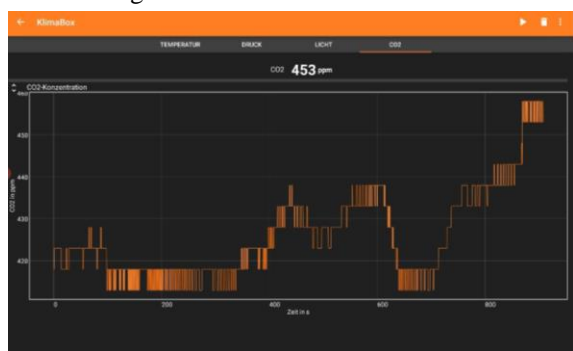


Abb. 5: Phyphox Klimabox-Interface

3.8. Aufnahme von Messreihen

Zur Erfassung der Temperaturänderung mit dem angegebenen Auflösungsvermögen des Temperatursensors ist bei dem bestehenden Aufbau eine Messzeit von 180s geeignet. Die Starttemperatur sollte konstant gehalten werden, da sonst der Wärmeaustausch zwischen der (nicht isolierten) Box und Raumumgebung variieren kann. Nähert man die

Temperaturentwicklung in diesem Zeitraum als linear an, so kann über die Differenz von Start- und Endtemperatur oder über die Steigung einer Ausgleichsgeraden (beides über die Phyphox-App darstellbar) ein Wert für die Temperaturerhöhung bestimmt werden.

In Abb. 6 sind zwei exemplarische Messreihen dargestellt, die die Temperaturverläufe für unterschiedene Einstrahlwinkel und Bewölkungsgrad zeigen. Darstellen lassen sich Unterschiede in der Temperaturerhöhung von etwa 0,3 °C (obere Abb.: Einstrahlwinkel 90° versus 60°) bzw. von etwa 0,7 °C ablesen (untere Abb.: wolkig versus wolkenlos).

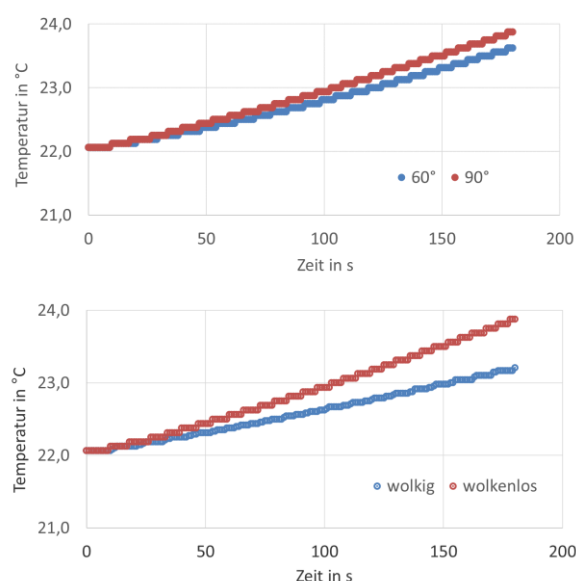


Abb. 6: Beispielmessungen der Winkeländerung (oben) und der Wolkenänderung (unten)

4. Wirkung der Klimabox

Wie dargestellt ist ein Ziel der entwickelten Klimabox, Fachwissen im Kontext Klima zu vermitteln. Im Fokus unseres Forschungsinteresses sind aber insbesondere affektive Kompetenzanteile, um durch das Interesse am Kontext Klima dem allgemein niedrigen Sachinteresse an Physik entgegenzuwirken. Hier greifen wir zunächst die aktuelle Motivation und den Flow auf.

4.1. Motivation

Die aktuelle Motivation betrachten wir als relevant, weil sie als bedeutsamer Prädiktor für Lernerfolg gilt (Heckhausen und Heckhausen 2018). Nach der Selbstbestimmungstheorie (Deci & Ryan, 1993) gilt Motivation als die „Intentionalität“ von Menschen etwas zu erreichen und die Bereitschaft, bestimmte Mittel zu diesem Zweck einzusetzen. Dabei lässt sich zwischen intrinsischer und extrinsischer Motivation unterscheiden. Erstere führt zu einer interessengesteuerten Handlung, die aus eigenem Antrieb erfolgt. „Intrinsisch motivierte Handlungen repräsentieren den Prototyp selbstbestimmten Handelns“, (Deci & Ryan, 1993) und sollen mit der Klimabox insbesondere initiiert werden. Dieser Mechanismus lässt sich

auch durch Krapps (1999) „Person-Gegenstands-Theorie des Interesses“ als anderen Ansatz beschreiben. Die Person setzt sich mit einem Gegenstand, wie eine Aufgabe oder einem Objekt, im Rahmen einer Situation auseinander und kann durch die Verbindung von Gefühlen mit dieser Auseinandersetzung ein situationales Interesse aufbauen. Dies führt dann zur aktuellen Motivation als situationsgebundenes Konstrukt.

4.2. Flow

Rheinberg und Engeser (2018) beschreiben den Flow wie folgt: „Bei diesem Zustand handelte es sich um das selbstreflexionsfreie, gänzliche Aufgehen in einer glatt laufenden Tätigkeit, bei der man trotz voller Kapazitätsauslastung das Gefühl hat, den Geschehensablauf noch gut unter Kontrolle zu haben.“ (Rheinberg und Engeser, 2018). Diese Bedingungen und Merkmale des Flows sind nach Zusammenstellung von Rheinberg und Engeser (2018) folgende:

- Die Balance zwischen Fähigkeiten und Anforderungen – eine optimale Beanspruchung
- Die Handlungsanforderungen und Rückmeldungen werden als interpretationsfrei erlebt
- Der Handlungsablauf wird als glatt und flüssig verlaufend erlebt
- Es muss sich nicht mehr willentlich auf die Aufgabe konzentriert werden
- Die Wahrnehmung von Zeit wird beeinträchtigt
- Es wird gänzlich in der Aktivität aufgegangen und es kommt zum Verlust von Reflexivität und Selbstbewusstheit

Diese Bedingungen und Merkmale lassen sich durch ihre Formulierung als motivationsfördernd und somit auch leistungssteigernd vermuten, da sich die Merkmale teilweise mit der Umschreibung von intrinsischer Motivation überschneiden (Rheinberg und Engeser, 2018).

5. Ziel der Untersuchung

Um die Eignung der entwickelten Klimabox als experimentelle Lerngelegenheit zu prüfen, soll in einem ersten Schritt die grundsätzliche Nutzbarkeit der Klimabox untersucht werden. Hierfür ergeben sich folgende Forschungsfragen:

1. Inwieweit nehmen die Lernenden die Experimentierumgebung als praktikabel/gebrauchstauglich wahr?
2. Welche Handlungsmöglichkeiten der Experimentierumgebung nutzen die Lernenden?

Im Anschluss werden die affektiven Merkmale der Personen bei der Nutzung der Klimabox fokussiert. Handlungsleitend ist folgende Forschungsfrage:

3. Inwieweit ermöglicht die Experimentierumgebung ein positives Erleben der Lernenden?

6. Design und Methoden

6.1. Erhebungsinstrumente

Zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage wird die Einfachheit der Verwendung durch eine Usability-Scale nach John Brooke (1995) abgefragt. Für die Erhebung der Verständlichkeit werden die Rückfragen zur Lernumgebung und für die zeitliche Nutzung die Testzeit auf einem Beobachtungsbogen erfasst.

Die Verwendung des Experimentiermaterials und der Anleitungen und die Veränderungen der Variablen über einen Beobachtungsbogen werden aufgenommen, um die zweite Forschungsfrage zu beantworten. Die Möglichkeit den Einfluss auf die Temperatur zu untersuchen, wird zu demselben Zweck durch schriftliche Notizen der Lernenden zum Experiment erfasst.

Im Rahmen der dritten Frage wird die Anfangsmotivation über einen Motivationsfragebogen von Rheinberg Vollmeyer und Burns (2001) und das Flow-Erleben mithilfe eines Flow-Fragebogens von Rheinberg und Vollmeyer (2003) erfasst. Durch den Vergleich der Anfangsmotivation mit der des Flow-Erlebens während des Experimentierens soll eine Aussage darüber getroffen werden, wie sich das Experiment und der Experimentierverlauf auf die Motivation der Teilnehmenden einwirken könnte.

6.2. Stichprobe

Die erste Erprobung der Klimabox wurde mit Studierenden des Studiengangs Grundschullehramt mit dem Schwerpunkt Sachunterricht an der Universität Duisburg-Essen durchgeführt, die bis zu diesem Zeitpunkt noch keine naturwissenschaftlichen Inhalte im Studium belegt hatten. Die Studierenden befinden sich daher im Bereich der fachlichen Kompetenzen noch nahe an der oberen Skala von Schülerinnen und Schülern der Oberstufe. Die Stichprobe besteht aus zwölf Studierenden, überwiegend aus dem zweiten Fachsemester.

6.3. Aufgabenstellung

Für die Erhebung wird bewusst eine offen gehaltene Fragestellung gewählt, um ein Auftreten möglichst vieler Varianten der Nutzung beobachten zu können:

„Die Klimabox bietet verschiedene Möglichkeiten zu Experimentieren. Du kannst diese Möglichkeiten nach deinen Interessen nutzen, um etwas über die Physik des Klimas herauszufinden.“

6.4. Ablauf

Die Studierenden fanden die Experimentierumgebung bereits aufgebaut vor, erhielten die Aufgabenstellung und durften sich einen Überblick über die Materialien verschaffen, bevor sie einen Motivationsfragebogen zur Aufgabe ausfüllten. Anschließend startete die Experimentierzeit von einer Stunde für die Verwendung der Klimabox und Materialien. Die Bearbeitung des Versuchs erfolgte in Einzelarbeit und

wurde von einem Versuchsleiter beaufsichtigt. Nach der Hälfte der Zeit wurde die Erprobung unterbrochen und die Studierenden füllten den Flow-Fragebogen aus, bevor sie wieder mit dem Versuch starteten. Der Versuch endete nach einer Stunde Experimentierzeit oder wenn kein weiterer Experimentierbedarf von Studierendenseite bestand. Abschließend fassten die Studierenden ihre Notizen und Ergebnisse zusammen und gaben ihre Rückmeldung zur Verwendung der Klimabox durch das Ausfüllen der Usability-Scale.

7. Ergebnisse

Neun von 12 Studierenden haben die einstündige Experimentierzeit vollständig ausgenutzt. Alle Teilnehmenden haben dabei mindestens drei der Variablen verändert, am häufigsten den Bodenbelag. Die am wenigsten veränderten Variablen sind der Abstand der Lichtquelle und der CO₂-Anteil.

7.1. System Usability Score (SUS)

Die Reliabilität der Skala der Ergebnisse beträgt Cronbachs- $\alpha = .73$ und kann damit als hinreichend betrachtet werden. Der Mittelwert aller Bewertungen der SUS erzielt einen Score von 74.0 Punkten mit einer Standardabweichung von 12.0 Punkten. Der maximal ermittelte Score ist 90.0 Punkte und der niedrigste Score beträgt 52.5 Punkte.

7.2. Dokumentation der Experimente

Eine Dokumentation wird dann als ausreichend gewertet, wenn für mindestens die Hälfte aller durchgeführten Versuche Messwerte aufgeschrieben wurden. Diesen Bereich hat kein Teilnehmenden während der Studie erreicht. Die am seltensten dokumentierte Größe ist die Anfangstemperatur, die nur von einem Teilnehmenden notiert wurde. Danach folgt die Messzeit, die nur von vier Teilnehmenden aufgeschrieben wurde. Die häufigste Größe in den Notizen ist die Endtemperatur eines Versuchs. Für die Schlussfolgerungen verwendeten sechs Teilnehmenden als Basis absolute Werte, vier Teilnehmenden haben Messwerte der Temperatur mit einer Temperaturänderung in Relation zur Zeit oder über gleiche Zeiten verwendet und zwei Teilnehmenden haben keine Datenbasis für ihre Schlussfolgerungen genutzt.

7.3. Interesse und Flow

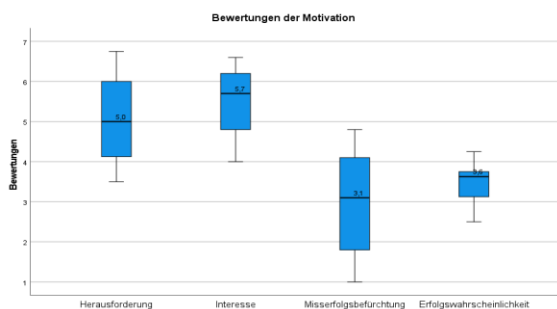


Abb. 7: Bewertung der Motivation

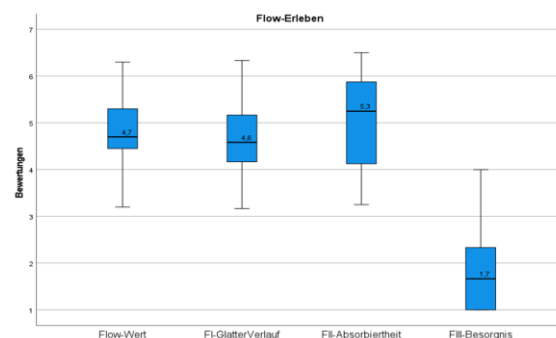


Abb. 8: Flow-Erleben

Der Wert für Cronbachs- α des Motivationsfragebogens beträgt $.73$ und liegt somit in dem Bereich des Literaturwertes von $.66$ bis $.90$. Der Wert für Cronbachs- α für den Flow-Wert liegt bei $.74$ und der des Besorgniswert bei $.69$. Damit liegen beide Werte etwas unterhalb der Literaturwerte für das Flow-Erleben von $\alpha = .90$ und der Besorgnis Komponente von $\alpha = .80$ bis $.90$. In den Ergebnissen zeigt sich erfreulicherweise ein eher hohes Interesse, wobei aber auch die Komplexität der Lernumgebung offensichtlich wahrgenommen wird (vgl. Abb. 7). Das berichtete Flow-Erleben übertrifft die mit der Situation einhergehende Besorgnis (vgl. Abb. 8).

8. Diskussion

8.1. Inwieweit nehmen die Lernenden die Experimentierumgebung als praktikabel/gebrauchstauglich wahr?

Die Gebrauchstauglichkeit der Klimabox wird als gut bewertet, zu einer sehr guten Bewertung reicht es aber nicht. Die Nutzung der Experimentierzeit und der Materialien zeigt, dass die Teilnehmenden gerne die Möglichkeit genutzt haben mit der Klimabox zu experimentieren. Die Untersuchung der einzelnen Items und die Rückfragen zum Experiment geben Hinweise darauf, dass einzelne Teilnehmende noch Probleme mit dem Umgang haben und Teile der Anleitungen und Durchführung noch Verbesserungspotential bieten.

8.2. Welche Handlungsmöglichkeiten der Experimentierumgebung nutzen die Lernenden?

Alle Teilnehmenden haben die Möglichkeit genutzt Variablen zu verändern und ihren Einfluss auf die Temperatur zu untersuchen. Die Variable Boden scheint besonders zugänglich für die Teilnehmenden zu sein. Die Variablen Winkel, Abstand und CO₂ wurden im Vergleich weniger verwendet und könnten entweder weniger interessant oder weniger zugänglich sein. Die Analyse der Notizen zeigt, dass die meisten Teilnehmenden überwiegend absolute Werte für ihre Auswertungen oder Messdatenaufnahmen verwendet haben und somit nur zusammen mit der Messzeit ihrer Aufnahmen eine Aussage über die Auswirkung der Variablen treffen könnten. In der Auswertung der schriftlichen Ergebnisse ist aber ersichtlich, dass nur 4 der Teilnehmenden überhaupt Messzeiten aufgeschrieben haben. Zusätzlich wurden

bei 11 von 12 Teilnehmenden auch keine Anfangstemperaturen notiert. Niemand hat somit alle notwendigen zu kontrollierenden Variablen für ein unkonfundiertes Experiment notiert. Die digital gemessenen Werte, die Endtemperatur ausgenommen, wurden nur von etwa der Hälfte der Teilnehmenden erfasst. Dies bedeutet, dass niemand eine erfolgreiche Anwendung der Variablenkontrollstrategie (VKS) vorweisen kann.

8.3. Inwieweit ermöglicht die Experimentierumgebung ein positives Erleben der Lernenden?

Aus den hohen Werten für die Motivation lässt sich folgern, dass die Teilnehmenden Interesse daran haben, das Thema Klima oder die Aufgabe zu der Klimabox zu bearbeiten. Außerdem ist der Wert der Herausforderung etwas höher als der mittlere Wert der Bewertungs-Skala und ist somit in dem Schwierigkeitsbereich von Aufgaben, die herausfordernd sind und motivierend wirken. Die Misserfolgsbefürchtung liegt unter dem mittleren Wert der Bewertungs-Skala, damit haben die Teilnehmenden weniger Angst, der Aufgabe nicht gewachsen zu sein. Die Abwesenheit dieser Stressfaktoren begünstigt ebenfalls die Motivation. Die Erfolgswahrscheinlichkeit ist mit 3.6 etwa im mittleren Bereich der Bewertungs-Skala und besitzt auch die geringste Streuung. Die Teilnehmenden schätzen ihre Chance, die Aufgabe zu schaffen, also nicht als sehr gut, aber auch nicht als unmöglich ein. Dieser Faktor kann sich zusammen mit der Herausforderung, bei einer erfolgreichen Bewältigung der Aufgabe oder Teilen davon, positiv auf die Motivation auswirken.

Der Flow-Test zeigt, dass die Teilnehmenden motiviert sind, die Aufgabe der Klimabox zu bearbeiten. Unterstützt wird dies von dem Mittelwert der Absorbiertheit und dem Wert für einen glatten Verlauf. Daraus lässt sich schließen, dass sie in ihrer Aufgabe vertieft sind und das Gefühl haben, die Bearbeitung der Aufgabe laufe gut. Zusätzlich ist der Wert für die Besorgniskomponente niedrig, sie machen sich wenig Sorgen um die Bearbeitung der Aufgaben oder die Endresultate.

Die Anforderungspassung in Kombination mit dem Flow-Wert unterstützt den Eindruck der Herausforderung und der Erfolgswahrscheinlichkeit des Motivationsfragebogens. Die Erfolgswahrscheinlichkeiten sind vor der Bearbeitung der Aufgabe niedrig und die Herausforderung recht hoch. Während der Bearbeitung wird die Anforderungspassung aber in dem Bereich von 5 ‚genau passend‘ empfunden und der Flow-Wert erreicht zumeist einen Wert im oberen Drittel der Skala. Dies lässt also den Schluss zu, dass die Teilnehmenden die Aufgabe zwar als schwierig wahrgenommen haben, aber während der Bearbeitung in die Aufgabe vertieft sind und sie als angemessene Herausforderung verstehen.

9. Fazit und Ausblick

Der erste Einsatz der Klimabox zeigt, dass die Abbildungsfähigkeit der Einflüsse auf die Temperatur

grundsätzlich gegeben ist. Einschränkungen bestehen dabei jedoch durch die Modellrahmenbedingungen. Als eine zentrale Herausforderung durch die Einschränkungen des Modells hat sich die Messzeit herausgestellt: Sie kann nicht beliebig klein gewählt werden, da sonst Unterschiede in den Temperaturen durch einen geringen Anstieg und die Messgenauigkeit des Sensors nicht aufgelöst werden können. Als Konsequenz brauchen Nutzende Hinweise zur Wahl der Messzeit, weil es keine für sie verfügbaren Ansätze zur Abschätzung gibt. Berücksichtigt man die in Kapitel 3 erwähnten Einschränkungen, stellt die Experimentierumgebung jedoch die Einflüsse der Faktoren und ihrer Einflüsse aufeinander dar. Die Ergebnisse der Erprobung zeigen ferner, dass die Teilnehmenden die Lernumgebung als praktikabel wahrnehmen. Sie bewerten die Funktionen als gut integriert und schätzen den Umgang als schnell zu erlernen ein. Bemängelt wird die fehlende Struktur der Aufgabe und sie wünschen sich mehr Unterstützung bei der Bearbeitung. Zwar wurden die Möglichkeiten der Veränderungen genutzt, es zeigten sich aber auch Probleme mit der Verwendung der Materialien von CO₂ und Winkel. Hier werden Hilfestellungen in einer Weiterentwicklung aufgenommen. Die Möglichkeit der Anwendung der VKS wurde kaum genutzt. Den Notizen fehlen häufig die Messzeiten oder die Anfangstemperaturen. Bei der Auswertung haben die Teilnehmenden dadurch keine Möglichkeit, Schlüsse über Zusammenhänge aus ihren Ergebnissen zu ziehen, da sie sich meistens nur auf absolute Werte der Endtemperaturen stützen können. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen von Schwichow und Härtig (2005), bei welchen gezeigt werden konnte, dass SuS ohne explizite Vermittlung der VKS diese auch nicht anwenden können.

Bei der Bearbeitung der Aufgabe zeigen die Ergebnisse ein positives Erleben der Teilnehmenden mit der Klimabox. Die Teilnehmenden nehmen die Aufgabe als Herausforderung an und sind in der Bearbeitung der Aufgabe vertieft. Die Aufgabenschwierigkeit wird dabei als ‚passend‘ empfunden. Der motivierende Einfluss, die Übungsmöglichkeit des Umgangs mit digitalen Messungen und anderen experimentellen Kompetenzen, sowie die praktische Anwendungsmöglichkeit von VKS sprechen für den Einsatz als Lernmöglichkeit in der Schule.

Für die weitere Untersuchung der Lernumgebung Klimabox sollen in zukünftigen Schritten die Materialien weiter überarbeitet und beispielweise die Abbildung der Farbe und das Material des Bodens unabhängig möglich werden.

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass die Klimabox eine motivierende und praktikable Möglichkeit darstellt, einige Zusammenhänge des Klimas zu erforschen und eine Möglichkeit der praktischen Anwendung der VKS darstellt. Sie lässt in der jetzigen Form eine gute Nutzung durch Studierende zu, wird für den Einsatz als Lernumgebung in der Schule aber noch Verbesserungen am Material benötigen.

10. Literatur

- Bergmann, Marc (2023): Entwicklung einer Experimentierumgebung zur Förderung der Variablenkontrollstrategie im Kontext Klima. Bachelorarbeit. Universität Duisburg-Essen.
- BIOACID / Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel (GEOMAR) (Hg.) (2012): Das andere CO₂-Problem Ozeanversauerung. Acht Experimente für Schüler und Lehrer. Online verfügbar unter https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/13973/1/BIOACID_Experimente_2012.pdf, zuletzt geprüft am 31.05.2024.
- Brönnimann, Stefan (2018): *Klimatologie*. 1. Auflage. Bern: Haupt Verlag (UTB, UTB-Band-Nr. 4819).
- Brooke, John (1995): SUS: A quick and dirty usability scale. In: *Usability Eval. Ind.* (189). Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/John-Brooke-6/publication/228593520_SUS_A_quick_and_dirty_usability_scale/links/5f24381392851cd302cbaf25/SUS-A-quick-and-dirty-usability-scale.pdf?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7Im-ZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19.
- Deci, Edward L.; Ryan, Richard M. (1993): Die Selbstbestimmungstheorie der Motivation und ihre Bedeutung für die Pädagogik. *Zeitschrift für Pädagogik* 39 (1993) 2, S. 223-238. In: *Zeitschrift für Pädagogik* 39. DOI: 10.25656/01:11173. Online verfügbar unter https://www.pedocs.de/volltexte/2017/11173/pdf/ZfPaed_1993_2_Deci_Ryan_Die_Selbstbestimmungstheorie_der_Motivation.pdf.
- Feierabend, Timo; Eilks, Ingo (2013): Der Klimawandel vor Gericht – Unterrichtsentwicklung und Implementation durch Partizipative Aktionsforschung. In: Jürgen Menthe, Dietmar Höttecke, Ingo Eilks und Corinna Höhle (Hg.): *Handeln in Zeiten des Klimawandels. Bewerten lernen als Bildungsaufgabe*. Münster, New York, München, Berlin: Waxmann, S. 113–124.
- Heckhausen, Jutta; Heckhausen, Heinz (Hg.) (2018): *Motivation und Handeln*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch).
- Höhnle, Steffen; Velling, Hanna; Schubert, Jan Christoph (2023): Das Interesse von Schülerinnen und Schülern am Klimawandel. 70-85 Seiten / *Zeitschrift für Geographiedidaktik (ZGD)*, Bd. 51 Nr. 2 (2023): 2|2023. DOI: 10.60511/51192. Online verfügbar unter <https://zgd-journal.de/index.php/zgd/article/view/192/476>.
- Hupfer, Peter; Kuttler, Wilhelm (2005): *Witterung und Klima: Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie*. Unter Mitarbeit von Frank-Michael Chmielewski und Hermann Pethe. 11., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Kappas, Martin (2009): *Klimatologie. Klimafor-schung im 21. Jahrhundert - Herausforderung für Natur- und Sozialwissenschaften*.
- Kerncurriculum Niedersachsen (2020). Niedersächsisches Kultusministerium. Kerncurriculums für das Unterrichtsfach Physik für den Sekundarbereich II. Hannover. <https://cuvo.nibis.de/cuvo.php?p=download&upload=363> (Zugriff: 31.5.2024).
- KLP NRW (2019) Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen. Kernlehrplan Physik für die Sekundarstufe I Gymnasium in Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf. https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplan/208/g9_ph_klp_%203411_2019_06_23.pdf.
- KMK (2020) Beschlüsse der Kultusministerkonferenz. Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife. München: Luchterhand.
- Krapp, Andreas (1998): Entwicklung und Förderung von Interessen im Unterricht. In: *Psychologie, Erziehung, Unterricht* (44), S. 185–201.
- Krapp, Andreas (1999): Intrinsische Lernmotivation und Interesse. Forschungsansätze und konzeptuelle Überlegungen. *Zeitschrift für Pädagogik* 45 (1999) 3, S. 387-406. In: *Zeitschrift für Pädagogik* 45. DOI: 10.25656/01:5958. Online verfügbar unter https://www.pedocs.de/volltexte/2012/5958/pdf/ZfPaed_1999_3_Krapp_Intrinsische_Lemmotivation.pdf.
- Kuttler, Wilhelm (2013): *Klimatologie*. 2., aktualisierte und erg. Aufl. Paderborn: Schöningh (UTB, 3099).
- Möller, Kornelia (2014): Vom naturwissenschaftlichen Sachunterricht zum Fachunterricht – Der Übergang von der Grundschule in die weiterführende Schule. In: *ZfDN* 20 (1), S. 33–43.
- Pusch, Alexander (2023): Wie beginne ich mit dem Arduino? In: *MNU Journal* 76 (2), S.94-96.
- Rheinberg, F.; Engeser, S. (2018): Intrinsische Motivation und Flow-Erleben. In: Jutta Heckhausen und Heinz Heckhausen (Hg.): *Motivation und Handeln*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch), S. 423–450.
- Rheinberg, Falko; Vollmeyer, Regina; Burns, Bruce D. (2001): FAM: Ein Fragebogen zur Erfassung aktueller Motivation in Lern- und Leistungssituationen. In: *Diagnostica* 47 (2), S. 57–66. DOI: 10.1026//0012-1924.47.2.57. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Falko-Rheinberg/publication/247398603_FAM_Ein_Fragebogen_zur_Erfassung_aktueller_Motivation_in_Lern-_und_Leistungssituationen/links/

- 54ad6daf0cf2213c5fe3f858/FAM-Ein-Fragebogen-zur-Erfassung-aktueller-Motivation-in-Lern-und-Leistungssituationen.pdf?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnNOUGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn9uLi-wicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19.
- Rheinberg, Falko; Vollmeyer, Regina; Engeser, Stefan (2003): Die Erfassung des Flow-Erlebens. In: Joachim Stiensmeier-Pelster und Falko Rheinberg (Hg.): Diagnostik von Motivation und Selbstkonzept. Göttingen [u.a: Hogrefe, Verl. für Psychologie (Tests und Trends N.F., 2), S.261-279. Online verfügbar unter https://publishup.uni-potsdam.de/opus4-ubp/frontdoor/deliver/index/docId/551/file/Rheinberg_ErfassungFlow_Erleben_mitAnhangFKS.pdf.
- Schubatzky, Thomas; Wackermann, Rainer; Wöhlke, Carina; Haagen-Schützenhöfer, Claudia (2021): Das Thema Klimawandel im Physikunterricht. Zentrale fachliche Inhalte, Konzepte und Vorstellungen. In: PlusLucis (3), S.4-8. Online verfügbar unter https://pluslucis.org/ZeitschriftenArchiv/2021-3_PL.pdf.
- Schwichow, Martin; Christoph, Simon; Härtig, Hendrik (2005): Förderung der Variablen-Kontroll-Strategie im Physikunterricht. In: MNU 68 (6), S.346-350.
- Scorza, Cecilia; Lesch, Harald; Strähle, Moritz; Sörge, Dominika (2022): Der Klimawandel: verstehen und handeln. Ein Bildungsprogramm für Schulen der Fakultät für Physik der LMU München. Hg. v. Ludwig-Maximilians-Universität Fakultät für Physik. Online verfügbar unter https://klimawandel-schule.de/sites/default/files/2023-10/10-2023_stmuv_handbuch-klimawandel_a4.pdf.
- Stinken-Rösner, Lisa (2021): Eine experimentelle Unterrichtseinheit zum Treibhauseffekt. Experimente mit der Wärmebildkamera & Co. In: PlusLucis (3), S.20-24. Online verfügbar unter https://pluslucis.org/ZeitschriftenArchiv/2021-3_PL.pdf.
- Toczkowski, Thomas; Wieczorek, Robert; Scorza, Cecilia; Strähle, Moritz (2022): Klimawandel verstehen und handeln. Materialien und Modellexperimente zum Thema Klimawandel. In: Unterricht Chemie (191), S. 32–38.

Einführung in die Datenauswertung mit Python im physikalischen Praktikum für Lehramt- und Nebenfachstudierende

Maximilian Kühlkamp*, Ralf Detemple*, Dominik Dorsel*, Heidrun Heinke*

*I. Physikalisches Institut IA, RWTH Aachen University
maximilian.kuehlkamp@rwth-aachen.de

Kurzfassung

In einer Zeit, in der die programmiersprachenbasierte Datenauswertung die Naturwissenschaften dominiert und informatische Grundkonzepte in der schulischen Bildung immer wichtiger werden, ist es auch für angehende Physik-Lehrkräfte wichtig, in diesen Bereichen ausreichende Kompetenzen zu erwerben. Auf Grundlage dessen wurde ein Modul zur Datenauswertung mit Python für Lehramtstudierende im physikalischen Praktikum entwickelt. In dem Praktikumsversuch sollen die Lehramtstudierenden mit Jupyter-Notebooks in die Grundlagen der Datenauswertung mit Python eingeführt und unter Verwendung eines Scaffolding-Ansatzes zum selbstständigen Umgang mit Python in zukünftigen Auswertungen befähigt werden. In diesem Beitrag wird das entwickelte Modul zur Einführung in die Datenauswertung mit Python vorgestellt und der geplante Einsatz im physikalischen Praktikum für Lehramtstudierende beschrieben. Zudem werden die bereits durch den Einsatz in einem freiwilligen Tutorium für Lehramtstudierende und im physikalischen Nebenfachpraktikum für Biologie- und Chemiestudierende gesammelten Erfahrungen diskutiert.

1. Motivation

Die digitale Messdatenanalyse ist eine wichtige Kompetenz angehender Naturwissenschaftler/innen. Vor allem in der Physik, aber auch in den anderen Naturwissenschaften wie z. B. der Chemie oder den Geowissenschaften, ist dabei eine programmiersprachenbasierte Datenanalyse längst etablierte Praxis. In dem Bachelorstudiengang Physik an der RWTH Aachen erwerben Studierende aus diesem Grund in einem Modul zur Einführung in das Programmieren Grundfertigkeiten, die sie in physikalischen Praktika in Anwendungsaufgaben nutzen können. Studierende der anderen Naturwissenschaften müssen in ihrem Studienverlauf ebenfalls ein physikalisches Praktikum absolvieren, um dort physikalische sowie experimentelle Kompetenzen zu erwerben. Die höchstrelevante und aktuelle programmiersprachenbasierte Datenanalyse ist dort bislang jedoch kein Inhalt.

Auch in der schulischen Bildung werden die digitalen Grundkompetenzen immer populärer (vgl. KMK, 2017). Zu diesen Kompetenzen zählen z. B. ein algorithmisches Verständnis sowie die Problemlösefähigkeit (vgl. Dörge, 2015, S. 347-349). Überraschenderweise sind solche informatischen Grundkompetenzen ebenfalls bislang kein zentraler Gegenstand der naturwissenschaftlichen Lehramtsausbildung. Sie könnten aber durch das Erlernen einer Programmiersprache zur Datenauswertung zumindest teilweise abgedeckt werden.

Diese Umstände sowie eine sinnvolle Kombination aus Messdatenaufnahme und -analyse führten zu der

Entwicklung eines Praktikumsversuchs zur Einführung in die Datenauswertung mit Python, der sowohl für Lehramtstudierende mit dem Unterrichtsfach Physik als auch für sogenannte Nebenfachstudierende verschiedener Studiengänge zum Einsatz kommen soll.

Die Wahl der Programmiersprache fiel auf Python, da Python die am meisten verwendete Programmiersprache weltweit ist (vgl. Statista Research Department, 2024) und vor allem in der Datenanalyse und dem Maschinernen Anwendung findet. Die simple Syntax und die Modulierbarkeit mit hilfreichen externen Paketen für die Datenauswertung ermöglichen einen vergleichsweise einfachen Einstieg in die programmiersprachenbasierte Datenanalyse. In Kombination mit Jupyter-Notebooks lassen sich Auswertungsschritte direkt im selben Dokument mit Erklärungen und Hilfestellungen beschreiben.

2. Fachdidaktische Ansätze

Der Entwicklung des Moduls sowie einigen Umsetzungen der Inhalte liegen die folgenden fachdidaktischen Ansätze zugrunde:

Bei der Entwicklung wurde sich an dem Modell der didaktischen Rekonstruktion nach Kattmann orientiert (vgl. Kattmann et al., 1997) und ein Design-Based Research-Ansatz gewählt. Beides sind iterative Prozesse aus Design, Evaluation und Re-Design. Das Modell der didaktischen Rekonstruktion legt dabei den Fokus darauf, die Sichtweisen der Lernenden und

die Ergebnisse der fachlichen Klärung in der didaktischen Strukturierung wechselseitig zu verknüpfen. Das heißt, dass die zu vermittelnden fachwissenschaftlichen Inhalte nicht ohne eine Anpassung an die Vorkenntnisse, Weltanschauungen und verinnerlichten Werte der Lernenden in einem Unterrichtsgefüge integriert werden sollten (vgl. Kattmann et al., 1997). Wichtig sind somit vor der Entwicklung des Moduls eine Erhebung der Lernendenperspektive und anschließend die Abstimmung der Inhalte auf die Ergebnisse der Erhebung.

Durch die Verwendung eines Design-Based Research-Ansatzes wird sichergestellt, dass anhand von Evaluation und Re-Design nach jeder Durchführung die ursprüngliche Intervention (hier die Einführung in Python) optimiert wird und ein Beitrag zur Theorieentwicklung geleistet werden kann (vgl. Gess et al., 2014).

Der Aufbau des entwickelten Moduls folgt einem Scaffolding-Ansatz. Scaffolding beschreibt ein Gerüst an Hilfestellungen, das die Lernenden dazu befähigt, ein Problem zu lösen, welches sie ohne die Hilfestellungen nicht hätten lösen können. Um eine Selbstständigkeit der Lernenden zu erreichen, muss das Gerüst aus Hilfestellungen schrittweise abgebaut werden (vgl. Wood et al., 1976). Die Umsetzung des Scaffolding-Ansatzes im Modul wird in Abschnitt 5.1 näher ausgeführt.

Bei der Umsetzung der Inhalte wurden neben dem Scaffolding-Ansatz auch die didaktischen Prinzipien (vgl. Baumann, 1996) bzw. die Prinzipien didaktischen Handelns (vgl. Hubwieser, 2007) berücksichtigt. Diese grundlegenden Prinzipien unterstützen die Wahl der Methodik und Darstellung der Inhalte. Ebenfalls sind die Erkenntnisse des ARCS-Modells in die Entwicklung eingeflossen. Die vier Bedingungen *attention*, *relevance*, *confidence* und *satisfaction* müssen nach Keller erfüllt sein, damit eine Person wirklich motiviert ist (vgl. Keller, 1987). Der Einfluss des Modells in die Entwicklung lässt sich z. B. in der Einleitung der Praktikumsanleitung des entwickelten Moduls wiederfinden.

3. Erhebung zum Interesse und Vorwissen von Lehramtstudierenden

Gemäß der Berücksichtigung der Lernendenperspektive im Modell der didaktischen Rekonstruktion wurde vor der Entwicklung des Moduls eine Erhebung zum Interesse und Vorwissen von Physik-Lehramtstudierenden zur Programmierung durchgeführt. Es konnten dabei insgesamt 29 Studierende befragt werden. Da die Umfrage während ausgewählter Veranstaltungen stattfand, teilt sich die Stichprobe in 9 Studierende des 4. Semesters und 20 Studierende des 6. oder eines höheren Semesters. Trotz der relativ kleinen Stichprobe konnten durch die Durchführung in Pflichtveranstaltungen zwei Kohorten des aktuell

kleinen Physik-Lehramtstudiengangs für die Schulform Gymnasien und Gesamtschulen fast in ihrer Gänze abgebildet werden.

Die Erhebung orientierte sich an den folgenden drei Leitfragen:

1. Welches Interesse besteht an der Datenauswertung mit Python?
2. Welche Vorerfahrungen im Programmieren und im Umgang mit Python besitzen die Studierenden bereits?
3. Welche Erwartungen und Wünsche hätten die Studierenden an ein Modul zur Einführung in die Datenauswertung mit Python?

3.1. Interesse

Die Erhebung ergab, dass 90 % der Physik-Lehramtstudierenden ihre Daten mit Excel (25¹) oder Origin (1) auswerten. Von den 3 Studierenden, die ihre Messdaten bereits mit Python auswerten, studieren 2 als zweites Lehramtsfach Informatik. Die für die Entwicklung essenzielle und überraschende Erkenntnis war, dass 73 % (19) der Studierenden, die ihre Messdaten nicht bereits mit Python auswerten, angaben, dass sie nach einer expliziten Einführung zu einer Auswertung mit Python wechseln würden. Auffällig ist dabei auch die Aufteilung der Angaben der Studierenden bei bestehenden oder fehlenden Vorkenntnissen (s. Abbildung 1).

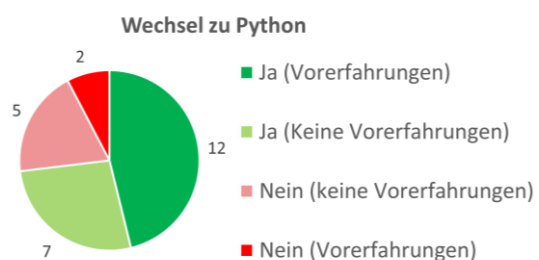


Abb. 1: Aufteilung der Angaben der Studierenden zu einem möglichen Wechsel zur Verwendung von Python nach einer Einführung in „Ja“ (grün) und „Nein“ (rot) bei bestehenden oder fehlenden Vorkenntnissen. N = 26

3.2. Vorerfahrungen

Der erste mögliche Kontaktpunkt mit textueller Programmierung ist häufig der Informatikunterricht in der Schule. 76 % (22) der Befragten gaben an, bereits in der Schule Informatikunterricht besucht zu haben, davon jedoch 55 % (12) nur in der Sekundarstufe 1, in welcher die textuelle Programmierung eher selten behandelt wird und Python bis jetzt kein Inhalt des Kernlehrplans Informatik in NRW ist (vgl. Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2023). 59 % (17) der Studierenden gaben an, bereits Erfahrungen mit Python gesammelt zu haben. Die häufigsten Angaben für die Herkunft der Vorerfahrungen waren Übungsblätter der Pflichtveranstaltungen Experimentalphysik 1 und 2 sowie der

¹ Anzahl der Personen

Einführung in die Theoretische Physik, die Inhalte einer Mathematik für Physiker/innen vermittelt. Die Frage zur Selbsteinschätzung im Umgang mit Python zur Datenauswertung zeigt mit einem Wert von ca. 2,3 auf einer sechsstufigen Likert-Skala von 1 (unsicher) bis 6 (sicher) jedoch, dass die vermittelten Kompetenzen in diesen Veranstaltungen nicht für ein selbstbewusstes Anwenden bei der Datenauswertung ausreichen. Werden die 3 Studierenden, die Python bereits zur Datenauswertung verwenden, aus dieser Stichprobe ausgenommen, liegt der numerische Wert für die Selbsteinschätzung sogar nur bei 1,7.

3.3. Erwartungen und Wünsche

Bei der Erfragung der Erwartungen und Wünsche an das Modul zur Einführung in Python zur Datenauswertung wurden verschiedene Aspekte genannt. Die häufigsten Nennungen waren dabei, dass das Modul

- eine grundlegende Einführung in die Datenauswertung bieten soll.
- die Grundkompetenzen von Python vermitteln soll.
- Vorteile der Datenauswertung mit Python aufzeigen soll.

3.4. Folgerungen für die Entwicklung des Moduls

Eine wichtige Erkenntnis für die Entwicklung des Moduls ist, dass die Zielgruppe eine große Heterogenität in Bezug auf die Vorerfahrungen im Umgang mit Python bei der Datenauswertung aufweist. Das Modul muss daher, wie auch in den Wünschen geäußert, eine grundlegende Einführung in Python als textuelle Programmiersprache bieten. Auch auffällig ist, dass die Akzeptanz eines Wechsels des Auswertungsmediums größer ist, wenn bereits erste Erfahrungen mit Python gemacht wurden (s. Abbildung 1). Eine Einführung in Python sollte deswegen die Vorteile der Nutzung von Python zur Datenauswertung im Vergleich zu Programmen wie Excel aufzeigen und verdeutlichen.

4. Ziele und Inhalte des Moduls

Aus den Ergebnissen der Erhebung sowie der fachlichen Klärung können die folgenden Ziele für das Modul definiert werden.

In erster Linie ist das Ziel des Moduls, den Studierenden das selbstständige Auswerten ihrer Messdaten mit Python in Praktikumsversuchen zu ermöglichen. Dabei lernen die Studierenden grundlegende Kompetenzen der Informatik kennen. Dazu gehören z. B. die Problemlösung mit den Teilkompetenzen der Recherche und des Debuggings sowie eine algorithmische Denkweise. Ein weiteres Ziel des Moduls ist es, für

die Studierenden die Vorteile der Verwendung von Python zur Datenauswertung sichtbar zu machen. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Verwendung von Paketen zur Automatisierung von Auswertungsschritten, vor allem bei der Betrachtung von Messunsicherheiten.

Inhalte des Moduls sind dementsprechend einerseits die Grundlagen von Python (Syntax, Datentypen/-strukturen, Funktionen, Pakete) und andererseits datenauswertungsspezifische Kompetenzen (Einlesen und Plotten von Messdaten, Fitten mathematischer Funktionen, Betrachtung und Berechnung von Unsicherheiten). Für die Datengrundlage wird das Experiment Federpendel eingesetzt. Die Studierenden sollen mit Hilfe von phyphox² den Beschleunigungsverlauf verschiedener Massen an einem Federpendel messen und anschließend in einem Jupyter-Notebook die Federkonstante bestimmen.

5. Beschreibung des Moduls

Das Modul besteht aus drei Produkten: einer Versuchsanleitung und zwei Jupyter-Notebooks. In der Versuchsanleitung wird das Modul motiviert, eine Anleitung zur Installation von Anaconda³ und Visual Studio Code⁴ gegeben sowie der Versuch Federpendel erklärt. Der Link zum GitHub-Repository des Moduls ist im Anhang des Beitrags zu finden.

5.1. Scaffolding

Zur Umsetzung eines Scaffolding-Ansatzes wird das Modul in zwei Teile mit jeweils einem Jupyter-Notebook gegliedert (s. Abbildung 2).

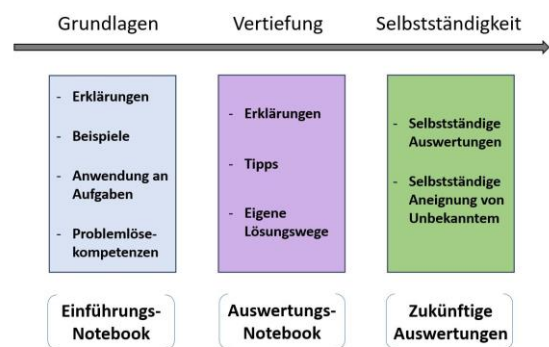


Abb. 2: Darstellung der Umsetzung des Scaffolding-Ansatzes im entwickelten Modul.

Im ersten Teil lernen die Studierenden mit Hilfe des Einführungsnotebooks die Grundlagen von Python und Jupyter-Notebooks kennen. Dort werden zusätzlich schon grundlegende Funktionen wie das Einlesen

² Smartphone-App zur Messdatenaufnahme mit den im Smartphone verbauten Sensoren. Website: <https://phyphox.org/de/home-de/> (Stand: 19.05.2024)

³ Gängige Python-Distribution mit vielen für die Datenanalyse vorinstallierten Paketen. Website: <https://www.anaconda.com/> (Stand: 21.05.2024)

⁴ Alternative zu Jupyter für die Bearbeitung von Notebooks. Visual Studio Code bietet gegenüber Jupyter viele nützliche Funktionen wie z. B. die Codevervollständigung von IntelliSense. Website: <https://code.visualstudio.com/> (Stand: 21.05.2024)

und Plotten von Messdaten thematisiert. Hilfestellungen, Beispiele und vertiefende Aufgaben sollen dabei den Kompetenzerwerb fördern. Im zweiten Teil, dem Datenauswertungsnotebook, werden die Messdaten des Federpendelversuchs ausgewertet. Hier werden die Hilfestellungen schrittweise abgebaut, um gemäß dem Scaffolding-Ansatz eine zunehmende Selbstständigkeit der Studierenden zu ermöglichen.

5.2. Einführungsnotebook

Das Einführungsnotebook ist als Vorbereitung auf das Datenauswertungsnotebook gedacht und ist so aufgebaut, dass ein neuer Inhalt (z. B. Datentypen) zuerst anhand von Erläuterungen und Beispielen eingeführt wird und anschließend mit Hilfe einer Aufgabe gefestigt werden kann.

Das Notebook orientiert sich inhaltlich teilweise an dem Buch „Mit Jupyter durchs Physikpraktikum“ von Lew Classen (vgl. Classen, 2022). Das Buch bietet eine ausführliche Grundlage zur Einführung in die Datenauswertung mit Python, hat aber durch die fehlende Interaktivität eines Buches Nachteile gegenüber einer Umsetzung als Jupyter-Notebook. Ein Vorteil von Notebooks ist z. B., dass die Code-Beispiele von den Studierenden bearbeitet und dadurch Unklarheiten durch Abänderungen des Beispiels selbstständig überprüft werden können. Die Inhalte des Buches wurden zusätzlich mit wichtigen Kompetenzen wie dem Debugging und dem Recherchieren von Funktionsdokumentationen erweitert.

5.3. Datenauswertungsnotebook

Das Datenauswertungsnotebook stellt eine Schritt-für-Schritt-Anleitung zur Auswertung des Versuchs Federpendel dar. Die einzelnen Auswertungsschritte und die dafür benötigten Funktionen bzw. Pakete werden in einem Text ausführlich beschrieben. Die Aufgabe der Studierenden ist es, mit den im Einführungsnotebook erlangten Kompetenzen und den Beschreibungen der Auswertungsschritte selbstständig den für die Auswertung benötigten Code zu schreiben.

Eine Besonderheit des auszuwertenden Versuchs ist die Verwendung von „unbekannten“ Massen bei der Messung der Beschleunigung am Federpendel. Durch die sehr genauen Messungen von phyphox und die Verwendung einer Fit-Methode in Python würden die Studierenden bei vorher gewogenen Massen sehr kleine Messunsicherheiten und eine nahezu perfekte lineare Funktion bei der geeignet linearisierten Auftragung der quadrierten Kreisfrequenz ω^2 als Funktion der reziproken Masse $1/m$ erhalten (s. Abbildung 3). Da jedoch ein Inhalt des Notebooks der Unterschied zwischen den beiden in Python gängigen Fit-Methoden `optimize.curve_fit`⁵ und `ODR`⁶ ist, ist eine

kleine Abweichung der Messdaten von den theoretischen Erwartungen gewünscht. Aus diesem Grund wurden mit einem 3D-Drucker fünf gleichaussehende Massstücke mit unterschiedlichen Füllichten produziert. Die Studierenden sollen die Massstücke nicht auswiegen, sondern erhalten für die Berechnungen das durchschnittliche Gewicht aller Massstücke mit dem Bereich der Abweichungen als Unsicherheit. Durch diese synthetisch erzeugte große Unsicherheit kann der Unterschied zwischen den beiden Fit-Methoden besser verdeutlicht werden (s. Abbildung 4).

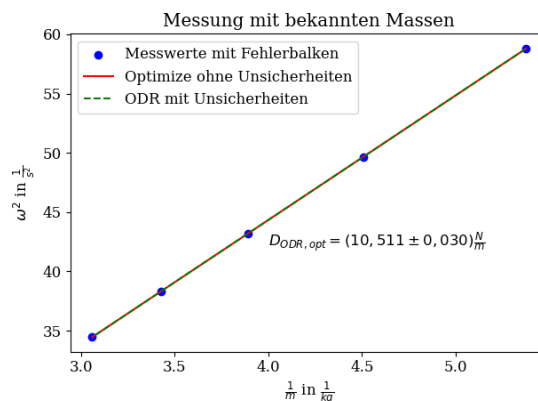


Abb. 3: Diagramm zur Bestimmung der Federkonstante bei bekannten Massen. Auf der x-Achse m^{-1} in kg^{-1} mit der Masse m und auf der y-Achse ω^2 in s^{-2} mit der Kreisfrequenz ω . Beide linearen Fits der Methoden `optimize.curve_fit` (hier Optimize) (rot) und `ODR` (grün gestrichelt) liegen übereinander und führen zum gleichen Ergebnis für die Federkonstante.

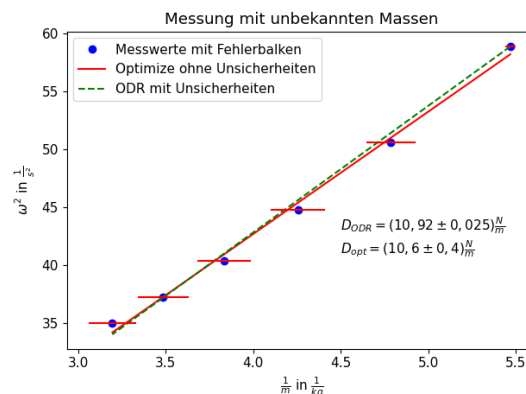


Abb. 4: Gleiche Darstellung wie in Abbildung 3, jedoch nun mit den unbekanntem Massstücken sowie entsprechend sichtbaren Fehlerbalken und Abweichungen der Datenpunkte. Da `ODR` auch die Unsicherheiten in x-Richtung berücksichtigen kann, führen die beiden Fit-Methoden hier zu unterschiedlichen Federkonstanten.

⁵ Methode des Pakets `scipy` zum Fitten von Messdaten. Ermöglicht nur die Übergabe von Unsicherheiten in y-Richtung.

⁶ Ebenfalls Methode des Pakets `scipy` zum Fitten von Messdaten. Ermöglicht jedoch das Übergeben von Unsicherheiten in x- und y-Richtung.

Aufgrund von gesammelten Erfahrungen aus dem Einsatz im physikalischen Nebenfachpraktikum (s. Abschnitt 7) wurde das Datenauswertungsnotebook zur weiteren Differenzierung um Knöpfe mit Hilfestellungen erweitert. Die Knöpfe wurden an Stellen mit häufig auftretenden Schwierigkeiten platziert, damit die Studierenden nach eigenem Ermessen Hilfen einholen können, ohne zwingend eine/n Tutor/in konsultieren zu müssen. Das Skript für die Hilfestellungen ist zur besseren Übersichtlichkeit des Notebooks in einer zusätzlichen Datei ausgegliedert und kann am Anfang des Notebooks durch das Ausführen einer dafür vorgesehenen Code-Zelle eingebunden werden.

6. Einsatz in der Lehramtsausbildung

Der erste reguläre Einsatz des Moduls für Lehramtstudierende der Physik ist für das Kompetenzpraktikum (s. Abschnitt 6.1) im Sommersemester 2024 geplant. Erste Erfahrungen mit Physik-Lehramtstudierenden konnten jedoch schon bei einem freiwilligen Tutorium für Studierende des 5. Semesters gesammelt werden (s. Abschnitt 6.3).

6.1. Rahmenbedingungen des Kompetenzpraktikums

Das Modul wurde für den Einsatz im Kompetenzpraktikum, dem ersten von insgesamt drei Teilen im Grundpraktikum für Physik-Lehramtstudierende der RWTH Aachen, entwickelt. Das Kompetenzpraktikum ist nach der Prüfungsordnung von 2023 im 2. Semester verortet. Im Kompetenzpraktikum erlernen die Studierenden die Grundlagen des Experimentierens. Für das Absolvieren des Praktikums erhalten die Studierenden 3 ECTS Credits. Es ist somit einen Arbeitsaufwand von insgesamt ca. 90 Stunden vorgesehen. Bei einer Dauer von 13 Wochen ergibt sich ein wöchentlicher Umfang von ca. 7 Stunden mit einer Präsenzzeit am Praktikumstag von 2 Stunden und 15 Minuten. Die restliche Zeit kann für die Vorbereitung auf den Praktikumstag und die Nachbereitung bzw. Erstellung eines Versuchsprotokolls verwendet werden.

Das Kompetenzpraktikum startet für alle Studierende mit einer Einführung in die Grundlagen von Messdaten und ihren Unsicherheiten im Versuch MEDA (MEssDaten). Darauf folgt in der zweiten Woche ergänzend ein Tutorium zur Datenauswertung mit Excel. Nach dem zweiwöchigen Einführungsblock durchlaufen die Studierenden in Gruppen von bis zu 8 Personen zehn Wochen lang wöchentliche Versuche. In der Regel muss bei den regulären Versuchen für die erfolgreiche Teilnahme ein Versuchsbericht angefertigt und abgegeben werden. Das Praktikum wird am Ende der 13 Wochen mit einer 15-minütigen mündlichen Prüfung mit experimentellen Anteilen abgeschlossen.

6.2. Geplanter Einsatz

Das entwickelte Modul zur Einführung in die Datenauswertung mit Python ist als übergreifendes Tuto-

rium für alle Studierenden in der Mitte des Kompetenzpraktikums geplant. Auf diese Weise können die Studierenden erste Erfahrungen im Experimentieren sammeln und sich an die Gegebenheiten des Praktikums gewöhnen, ohne direkt zu Beginn von dem Lernen einer Programmiersprache überfordert und abgeschreckt zu werden. Gleichzeitig finden nach dem Tutorium noch genügend reguläre Versuche statt, in denen der Umgang mit Python zur Datenauswertung erprobt und gefestigt werden kann.

Die Studierenden sollen als Vorbereitung auf den Versuchstag gemäß der Praktikumsanleitung alles für die Datenauswertung Benötigte installieren und das Einführungsnotebook vollständig bearbeiten. Am Versuchstag werden zu Beginn Fragen und aufgetretene Probleme der Vorbereitung geklärt. Anschließend wird der Versuch Federpendel durchgeführt und die Messdaten werden aufgenommen. Diese werden dann in dem Datenauswertungsnotebook ausgewertet. Während der Präsenzzeit steht der Tutor bzw. die Tutorin für Fragen zur Verfügung. Das Datenauswertungsnotebook kann, wenn nötig, zuhause vervollständigt werden.

6.3. Erfahrungen aus freiwilligem Tutorium

Anfang April 2024 wurde das Modul für 9 freiwillige Studierende des 5. Semesters als Vorbereitung auf das Fortgeschrittenenpraktikum (letztes Praktikum des Physik-Lehramtstudiums im 6. Semester) in der Form eines Tutoriums angeboten. Das Tutorium hat nach Absprache mit den Teilnehmenden über den Verlauf eines Tages in Präsenz stattgefunden. Morgens wurde innerhalb von ca. 3 Stunden die Vorbereitung (Installation und Einführungsnotebook) abgeschlossen. Nach einer Mittagspause wurden die Messdaten am Federpendel aufgenommen (ca. 25 Minuten) und anschließend im Datenauswertungsnotebook ausgewertet. Nach ca. 3 weiteren Stunden war das Tutorium beendet.

Die Vorbereitung sowie die Messdatenaufnahme verliefen problemlos und es gab durchweg gutes Feedback. Erste Schwierigkeiten traten bei der Datenauswertung auf. Durch den Abbau der Hilfestellung zwischen Einführungs- und Datenauswertungsnotebook waren die Studierenden auch mit Hilfestellungen häufig mit Syntaxfehlern oder der falschen Verwendung der durch die Pakete gelieferten Funktionen (z. B. fehlende zu übergebende Parameter) beschäftigt. Das Auftreten und Lösen solcher Probleme führte teilweise zu Frustration, teilweise auch zu Euphorie. Es kostete aber in vielen Fällen so viel Zeit, dass die meisten Teilnehmenden die Datenauswertung in Präsenz aus zeitlichen Gründen nicht abschließen konnten. Trotz der genannten Schwierigkeiten war eine durchgehend intensive Beschäftigung mit der Auswertung erkennbar und das Feedback war insgesamt positiv. Die Erfahrungen überschneiden sich an einigen Stellen mit denen aus der Durchführung im Nebenfachpraktikum, weswegen in Abschnitt 8 ein zusammenfassendes Fazit gezogen wird.

7. Einsatz in Physikpraktika für Nebenfachstudierende

Nach der Entwicklung des Moduls wurde als weiteres Anwendungsfeld der Einsatz im physikalischen Praktikum für Chemie- und Biologie-Studierende identifiziert und in einer ersten Durchführung pilotiert. Die Überlegung war zunächst, die Einführung in Python für eine Freiwilligen-Gruppe mit 8 bis 10 Personen je Studiengang anzubieten. Die Anmeldungen zeigten jedoch, dass das Interesse an einer solchen Einführung weit größer war als vorher angenommen. Insgesamt 80 Studierende (30 von insgesamt 133 Biologie-Studierenden und 50 von insgesamt 106 Chemie-Studierenden) waren gewillt, das Modul durchzuführen. Entsprechend wurde das Modul im Wintersemester 2023/24 in 3 Biologie- und 5 Chemie-Gruppen mit insgesamt 80 Teilnehmenden eingesetzt und evaluiert.

7.1. Rahmenbedingungen des physikalischen Nebenfachpraktikums

Das physikalische Praktikum für Chemie- und Biologie-Studierenden ist wie das Kompetenzpraktikum für Lehramtstudierende mit 3 ECTS Credits versehen. Die Präsenzzeit ist jedoch mit 3 Stunden pro Woche länger als das Kompetenzpraktikum im Lehramtstudium. Dadurch sinkt die Zeit für Vor- und Nachbereitung auf 4 Stunden, was durch einen weniger umfangreichen Versuchsbericht ausgeglichen wird. Das Praktikum startet in Kleingruppen von 8 Personen mit einem zweiwöchigen Einführungsblock aus dem Versuch MEDA (MEssDATen) und dem Tutorium TDA (Tutorium Datenauswertung mit Excel). Darauf folgen 9 reguläre Versuche mit zusätzlich 2 Tutorien, in welchen die Studierenden auf die nachfolgenden Versuche vorbereitet werden. Für die Gruppen, die das Modul zur Einführung in Python besuchen, wird das Tutorium TDA mit dem Versuch PYT ersetzt.

7.2. Ablauf des Versuchs PYT

Die Studierenden bereiten sich zu Hause mithilfe der Praktikumsanleitung und dem Einführungsnotebook auf den Praktikumstag vor. Sie installieren vor dem Praktikumstag alle benötigten Programme und bearbeiten vollständig das Einführungsnotebook. Der Betreuer bzw. die Betreuerin steht per Mail für Fragen zur Verfügung. Um mehr Zeit für die Datenauswertung zu schaffen und fehlerbehaftete Messungen zu vermeiden, nehmen die Studierenden die Messdaten nicht selbst auf, sondern erhalten im Vorfeld eine geeignete Messreihe zum Versuch Federpendel. Die Messdaten sollen dann am Praktikumstag im Datenauswertungsnotebook ausgewertet werden. Für die erfolgreiche Teilnahme am Versuch ist neben der Anwesenheit eine sichtbare, hinreichend intensive Beschäftigung mit den Versuchsinhalten ausreichend. Durch die in Abschnitt 3 angesprochene große Heterogenität der Vorkenntnisse in Bezug auf schulische Vorerfahrungen muss berücksichtigt werden, dass trotz differenzierter Hilfestellungen nicht erwartet

werden kann, dass alle Studierenden gleichermaßen das Lernziel erreichen.

7.3. Erfahrungen aus dem Praktikum

Wie auch bei der Durchführung als Tutorium für Lehramtstudierende (s. Abschnitt 6.3) fällt das Feedback zum Vorbereitungsmaterial durchweg positiv aus. Zu Beginn des Versuchstages fühlen sich die Studierenden gut auf den Praktikumstag vorbereitet und es gibt wenig Unklarheiten zu besprechen. Die Vorbereitungszeit liegt im Durchschnitt zwischen 2 und 4 Stunden.

Am Versuchstag hatten die Studierenden sichtlich Schwierigkeiten, die bei der Vorbereitung erlangten Kompetenzen in der Datenauswertung umzusetzen. Ein häufiger Grund dafür war, dass Erklärungen und Anweisungen nicht ausreichend genau durchgelesen oder sogar direkt übersprungen wurden. Aus diesem Grund wiederholten sich die Hilfestellungen der Tutorinnen bzw. Tutoren oft bei verschiedenen Personen. Diese Erkenntnis führte zur Implementierung der in Abschnitt 5.3 angesprochenen Knöpfe mit Hilfestellungen, die die Tutorinnen und Tutoren entlasten sollen.

Als Feedback äußerten die Studierenden, dass der Umfang des Datenauswertungsnotebooks möglicherweise zu groß für einen einzelnen Versuchstermin sei, weswegen eine Aufteilung auf zwei Termine sinnvoll wäre.

Am Ende des Versuchstages wurde in einem Fragebogen unter anderem erhoben, ob die Studierenden versuchen werden, die zukünftigen Versuche mit Python auszuwerten und ob sie den Versuch PYT ihren Kommilitoninnen und Kommilitonen weiterempfehlen würden. Bei einer Stichprobe von $N = 55$ gaben ca. 73 % (40) der Studierenden nach der Einführung in Python an, dass sie versuchen werden, die zukünftigen Versuche mit Python auszuwerten. Trotz der in der Pilotierung beobachteten Schwierigkeiten, die vor allem den zeitlichen Umfang und die verfügbaren Hilfen zur eigenständigen Problemlösung betrafen, würden sogar ca. 82 % (45) der befragten Studierenden das Modul ihren Kommilitoninnen und Kommilitonen weiterempfehlen.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund der zunehmenden Bedeutung informatischer Kompetenzen und der programmiersprachenbasierten Datenanalyse wurde ein Modul zur Datenauswertung mit Python für physikalische Praktika entworfen und in diesem Beitrag vorgestellt. In dem Modul lernen die Studierenden in zwei Jupyter-Notebooks zuerst die Grundlagen von Python und anschließend die Datenauswertung mit Python anhand eines Versuchs zum Federpendel kennen. Durch einen Scaffolding-Ansatz sollen sie zur selbstständigen Datenauswertung mit Python befähigt werden.

Das Modul besteht aus einer Vorbereitung und der eigentlichen Datenauswertung. In der Vorbereitung

sollen (in der Regel zuhause) anhand der Praktikumsanleitung alle nötigen Programme installiert und das Einführungsnotebook mit den Grundlagen von Python bearbeitet werden. Am Praktikumstag werden die Messdaten am Versuch zum Federpendel aufgenommen (bzw. im Nebenfachpraktikum bereitgestellt) und anschließend im Datenauswertungsnotebook ausgewertet.

Eine Erhebung unter Lehramtstudierenden des 4. und höheren Semesters ergab, dass die Mehrheit der Studierenden nach einer Einführung in Python durch ein solches Modul von der Verwendung von Excel für die Datenauswertung zu Python wechseln würden. Zusätzlich konnte durch die Erhebung gemäß dem Modell der didaktischen Rekonstruktion die Lernendenperspektive in Erfahrung gebracht und bei der Entwicklung des Moduls berücksichtigt werden.

Ursprünglich war der Einsatz des Moduls zunächst nur für das Kompetenzpraktikum im 2. Semester des Lehramtstudiums Physik angedacht. Ein Test der Akzeptanz des Moduls im Rahmen des Nebenfachpraktikums für Studierende der Biologie und Chemie erbrachte ein überraschend großes Interesse dieser Studierenden an einer Einführung in Python zur Datenauswertung und führte zum Einsatz im physikalischen Nebenfachpraktikum. Dort wurde das Modul im Wintersemester 2023/24 von insgesamt 80 Biologie- und Chemiestudierenden durchgeführt. Zusätzlich konnte es im April 2024 in einem freiwilligen Tutorium für Physik-Lehramtstudierende des 5. Semesters angeboten werden.

Die Erfahrungen aus diesen ersten Einsätzen zeigen, dass die Vorbereitung mit der Installation und dem Einführungsnotebook gut funktioniert. Bei der Datenauswertung arbeiten die Studierenden fokussiert, haben jedoch häufig Schwierigkeiten, das Gelernte aus der Vorbereitung auf den neuen Kontext anzuwenden und tun sich insbesondere mit neuen Inhalten schwer. Die nicht vertraute Syntax einer Programmiersprache stellt dabei sicherlich eine große, wenn nicht die größte Problemquelle dar. Erste Anpassungen durch differenzierte Hilfestellungen in der Form von Knöpfen an häufig problematischen Stellen des Notebooks können die Schwierigkeiten nur teilweise lösen, weswegen über zusätzliche Hilfestellungen nachgedacht werden sollte. Aufgrund der bisher auftretenden Schwierigkeiten übersteigt zudem aktuell der zeitliche Umfang der Datenauswertung noch die Dauer eines Praktikumstages. Eine mögliche Lösung bei vorhandenen Ressourcen wäre die Aufteilung auf zwei Praktikumstage.

Insgesamt kann jedoch festgestellt werden, dass trotz der Schwierigkeiten bei der Datenauswertung das Modul bei den Studierenden gut ankommt. Tatsächlich würden 82 % der befragten Nebenfachstudierenden das Modul, nachdem sie es durchlaufen haben, ihren Kommilitoninnen und Kommilitonen weiterempfehlen. Das Modul wird deswegen auch in Zukunft im physikalischen Nebenfachpraktikum sowie

im Kompetenzpraktikum für Lehramtstudierende an der RWTH Aachen angeboten und kontinuierlich weiterentwickelt.

9. Literatur

- Baumann, R. (1996). Didaktik der Informatik (2., vollst. neu bearb. Aufl). Klett.
- Classen, L. (2022). Mit Jupyter durchs Physikpraktikum: Auswerten mit Python leicht gemacht. Springer Spektrum.
https://doi.org/10.1007/978-3-658-37723-6_1
- Dörge, C. (2015). Informatische Schlüsselkompetenzen: Konzepte der Informationstechnologie im Sinne einer informatischen Allgemeinbildung. Universitätsverlag Potsdam.
- Gess, C., Rueß, J. & Deicke, W. (2014). Design-based Research als Ansatz zur Verbesserung der Lehre an Hochschulen - Einführung und Praxisbeispiel. Qualität in der Wissenschaft, 8(1), 10-16.
- Hubwieser, P. (2007). Didaktik der Informatik: Grundlagen, Konzepte, Beispiele (3., überarbeitete und erweiterte Auflage). Springer.
- Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H. & Komorek, M. (1997). Modell der Didaktische Rekonstruktion - Ein Rahmen für naturwissenschafts-didaktische Forschung und Entwicklung. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 3, 3-18.
- Keller, J. M. (1987). Development and use of the ARCS model of instructional design. Journal of Instructional Development, 10(3), 2-10.
<https://doi.org/10.1007/BF02905780>
- Kultusministerkonferenz (KMK). (2017). Bildung in der digitalen Welt: Strategie der Kultusministerkonferenz. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 08.12.2016 in der Fassung vom 07.12.2017.
- Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2023). Kernlehrplan für die Sekundarstufe I Gymnasium in Nordrhein-Westfalen Wahlpflichtfach Informatik. Abgerufen am 21.05.2024, von https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrpläne/up-load/klp_SI/GY19/wpif23/g9_wpif_klp_2023_06_01.pdf
- Wood, D., Bruner, J. S., & Ross, G. (1976). The Role of Tutoring in Problem Solving. Journal of Child Psychology and Psychiatry, 17(2), 89-100. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1976.tb00381.x>
- Statista Research Department. (2024). Die beliebtesten Programmiersprachen weltweit laut PYPL-Index im Mai 2024. Statista. Abgerufen am 21.05.2024, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/678732/umfrage/beliebteste-programmiersprachen-weltweit-laut-pypl-index/>

Anhang

GitHub-Repository des Moduls:

<https://github.com/KuehliM/Modul-Python> (Stand:
20.05.2024)

Entwicklung von Testinstrumenten zu deklarativem Wissen und Vorstellungen zur Quantenphysik in der Mittelstufe

Carsten Albert^{**}, Gesche Pospiech⁺

* Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden
+ Technische Universität Dresden, Professur für Didaktik der Physik
c.albert@ifw-dresden.de, gesche.pospiech@tu-dresden.de

Kurzfassung

Quantentechnologien bieten zahlreiche Kontexte zur Vermittlung konzeptueller quantenphysikalischer Aspekte. Das ermöglicht nicht zuletzt einen früheren Einstieg in die Thematik. In diesem kontextuellen Rahmen wurde ein Spin-First-Lehrkonzept zur Vermittlung konzeptueller und phänomenologischer Aspekte moderner Quantenphysik in Klassenstufe 9 entwickelt.

Die summative Evaluation des Konzeptes untersucht kognitive und affektive Lernendenmerkmale sowie Lehrkräfteeinschätzungen. Zur Untersuchung der Lernwirksamkeit des Konzeptes wurde ein Fragenbogen zum erworbenen deklarativen Wissen entwickelt. Zudem entstand ein Vorstellungsfra-gebogen, der die Erhebung des Ausprägungsgrades quantenphysikalischer Vorstellungen, Denkweisen und Konzepte fokussiert. Dieser Beitrag gibt einen Einblick in die Entwicklung und diskutiert die Sicherstellung von Testgütekriterien der beiden geschlossenen Testinstrumente.

1. Quantenphysik in der Schule

Quantenphysik erhält, nicht zuletzt durch die derzeitigen großen Entwicklungssprünge im Bereich von Quantentechnologien der zweiten Generation, auch im schulischen Bereich eine wachsende Aufmerksamkeit (Müller, 2023). Zwar ist sie im internationalen Vergleich bereits verhältnismäßig lange im deutschen Schulunterricht etabliert, dabei allerdings praktisch ausschließlich als Thema in der gymnasialen Oberstufe (Stadermann et al., 2019).

Die dabei etablierte quasi-historische Vorgehensweise wird bereits seit längerer Zeit kritisiert (siehe z. B. Müller, 2005). Dagegen bieten Quantentechnologien zahlreiche Kontexte, die insbesondere auf moderne und konzeptuelle Aspekte der Quantenphysik fokussieren – ein Trend, der sich mittlerweile auch in den Bildungsstandards für die gymnasiale Oberstufe niederschlägt (Müller, 2023).

Zahlreiche Autoren sprechen sich in Hinblick auf diese Entwicklungen und Ergebnisse für einen Spin-First-Ansatz aus (Stadermann et al., 2019). Ein solcher Ansatz betont die zentrale Rolle der Superposition in der Quantenphysik und erarbeitet konzeptuelle Aspekte anhand exemplarischer Zweizustandssysteme (Stadermann et al., 2019).

Eine zentrale Argumentation für diesen Ansatz ist die Einfachheit der betrachteten Systeme, verbunden mit ersten Erkenntnissen, dass Schülerinnen und Schüler solche Systeme auch phänomenologisch gut erfassen und dadurch formal besser analysieren können (Müller, 2016; Micheli & Stefanel, 2022).

Auch im Bereich der Hochschullehre gibt es für einen solchen Ansatz bereits positive Erfahrungswerte (Sadaghiani, 2016).

2. Entwicklung eines Mittelstufen-Lehrkonzeptes

Ein Spin-First-Ansatz eröffnet auch die Möglichkeit, die Quantenphysik unter einem konzeptuellen und phänomenologischen Fokus bereits in der Sekundarstufe 1 einzuführen, da er auf Seiten der Lernenden die Voraussetzungen an Vorwissen und mathematischen Kompetenzen für einen entsprechenden Lehrgang absenkt. So ist unter anderem eine fachlich saubere qualitative Diskussion konzeptueller Aspekte der Quantenphysik möglich, die vollständig auf den Wellenaspekt zu verzichtet und so die damit verbundenen Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten (siehe z. B. Körhasan & Miller, 2020) umgeht.

Damit kann insbesondere eine junge Zielgruppe in den Fokus fachdidaktischer Forschung rücken, zu der es bisher nur erst Hinweise gibt, dass auch hier eine Vermittlung zentraler Inhalte moderner Physik möglich ist (vgl. Stadermann et al., 2019).

Im Rahmen eines Entwicklungsforschungsprojektes wurde ein Lehrkonzept für die Klassenstufe 9 konzipiert, das auf einem Spin-First-Ansatz aufbaut und hinsichtlich der physikalischen Grundprinzipien des Quantencomputers eine quantentechnologisch geprägte Kontextorientierung aufweist.

Das Lehrkonzept soll innerhalb dieses Kontextes einen verhältnismäßig frühen qualitativen Einblick in moderne Ideen und konzeptuelle Aspekte der Quantenphysik geben, etwa zu Prinzipien wie Superposition und Verschränkung.

Das Konzept wurde im Design-Based-Research-Ansatz mit den zugehörigen Lehrmaterialien in mehreren Schritten entwickelt und wird im Rahmen einer Feldstudie abschließend summativ evaluiert. In diesem Rahmen kommen vorhandene, aber auch neu entwickelte Testinstrumente zum Einsatz.

2.1. Entwicklungsschritte und Methodik

Zunächst wurden auf Grundlage bisheriger Erkenntnisse aus der fachdidaktischen Forschung Design-Prinzipien für den Kurs abgeleitet und ein erster Entwurf für ein Vermittlungskonzept erarbeitet. Dieser Konzeptentwurf wurde anschließend in einem ersten empirischen Schritt anhand von Akzeptanzbefragungen (leitfadenbasierte Einzelinterviews mit Interventionsphasen) als Laborstudie erprobt und angepasst. Für Details hierzu siehe Albert und Pospiech (2023). Es folgte eine Pilotierungsphase, in der

- 1) das Konzept unter realistischen Bedingungen im Feld erprobt und verbessert wurde, sowie
- 2) Erhebungsinstrumente für die summative Evaluation entwickelt wurden.

2.2. Einblick in das Lehrkonzept

Das Lehrkonzept adressiert in erster Linie Schülerinnen und Schüler der Klassenstufe 9. Ausgehend von verschiedenen empirischen Befunden und theoretischen Überlegungen wurden wie beschrieben, unter Beachtung der praktischen Rahmenbedingungen, Design-Prinzipien erarbeitet, die dem gesamten Lehrkonzept zugrunde liegen. Dazu zählen insbesondere:

- Aufbau auf Zweizustandssystemen
- Verzicht auf das Konzept von Wellen
- klare Begriffsbildung und Sprachsensibilität
- Phänomen- und Konzeptorientierung
- sprachliche und inhaltliche Abgrenzung zwischen Quantenphysik und klassischer Physik
- Diskussion des Zusammenhangs von Quantenphysik und klassischer Physik
- Gamification zum Einstieg in die Quantenphysik

Im Zentrum des Konzeptes stehen vier Wesenszüge (Namensgebung orientiert an Küblbeck und Müller (2007)): Superposition, Messprozess, statistischer Charakter und Verschränkung.

Zeitlich umfasst der entwickelte Kurs insgesamt etwa sechs bis sieben Doppelstunden. Details zur Sachstruktur des Konzeptes sind ebenfalls in Albert und Pospiech (2023) zu finden.

3. Entwicklung von Testinstrumenten

Die Entwicklung von Tests, die der Beantwortung von Forschungsfragen dienen, ist eine wichtige und komplexe Aufgabe fundierter fachdidaktischer Forschung (Schmiemann & Lücken, 2014). Voraussetzungen sind präzise Forschungsfragen sowie die Vorlagerung von Theoriearbeit und zahlreicher Entwicklungs- und Analyseschritte (vgl. z. B. Riese & Reinhold, 2014; Schmiemann & Lücken, 2014).

Insbesondere müssen solche Tests den Standards und Kriterien der Wissenschaftlichkeit entsprechen, um eine hohe Testqualität sicherzustellen. Dazu können etwa die Hauptgütekriterien für Tests betrachtet werden (Döring, 2023).

Der Beitrag beschäftigt sich im Folgenden mit der Entwicklung von Testinstrumenten, die im Rahmen der summativen Evaluation des beschriebenen Konzeptes eingesetzt werden, und unter Beachtung der angegebenen wissenschaftlichen Standards entwickelt wurden.

Dafür werden zunächst ausgewählte Forschungsfragen der summativen Evaluation vorgestellt, um darauf aufbauend die Entwicklung zweier Testinstrumente zur Beantwortung dieser Forschungsfragen zu skizzieren.

3.1. Forschungsfragen

Im Zuge der summativen Evaluation stellen sich unter anderem folgende zentrale Forschungsfragen in Hinblick auf kognitive Lernendenmerkmale:

- FF1: Wie lernwirksam ist das Konzept und welche Verständnisschwierigkeiten treten auf?
- FF2: Sind bei den Lernenden nach dem Unterricht quantenphysikalisch geprägte Vorstellungen und Denkweisen erkennbar?

3.2. Testinstrument zum deklarativen Wissen

Zur Beantwortung von FF1 kommt unter anderem ein geschlossener Fragebogen im Single-Choice-Format für Schülerinnen und Schüler zum Einsatz. Dieser Fragebogen wird bezüglich Zielstellung, Entwicklung und Analyse im Folgenden kurz vorgestellt.

3.2.1. Zielstellung

Durch den Fragebogen soll die Lernwirksamkeit des Konzeptes unter Praxisbedingungen evaluiert werden. Unter Lernwirksamkeit wird innerhalb dieser Studie das erworbene deklarative (domänenspezifische) Wissen zu Themen, grundlegenden Begriffen und Ideen der Quantenphysik im Rahmen des Lehrkonzeptes verstanden. Dabei umfasst deklaratives Wissen ein Spektrum aus Sach-, Fakten- und Begriffswissen (Lenske et al., 2015).

Evaluationsergebnisse, die sich auf Grundlage dieses Fragebogens ergeben, können auch Hinweise auf Lernschwierigkeiten geben. Jedoch geben auch andere, hier nicht vorgestellte Erhebungen, Einblick in diesen Teil der Forschungsfrage (insbesondere Lehrerfragebogen und Schülerinterviews).

Ziel des Fragebogens zum deklarativen Wissen ist es somit insbesondere nicht, quantenphysikalische Vorstellungen, Transfer- und Argumentationsfähigkeiten oder ein generelles Verständnis zur Quantenphysik zu erheben (vgl. Bitzenbauer, 2020).

3.2.2. Entwicklungsschritte

Der Fragebogen wurde grundlegend nach den Empfehlungen von Jonkisz et al. (2011) und Bühner (2010) konstruiert. Zudem orientiert er sich, insbesondere auch in der in der Entwicklungsmethodik, in großen Teilen an Bitzenbauer (2020).

Methodologisch wurde der Fragebogen linear entsprechend der nachfolgend dargelegten Vorgehensweise entwickelt:

- 1) Konstrukt und Curriculumsbezug
- 2) offene Fragen/Lerntagebücher
- 3) Entwicklung einer vorläufigen Testversion
- 4) Lautes Denken
- 5) Überarbeitung
- 6) Pilotierung und psychometrische Prüfung
- 7) Überarbeitung
- 8) Expertenvalidierung

Der Ansatz zum Konstrukt sowie Einblicke in die Laut-Denken-Studie und abschließende psychometrische Kennwerte werden im Folgenden gegeben.

3.2.3. Konstrukt

Entsprechend der Zielstellung bezweckt der Fragebogen die Erhebung von Sach-, Fakten- und Begriffswissen zentraler Begriffe und Ideen aus dem Unterrichtskonzept. Die Festlegung dieser Begriffe erfolgt auf Grundlage eines Blueprints nach Flateby (2013). Konkret wurde hierfür der den Lehrkräften vorgegebene Stoffverteilungsplan zugrunde gelegt, in dem die als zentral geltenden Begriffe und Aspekte vermerkt sind. Durch die Zuordnung der Items im finalen Format des Fragebogens zu den Begriffen und Ideen des Blueprints wird curriculare Validität sichergestellt.

3.2.4. Lautes Denken

Auf Grundlage des Konstruktes und Blueprints entstand ein erster Testentwurf, dessen Distraktoren aus Schülerantworten in Lerntagebüchern (eingesetzt in der ersten Pilotierungsklasse) abgeleitet wurden. Zur Sicherstellung inhaltlicher Validität insbesondere auf Itemebene wurde eine an Bitzenbauer (2020) orientierte Laut-Denken-Studie mit $N = 8$ Schülerinnen und Schülern durchgeführt, welche das Lehrkonzept zuvor im Rahmen der Pilotierung kennengelernt und durchlaufen haben.

Unter der Methode „Lautes Denken“ wird „[...] das gleichzeitige laute Aussprechen von Gedanken bei der Bearbeitung einer Aufgabe [...]“ (Knoblich & Öllinger, 2006, zitiert nach Schnell, 2016) verstanden. Im vorliegenden Fall wurde der erste Entwurf des Fragebogens zum deklarativen Wissen von den Teilnehmenden bearbeitet. Auf Grundlage dieser Form des Interviews sollte geklärt werden, ob

- a) die Items domänenkonform interpretiert werden,
- b) die kognitiven Hürden in den Items wahrgenommen werden,
- c) die Items sprachlich verständlich formuliert sind,
- d) die entwickelten Distraktoren als hinreichend plausibel und unterscheidbar wahrgenommen werden, sowie
- e) jeweils eine begründete Entscheidung für eine Antwort möglich ist.

Die Auswertung der Interviews erfolgte durch eine skalierende Inhaltsanalyse nach Mayring (2010) mit einem deduktiven Kategoriensystem sowie einer

daraus abgeleiteten gerichteten Exploration des Interviewmaterials zur Ableitung von Anpassungen an den Items.

Zu jedem der genannten Aspekte bzw. Fragestellungen a) – e) kam folgendes dreistufiges ordinales Kategoriensystem, genauer definiert in einem Kodiermanual, zum Einsatz:

- trifft zu (kodiert mit 0; grün)
- trifft teilweise zu (kodiert mit 0,5; gelb)
- trifft nicht zu (kodiert mit 1; rot)

Nach Kodierung aller Interviews und Items ergaben sich für die 16 finalen Items die in Tabelle 1 dargestellten arithmetischen Mittelwerte zu den jeweiligen Fragestellungen a) – e).

Tab. 1: Ergebnisse der Laut-Denken-Studie.

Item	Inhalt	Hürde	Verständlichkeit	Distraktoren	Begründung
1	0,00	0,19	0,25	0,38	0,19
2	0,00	0,38	0,00	0,56	0,00
3	0,00	0,31	0,00	0,63	0,13
4	0,13	0,31	0,00	0,25	0,31
5	0,44	0,13	0,00	0,38	0,38
6	0,13	0,06	0,00	0,19	0,25
7	0,13	0,00	0,00	0,19	0,06
8	0,00	0,25	0,06	0,25	0,06
9	0,31	0,06	0,06	0,31	0,06
10	0,13	0,19	0,00	0,44	0,00
11	0,25	0,00	0,13	0,19	0,06
12	0,13	0,00	0,00	0,31	0,06
13	0,06	0,56	0,00	0,56	0,06
14	0,00	0,00	0,19	0,38	0,06
15	0,00	0,44	0,00	0,69	0,19
16	0,00	0,25	0,25	0,31	0,06

12,5% der Daten wurden von einem unabhängigen Rater mit $\kappa = 0,71$ zweikodiert.

Diese Mittelwerte dienen zunächst der übersichtlichen Zusammenfassung und Dokumentation der Kodiererergebnisse und geben so für die untersuchten Aspekte Hinweise und Nachweise für die Validität auf Itemebene. Auf Grundlage dieser Kodierung fand zur Weiterentwicklung im nächsten Schritt eine tiefere qualitative Exploration der Interviewaussagen und eine weitere Runde offener Fragen bei zusätzlichen Schülerinnen und Schülern aus den Pilotierungsklassen statt. Auf Grundlage dieser Ergebnisse und Antworten wurde der Fragebogen, insbesondere Formulierungen und Distraktoren, weiter angepasst.

3.2.5. Finales Format und psychometrische Eigenschaft

Die finale Ausgestaltung des Fragebogens besteht aus 16 Items im Single-Choice-Format. Jedes Item umfasst einen Attraktor sowie zwei Distraktoren. Hinterlegt ist bezüglich der Wahl der korrekten (1 Punkt) oder falschen (0 Punkte) Antwort eine dichotome Skala. Der Testwert entspricht der Gesamtpunktzahl. Auf Grundlage von Erhebungen in insgesamt fünf finalen Klassen/Kursen der Pilotierung wurden psychometrische Kennzahlen zu diesen Items

bestimmt. Diese Werte basieren auf $N = 84$ vollständig ausgefüllten Fragebögen.

14 der 16 finalen Items liegen innerhalb der von Döring (2023) vorgeschlagenen Grenzen für Itemschwierigkeit und/oder Trennschärfe. Die Items 9 und 15 wurden trotz leichter Unter- oder Überschreitung dieser Grenzen beibehalten, da sie vor allem auf inhaltlich zentrale Aspekte rekurren (curriculare Validität) und zugleich der Vermeidung eines Bodeneffekts dienen können.

Darüber hinaus sind die Items zweistufig gestaltet; bei jedem Item wird zur Ratekorrektur unmittelbar die Antwortsicherheit der Teilnehmenden mit erhoben (vgl. Bitzenbauer, 2020).

Die interne Konsistenz des Fragebogens ergibt sich insgesamt zu $\alpha = 0,80$. Tabelle 2 zeigt psychometrische Kennwerte für alle Items des finalen Fragebogens unter Einbeziehung einer Item-Ratekorrektur.

Tab. 2: Psychometrische Kennzahlen. Strichlinien markieren bevorzugte Bereiche nach Döring (2023) (Itemschwierigkeit: [0,20;0,80], Itemtrennschärfe: [0,30;1,00]).

Item	Schwierigkeit	Trennschärfe
1	0,71	0,60
2	0,61	0,51
3	0,54	0,38
4	0,58	0,50
5	0,57	0,43
6	0,51	0,31
7	0,72	0,40
8	0,22	0,31
9	0,29	0,26
10	0,59	0,30
11	0,67	0,60
12	0,23	0,30
13	0,72	0,52
14	0,68	0,35
15	0,86	0,19
16	0,48	0,41
Durchschnitt	0,56	0,40

3.2.6. Testgütekriterien

Tabelle 3 zeigt eine Zusammenstellung zum Nachweis der Testgütekriterien des Fragebogens zum deklarativen Wissen. Korrelationskoeffizienten zur Sicherstellung der Kriteriumsvalidität basieren auf Antworten und Angaben der gleichen Stichprobe.

Die Expertenvalidierung ist zum Zeitpunkt der Einreichung des Beitrages noch nicht abgeschlossen. Es zeichnet sich jedoch auch hier, basierend auf den vorläufigen Daten, eine Bestätigung der Validität auf dieser Ebene ab.

Tab. 3: Zusammenfassung der Testgütekriterien.

Kriterium	Fragebogen zum deklarativen Wissen
Objektivität	geschlossene Form ✓
Reliabilität	$\alpha = 0,8$ ✓
Validität	Inhaltvalidität global (✓) <i>Lautes Denken + Expertenvalidierung</i>
	Inhaltvalidität auf Itemebene ✓ <i>Lautes Denken</i>
	Kriteriumsvalidität ✓ <i>Punktzahl - Note:</i> $r = 0,59, p < 0,001$ <i>Punktzahl - Interesse an Quantenphysik:</i> $r = 0,44, p < 0,001$
	curriculare Validität ✓ <i>Orientierung am Stoffverteilungsplan</i>

3.3. Testinstrument zu quantenphysikalischen Vorstellungen und Denkweisen

Zur Beantwortung von FF2 kommt unter anderem ein geschlossener Fragebogen für Schülerinnen und Schüler mit fünfstufiger Ratingskala zum Einsatz. Dieser Fragebogen wird bezüglich Zielstellung, Ansatz, Entwicklung und Validierung im Folgenden kurz vorgestellt.

3.3.1. Zielstellung

Mithilfe des Fragebogens sollen Einblicke in den Umfang quantenphysikalisch geprägter Vorstellungen und in das konzeptuelle Verständnis der Schülerinnen und Schüler nach Abschluss des Unterrichts gewonnen werden. Die Ergebnisse dieses Fragebogens werden durch begleitende leitfadensbasierte Interviews im Rahmen der Hauptstudie trianguliert.

3.3.2. Ansatz des Fragebogens

Der Vorstellungsfragebogen orientiert sich an Müller (2003) und Bitzenbauer (2020) und besitzt in seiner finalen Form zwölf Items, die jeweils eine physikalische Aussage treffen. Diese Aussagen sind jeweils entweder geprägt von einer quantenphysikalischen oder einer klassischen Denkweise. Anhand der Ratingskala kann jeder Aussage auf fünf Stufen zugestimmt, eine neutrale Haltung eingenommen, oder sie abgelehnt werden.

Jedes Item hat, entsprechend der sich aus dem Lehrkonzept ergebenden Relevanz, eine Wichtung hinterlegt (einfach oder doppelt gewichtet). Zudem besitzt jedes Item ein hinterlegtes Vorzeichen, entsprechend seiner inhaltlichen Ausrichtung:

- positiv (+) entspricht einer quantenphysikalisch adäquaten Denkweise
- negativ (−) entspricht nicht einer quantenphysikalisch adäquaten Denkweise

Damit ergibt sich für jedes Item i ein Gewichtungsfaktor $g_i \in \{-2, -1, +1, +2\}$.

Bezeichnet man für jedes Item i die von den Teilnehmenden gewählte Bewertung mit v_i ($v_i \in \{1, \dots, 5\}$), dann lässt sich für jeden vollständig ausgefüllten Fragebogen ein Gesamtvorstellungsindex entsprechend

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n g_i \cdot 50(v_i - 3)}{\sum_{i=1}^n |g_i|} \quad \{1\}$$

mit $C \in [-100, +100]$ berechnen.

Dabei laufen für $C = -100$ alle Antworten der quantenphysikalisch adäquaten Denkweise völlig zu wider, 0 bezeichnet eine indifferente Haltung, und für $C = 100$ entsprechen alle Antworten vollkommen einer adäquaten quantenphysikalischen Denkweise.

3.3.3. Entwicklungsschritte

Grundlage für den Fragebogen waren die Vorstellungsfragebögen von Müller (2003) und Bitzenbauer (2020).

Darauf aufbauend wurde der Fragebogen methodologisch linear entsprechend der folgenden Vorgehensweise entwickelt:

- 1) Konzeptmodell festlegen
- 2) Entwicklung einer vorläufigen Testversion
- 3) Validierungsinterviews I
- 4) Überarbeitung
- 5) Validierungsinterviews II
- 6) Überarbeitung
- 7) Expertenvalidierung

Ein Kurzüberblick zum Konzeptmodell sowie zur zweiten Runde der Validierungsinterviews werden im Folgenden gegeben.

3.3.4. Konzeptmodell

Die Items wurden inhaltlich auf das Curriculum des Lehrkonzeptes abgestimmt. Der Vorstellungsfragebogen ist damit domänenspezifisch im Kontext des Lehrkonzeptes. Insbesondere werden Vorstellungen zu den dort vorgestellten Wesenszügen, sowie zum Grundprinzip des Indeterminismus erfasst. Darüber hinaus sind Aspekte zur Dekohärenz eingeschlossen. Abbildung 1 zeigt einen Überblick zu den entsprechenden Konzepten.

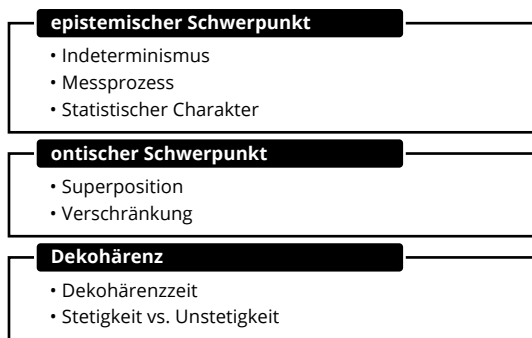


Abb. 1: Konzepte im Vorstellungsfragebogen.

3.3.5. Validierungsinterviews

Zur Validierung des Fragebogens wurden, ergänzend zum Vorgehen von Müller (2003) und Bitzenbauer (2020), leitfadensbasierte Einzelinterviews geführt.

Jedem Item des Vorstellungsfragebogens ist in diesen Interviews eine entsprechende Frage im Interviewleitfaden zugeordnet. Die Antwort der Teilnehmenden im Interview wurde fünfstufig ordinalskaliert kodiert (adäquate ... inadäquate Vorstellungsmuster). Damit kann die Kodierung der Interviewantwort mit der Antwort der Teilnehmenden zur entsprechenden Frage im Fragebogen numerisch in Beziehung gesetzt werden. Unter Beibehaltung der Gewichtungsfaktoren aus dem Fragebogen kann damit ein Vorstellungsindex aus den Interviews $C_{\text{Interview}}$ ermittelt werden, der probandenweise mit dem Ergebnis des Fragebogens $C_{\text{Fragebogen}}$ verglichen werden kann.

Es fanden zwei solcher Interviewrunden statt. Die finale Interviewrunde umfasste $N = 10$ Schülerinnen und Schüler aus einem Pilotunterricht, welche zunächst den Fragebogen ausgefüllt und unmittelbar im Anschluss am Validierungsinterview teilgenommen haben.

Die Interviews wurden vollständig durch einen unabhängigen Rater zweitcodiert, es ergab sich $\kappa = 0,76$. Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse.

Tab. 4: Ergebnisse bei den Validierungsinterviews II.

Probanden-Nr.	$C_{\text{Fragebogen}}$	$C_{\text{Interview}}$
1	76	68
2	68	58
3	34	21
4	42	42
5	53	37
6	29	21
7	89	82
8	42	66
9	50	87
10	-3	-16

Ein graphischer Vergleich ist im Streudiagramm in Abbildung 2 zu sehen.

Man erkennt, dass ein höherer Vorstellungsindex basierend auf Fragebogenantworten ebenfalls mit einem höheren Vorstellungsindex basierend auf Interviewantworten einhergeht. Damit kann die Annahme getroffen werden, dass der Vorstellungsfragebogen grundsätzliche Tendenzen im Gesamtvorstellungsindex ähnlich zuverlässig wie das Interview nachweisen kann.

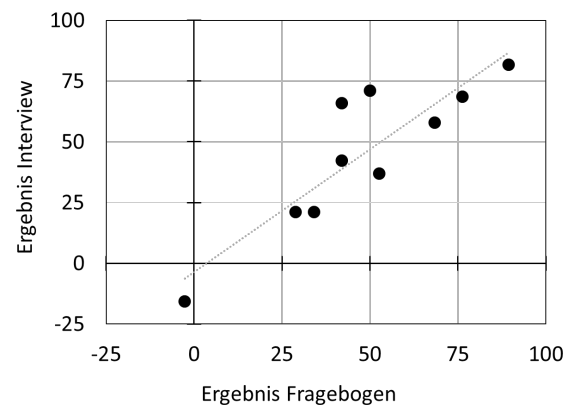


Abb. 2: Streudiagramm zu den probandenbezogenen Gesamtvorstellungsindizes aus Vorstellungsfragebogen und Validierungsinterviews II.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Zur Evaluierung des Lernerfolgs durch das entwickelte Lehrkonzept und -material zur Quantenphysik in Klassenstufe 9 kommen unter anderem zwei Testinstrumente zum Einsatz, deren Entwicklung im Rahmen dieses Beitrages skizziert wurde.

Auf Grundlage des entwickelten Curriculums sowie zahlreicher Schritte zur Entwicklung und Analyse der Testinstrumente konnte deren grundsätzliche Eignung für den Einsatz im Rahmen einer summativen Evaluierung nachgewiesen werden.

Im Vergleich zum Interview geht beim Vorstellungsfragebogen durch die Reduktion von Vorstellungsmustern und Denkweisen auf ein numerisches Maß ein Großteil der Informationen und der damit verbundenen Interpretationsmöglichkeiten verloren. Darum werden ergänzend zum Vorstellungsfragebogen in

der Hauptstudie leitfadensbasierte Interviews zur Triangulation stichprobenartig durchgeführt.

Die Hauptstudie zur summativen Evaluation findet im Schuljahr 2023/24 in Zusammenarbeit mit zahlreichen Schulen in Deutschland sowie einiger internationaler Partnerschulen statt.

Zur Sicherstellung externer Validität der Studie findet diese als Feldstudie unter realen Bedingungen statt. Lehrkräfte unterrichten im Zuge dieser Studie das Lehrkonzept wissenschaftlich begleitet, aber selbstständig. Zur Sicherstellung interner Validität durchliefen alle teilnehmenden Lehrkräfte eine vorgelagerte Lehrkräftefortbildung.

Eine mittlere dreistellige Zahl von Schülerinnen und Schülern wird so nach dem Lehrkonzept unterrichtet. Die Evaluation im Mixed-Method-Design untersucht abschließend die beschriebenen kognitiven Lernendenmerkmale, sowie affektive Effekte des Lehrkonzeptes und Erfahrungen der beteiligten Lehrkräfte.

5. Literatur

- Albert, C., & Pospiech, G. (2023). Quantenphysik in Klasse 9: Ergebnisse einer Akzeptanzbefragung für ein Spin-First-Unterrichtskonzept. *PhyDid B - Didaktik Der Physik - Beiträge Zur DPG-Frühjahrstagung*, 1(1). Abgerufen von <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1370>
- Bitzenbauer, P. (2020). *Quantenoptik an Schulen. Studie im Mixed-Methods Design zur Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik*. Logos Verlag.
- Bühner, M. (2010). *Einführung in die Test- und Fragebogenkonstruktion* (PS Psychologie, 2., aktualisierte und erw. Aufl., [Nachdr.]. München: Pearson Studium.
- Döring, N. (2023). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften* (6., vollst. überarb., akt. u. erw. Auflage 2023). Berlin: Springer Berlin; Springer.
- Flateby, T. L. (2013). *A Guide for Writing and Improving Achievement Tests*, University of South Florida. Verfügbar unter: https://www.academia.edu/27786842/A_Guide_for_Writing_and_Improving_Achievement_Tests
- Jonkisz, E., Moosbrugger, H. & Brandt, H. (2011). Planung und Entwicklung von Tests und Fragebogen. In H. Moosbrugger & A. Kelava (Hrsg.), *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion* (Springer-Lehrbuch, 2. Aufl. 2012, S. 27–74). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20072-4_3
- Knoblich, G. & Öllinger, M. (2006). Die Methode des lauten Denkens. In J. Funke & P. A. Frensch (Hrsg.), *Handbuch Allgemeine Psychologie - Kognition* (Handwörterbuch der Psychologie, S. 691–696). Göttingen: Hogrefe.
- Körhasan, N. D. & Miller, K. (2020). Students' mental models of wave-particle duality. *Canadian Journal of Physics*, 98(3), 266–273. <https://doi.org/10.1139/cjp-2019-0019>
- Küblbeck, J. & Müller, R. (2007). *Die Wesenszüge der Quantenphysik. Modelle, Bilder, Experimente* (3., unveränd. Aufl.). Aulis-Verl.
- Lenke, G., Thillmann, H., Wirth, J., Dicke, T. & Leutner, D. (2015). Pädagogisch-psychologisches Professionswissen von Lehrkräften: Evaluation des ProwiN-Tests. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 18(2), 225–245. <https://doi.org/10.1007/s11618-015-0627-5>
- Mayring, P. (2010). *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken* (11., aktual. und überarb. Aufl.). Beltz (Pädagogik).
- Michellini, M. & Stefanel, A. (2022). *Research based studies on learning quantum physics*, University of Udine.
- Müller, R. (2005). *Qualitative Quantenphysik. Eine Handreichung für die Sekundarstufe I*, IPN Kiel.
- Müller, R. (2016). Quanteninformation. Ein neues Paradigma für den Quantenphysik-Unterricht? *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, 65 (1), S. 4.
- Müller, R. & Heusler, S. (2023). Schulische Zugänge mit den Wesenszügen der Quantenphysik und didaktische Potenziale. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 198, S. 2.
- Riese, J. & Reinhold, P. (2014). Entwicklung eines Leistungstests für fachdidaktisches Wissen. In I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (Springer eBook Collection, S. 257–267). Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Sadaghiani, H. R. (2016). Spin First vs. Position First instructional approaches to teaching introductory quantum mechanics. In *2016 Physics Education Research Conference Proceedings* (S. 292–295). American Association of Physics Teachers.
- Schmiemann, P. & Lücken, M. (2014). Validität – Misst mein Test, was er soll? In I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (Springer eBook Collection, S. 107–118). Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Schnell, C. (2016). „Lautes Denken“ als qualitative Methode zur Untersuchung der Validität von Testitems. Erkenntnisse einer Studie zur Diagnose des ökonomischen Fachwissens von Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe I. *Zeitschrift für ökonomische Bildung*, 2016(5), 26–49. <https://doi.org/10.7808/0502>
- Stadermann, H. K. E.; van den Berg, E. & Goedhart, M. J. (2019). Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic. *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.*, 15 (1), S. 10130. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010130>

Experimental and Theoretical Analysis of Quantum Computing

Philipp Schöneberg¹, Hans-Otto Carmesin^{1,2,3}, Phil Gustke¹ and Jannes Ruder¹

¹Gymnasium Athenaeum, Harsefelder Straße 40, 21620 Stade

²Studienseminar Stade, Bahnhofstr. 5, 21682 Stade

³Universität Bremen, Fachbereich 1, Postfach 330440, 28334 Bremen
hans-otto.carmesin@t-online.de

Kurzfassung

Innerhalb der Jugend forscht AG unserer Schule sowie einem Kurs über Quantengravitation lernten wir die fundamentalen Konzepte von Quantencomputern theoretisch kennen und entwickelten darauf aufbauend demonstrative Experimente. In diesem Artikel erklären und demonstrieren wir ein universelles Set bestehend aus essenzielle Quantengattern. Des Weiteren zeigen wir darauf aufbauend zwei bekannte Quantenalgorithmien und präsentieren eine Möglichkeit zum Vervielfachen der allgemeinen Rechengeschwindigkeit von Quantencomputern.

Abstract

In a student research club, we explain elemental concepts of quantum computing with theory and experiments. For it, we demonstrate multiple fundamental quantum gates. These quantum gates result in a valuable universal set. By using this set, we derive two known algorithms showing quantum supremacy. Moreover, we present and discuss an opportunity to multiply the calculation speed of quantum computing.

1. Introduction

Since the production of the first computer humans have tried to achieve continuous growth in terms of efficiency. Hereby, transistors are often used as an indicator due to their functionality. In 1965 Gordon Moore noticed a doubling of the number of transistors inside newly published computer chips in a time interval of one to two years (Moore, 1965) which is often realized by downsizing. However, an end of this trend is suspected due to physical limitations like the size of an atom. Therefore, the focus started to shift towards new technologies like quantum computers. In a student research club, we try to understand the complexity of this topic by developing functional demonstration experiments of quantum computing. In particular, we decided to focus on the technology of quantum computers based on light because of their leading efficiency (Madsen, et al., 2022). Furthermore, we even discovered a way to multiply the speed of processing inside a quantum computer by transferring the idea of multiplexing from the data transfer into the processing of optical computers including quantum computers based on light. Moreover, we learn about algorithms which have been used to demonstrate quantum supremacy in the past (Deutsch and Jozsa, 1992). To illustrate these, we employ exemplary calculations and verify these with adequate simulations.

1.1. Universal Set

To understand quantum computing completely we wanted our demonstration experiments to explain the most fundamental way of processing inside a quantum computer. This is the processing of qubits and mathematically known as unitary operations. They are realized by quantum gates. To be able to achieve every possible unitary operation we use a universal set of quantum gates. Mathematically this could be achieved by the set {C-NOT, single-qubit gate} (De_Ro, 2021). Yet it is physically impossible to realize a universal and precise single-qubit gate which would be able to convert a qubit in every possible way (Circuit Library, 2023). Therefore, we use the Set {C-NOT, H, T} approximating a universal Set (De_Ro, 2021).

1.2. Materials

For our experiments we are mainly using a laser with a wavelength of 650nm. Yet in some experiments requiring a second laser we additionally use a laser with a wavelength of 520nm.

1.3. Qubits

Based on the usage of the C-NOT gate as the only multiple qubit gate of our universal set, we need to realize a minimum of two qubits. We decided to use the linear polarization of the light as the first qubit defining it being vertically polarized as $|0\rangle$ and it being horizontally polarized as $|1\rangle$. This qubit will also be used as the controlling qubit inside the C-NOT gate.

Therefore, the second qubit will only have to show an inversion in some of the cases in the C-NOT gate. For this reason, we decided to simply use an asymmetry of our laser creating a diagonal oval as a representation of the second Qubit. Thereby, it being antidiagonally oriented from the bottom left to the top right will be defined as $|0\rangle$ whereas it being diagonally oriented from the bottom right to the top left will be defined as $|1\rangle$.

2. Experiments

2.1. C-NOT Gate

The C-NOT gate (CX gate) in optical quantum computers is characterized by using the correlation between a control and a target qubit to control the inversion of the target qubit. The crucial point here is that the C-NOT gate entangles the states of the qubits, thus, enabling complex quantum operations that are not realizable in classical systems. We have achieved this by guiding a laser beam, realizing the two previously described qubits, through an optical circuit. Inspired by an existing C-NOT realization (Lopez, et al., 2018), we designed the following setup (see fig. 1).

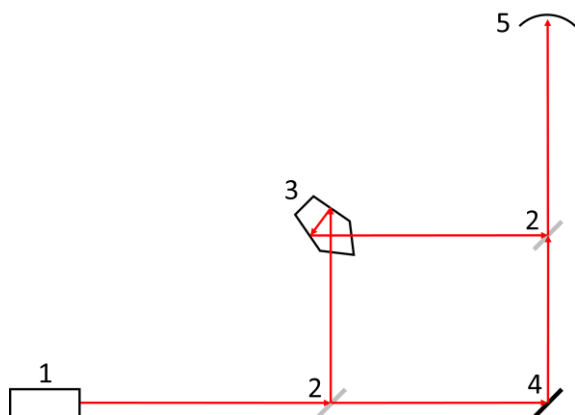


Fig. 1: Schematic experimental setup of the C-NOT gate demonstration: 1. laser, 2. polarizing beamsplitter, 3. pentaprism, 4. mirror, 5. detector

The first polarizing beamsplitter reflects or transmits the beam depending on the state of the control qubit, being the polarization. In our case, the beamsplitter transmits horizontally polarized light, while vertically polarized light is reflected. The pentaprism reflects the asymmetry of our laser, used as the second qubit, twice and thus ensures a double inversion of the target qubit. Therefore, the target qubit does not change. The mirror reflects the beam, causing the state of the target qubit to be inverted only once. The second polarizing beamsplitter combines the two previously separated light waves.

To verify the general functionality of our demonstration experiment we implemented every combination of basis states and checked if their outcome corresponds to the expected theoretical results (see fig. 2).

Input control qubit	Input target qubit	Resulting control qubit	Resulting target qubit	Corresponding experiment
$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	Fig 3
$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	Fig 4
$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	Fig 5
$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	Fig 6

Fig. 2: A table showing the implemented basis states of each qubit as well as their theoretical outcome and corresponding performed experiments.

However, although this realization works fine for most demonstrative purposes, it cannot demonstrate more complicated functionality like phase kickback yet. This occurs mostly, due to the solely demonstrative nature of the target qubit, briefly realized by the asymmetric orientation of the laser.



Fig. 3: C-NOT experiment realizing the input qubit states through the usage of a vertical polarizer and the rotation of the laser, creating an antidiagonal oval.



Fig. 4: C-NOT experiment realizing the input qubit states through the usage of a vertical polarizer and the rotation of the laser, creating a diagonal oval.

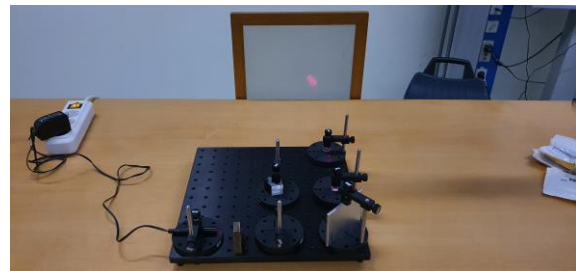


Fig. 5: C-NOT experiment realizing the input qubit states through the usage of a horizontal polarizer and the rotation of the laser, creating an antidiagonal oval.



Fig. 6: C-NOT experiment realizing the input qubit states through the usage of a horizontal polarizer and the rotation of the laser, creating a diagonal oval.

2.2. Single Qubit Gates

To realize single qubit gates for the qubit of polarization, we employ a variety of wave plates. Specifically, we use a half wave plate to realize the Hadamard gate specified in our chosen universal set as well as an NOT gate (X gate) and a Z gate. Well, known by most physicists is the realization of the quantum-NOT gate through rotating a half wave plate by 45° along the optical axis. This function can be experimentally demonstrated by using two linear (vertical) polarizers and placing the rotated half wave plate in between (see fig. 7).

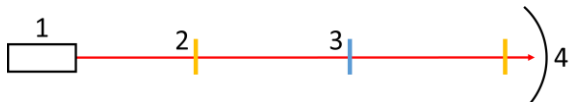


Fig. 7: Schematic experimental setup for the NOT gate demonstration: 1. laser, 2. horizontal polarizer, 3. X gate, 4. detector

Thus, we initialize the polarization qubit of the input beam with a value of $|0\rangle$ and invert its value to $|1\rangle$. Then, by employing the last polarizer as a method to read out the qubit's value, we show that the intensity of the light beam hitting the detector is approximately 0lx and the linear polarization has been inverted (see fig. 8).

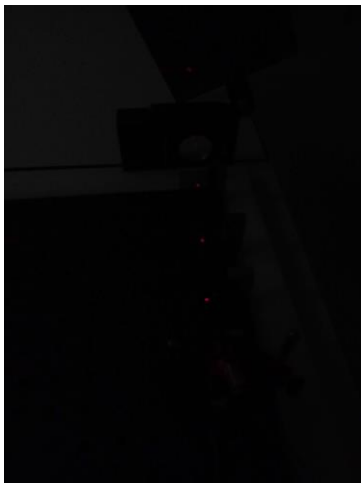


Fig. 8: Realization of the experimental setup in fig. 7 with a diverging lens added before the detector. The point on the detector is barely visible to the naked eye.

On the other hand, the T gate has not been realized due to the lack of accessible material. Nevertheless, we propose a method for realizing a T gate by employing a $\frac{\lambda}{8}$ wave plate that has been rotated by 0° degrees. Luckily, the T gate is quite similar to the Z gate regarding their same rotation angle around the optical axis. Due to this similarity, one can imagine the Z gate as a kind of replacement for the missing T gate for demonstrative purposes. This works especially well, because the Z gate can be used to replace the T gates in our exemplary calculations regarding the quantum algorithms.

Realizing a Z gate can be done by employing a half wave plate rotated by 0° around the optical axis, while the Hadamard gate is realized by using a half wave plate that is rotated by 22.5° . To demonstrate these gates experimentally, we employ the same method as we have with the X gate, although in this instance we realize the NOT operation through the sequence of gates: Hadamard gate, Z gate, Hadamard gate (Qiskit Textbook, 2024) (see fig. 9).



Fig. 9: Schematic experimental setup for the Hadamard and Z gate demonstration: 1. laser, 2. horizontal polarizer, 3. Hadamard gate, 4. Z gate, 5. detector

Therefore, by placing the half wave plates in the given order we transform the polarization qubit form $|0\rangle$ to $|+\rangle$ to $|-\rangle$ to $|1\rangle$ and thus, demonstrate the Hadamard and Z gates in the same fashion as the X gate (see fig. 10).

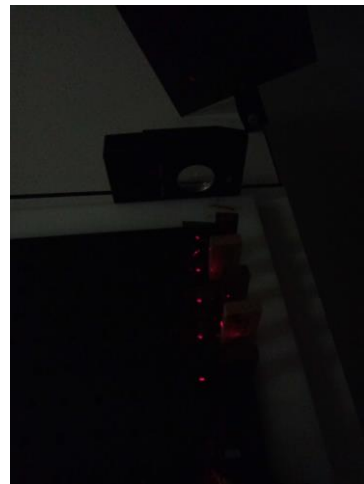


Fig. 10: Realization of the experimental setup in fig. 9 with a scattering lens added before the detector. The point on the detector is barely visible to the naked eye.

2.3. Multiplexing

During our research on the C-NOT gate, we had the idea to transfer the technology of multiplexing, known from data transfer to data processing in optical

computers. Specifically, we focused on wavelength-based multiplexing. This is characterized by increasing the parallelism of a light-based systems by superimposing photons of different wavelengths. The crucial point here is that these superimposed photons do not interfere with each other and can be processed simultaneously in optical circuits. Thus, the bandwidth of data that such a computer can process simultaneously can be drastically multiplied.

To prove that the light beams do not influence each other during data processing through superposition, we utilized our existing setup of the C-NOT gate. We intersected the different laser beams multiple times within the gate (see fig. 11).

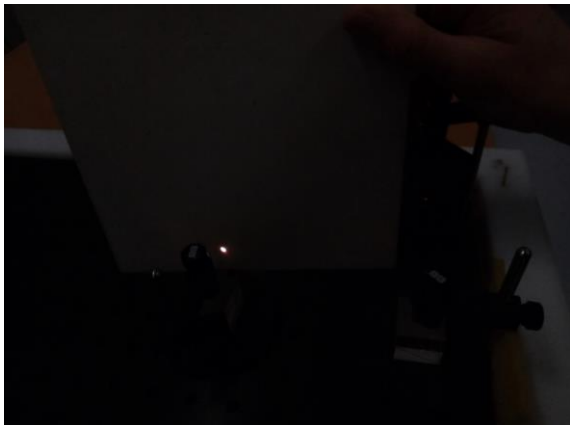


Fig. 11: Intersection of the two laser beams between the pentaprism and the second beamsplitter.

During this process, we observed continued complete and accurate data processing of the individual qubits, implemented through the different laser beams (see fig. 12).

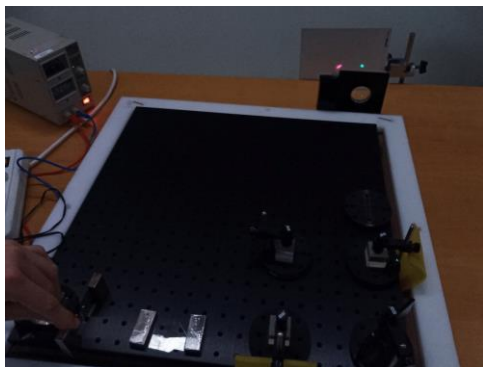


Fig 12: C-NOT experiment realizing the input qubit states $|0\rangle$ and $|0\rangle$ in the red laser as well as $|1\rangle$ and $|0\rangle$ in the green laser. The qubits implemented in the red laser are realized by the usage of a vertical polarizer and the rotation of the laser, creating an antidiagonal oval. The ones in the green laser are realized by the usage of a horizontal polarizer and a rotation of the laser creating an antidiagonal oval as well.

Another possible implementation of wavelength-based multiplexing can be achieved by cleverly superimposing multiple lasers. The lasers are

superimposed using a combination of collecting and scattering lenses. Subsequently, the combined beam is sent through an optical circuit (see fig. 13).

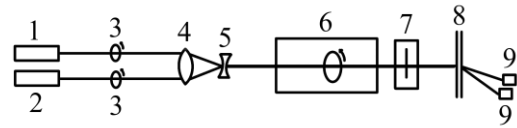


Fig. 13: Exemplary optical setup to use wavelength-based multiplexing for optical computation: 1. laser of wavelength a, 2. laser of wavelength b, 3. wave plate to initialize input state of the given qubit, 4. collecting lens, 5. scattering lens, 6. optical operation, 7. polarizer for measurement, 8. optical lattice, 9. intensity measurement device

Afterwards, a measurement is performed using a polarizer, which changes the intensity depending on the polarization. Finally, the combined beam is split again according to the wavelength of the individual components, and the individual states are determined using intensity measurement devices.

3. Calculations and Simulations

To emphasize the applicability of our universal set, we decided to illustratively calculate two exemplary quantum algorithms. Therefore, we solely use the gates contained in our chosen universal set, except for the Z gate. We have decided to use the Z gate in the following calculations because it is a gate we have experimentally realized, and it can be easily transferred to our universal set by replacing it with a sequence of four T gates. Thus, the connection of experiments and theoretic calculations becomes much clearer.

3.1. Deutsch-Jozsa Algorithm

The Deutsch-Jozsa algorithm is an algorithm to categorize a binary function into either constant or balanced. Herby the algorithm only needs to run once and implies a constant function through returning the measured qubit in the state $|1\rangle$ and a balanced function by returning it in the state $|0\rangle$.

To understand the Deutsch-Jozsa algorithm we focus on its simplest form using only two qubits. Its then called the Deutsch algorithm and consists of three Hadamard gates and one oracle arranged as follows (see fig. 14):

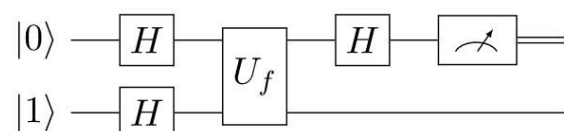


Fig. 14: A diagram of the circuit representing the Deutsch algorithm.

Thereby, the oracle represents the function. In our case we just use a C-NOT gate as an oracle because it is equivalent to a balanced function (see fig 15).

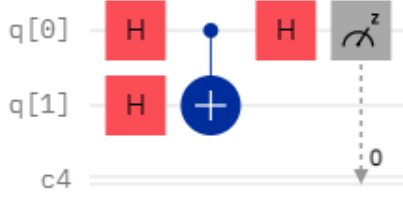


Fig. 15: A diagram of the circuit representing the modified Deutsch algorithm.

To show that the Deutsch algorithm works with our universal set we start calculating this version of the algorithm by initializing the two qubits: Qubit $|q_0\rangle$ as $|0\rangle$ and qubit $|q_1\rangle$ as $|1\rangle$ (see equation {1} and {2}).

$$|q_0\rangle = |0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \{1\}$$

$$|q_1\rangle = |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \{2\}$$

Now we connect the two qubits with each other through the usage of the Kronecker product (see equation {3}).

$$\begin{aligned} |q_0q_1\rangle &= |q_1\rangle \otimes |q_0\rangle = |1\rangle \otimes |0\rangle \\ &= \begin{pmatrix} 0 \cdot 1 \\ 0 \cdot 0 \\ 1 \cdot 1 \\ 1 \cdot 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \{3\} \end{aligned}$$

Subsequently, we apply a Hadamard gate to both qubits (see equation {4}).

$$\begin{aligned} &H_{q_0,q_01} \cdot |q_0q_1\rangle \\ &= \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad \{4\} \end{aligned}$$

Next, we use the C-NOT gate to modify the qubits through the function (see equation {5}).

$$\begin{aligned} &CX_{q_0,q_01} \cdot |q_0q_1\rangle \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad \{5\} \end{aligned}$$

Afterwards we apply another Hadamard gate to the first qubit so that it can be measured in the next step (see equation {6}).

$$\begin{aligned} &H_{q_0} \cdot |q_0q_1\rangle \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \\ &= |1-\rangle \quad \{6\} \end{aligned}$$

Finally, we notice that the measured first qubit changed. This is due to the phase kickback inside the C-NOT gate (Lee and Selby, 2016). Thereby, it being $|1\rangle$ verifies the used C-NOT gate as a balanced function. A simulation we programmed using qiskit libraries in python verifies this result (see fig. 16 and 17).

```
#Initialisierung importieren
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

#Qiskit importieren
from qiskit import *
from qiskit.tools import job_monitor
from qiskit.quantum_info import Statevector
from qiskit_ibm_runtime import QiskitRuntimeService
from qiskit_ibm_runtime import Sampler

#Visualisierungshilfen importieren
from qiskit.visualization import plot_histogram
from qiskit.visualization import plot_bloch_vector
from qiskit.visualization import plot_bloch_multivector
from qiskit.visualization import plot_histogram
from qiskit_textbook.tools import vector2latex
from qiskit.visualization import plot_distribution

#Hadamard-Gatter auf alle Qubits
def initialize(qc, qubits):
    for q in qubits:
        qc.h(q)
    return qc

#Simulation
def simulate_state_vector(qc):
    state = Statevector(qc)
    return state
```

Fig. 16: Verification of our calculation of the Deutsch algorithm using qiskit libraries for python with jupyter notebook.

```

#Erstellen von Quantenschaltung mit 2 Qubits
n = 1
deutsch_circuit = QuantumCircuit(n+1, n)

#Umkehrung des Kontrollqubits
#von Zustand |0> auf |1>
deutsch_circuit.h(1)
deutsch_circuit.z(1)
deutsch_circuit.h(1)

<qiskit.circuit.instructionset.InstructionSet at 0x13f3>

#Initialisierung
deutsch_circuit = initialize(deutsch_circuit, [0,1])

# Oracle
deutsch_circuit.cx(0,1)

<qiskit.circuit.instructionset.InstructionSet at 0x13f7>

#Hadamard-Gatter auf Zielqubit
deutsch_circuit.h(0)
#doppelte Anwendung des Hadamards
#ist theoretisch obsolete,
#aber zu Demonstrationszwecken
#erhalten geblieben

<qiskit.circuit.instructionset.InstructionSet at 0x13f3>

#Visualisierung Zustandsvektor
vector2latex(simulate_state_vector(deutsch_circuit),
             pretext="\\psi\\rangle =")
    
```

$$|\psi\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.70711 \\ 0 \\ -0.70711 \end{bmatrix}$$

Fig. 17: Verification of our calculation of the Deutsch algorithm using qiskit libraries for python with jupyter notebook.

3.2. Grover's algorithm

The Grover algorithm is a quantum search algorithm that can be interpreted as searching for specific items from a given list. It consists of an initialization in a uniform superposition, an oracle representing the function selecting the search result and the diffusion operator amplifying the search result for effective measurement.

In its simplest form with two qubits, while still featuring our chosen universal set, the algorithm can be written as follows (see fig. 18).

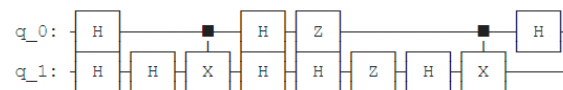


Fig. 18: Schematic quantum circuit for our exemplary version of the Grover algorithm for two qubits.

In this instance, the oracle is selecting the $|11\rangle$ state and is derived from a simple realization by the qiskit textbook (Qiskit Textbook, 2024). Gates like the CZ gate have been replaced with the sequence: Hadamard gate, cx gate, Hadamard gate to feature our universal set. Moreover, we algebraically calculate the algorithm step by step and verify the outcome with a qiskit simulation.

Firstly, we initialize both qubits in the $|0\rangle$ state and connect them via Kronecker product (see equation 7).

$$|q_0q_1\rangle = |q_1\rangle \otimes |q_0\rangle = |0\rangle \otimes |0\rangle = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \{7\}$$

Then, we apply the Hadamard operation to both qubits to achieve a uniform superposition of $|++\rangle$ (see equation 8).

$$H_{q_0,q_01} \cdot |q_0q_1\rangle = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \end{pmatrix} \{8\}$$

Thirdly, we require the oracle consisting of a CZ gate. Therefore, we replace it with a sequence of our chosen gates and apply those to calculate the operation (see equation 9-12).

$$H_{q_1} CX_{q_0,q_01} H_{q_1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} = CZ_{q_0q_01} \{9\}$$

$$H_{q_1} \cdot |q_0q_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \{10\}$$

$$CX_{q_0,q_01} \cdot |q_0q_1\rangle = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad \{11\}$$

$$H_{q_1} \cdot |q_0q_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad \{12\}$$

Next, we want to apply the general diffusion operator for the two qubit Grover's algorithm. To achieve this, we start by applying two Hadamard operations (see equation 13).

$$\begin{aligned} & H_{q_0,q_01} \cdot |q_0q_1\rangle \\ &= \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad \{13\} \end{aligned}$$

Now, we replace the following necessary matrix with a sequence of our chosen gates and apply those to the exemplary calculation (see equation 14-17).

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \\ &= Z_{q_0,q_01} CZ_{q_0,q_01} = Z_{q_0,q_01} H_{q_1} CX_{q_0,q_01} H_{q_1} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \\ & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \{14\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{q_0,q_01} \cdot |q_0q_1\rangle &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad \{15\} \end{aligned}$$

$$H_{q_1} \cdot |q_0q_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 \end{pmatrix} \quad \{16\}$$

$$\begin{aligned} & CX_{q_0,q_01} \cdot |q_0q_1\rangle \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad \{17\} \end{aligned}$$

Lastly, we need to again apply two Hadamard operations. However, since we would now apply two Hadamard operations to the first qubit, we can ignore those, because the Hadamard operation is a self-inverse matrix. Thus, we only apply a Hadamard operation to the second qubit to finish our calculations (see equation 17).

$$\begin{aligned} & H_{q_1} \cdot |q_0q_1\rangle \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = |11\rangle \quad \{18\} \end{aligned}$$

Finally, we verify our solution with the following qiskit simulation (see fig. 19 and 20).

```

#Initialisierung importieren
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

#Qiskit importieren
from qiskit import *
from qiskit.tools import job_monitor
from qiskit.quantum_info import Statevector
from qiskit_ibm_runtime import QiskitRuntimeService
from qiskit_ibm_runtime import Sampler

#Visualisierungshilfen importieren
from qiskit.visualization import plot_histogram
from qiskit.visualization import plot_bloch_vector
from qiskit.visualization import plot_bloch_multivector
from qiskit.visualization import plot_histogram
from qiskit_textbook.tools import vector2latex
from qiskit.visualization import plot_distribution

#Erstellen von Quantenschaltung mit 2 Qubits
n = 2
grover_circuit = QuantumCircuit(n)

#Hadamard-Gatter auf alle Qubits
def initialize(qc, qubits):
    for q in qubits:
        qc.h(q)
    return qc

```

Fig. 19: Verification of our calculation of the Grover algorithm using qiskit libraries for python with jupyter notebook.

```

#Simulation
def simulate_state_vector(qc):
    state = Statevector(qc)
    return state

#Initialisierung in uniformer Superposition
grover_circuit = initialize(grover_circuit, [0,1])

# Oracle für |11>
grover_circuit.h(1)
grover_circuit.cx(0,1)
grover_circuit.h(1)

<qiskit.circuit.instructionset.InstructionSet at 0x15cf...

# Diffusion Operator
grover_circuit.h([0,1])
grover_circuit.z([0,1])
grover_circuit.h(1)
grover_circuit.cx(0,1)
grover_circuit.h(0)

<qiskit.circuit.instructionset.InstructionSet at 0x15cf...

#Visualisierung Zustandsvektor
vector2latex(simulate_state_vector(grover_circuit),
             pretext="\\psi\\rangle =")

```

$$|\psi\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Fig. 20: Verification of our calculation of the Grover algorithm using qiskit libraries for python with jupyter notebook.

4. Results

In our experiments we have realized the C-NOT and Hadamard gate of our universal set. Additionally, we were able to demonstrate the X- and Z gate. Thereby, the Z gate could also be used within the calculation of the algorithms as a replacement of the T gate. Furthermore, we discovered a great possibility to increase the

processing speed of light-based computers through the usage of multiplexing. Moreover, we were able to show the functionality of the Deutsch-Jozsa as well as Grover algorithm mathematically and through simulations, while working in the confines of our universal set. Hence, we gained a detailed understanding of the functionality of quantum computers and their hardware as well as software.

5. Discussion

Obviously, our experimental demonstrations do not quite work as a complete and functioning implementation of a quantum computer yet, especially due to the solely demonstrative nature of our CX gate and the missing implementation of a T gate.

Nevertheless, using the orbital angular momentum of light as a second qubit, we are currently trying to realize the complete universal set of gates. Firstly, we are employing the C-NOT-realization from Lopez (Lopez, et al., 2018) in combination with an oam-Hadamard gate (Xinbing Song, et al., 2020) to eventually implement a swap gate (Qiskit Textbook, 2024). Combining this with our proposed solution for a T gate and the given Hadamard gate-realization, the entire universal set can be physically realized.

Moreover, we are currently working on a physical realization of the Deutsch algorithm solely using this universal set and the materials mentioned above.

In a nutshell, our experiments and calculations have helped us to greatly improve our understanding of quantum computers in all areas and even let us apply the gained knowledge in a practical way. It especially helps us to connect abstract mathematics and theory with their physical implementation and thus provides a more thorough picture of the field. The experiments are simple and visually appealing, while still conveying the essential concepts of quantum computing.

Additionally, while the costs for the C-NOT gate realization might be a lot for most schools and some universities, the demonstration experiments for the single qubit gates solely require polarizer and half wave plate foil. Thus, the costs come out to be in the low double-digit area making the experiments easily and cheaply replicable.

6. Literature

Qiskit Textbook: <https://github.com/Qiskit/textbook>
(Stand: 8/2024)

Lee, Ciarán M; Selby, John H (2016): Generalised phase kick-back: the structure of computational algorithms from physical principles. In: New J. Phys. 18 033023, Url: <https://iop-science.iop.org/article/10.1088/1367-2630/18/3/033023/meta>

(Stand: 8/2024)

Circuit Library: https://qiskit.org/documentation/stable/0.19/apidoc/circuit_library.html

(Stand: 3/2023)

De_Ro, Nicolas (2021): Universal Sets of Gates in Quantum Computing. In: ResearchGate, Url: https://www.researchgate.net/publication/357768824_Universal_Sets_of_Gates_in_Quantum_Computing

(Stand: 8/2024)

Deutsch, David; Jozsa, Richard (1992): Rapid solution of problems by quantum computation. In: Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, p. 553-558, Url: <https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rspa.1992.0167>

(Stand: 8/2024)

Lopez, J. H.; et al. (2018): Experimental realization of quantum CNOT gate for orbital angular momentum and polarization with linear optical spanners and the rotational frequency shift. In: arXiv:1807.06065, Url: <https://arxiv.org/abs/1807.06065>

(Stand: 8/2024)

Madsen, Lars S; et al. (2022): Quantum computational advantage with a programmable photonic processor. In: Nature, p. 210-214, Url: <https://www.nature.com/articles/s41586-022-04725-x>

(Stand: 8/2024)

Moore, Gordon E. (1965): Cramming more components onto integrated circuits. In: Electronics, Volume 38, Number 8, Url: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4785860>

(Stand: 8/2024)

Xinbing, Song; Yifan, Sun; et al. (2015): Bell's measure and implementing quantum Fourier transform with orbital angular momentum of classical light. In: Scientific Reports, Url: <https://www.nature.com/articles/srep14113>

(Stand: 8/2024)

Acknowledgements

We would like to take this opportunity to thank the Lower Saxony sponsor pool and the Anna and Claus Heinrich Siemens Foundation, whose generous financial support made this project possible in the first place. We would also like to thank Sparkasse for its mediation between us and the foundation.

Quanteninformatik in der Lehrerbildung mit Transfer in den berufsorientierenden Unterricht

Gesche Pospiech*, Moritz Förster*

*Technische Universität Dresden, Professur für Didaktik der Physik
gesche.pospiech@tu-dresden.de, moritz.foerster@tu-dresden.de

Kurzfassung

Quantentechnologien der zweiten Generation gewinnen rasant an Bedeutung. Da aus diesem Grund ein hoher Bedarf an Spezialist:innen in diesem Bereich erwartet wird, sollte das Interesse an diesem Gebiet bereits in der Schule gefördert werden. Lehrkräfte spielen hierbei eine zentrale Rolle. Sie sollten dazu befähigt werden, Schüler:innen in dieses Themengebiet einzuführen, Unterrichtseinheiten zu gestalten und Einblicke in entsprechende berufliche Kontexte geben zu können. Zu diesem Zweck wurde eine universitäre Lehrveranstaltung entwickelt, die neben theoretischen Grundlagen zu Quantentechnologien und Quanteninformatik direkte Erfahrungen im Berufsfeld durch ein didaktisch angeleitetes Industriepraktikum ermöglicht. Basierend auf diesen Einblicken sollen Lehramtsstudierende befähigt werden, berufsorientierende Unterrichtseinheiten zu gestalten. Die Lehrveranstaltung wird mittels leitfadensbasierter Interviews evaluiert. Erste Ergebnisse werden hier präsentiert.

1. Einführung

Quantentechnologien gewinnen unter dem Stichwort „Quantenrevolution 2.0“ in den letzten Jahren massiv an Bedeutung und werden insbesondere im Kontext des Quantencomputers auch in der Öffentlichkeit stark diskutiert (Pospiech, 2021).

Die möglichen Anwendungen gehen aber weit darüber hinaus. Sie umfassen neben den Quantencomputern auch Quantenkryptographie mit der Vision eines Quanteninternets, Quantenmetrologie oder Quantensensorik, deren Bedeutung in zahlreichen Lebensbereichen, darunter medizinischen Anwendungen, stark zunimmt und besonders intensiv im industriellen Kontext beforscht und entwickelt wird.

Damit umfassen die Quantentechnologien ein weites und vor allem auch interdisziplinäres Feld, in dem Aspekte der Informatik (z.B. Quantenalgorithmien oder -kryptographie), physikalische Grundlagen (beispielsweise für die Realisierung von Quantencomputern oder Quantensensoren), ingenieurwissenschaftliche Problemstellungen sowie Kenntnisse aus den verschiedenen Anwendungsgebieten zusammenfließen müssen.

In dem sich hieraus entwickelnden Industriezweig entsteht somit ein erwartbar wachsender Bedarf an spezifisch ausgebildeten Fachkräften. Neben der Deckung des Bedarfs durch Weiterbildung im Beruf sowie durch Studienangebote in den Ingenieurwissenschaften wird es zur ausreichenden Fachkräfterekrutierung notwendig sein, zusätzlich potentiell Interessierten entsprechende berufliche Möglichkeiten aufzuzeigen.

1.1. Motivation

Der absehbare Bedarf an Fachkräften, die bereit und fähig zum Quantendenken sind, das heißt, die mit den quantenspezifischen Charakteristika, die sich von der klassischen Physik grundsätzlich unterscheiden, umgehen und sie zur Problemlösung einsetzen können, erfordert bereits Maßnahmen in der schulischen Bildung (Stifterverband, 2023). Darüber hinaus sollten aber auch die künftigen Nicht-Fachkräfte, zum Beispiel Abiturient:innen, grundsätzlich in der Lage sein, einzuordnen, was die Quantentechnologien prinzipiell leisten können. Dies erfordert ein grundlegendes Verständnis der quantenphysikalischen Prinzipien, um eine Vorstellung davon entwickeln zu können, wie die Quantentechnologien funktionieren. Dabei erscheint für Lernende insbesondere der Bereich der Quanteninformatik interessant, nicht zuletzt auf Grund der Berichterstattung in den Medien und einer starken Präsenz im Internet, beispielsweise auf YouTube. Zudem bietet gerade dieser Bereich der Quantentechnologien die Möglichkeit, den allgemeinbildenden Anspruch und die Berufsorientierung miteinander zu verbinden (Pospiech, 2024).

Zudem kommt Lehrkräften als wichtigen Personen für die Berufsorientierung die Aufgabe zu, ihren Schüler:innen eine entsprechende Orientierung geben zu können (Stifterverband, 2023). Damit müssen Quantentechnologien respektive Quanteninformatik für Lehrkräfte allerdings selbst greifbar werden.

1.2. Zielsetzung

Aus diesen beschriebenen Anforderungen ergibt sich das Ziel, dass Lehrkräfte zum einen direkte Einblicke in die Entwicklung und Nutzung von Quanten-

technologien in Industrie oder Forschungsunternehmen erhalten und so Schüler:innen aus erster Hand berichten können. Zum anderen sollen Lehrkräfte befähigt werden, ausgewählte Aspekte des Berufsfeldes in einem Unterrichtskonzept so umzusetzen, dass ihre Schüler:innen gleichfalls einen authentischen Einblick erhalten und gegebenenfalls motiviert werden, einen entsprechenden Beruf in Betracht zu ziehen.

Die erforderlichen Einblicke und Kenntnisse sollen künftige Lehrkräfte, das heißt Lehramtsstudierende, in einer universitären Lehrveranstaltung erhalten, die die verschiedenen Anforderungen miteinander verknüpft. Ferner soll auch eine entsprechende Lehrkräftefortbildung entwickelt werden.

2. Einordnung in den Forschungsstand

Der Physikunterricht hat sowohl eine allgemeinbildende (Kircher, Girwidz & Häußler, 2022; DPG, 2016) als auch eine berufsorientierende Aufgabe (Mujtaba & Reiss, 2016). Auch wenn in Deutschland im internationalen Vergleich sehr viele Studienanfänger:innen ein MINT-Studium aufnehmen (OECD, 2019), besteht dennoch nach wie vor ein starker Fachkräftebedarf in diesem Bereich (Anger, Betz & Plünnecke, 2024). In den Quantentechnologien, die im Moment rasant wachsen und hochqualifizierte Spezialist:innen aus den unterschiedlichsten Gebieten, wie etwa der Physik, Chemie, Informatik, Elektrotechnik oder Halbleitertechnologien benötigen, möchte man durch besondere Anstrengungen einem Mangel vorbeugen (Krimphove, 2022).

Kurzfristig sind hier berufsbegleitende Qualifizierungsmaßnahmen möglich, aber mittel- und langfristig werden auch grundständig ausgebildete Spezialist:innen auf unterschiedlichen Qualifikationsstufen nötig sein. Ein möglicher Weg besteht darin, Absolvent:innen allgemein- und berufsbildender Schulen auf entsprechende Berufsmöglichkeiten aufmerksam zu machen.

Bei der Entscheidung für eine Ausbildung oder ein Studium spielen nach Aussagen von Abiturient:innen Projektwochen oder persönliche Gespräche mit Lehrkräften eine besonders wichtige Rolle (Risius, Malin, & Flake, 2017). Daher scheint es vielversprechend, Lehrkräfte in die Lage zu versetzen, „Quanten-Projektwochen“ durchzuführen oder den Jugendlichen aus eigener Erfahrung berichten zu können. In beiden Fällen ist ein situierendes und kontextbezogenes Lernen, sei es durch Exkursionen in Unternehmen, an Hochschulen, an Schülerlabore oder Ähnliches von Bedeutung. Solches Lernen, auch außerhalb der Schule, ermöglicht eine direkte Erfahrung und die Begegnung mit Expert:innen und beinhaltet oft in natürlicher Weise auch fächerübergreifende oder interdisziplinäre Sachverhalte (Pospiech et al., 2020).

Hierbei ist zu bedenken, dass in Deutschland Lehramtsstudierende zwar anders als in vielen anderen Ländern zwei Fächer studieren, oft aber nicht bewusst

einen Perspektivwechsel zwischen den Fächern vornehmen können, Gemeinsamkeiten oder Unterschiede nicht erkennen und damit interdisziplinäres Lernen nicht automatisch vorgegeben ist. In dem interdisziplinären Feld der Quanteninformatik besteht für die Studierenden die Gelegenheit, wissenschaftliches Arbeiten und Austausch zwischen unterschiedlichen Wissensgebieten direkt zu erfahren.

Ein anderer Punkt betrifft die wahrgenommene Relevanz der Studieninhalte, hier der Quantentheorie, für Lehramtsstudierende. Diese erscheinen ihnen oft zu weit weg von der Schulrealität, so dass sie ungenügend gelernt werden (Massolt & Borowski, 2020). Dies kann dazu führen, dass in den universitären Vorlesungen eventuell ein moderner Zugang zur Quantenphysik gelehrt wird, in der Schule aber später die traditionellen Inhalte vermittelt werden (Stadermann et al., 2019). Auch wenn noch relativ wenig über das Lernen und Lernschwierigkeiten in der Quanteninformatik bekannt ist, gibt es doch erste Hinweise, dass ein Zugang über Zwei-Zustandssysteme im Allgemeinen, sowie verbunden mit einer Nutzung der Dirac-Notation im Speziellen, auch für Schüler:innen gut gangbar ist (z.B. Albert & Pospiech, 2023; Michelini & Stefanel, 2008; Müller, 2019; Neumann, 2020).

Daher soll in einer spezifisch designten Lehrveranstaltung für Lehramtsstudierende die wahrgenommene Relevanz der Quantentheorie erhöht und die Kompetenz verbessert werden, Schüler:innen über aktuelle Entwicklungen der Quanteninformatik in für die Berufswahl relevanter Weise zu informieren. Gleichzeitig wird eine Modernisierung in dieser Weise auch den Bildungsstandards für die allgemeine Hochschulreife (KMK, 2020) gerecht.

Um Lehrer:innen zu befähigen, authentische Einblicke in Berufsfelder zu geben, ist es zentral, dass sie selbst über solche Einblicke verfügen. Lehrkräften fehlen jedoch in der Regel solche Einblicke in Unternehmen oder Forschungsinstitutionen.

Deshalb wurde in der Vergangenheit an der TU Dresden im Rahmen des Projekts „Lehrer studiert Unternehmen“ (Lein & Pospiech, 2013; Unverricht et al., 2012) in Kooperation von Chemie- und Physikdidaktik ein – nicht themengebundenes – didaktisches Betriebspraktikum in die Lehrkräftebildung integriert, in welchem Studierende zwei Wochen lang in ein Unternehmen oder eine Forschungsinstitution gehen und auf der Basis ihrer Erfahrungen ein Unterrichtskonzept entwickeln.

Dieses wurde positiv evaluiert (Lein, 2014). Daher scheint es naheliegend, diese Form des Industriepraktikums auf die besonderen Anforderungen der Quanteninformatik anzupassen.

3. Das Projekt QUILT

Für den Einsatz im Bereich der Quanteninformatik wird das bestehende Konzept „Lehrer studiert Unternehmen“ adaptiert.

Das Projekt „QUILT – Quanteninformatik in der Lehrerbildung mit Transfer in den berufsorientierenden Unterricht“ zielt, ausgehend von den bisherigen Überlegungen, in einer langfristigen Perspektive auf die Gewinnung zusätzlicher Fachkräfte durch einen berufsorientierenden Ansatz bereits in der Schule ab. Hierbei sollen Lehrkräfte befähigt werden, den Jugendlichen einen authentischen Einblick in die Berufswelt der Quanteninformatik zu geben und zugleich die zugehörige Faszination überzeugend vermitteln zu können.

Dieses Problem wird dadurch angegangen, dass unter aktiver Beteiligung industrieller Partner Berufsbilder entwickelt und relevante Kompetenzen identifiziert werden, die für künftige Fachkräfte wichtig sind, aber auch grundsätzlich ein Verständnis der Quanteninformatik ermöglichen. Diese fließen in universitäre Lehrveranstaltungen ein, indem die (künftigen) Lehrkräfte die Grundlagen der Quanteninformatik in einem allgemeinbildenden Sinne erlernen, einen konkreten Einblick in die Berufswelt erhalten und die Kompetenzen erwerben, ihren eigenen Unterricht berufsorientierend zu gestalten. Auf diese Weise soll der Unterricht dazu beitragen, dass die Schüler:innen zum einen berufliche Perspektiven erfahren und zum anderen ein Verständnis für das Zusammenspiel von Wissenschaft, Technik und Wirtschaft entwickeln.

Zusammenfassend ergeben sich folgende Elemente als Kern der universitären Lehrveranstaltung:

Theorie:	Vermittlung fachlicher und fachdidaktischer Inhalte zur Quanteninformatik in einem Seminar
Industrie-einblicke:	Ermöglichung konkreter Einblicke in Berufsfelder durch ein didaktisch angeleitetes Industriepraktikum
Schulpraxis:	Vermittlung der Kompetenz, Unterricht berufsbezogen zu konzipieren sowie durchzuführen (Erstellung und Erprobung eines Unterrichtskonzeptes)

3.1. Projektablauf

In Abbildung 1 ist der Ablauf des Projektes QUILT dargestellt, welcher im Sinne eines Design-Based-Research-Ansatzes geplant wurde.

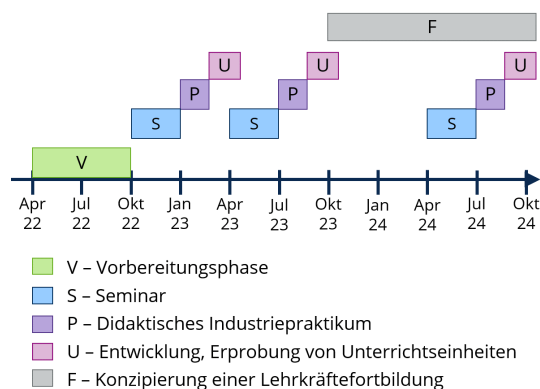


Abb. 1: Projektablauf.

Nach einer Vorbereitungsphase wurde eine Pilotlehrveranstaltung mit Seminar, Praktikum und unterrichtlicher Umsetzung durchgeführt. Die Erkenntnisse aus dieser Durchführung flossen in die weitere Gestaltung und Optimierung, sowohl inhaltlicher als auch organisatorischer Art, ein. Insgesamt wird die Lehrveranstaltung dreimal durchgeführt.

Die gewonnenen Erkenntnisse und Unterrichtskonzepte dienen der Weiterentwicklung des Seminars mit Einbezug der Netzwerkpartner, der Optimierung der Organisationsabläufe im Hinblick auf Effizienzsteigerung und last but not least, der Entwicklung einer Lehrkräftefortbildung.

3.2. Beschreibung der Lehrveranstaltung

Die Realisierung der Lehrveranstaltung erfolgte im Rahmen des Wahlbereiches des Lehramtsstudiums an der TU Dresden.

3.2.1. Theorieteil: Universitäres Seminar

Der Theorieteil umfasst ein einstündiges Seminar (entspricht 1 SWS; 8 Termine mit je 90 Minuten) mit fachlichen, didaktischen und industriebezogenen Anteilen.

Im Seminar liegt der Schwerpunkt auf der Quanteninformation als dem Bereich, in den man relativ gut mit geringen Mitteln grundlegende Technologien behandeln kann. Beispielsweise werden die Quantenkryptographie mit Fokus auf das BB84 Protokoll und Grundlagen zum Quantencomputer, wie der Deutsch-Algorithmus, behandelt. Als Vorkenntnis wird die Vorlesung Quantentheorie vorausgesetzt, so dass inhaltlich relativ zügig vorgegangen werden kann. Es wird große Rücksicht darauf genommen, dass die Inhalte auch in den schulischen Physikunterricht übertragen werden können. Didaktische Gesichtspunkte werden jederzeit einbezogen.

Neben den fachlichen Inhalten werden fachdidaktische Grundlagen der Unterrichtsgestaltung und -planung behandelt. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf dem kontext- und problemorientierten Unterricht. Auch wenn dies den Studierenden nicht völlig neu ist, stellt die Verbindung der entsprechenden Kenntnisse mit einem berufsorientierenden Ansatz eine Herausforderung dar. Ferner lernen die Studierenden durch kurze Gastvorträge mehrere Unternehmen kennen und entscheiden sich zwischen mehreren Unternehmen für ihr Industriepraktikum.

3.2.2. Praxisphase: Didaktisches Industriepraktikum

Die Praxisphase besteht aus dem einwöchigen „didaktischen Industriepraktikum“ mit Auswertung und Reflexion der Erfahrungen.

Die Studierenden gehen in Tandems für ein bis zwei Wochen in ein Unternehmen der Quantentechnologien und analysieren die beruflichen Anforderungen und Tätigkeiten der Mitarbeitenden. Grundlage dafür ist die Didaktische Arbeitsanalyse, für die die Studierenden einen detaillierten Leitfaden an die Hand bekommen (vgl. Lein, 2014).

In der Regel werden mit Hilfe von Arbeitsanalysen systematisch Informationen über die Tätigkeit von Mitarbeitenden eines Unternehmens, die Arbeitsbedingungen und deren Wirkungen auf den Arbeitsprozess erfasst und beurteilt.

Ziel einer didaktischen Arbeitsanalyse ist es:

- typische (akademische) Arbeitsaufgaben zu identifizieren und zu strukturieren,
- den natur- bzw. ingenieurwissenschaftlichen Arbeits- bzw. Forschungsprozesses abzubilden (berufswissenschaftliche Arbeitsanalyse),
- exemplarische Beispiele von Arbeitsaufgaben zu identifizieren (in Korrespondenz zu den Lehrplänen der allgemeinbildenden Schule), die von Lernenden bewältigbar sind.

Somit liegt der Fokus auf didaktischen Aspekten, die für die Realisierung im Unterricht relevant sind. Damit die Studierenden dies zielgerichtet durchführen können, wird die didaktische Arbeitsanalyse durch die Projektmitarbeiter:innen angeleitet und vorbereitet.

Es ist Aufgabe der Mitarbeitenden, die Einordnung des Unternehmens oder Forschungsinstituts in übergeordnete gesellschaftliche, ökonomische und ökologische Systeme vorzunehmen, Forschungs- oder Arbeitsschwerpunkte zu identifizieren, eine zum Ziel des Projekts passende Abteilung auszuwählen sowie das zu analysierende Forschungsprojekt einzugrenzen.

Auf dieser Grundlage sollen die Studierenden die Tätigkeitsfelder der begleiteten Ingenieur:innen und Naturwissenschaftler:innen ermitteln und typische Arbeitstätigkeiten zur Realisierung eines Arbeits- oder Forschungsauftrages innerhalb einer Abteilung analysieren. Dabei werden verschiedene Befragungs- und Beobachtungsmethoden eingesetzt. Während die Studierenden die Mitarbeitenden begleiten, lassen sie sich die Tätigkeiten erläutern (Beobachtungsinterview), sie nehmen Daten anhand eines Leitfadens auf und arbeiten nach Möglichkeit selbstständig an einzelnen Aufgaben mit.

Dabei geht es in erster Linie um systematische Beobachtung, Befragung der Mitarbeitenden sowie eine Analyse ihrer Tätigkeiten im Hinblick auf den quantenphysikalischen oder quantentechnologischen Gehalt und das mögliche Potential für den Unterricht. Vor allem sollen bildungsrelevante Arbeitsinhalte für den Unterricht identifiziert werden.

3.2.3. Transferphase: Erstellung und Erprobung eines Unterrichtskonzeptes

Die gewonnenen Erkenntnisse sollen in die Schulpraxis umgesetzt werden. Dies erfordert eine Analyse im Hinblick auf mögliche Unterrichtsziele und einen Entscheidungsprozess: Welche Inhalte und Tätigkeiten geben ein interessantes und realistisches Bild des Berufsfeldes und können in einer begrenzten Zeit im Unterricht umgesetzt werden?

Aus den gesammelten Daten und Informationen werden daher bildungsrelevante Arbeitsinhalte (technische Verfahren, Geräte, Analysemethoden, Materialien, Anwendungen, Arbeitsweisen, Projekte, usw.) in Korrespondenz zu den Lehrplänen der allgemeinbildenden Schule identifiziert und strukturiert, welche geeignet sind, den Lernenden ein Abbild von realen Tätigkeiten von Akademiker:innen in der Arbeitswelt zu geben.

Die leitenden Fragen sind:

- Welche Bezugspunkte können für die zukünftige Arbeit als Lehrperson identifiziert werden?
- Welches konkrete Lernpotenzial steckt in den typischen Arbeitsaufgaben von Akademiker:innen?
- Welche Mittel, Methoden und Arbeitsweisen lassen sich in den Unterricht transferieren?

Um den Studierenden eine Brücke zu bauen und die Verarbeitung der Eindrücke zu erleichtern, werden sie aufgefordert, in einem ersten Schritt ihre Erfahrungen für ein allgemeines Publikum in einem Bericht, Blog, Zeitungsartikel oder Ähnlichem darzulegen und zu beschreiben, noch unabhängig von einer späteren Umsetzung im Unterricht.

Auf der Basis der Analyse und ihrer Einblicke entwickeln die Studierenden ein Unterrichtskonzept im Umfang von einer Doppelstunde und führen dieses auch in einer Schulklasse durch, gleichfalls im Tandem. In dieser Phase der Unterrichtskonzeption werden sie intensiv betreut. Die Lehramtsstudierenden werden beim Unterrichtsversuch hospitiert. Aus dem Ablauf der Unterrichtsversuche werden Schlussfolgerungen für die weitere Optimierung der Lehrveranstaltung gezogen.

4. Evaluation des Vorhabens

Die Durchführbarkeit und Effektivität dieses Vorgehens wird mit Fokus auf die Wahrnehmung der Lehrveranstaltung durch die Lehramtsstudierenden evaluiert. Dabei stehen die folgenden Forschungsfragen im Mittelpunkt:

- FF1: Wie wirkt sich Berufsorientierung im Bereich Quanteninformatik auf die Einstellungen und Kenntnisse von Lehramtsstudierenden aus?
- FF2: Wie relevant werden Inhalte der Quanteninformatik von Lehramtsstudierenden wahrgenommen und welche Lernschwierigkeiten gibt es?
- FF3: Inwieweit können berufsorientierende Unterrichtseinheiten zur Quanteninformatik im Unterricht umgesetzt werden?
- FF4: Inwiefern ist die angestrebte Kombination von Allgemeinbildung und Berufsorientierung hinreichend realisierbar?

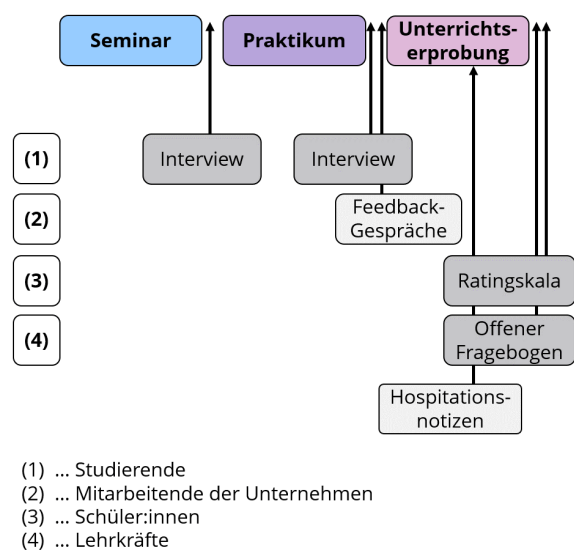
4.1. Forschungsmethodik und Instrumente

Die Lehrveranstaltung wird gemäß eines Design-Based-Research-Ansatzes entwickelt und optimiert. Dazu wird sie insgesamt dreimal durchgeführt. Im

Folgendes wird über die ersten beiden Erprobungen und daraus gewonnenen Erkenntnissen berichtet.

Für die Evaluation dieser Lehrveranstaltung werden spezifische Erhebungsinstrumente entwickelt, die es erlauben, die Entwicklung von Einstellungen der Lehramtsstudierenden sowie ihr fachliches Lernen in der Quanteninformatik zu erfassen.

Aufgrund der geringen Zahl an teilnehmenden Studierenden werden qualitative Methoden eingesetzt. Auch die Evaluierung orientiert sich an der Dreiteilung des Lehrveranstaltungskonzeptes (siehe Abbildung 2). Dazu werden mit den Studierenden nach jedem Abschnitt der Lehrveranstaltung leitfadengestützte Interviews geführt.



- (1) ... Studierende
 (2) ... Mitarbeitende der Unternehmen
 (3) ... Schüler:innen
 (4) ... Lehrkräfte

Abb. 2: Überblick über die Datenerhebungen.

Die Interviews bilden den Kern der Evaluation. Diese werden in der Regel mit zwei Studierenden zugleich geführt, jeweils in den Tandem-Gruppen, welche auch gemeinsam in ein Praktikum gehen und gemeinsam Unterricht planen und durchführen.

Die Interviews werden per Audioaufnahme aufgezeichnet. Die Daten werden transkribiert und dabei anonymisiert, wobei sich die Transkriptionsregeln an Kuckartz (2022) beziehungsweise Dresing und Pehl (2018) orientieren.

Die Datenauswertung erfolgt mittels deduktiv-induktiver qualitativer Inhaltsanalyse. Ausgehend von deduktiven Oberkategorien, welche auf den Interviewleitfäden und damit auf den Forschungsfragen basieren, werden induktive Subkategorien gebildet. Hierbei steht die Bildung inhaltlich strukturierender Kategorien (vgl. Kuckartz, 2022) im Vordergrund.

Neben den Studierenden sollen auch die Mitarbeitenden der Praktikumsunternehmen, sowie die Schüler:innen und Lehrkräfte der Klassen, in welchen die Unterrichtseinheiten erprobt werden, einbezogen werden.

Mit den Mitarbeitenden der Unternehmen werden nach jedem Praktikum Feedbackgespräche geführt, um die Praktika auch aus Sicht der Unternehmen

bewerten zu können und gegebenenfalls Anpassungen vorzunehmen.

Um die Wirkung der Unterrichtsstunden auf die Schüler:innen sowie deren Einstellungen gegenüber der behandelten Themen in kleinem Rahmen zu erfassen, soll der Unterricht mittels einer Ratingskala durch diese eingeschätzt werden. Darüber hinaus wird jede erprobte Unterrichtseinheit mit Hilfe eines offenen Fragebogens durch hospitierende Fachlehrkräfte beurteilt.

4.2. Erste Ergebnisse der Interviews

Erste Ergebnisse der Interviews liegen auf Basis der zweimaligen Durchführung der Lehrveranstaltung vor. Der erste Durchlauf erfolgte im Wintersemester 2022/2023, der zweite Durchlauf im Sommersemester 2023.

Insgesamt wurden $N=10$ Studierende jeweils zweimal interviewt. Zum ersten Interviewzeitpunkt im Anschluss an das Seminar wurden hierbei $N=5$ Interviews mit jeweils einem Paar von Studierenden geführt. Aus organisatorischen Gründen, konnten zwei Studierende ihr Praktikum nicht im Tandem absolvieren, weshalb zum zweiten Interviewzeitpunkt im Anschluss an das Praktikum $N=6$ Interviews geführt wurden (je 4 Paare und 2 Einzelinterviews).

Da noch ein Durchlauf im Sommersemester 2024 aussteht und die Auswertung der Daten noch nicht abgeschlossen ist, können hier zunächst nur erste Beobachtungen beschrieben werden. Diese geben allerdings Hinweise für alle Teile der Lehrveranstaltung.

Für beide Interviews wurde ein gemeinsames Kategoriensystem entwickelt. Im Folgenden sollen erste, zentrale Ergebnisse vorgestellt werden.

4.2.1. Vorkenntnisse und Vorwissen über Berufe der Quantentechnologien

Es wird deutlich, dass Studierende nicht nur zu Beginn der Lehrveranstaltung, sondern auch noch nach Ende des Seminars als erstem Teil wenige Vorstellungen darüber haben, was sie im Praktikum erwartet. Tatsächlich kommt dies in allen geführten Interviews zum Ausdruck. Damit einher geht auch, dass Studierende im Anschluss an das Seminar Schwierigkeiten haben, einschätzen zu können, inwiefern sie dieses gut auf das Praktikum vorbereitet.

Ich finde es halt gerade, wie gesagt, ziemlich schwierig, aufs Praktikum vorbereitet zu sein, wenn man halt überhaupt noch nicht weiß, worum es im Praktikum geht. Also ich kann das, wie gesagt, ich kann ja noch null abschätzen, was die da überhaupt machen und ob das überhaupt mit dem zusammenhängt, was wir [im Seminar] gemacht haben. [...]
 (22 Interview 1a, Pos. 97-100)

Wesentlich lassen sich hierbei zwei Aspekte in fast allen Interviews finden. Zum einen zeigen Studierende vor dem Praktikum wenige Vorstellungen darüber, wie und wozu Industrie und Forschung im Bereich der Quantentechnologien konkret arbeiten und

wie konkrete Arbeitsinhalte und Tätigkeiten aussehen. Zum anderen zeigen Studierende Angst und Bedenken dahingehend, auf das Praktikum fachlich gut vorbereitet zu sein.

Ich kann auch ehrlich gesagt noch nicht so richtig einschätzen, was sie dann von uns quasi fachwissenstechnisch verlangen [...] (23 Interview1c, Pos. 28)

Im Praktikum selbst zeigt sich, dass Inhalte zwar oftmals über fachliche Kenntnisse der Studierenden hinausgehen, benötigtes Sachwissen aber auf Grund der guten Betreuung und Einweisung durch die Mitarbeitenden der Unternehmen zielführend in vorhandene Kenntnisse eingeordnet und ergänzt werden können.

Das Praktikum wird von den Studierenden positiv eingeschätzt. Vor allem die inhaltlichen Einblicke werden als sehr umfangreich und eindrucksvoll beschrieben. Einblicke, welche als besonders relevant und interessant empfunden werden, sind neben fachlichen Aspekten beispielweise auch Einblicke in Arbeits- oder generelle Organisationsstrukturen der Unternehmen.

4.2.2. Einstellungen gegenüber Inhalten der Quantentechnologien und Quanteninformatik

Festgehalten werden muss, dass die im Seminar vermittelten Fachinhalte zu Quantentechnologien im Allgemeinen und Quanteninformatik im Speziellen von den Studierenden sehr positiv bewertet und als spannend und interessant empfunden werden. Hier bestätigen sich über die inhaltlichen Potentiale hinaus die positiven Einflüsse, welche die Thematik auf Motivation und Interesse haben kann.

Hervorgehoben wird vor allem das Aufzeigen der Anwendungen von Quantenphysik, welcher der Ansatz mit sich bringt. Die Studierenden heben positiv hervor, dass an vielen Stellen aus dem Studium bereits bekannte Inhalte, etwa aus der Quantentheorie oder der Atom- und Festkörperphysik, wieder aufgegriffen und um konkrete Anwendungsbezüge erweitert werden.

Ich fand es ganz gut, dass das so auf Anwendung in der Quantenphysik voll bezogen war, weil das, was mir in der Vorlesung gehört hat, sowohl in der Experimentalphysik als auch in der Quantentheorievorlesung, das war halt immer nur so mit Theorien rumgeballert. Und ich habe nie so richtig verstanden, für was braucht man das jetzt und was bringt das jetzt so in der Technik. [...] Und das fand ich gut und dann ist mir so ein bisschen klar geworden, für was man das eigentlich braucht. (23 Interview1a, Pos. 5)

Im Speziellen werden Inhalte zur Anwendung der Verschränkung etwa bei Quantenalgorithmien und insbesondere die Quantenschlüsselerzeugung als spannend, interessant und gut verständlich empfunden. Diese Aussagen spiegeln das Potential wider, welches Quantentechnologien im Physik-

Fachstudium des Lehramts auch unabhängig von der Umsetzung im Unterricht haben können.

4.2.3. Umsetzung berufsorientierenden Unterrichts zu Quantentechnologien

Im Rahmen der beiden Lehrveranstaltungsdurchführungen wurden sieben Unterrichtskonzeptionen für jeweils eine Doppelstunde konzipiert und im Physikunterricht der Sekundarstufe II erprobt.

Es zeigt sich hierbei, dass die Ideenfindung der berufsorientierenden Stunden auf Basis des Praktikums durch die Studierenden als schwierig eingeschätzt wird und Probleme bereitet. In vielen Fällen wurden bereits während der Praktikumsdurchführung Konsultationen durchgeführt, um die Studierenden bei ihrer Ideenfindung zu unterstützen. Der Transfer von Praktikum zum konkreten Unterricht scheint hierbei eine große Hürde darzustellen.

Also, es ist schon recht schwergefallen. Genau, weil es geht eben bei denen viel um Algorithmen-Entwicklung und das kann man ja direkt komplett vergessen für die Schule. Und [...] dann ging es uns halt darum, was jetzt die Arbeitsweisen sind, wie beschäftigen die sich mit dem Thema und so weiter und so fort. [...] Das macht es halt auch alles nicht leichter, dann irgendwie ein passendes Stundenthema zu finden. (23 Interview2b, Pos. 39-41)

Des Weiteren wird die didaktische Reduktion der Fachinhalte als schwer angesehen. Das ist insofern nicht überraschend, als dass die Praktikumsunternehmen mitunter hochspezialisierte Tätigkeiten in speziellen Teilgebieten der Quantentechnologien aufweisen. Erschwert wird dies auch dadurch, dass es bisher nur wenige vorhandene, schulgeeignete Materialien zur Quanteninformatik, wie beispielsweise didaktisch gut aufbereitete Lehrtexte gibt. Dementsprechend sind die Studierenden gezwungen, viele Materialien selbst zu erstellen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend zeigt die Evaluation der bisherigen Durchläufe, dass das Praktikum als sehr ergiebig und sinnstiftend von den Studierenden eingeschätzt wird. Insbesondere werden sowohl die Möglichkeit, ein Industrie- beziehungsweise Forschungsunternehmen zu besuchen im Allgemeinen, als auch Inhalte zu Quantentechnologien und Quanteninformatik im Speziellen, als interessant und motivierend bewertet.

Es zeigt sich, dass durchaus hohe Anforderungen an Studierende gestellt werden. Nicht nur müssen sie das Praktikum absolvieren, die fachlichen Inhalte verstehen und in Form der Didaktischen Arbeitsanalyse verarbeiten, sondern auf Basis dessen berufsorientierenden Unterricht konzipieren. Es zeigt sich aber, dass Studierende diesen Aufgaben durchaus gewachsen sind. Allerdings setzt das Gelingen der Lehrveranstaltung eine enge und umfangreiche universitäre Betreuung in Form von Konsultationen vor, während und nach dem Praktikum voraus, um geeignete

Unterrichtskonzepte zu entwickeln. Im letzten Durchlauf wird besonders durch Beispiele ein noch größerer Wert darauf gelegt, den Studierenden die Kompetenz zu vermitteln, berufsbezogenen Unterricht zu konzipieren.

Seminar und Praktikum laufen nach Rückmeldung der Studierenden bereits überwiegend sehr gut. Vor allem organisatorisch können an der einen oder anderen Stelle noch kleine Optimierungen vorgenommen werden, allerdings hat sich das Design grundsätzlich bewährt und wird nicht mehr geändert werden. Im Sommersemester 2024 erfolgt der letzte Durchlauf der Lehrveranstaltung.

Das Projekt QUILT setzt sich in besonderer Weise mit dem erwartbaren Fachkräftemangel im Bereich der Quantentechnologien auseinander. Dies geschieht, indem Lehramtsstudierende die Fähigkeiten vermittelt bekommen sollen, berufsorientierenden Unterricht in diesem Bereich zu planen und durchzuführen. Um dieses perspektivische Ziel in breiterem Umfang zu erreichen, sollen die Ergebnisse des Projekts in die Lehrkräftefortbildung einfließen, so dass weitere Lehrpersonen erreicht werden können. Dazu wird eine Lehrkräftefortbildung konzipiert, in welcher neben fachlichen und didaktischen Inhalten zu Quantentechnologien und Quanteninformatik, außerdem berufsorientierende Aspekte vermittelt werden sollen. Kern bilden dabei auch die durch die Studierenden entwickelten Unterrichtskonzeptionen, welche nach einer Überarbeitung durch die Projektmitarbeitenden an Lehrkräfte herausgegeben werden können.

6. Literatur

- Albert, C. & Pospiech, G. (2023). Quantenphysik in Klasse 9: Ergebnisse einer Akzeptanzbefragung für ein Spin-First-Unterrichtskonzept. *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1370>
- Anger, C., Betz, J. & Plünnecke, A. (2024). MINT-Frühjahrsreport 2024. Herausforderungen der Transformation meistern, MINT-Bildung stärken, Gutachten für BDA, Gesamtmetall und MINT Zukunft schaffen, Köln.
- Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. (2016). Physik in der Schule. Bad Honnef.
- Dresing, T. & Pehl, T. (2018). Praxisbuch Interview, Transkription & Analyse: Anleitungen und Regelsysteme für qualitativ Forschende (8. Auflage).
- Kircher, E., Girwidz, R. & Häußler, P. (Hrsg.) (2015). Physikdidaktik. Theorie und Praxis. (3. Auflage) Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- KMK (2020). Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife: Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020.
- Krimphove, P. (2022, 03. Mai). Quantentechnologien: Fachkräfte dringend gesucht. Merton-OnlineMagazin des Stifterverbandes. <https://merton-magazin.de/quantentechnologie-fachkraefte-dringend-gesucht>
- Kuckartz, U. & Rädiker, S. (2022). Qualitative Inhaltsanalyse: Methoden, Praxis, Computerunterstützung: Grundlagentexte Methoden (5. Auflage). Grundlagentexte Methoden. Beltz Juventa.
- Lein, S. (2014). Das Betriebspraktikum in der Lehrerbildung. Eine Untersuchung zur Förderung der Wissenschafts- und Technikbildung im allgemeinbildenden Unterricht. Berlin: Logos Verlag Berlin GmbH (Studien zum Physik- und Chemielernen, 165).
- Lein, S. & Pospiech, G. (2013). Akademische Arbeitsinhalte im Unterricht – eine lösbare Aufgabe für Lehramtsstudierende der Physik und Chemie?. *Inquiry-based Learning–Forschendes Lernen*, 155.
- Massolt, J. & Borowski, A. (2020). Perceived relevance of university physics problems by pre-service physics teachers: Personal constructs. *International Journal of Science Education*, 42(2), 167–189.
- Michellini, M. & Stefanel, A. (2008). Learning paths of high school students in quantum mechanics. *Frontiers of Physics Education*, 337–343.
- Mujtaba, T. & Reiss, M. J. (2016). “I Fall Asleep in Class... But Physics Is Fascinating”: The Use of Large-Scale Longitudinal Data to Explore the Educational Experiences of Aspiring Girls in Mathematics and Physics. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 16(4), 313–330.
- Müller, C. (2019). Planung einer Unterrichtseinheit zur Quantenkryptografie und Akzeptanzanalyse der Dirac-Notation [Wissenschaftliche Abschlussarbeit]. TU Dresden.
- Neumann, C. (2020). Einstieg in die Quantenphysik über die Quantenkryptografie – Erarbeitung und Erprobung einer Unterrichtseinheit [Wissenschaftliche Abschlussarbeit]. TU Dresden.
- OECD (2019). Bildung auf einen Blick 2019: OECD-Indikatoren. wbv Media. Bielefeld.
- Pospiech, G. (2021). Die zweite Quantenrevolution: Quanteninformatik im Physikunterricht. In J. Grebe-Ellis & H. Grötzebauch (Vorsitz), *Virtuelle DPG-Frühjahrstagung 2021*. Symposium im Rahmen der Tagung von DPG.
- Pospiech, G. (2024). Teaching Quantum Physics Between Quantum Technology and General Education. In E. Aydiner, B. G. Sidharth, M. Michellini, & C. Corda (Hrsg.), *Frontiers of Fundamental Physics FFP16* (S. 393–416). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38477-6_22
- Pospiech, G., Niethammer, M., Wieser, D. & Kuhlmann, F.-M. (Hrsg.). (2020). *Begegnungen mit der Wirklichkeit: Chancen für fächerübergreifendes Lernen an außerschulischen Lernorten*. hep-Verlag.

- Risius, P., Malin, L. & Flake, R. (2017). *Ausbildung oder Studium? Wie Unternehmen Abiturienten bei der Berufsorientierung unterstützen können* (No. 3/2017). KOFA-Studie.
- Stadermann, H. K. E., van den Berg, E. & Goedhart, M. J. (2019). Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic. *Physical Review Physics Education Research*, 15(1).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEduRes.15.010130>
- Stifterverband (2023). Quantum Skills in der Lehrkräftebildung. DISCUSSION PAPER °8. Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e.V.
<https://www.stifterverband.org/quantum-skills-in-der-lehrkraeftebildung-empfehlungen>
- Unverricht, I., Lein, S., Niethammer, M. & Pospiech, G. (2012). Das Projekt „Lehrer studiert Unternehmen“ - Ein modernes Betriebspraktikum in der Lehramtsausbildung. In S. Bernholt (Hrsg.), *Konzepte fachdidaktischer Strukturierung für den Unterricht*. (S. 491–493).

Danksagung

Wir danken dem BMBF für die Förderung des Projekts.

Students Learn the Fundamental Exact Unification of Gravity, Relativity, Quanta and Elementary Charge

Hans-Otto Carmesin*

*¹Gymnasium Athenaeum, Harsefelder Straße 40, 21680 Stade

²Studienseminar Stade, Bahnhofstr. 5, 21682 Stade

³Universität Bremen, Fachbereich 1, Postfach 330440, 28334 Bremen
hans-otto.carmesin@t-online.de

Abstract

Near Earth Orbit asteroids require a precise orbit determination. For it, in principle, essential theories are quantum physics, QP, and general relativity, GR. However, these are not fully compatible. How can this be overcome? For it, the volume dynamics, VD, of intergalactic space and of volume in nature in general are derived. The VD provide QP and GR as well as gravity. Moreover, the VD are tested at fundamental problems: The VD provide the dark energy. The VD solve the Hubble tension and predict H_0 -values ranging from redshift $z = 1090$ to $z = 0$. The VD solve the cosmological constant problem. Thus, the VD bridge cosmology, QP and GR and provide a deep insight. In a didactic analysis, all results are derived according to the hypothetic deductive method, and all didactic steps are elaborated. So you can directly use the concept for your courses. The learning process has been tested in various learning groups, and experiences are reported.

1. Introduction

1.1. Comets: Beautiful and possibly dangerous

In July 2020, the comet Neowise had a distance to Earth of only $103 \cdot 10^6$ kilometers (Fig. 1). At April 13th in 2029, the asteroid Apophis will pass Earth at a distance of 35 500 km, see Bancelin et al. 2012. So, a defence of Earth is analysed. For it, a precise observation of the time and position of asteroids is essential: Atomic clocks and curvature of space and time are relevant. These are described by two essential physical theories: quantum physics, QP, and general relativity, GR. So, a fundamental theory providing QP and GR is essential. Such a theory is proposed. As a test, it solved the Hubble tension and the cosmological constant problem, Carmesin (2024g).



Fig. 1: Comet Neowise near Hamburg at August 2020.



Fig. 2: Wavelengths of light can be measured. This photo of a hydrogen lamp is taken by a smartphone camera with a cross-grating in front of the lens.

1.2. Experiments showing quanta and redshift

At a measurable wavelength λ of light, a smallest portion of energy can be measured with help of λ , the velocity of light c and the Planck constant h . as follows (Fig. 3): $E = h \cdot \frac{c}{\lambda}$ {1}



Fig. 3: A LED is illuminated and provides the voltage $U = 2.137$ V and electrons with the energy $E = 2.137$ eV.

The experiments in Figs. (2,3) represent an example of the quantization of energy. At a distance r from a mass M , light has a gravitational redshift: Light starts with a wavelength λ_∞ at a very large distance r_∞ . At r_∞ , the gravitational field is negligible. When the light arrives at a distance r from M , it has the wavelength $\lambda(r) = \frac{\lambda_\infty}{\sqrt{1-R_S/r}}$ with $R_S = \frac{2 \cdot G \cdot M}{c^2}$ {2}

G is Newton's gravitational constant, R_S is the Schwarzschild radius. So, the periodic time of such light is the following function: $T(r) = \frac{T_\infty}{\sqrt{1-R_S/r}}$ {3}

Such periodic time is used in optical atomic clocks (Gill et al. (2008) and Fig. 4). In traditional physics, light is used as a measure of space. Thus, the gravitational redshift is an example for the curvature of space, see Einstein (1915).

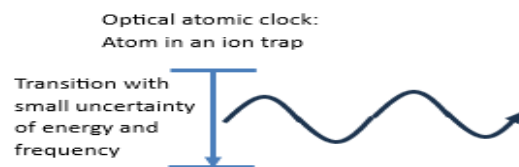


Fig. 4: In an optical atomic clock, an atom emits a photon, with T , with $\frac{\Delta T}{T} = 10^{-18}$, see Huntemann et al. (2016).

1.3. Traditional concept of physics

In present – day physics, the experiments in section (1.1) are interpreted as follows: Objects such as light or atoms move and interact in a metric space, described by general relativity, see e. g. Einstein (1915), Delva (2018). Thereby, many objects are quantized at the microscopic level., see e. g. Planck (1900), Einstein (1905), Heisenberg (1925), Schrödinger (1926), Ballentine (1998). However, QP and GR appear to be hardly compatible, see Einstein et al. (1935), Einstein (1948), Ballentine (1998), Nobbenius (2006). So, the foundations of QP and GR show problems: the cosmological constant problem (Nobbenius 2006), the Hubble tension (Riess 2022), nonlocality (Einstein et al. 1935). As we live in one world, a unification of GR, QP is important. For it, epistemology is essential:

1.4. Epistemology

Kircher, Girwidz und Häußler (2001, section 4.1.2) describe the hypothetic deductive method. In the epistemological literature, this method is also called hypothetico-deductive testing (Niiniluoto, Sintonen, Wolenski 2004, S. 214). The method consists of three steps: In the hypothetic step, a thesis or hypothesis is suggested for testing. In the deductive step, implications are derived. In the third step, the implications are compared with observation. Hereby, in principle, a falsification should be possible. This method is used here as well as in Carmesin (2024a-g, 2019, 2020, 2021 a-d, 2022 a-c, 2023 a-c).

1.5. Volume in nature is a fundamental concept

Volume in nature is fundamental, as objects exist, move and interact in the volume in nature. The hypothesis in section (1.4) consists of properties of the volume in nature. These properties are evident part of present-day knowledge. In the deductive step, the dynamics of volume in nature are derived, the volume dynamics, VD.

2. Didactic and physical analysis

In this section, the evident properties of volume in nature are presented (section 2.1) and essential implications are derived (section (2.2) in a self-contained manner. Moreover, didactic steps are developed. Furthermore essential achieved insights are reflected.

2.1. Volume in nature: evident properties

2.1.1. Volume of intergalactic space

2.1.1.1. Physical analysis

Volume in nature occurs in a relatively pure form in the intergalactic space. Volume $V_{intergalactic\ space}$ of intergalactic space, see Karttunen (2007):

$$V_{intergalactic\ space} \approx V \quad \{4\}$$

2.1.1.2. Didactic analysis

In a first didactic step, we realize that traditional physics (section 1.2) uses different concepts of

vacuum (Einstein 1917, Casimir 1948, Ballentine 1998, Hobson 2006, Nobbenius 2006).

In didactic step two, we realize that traditional physics applies the concept of a metric space. Volume-ports, propagating in different directions, are not considered (Einstein 1915, Hobson 2006).

In a 3rd step, the meaning of volume in nature is clarified with help of the example of intergalactic space in a direct and general manner, that is not restricted to a particular theory. This example and the above two didactic steps have no essential learning barrier.

2.1.2. Evident properties

2.1.2.1. Physical analysis

In traditional physics and in metric space, the volumetric property of volume is characterized:

Increments of volume that are used in differential geometry and general relativity are analysed as follows, see Lee e. g. (1997), Hobson (2006) or Carmesin (2020): $dV_L = \prod_j^D \sqrt{|g_{jj}|} \cdot d\xi^j$ {5}

Hereby, D is the dimension of the analysed space or spacetime, the $d\xi^j$ are increments of locally orthogonal coordinates, and g_{jj} are the elements of the metric tensor. The subscript L specifies that the light – travel distance d_{LT} is used as a distance measure, see e. g. Einstein (1905), Hobson (2006), Condon (2018). Thereby, volume has basic properties that are provided by evident present-day knowledge about volume and electromagnetic waves: Firstly, volume and time are fundamental. Secondly, volume in nature has the volumetric property, see Eq. {5}. Thirdly, volume in nature has zero rest mass:

$$m_{vol,0} = 0 \quad \{6\}$$

Fourthly, at a global level, volume is isotropic. This is at least a good approximation, see Carmesin (2023a). Fifthly, a basic property of electromagnetic waves is used: Electromagnetic waves exhibit the property of linear superposition. With it, special relativity, SR, has been derived, see e. g. Carmesin (2019, 2020, 2022a section 7.8).

2.1.2.2. Didactic analysis

In step one, the volumetric property is described by the metric theory via the metric tensor. This theory is based on differential geometry, see e. g. (Lee (1997), so it has a robust mathematical basis. And the metric theory of space is also used by traditional physics, so there is a maximum of continuity with the traditional physics (section 1.2). This traditional theory has no essential learning barrier. In step two, properties {1} to {5} are introduced. These are evident.

2.2. Implications of the evident properties

The evident properties of volume in nature (section 2.1) imply essential results. These are derived in the deductive step of the epistemological method:

2.2.1. Portions of volume

2.2.1.1. Physical analysis

Theorem: Law of the existence of volume-portions in nature. Firstly, volume in nature propagates at the velocity of light. Secondly, volume in nature consists of volume-portions, VPs. Proof: see Carmesin(2024g).

2.2.1.2. Didactic analysis

In a first didactic step, the following is shown: $m_{vol,0} = 0$ implies that volume-portions propagate at the velocity of light. This step has no mathematical learning barrier. However, this step provides a mental learning barrier: It is shown that volume-portions move at $v = c$, this differs from usual metric space. In a second step, it is shown that the average velocity of VPs is zero, as VPs are isotropic. This step has no special learning barrier. In a third step, it is shown that the average zero requires several VPs. This step has no special learning barrier.

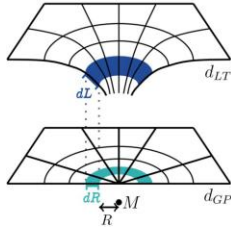


Fig. 5: In the vicinity of a mass M or effective mass M_{eff} , the radial increment dL of the light travel distance d_{LT} is increased with respect to the original increment dR that would occur in the limit M to zero. This increment dR is called gravitational parallax distance d_{GP} .

2.2.2. Measurable gravitational parallax distance

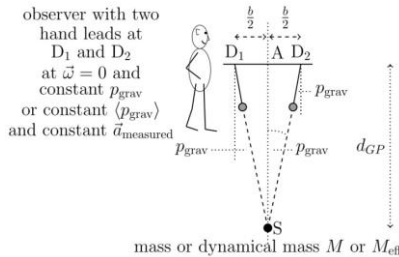


Fig. 6: Measurement of gravitational parallax distance d_{GP} via the angle of gravitational parallax p_{grav} : D_1, D_2 and S form an isosceles triangle D_1D_2S . The base line D_1D_2 has the centre A . An effective mass M_{eff} is measured at constant measured acceleration $\vec{a}_{measured}$.

2.2.2.1. Physical analysis

It is fundamental that the distance d_{LT} in curved space and the corresponding distance d_{GP} in flat space can be measured simultaneously in the same curved space (Fig. 5). Firstly, it is well-known how the light travel distance can be measured, see e. g. Hobson (2006), Condon and Matthews (2018). Secondly, the gravitational parallax distance d_{GP} is founded by defining corresponding measurement procedures: We describe how an observer can apply two hand leads, in order to measure the distance to

an object (Fig. 6). Definition 1: Gravitational parallax distance to a mass: The gravitational parallax distance, d_{GP} , between an observer and a (dynamical) mass is defined by the measurement procedure in Fig. (6):
$$d_{GP} = \frac{0.5b}{\tan(p_{grav})} \quad \{7\}$$

For details, see Carmesin (2023a,2024g)

2.2.2.2. Didactic analysis

In a first step, the measurement procedures are defined. Hereby, the measurement of a distance by triangulation is a well-known procedure. Similarly, hand leads are well-known devices. Additionally, it is clear that hand leads are influenced by an acceleration and by a rotation. Thus, these are excluded with respect to a reference mass M or M_{eff} . This step has a medium-sized learning barrier: The acceleration and angular velocity must be set to zero with help of a closed loop control. In a second didactic step, the following is reflected: In general, M or M_{eff} can be accelerated with respect to some other object. Accordingly, the gravitational parallax distance d_{GP} is measured relative to M or M_{eff} . This relation is not very complex, and so it can be understood clearly. Moreover, the fact that d_{GP} is measured relative to M or M_{eff} is clear from the very beginning. Thus, this step has only a medium-sized mental learning barrier. Altogether, only medium-sized learning barriers occur in the measurement procedures for d_{GP} . Moreover, the d_{GP} provides a useful tool: Curved space can be compared with flat space by observation. With it, the dynamics of distances and of volume can be measured and analysed.

2.2.3. Representation of space with help of VPs

2.2.3.1. Physical analysis

In general, space can exhibit curvature (Fig. 5). It can be represented with help of a metric tensor g_{ij} . However, as space consists of volume portions, it is valuable to transform the description with the metric tensor to a description using VPs. This transformation is worked out in this section:

A mass M causes additional volume δV . It can be described with help of the metric tensor, see e. g.

Hobson (2006, section 2.10):

$$\delta V = \prod_j^D \sqrt{|g_{jj}|} \cdot d\xi^j - \prod_j^D \sqrt{|g_{jj,flat}|} \cdot d\xi^j \quad \{8\}$$

Hereby, $g_{jj,flat}$ is the metric tensor of flat space, whereas g_{jj} is the metric tensor of curved space.

At each point in D -dimensional space or spacetime, a local orthogonal coordinate system can be used, Lay (2016, section 6.4).

We name the corresponding incremental orthogonal coordinates $d\vec{\xi}^j$ and the corresponding basis vectors $d\vec{\xi}^j$. Hereby, in traditional general relativity, GR, two types of components are used, contravariant components are marked by an upper index and covariant components are marked by a lower index, see e. g. Landau and Lifschitz (1971, § 6). The geometric properties of D -dimensional space or spacetime can be described by the metric tensor g_{ij} ,

see e. g. {Landau and Lifschitz (1971, § 84). Thereby, the metric tensor can be obtained by the scalar product of the basis vectors, see e. g. Hobson (2006, sections 4.1 – 4.4): $g_{ij} = d\vec{\xi}_i \cdot d\vec{\xi}_j$ {9} It is useful to represent the light-travel distance based length of each basis vector $d\vec{\xi}_{L,j}$ by an increment $dx_{L,j}$ which subsumes the root of the element of the metric tensor, see e. g. Hobson (2006, section 2.10) and Fig. (7): $dx_{L,j} = \sqrt{g_{jj}} \cdot d\xi^j$ {10} Consequently, the volume spanned by the D basis vectors is as follows, see e. g. Hobson (2006, section 2.10): $dV_L = \prod_j^D dx_L^j = \prod_j^D d\xi_L^j \cdot \sqrt{|g_{jj}|}$ {11}

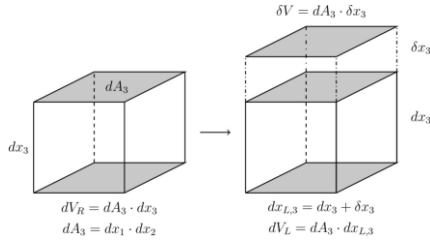


Fig. 7: VPs can be represented with cubes and cuboids.

Theorem: Law of representation by additional volume (proof: Carmesin 2024g): At each point, the metric tensor can be represented by differences and relative differences as follows: Firstly, even if the space is curved, at each point, the incremental orthogonal coordinates of flat space dx_j can be measured. These are related to the metric tensor of flat space $g_{ij,flat}$ as follows: $dx_j = \sqrt{g_{jj,flat}} \cdot d\xi^j$ {12}

Secondly, at each point in space, the length difference caused by curvature can be measured:

$$\delta x_j = dx_{L,j} - dx_j \quad \{13\}$$

Thirdly, at each point in space, the incremental volume in flat space can be measured:

$$dV_R = \prod_j^D dx^j = \prod_j^D d\xi^j \cdot \sqrt{|g_{jj,flat}|} \quad \{14\}$$

Fourthly, at each point in space, the additional volume can be measured: $\delta V = dV_L - dV_R$ {15}

Fifthly, at each point, the intensive quantity, normalized by the advantageous d_{LT} based volume dV_L , can be measured: $\varepsilon_L := \frac{\delta V}{dV_L}$ {16}

That ratio is named relative additional volume ε_L .

Sixthly, at each point, the relative additional volume is the following function of dV_L and dV_R :

$$\varepsilon_L = 1 - \frac{dV_R}{dV_L} \quad \{17\}$$

2.2.3.2. Didactic analysis

In a first didactic step, the increments of a VP are described with help of the metric tensor, see Eqs. {9} and {10}. This notation is especially valuable for readers familiar with the metric tensor notation. This step has no special learning barrier for such learners. In a second didactic step, the root of the respective metric tensor element is subsumed multiplied by the increment of the coordinate of the orthogonal coordinate system, see Eq. {11} and Fig (7). The product is an increment $dx_{L,j}$. The resulting notation is especially valuable for readers familiar with Cartesian coordinate systems. This step has

only a medium-sized mental learning barrier for readers that stick to one of the two notations. In didactic step three, additional volume is introduced: Based on the volumetric property of volume in nature and on the measurements of the light-travel distance and the gravitational parallax distance, the additional volume caused by a mass M or M_{eff} is derived in a direct manner. This step is algebraically straight forward. This step has only a medium-sized mental learning barrier for readers that stick to a particular personal view in which difference of volume-portions are avoided artificially. In a fourth didactic step, a very useful intensive quantity is derived. This step is algebraically straight forward. This step has a medium-sized mental learning barrier for readers that do not realize the immense advantage of intensive physical quantities with respect to the search of universal laws of physics. This step has another medium-sized mental learning barrier for readers that do not realize that the relative additional volume should have the light-travel distance based volume in the denominator in order to achieve universal local laws of physics. In a didactic fifth step, some algebraic transformations are used in order to prove the theorem. This step has no special learning barrier. Altogether, the five didactic steps have no special algebraic or formal or geometric learning barrier, and they have several mental learning barriers. Moreover, the relative additional volume has many valuable implications. This topic provides a high learning efficiency, deep insights and a useful tool.

2.2.4. Differential equation of volume

Portions of additional volume propagate with $v = c$ (section 2.2.1).

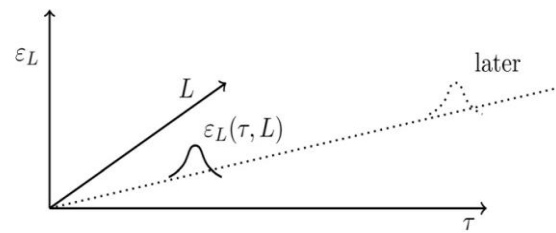


Fig. 8: A localizable portion of relative additional volume ε_L propagates in space. The relative additional volume is analysed as a function of τ and \vec{L} .

2.2.4.1. Physical analysis

The volume-portions δV in sections (2.2.1, 2.2.3) have a valuable completely new property: They can propagate in space: Theorem: Law of propagation of relative additional volume (proof: Carmesin 2024g): Localizable VPs propagate as follows: Firstly, during an increment of time $d\tau$, the local maximum of relative additional volume ε_L changes its position by a spatial increment $d\vec{L}$ as follows:

$$d\vec{L} = \frac{\partial \vec{L}}{\partial \tau} d\tau \quad \text{with} \quad \frac{\partial \vec{L}}{\partial \tau} = c \vec{e}_v \quad \{18\}$$

Secondly, if the relative additional volume ε_L is analysed as a function of τ and \vec{L} (Fig. 8), then it fulfils

the following differential equation, DEQ of VD:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \varepsilon_L = -v \cdot \vec{e}_v \cdot \frac{\partial}{\partial \vec{L}} \varepsilon_L \quad \text{with } v = c \quad \{19\}$$

Thirdly, in principle, there is no difference between a portion of additional volume δV and a localizable VP. Consequently, Eqs. {18} and {19} hold for each localizable VP. Fourthly, each localizable volume-portion propagates according to the following Lorentz invariant DEQ: $\dot{\varepsilon}_L^2 - c^2 \cdot \left(\frac{\partial}{\partial \vec{L}} \varepsilon_L\right)^2 = 0$ {20}

2.2.4.2. Didactic analysis

In a first didactic step, the motion of the maximum is analysed. As a localizable portion of relative additional volume propagates at $v = c$, the position \vec{L} of its maximum value moves according to Eqs. {18} and {20} as a function of time, $\vec{L} = \vec{L}(\tau)$. This motion is similar to the motion of a point-like mass. Thus, this step provides no essential learning barrier for learners familiar with analysis. In a second didactic step, the fact is realized that the portion is not point-like. Accordingly, its form is described as a function of τ and \vec{L} (Fig. 8). This step and this function $\varepsilon_L(\tau, \vec{L})$ provide no essential learning barrier for learners that are familiar with distribution functions or with density functions or with atomic orbitals. In didactic step three, both functions $\vec{L}(\tau)$ and $\varepsilon_L(\tau, \vec{L})$ are combined. For it, the fact is used that the maximum has zero derivative. With it, the DEQs {19} and {20} are derived. This derivation uses well-known methods of analysis, so it provides no essential learning barrier. Hence, this step has no essential learning barrier.

2.2.5. Schrödinger equation derived from VD

2.2.5.1. Physical analysis

Theorem: Law of the derived GSEQ: Eq. {19} implies the generalized SEQ, GSEQ (proof: Carmesin 2024g): $i\hbar \frac{\partial}{\partial \tau} \Psi = c \cdot \hat{p} \Psi = \hat{H} \Psi$ {22}

Hereby, the wave function is $\Psi = t_n \cdot \varepsilon_L$. And the normalization factor is t_n .

Theorem: Law of the derived SEQ: Eq. {22} implies the SEQ (proof: Carmesin 2024g): In the limit of slow objects, the SEQ proposed or postulated by Schrödinger is derived:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial \tau} \Psi \doteq \frac{\hat{p}^2}{2m_0} \Psi + E_{pot} \Psi = \hat{H} \Psi \quad \{23\}$$

2.2.5.2. Didactic analysis

In a first didactic step, the GSEQ is derived from the DEQ {19} of volume. For it, a time derivative is applied and $i\hbar t_n$ is multiplied. This step has no essential analytic, algebraic or geometric learning barrier. The identification of DEQ {22} with a GSEQ represents a mental learning barrier for all readers that expect the form of the SEQ proposed by Schrödinger (1926). That learning barrier is reduced with help of a second didactic step: The traditional wave function is identified, see DEQ {23}. This step has only a mental learning barrier for those readers that have the opinion it would be impossible to identify the physical meaning of the wave function. In fact, this opinion is quite common, see e. g. Kumar (2018, p.

14). However, that opinion has never been proven in general. Fortunately, some authors regard the interpretation of the wave function as an open question, see e. g. Scheck (2013, p. vii, sections 1.3-5.1). That learning barrier is reduced further by using the traditional operators of momentum and energy in a third didactic step, see DEQs {22,23}. This step has only a mental learning barrier: The Hamiltonian of the GSEQ describes relativistic objects, including the option of a nonrelativistic limit. In contrast, the SEQ proposed by Schrödinger describes non-relativistic or slow objects only. Thus, the traditional SEQ is a special case of the GSEQ. That learning barrier is reduced further by deriving the non-relativistic limit. The result is the traditional form of the SEQ. This step has no essential learning barrier. Altogether, the derivation provides great insights: It bridges QP and cosmology. It clarifies the meaning of the wave function. It provides a generalization.

2.2.6. Generalized potential

2.2.6.1. Physical analysis

The law of propagation of localizable relative additional volume can be applied to the vicinity of a mass M or effective mass: Theorem: Law of the derived generalized gravitational interaction. In the vicinity of a mass M or effective mass M_{eff} , the relative additional volume ε_L exhibits the following properties (proof: Carmesin 2024g, we use spherical polar coordinates with M at the origin, $d_{GP} = dR$ and $d_{LT} = dL$): (1) The relative additional volume ε_L propagates according to Eq. {19}. That Eq. is multiplied by c : $c \frac{\partial}{\partial \tau} \varepsilon_L = \vec{e}_v \cdot \frac{\partial}{\partial \vec{L}} \cdot (-c^2 \cdot \varepsilon_L)$ {24} The bracket in the above DEQ has the form of a generalized potential Φ_{gen} : $\Phi_{gen} := -c^2 \cdot \varepsilon_L$ {25} (Hereby, the potential is generalized as it describes volume, whereby volume can generate matter in a phase transition, see Higgs 1964). The negative gradient of that generalized potential is the generalized field \vec{G}_{gen} :

$$\vec{G}_{gen} := -\frac{\partial}{\partial \vec{L}} (-c^2 \cdot \varepsilon_L) = -\frac{\partial}{\partial \vec{L}} \Phi_{gen} \quad \{26\}$$

The DEQ {22} takes the form of the following rate gravity relation:

$$c \frac{\partial}{\partial \tau} \varepsilon_L = \vec{e}_v \cdot \frac{\partial}{\partial \vec{L}} \cdot \Phi_{gen} = -\vec{e}_v \cdot \vec{G}_{gen} \quad \{27\}$$

(2) That rate gravity relation can be expressed with help of the following rate gravity scalar RGS_{gen} :

$$RGS_{gen} := \left(c \frac{\partial}{\partial \tau} \varepsilon_L\right)^2 - \vec{G}_{gen}^2, \quad \text{thus} \quad \{28\}$$

$$RGS_{gen} = \left(c \frac{\partial}{\partial \tau} \varepsilon_L\right)^2 - \sum_j^D G_{gen,j}^2 \quad \text{and} \quad \{29\}$$

$$RGS_{gen} = \left(c \frac{\partial}{\partial \tau} \varepsilon_L\right)^2 - \left(c \frac{\partial}{\partial \vec{L}} \Phi_{gen}\right)^2 \quad \text{and} \quad \{30\}$$

$$RGS_{gen} = 0 \quad \{31\}$$

(3) The generalized field is proportional to $\frac{1}{R^{D-1}}$:

$$|\vec{G}_{gen}| = \frac{1}{R^{D-1}} \quad \{32\}$$

2.2.6.2. Didactic analysis

In a first didactic step, the form of DEQ {19} of VD provides a generalized potential $\Phi_{gen}(R)$ and field $\vec{G}_{gen}(R)$ of the volume in an exact manner. This step has no analytic or algebraic learning barrier for all learners familiar with fields and potentials. Even though the derived results are exact, there remains an open question about the interpretation – it will be answered in the next section. In didactic step two, a coordinate invariant scalar is derived. This step has no learning barrier for learners familiar with four-vectors. In a third didactic step, it is shown that the generalized field is proportional to $\frac{1}{R^{D-1}}$, whereby R is the radial coordinate or the gravitational parallax distance to the field generating mass M . This step has no special learning barrier. The derived potential, field and the proportionality to $\frac{1}{R^{D-1}}$ are very valuable, as they are exact. In contrast, the potential in Newton's theory of gravitation is not exact, see e. g. Hobson (2006).

2.2.7. General relativity and gravity

2.2.7.1. Physical analysis

We use spherical polar coordinates with radial coordinate R . The inverse root of g_{RR} of the metric tensor is named position factor $\varepsilon_E: \frac{1}{\sqrt{g_{RR}}} =: \varepsilon_E$ {33}

In general, ε_E is a function of R .

Theorem: Law of the derived curvature and interaction (proof: Carmesin 2024g): ε_E has the following properties: $\varepsilon_E = 1 - \varepsilon_L$ {34}

The generalized field is proportional to the mass M and to $\frac{1}{R^{D-1}}$: $|\vec{G}_{gen}(R)| \propto \frac{M}{R^{D-1}}$ {35}

The proportionality factor is interpreted as a universal constant of nature G_{gen} . It must be obtained from

observation: $|\vec{G}_{gen}(R)| = G_{gen} \cdot \frac{M}{R^{D-1}}$ {36}

$\varepsilon_E(R)$ fulfils: $\frac{G_{gen}M}{c^2 R^{D-1}} = \varepsilon_E \frac{\partial \varepsilon_E}{\partial R}$ {37}

That DEQ and the relation $\lim_{R \rightarrow \infty} \varepsilon_E = 1$ imply:

$\varepsilon_E(R) = \sqrt{1 - \frac{2G_{gen}M}{c^2} \cdot \frac{1}{R^{D-2(D-2)}}}$ {38}

Observation shows: $G_{gen}(D = 3)$ is Newton's constant of gravitation: $G_{gen}(D = 3) = G$ {39}

and $G_{gen} = G \cdot L_P^{D-3} \cdot (D - 2) = G_D$ {40}

Hereby, L_P is the Planck length:

$L_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 1.616 \cdot 10^{-35} \text{ m}$ {41}

At $D = 3$, the Schwarzschild radius $R_S = \frac{2GM}{c^2}$ implies:

$\varepsilon_E(R) = \sqrt{1 - \frac{R_S}{R}}$ at $D = 3$ {42}

At a dimension $D \geq 3$, the Schwarzschild radius is as follows, see e. g. Carmesin (2019, section 2.6):

$R_{SD} = (R_S \cdot L_P^{D-3})^{\frac{1}{D-2}}$ {43}

so, $\varepsilon_E(R) = \sqrt{1 - \left(\frac{R_{SD}}{R}\right)^{D-2}}$ at $D \geq 3$ {44}

As a consequence, in three-dimensional space, the

generalized field is equal to the gravitational field:

$\vec{G}_{gen}(R) = -\frac{GM}{R^2} \cdot \vec{e}_L = \vec{G}^*(R)$ at $D = 3$ {45}

Hereby, $\vec{e}_L = \vec{e}_v$. Consequently, at $D \geq 3$:

$\vec{G}_{gen}(R) = -\frac{G_D M}{R^{D-1}} \cdot \vec{e}_v$, thus

$\vec{G}_{gen}(R) = -\frac{G \cdot M}{R^2} \cdot \vec{e}_v \cdot (D - 2) \cdot \left(\frac{L_P}{R}\right)^{D-3}$ {46}

2.2.7.2. Didactic analysis

In a first step, the position factor is used as an abbreviation. Moreover, the relative additional volume is related to the position factor. This step has no special learning barrier. That step provides the valuable insight that the relative additional volume explains the position factor and the metric tensor element g_{RR} . In a second didactic step, a term for the generalized field is derived. This step has no special learning barrier. In step three, the DEQ for the position factor is derived. Moreover, the solution of that DEQ is derived. This step has no special learning barrier. In a fourth didactic step, it is shown that Newton's constant of gravitation applies to the generalized potential and field. Thereby, it is shown that the derived position factor explains the element g_{RR} of the metric tensor in general relativity. With it, the other elements of the metric tensor of the Schwarzschild solution can be derived, if desired, see e. g. Carmesin (2023a). This step has no special learning barrier. In a fifth step, the exact gravitational field is derived. This step has no special mathematical learning barrier. The results of the above didactic steps are exact, insightful, useful and general, as they show that the same volume dynamics in the DEQ {19} provide the SEQ as well as the Schwarzschild metric of GR as well as the exact gravitational field. Moreover, the results are general, as they can be applied to the vicinity of each effective mass. More generally, the relation to GR is provided in Carmesin (2024g).

2.2.8. Local formation of volume, LfV

2.2.8.1. Physical analysis

As a byproduct of the propagation of relative additional volume, there can occur local formation of volume, LfV: Definition: LfV: If additional volume δV_{jj} forms in a volume dV_L and in a direction j during a time $\delta \tau$, then this process can be described by the following normalized rate of unidirectional LfV,

see Fig. (7): $\dot{\varepsilon}_{L,jj} := \frac{\delta V_{jj}}{\delta \tau \cdot dV_L}$ {47}

In the vicinity of a mass M or an effective mass M_{eff} , and at a d_{GP} based distance R from M or M_{eff} , the following holds for the normalized rate:

Theorem: Law of locally formed volume, LfV:

(1) In the far distance approximation, FDA, the ratio $\frac{R_S}{R}$ is relatively small. At first order in that ratio $\frac{R_S}{R}$, the normalized rate is: $\dot{\varepsilon}_{L,jj} c^2 = G_{gen,j}^2$ {48}

$G_{gen,j}$ is the component j of the generalized field, see section (2.2.6). The full additional volume is obtained by the sum with respect to the components j ,

as nondiagonal components $\dot{\xi}_{L,ij}$ do not provide additional volume: $\dot{\xi}_L^2 c^2 := \sum_j \dot{\xi}_{L,jj}^2 c^2 = \sum_j G_{gen,j}^2$ {49}

This relation can be expressed in a Lorentz invariant form: $\dot{\xi}_L^2 c^2 - \sum_j G_{gen,j}^2 = 0$ {50}

Hereby, the generalized field is equal to the exact expression of the gravitational field, whereas Newton's gravitational field is an approximation, see sections (2.2.6) and (2.2.7).

2.2.8.2. Didactic analysis

In a first step, the fact of formation of additional volume is realized. This step has no special learning barrier, as the dependence of R is obvious. In step two, the rate of LFV is derived. As the derivation is quite simple, there is no special learning barrier.

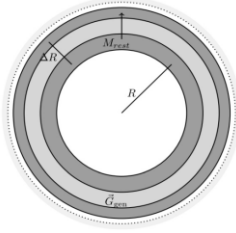


Fig. 9: A mass M (dark grey) in a shell at a radius R is lifted to a radius $R + \Delta R$: Differential parts dM are lifted, while the rest M_{rest} is still at R . Thereby the field \vec{G}_{gen} (medium grey) in the shell with radius R and thickness ΔR becomes zero, when the whole mass is at $R + \Delta R$.

2.2.9. Energy density of the field

2.2.10.1. Physical analysis

Theorem: Law of the energy density of a gravitational field (Proof: Carmesin 2024g or 2023a):

(1) A gravitational field \vec{G}_{gen} has the following energy density: $u_{gr.f.} = -\frac{|\vec{G}_{gen}|^2}{8\pi G}$ {51}

(2) A gravitational field \vec{G}_{gen} causes LFV with a rate: $\dot{\xi}_L^2 c^2 \doteq \sum_j G_{gen,j}^2 = \vec{G}_{gen}^2$, {52}

at first order in the FDA. At that locally formed volume, there occurs the following density of a generalized kinetic energy: $u_{gen,kin} = \frac{\dot{\xi}_L^2 c^2}{8\pi G}$ {53}

Similarly, the analogous result can be derived for the relative additional volume: $u_{gen,kin} = \frac{\dot{\xi}_L^2 c^2}{8\pi G}$ {54}

2.2.10.2. Didactic analysis

In a first didactic step, the process in Fig. (9) is introduced. As this is very intuitive, there is no special learning barrier. In step two, the change of generalized potential energy in the process in Fig. (9) is derived. As the generalized potential is exact, that derivation is exact. This increases the confidence. As the mathematical steps involve at most a simple integration, this step has no special learning barrier. In step three, the sign of the potential energy is derived. As the transfer of energy in the process in Fig. (9) is transparent, there is no special learning barrier. This is insightful, as it shows that the sum of the energy densities is zero. In step four, the LFV is applied.

With it, the energy density of the gravitational field is identified directly. On that basis, the positive term in Eq. {53} is directly identified with another energy density. According to its sign and its form, it is interpreted as a generalized kinetic energy density. As the interpretation does not require a proof, this step has no special learning barrier.

3. Experience: learning process and learners

The experiences with learning groups have been documented in terms of photographs of the blackboard and with help of additional reports. These are summarized as follows. In a general studies course at the university, the learning process was enriched by a permanent discussion of the achieved results and by exercises about the derived relations. In particular, the learning process took place in eight units, each lasting 90 minutes: (1) An introduction, the epistemological method, the volume in nature, the evident properties and a summary of special relativity have been treated. (2) The existence of several volume-portions has been derived. The measurement methods for d_{LT} and d_{GP} have been introduced (Fig. 6). The resulting maps (Fig. 5) have been treated. The additional volume (Fig. 7) and the law of representation by additional volume have been derived. (3) The propagation of VPs has been derived (DEQ {19} and Fig. 8). The GSEQ and SEQ have been derived. In exercises, several solutions have been developed. (4) The stationary SEQ has been derived. In exercises, several solutions have been developed. And the semiclassical limit has been introduced. Hereby, the principle of least action has been developed. It has been shown, how the Einstein field equation has been derived with help of that principle. (5) Newtonian gravity was summarized, in order to prepare the introduction of the generalized field \vec{G}_{gen} and potential Φ_{gen} . Then, these quantities \vec{G}_{gen} and Φ_{gen} have been derived. (6) The position factor including the curvature of space have been derived. In exercises, examples have been analysed and the Heisenberg uncertainty principle has been investigated. (7) LFV has been derived. (8) The energy densities of the gravitational field and of the generalized kinetic energy have been derived.

A quantum gravity group of a research club meets 90 minutes each week: Topics such as quantum computers, cosmology, astrophysics or quantum gravity are treated. In that group, essentially the same learning process has been treated in an extra meeting for one and a half days at a weekend. Hereby, questions and exercises, including adequate derivations, have been treated. So, training, metacognitive activity and experience of self-efficacy and competence are provided.

4. Discussion

Comets and asteroids could collide with Earth. So, planetary defence is organized, see Michel (2016). Hereby, precise observations, QP and GR are important. But QP and GR are incompatible, see Einstein et al. (1935). Here, the VD is derived from evident properties. The VD implies and generalizes QP

and GR. And the VD solves fundamental problems of QP and GR. And the VD have been tested: (1) The density of volume has been derived from the VD, see Carmesin (2023a, 2024c). (2) The VD solves the Hubble tension and predicts future measurements, see Carmesin (2023a, e, 2024d). (3) The VD solves the cosmological constant problem, see Carmesin (2023, a, 2024f,g). The results are in precise accordance with observation. Thereby, no fit has been executed and no postulate has been proposed. Such a testing of a (evident) hypothesis (section 1.4) and such a deduction from prior knowledge have a high learning efficiency, see Hattie (2006). The learning process uses everyday life contexts, so it is meaningful, see Muckenfuß (1995), and it achieves an additional high learning efficiency, see Hattie (2006).

The learning process of VD has been tested in two learning groups. That process takes 720 minutes at a university course as well as in a research club. In both learning groups, the students were able to perform exercises and to use instructions in order to derive parts of the theory. Moreover, the VD has been used in order to derive the elementary charge, see Carmesin (2021a, 2024g). This result is beyond GR, QP and the standard model of elementary particles.

5. Literature

- Ballentine, L. E. (1998). *Quantum Mechanics*. London and Singapore: World Scientific Publishing.
- Bancelin, D. et al. (2012). Asteroid (99942) Apophis: new predictions of Earth encounters for this potentially hazardous asteroid. *A & A*, 544, A15.
- Carmesin, Hans-Otto (2019). *Die Grundschwingungen des Universums - The Cosmic Unification - With 8 Fundamental Solutions based on G, c and h*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2020). *The Universe Developing from Zero-Point Energy: Discovered by Making Photos, Experiments and Calculations*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2021a). *Quanta of Spacetime Explain Observations, Dark Energy, Graviton and Nonlocality*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2021b). *Cosmological and Elementary Particles Explained by Quantum Gravity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2021c). *The Elementary Charge Explained by Quantum Gravity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2021d). *Lernende erkunden die Raumzeit*. *Mathematikunterricht*. 67(2), 47-56.
- Carmesin, H.-O. (2022a). *Quantum Physics Explained by Gravity & Relativity*. Berlin: Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2022b). *Explanation of Quantum Physics by Gravity and Relativity*. *PhyDid B*, pp 425-438.
- Carmesin, Hans-Otto (2022c). *How Excitations of Vacuum Form Matter*. *PhyDid B*, pp 447-458.
- Carmesin, Hans-Otto (2022d). *The Electroweak Interaction Explained by and Derived from Gravity and Relativity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2023a). *Geometric and Exact Unification of Spacetime, Gravity and Quanta*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2023b). *{Students Exactly Derive Quantization and its Universality}*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2023c). *{Students Derive an Exact Solution of the Flatness Problem}*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024a). *Students Learn the Fundamental Exact Unification of Gravity, Relativity, Quanta and Elementary Charge*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024b). *Students Learn to Derive Universal Properties of Gravitons*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024c). *Students Learn to Derive the Energy Density of Volume*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024d). *Students Analyse the Impact of the H_0 Tension on the Worldview*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024e). *Students Learn to Derive Nonlocality from Fundamental Physics*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024f). *Students Learn to Solve the Cosmological Constant Problem*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024g). *How Volume Portions Form and Found Light, Gravity and Quanta*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Casimir, Hendrik (1948). *On the attraction between two perfectly conducting plates*. *Proceedings of the Section of Sciences, Koninklijke Nederlandsche Akademie van Wetenschappen*, 51, pp 793-795.
- Condon, J. J. and Mathews, A. M (2028) *Λ CDM Cosmology for Astronomers*. *Publications of the Astronomical Soc. of the Pacific*, 130, pp 1-17.
- Delva, P. et al. (2018). *Gravitational Redshift Test Using Eccentric Galileo Satellites*. *PRL*, 121.
- Einstein, Albert (1905). *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*. *Annalen der Physik*, 17, pp 891-921.
- Einstein, Albert (1915). *Die Feldgleichungen der Gravitation*. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akad. der Wissenschaften*, pp 844-847.
- Einstein, Albert (1917). *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, pp 142-152.
- Einstein, Albert, Podolski, Boris, Rosen, Nathan (1935). *Can the quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?* *Phys. Rev.*, 47, pp 777-780.
- Einstein, Albert (1948). *Quanten-Mechanik und Wirklichkeit - Quantum Mechanics and Reality*. *Dialectica*. 2(3-4), pp 320-324.
- Gill, Patrick et al. (2008) *Optical Atomic Clocks for Space*. *Teddington: National Physical Laboratory*.
- Hattie, John (2009). *Visible Learning*. London: Taylor and Francis Ltd.
- Heisenberg, Werner (1925). *Quantum-Theoretical Re-Interpretation of Kinematic and Mechanical Relations*. *Z. f. Physik*, 33, p. 879-893.

- Higgs, P. W. (1964). Broken Symmetries, Massless Particles and Gauge Fields. *Phys. Lett.*, pp 132-133.
- Hobson, M. P.; Efstathiou, G. P. and Lasenby, A. N. (2006). *General Relativity*. Cambridge: C. U. P.
- Huntemann, N. et al. (2016). Single Ion Atomic Clock with $3 \cdot 10^{-18}$ syst. Uncertainty. *PRL*, 116.
- Karttunen, Hannu et al. (2007) *Fundamental Astronomy*. 5. Ed. Berlin: Springer.
- Kircher, Ernst; Girwidz, Raimund and Häußler, Peter (2001) *Physikdidaktik*. 2. Ed. Berlin: Springer.
- Kumar, A. (2018). *Fundamentals of Quantum Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Landau, Lew and Lifschitz, Jewgeni (1971) *Course of Theoretical Physics II - The Classical Theory of Fields*. 3. Ed. Oxford: Pergamon Press.
- Lay, D., C.; Lay, S. R. and McDonald, Judi J. (2016) *Linear Algebra*, 5. Ed. Boston: Pearson Education.
- Lee, John M. (1997) *Riemannian Manifolds: An Introduction to Curvature*. New York: Springer.
- Michel, P. (2016) Science case for the Asteroid Impact Mission (AIM): A component of the Asteroid Impac & Deflection Assessmant (AIDA) mission. *Advaces in Space Research*, 57, pp 2529-2547.
- Muckenfuß, Heinz (1995). *Lernen im sinnstiftenden Kontext*. Berlin: Corneslen
- Niiniluoto, I.; Sintonen, M.; Wolenski, J. (2004) *Handbook of Epistemology*. Dordrecht: Springer.
- Nobbenius, Stefan (1925). *The Cosmological Constant Problem, an Inspiration for New Physics*. Utrecht: University Utrecht.
- Planck, Max (1900). Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum. *Verhandl. Dtsch. Phys. Ges.* at December 14th, 2, p. 237-245.
- Riess, Adam et al. (2022). A Comprehensive Measurement of the Local Value of the Hubble Constant with $1 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ Uncertainty from the Hubble Space Telescope and the SHOES Team. *APJ Lett.*, 934, L7, pp 1-52.
- Scheck, Florian (2013) *Quantum Physics*. 2. Ed. Heidelberg - New York - Dordrecht: Springer.
- Schrödinger, E. (1926). Quantisierung als Eigenwertproblem I. *Annalen der Physik*, 79, pp 361-376.

Acknowledgement

I am very grateful to I. Carmesin for many interesting discussions and for proofreading the manuscript. I am also grateful to Matthias Carmesin for interesting discussions.

Students Learn to Derive Nonlocality from Fundamental Physics

Hans-Otto Carmesin*

*¹Gymnasium Athenaeum, Harsefelder Straße 40, 21680 Stade

²Studienseminar Stade, Bahnhofstr. 5, 21682 Stade

³Universität Bremen, Fachbereich 1, Postfach 330440, 28334 Bremen
hans-otto.carmesin@t-online.de

Abstract

In everyday life, in smartphones, we use electromagnetic waves for telecommunication. These waves propagate at the velocity of light. Is telecommunication at superluminal velocity (at $v > c$) possible? Einstein (1907) wrote that no action can travel faster than light, as such action would imply a causality violation.

However, quantum physics includes actions that travel faster than light, see e. g. Einstein, Podolski and Rosen (1935). Accordingly, Einstein (1948) named such actions (at $v > c$) ‘spukhafte Fernwirkung’ or ‘spooky action at a distance’. But Aspect, Grangier and Roger (1982) provided such action at $v > c$ in experiments with pairs of entangled photons. While this experiment demonstrates the seeming transfer of information at $v > c$, delayed-choice experiments do additionally demonstrate the seeming transport of energy and matter at $v > c$, see Jaques (2008) and Manning et al. (2015). Do these actions at $v > c$ violate the principle of causality? Does quantum gravity escape causality violation, as Hobson, Efstathiou and Lasenby hope (2006, p. 346)? Can such action at $v > c$ be used in telecommunications and quantum computers?

These questions are answered with help of the dynamics of volume in nature, the volume dynamics, VD, see Carmesin (2023a). The VD bridge general relativity and quantum physics. For these results, we provide a learning process, so that you can directly use the concept in your courses. The learning process has been tested in various learning groups, and experiences are reported.

1. Introduction

1.1. On Einstein’s causality violation at $v > c$

Einstein (1905) proposed that the velocity of light is an invariant and universal constant, irrespective of the velocity of the object that emits the electromagnetic radiation. Indeed, this invariance can even be derived from the principle of superposition, see Carmesin (2022 a, section 7.8).

Moreover, Einstein (1907, p. 381) analysed how a velocity $w > c$ could imply causality violation, see Fig. (1):

Relative to a first system in Fig (1), there moves a second system with a velocity v . In that system, there moves an object or signal with a velocity w . As a consequence, the object moves with a velocity u relative to the first system. Thereby, u is the following function of v and w , see e. g. Einstein (1905, p. 906) or Burisch et al. (2022, p. 482):

$$u = \frac{v+w}{1+\frac{v \cdot w}{c^2}} \quad \{1\}$$

As a consequence, in order to travel a distance dL from a point A to a point B relative to the first system, the object requires the following time dt :

$$dt = \frac{dL}{u} = dL \cdot \frac{1+\frac{v \cdot w}{c^2}}{v+w} \quad \{2\}$$

If the velocity w is positive, and if the velocity v is negative with an absolute value $\bar{v} = |v|$, then the required time is as follows:

$$dt = dL \cdot \frac{1-\frac{\bar{v} \cdot w}{c^2}}{w-\bar{v}} \quad \{3\}$$

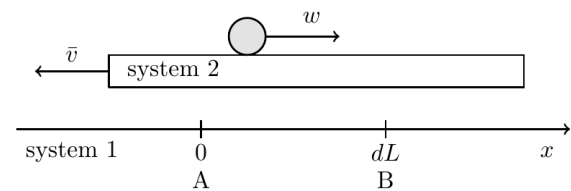


Fig. 1: Einstein (1907, p. 381) proposed the following situation: In a system 1, a system 2 moves at a velocity \bar{v} to the left. In system 2, an object or signal moves at a velocity w to the right. Thus, in system 1, the object moves at a velocity u . The time dt is analysed, that the object requires for a motion from a Point A at $x = 0$ to a point B at $x = dL$.

Einstein (1907, p. 381) argues, that the time dt can become negative at appropriate values of the velocity v , and that negative times indicate causality violation. We analyse the velocity u and the required time dt as a function of the absolute velocity \bar{v} , see Fig. (2):

As an example, we use $w = 2c$ and $dL = 10$ m, without loss of generality in principle. There occur three qualitatively different cases, see Fig. (2):

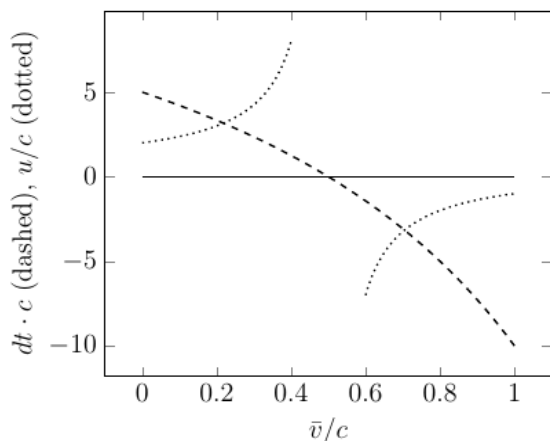


Fig. 2: Required time $dt \cdot c$ (dashed) and velocity $\frac{u}{c}$ (dotted) as a function of the velocity \bar{v}/c in the example proposed by Einstein (1907, p. 381). Hereby, for instance, $w = 2c$ and $dL = 10$ m have been chosen. At $\bar{v}/c = \frac{1}{2}$, the velocity $\frac{u}{c}$ diverges, and the time dt becomes zero. At $\bar{v}/c > \frac{1}{2}$, the velocity $\frac{u}{c}$ as well as the time dt become negative: We interpret that case as follows: The object moves to the left and might have been at the point B in the past, accordingly, $dt < 0$.

- (1) At $\bar{v} < 0.5 c$, the object has a positive velocity u . Thus, it reaches the point B after a positive time $dt > 0$. This motion is in accordance with causality.
- (2) At $\bar{v} = 0.5 c$, the velocity u diverges and is not defined by Einstein’s (1907) relation in Eq. {1}. In spite of the undefined velocity, the time dt that converges to zero and is zero according to Eq. {3}. Thus, in the limiting case $\bar{v} = 0.5 c$, the required time is zero, $dt = 0$.
- (3) At $\bar{v} > 0.5 c$, the velocity u is negative. A negative u describes a motion of the object to the left, with respect to the system 1. In such a motion, an object starting at the point A does never reach the point B in Fig. (1). More generally, in such a motion, the object could have been at the point B in the past, described by $dt < 0$. Thus, the case 3), the velocity $u < 0$ with the time $dt < 0$ describe a causal motion, as the product of the velocity and the time is positive, see Fig. (2). More generally, in all cases 1) and 3), at which u is defined by Eq. {1}, the product of the velocity and the time is positive, see Fig. (2), so that a causal motion is described.
- (4) In spite of that fact, Einstein stated that the negative time dt would imply causality violation (1907, p. 381-382): ‘Dies Resultat besagt, dass wir einen Übertragungsmechanismus für möglich halten müssten, bei dessen Benutzung die erzielte Wirkung der Ursache vorangeht.’ In

English: , This result states, that we must accept a mechanism of transmission, that provides an effect before the cause has taken place.’

- (5) Additionally, Einstein (1907, p. 381-382) stated the impossibility of $w > c$: ‘..., dass durch dasselbe die Unmöglichkeit der Annahme $w > c$ zu Genüge erwiesen ist.’ In English: ‘..., that by this the impossibility of the assumption $w > c$ is sufficiently proven.’

What can we learn from Einstein’s (1907, p. 381-382) example?

- (1) If an effect occurs before its cause has taken place, then causality is violated.
- (2) Einstein’s example can be interpreted with a causal motion in all cases with a defined value of the velocity u , see Fig. (2) and the cases (1), $\bar{v} < 0.5 c$, and (2), $\bar{v} = 0.5 c$.
- (3) In the addition of velocities in Einstein’s example, an assumed velocity $w > c$ can give rise to $dt < 0$. This could be interpreted as a causality violation, if the interpretation with causal motions in 1) and 3) is not discussed. Indeed, Einstein did not discuss these motions in (1), $\bar{v} < 0.5 c$, and 3), $\bar{v} > 0.5 c$, and he proposed the interpretation of causality violation. However, as a consequence, his analysis is incomplete. Thus, his interpretation in the above item (4) of his example as a causality violation is hardly convincing.
- (4) At this point, we apply the contraposition: A velocity u that is well-defined by Eq. {1} implies the impossibility of $w > c$. In this sense, we agree with Einstein’s statement in the above item 5) that the impossibility of $w > c$ is proven (if u has to be well-defined by Eq. {1}).
- (5) In the sense of the above item (4), velocities $w > c$ appear not realistic or ‘spooky’ in relativity.
- (6) In the case 2), the required time dt is zero, see Fig. (2). Thus, an object with $w > c$ can reach each location at zero required time, with help of the addition of velocities. Accordingly, such a system can be named nonlocal.
- (7) Accordingly, the following criterion for quantum nonlocality can be formulated: Objects that are not fully separated (or consisting of stochastic dependent components alias entangled components) or that propagate at superluminal velocity, $w > c$, have the property of quantum nonlocality.

Can quantum nonlocality be observed, and how are results obtained?

1.2. Epistemology

Kircher, Girwidz und Häußler (2001, section 4.1.2) describe the hypothetic deductive method. In the

epistemological literature, this method is also called hypothetico-deductive testing (Niiniluoto, Sintonen, Wolenski 2004, S. 214). The method consists of three steps: In the hypothetic step, a thesis or hypothesis is suggested for testing. In the deductive step, implications are derived. In the third step, the implications are compared with observation. Hereby, in principle, a falsification should be possible. This method is used here as well as in Carmesin (2024a-g, 2017, 2018a-b, 2019a-b, 2020a-c, 2021a-d, 2022a-c, 2023a-f).

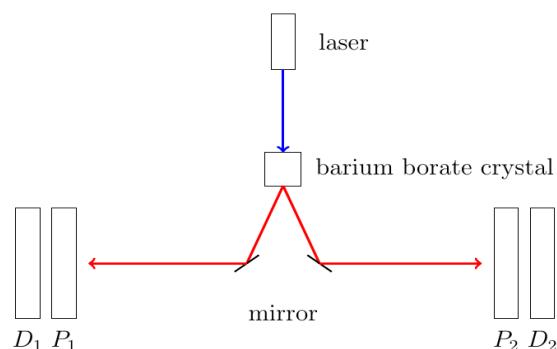


Fig. 3: Pairs of entangled photons are generated in a barium borate crystal. These photons are directed to two observers with polarizers P_1 and P_2 and detectors D_1 and D_2 .

1.3. A pair of photons shows action at $v > c$

A pair of entangled photons are generated, see Fig. (3). Hereby, the polarization of one of the two photons at detector D_1 is correlated with the polarization of the other photon at D_2 . Thereby, the two polarizations are different, for instance vertical and horizontal. Hereby, the measurement includes the polarizer and the detector. For instance, observer 1 polarizes the photon with P_1 and then measures with D_1 .

However, if the photon at P_1 is polarized with P_1 , then the state of the entangled pair is changed at the same time. Consequently, the state of the other photon is changed without loss of time. These instant changes of the polarization state of the other photon at a distance have been checked in many experiments, see e. g. Aspect, Grangier and Roger (1982). For a detailed analysis, see Carmesin (2023a). These changes take place at a velocity above the velocity of light. Consequently, this experiment shows nonlocality.

1.4. A delayed-choice experiment

Jaques et al. (2008) performed the delayed-choice experiment in Fig. (4). It is based on a Mach-Zehnder Interferometer, MZI. Single photons enter the MZI. The second beam splitter operates in one of two modes:

Mode 1: If the second beam splitter has the reflectivity 0.5, then the photon exhibits interference:

In detector D_1 , the wave at the solid line accumulates the phase shift π at the right mirror. Moreover, the wave at the dashed line accumulates the phase shift π at the left mirror plus two phase shifts of $\pi/2$ at each beam splitter. Altogether, the phases of the two paths

differ by π . Thus, there occurs destructive interference at D_1 .

In detector D_2 , the wave at the solid line accumulates the phase shift π at the mirror plus the phase shift $\pi/2$ at the second beam splitter. Moreover, the wave at the dashed line accumulates the phase shift π at the mirror plus the phase shift of $\pi/2$ at the first beam splitter. Altogether, the phases of each path is $3\pi/2$. Thus, there occurs constructive interference at D_2 . Hence, the photon occurs at D_2 . In the experiment, the interference showed a visibility of 94 %.

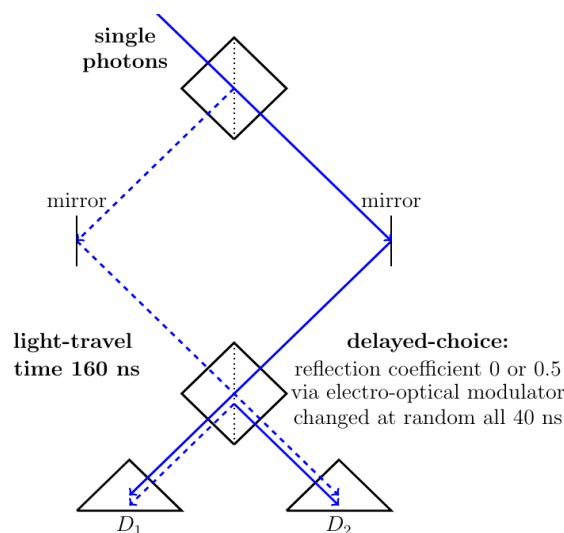


Fig. 4: Mach-Zehnder Interferometer: The second beam splitter is switched at random from reflectivity 0 to 0.5 and vice versa.

Mode 2: If the second beam splitter has the reflectivity 0., then the photon is transmitted, and there occurs no interference:

The wave function Ψ splits at the first beam splitter into $\Psi/\sqrt{2}$ in the solid path and $\Psi/\sqrt{2}$ in the dashed path. Thus, there occurs the probability $0.5\Psi^2 = 0.5$ at each detector. As the photon is quantized, it occurs in one detector, and it does not occur in the other detector. Consequently, the detection of the photons is anticorrelated. In the experiment, the anticorrelation parameter $\alpha = 0.12$ is observed.

Altogether, the second beam splitter operates in the delayed-choice mode, as a new choice is generated at random every 40 ns. Thereby, the light-travel time of a photon from the first beam splitter to the second one is 160 ns. Consequently, the wave function passed the first beam splitter, when the choice is generated.

Interpretation:

Particle interpretation: In a classical particle interpretation, one might assume that the photon uses one of the two paths after the first beam splitter.

That interpretation describes the experiment in the mode (2) with reflectivity 0.

However, that interpretation does not describe the experiment in the mode 1 with reflectivity 0.5. In this

mode, interference is observed. This falsifies the particle interpretation.

Wave interpretation: In a classical wave interpretation, one might assume that the wave functions $\Psi/\sqrt{2}$ propagate in each path.

That interpretation describes the experiment in the mode (1) with reflectivity 0.5, as interference is observed.

However, that interpretation does not describe the experiment in the mode 2 with reflectivity 0. In the wave interpretation, in each detector, there should occur 50 % of all photons, without any anticorrelation. This interpretation is falsified by the observed anticorrelation.

Moreover, in each detector, there would be insufficient energy for the detection of a complete photon. However, in the wave interpretation, only one half of the squared wave function arrives at each detector.

Is it possible that each interpretation explains one of the modes? For it, the quantum object must make its choice at the first beam splitter in accordance with the choice made at the second beam splitter at a time t_2 . For it, the object must start at the first beam splitter at the time t_2 , then the object must propagate at superluminal velocity, in order to arrive in time at the detectors. In this sense, the delayed-choice experiment is an example of nonlocality. Moreover, similar delayed-choice experiments have been performed with atoms, see Manning et al. (2015).

1.5. Organization of the paper

A didactic analysis including a professional analysis is provided in section 2. The learning process including experiences with learning groups are shown in part 3. We discuss our findings in section 4. Many useful and insightful related results are presented in my parallel papers in the report about the DPG conference in March 2024 in Greifswald, see Carmesin (2024a-g).

2. Didactic analysis

2.1. Universal nonlocal quantization

2.1.1. Physical analysis

(1) Derivation of a universal quantization:

If monochromatic light with a circular frequency ω falls down towards a mass M , then a minimal portion of energy E_{min} has the momentum $p_{min} \cdot c$, according to special relativity.

Moreover, the minimal portion has the wave number $k = \omega/c$. As a consequence, wave theory and special relativity imply the following relation:

$$\frac{E_{min}}{p_{min}} = c = \frac{\omega}{k} \quad \{4\}$$

This relation is solved for $\frac{E_{min}}{\omega}$:

$$\frac{E_{min}}{\omega} = \frac{p_{min}}{k} = K(\omega) \quad \{5\}$$

The above two ratios are equal, and they are named $K(\omega)$. Using gravity caused by the mass M and general relativity, it has been shown in Carmesin (2023a-b), that this ratio $K(\omega)$ is the same for each ω . Thus, that ratio is a universal constant of quantization.

- (2) Value of the universal constant of quantization: Based on the wave theory of light and on special relativity, that universal constant of quantization could have the value zero, in principle. In that case, the minimal energy portion would have the energy zero. Such a quantization would not differ from classical physics. $K > 0$ is derived in Carmesin (2024g). In fact, the value of the universal constant K is measured. Its value is the Planck constant divided by 2π :

$$K = \frac{h}{2\pi} \quad \& \quad h = 6.626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \quad \{6\}$$

- (3) Derivation of universal nonlocality:

The nonlocal delayed-choice experiment in Fig. (4) can be used in the vicinity of the mass M , so that all derived results about the universal quantization apply (of course, these results would also apply without M):

- At each circular frequency ω , there occurs a minimal energy portion E_{min} .
- Consequently, a detector can measure either one or zero minimal energy portions E_{min} , irrespective of the value of the universal constant of quantization K .
- As a consequence, the observations in the delayed-choice experiment in Fig. (4) are fully implied by the wave property of light combined with special & general relativity.

These results are summarized:

Theorem: Law of the derived universal quantization and universal nonlocality:

Special & general relativity combined with the wave property of light imply the following:

- (1) Light with a circular frequency ω forms minimal portions of energy $E_{min}(\omega)$ and of momentum $p_{min}(\omega)$ with a quantization constant K as follows:

$$\frac{E_{min}}{\omega} = \frac{p_{min}}{k} = K \quad \{7\}$$

The quantization constant is the same for all ω . In this sense, K is universal.

- The value of K in SI units is measured, shown in Eq. {6} and named reduced Planck constant $K = \hbar$.
- The implied quantization in parts (1) and (2) implies quantum nonlocality in the delayed-choice experiment in Fig. (4), irrespective of the value of the quantization constant.

Similarly, the implied quantization in parts (1) and (2) implies quantum nonlocality in all experiments and systems in nature, in which light exhibits quantum nonlocality in a manner not depending on the value of the quantization constant. In this sense, quantum nonlocality is universal.

Comments:

- (1) It can be shown that the constant K of quantization must be nonzero, see Carmesin (2024g).
- (2) It is insightful that universal quantum nonlocality is inherent to special & general relativity combined with the wave property of light.
- (3) However, an essential question remains: How can objects achieve quantum nonlocality as described in the criterion in section (1.1)?
- (4) Moreover, an important question remains: Is quantum nonlocality a causality violation?

2.1.2. Didactic analysis

In a first didactic step, the universal quantization is derived from the wave property of light and from special & general relativity. Hereby, a very direct, clarifying and insightful way to general relativity is used, see Carmesin (2023a, 2024f). As a consequence, this step has no special learning barrier.

In a didactic step (2), the Planck constant is measured, see e. g. Carmesin (2020a, c). This step has no special learning barrier.

In a didactic step (3), the universal nonlocality is derived from the wave property of light and from the derived universal quantization in step (1). Thereby, the intuitive and clear delayed-choice experiment in Fig. (4) is used. As a consequence, this step has no special learning barrier.

2.2. No substantial transport

2.2.1. Physical analysis

In quantum physics, the propagating object is the wave function. In the VD, it is equal to the time derivative $\Psi = t_n \cdot \dot{\varepsilon}_L$ of the relative additional volume ε_L , multiplied by a normalization factor, see Carmesin (2022a-b, 2023a, 2024a). The wave function must be related to the relative additional volume, as in this manner, it provides the Schrödinger equation, see Carmesin (2022a-b, 2023a, 2024a). Moreover, the wave function must be proportional to the time derivative of ε_L , as in this manner, it provides the correct probabilities proportional to $|\Psi|^2$, as the generalized kinetic energy density is proportional to $\dot{\varepsilon}_L^2$, and that energy density is proportional to the probability, see Carmesin (2022a-b, 2023a, 2024a). As a consequence, the propagating object, the wave function, is not substantial like the relative additional volume ε_L , as Ψ represents the derivative only. Furthermore, the relative additional volume has a generalized field, which is an exact version of the gravitational field

with an energy density $u_{gr.f.}$, see Carmesin (2021a-b, 2022a-b, 2023a, 2024a). Moreover, each harmonic solution of the DEQ of the volume-dynamics, VD, has a generalized kinetic energy density $u_{gen,kin}$, see Carmesin (2021a-b, 2022a-b, 2023a, 2024a). Thereby, $u_{gr.f.}$ and $u_{gen,kin}$ compensate each other, $u = u_{gr.f.} + u_{gen,kin}$. Thus, the complete energy density of a harmonic solution, corresponding to a harmonic wave function, vanishes. According to the Fourier analysis, a general wave can be described as a linear combination of harmonic solutions, in the form of a Fourier integral, see e. g. Schiff (1991).

As a consequence, a nonlocal transport by a wave function does not necessarily cause a transport of a physical entity, such as ε_L , or of a complete energy density u .

Of course, observables are represented by self-adjoint operators, such as the momentum operator $-i\hbar\partial_x$, or the energy operator $i\hbar\partial_t$. These provide the values that can be measured by a corresponding measurement device, the eigenvalues with corresponding probabilities. In principle, such a process can be provided by the VD, for instance, a stationary local quantum can form at the detector, see Carmesin (2023a, d).

Altogether, the above discussed facts show that in the VD, in general, an object does not travel at a path taken by the wave function.

2.2.2. Didactic analysis

In one didactic step, it is summarized, how the VD describes the correct observable eigenvalues and the corresponding probabilities, without describing the propagation of any substance. This step has an intermediate mental learning barrier, as in everyday life, many objects appear to be transported at paths. However, also in everyday life, there are other examples. For instance, the optimal visual acuity can be understood with help of the Heisenberg uncertainty relation, see Carmesin (2020c). Such examples are used in order to overcome that mental barrier. With it, there is no special remaining learning barrier in this step.

2.3. Explanation of nonlocality by the dynamics of volume in nature

2.3.1. Physical analysis

- (1) How objects achieve quantum nonlocality:

- a) Propagation:

The law of propagation of relative additional volume shows that volume-portions, VPs $\varepsilon_L(\tau, \vec{L})$, propagate according to the following DEQ, see Carmesin (2023a, 2024a):

The relative additional volume $\varepsilon_L(\tau, \vec{L})$ fulfils the following differential equation, DEQ:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \varepsilon_L = -v \cdot \vec{e}_v \cdot \frac{\partial}{\partial \vec{L}} \varepsilon_L \quad \text{with } v = c \{8\}$$

The law of the derived Schrödinger equation, SEQ, in Carmesin (2024a) shows that the wave function is the product of the time derivative $\dot{\varepsilon}_L$ of the relative additional volume ε_L and a normalization factor t_n , thus: $\Psi = t_n \cdot \dot{\varepsilon}_L$. And the normalization factor is t_n .

b) Subspace:

Thus, the solutions ε_L of Eq. {8} form a vector space. Similarly, the time derivatives $\dot{\varepsilon}_L$ thereof and the wave functions Ψ form a vector space. It is the Hilbert space H in quantum physics. Note that these are solutions of a generalized Schrödinger equation, GSEQ, see Carmesin (2024a). In a particular physical system, the solutions of the GSEQ form a subspace of H_1 .

c) Preparation or measurement:

Each measurement provides a preparation of the state. Each such preparation switches from a subspace H_1 of solutions of the GSEQ to subspace H_2 of the subspace H_1 of solutions of the GSEQ. Such a change of solutions represents a transient phenomenon in the theory of solutions of linear differential equations, whereby that transient phenomenon can be described with help of the Laplace transform, see Schiff (1991).

d) Transient phenomenon:

Einstein's (1907, p. 381-382) example in section (1.1) shows that a local signal of object cannot move or propagate faster than the velocity of light.

However, a harmonic solution of the DEQ {8} of the VD does not represent such a local signal or object, as a harmonic solution can be represented by a sine function and a cosine function, both ranging from minus infinity to plus infinity, mathematically. At least these solutions range from one point of the light horizon to the opposite point of the light horizon, as long as observable states are causally related.

Thus, such a harmonic function could in principle propagate at a velocity $v > c$, in accordance with the example proposed by Einstein (1907) in section (1.1). For it, the DEQ {8} is generalized to the case of a velocity v that is not restricted to c , for the case of such harmonic functions. This generalization is adequate and possible, as the development of the DEQ {8} in Carmesin (2024a) can be performed for any velocity v . This shows, that the propagation of a VP can be described by a generalized version of DEQ {8}, at which the only difference to DEQ {8} is the fact that the velocity v can take any value:

$$\frac{\partial \varepsilon_L}{\partial \tau} = -v \vec{e}_v \frac{\partial \varepsilon_L}{\partial \vec{L}}, \text{ for harmonic } \varepsilon_L(\tau, \vec{L}) \text{ \{9\}}$$

That generalized DEQ is applicable to these harmonic functions.

The transient phenomenon can be achieved by a linear combination of such harmonic solutions of the DEQ, see Schiff (1991) or Carmesin (2023a).

Based on such harmonic functions, the change of the subspace H_1 to a subspace H_2 thereof, caused by a measurement, could take place without restriction by c . Of course, this includes one-dimensional subspaces of H . In this manner, quantum nonlocality caused by measurements or preparations at a quantum system could be explained by harmonic solutions of the DEQ of the VD with $v > c$, see Eq. {9}. The mathematical details of the Laplace transform and of the transient phenomenon are elaborated in Carmesin (2023, chapter 16).

e) Applicability:

i) In the experiment in Fig. (3), the measurement at a detector causes the non-local change of the state. It is explained by the rapid transient phenomenon provided by the harmonic solutions of the DEQ {9}.

ii) In the experiment in Fig. (4), there are mode 1 and mode 2 with reflectivity 0.5 or 0, respectively:

In mode 1, the wave function Ψ of the photon propagates in both paths of the MZI, as shown by the interference pattern. Thus Ψ is separated into two stochastic dependent components. Thus, according to the criterion of quantum nonlocality in section (1.1), the photon is nonlocal in mode 1.

In mode 2, the photon is detected by one of the detectors, for instance by D_1 , and not by D_2 . This is shown by the observed anticorrelation, within the experimental accuracy. Thus, at the moment of the detection by D_1 , the subspace of H with the wave function at both detectors switches to a subspace with the wave function at D_1 and not at D_2 . That change is achieved by the superluminal transient phenomenon provided by the harmonic solutions of the DEQ {9}. Thence, the photon is nonlocal in mode 2 as well.

iii) In general, there are two possible sources of quantum nonlocality, see the criterion in section (1.1):

Entanglement: The wave function propagates in the form of stochastic

dependent (alias entangled) components of the object.

Transient phenomenon: A measurement or preparation of the object causes the superluminal change of the subspace of H via the superluminal transient phenomenon provided by the harmonic solutions of the DEQ {9}.

In both cases, the quantum nonlocality is explained by the dynamics of volume in nature, as described by the DEQs {8} and {9}.

(2) Is quantum nonlocality a causality violation?

- a) The argument proposed by Einstein (1907, p. 381-382) is a good argument for the fact that local signals or objects cannot move at $w > c$. However, the statement that $w > c$ would imply causality violation is not fully convincing, see section (1.1). Nevertheless, we analyse the possibility of causality violation. There are two sources of quantum nonlocality, see section (1.1):
- b) Entanglement: The wave function propagates in the form of stochastic dependent (alias entangled) components of the object.

That propagation takes place at velocities w that do not exceed the velocity of light, $w \leq c$. Consequently, that source of quantum nonlocality does not violate causality as discussed by Einstein, as $w \leq c$.

- c) Transient phenomenon: A measurement or preparation of the object causes the superluminal change of the subspace of H via the superluminal transient phenomenon provided by the harmonic solutions of the DEQ {9}.

The transient phenomenon is achieved by harmonic solutions propagating at $w > c$. However, these do not provide a local motion of energy, as a harmonic solution does not even define a local position of energy. Thus, these harmonic solutions do not violate causality. Correspondingly, such solutions are not included in Einstein's (1907, p. 381-382) analysis of causality violation.

Moreover, the effect of the transient phenomenon does not enable the emission of an object in the form of an information or energy E or mass $m = \frac{E}{c^2}$ at a point A and the arrival of that object at a point B according to a superluminal velocity. Thus, the effect of the transient phenomenon does not violate causality violation.

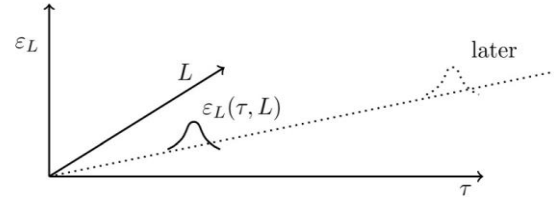


Fig. 5: A portion of relative additional volume ε_L propagates in space. The relative additional volume is analysed as a function of τ and \vec{L} .

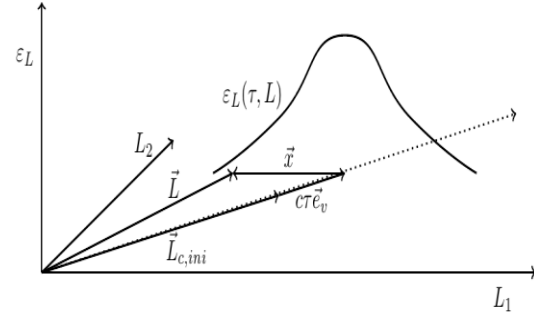


Fig. 6: A volume-portion with an initial position of the centre at $\vec{L}_{c,ini}$. The VP moves, e. g. during a time τ , the centre moves to $\vec{L}_{c,ini} + c\tau \vec{e}_v$. The VP has a form (similar to an orbital in an atom). For instance, a part is shifted by a vector \vec{x} from the centre, so the part is at a coordinate \vec{L} , in an external frame. In particular, these relations hold in an incremental manner.

These results are summarized:

Theorem: Law of the mechanisms underlying quantum nonlocality:

- (1) A measurement or preparation at a quantum object or quantum system can change the subspace H_{sub} of Hilbert space H , that describes the state of the object or system. In particular, that H_{sub} can be a one-dimensional subspace of H . Such a change of H_{sub} represents a transient phenomenon in the space of solutions of the DEQ {9}. Such a transient phenomenon can be achieved by harmonic solutions, see Schiff (1991) of the respective DEQ {9}. The velocity of propagation of harmonic solutions of DEQ {9} is not restricted by the velocity of light. Thus, the transient phenomenon can cause superluminal changes of H_{sub} . This explains the mechanism of the observed and observable superluminal changes of states in quantum objects, quantum systems and quantum nonlocality by the dynamics of volume in nature, the volume-dynamics, VD, see Eqs. {8} and {9}. Thus, the VD explain the measurement based source of quantum nonlocality.

For the case of localized VPs, the VD is represented by the DEQ {8}. For the case of harmonic functions, the VD is represented by the DEQ {9}. Both DEQs {8} and {9} describe the same process of propagation, formation and evolving form of VPs, see Figs. (5) and (6), see Carmesin (2023a, 2024a-b).

- (2) The DEQ {8}, describing the VD, can cause a separation of a wave function into stochastic dependent (alias entangled) parts. Thus, the VD explains the propagation based source of quantum nonlocality.
- (3) There is no unequivocal empirical or theoretical proof of a causality violation provided by quantum nonlocality.

2.3.2. Didactic analysis

In a first didactic step (1), the following question is answered: How objects achieve quantum nonlocality?

For it, the transient phenomenon is identified and applied. This didactic step has an intermediate learning barrier, as several facts about the solutions of linear differential equations are combined.

This learning barrier is overcome as follows: For the case of harmonic functions, the DEQ {8} with $v = c$ is generalized to the DEQ {9}. A measurement can provide an change of subspace H_{sub} of Hilbert space H at a superluminal rate. That change is explained by the DEQ {9}. Thereby, the DEQ {8} and {9} describe the same process of propagation, formation and evolution of form of VPs. On that basis, this didactic step has no remaining special learning barrier.

In a didactic step (2), the following question is answered: Is quantum nonlocality a causality violation?

For it, the criterion of quantum nonlocality in section (1.1) is used and the results of step (1) are applied.

On that basis, this didactic step has no remaining special learning barrier.

3. Experience: learning process and learners

The experiences with learning groups have been documented in terms of photographs of the blackboard and with help of additional reports. These are summarized as follows.

Since 2023, see Carmesin (2023a), the topic has been presented in several general studies courses at the university. The learning process was enriched by a permanent discussion of the achieved results and by exercises about the derived relations. In particular, the learning process took place as follows:

In a first unit, the concepts of causality violation and of quantum nonlocality have been treated, see section (1.1). That unit requires 90 minutes, if the mathematics of the statistical analysis in the experiment in Fig. (3) is elaborated, see Carmesin (2023a, chapter 16). Without that analysis, the unit can be treated in 45 minutes. The students stated that the analysis in section (1.1) is very clear.

In a second unit, the very insightful and valuable universal quantization, see Carmesin (2023a, b, f), and universal nonlocality are derived in a very direct and clarifying manner. As this topic uses very direct and efficient methods only, the unit can be treated in 45 minutes. In discussions, the students appreciate the

clarity and efficiency of the derivation. However, students that are already familiar with the dynamics of volume in nature say that they do not need this direct and relatively elementary derivation.

A unit three requires 45 minutes, see section (2.2). In that unit, the fact is summarized that the wave function does not transport any substance, in the VD. The students think that this is quite intuitive.

In a fourth unit, the DEQ {9} is used. With it, the concept of the transient phenomenon is introduced and applied. That unit requires 90 minutes, if the mathematics of the Laplace transform is examined, see Carmesin (2023a, chapter 16). Without that analysis, the unit can be treated in 45 minutes.

In a fifth unit, the results derived in the above units are used in order to discuss and exclude causality violation. That part requires 45 minutes. Depending on the interests of the learning group, quantum cryptography is treated as an innovative and exciting application of quantum nonlocality. This requires additional 45 minutes, see e. g. Carmesin (2020c). Moreover, quantum computing can be treated as an innovative and momentous application of quantum nonlocality, see e. g. Carmesin (2024h). This requires at least additional 90 minutes.

A quantum gravity group of a research club meets 90 minutes each week. Thereby topics such as quantum computers, cosmology, astrophysics or quantum gravity are treated. In that group, essentially the same learning process has been treated in several courses since 2022. Also in this case, all questions have been discussed directly, and exercises have been performed.

Altogether, in all learning groups, the learners asked questions. These have been discussed directly in a fully sufficient manner. Moreover, exercises have been used in order to achieve sufficient training, metacognitive activity and familiarity with the new concepts. In some of the exercises, the students were instructed so that they were able to achieve parts of the derivations on their own. This is an efficient test of the ability of the students, and it provides self-esteem to the students in a convincing manner.

4. Discussion

Telecommunication is an essential tool for our everyday life. Moreover, causality is a fundamental concept for the organization of our everyday life and knowledge. Both concepts are challenged by the observed quantum nonlocality. Moreover, quantum nonlocality is the basis for ground breaking future technologies such as quantum cryptography and quantum computing. Thus, the present topic is very exciting and interesting to students.

In a first unit, the experiments and their challenging implications are analysed. As an important result, a very valuable and insightful criterion for quantum nonlocality is elaborated, see section (1).

On that basis, the universal nature of quantum nonlocality is derived in a second unit.

In a third unit, the underlying mechanisms are elaborated: The volume dynamics, VD, is based on one process of propagation, formation and evolution of form of volume-portions, VPs. That process is described in the DEQs {8} and {9}, see Figs. (5) and (6). That VD explains the quantum nonlocality that is provided by a measurement or preparation. That VD also explains gravity and curvature of space and time. Moreover, that VD solves many problems in physics, see e. g. Carmesin (2023a, 2024a-g).

In a fourth unit, the possibility of causality violation is examined. It is argued that there is no unequivocal empirical or theoretical proof of the idea that quantum nonlocality could provide causality violation. Depending on the learning group, the full mathematical depth can be achieved and innovative applications can be treated. Accordingly, the topic requires between 180 and 450 minutes.

Altogether, we show how the quantum nonlocality and possible causality violations in nature can be treated, analysed and explained in a founded manner. Thereby, we derive the universality as well as the underlying mechanisms of these phenomena. In particular, we show how clarifying criteria for quantum nonlocality and possible causality violation can explain the sources of quantum nonlocality and can exclude that these sources can provide a causality violation.

The learning process is based on the hypothetic deductive method, see the section about the epistemology. Such a testing of a hypothesis and such a deduction from prior knowledge have a high learning efficiency, see Hattie (2006). Moreover, the learning process uses everyday life contexts, so that the learning is meaningful, see Muckenfuß (1995) and achieves an additional high learning efficiency, see Hattie (2006). In the particular case, applications to quantum cryptography and quantum computing are very motivating. For more interesting examples, see Carmesin (2020c).

The learning process has been tested in several learning groups. The learning process includes four units with a minimum of 45 minutes for each unit. Additionally, there are insightful and valuable deepening extensions, so that the time required for the four units adds up to 450 minutes. This has been tested at university courses as well as in research club courses. In all these learning groups, the students were able to perform exercises and to use instructions in order to derive parts of the theory. Thus, the topic provides a large amount of self-esteem to the learners.

5. Literature

Aspect, Alain; Grangier, Philippe and Roger, Gerard (1981). Experimental Tests of realistic Local Theories via Bell's Theorem. PRL 47, pp 460-463.

- Burisch, C. et al. (2022). *Universum Physik Gesamtband SII*. Berlin: Cornelsen Verlag.
- Carmesin, Hans-Otto (2017a). *Vom Big Bang bis heute mit Gravitation: Model for the Dynamics of Space*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2017b). *Schülerinnen und Schüler entdecken Gravitationswellen mithilfe von Computereperimenten*. *PhyDid B*, pp 11-18.
- Carmesin, Hans-Otto (2018a). *Entstehung dunkler Energie durch Quantengravitation - Universal Model for the Dynamics of Space, Dark Matter and Dark Energy*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2018b). *Entstehung der Raumzeit durch Quantengravitation - Theory for the Emergence of Space, Dark Matter, Dark Energy and Space-Time*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2019a). *Die Grundschwingungen des Universums - The Cosmic Unification - With 8 Fundamental Solutions based on G, c and h*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2019b). *A Novel Equivalence Principle for Quantum Gravity*. *PhyDid B*, pp 1-9.
- Carmesin, Hans-Otto (2020a). *The Universe Developing from Zero-Point Energy: Discovered by Making Photos, Experiments and Calculations*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2020b). *Explanation of the Rapid Enlargement of Distances in the Early Universe*. *PhyDid B*, pp 9-17.
- Carmesin, Hans-Otto et al. (2020): *Universum Physik, Qualifikationsphase, Niedersachsen*. Berlin: Cornelsen Verlag.
- Carmesin, Hans-Otto (2021a). *Quanta of Spacetime Explain Observations, Dark Energy, Graviton and Nonlocality*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2021b). *Cosmological and Elementary Particles Explained by Quantum Gravity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2021c). *The Elementary Charge Explained by Quantum Gravity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2021d). *Lernende erkunden die Raumzeit*. *Der Mathematikunterricht*. 67(2), 47-56.
- Carmesin, Hans-Otto (2022a). *Quantum Physics Explained by Gravity and Relativity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2022b). *Explanation of Quantum Physics by Gravity and Relativity*. *PhyDid B*, pp 425-438.
- Carmesin, Hans-Otto (2022c). *How Excitations of Vacuum Form Matter*. *PhyDid B*, pp 447-458.
- Carmesin, Hans-Otto (2022d). *The Electroweak Interaction Explained by and Derived from Gravity and Relativity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2023a). *Geometric and Exact Unification of Spacetime, Gravity and Quanta*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2023b). *Students Exactly Derive Quantization and its Universality*. *PhyDid B*.

- Carmesin, Hans-Otto (2023c). Students Derive an Exact Solution of the Flatness Problem. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2023d) Fundamental Solution to the Cosmological Constant Problem. *Results in Physic*. Preprint.
- Carmesin, Hans-Otto (2023e) Derivation of Dark Energy and of the Source of the Hubble Tension. *MNRAS*. Preprint.
- Carmesin, Hans-Otto (2024a). Students Learn the Fundamental Exact Unification of Gravity, Relativity, Quanta and Elementary Charge. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024b). Students Learn to Derive Universal Properties of Gravitons. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024c). Students Learn to Derive the Energy Density of Volume. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024d). Students Analyse the Impact of the H_0 Tension on the Worldview. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024e). Students Learn to Derive Nonlocality from Fundamental Physics. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024f). Students Learn to Solve the Cosmological Constant Problem. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024g). *How Volume Portions Form and Found Light, Gravity and Quanta*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Einstein, Albert (1905). Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, 17, pp 891-921.
- Einstein, Albert (1907). Über die vom Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, 328, pp 371-384.
- Einstein, Albert, Podolski, Boris, Rosen, Nathan (1935). Can the quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Phys. Rev.*, 47, pp 777-780.
- Einstein, Albert (1948). Quanten-Mechanik und Wirklichkeit - Quantum Mechanics and Reality. *Dialectica*. 2(3-4), pp 320-324.
- Hattie, John (2009). *Visible Learning*. London: Taylor and Francis Ltd.
- Jaques, V. et al. (2008) Wheeler's delayed-choice thought experiment: Experimental realization and theoretical analysis. *Ann. Phys. Fr*, 1, pp 1-4.
- Kircher, Ernst and Girwidz, Raimund and Häußler, Peter (2001) *Physikdidaktik*. 2. Ed. Berlin: Springer.
- Manning, A. G. et al. (2015) Wheeler's delayed-choice gedanken experiment with a single atom. *Nature physics*, 11, pp 540-542.
- Muckenfuß, Heinz (1995). *Lernen im sinnstiftenden Kontext*. Berlin: Cornelsen
- Niiniluoto, Ilkka and Sintonen, Matti and Wolenski, Jan (2004) *Handbook of Epistemology*. Dordrecht: Springer.
- Schiff, Joel L. (1991) *The Laplace Transform: Theory and Applications*. New York: Springer.

Acknowledgement

I am very grateful to I. Carmesin for many interesting discussions and for proofreading the manuscript. I am also grateful to Matthias Carmesin for interesting discussions.

Students Learn to Solve the Cosmological Constant Problem

Hans-Otto Carmesin*

*1Gymnasium Athenaeum, Harsefelder Straße 40, 21680 Stade

²Studienseminar Stade, Bahnhofstr. 5, 21682 Stade

³Universität Bremen, Fachbereich 1, Postfach 330440, 28334 Bremen

hans-otto.carmesin@t-online.de

Abstract

In everyday life, digital cameras and photovoltaic systems are ubiquitous. Thereby, quanta of the electromagnetic field are absorbed in order to gain visual information or electric energy. Our understanding of such quanta is rooted on the quantum field theory of electrodynamics, quantum electrodynamics, QED, in present-day physics. However, that QED predicts an energy density of the vacuum of $u_{\Lambda, \text{QED}} = 3.6 \cdot 10^{112} \text{ J/m}^3$. In general, the energy density of space u_{Λ} is related to the cosmological constant Λ proposed by Einstein (1917). In contrast to $u_{\Lambda, \text{QED}}$, the energy density of space, the dark energy, has been observed at the intergalactic space: $u_{\Lambda, \text{obs}} = 5.1 \cdot 10^{-10} \text{ J/m}^3$. That huge discrepancy presents a severe problem of QED, it is called the cosmological constant problem. How is that problem resolved?

This question is answered with help of the dynamics of volume in nature, the volume dynamics, VD, see Carmesin (2023a). The VD bridge general relativity and quantum physics. For these results, we provide a learning process, so that you can directly use the concept in your courses. The learning process has been tested in various learning groups, and experiences are reported.

1. Introduction

In order to understand the meaning of the energy density associated with space or volume, we analyse Einstein's (1917) idea of a cosmological constant Λ .

1.1. On Einstein's idea of Λ

The expansion of space can be derived from general relativity, see Einstein (1917), Friedmann (1922) and Lemaître (1927). Thereby, a uniform scaling of space is derived. In general, such a uniform scaling can be described by the time evolution of a scale radius $r(t)$, see Fig. (1): If space expands by a factor q , then r is multiplied by q . That time evolution can be described by this differential equation, DEQ:

$$\frac{\dot{r}^2}{r^2} = \frac{8\pi G}{3} \cdot (\rho_r + \rho_m + \rho_K + \rho_{\Lambda}) \quad \{1\}$$

Hereby, G is the universal constant of gravity. Moreover, four densities are distinguished, so that each density has a characteristic scaling behaviour as a function of the scale radius r :

ρ_r is the density of radiation,

ρ_m is the density of matter,

ρ_K is the density of a curvature parameter, it is zero according to observation, see Planck collaboration (2020), and as a result of a proof, see Carmesin (2023c),

ρ_{Λ} is the density of the cosmological constant, it does not change as a function of the scale radius r .

A present-day value of a quantity is marked by the subscript zero. Next, the densities in Eq. {1} are expressed as functions of the scale radius:

$$\frac{\dot{r}^2}{r^2} = \frac{8\pi G}{3} \cdot \left(\rho_{r,0} \frac{r_0^4}{r^4} + \rho_{m,0} \frac{r_0^3}{r^3} + \rho_{\Lambda} \right) \quad \{2\}$$

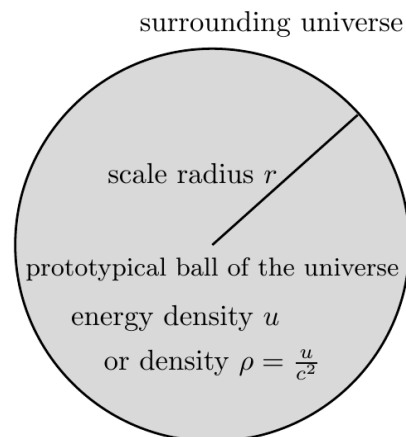


Fig. 1: A prototypical ball of the universe with a scale radius r and an energy density u . The energy density can be expressed in terms of a density or dynamic density $\rho = \frac{u}{c^2}$.

When ρ_{Λ} becomes essential, r is very large, so that ρ_r becomes very small, so we neglect it in section (1.1). We multiply by r^2 and apply the time derivative:

$$\frac{\partial}{\partial t} \dot{r}^2 = \frac{8\pi G}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_{m,0} \frac{r_0^3}{r^1} + \rho_{\Lambda} r^2 \right) \quad \{3\}$$

$$2\dot{r} \ddot{r} = \frac{8\pi G}{3} \left(-\rho_{m,0} \frac{r_0^3}{r^2} + 2\rho_{\Lambda} r \right) \dot{r} \quad \{4\}$$

In order to obtain a relative acceleration $\frac{\ddot{r}}{r}$, we divide by $2r\dot{r}$:

$$\frac{\ddot{r}}{r} = \frac{8\pi G}{3} \left(-\frac{1}{2}\rho_m + \rho_\Lambda \right) \quad \{5\}$$

Einstein (1917) had the idea of a static universe: If the ρ_Λ compensates $\frac{1}{2}\rho_m$ in the above DEQ, then r is not accelerated. Thus, if \dot{r} is zero initially, then \dot{r} remains zero and the universe is static.

For this purpose of a possibly static universe, Einstein (1917) proposed the cosmological constant Λ , corresponding to the density $\rho_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{8\pi G}$ and energy density $u_\Lambda = \frac{\Lambda c^4}{8\pi G}$, see e. g. Hobson (2006, section 15.1).

1.2. Epistemology

Kircher, Girwidz und Häußler (2001, section 4.1.2) describe the hypothetic deductive method. In the epistemological literature, this method is also called hypothetico-deductive testing (Niiniluoto, Sintonen, Wolenski 2004, S. 214). The method consists of three steps: In the hypothetic step, a thesis or hypothesis is suggested for testing. In the deductive step, implications are derived. In the third step, the implications are compared with observation. Hereby, in principle, a falsification should be possible. This method is used here as well as in Carmesin (2024a-g, 2017, 2018a-b, 2019a-b, 2020a-c, 2021a-d, 2022a-c, 2023a-f).

1.3. On the observed value Λ_{obs}

As a consequence of Eq. {5}, it was clear how ρ_Λ could be measured: If an observer would measure an accelerated expansion of space, then this could be explained by the dynamic density ρ_Λ , see e. g. Carmesin (2019a, 2020a). Indeed, Perlmutter et al. (1998) discovered the accelerated expansion of the universe.

Meanwhile, many observers confirmed the accelerated expansion of the universe. An especially precise measurement of ρ_Λ has been achieved with help of the cosmic microwave background, CMB, see Planck collaboration (2020). That group applied several evaluation procedures, whereby the so-called temperature-temperature correlation is especially robust and used here:

The Hubble constant H_0 is the present-day value of the Hubble parameter $H = \frac{\dot{r}}{r}$, the observed value is:

$$H_{0,obs} = 66.88 (\pm 0.92) \frac{\text{km}}{\text{s}\cdot\text{Mpc}} \quad \text{with}$$

$$1\text{Mpc} = 3.086 \cdot 10^{19} \text{ km}, \quad \text{thus,}$$

$$H_{0,obs} = 2.167 (\pm 0.03) \cdot 10^{-18} \frac{1}{\text{s}} \quad \{6\}$$

With it, the so-called critical density is as follows:

$$\rho_{cr.} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} = 8.4 \cdot 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \{7\}$$

The density divided by the critical density is the density parameter, $\Omega_\Lambda = \frac{\rho_\Lambda}{\rho_{cr}}$. Its observed value is:

$$\Omega_{\Lambda,obs} = 0.679 (\pm 0.013) \quad \{8\}$$

Note that this density parameter means that 67.9 % of all energy and matter in the universe is the energy of ρ_Λ , the so-called dark energy, see Huterer (1999), Planck collaboration (2020), Workman et al. (2022).

Thus, the observed value of ρ_Λ is:

$$\rho_{\Lambda,obs} = \Omega_{\Lambda,obs} \cdot \rho_{cr.} = 5.704 (\pm 0.27) \cdot 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \{9\}$$

$$u_{\Lambda,obs} = 5.133 (\pm 0.243) \cdot 10^{-10} \frac{\text{J}}{\text{m}^3} \quad \{10\}$$

1.4. On photon states

How are the photons described that the camera chip of a digital camera absorbs: In QED, photons with a circular frequency ω_μ are described by orthonormal photon states $|n_{\mu,p}\rangle$, with $n \in \{0, 1, 2, 3, \dots\}$:

$$\langle n_{\mu,p} | n_{\mu,p} \rangle = \delta_{\mu,\mu'} \quad \{11\}$$

Hereby, the subscript p marks photons. These states $|n_{\mu,p}\rangle$ are eigenfunctions of the number operator $\hat{N}_{\mu,p}$:

$$\hat{N}_{\mu,p} |n_{\mu,p}\rangle = n_{\mu,p} |n_{\mu,p}\rangle \quad \{12\}$$

The energy operator is as follows:

$$\hat{H} = \sum_\mu \left(\hat{N}_{\mu,p} + \frac{1}{2} \right) \cdot \hbar\omega_\mu \quad \{13\}$$

The matrix elements of \hat{H} are as follows:

$$H_{\mu,\mu'} = |n_{\mu,p}\rangle \left(n_\mu + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_\mu \delta_{\mu,\mu'} \delta_{p,p'} \langle n_{\mu,p} | \quad \{14\}$$

The Kronecker delta $\delta_{\mu,\mu'}$ indicates that only the diagonal matrix elements are nonzero. The Kronecker delta $\delta_{p,p'}$ indicates that quantum states $\langle n_{\mu,p} |$ with $p \neq p'$ of other quanta than photons provide a factor zero.

Consequently, zero photon state $|0_{\mu,p}\rangle$ of the circular frequency ω_μ has the following eigenvalue equation for the energy:

$$\hat{H} |0_{\mu,p}\rangle = \left(\hat{N}_{\mu,p} + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_\mu |0_{\mu,p}\rangle = \frac{1}{2} \hbar\omega_\mu |0_{\mu,p}\rangle \quad \{15\}$$

Thus, the eigenvalue of the energy is nonzero. It is called the zero-point energy:

$$ZPE_{\mu,p} = \frac{1}{2} \hbar\omega_\mu \quad \{16\}$$

Correspondingly, the zero photon state $|0_{\mu,p}\rangle$ is the zero-point oscillation, ZPO, of the electromagnetic field at the circular frequency ω_μ .

If there is a state $|n_{\mu,p}\rangle$, and if an additional photon is emitted, for instance by an LED, then the number

state is increased by one, so that the state $|n_{\mu,p} + 1\rangle$ occurs. This process is described with help of a raising operator $\hat{a}_{\mu,p}^+$ as follows:

$$\frac{1}{\sqrt{n_{\mu,p}+1}} \cdot \hat{a}_{\mu,p}^+ |n_{\mu,p}\rangle = |n_{\mu,p} + 1\rangle \quad \{17\}$$

The process of emission is expressed in the form of an reaction equation as follows:

$$\hbar\omega_{\mu} + |n_{\mu,p}\rangle = |n_{\mu,p} + 1\rangle \quad \{18\}$$

Hereby, the energy $\hbar\omega_{\mu}$ must be provided by the emitting device in the form of a photon. Similarly, if the camera chip absorbs a photon at a state $|n_{\mu,p}\rangle$, the processes can be described by the lowering operator $a_{\mu p}$ as follows:

$$\frac{1}{\sqrt{n_{\mu,p}}} \cdot \hat{a}_{\mu,p} |n_{\mu,p}\rangle = |n_{\mu,p} - 1\rangle \quad \{19\}$$

The process of absorption is expressed in the form of an reaction equation as follows:

$$|n_{\mu,p}\rangle = |n_{\mu,p} - 1\rangle + \hbar\omega_{\mu} \quad \{20\}$$

Hereby, the energy $\hbar\omega_{\mu}$ of one photon must be taken up by the absorbing device.

In this manner, an LED can increase the number of photons in the state $|n_{\mu,p}\rangle$, whereby the circular frequency ω_{μ} corresponds to the colour of the LED. Analogously, a colour – pixel corresponding to ω_{μ} can decrease the number of photons in the state $|n_{\mu,p}\rangle$.

So far, QED describes the emission and absorption of photons in a very intuitive manner that is also in precise accordance with observation, see e. g. Ballentine (1998), see also Carmesin (2021a, 2023a, 2024a-d) for a derivation of the above algebra.

However, the zero-point energy corresponds to an energy density of the vacuum of $u_{\Lambda, \text{QED}} = 5.9 \cdot 10^{111} \text{ J/m}^3$, see e. g. Ballentine (1998). This is in clear contrast to the energy density of intergalactic space of $u_{\Lambda, \text{obs}} = 5.1 \cdot 10^{-10} \text{ J/m}^3$. This huge discrepancy is called cosmological constant problem, CCP.

1.5. Aim of the paper

The aim of the paper is to show how students or interested people can derive a solution to the CCP.

1.6. Organization of the paper

A didactic analysis including a professional analysis is provided in section 2. The learning process including experiences with learning groups are shown in part 3. We discuss our findings in section 4. Many useful and insightful related results are presented in my parallel papers in the report about the DPG conference in March 2024 in Greifswald, see Carmesin (2024a-g).

2. Didactic analysis

In a first didactic step in section (1.1), Einstein's (1907) introduction of the cosmological constant is presented. Thereby, the expansion of space according to Eq. {1} has been treated before. On that basis, this step has no special learning barrier. This step is essential, in order to have a clear concept of the cosmological constant and its density.

In a second didactic step in section (1.3), the observed values are presented. This step has no special learning barrier. The step is essential in order to understand the cosmological constant problem, CCP.

In a third didactic step in section (1.4), the ladder operators and number states are introduced for the case of electromagnetic radiation. This step is intuitive. Spectra are well-known from atoms, for instance, see e. g. Carmesin (2020c). It is similar to the states Thus, this step has no special learning barrier. The step is essential in order to explain why the volume does contribute to ρ_{Λ} , but the electromagnetic radiation does not.

2.1. Derivation of the observed $u_{\Lambda, \text{obs}}$

2.1.1. Physical analysis

Carmesin (2023a, 2024a-f) analysed the dynamics of the volume in nature, the volume-dynamics, VD. It includes the local formation of volume, LFV. With it, Carmesin (2021a, 2023a, 2024c) derived the energy density of volume as follows:

Theorem: Law of the derived energy density of volume in an empty universe.

In a universe consisting of volume only, the process of GFV from LFV causes the following energy density of volume:

$$u_{\Lambda, \text{theo}} = \frac{c^2 H_0^2}{4\pi G} = u_{\text{vol}}, \quad \text{thus,} \quad \{21\}$$

$$\rho_{\Lambda, \text{theo}} = \frac{H_0^2}{4\pi G} = 5.600 (\pm 0.155) \cdot 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \{22\}$$

The density is a consequence of the process of formation of volume since the Big Bang until the present-day time t_0 .

If that process ranges from the Big Bang to another time $t_1 \neq t_0$, then that process provides the same density of volume.

This result is in precise accordance with observation.

Proofs are presented in Carmesin (2021a, 2023a, 2024c-d). This result provides a solution to the CCP.

Next, we analyse, why the energy density $u_{\Lambda, \text{QED}}$ does not contribute to the energy density $u_{\Lambda, \text{obs}}$ observed at the intergalactic space, see Perlmutter (1998).

2.1.2. Didactic analysis

In a first didactic step, the derived energy density of volume is presented and discussed. That derivation and the corresponding didactic steps are analysed in Carmesin (2024c).

2.2. $u_{\Lambda, \text{QED}}$ does not contribute to the density ρ_r

2.2.1. Physical analysis

The density ρ_r in Eq. {1} represents the classical density of the electromagnetic radiation and of possible other components that propagate at the velocity of light, see e. g. Planck collaboration (2020) or Workman (2022).

The density $u_{\Lambda, \text{QED}}$ represents a density of a zero-point energy, ZPE, see e. g. Ballentine (1998).

For the case of the VD, it is shown that the zero-point energy ZPE_ω with a circular frequency ω is minimal energy that an object can have according to the Heisenberg uncertainty relation, see Carmesin (2024b, section 2.5). That derivation does not use the VD. Consequently, that result holds for all quantum objects. In particular, that fact holds for the zero-point energies ZPE_ω that provide the energy density $u_{\Lambda, \text{QED}}$.

However, the classical expectation value of the zero-point energies ZPE_ω and, consequently, of the energy density $u_{\Lambda, \text{QED}}$ are zero:

$$\langle u_{\Lambda, \text{QED}} \rangle_{\text{classical}} = 0 \quad \{23\}$$

As a consequence, that energy density does not contribute to the density ρ_r in Eq. {1}.

The above Eq. {23} can also be derived as follows: The VPs can form mass in the process of a phase transition, see Higgs (1964), Carmesin (2021a-b). Similarly, the VPs cause the elementary charge as well as the electromagnetic field that are generated by an elementary charge, for instance, see Carmesin (2021c, 2022b). Moreover, a VP exhibits an energy density of its gravitational field and a generalized kinetic energy density, whereby the sum of both, the complete energy density, is zero, see (Carmesin 2021a, 2023a, 2024a-d). This property is not changed during the above phase transitions, so that Eq. {23} holds in the following form:

$$u_{\Lambda, \text{QED}, \text{complete}} = 0 \quad \{24\}$$

2.2.2. Didactic analysis

In a first didactic step, it is explained with help of topics derived in advance, why the classical energy of a ZPE is zero, and why the complete energy of a ZPE of electromagnetic radiation is zero. As no derivation is required, there is no special learning barrier in this step.

2.2.3. $u_{\Lambda, \text{QED}}$ does not provide LFV or GFV

The complete energy density $u_{\Lambda, \text{QED}, \text{complete}}$ of the zero – point oscillations of the electromagnetic field is zero, see Eq. {24}, and $u_{\Lambda, \text{QED}, \text{complete}}$ includes no available energy ($n_{\mu'} \geq 1$), that would be available for a transformation. Consequently, $u_{\Lambda, \text{QED}, \text{complete}}$ does not provide any LFV or GFV. For comparison, the dynamic density $\rho_{r,0}$ includes available energy ($n_{\mu'} \geq 1$) and contributes to the (homogeneous, see

Carmesin (2023a,2024d,g)) dynamic density of the universe, and it provides GFV. For comparison, the VD provides the energy density of volume u_{vol} in accordance with observation, see Carmesin (2024c,g).

2.2.4. Physical analysis

(1) Dynamic density of volume in Eq. {1}:

In Eq. {1}, the density ρ_Λ contributes to the squared Hubble rate H^2 , and Einstein defined ρ_Λ by that measurable contribution. Carmesin (2023a, 2024c-d) showed that the main part of the observed value $\rho_{\Lambda, \text{obs}}$ is the dynamic density of the volume in nature, ρ_{vol} .

(2) ρ_{vol} causes local formation of volume:

The density ρ_{vol} provides the local formation of volume, LFV, see the law of locally formed volume, LFV in Carmesin (2023a, 2024a-d). The squared rate of the LFV in a direction \mathbf{j} is proportional to the field as follows, see Carmesin (2024a):

$$\dot{\xi}_{L,jj}^2 c^2 = G_{\text{gen},j}^2 \quad \{25\}$$

Hereby, $G_{\text{gen},j}$ is the component j of the generalized field.

(3) How ρ_{vol} causes the squared field:

Firstly, we provide a semiclassical description: A VP of minimal energy causes field \vec{G}_{gen} in its vicinity, corresponding to a gradient of relative additional volume. In this manner, that VP generates LFV.

Secondly, we provide a description of the process of LFV at the level of ladder operators:

A zero-point energy ZPE_ω of a volume-portion, VP, causes a nonzero squared field according to the law of the nonzero squared field in Carmesin (2024d): The squared field exhibits the following nonzero expectation value:

$$\langle n_\mu | \vec{G}_{\text{gen}}^2 | n_{\mu'} \rangle = G \int d\mu \hbar \omega_\mu \left(n_\mu + \frac{1}{2} \right) \delta_{\mu\mu'} \quad \{26\}$$

The matrix element $\langle n_\mu | \vec{G}_{\text{gen}}^2 | n_{\mu'} \rangle$ in the above Eq. can be expressed by the ladder operators, see Carmesin (2024d):

$$\langle n_\mu | \vec{G}_{\text{gen}}^2 | n_{\mu'} \rangle = \frac{\hbar c^2 G}{2\omega_\mu} \int d\mu \int d\mu' \vec{k}_\mu \vec{k}_{\mu'} f_\mu^{\text{cc}} f_{\mu'}^{\text{cc}} M_{\mu\mu'} \quad \{27\}$$

$$M_{\mu\mu'} := \langle n_\mu | (a_\mu^\dagger + a_\mu) (a_{\mu'}^\dagger + a_{\mu'}) | n_{\mu'} \rangle \quad \{28\}$$

In this manner, the VPs of minimal energy, cause other VPs of minimal energy.

(4) States of the ZPE_ω that provide $u_{\Lambda, \text{QED}}$:

The ladder operators in Eq. {28} act upon states of volume-portions, see Carmesin (2024b). Consequently, the application of such a ladder operator upon a state of the electromagnetic field provides zero as a result:

$$a_\mu |0_{\mu,p}\rangle = 0 \quad \& \quad a_\mu^\dagger |0_{\mu,p}\rangle = 0 \quad \{29\}$$

Consequently, the states $|0_{\mu,p}\rangle$ do not cause LFV.

As a consequence of sections (2.2) and (2.3), the zero-point energy of the electromagnetic field does not

provide the formation of additional volume in Eq. {1}. Thus, the zero-point energy of the electromagnetic field does not contribute to the squared Hubble parameter in Eq. {1}. Consequently, the zero-point energy of the electromagnetic field does not contribute to the measured value $\rho_{\Lambda,obs}$, as Einstein (1917) defined $\rho_{\Lambda,obs}$ by its effect upon the Hubble rate in Eq. {1}.

However, the zero-point energy of the electromagnetic field has no effect upon the Hubble parameter, so that ZPE is not part of $\rho_{\Lambda,obs}$. Thus, that ZPE is not part of ρ_{Λ} , as that density relies on the observed value $\rho_{\Lambda,obs}$.

We summarize our result:

Theorem: The electromagnetic ZPE forms no volume.

(1) As the electromagnetic ZPE has no classical energy, it is not part of ρ_r in Eq. {1}. So that ZPE does not form volume via ρ_r .

(2) As the ladder operators of the VD applied to a state of electromagnetic ZPE $|0_{\mu,p}\rangle$ provides zero, that state $|0_{\mu,p}\rangle$ does not cause LFV. Thus, that state does not contribute to ρ_{Λ} by the process of LFV.

(3) Consequently, the electromagnetic ZPE does not contribute to the Hubble rate in Eq. {1}. Accordingly, the electromagnetic ZPE is presumably compensated by a corresponding negative energy. Similarly, the kinetic energy of the ZPE of volume is compensated by a negative energy.

(4) This explains why the energy density u_{vol} is part of u_{Λ} , but the energy density $u_{\Lambda,QED}$ is not part of u_{Λ} .

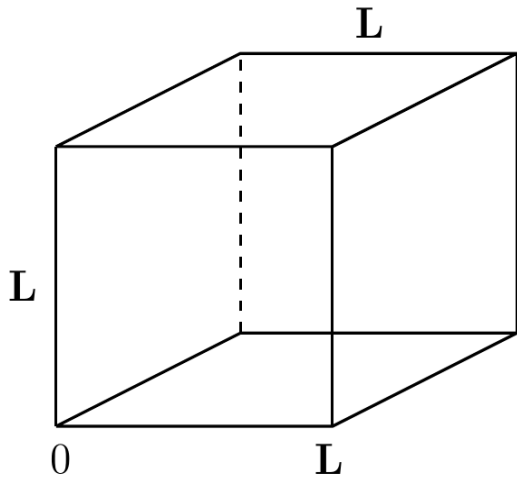


Fig. 2: A cube with length L of the edges is used in order to derive the energy density $u_{\Lambda,QED}$.

2.3. Energy density of electromagnetic ZPOs

2.3.1. Physical analysis

The energy density $u_{\Lambda,QED}$ corresponds to a vanishing complete energy density, see Eq. {24}. Consequently, all possible modes can form, up to a maximal wave vector k_{max} . The integral of these modes in a cube of

length L , see Fig. (2), provides the energy density, see e. g. Ballentine (1998), Carmesin (2020a):

$$u_{\Lambda,QED} = \frac{\hbar c \cdot k_{max}^4}{8\pi^2} \quad \{30\}$$

The largest possible value of k_{max} is provided with help of the Planck length $L_P = 1.616 \cdot 10^{-35} m$. If a ball with the radius of one L_P is at each corner of the cube in Fig. (2), then $L = 2L_P$, and $k_{max} = \frac{\pi}{L}$. In that case, the energy density is as follows:

$$u_{\Lambda,QED} = \frac{\hbar c \cdot k_{max}^4}{8\pi^2} = 3.6 \cdot 10^{112} \frac{J}{m^3} \quad \{31\}$$

2.3.2. Didactic analysis

In a first didactic step, the maximal possibly energy density is calculated. This step has no special learning barrier, as the equation is taken from the literature. This step is valuable, as the students become competent in analysing essential lengths and energy densities on their own.

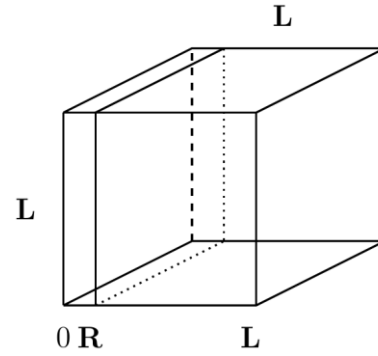


Fig. 3: A cube with length L of the edges, and with a plate at R and parallel to the faces of the cube. Two parallel conducting plates at $x = 0$ and $x = R$, each with area L^2 attract each with the Casimir force $F_{Casimir} = \frac{\hbar c \pi^2 L^2}{240R^4}$.

2.4. Observed Casimir force

2.4.1. Physical analysis

The zero-point oscillations of the electromagnetic field are reflected at two parallel electrically conducting plates, see Fig. (3). Thereby, a momentum transfer takes place, and a force is exerted upon the plates, see Casimir (1948), Ballentine (1998). Schmidt et al. (2022) observed such forces at plates with a distance of $h = 100 \text{ nm}$. The corresponding value of k_{max} is as follows:

$$k_{max} = \frac{\pi}{100 \text{ nm}} = 3.14 \cdot 10^7 \frac{1}{m} \quad \{32\}$$

With it, the corresponding energy density is as follows:

$$u_{\Lambda,QED} = \frac{\hbar c \cdot k_{max}^4}{8\pi^2} = 390.3 \frac{J}{m^3} \quad \{33\}$$

Thus, the observed value of $u_{\Lambda,QED}$ is clearly larger than the observed value of the energy density of the cosmological constant:

$$u_{\Lambda,obs} = 5.133 (\pm 0.243) \cdot 10^{-10} \frac{J}{m^3} \quad \{34\}$$

2.4.2. Didactic analysis

In a didactic step, the energy densities in Eqs. {30-34} are derived. Thereby, the comparison of Eqs. {3,33} and {34} provides a cognitive conflict, the cosmological constant problem.

This step is insightful, as it shows that values of $u_{\Lambda, \text{QED}}$, that are based on observation, are far beyond the value of the energy density that has been observed at intergalactic space, $u_{\Lambda, \text{obs}}$.

2.5. Explanation of the Casimir force

2.5.1. Physical analysis

(1) The Casimir force in Fig. (3) is explained by the transfer of momentum. Thereby, the momentum corresponds to the kinetic energy: $E_{kin} = p \cdot c$. Consequently, this momentum transfer takes place, irrespective of the value of the complete energy density:

$$\frac{\hbar c \pi^2 L^2}{240 R^4} = F_{\text{Casimir}} = F_{\text{reflection}} = \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad \{35\}$$

That force is derived from Eq. {30}, see Carmesin (2024g).

2.5.2. Didactic analysis

In a first didactic step, the Casimir force is derived and confirmed by observations, see Ballentine (1998), in order to show that zero – point oscillations of the electromagnetic field are measurable.

In a second didactic step, the complete energy density $u_{\Lambda, \text{QED}, \text{complete}} = 0$ in Eq. {24} is derived. Thus, the VD clarifies, why the electromagnetic zero – point oscillations have zero complete energy density.

In a third didactic step, the students realize that the derived energy density of volume u_{vol} is in accordance with observation. Thus, the VD clarifies, how the observed energy density of volume and outer space is formed. As these results can be derived, there is no special learning barrier in principle, in this step.

3. Experience: learning process and learners

The experiences with learning groups have been documented in terms of photographs of the blackboard and with help of additional reports. These are summarized as follows.

The topic has been presented in general studies courses at the university. The learning process was enriched by a permanent discussion of the achieved results and by exercises about the derived relations. In particular, the learning process took place as follows:

In first unit, the concepts of Einstein's (1917) cosmological constant and of the corresponding dynamics density and energy density are treated. That unit requires 30 minutes, if the dynamics in Eq. {1} have already been introduced. The students like this topic, as the source of the accelerated expansion is very inspiring and insightful.

In a second unit, the observed data are presented and discussed. With it, the CCP becomes evident. The

students like this step, as it makes transparent a deep problem of present-day physics. The unit requires 15 minutes.

In a third unit, the ladder operators are introduced in a descriptive manner. Some students know already a fundamental derivation for the case of volume in nature, see Carmesin (2024a-d). The students like that method, as it is very intuitive, and since it clarifies the spectrum. The unit requires 45 to 90 minutes, with variations depending on the depth of explanations or derivations.

In a fourth unit, the results derived for the energy density of volume are summarized. The students like this unit, as the mentioned process of the formation of volume is very insightful, see e. g. Carmesin (2024c-d). This unit requires 30 minutes.

In unit five, the energy density of $u_{\Lambda, \text{QED}}$ is summarized and explained. The students like this unit, as it is very insightful to realize that it is not obvious to derive a complete energy density. The unit requires 20 to 45 minutes.

In unit six, it is clarified, why the VPs cause LFV, but the ZPE of the electromagnetic field does not. At a first semiclassical level, the point is quite evident. At the level of ladder operators, the point is derived in a more formal manner. The students discuss the essential differences. This makes sense, as the differences are fundamental. Indeed, an even more fundamental derivation can be achieved on the basis of a derivation of the elementary charge from VPs, see Carmesin (2021c, 2022b). The unit requires 45 to 90 minutes.

In unit seven, values of $u_{\Lambda, \text{QED}}$ are analysed. The students like such calculations, as they are quite simple and insightful. The unit requires 20 minutes.

In unit eight, values of $u_{\Lambda, \text{QED}}$ are analysed with help of observed Casimir forces. The students like such calculations, as they are very simple and insightful. The unit requires 20 minutes.

In unit nine, the principle underlying the Casimir force is derived. The students like that derivation, as it is very clear, and as the Casimir force provides clear empirical evidence. The unit requires 15 minutes.

A quantum gravity group of a research club meets 90 minutes each week. Thereby topics such as quantum computers, cosmology, astrophysics or quantum gravity are treated. In that group, essentially the same learning process has been treated in 2023. Also in this case, all questions have been discussed directly, and exercises have been performed.

Altogether, in all learning groups, the learners asked questions. These have been discussed directly in a fully sufficient manner. Moreover, exercises have been used in order to achieve sufficient training, metacognitive activity and familiarity with the new concepts. In some of the exercises, the students were instructed so that they were able to achieve parts of the derivations on their own. This is an efficient test of

the ability of the students, and it provides self-esteem to the students in a convincing manner.

4. Discussion

Photovoltaics are ubiquitous. More generally, quantum technologies are essential for our everyday life. Casimir forces, for instance, are essential in nanotechnologies, see e. g. Gong et al. (2021) Accordingly, a fundamental problem of physics, the cosmological constant problem CCP, related to such a relevant topic, is interesting and inspiring.

Indeed, we can solve the CCP on the basis of the dynamics of volume in nature. This result is very inspiring, as we solved also other fundamental problems on the basis of that volume dynamics, see e. g. Carmesin (2023a, 2024a-g).

The learning process is based on the hypothetic deductive method, see the section about the epistemology. Such a testing of a hypothesis and such a deduction from prior knowledge have a high learning efficiency, see Hattie (2006). Moreover, the learning process uses everyday life contexts, so that the learning is meaningful, see Muckenfuß (1995) and achieves an additional high learning efficiency, see Hattie (2006). In the particular case, applications to quantum cryptography and quantum computing are very motivating. For more interesting examples, see Carmesin (2020c).

The learning process has been tested in several learning groups. The learning process includes nine units, some of which are quite short. This indicates that many fields of physics are combined or unified. Such use of prior knowledge provides an especially high learning efficiency, see Hattie (2006). This learning process has been tested at university courses as well as in research club courses. In all these learning groups, the students were able to perform exercises and to use instructions in order to derive parts of the theory. Thus, the topic provides a large amount of self-esteem to the learners.

5. Literature

Burisch, C. et al. (2022). *Universum Physik Gesamtband SII*. Berlin: Cornelsen Verlag.

Ballentine, L. E. (1998). *Quantum Mechanics*. London and Singapore: World Scientific Publishing.

Carmesin, Hans-Otto (2017a). *Vom Big Bang bis heute mit Gravitation: Model for the Dynamics of Space*. Berlin: Verlag Dr. Köster.

Carmesin, Hans-Otto (2017b). *Schülerinnen und Schüler entdecken Gravitationswellen mithilfe von Computereperimenten*. *PhyDid B*, pp 11-18.

Carmesin, Hans-Otto (2018a). *Entstehung dunkler Energie durch Quantengravitation - Universal Model for the Dynamics of Space, Dark Matter and Dark Energy*. Berlin: Verlag Dr. Köster.

Carmesin, Hans-Otto (2018b). *Entstehung der Raumzeit durch Quantengravitation - Theory for the Emergence of Space, Dark Matter, Dark Energy and Space-Time*. Berlin: Verlag Dr. Köster.

Carmesin, Hans-Otto (2019a). *Die Grundschrwingungen des Universums - The Cosmic Unification - With 8 Fundamental Solutions based on G, c and h*. Berlin: Verlag Dr. Köster.

Carmesin, Hans-Otto (2019b). *A Novel Equivalence Principle for Quantum Gravity*. *PhyDid B*, pp 1-9.

Carmesin, Hans-Otto (2020a). *The Universe Developing from Zero-Point Energy: Discovered by Making Photos, Experiments and Calculations*. Berlin: Verlag Dr. Köster.

Carmesin, Hans-Otto (2020b). *Explanation of the Rapid Enlargement of Distances in the Early Universe*. *PhyDid B*, pp 9-17.

Carmesin, Hans-Otto et al. (2020). *Universum Physik, Qualifikationsphase, Niedersachsen*. Berlin: Cornelsen Verlag.

Carmesin, Hans-Otto (2021a). *Quanta of Spacetime Explain Observations, Dark Energy, Graviton and Nonlocality*. Berlin: Verlag Dr. Köster.

Carmesin, Hans-Otto (2021b). *Cosmological and Elementary Particles Explained by Quantum Gravity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.

Carmesin, Hans-Otto (2021c). *The Elementary Charge Explained by Quantum Gravity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.

Carmesin, Hans-Otto (2021d). *Lernende erkunden die Raumzeit*. *Der Mathematikunterricht*. 67(2), 47-56.

Carmesin, Hans-Otto (2022a). *Quantum Physics Explained by Gravity and Relativity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.

Carmesin, Hans-Otto (2022b). *Explanation of Quantum Physics by Gravity and Relativity*. *PhyDid B*, pp 425-438.

Carmesin, Hans-Otto (2022c). *How Excitations of Vacuum Form Matter*. *PhyDid B*, pp 447-458.

Carmesin, Hans-Otto (2022d). *The Electroweak Interaction Explained by and Derived from Gravity and Relativity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.

Carmesin, Hans-Otto (2023a). *Geometric and Exact Unification of Spacetime, Gravity and Quanta*. Berlin: Verlag Dr. Köster.

Carmesin, Hans-Otto (2023b). *Students Exactly Derive Quantization and its Universality*. *PhyDid B*.

Carmesin, Hans-Otto (2023c). *Students Derive an Exact Solution of the Flatness Problem*. *PhyDid B*.

Carmesin, Hans-Otto (2023d) *Fundamental Solution to the Cosmological Constant Problem*. *Results in Physic*. Preprint.

Carmesin, Hans-Otto (2023e) *Derivation of Dark Energy and of the Source of the Hubble Tension*. *MNRAS*. Preprint.

Carmesin, Hans-Otto (2024a). *Students Learn the Fundamental Exact Unification of Gravity, Relativity, Quanta and Elementary Charge*. *PhyDid B*.

Carmesin, Hans-Otto (2024b). *Students Learn to Derive Universal Properties of Gravitons*. *PhyDid B*.

Carmesin, Hans-Otto (2024c). *Students Learn to Derive the Energy Density of Volume*. *PhyDid B*.

- Carmesin, Hans-Otto (2024d). Students Analyse the Impact of the H_0 Tension on the Worldview. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024e). Students Learn to Derive Nonlocality from Fundamental Physics. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024f). Students Learn to Solve the Cosmological Constant Problem. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024g). *How Volume Portions Form and Found Light, Gravity and Quanta*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Casimir, Hendrik (1948). On the attraction between two perfectly conducting plates. *Proceedings of the Section of Sciences, Koninklijke Nederlandsche Akademie van Wetenschappen*, 51, pp 793-795.
- Einstein, Albert (1907). Über die vom Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie. *Zur Elektrodynamik bewegter Körper. Annalen der Physik*, 328, pp 371-384.
- Einstein, Albert (1917). Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, pp 142-152.
- Friedmann, Albert (1915). Die Feldgleichungen der Gravitation. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, pp 844-847.
- Gong, Tao et al. (2021) Recent progress in engineering the Casimir effect – applications to nanophotonics, nanomechanics, and nanochemistry. *Nanophotonics*, 10, pp 523-536.
- Hattie, John (2009). *Visible Learning*. London: Taylor and Francis Ltd.
- Higgs, P. W. (1964). Broken Symmetries, Massless Particles and Gauge Fields. *Phys. Lett.*, pp 132-133.
- Hobson, M. P. and Efstathiou, G. P. and Lasenby, A. N. (2006) *General Relativity*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Huterer, Dragan and Turner, Michael, S. (1999). Prospects for probing the dark energy via supernova distance measurements. *Phys. Rev. D*, 60, pp 081301-081306.
- Kircher, Ernst and Girwidz, Raimund and Häußler, Peter (2001) *Physikdidaktik*. 2. Ed. Berlin: Springer.
- Lemaitre, Albert (1915). Die Feldgleichungen der Gravitation. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, pp 844-847.
- Muckenfuß, Heinz (1995). *Lernen im sinnstiftenden Kontext*. Berlin: Cornelsen
- Niiniluoto, Ilkka and Sintonen, Matti and Wolenski, Jan (2004) *Handbook of Epistemology*. Dordrecht: Springer.
- Perlmutter, Saul et al. (1998) Discovery of a Supernova Explosion at Half the Age of the Universe. *Nature*, 391, pp 51-54.
- Planck-Collaboration (2020) Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, pp 1-73.
- Schmidt, Falko et al. (2022) Tunable critical Casimir forces counteract Landau-Lifschitz attraction. *Nature Physics*, 19, pp 271-278.
- Workman, R. L. et al. (2022) Review of Particle Physics (by Particle Data Group). *Prog. Theor. Exp. Phys.*, pp 1-2270.

Acknowledgement

I am very grateful to I. Carmesin for many interesting discussions and for proofreading the manuscript. I am also grateful to Matthias Carmesin for interesting discussions.

Zur Rolle mathematischer Repräsentationen für das Verständnis quantenphysikalischer Prinzipien

Moritz Förster*, Gesche Pospiech*

*Technische Universität Dresden, Professur für Didaktik der Physik
moritz.foerster@tu-dresden.de, gesche.pospiech@tu-dresden.de

Kurzfassung

Mathematische Strukturen sind wesentlicher Bestandteil der Beschreibung von Quantenphysik. Nicht zuletzt wird die Quantentheorie als eine der wichtigsten physikalischen Theorien überhaupt bezeichnet und Mathematik als wesentlich für ein konzeptionelles Verständnis angesehen. Dementsprechend scheint es plausibel, dass mathematische Beschreibungen schon in der Schule zu einem Verständnis quantenphysikalischer Konzepte beitragen können, weshalb es erstrebenswert ist, den Einfluss mathematischer Beschreibungen auf das Verständnis im Kontext der Schule umfassend zu untersuchen.

In einer qualitativen Laborstudie werden die Akzeptanz gegenüber einer mathematisch formalen Beschreibung sowie die Rolle mathematischer Repräsentationen für das Verständnis quantenphysikalischer Prinzipien untersucht. Dabei werden in einem ersten Schritt Lehramtsstudierende und Lehrkräfte befragt, worauf in einem zweiten Schritt die Befragung von Lernenden der Sekundarstufe II folgen soll. Ergebnisse der Befragung von Lehramtsstudierenden werden hier vorgestellt.

1. Motivation und theoretischer Rahmen

Die Forschung und Entwicklung in Gebieten, welche sich quantenphysikalische Eigenschaften zu Nutze machen, haben in den vergangenen Jahrzehnten weitreichende Fortschritte erzielt. Insbesondere moderne Quantentechnologien erleben mit der „Zweiten Quantenrevolution“ einen Aufschwung und bekommen auch eine größer werdende ökonomische Relevanz (Pospiech, 2021). Betrachtet man diese Entwicklungen, so wird deutlich, dass die Frage nach einer adäquaten Behandlung moderner Quantenphysik schon in der Schule immer weiter an Bedeutung gewinnt.

1.1. Moderne Ansätze zur Behandlung von Quantenphysik in der Schule

In den vergangenen Jahren finden sich in der didaktischen Entwicklungs- und Forschungsarbeit diverse Ansätze zur Behandlung moderner Quantenphysik in der Schule, in welchen neben dem Einbezug aktueller Entwicklungen auch insbesondere nahegelegt wird, auf eine historische Einführung der Quantenphysik zu verzichten (z. B. Bitzenbauer, 2020; Müller, 2016).

In den Fokus rücken dabei solche Zugänge, die sich auf die Einführung von Quantenphysik über Zwei-Zustands-Systeme konzentrieren, also solchen quantenphysikalischen Systemen, welche nach einem quantenphysikalischen Messprozess nur zwei mögliche Ergebnisse aufweisen. Hierzu wurden in den vergangenen Jahren diverse Beiträge veröffentlicht (z. B. Dür & Heusler, 2012; Micheli & Stefanel, 2021;

Sadaghiani & Munteanu, 2015). Entscheidend ist, dass solche Zugänge aus didaktischer Sicht maßgeblich aus zwei Gründen Potential zur Einführung von Quantenphysik in der Schule bieten.

1) Aktualität der Thematik

Quantenphysikalische Zwei-Zustands-Systeme sind als Qubits insbesondere für die Quanteninformatik relevant. Damit ermöglicht ihre Behandlung in besonderer Weise die Einbeziehung technologischer sowie gesellschaftlich relevanter Kontexte, wodurch ein wesentlicher Beitrag zur Allgemeinbildung ermöglicht wird.

Insbesondere kann bei Lernenden somit ein Bewusstsein über derzeitige Entwicklungen und deren Relevanz erzeugt und nicht zuletzt auch fächerübergreifend unterrichtet werden (Pospiech, 2021). Darüber hinaus könnte auch die mediale Präsenz der Quanteninformatik und des Quantum Computings zu einem hohen Interesse bei Lernenden und der Motivation führen, sich mit der Thematik beschäftigen zu wollen.

2) Inhaltlich-didaktische Potentiale

Die Einführung der Quantenphysik über Zwei-Zustands-Systeme bringt inhaltliche Potentiale in dreierlei Hinsicht mit sich.

Zunächst bietet sie die Möglichkeit der Behandlung wesentlicher und grundlegender Prinzipien der Quantenphysik, wie dem Superpositionsprinzip sowie dem quantenphysikalischen Messprozess, der Unbestimmtheit und der Verschränkung (Dür & Heusler, 2012; Pospiech, 2021).

Des Weiteren werden Lernschwierigkeiten in der Unterscheidung beziehungsweise Abgrenzung von Quantenphysik und klassischer Physik umgangen. Insbesondere ist die Diskussion von Wellen- und Teilcheneigenschaften sowie die Problematik der Behandlung eines Welle-Teilchen-Dualismus (z. B. Bitzenbauer, 2020) nicht notwendig. Dies ermöglicht einen inhaltlichen Fokus auf die Behandlung der genannten und in Abbildung 1 zusammengefassten Prinzipien.

Prinzip I Superposition	Prinzip II Messprozess
Prinzip III Unbestimmtheit	Prinzip IV Verschränkung

Abb. 1: Grundlegende Prinzipien der Quantenphysik.

Nicht zuletzt bietet sich außerdem die Gelegenheit, die Rolle der Mathematisierung der Quantenphysik explizit zu thematisieren. Die mathematische Beschreibung von quantenphysikalischen Zwei-Zustands-Systemen ist insofern einfach, als dass sich diese durch zweidimensionale Vektorräume beschreiben lassen. Insbesondere wird zur Behandlung dieser Systeme keine Quantenphysik im Ortsraum benötigt, sodass keine Behandlung von Wellenfunktionen notwendig ist (Pospiech, 2021). Dies ermöglicht in einfacher Form eine mathematische Behandlung der Inhalte auch in der Sekundarstufe II.

1.2. Mathematische Beschreibungen in der Quantenphysik

Betrachtet man den Stellenwert, welchen eine mathematisch formale Behandlung von Physik gerade in der Quantenphysik hat, sowie die Tatsache, dass in der Fachphysik mathematische Strukturen der Quantenphysik inhärent sind, lässt sich die Mathematik als wesentlicher Teil des konzeptionellen Verständnisses ansehen (Pospiech et al., 2021).

Entsprechend scheint es plausibel, dass auch Lernenden der Sekundarstufe II ein mathematischer Formalismus, insbesondere unter Betrachtung von Zwei-Zustands-Systemen, helfen kann, ein tiefergehendes, konzeptionelles Verständnis von Quantenphysik aufzubauen.

Pospiech et al. (2021) heben die Rolle der Mathematik für die Schul-Quantenphysik hervor und beschreiben insbesondere, welche Chancen und Möglichkeiten eine mathematisch formale Behandlung von Quantenphysik auch in der Schule bieten kann. Die Autor:innen betonen, dass durch mathematische Betrachtungen qualitative Ergebnisse sowie physikalische Konzepte und Prozesse konsistent interpretiert sowie Vorhersagen getroffen werden können. Darüber hinaus können mathematische Beschreibungen den Aufbau mentaler Modelle ergänzen.

Nicht zuletzt scheint es vielversprechend, mittels mathematischer Ansätze nicht-klassische Denkweisen zu fördern und einen Wechsel hin zu quantenphysikalischen Denkweisen zu ermöglichen, da den

grundlegenden Prinzipien eine enge Verknüpfung von Mathematik und Physik innewohnt.

Diesen theoretischen Überlegungen, welche die Beforschung des Beitrags einer mathematisch formalen Behandlung der Physik von quantenphysikalischen Zwei-Zustands-Systemen in der Schule plausibel erscheinen lassen, steht gegenüber, dass die Thematik zumindest in Hinblick auf die Schule empirisch relativ unerforscht ist. Zwar gibt es verschiedene Arbeiten, welche aus theoretischen didaktischen Überlegungen heraus Konzepte zur mathematisch formalen Behandlung von Quantenphysik in der Schule beschreiben (z. B. Dür & Heusler, 2012; Pospiech, 2004) oder bereits in kleinem Rahmen evaluierte Unterrichtsgänge (Michellini & Stefanel, 2021), allerdings sind empirische Untersuchungen nur vereinzelt anzutreffen.

Empirische Forschung zur Rolle der Mathematik für ein quantenphysikalisches Verständnis lässt sich dagegen vor allem im Hochschulbereich finden (Singh & Marshman, 2015).

2. Zielsetzung und Forschungsgegenstand

Anknüpfend an die dargestellten Überlegungen zur Mathematisierung soll der Beitrag einer mathematisch formalen Beschreibung von Quantenphysik zum Verständnis quantenphysikalischer Konzepte untersucht werden, in Hinblick auf ein für die Sekundarstufe II geeignetes Niveau. Dabei wird die Polarisation von Einzelphotonen als Zwei-Zustands-System genutzt und ein reduzierter Dirac-Formalismus verwendet.

Zur Beschreibung quantenphysikalischer Zwei-Zustands-Systeme kann eine Vielzahl mathematischer Repräsentationen Verwendung finden. Daher soll der Fokus neben einer mathematischen Beschreibung im Allgemeinen auf die Nutzung zweier Repräsentationen im Speziellen gelegt werden. Konkret wird die Ket-Notation als algebraische Repräsentation sowie die Bloch-Kugel als graphische Repräsentation untersucht.

Zusammenfassend steht dementsprechend die Untersuchung des Beitrags mathematischer Repräsentationen für das Verständnis grundlegender quantenphysikalischer Prinzipien in Hinblick auf die Schule im Zentrum der Forschung.

Dabei soll untersucht werden, welche Rolle mathematische Beschreibungen für das Verständnis von Schüler:innen spielen können. Weiterhin soll der untersuchte Personenkreis auch auf Lehrkräfte und Lehramtsstudierende erweitert werden. Von Interesse ist dabei neben der Frage, welche Rolle die Mathematik in der Lehrkräfteaus- und weiterbildung zur Quantenphysik spielen kann, auch, wie Schulpraktiker:innen den Einsatz eines reduzierten Dirac-Formalismus in der Schule einschätzen.

3. Studiendesign

Im Rahmen einer qualitativen Laborstudie werden leitfaden- und materialgestützte Interviews durchgeführt, um explorativ Einblicke in Einstellungen gegenüber den Inhalten zu bekommen, sowie zu untersuchen, inwiefern Lehramtsstudierende, Lehrkräfte und Schüler:innen die Inhalte verstehen und welche Lernschwierigkeiten auftreten. Der Studienablauf ist in Abbildung 2 dargestellt.



Abb. 2: Studiendesign mit abgeschlossenen und geplanten Befragungen.

Nachdem im Februar 2023 eine Pilotstudie mit $N=5$ Studierenden durchgeführt wurde, in welcher Materialien und Erhebungsinstrumente erprobt sowie erste Explorations vorgenommen wurden, erfolgt seit Sommer 2023 die Datenerhebung der Hauptstudie in mehreren Etappen.

Im Zeitraum von Juli bis September 2023 erfolgte die Durchführung von Befragungen mit insgesamt $N=15$ Studierenden. Erhebungen mit Lehrkräften, welche auf einen ähnlichen Stichprobenumfang abzielen, sind bereits teilweise erfolgt.

In einem nächsten Schritt werden die Materialien für Lernende der Sekundarstufe II angepasst und weitere Interviews geführt.

4. Studierendenbefragung

Im Folgenden wird sich auf die Darlegung der Studierendenbefragung konzentriert. Es werden neben konkreten Forschungsfragen die Erhebungsmethodik sowie das Vorgehen und die Methodik der Datenauswertung dargestellt.

4.1. Forschungsfragen

Aufbauend auf den bisherigen Überlegungen werden folgende Forschungsfragen gestellt.

- FF1: Wie schätzen Studierende die mathematisch formale Beschreibung von Quantenphysik im Rahmen der Teaching Experiments ein und akzeptieren sie diese?
- FF2: Welche Schwierigkeiten und Probleme treten beim Umgang mit der mathematisch formalen Beschreibung von Quantenphysik auf?

FF1 zielt auf die Untersuchung von Einstellungen gegenüber den Inhalten ab. Es soll die Frage beantwortet werden, inwiefern die Inhalte als sinnvoll und schlüssig erachtet und wie die mathematischen Beschreibungen für das eigene Verständnis eingeschätzt werden. Demgegenüber soll die Beantwortung von FF2 Aufschluss über konkrete Lernschwierigkeiten geben.

4.2. Methodik der Datenerhebung

Zur Beantwortung der Forschungsfragen, insbesondere unter Berücksichtigung der geringen vorhandenen empirischen Ergebnisse innerhalb der fokussierten Zielgruppe, ist ein exploratives Vorgehen erforderlich. Wie in Kapitel 3 beschrieben, wurde eine qualitative Laborstudie mit Studierenden durchgeführt. Ziel war es, unter möglichst kontrollierten Bedingungen Lernprozesse und -schwierigkeiten zu erfassen sowie differenziert Einblicke in Einstellungen gegenüber einer mathematisch formalen Beschreibung von Quantenphysik zu bekommen. Dieses Vorgehen ermöglichte insbesondere, Handlungen und Denkweisen während der Bearbeitung von Aufgaben zum mathematischen Formalismus detailliert zu untersuchen (von Aufschnaiter, 2014).

Konkret wurden sogenannte Teaching Experiments, im deutschsprachigen Raum auch als „Akzeptanzbefragungen“ bezeichnet, durchgeführt. In dieser, ursprünglich von Jung (1992) vorgeschlagenen und kontinuierlich weiterentwickelten Methode, wurden leitfaden- und materialgestützte Einzelinterviews geführt. Hierbei wurde nach gegebenen fachlichen Erklärungen jeweils untersucht, inwiefern die Inhalte eingeschätzt und akzeptiert sowie verstanden wurden (z. B. Wiesner & Wodzinski 1996, Burde 2018, Bitzenbauer 2020).

Die Teaching Experiments folgten dabei der in Abbildung 3 dargestellten, fest vorgegebenen Struktur. Zunächst erfolgte eine Abfrage des Fachsemesters und des zweiten Studienfachs. Weiterhin erfolgte eine Abfrage des Vorwissens, in welcher erhoben wurde, inwiefern grundlegende, für das Teaching Experiment relevante Begriffe bereits bekannt waren. Hauptteil der Teaching Experiments bildete eine insgesamt sechsmalige, zyklische Abfolge von fünf Phasen in Anlehnung an Burde (2018):

1. Instruktion: Zunächst wird jeweils ein fachlicher Input gegeben und es erfolgt die Erklärung der Inhalte.
2. Akzeptanzabfrage: Es erfolgt die Abfrage der Akzeptanz der Inhalte und die befragten Personen geben eine Einschätzung zu den Inhalten.
3. Paraphrasierung: Die interviewte Person wird gebeten, basierend auf zwei bis drei Leitfragen, die Inhalte mit eigenen Worten wiederzugeben.
4. Transfer: Die interviewte Person muss ihr Wissen in ein oder zwei kurzen Aufgaben anwenden.
5. Reflexion: Die interviewte Person kann weitere Anmerkungen machen und Fragen stellen.

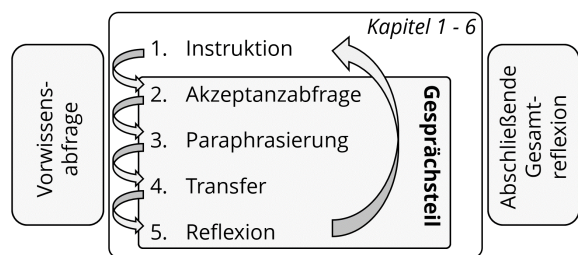


Abb. 3: Aufbau eines Interviews (Teaching Experiment).

Am Ende der Teaching Experiments schloss sich eine abschließende Gesamtreflexion an, in welcher sich noch einmal mit der Einheit insgesamt auseinandergesetzt werden sollte.

4.3. Inhaltliche Dimension der Teaching Experiments

Im Mittelpunkt der Teaching Experiments stand die Behandlung der grundlegenden Prinzipien der Quantenphysik (Abb. 1) sowie deren mathematisch formale Beschreibung mittels Ket-Notation und Bloch-Kugel. Entsprechend waren die in Abbildung 4 dargestellten sechs Kapitel strukturiert.

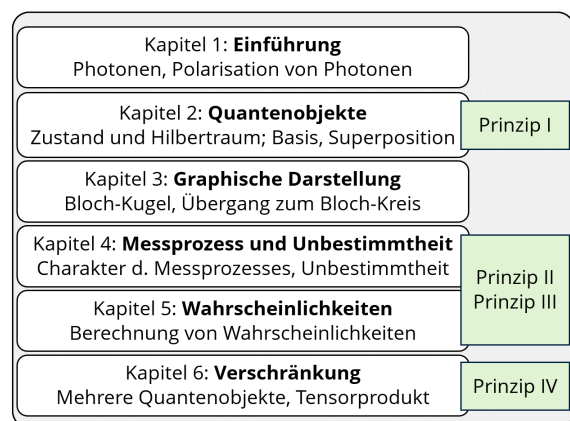


Abb. 4: Überblick über die Kapitel und Inhalte der Interviews.

Nach einem einführenden Kapitel 1 über die Polarisation von Photonen, in welchem Einzelphotonenexperimente an Polarisationsfiltern und am polarisierenden Strahlteilerwürfel vorgestellt wurden, folgte Kapitel 2, in welchem die Beschreibung von Quantenobjekten formalisiert wurde. Hier wurden die vektorielle Beschreibung von Zuständen sowie die zentralen Begriffe „Basis“ und „Superposition“ eingeführt. Im Mittelpunkt stand außerdem die Notation von Zuständen mittels Ket-Notation. Es folgte insbesondere eine Einführung der Notation von Superpositionszuständen mittels Addition von Basiszuständen.

In Kapitel 3 folgte die Behandlung der Darstellung von Zuständen an der Bloch-Kugel. Weiterhin wurde der Übergang zum Bloch-Kreis bei Betrachtung linearer Polarisationszustände thematisiert.

Kapitel 4 und Kapitel 5 behandelten den quantenphysikalischen Messprozess sowie die Unbestimmtheit. Hierbei wurde zunächst die Physik von Messprozess und Unbestimmtheit behandelt sowie die

Veranschaulichung dieser Prinzipien am Bloch-Kreis erläutert (Dür & Heusler, 2012), bevor dann die Berechnung konkreter Wahrscheinlichkeiten mittels der Betragsquadrate der Vorfaktoren beschrieben wurde.

Den Abschluss bildete Kapitel 6 zu Zuständen mehrerer Quantenobjekte, in welchem insbesondere die mathematische Beschreibung mittels Tensorprodukt sowie die Verschränkung im Mittelpunkt standen.

4.4. Methodik der Datenauswertung

Die Interviews wurden als Audiodatei aufgezeichnet und im Anschluss transkribiert und anonymisiert. Die für die Transkription verwendeten Regeln orientierten sich an den Systemen von Kuckartz (2022) beziehungsweise Dresing und Pehl (2018), wobei ergänzend dazu Regeln zur Transkription mathematischer Ausdrücke auf Geyer (2019) basierten. Die Anonymisierung der Daten erfolgte nach Meyermann und Porzelt (2014).

Im Mittelpunkt der Datenauswertung standen zwei Methoden der qualitativen Inhaltsanalyse.

1) Bildung skalierender Kategorien

In einem ersten Schritt wurde eine skalierende Strukturierung nach Mayring (2010) vorgenommen, analog zum in Burde (2018) oder Bitzenbauer (2020) beschriebenen Vorgehen. Ziel dieser Bildung skalierender Kategorien war dabei die Einschätzung der Antworten von Akzeptanzabfrage, Paraphrasierung und Transfer auf einer dreistufigen Ordinalskala. Hierbei wurden in den jeweiligen Phasen die in Tabelle 1 dargestellten Kategorien unterschieden. Die jeweils beste Kategorie wurde mit (+) codiert, die mittlere Kategorie mit (0) sowie die Schlechteste mit (-).

Tab. 1: Kategorienbezeichnungen (vgl. Burde, 2018; Bitzenbauer, 2020).

Akzeptanzabfrage	Paraphrasierung	Transfer
Vollständige Akzeptanz (+)	Gelungene Paraphrasierung (+)	Gute Lösung (+)
Eingeschränkte Akzeptanz (0)	Befriedigende Paraphrasierung (0)	Befriedigende Lösung (0)
Keine Akzeptanz (-)	Mangelhafte Paraphrasierung (-)	Mangelhafte Lösung (-)

Die Bildung der Kategorien erfolgte deduktiv. Es wurde ein skalierendes beziehungsweise evaluatives Kategoriensystem entwickelt (Kuckartz, 2022), in welchem für alle Kategorien jeweils Definitionen, Ankerbeispiele sowie Codierregeln und Bemerkungen beschrieben werden.

2) Bildung inhaltlich strukturierender Kategorien

Während die skalierende Strukturierung zunächst einen Überblick über Akzeptanz und Verständnis der

jeweiligen Kapitel sowie der Beantwortung der jeweiligen Fragen beziehungsweise Aufgaben liefern, stand das konkrete Erfassen der Einschätzungen zu den Inhalten sowie von Lernschwierigkeiten und Problemen im Mittelpunkt der Datenauswertung.

Deshalb wurde im zweiten Schritt eine inhaltlich strukturierende qualitative Inhaltsanalyse durchgeführt (Kuckartz, 2022). Es fand hierbei eine deduktiv-induktive Kategorienbildung statt. Nachdem zunächst deduktiv die Oberkategorien „Einschätzung der Inhalte“ und „Schwierigkeiten und Probleme“ in jedem Kapitel gebildet wurden, erfolgte induktiv die Bildung von Subkategorien. Weiterhin wurde auch die abschließende Gesamtreflexion mittels deduktiv-induktiver inhaltlich strukturierender qualitativer Inhaltsanalyse ausgewertet.

5. Erste Ergebnisse der Studierendenbefragung

Die Studierendenbefragung wurde im Zeitraum von Juli bis September 2023 durchgeführt. Im Folgenden werden erste wesentliche Ergebnisse dargelegt.

5.1. Beschreibung der Stichprobe

Im Rahmen der Studierendenbefragung wurden $N=15$ Lehramtsstudierende in der Regel aus dem vierten Fachsemester interviewt. Diese Studierenden hatten noch keine Lehrveranstaltung zur theoretischen Quantenphysik besucht, sodass die eingeführte mathematisch formale Beschreibung mittels reduziertem Dirac-Formalismus zumindest unter Berücksichtigung des Vorwissens aus dem Physikstudium neu war.

Die Dauer der Interviews lag zwischen etwa 130 bis 170 Minuten mit einer mittleren Dauer von 150 Minuten. Nach Beendigung von Kapitel 4 wurde jeweils eine kurze Pause von etwa 10 bis 15 Minuten eingelegt.

Insgesamt wurden $N=11$ Studierende des gymnasialen Lehramts und $N=4$ Oberschullehramtsstudierende befragt (siehe Abb. 5).

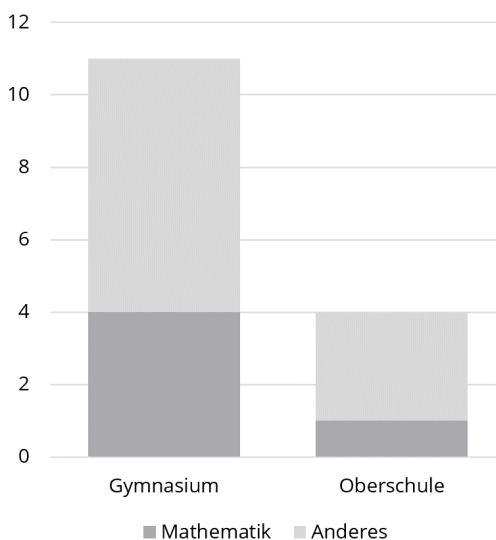


Abb. 5: Zahl der befragten Studierenden, geordnet nach Schulart und zweitem Unterrichtsfach.

5.2. Skalierende Strukturierung

Die Ergebnisse der skalierenden Strukturierung der Akzeptanzabfrage sowie von Paraphrasierung und Transfer wurden tabellarisch, nach Befragten und Kapitel gelistet, aufgestellt (Burde 2018).

Die Ergebnisse der skalierenden Strukturierung von Paraphrasierung und Transfer geben Aufschlüsse über das Gelingen und die Schwierigkeiten bei einzelnen Fragen beziehungsweise Aufgaben, weshalb die Diskussion eine umfassende Beschreibung der jeweils gestellten Fragen sowie zu lösenden Aufgaben erfordert und hier nicht beschrieben werden soll.

Im Gegensatz dazu liefert das Ergebnis der skalierenden Strukturierung der Akzeptanzabfrage einen Überblick über die Einschätzung der jeweiligen Kapitel und ist Tabelle 2 dargestellt. Zeilenweise sind dabei die befragten Personen gelistet und spaltenweise die Akzeptanzabfragen der Kapitel 1 bis 6.

Tab. 2: Ergebnis der Akzeptanzabfrage.

	A 1	A 2	A 3	A 4	A 5	A 6
Stu01	+	0	+	0	0	+
Stu02	+	+	0	+	+	+
Stu03	+	+	+	0	+	+
Stu04	0	+	+	+	+	+
Stu05	+	+	0	0	+	0
Stu06	+	+	+	+	+	+
Stu07	+	+	+	+	+	+
Stu08	0	0	0	+	+	+
Stu09	+	0	0	0	0	+
Stu10	+	+	0	-	+	+
Stu11	+	+	+	+	+	0
Stu12	+	+	0	+	+	+
Stu13	+	+	+	+	+	0
Stu14	+	+	0	+	+	+
Stu15	+	+	+	+	+	+

Im Ergebnis lässt sich erkennen, dass sowohl Kapitel 1 und Kapitel 2 als auch die Kapitel 4 bis 6 im Mittel von den Studierenden gut akzeptiert wurden und lediglich vereinzelte Studierende eingeschränkte Akzeptanz oder in einem Fall gar keine Akzeptanz zeigten.

Insbesondere muss dabei bemerkt werden, dass Kapitel 2, in welchem die Einführung des reduzierten Dirac-Formalismus und der Ket-Notation erfolgt, mit lediglich drei Fällen von eingeschränkter Akzeptanz, von den Studierenden gut akzeptiert und positiv eingeschätzt wird. Gestützt wird dies durch Ergebnisse der inhaltlich strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse.

Auffällig ist allerdings, dass in Kapitel 3 knapp die Hälfte der Studierenden lediglich eingeschränkte Akzeptanz zeigen. Hier zeigt sich in der inhaltlich strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse, dass die Einführung der Bloch-Kugel, welche in Kapitel 3 erfolgt, von Studierenden kritisch gesehen wird und Schwierigkeiten bereitet.

5.3. Inhaltlich strukturierende qualitative Inhaltsanalyse

Während die durchgeführte skalierende Strukturierung zunächst einen Überblick über Akzeptanz und Hinweise auf das Verständnis innerhalb der einzelnen Kapitel liefert und zeigt, innerhalb welcher Kapitel und Aufgaben besonders wenige oder auffällig viele Schwierigkeiten auftreten, bildet die inhaltlich strukturierende qualitative Inhaltsanalyse den Kern der Datenauswertung.

Im Folgenden sind wesentliche Ergebnisse der Studierendenbefragung in Bezug auf Einschätzungen der Inhalte mit Schwerpunkt auf mathematisch formale Beschreibungen sowie den mathematischen Repräsentationen und aufgetretene Lernschwierigkeiten und Probleme dargestellt.

5.3.1. Reduzierter Formalismus und Vektorbeschreibung von Zuständen

Die skalierende Strukturierung der Akzeptanzabfrage in Kapitel 2 macht deutlich, dass die Einführung der vektoriellen Beschreibung von Zuständen sowie die Einführung wesentlicher Konzepte und Begriffe wie Basis oder Superposition grundlegend akzeptiert und positiv bewertet werden. Deutlich wird dies auch in den Ergebnissen der inhaltlich strukturierenden Inhaltsanalyse, welche zeigen, dass keine Schwierigkeiten und Probleme gehäuft oder bei einer Vielzahl der Studierenden auftreten.

Fünf Studierende gaben explizit an, dass sie die Mathematik leicht fanden.

Also ich fand die Erklärung gut nachvollziehbar, dadurch, dass auch wieder Anschauungsmaterial dabei war. Ich fand es schlüssig, logisch, verständlich. Und die mathematischen Beschreibungen waren ja bisher auch recht simpel. Also gut verständlich. (Stu03, Pos. 60)

Insbesondere die Beschreibung von Polarisationszuständen mittels Vektoren wurde von Studierenden explizit als positiv für das eigene Verständnis hervorgehoben. Interessant ist dabei, dass mehrfach geometrische Interpretationen im zweidimensionalen Koordinatensystem auftauchen und Studierende selbstständig eine geometrische Vorstellung entwickeln. Dass diese geometrische Vorstellung für viele Studierende hilfreich ist, zeigen verschiedene Aussagen, von welchen im Folgenden stellvertretend zwei vorgestellt werden.

Also in sich finde ich es gut, das mit der Vektorbeschreibung der Photonen. Kann man sich ja irgendwie vorstellen, dass da was Räumliches mit reinkommt. Ich denke, dass das relativ schlüssig und verständlich ist. (Stu04, Pos. 77)

[...] Die mathematischen Beschreibungen fand ich hilfreich, muss ich sagen. [...] Also als du darauf zurückgegriffen hast, dass man sich das als Vektoren vorstellen kann, finde ich, hat man so eine bildliche Vorstellung im Kopf, was dann

auch mit der Addition von diesen Zuständen [...] man sich so herleiten kann im Kopf. [...] [Es] war diese Vektorvorstellung, die ganz praktisch war. (Stu05, Pos. 62-64)

Kleinere Probleme traten vereinzelt beim Umgang mit Beträgen von komplexen Zahlen auf. Zwei Studierende zeigten Schwierigkeiten beim Umgang mit dem Begriff der Basis im Zusammenhang mit dem Superpositionsprinzip.

5.3.2. Ket-Notation

Neben der vektoriellen Beschreibung an sich, wird auch die Ket-Notation als algebraische Repräsentation gut akzeptiert. Studierende zeigen keine Probleme darin auf, diese Schreibweise als Konvention aufzufassen und zu akzeptieren.

Insbesondere in der abschließenden Gesamtreflexion wird der Vorteil der Ket-Notation in der kompakten und kurzen Schreibweise angemerkt. Hierbei wird allerdings nicht nur die Rolle der Mathematik als Sprache hervorgehoben, sondern auch, dass mittels Ket-Notation Eigenschaften physikalischer Systeme erfasst und Aussagen über den Ausgang von Experimenten und mögliche Messergebnisse vorhergesagt werden können.

Also jetzt, wo ich das kenne, ist es glaube ich sehr hilfreich für das Verständnis. [...] Und die Ket-Notation / Man kann halt dann entsprechend die Basen aufstellen und die ist für das nachvollziehen von quantenmechanischen Experimenten glaube ich sehr, sehr wichtig und für das eigene Verständnis. (Stu04, Pos. 271)

Mehrfach wird der Vorteil der Ket-Notation dann gesehen, wenn Zustände mehrerer Quantenobjekte betrachtet werden und Entscheidungen darüber gefällt werden sollen, welche Systeme verschränkt oder nicht verschränkt sind. Hier zeigt sich der Vorteil einer kompakten Notation der Zustände darin, insbesondere Verschränkung zu beschreiben. Auf die Frage, inwiefern die Erklärungen zu Zuständen mehrerer Quantenobjekte und der Verschränkung in Kapitel 6 verstanden wurden, antwortete Stu04 beispielsweise Folgendes:

Also das fand ich nachvollziehbar, aber ich glaube auch nur durch die mathematischen Beschreibungen, weil ich mir das nur mathematisch irgendwie mit Kontext füllen kann. Weil so an sich der Verschränkungsbegriff rein, wenn man es jetzt mit dem Experiment erklärt, glaube ich, für mich keinen Sinn ergeben würde. Deswegen ist, glaube ich, hier die mathematische Beschreibung sehr wichtig, dass man dann eben sieht, okay, wenn [...] das so vorliegt, dann ist das da als Zustand verschränkt beziehungsweise dann nicht verschränkt. Ich glaube, so ist das dann besser nachvollziehbar tatsächlich durch die mathematischen Beschreibungen, als wenn ich das jetzt irgendwie ohne mache, weil ich ohne die mathematischen Beschreibungen halt auch nicht

wüsste, wie sich das ins System dann einfügt. (Stu04, Pos. 236-237)

Weiterhin wird von einigen Studierenden ein Vorteil der Ket-Notation darin gesehen, schnell Wahrscheinlichkeiten zu erfassen und Messprozesse quantitativ zu beschreiben:

Ich glaube, die Ket-Notation ist dann eher hilfreich, wenn ich wirklich dann die Wahrscheinlichkeiten berechnen will. (Stu04, Pos. 273)

5.3.3. Bloch-Kugel und Bloch-Kreis

Bereits in der skalierenden Strukturierung zeigt sich, dass sich die Akzeptanz gegenüber der Bloch-Kugel als durchwachsen herausstellt. Dies äußert sich nicht nur in konkreten Verständnisproblemen, sondern auch in der grundlegenden Einschätzung der Darstellung von Polarisationszuständen an der Bloch-Kugel als abstrakt und kompliziert.

[...] Es ist, glaube ich, auch ein bisschen anspruchsvoller geworden. Einfach auch schon alleine, wenn man sich vorstellen muss, dass das auf einer Kugel liegt. Das ist schon mal ein bisschen von der Vorstellung her schwieriger. [...] Das müsste man sich auch öfter mal vielleicht nachvollziehen. (Stu06, Pos. 75-76)

Dennoch muss festgehalten werden, dass durchaus auch Studierende interviewt wurden, welche explizitangaben, keine Schwierigkeiten mit der Repräsentation von Zuständen an der Bloch-Kugel zu haben.

Bemerkt werden muss allerdings, dass die Visualisierungen zu Messprozess und Unbestimmtheit am Bloch-Kreis, welche Kerninhalt von Kapitel 4 sind, deutlich positiver eingeschätzt werden. Die Visualisierung des Messprozesses am Bloch-Kreis nach Dür & Heusler (2012) und die damit einhergehende Möglichkeit, Ausgänge von Experimenten anschaulich zu beschreiben, wird von acht Studierenden explizit als positiv für das Verständnis hervorgehoben.

Also ich fand die Beschreibung über den Bloch-Kreis eigentlich echt schön, weil es war halt einfach nachvollziehbarer mit Bild. [...] Ich habe das gesehen und es war intuitiv so [...]. Also das fand ich wirklich sehr schön. (Stu06, Pos. 110)

Person Stu10 gab an, dass sie die mathematischen Beschreibungen einleuchtender fand als die qualitativen Erklärungen zu Eigenschaften des quantenphysikalischen Messprozesses zu Beginn von Kapitel 4. Hierbei bezieht sie sich auf die die grafische Erklärung des Messprozesses am Bloch-Kreis.

[...] Aber wiederum fand ich die mathematischen Beschreibungen besser, [...] da habe ich das so ein bisschen dann noch verstanden, anhand der Bloch-Kugel. (Stu10, Pos. 209)

Es lässt sich erkennen, dass die Bloch-Kugel dann als positiv für das eigene Verständnis empfunden wird, wenn die Arbeit mit ihr über ein bloßes Darstellen von Zuständen hinaus geht und mit ihr bezüglich

Messprozess und Unbestimmtheit argumentiert und gearbeitet wird.

5.4. Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich herausstellen, dass innerhalb der durchgeführten Teaching Experiments sowohl der reduzierte Formalismus allgemein, als auch die Ket-Notation im Speziellen akzeptiert und als positiv eingeschätzt werden.

Neben dem Vorteil einer kompakten Notation von Zuständen wird der Vorteil der Ket-Notation von Studierenden vor allem darin gesehen, mögliche Ausgänge von Messprozessen und insbesondere Messergebnisse sowohl qualitativ besser zu erfassen als auch quantitativ zu beschreiben.

Hinsichtlich der Akzeptanz der Bloch-Kugel zeichnet sich ein durchwachsenes Bild. Während die Bloch-Kugel selbst mit der Darstellung von Zuständen als komplex und schwierig eingeschätzt wird, deutet sich eine Änderung hinsichtlich Akzeptanz und Verständnis an, wenn sich zum einen auf den Bloch-Kreis beschränkt und zum anderen Messprozesse visualisiert werden. Die Bloch-Kugel wird oftmals dann als positiv für das Verständnis eingeschätzt, wenn mit ihr gearbeitet und der quantenphysikalische Messprozess oder die Unbestimmtheit behandelt werden.

6. Ausblick

Die hier beschriebene Methodik der Datenauswertung bildet die Grundlage für weiterführende Analysen. In weiteren Schritten soll die Analyse von in den Fragen der Paraphrasierungen und Aufgaben des Transfers genutzten Ressourcen und stattfindenden Lösungsprozessen erfolgen. Hierbei soll insbesondere untersucht werden, auf welche mathematischen Beschreibungen und Repräsentationen in eigenen Erklärungen der Studierenden zurückgegriffen wird. Außerdem sollen weiterhin Fallanalysen durchgeführt werden, um zu untersuchen, inwiefern sich Akzeptanz und Verständnis gegenüber den Inhalten innerhalb eines Interviews ändern.

Die Teaching Experiments, welche mit Lehrkräften durchgeführt wurden, sollen mit einem analogen Vorgehen ausgewertet werden, um im nächsten Schritt einen Vergleich der Ergebnisse von Lehramtsstudierenden und Lehrkräften durchführen zu können. Insbesondere soll hierbei untersucht werden, welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede es hinsichtlich der Einschätzung der Inhalte gibt und inwiefern ähnliche Lernschwierigkeiten auftreten. Des Weiteren ist von Interesse, inwiefern Lehrkräfte die Inhalte in Hinblick auf eine mögliche Behandlung in der Schule einschätzen.

In einem weiteren Schritt werden die Materialien und Erhebungsinstrumente noch einmal überarbeitet und für die Sekundarstufe II adaptiert, sodass die Teaching Experiments mit Schüler:innen durchgeführt werden können. Eine erste Pilotierung mit Lernenden der gymnasialen Oberstufe fand bereits statt.

7. Literatur

- Aufschnaiter, C. von. (2014). Laborstudien zur Untersuchung von Lernprozessen. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 81–105). Springer Spektrum.
- Bitzenbauer, P. (2020). Quantenoptik an Schulen: Studie im Mixed-Methods Design zur Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik. *Studien zum Physik- und Chemielernen*: Bd. 303. Logos Verlag.
- Burde, J.-P. (2018). Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells. *Studien zum Physik- und Chemielernen*: Bd. 259. Logos Verlag.
<https://doi.org/10.30819/4726>
- Dür, W. & Heusler, S. (2012). Was man vom einzelnen Qubit über Quantenphysik lernen kann. *PhyDid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 1–16.
- Jung, W. (1992). Probing Acceptance: A Technique for Investigating Learning Difficulties. In IPN: Bd. 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* (S. 278–295).
- Kuckartz, U. & Rädiker, S. (2022). *Qualitative Inhaltsanalyse: Methoden, Praxis, Computerunterstützung: Grundlagentexte Methoden* (5. Auflage). Grundlagentexte Methoden. Beltz Juventa.
- Mayring, P. (2010). *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken* (11. Neuausgabe). Beltz Pädagogik. Beltz.
- Meyermann, A. & Porzelt, M. (2014). Hinweise zur Anonymisierung qualitativer Daten. Version 1.1. Leibniz-Institut für Bildungsforschung und Bildungsinformation
- Michelini, M. & Stefanel, A. (2021). A path to build basic Quantum Mechanics ideas in the context of light polarization and learning outcomes of secondary students. *Journal of Physics: Conference Series*, 1929(1).
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1929/1/012052>
- Müller, R. (2016). Die Quantenphysik im Spannungsfeld zwischen Fachlichkeit, empirischer Forschung und Schulpraxis. In C. Maurer (Hrsg.), *Gesellschaft der Didaktik der Chemie und Physik: Bd. 36. Authentizität und Lernen - das Fach in der Fachdidaktik* (Bd. 36, 13-24). Universität Regensburg.
- Pospiech, G. (2004). *Moderne Quantenphysik im Unterricht: Ein Lehrgang*. Logos Verlag.
- Pospiech, G. (2021). Die zweite Quantenrevolution: Quanteninformatik im Physikunterricht. In J. Grebe-Ellis & H. Grötzebauch (Vorsitz), *Virtuelle DPG-Frühjahrstagung 2021*. Symposium im Rahmen der Tagung von DPG.
<http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/1158/1244>
- Pospiech, G., Merzel, A., Zuccarini, G., Weissman, E., Katz, N., Galili, I., Santi, L. & Michelini, M. (2021). The Role of Mathematics in Teaching Quantum Physics at High School. In B. Jarosievitz & C. Sükösd (Hrsg.), *Challenges in Physics Education. Teaching-Learning Contemporary Physics* (S. 47–70). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-78720-2_4
- Sadaghiani, H. R. & Munteanu, J. (2015). Spin First instructional approach to teaching quantum mechanics in sophomore level modern physics courses. *2015 Physics Education Research Conference Proceedings*, 287–290.
- Singh, C. & Marshman, E. (2015). Review of student difficulties in upper-level quantum mechanics. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 11(2).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.11.020117>
- Wiesner, H. & Wodzinski, R. (1996). Akzeptanzbefragungen als Methode zur Untersuchung von Lernschwierigkeiten. In R. Duit & C. von Rhöneck (Hrsg.), *Lernen in den Naturwissenschaften* (S. 250–274). IPN.

Vom Karzer zum Bachelor

- Eine kurze Geschichte der Prüfungsversuchsbeschränkungen -

Annemarie Sich¹, Stefan Brackertz¹, Philipp Bönninghaus¹, Barbara Obwaller⁴, Lisa Lehmann², Jonathan Moeller², Manuel Längle⁵, Amr El Miniawy³ und Robert Barz¹

¹Universität zu Köln, Fachschaft Physik, ²Technische Universität Dresden, Fachschaft Physik, ³Humboldt-Universität zu Berlin, Fachschaftsinitiative Physik, ⁴Universität Innsbruck, Studienvertretung Physik, ⁵Universität Wien, Studienvertretung Physik

orga@studienreform-forum.de

Kurzfassung

Bis heute gibt es an vielen Hochschulen Höchststudiendauern und/oder Prüfungsversuchsbeschränkungen, in denen z.B. geregelt ist, dass ein endgültiges Nicht-Bestehen einer Prüfung zu Zwangsexmatrikulation führt. Seit Jahren wird (von studentischer Seite) die Abschaffung genau dieser Regelungen gefordert. Was die Ursprünge der Einführung von Zwangsexmatrikulation sind und weshalb diese nichts mit den aktuell diskutierten Argumenten zu tun haben, wollen wir in diesem Beitrag näher beleuchten. Zudem spielen diese Hintergründe eine Rolle für die aktuelle Debatte um die Wiedereinführung des Ordnungsrechts in Berlin, was in diesem Artikel ebenfalls als Exkurs thematisiert wird.

1. Aktuelle Relevanz der Debatte

„(1) Nicht bestandene Modulprüfungen können innerhalb eines Jahres nach Abschluss des ersten Prüfungsversuches einmal als zweiter Prüfungsversuch wiederholt werden. Die Frist beginnt mit Bekanntgabe des erstmaligen Nichtbestehens der Modulprüfung. Nach Ablauf dieser Frist gelten sie als erneut nicht bestanden.“

(2) Eine zweite Wiederholung der Modulprüfung kann als dritter Prüfungsversuch nur zum nächstmöglichen Prüfungstermin durchgeführt werden. Danach gilt die Modulprüfung als endgültig nicht bestanden. Eine weitere Wiederholungsprüfung ist nicht zulässig.“ [11]

Solche und ähnliche Regelungen finden sich in zahlreichen Prüfungsordnungen. Ihre Abschaffung wird von Studierendenvertretungen seit Längerem gefordert [1] und hat inzwischen auch Einzug in Wahlprogramme sowohl bei studentischen Wahlen [8][9] als auch Landtagswahlen [4][5] gefunden. Während der Corona-Pandemie wurden diese Regelungen weitgehend ausgesetzt [6]; als sie danach wieder in Kraft traten, hat dies die Debatte um diese Regelungen neu befeuert. So hat beispielsweise die Uni Wuppertal eine systematische Auswertung der Erfahrungen vorgenommen und einen uniweiten Diskussions- und Reformprozess angestoßen [7]. Im Rahmen des Studienreform-Forums wurde diese Frage nach Corona mit einem sehr viel klareren Ergebnis auf der DPG-Tagung diskutiert als noch vor Corona [2].

In diesem Zusammenhang wurden die Argumente für eine Abschaffung dieser Restriktionen, aber auch die Bedenken, die dagegen sprechen, inzwischen

weitgehend systematisch aufgearbeitet [3]. Wenig beachtet wurde dagegen die Frage, warum diese Regelungen überhaupt jemals eingeführt wurden, was insbesondere deshalb lohnend erscheint, weil solche Regelungen international selten sind.

Tatsächlich gehen die Ursprünge der aktuellen Regelungen zurück auf die Sondergerichtsbarkeit deutscher Unis im Mittelalter und die über Jahrhunderte immer wieder aufgekommene Diskussion darum hat wenig mit den derzeit diskutierten Argumenten zu tun.

Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden zunächst die Historie der aktuellen Regelungen skizziert. Im Anschluss wird das ebenfalls aus dieser Geschichte entstandene heutige Ordnungsrecht behandelt. Dies existiert noch immer in den meisten Bundesländern in verschiedenen Ausprägungen; lediglich Berlin hat es 2021 [14] vollständig abgeschafft und derzeit gibt es angesichts der Initiative des Berliner Senats zu dessen Wiedereinführung eine erneute Diskussion darum [10]. Zuletzt wird die historische Entwicklung zur heutigen Debatte ins Verhältnis gestellt.

2. Geschichte der universitären Gerichtsbarkeit bis 1969

In diesem Kapitel werden die Ursprünge der aktuellen Restriktionen in Prüfungsordnungen von der Gründung der europäischen Universitäten im Mittelalter bis 1969 skizziert. 1969 ist deshalb eine Zäsur, weil zu diesem Zeitpunkt das Disziplinarrecht abgelöst wurde von Restriktionen in Prüfungsordnungen einerseits und einem Ordnungsrecht andererseits, die sich seitdem weitgehend unabhängig voneinander

und mit wenig aufeinander bezogenen Diskursen weiterentwickelt haben.

2.1. Mittelalter: Gründung der ersten Universitäten

Typisch für die im Mittelalter in ganz Europas neu gegründeten Universitäten war eine eigene Sondergerichtsbarkeit. Mit der Einschreibung an einer Universität gehörten Studierende und Lehrende in der Regel für den Rest ihres Lebens der jeweiligen Universität an und unterlagen fortan nicht mehr den allgemeinen Gesetzen sondern den Gesetzen der jeweiligen Universität, weshalb Streit, in den sie oder ihre Familienmitglieder involviert waren, vor Universitätsgerichten ausgetragen wurde. [12][18] Sondergerichtsbarkeiten waren im Mittelalter nichts besonderes; verschiedene Berufsgruppen und insbesondere die Kirchen hatten ebenfalls Sondergerichtsbarkeiten; dass Kirchen in Deutschland bis heute ein besonderes Arbeitsrecht haben, ist neben dem universitären Ordnungsrecht und Zwangsexmatrikulationsregelungen einer der wenigen Überreste dieser Sondergerichtsbarkeiten.

Die universitäre Sondergerichtsbarkeit umfasste alle Lebensbereiche und Maßnahmen bis hin zur Todesstrafe. Letztere war allerdings (im Gegensatz zu anderen damaligen Gerichtsbarkeiten) nur an wenigen Universitäten (z.B. Heidelberg [18]) vorgesehen und wurde auch dann nur sehr selten angewandt; an den meisten Universitäten war die Relegation, die vergleichbar mit der heutigen Zwangsexmatrikulation ist, die Höchststrafe, die ebenfalls nur in besonderen Fällen angewendet wurde. Charakteristisch für die universitäre Sondergerichtsbarkeit war nämlich (in Abgrenzung von anderen mittelalterlichen Gerichtsbarkeiten) nicht eine Logik von Strafe, Vergeltung oder Abschreckung, sondern die Wiederherstellung von Frieden und Zusammenarbeit innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinde. So konnten Universitätsmitglieder typischerweise Titel erst dann verliehen bekommen, wenn sie sämtliche Streitigkeiten mit anderen Universitätsmitgliedern zur Zufriedenheit aller Beteiligten, die dies bestätigen mussten, beigelegt hatten. Dementsprechend hatten die hauptsächlich verhängten Strafen Karzer (Universitätsgefängnis) und Consilium abeundi (vorübergehende Verbannung aus der Stadt) typischerweise eine Dauer von nur wenigen Tagen und sollten vor allem dafür sorgen, dass Konfliktparteien vorübergehend voneinander getrennt wurden und sich jenseits des Trubels des regulären Universitäts- und Stadtbetriebs sammeln sollten.

Charakteristisch für die Universitätsgerichtsbarkeit im Mittelalter war zudem, dass sie nicht zwischen verschiedenen Mitgliedergruppen der Universitäten unterschied. Die herausgehobene Rolle der Professor*innenschaft an den Universitäten wurde vielmehr erst in der Neuzeit etabliert.

Im europäischen Vergleich nahmen die deutschen Universitäten eine Sonderrolle ein: Während die

neuen Universitäten in Frankreich und Italien inklusive ihrer Sondergerichtsbarkeit von Studierenden-Lehrenden-Genossenschaften ähnlich wie Städte / Kommunen als Freiräume von der monarchischen Herrschaft und demokratische Avantgarde erkämpft waren, waren im deutschsprachigen Raum weltliche und teilweise auch kirchliche Herrscher in die Universitätsgründungen involviert und die Sondergerichtsbarkeit dieser Universitäten hatte den Charakter eines von diesen Herrschern gewährten Privilegs.

Die Universitäten im Rest Europas wurden weitgehend erst später gegründet und folgten einem der beiden Modelle.

2.2. Aufklärung: Strafgerichtsbarkeit geht an reguläre Gerichte über

Die Aufklärung ging in großen Teilen Europas mit einer Demokratisierung der Gesellschaften einher, als deren Vorreiter sich die Universitäten begriffen. In diesem Rahmen wurde auch das Rechtssystem neu geordnet, wobei in der Regel große Teile der universitären Sondergerichtsbarkeiten, die bis dahin vor allem sehr viel liberaler und aufgeklärter als die sonstigen Rechtssysteme waren, für überflüssig erachtet und abgeschafft wurden (z.B. Frankreich [30]).

Im Gegensatz dazu blieb es im deutschsprachige Raum bei absolutistischen Regierungen, die aber die Bedeutung der Bildung für die gesellschaftliche Entwicklung zunehmend erkannten. Angesichts dessen wurden die Universitäten von nun an umfassender und systematischer staatlich finanziert. Damit einher ging aber auch das Bestreben, die Unis mehr unter staatliche Kontrolle zu bekommen. Als Konsequenz wurde die Studierendenschaft, die bis dahin mit den Professoren gleichberechtigt war oder sogar mehr Macht hatte als diese, künftig aus den universitären Entscheidungen ausgeschlossen und den Universitäten das Privileg des Sonderstrafrechts (und damit einhergehend auch die schon vorher von den wenigsten Unis genutzte Möglichkeit Todesstrafe) entzogen.

Teilweise gab es dabei sehr lange, teils bis 1879 andauernde Übergangszeiten, in denen die eigentlich nur noch für die anderen Rechtsgebiete zuständigen Unigerichte in Strafsachen weiterhin die Urteile sprachen, die in einem lediglich formalen Akt durch die Regierungen bestätigt wurden.

Ausgeschlossen aus den universitären Entscheidungsstrukturen gründeten Studierende zahlreiche, teils sehr verschieden ausgerichtete Vorläufer der heutigen Verbindungen, aus denen Professoren explizit ausgeschlossen waren. Die bekanntesten davon waren die Landmannschaften und Studentenorden. Sie dienten einerseits der sozialen Selbsthilfe der Studierenden, dienten vor allem aber auch der Austragung religiöser und sozialer Konflikte, durch die diese Zeit des Umbruchs zunehmend geprägt war.

Typisch für die Studentenorden war das Lebensbund-Prinzip, ein strenges Reglement und die Kultur einer eingeschworenen Gemeinschaft. Da sie in der Regel im Gegensatz zu beispielsweise den Freimaurern explizit Professoren ausschlossen, waren sie von Anfang an nicht nur der Regierung, sondern auch den Professoren verdächtig, was letztlich 1793 zu einem Verbot der Studentenorden durch den Immerwährenden Reichstag in Regensburg führte. [19] Insbesondere die Landmannschaften richteten sich oft gegen die Ideen der Aufklärung, etablierten hierarchische Strukturen (Pennalismus) und versuchten mit dem „Comment“ und dem Duellwesen eine eigene voraufgeklärte Rechtsprechung an den Unis durchzusetzen, wohingegen sich die Profs mehrheitlich der Aufklärung verpflichtet sahen.

Das Universitätsrecht war in dieser Epoche vor allem ein Instrument der Professorenschaft, um studentische Vereinigungen, insbesondere die Landmannschaften, sowie das Duellwesen zu bekämpfen. Die Relegation, vergleichbar mit der heutigen Zwangsexmatrikulation, war dabei die schwerste Sanktion.

2.3. 19. Jahrhundert bis 1879: Aufstieg des Bürgertums



Abb. 1: Ehemaliger Karzer mit vielen Sprüchen und Zeichnungen von Studenten. (Bild: Erich Malter: „Kreativer Zeitvertreib: Viele Sprüche und Zeichnungen haben die Studenten im ehemaligen Karzer hinterlassen.“, <https://www.fau.de/2015/01/news/wo-einst-die-wilden-kerle-einsassen/> [31])

voller Name	Geburtsjahr	Geburtsort	Immat.Datum	Studienfach	Strafen
Bochmann, Traugott Bernhard	1.851.00	Rochlitz	6.5.1871	stud. jur.	1872: Verweis weg. Trunkenheit u. nichtl. Ruhestörung
Bode, Johannes Paul	1.841.00	Hohendorf	22.4.1861	stud. theol.	1864: 14 Tage Karzer 2. Grades weg. Ehrenwortbruchs
Böhm, Ehergott Ismannel	1.843.00	Kirchberg	22.10.1868	stud. jur. et cam.	1870: Privatankläger in einer Beleidigungssache
Böhme, Julius Theodor Hermann	1.842.00	Dresden	24.4.1862	stud. jur.	1865: in Untersuchung weg. einer Diebstahlsache
Böhmer, Friedrich Ernst	1.841.00	Großhennersdorf	29.10.1861	stud. jur. et cam.	1862: erhält einen Verweis weg. nichtl. Ruhestörung und unangemessenen Verhaltens; 1863: vier Tage Karzer 2. Grades und Verwarnung weg. nichtl. Umherherschwürmens, nichtl. Ruhestörung u. Verhöhnung u. Bedrohung d. Nachtwächters
Bork, Paul	1.852.00	Posen	9.5.1870	stud. philol.	1870: Verweis weg. Einschlagens von Fenstern
Börner, Hermann Emil	1.848.00	Freibergsdorf	22.10.1867	stud. cam.	1868: zwei Tage Karzer 2. Grades weg. Teilnahme an Duell

Abb. 2: Auszug aus einer Liste von Karzerstrafen. (Bild: Universität Leipzig: Karzerstrafen (Screenshot) <https://ual.archiv.uni-leipzig.de/karzerstrafen.php> [32])

Dieser Konflikt setzte sich im 19. Jahrhundert im Wesentlichen fort, wobei die sich gründenden studentischen Verbindungen im Vergleich zu ihren Vorläufern vor allem eine Modernisierung und eine Nationalisierung im Rahmen der sog. Befreiungskriege voran trieben.

Gleichzeitig setzte angesichts der Industrialisierung eine weitere Entwicklung ein: Während das aufstrebende, teils kapitalistisch orientierte (Bildungs-)Bürgertums im 19. Jahrhundert vor allem von Ehrgeiz geprägt war, nutzten die Söhne der zunehmend vom Niedergang bedrohten Monarchie ihre Privilegien rücksichtslos aus. Nicht nur Duelle, sondern zunehmend auch Tyranisierungen der anderen Studierenden und der lokalen Bevölkerung durch Randalieren, Brandstiftung, Vergewaltigungen, Eheschwindel und Hochstapelei waren weit verbreitet. [12][18] Das universitäre Recht sah dafür viel mildere Reaktionen als das übrige Recht vor und schützte dieses Verhalten teilweise auch dadurch, dass z.B. vielerorts Studenten, die während ihres Studiums Kinder gezeugt hatten, nicht zu Alimenteren heran gezogen werden konnten, von Studenten geschlossene Ehen nicht automatisch rechtskräftig waren oder Schulden von Studenten nur bis zu einem bestimmten Grenzbetrag zurück gezahlt werden mussten.

Die Standardstrafe in dieser Zeit war, einige Stunden bis einige Tage im Karzer zu verbringen, und wurde sehr oft verhängt. Abbildung 1 gibt einen Eindruck davon.

Im andauernden Kräftemessen zwischen Bürgerlichen und Aristokraten wurde vielerorts durchgesetzt, dass Studenten besucht werden durften, während sie ihre Strafen im Karzer absaßen.

Dies führte dazu, dass die Karzer zunehmend zu teils bis heute sagenumwobenen Partyorten wurden (Abbildung 2), wobei der jeweils Einsitzende Alkohol und Prostituierte für alle zu bezahlen hatte.

2.4. Reichsjustizgesetz 1879: Nur noch Disziplinarrecht für die Unis

Mit der Einführung der Reichsjustizgesetze 1879 wurde die Verfügungsgewalt der Universitäten mit dem Disziplinarrecht auf die Ahndung des Fehlverhaltens von Studenten, Dozenten und Professoren im Verhältnis zur Universität eingeschränkt [12], was die akademische Gerichtsbarkeit bezüglich Straftaten und Zivilsachen endgültig beendete. Straftaten von Studenten wurden von nun an an staatlichen Gerichten geklärt, was jedoch nicht zur Folge hatte, dass eine Doppelbestrafung, strafrechtlich sowie disziplinarisch, ausgeschlossen war. Disziplinarstrafen konnten (durch den Rektor bzw. den Prorektor, den Universitätsrichter und den Senat) verhängt werden, wenn Studierende

- „gegen Vorschriften verstießen, die unter Androhung disziplinarer Strafen erlassen worden waren,

- Handlungen begingen, welche die Sitte und Ordnung des akademischen Lebens störten oder gefährdeten oder durch welche sie ihre Ehre oder die ihrer Genossen verletzten,
- leichtsinnig Schulden machten oder sich in einer Art und Weise verhielten, die mit dem Zweck des Aufenthalts auf der Universität in Widerspruch stand.“ [12]

Zu den sieben möglichen Disziplinarstrafen gehörten nach „(§ 6 Abs. 1):

- Verweis
- Geldstrafe bis 20 Mark
- Karzerhaft bis zwei Wochen
- Nicht-Anrechnung des laufenden Halbjahres auf die vorgeschriebene Studienzeit
- Androhung der Entfernung von der Universität (Unterschrift des Consilium abeundi)
- Entfernung von der Universität (Consilium abeundi)
- Ausschluss vom Universitätsstudium (Relegation). Die zuletzt genannte Sanktion konnte nur aufgrund einer rechtskräftigen Verurteilung wegen einer strafbaren Handlung ausgesprochen werden, „wenn dieselbe aus einer ehrlosen Gesinnung entsprungen ist“ (§ 6 Abs. 2).“ [12]

Das studentische Disziplinarrecht schloss zwar „in seiner Eigenart an das Strafrecht an“, es war allerdings „nicht tatbestandlich gebunden“. [21] Es blieb dem Ermessen der Universitätsbehörde überlassen, ob sie eine Störung der Ordnung ahnden wollten oder nicht. Die Möglichkeit einer fehlerhaften oder gar missbräuchlichen Ausübung war darin inkludiert. Das Disziplinarrecht bewegte sich somit in eine Richtung, die eine willkürliche Ausgestaltung und Ausübung in die NS-Zeit ermöglichte und teils auch schon vorweg nahm.

2.5. Zeit des Nationalsozialismus

Der zuvor angesprochene Missbrauch des Disziplinarrechts kommt in der NS-Zeit maximal zum Ausdruck. Bereits 1934 kam es zu einem Ausschluss linker Studierender, die sich nachweislich im kommunistischem Sinne betätigt haben, mittels Disziplinarrecht. Dabei war eine Mitgliedschaft z.B in der KPD nicht notwendig. Es folgte die Exmatrikulation jüdischer Studierende, sowie weiteren Studierenden, die einem „unbequem“ waren. Das Ziel war nicht mehr (nur) Fehlverhalten zu bestrafen, sondern insbesondere die Gleichschaltung der Universitäten. (zitiert nach [20])

Der gesetzliche Rahmen änderte sich zunächst nicht, erst im April 1935 wurden die obigen Vorschriften durch eine reichseinheitliche Strafordnung ersetzt. Diese wich kaum von dem Vorherigem ab, allerdings wurde sie von „delikthafte[m] Verhalten“ auf „pflichtwidriges Verhalten“ erweitert. Letzteres wurde sehr vage durch „Verstoß gegen die erhöhte Be-

reitschaft im Dienste für Volk und Staat“ definiert (zitiert nach [20]).

2.6. Nachkriegszeit und Studierendenbewegung

Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde das studentische Disziplinarrecht der Weimarer Zeit zunächst wiederhergestellt, aber u.a. auf Grund von Verfassungsbedenken kaum noch angewandt [12]. Das änderte sich mit Aufkommen der 68er, als das Disziplinarrecht an einigen Unis gegen protestierende Studierende eingesetzt wurde [16]. Dies führte jedoch zu neuer Aufmerksamkeit, Aufarbeitung der Rolle des Disziplinarrechtes während der Nazizeit und 1969 zur Erarbeitung eines Entwurfes für einen „Staatsvertrag über das Ordnungsrecht an Hochschulen“.

Dieser Entwurf war zwar umstritten und ist mangels ausreichender Ratifizierung durch die Bundesländer nie inkraft getreten, hat aber letztlich das Ende des studentischen Disziplinarrechts eingeleitet, weil in der Folge Ähnliches in allen Bundesländern beschlossen wurde: Das erzieherisch-strafende und moralisch aufgeladene Disziplinarrecht wurde in der gesamten BRD abgelöst durch einerseits Restriktionen im Prüfungsrecht und andererseits ein Ordnungsrecht, das auf Aufstandsprävention / -bekämpfung, Vorlesungsinterventionen und Sitzstreiks fokussiert war.

Anders als Disziplinarrecht darf Ordnungsrecht nicht strafen; vielmehr dürfen die daraus folgenden Maßnahmen allein darauf gerichtet sein, die öffentliche Ordnung für die Zukunft sicher zu stellen. Damit wurde zumindest formell dem verfassungsrechtlichen Hauptkritikpunkt, dass das universitäre Disziplinarrecht im Zusammenhang mit dem allgemeinen Strafrecht gegen das Doppelbestrafungsverbot verstieß, genüge getan. Von Anfang an war aber umstritten, ob das neue Ordnungsrecht tatsächlich diese Anforderung und rechtsstaatliche Grundanforderungen erfüllt: Es eröffnete und eröffnet noch immer vor allem die Möglichkeit, relativ willkürlich und weitgehend ohne Einhaltung rechtsstaatlicher Verfahrensgrundsätze Zwangsexmatrikulationen. Dabei ist nicht nachvollziehbar, was diese Zwangsexmatrikulationen zur Aufrechterhaltung der universitären Ordnung beitragen kann, was das unabhängige reguläre Hausrecht nicht auch leisten kann. Angesichts dessen – so die Kritik – gehe es faktisch weiterhin um die Möglichkeit, willkürlich disziplinieren und unter Verstoß gegen das Doppelbestrafungsverbot bestrafen zu können.

Erklärtermaßen [16][25] disziplinierend wirken sollten die neu in den Prüfungsordnungen eingeführten leistungsorientierten Restriktionen, die ebenfalls auf Zwangsexmatrikulationen bzw. deren Vermeidung gerichtet sind: Vor allem in den südlichen und seinerzeit CDU-regierten Bundesländern und Österreich hatten sie die Form von Studienhöchst dauern sowie sog. Grundlagen- und Orientierungsprüfung (GOP) / Studieneingangs- und Orientierungsphase

(STEOP). In den übrigen alten Bundesländern wurde der sozialen Lage von Studierenden, die neben dem Studium arbeiten mussten, Rechnung getragen und Restriktion in Form einer Beschränkung der Anzahl Prüfungsversuche implementiert.

3. Restriktionen im Prüfungsrecht

Nach den 68er- Reformen war die „Unternehmerische Hochschule“ [23] die nächste große Etappe, die den bereits in den 1980ern angelegten neoliberalen Turnaround, gegen große Widerstände, erst relativ spät an die Hochschulen brachte.

3.1. 1969 bis Bologna

Die Forderung, die Prüfungsrestriktionen aufzuheben, findet sich seit ihrer Einführung immer wieder in studentischen Papieren oder auch bei der Bundesassistentenkonferenz [24]. Wie sehr sie tatsächlich verfolgt wurde, ist zumindest den Autor*innen unklar. Vor allem findet in dieser Zeit eine Entzerrung der ursprünglich sehr geballten Prüfungen sowie in vielen Fachbereichen eine Reform der Studien- und Prüfungsinhalte statt.

3.2. Bologna-Reform: Alles ist jetzt Prüfung

Angesichts der Tatsache, dass die bereits in den 90ern gestartete Bologna-Reform als eine der drei Säulen der Unternehmerischen Hochschule [23] von den Regierungen im Wesentlichen gegen die Hochschulen durchgesetzt wurde in einem gesellschaftlichen Klima, in dem die Boulevardpresse Applaus mit der Entlarvung von „schmarotzenden“ Studierenden und Arbeitlosen bekam, war diese Reform insgesamt von Misstrauen, Verregelung, Verschulung und formalistischem Vorgehen geprägt. [27] [28]

Dabei ist anzumerken, dass eine entscheidende Änderung der Bologna-Reform darin bestand, dass die Hochschulen nun in fast allen Bundesländern vollkommen unabhängig vom Land über Restriktionen in Prüfungsordnungen entscheiden können. Lediglich sehr wenige Bundesländer wie Sachsen schränken die Freiheit der Hochschulen hier noch ein.

Angesichts der Gesamtausrichtung der Reform, ihrer Top-Down-Erzwingung [26] durch die Regierungen, gab es aber nur vergleichsweise wenige Fachbereiche wie z.B. die Geisteswissenschaften in Köln, die Physik in Wuppertal oder auch die gesamte Uni Bielefeld, die diese Umstellung zur Aufhebung von Restriktionen nutzten.

Wie schon früher dargelegt [22] geschah eher das Gegenteil: Was in Diploma und Magister „Scheine“ waren, wurde in Bachelor und Master zu Prüfungen und die Restriktionen, die zuvor in der Regel nur für Prüfungen, nicht aber für „Scheine“ gegolten hatten, in diesem Zuge verallgemeinert.

4. Ordnungsrecht

Die damalige rot-rot-grüne Regierung Berlins setzte mit ihrer 2021 inkraft getretenen Hochschulgesetz-Reform insgesamt sehr viele Forderungen der Stu-

dierendenbewegung und der Gewerkschaften der letzten Jahrzehnte gegen große Widerstände um. Hauptgrund der Schwierigkeiten war, dass darunter auch viele Forderungen waren, gegen die es großen Widerstand von konservativer Seite gab, aber keine Bewegung an den Hochschulen, die diese Forderungen zu dem Zeitpunkt real verfolgte. Erstaunlich wenig Widerstand gab es – vielleicht angesichts einer wenig rebellischen und durch Restriktionen im Prüfungsrecht scheinbar ausreichend disziplinierten Studierendenschaft – gegen die Abschaffung des Ordnungsrechts.

Angesichts sich verschärfender gesellschaftlicher Meinungskämpfe und daraus resultierender vermehrter Proteste und Besetzungen an Berliner Hochschulen häufen sich seit Beginn 2023 nun allerdings Forderungen nach härteren Ordnungsmaßnahmen seitens der Hochschulen gegen Studierende. Zudem plant die aktuelle Regierung aufgrund eines brutalen Übergriffs auf einen jüdischen Studenten der Freien Universität (FU) Berlin, der allerdings außerhalb der Uni stattgefunden hat, nun die Wiedereinführung eines (verschärften) Ordnungsrechtes, um die Exmatrikulation des angreifenden Studenten (auch FU) zu ermöglichen.

Dieses Vorhaben ist allerdings sehr umstritten und im Folgenden sollen die Kernargumente dieses Streits kurz zusammen gefasst werden:

4.1. Mögliche ordnungsrechtliche Maßnahmen

Angesichts der grundgesetzlichen Voraussetzung, dass das Ordnungsrecht nicht strafen, sondern nur darauf gerichtet sein darf, dass der Unibetrieb weiter stattfinden kann, sind die möglichen Maßnahmen des Ordnungsrechts sehr eingeschränkt. Neben dem Verbot an bestimmten Veranstaltungen teilzunehmen oder bestimmte Gegenstände mitzubringen, was schon im Rahmen des regulären Hausrechts verfügt werden kann, geht es vor allem um die Zwangsexmatrikulation (bzw. Rügen und Androhungen aller dieser Maßnahmen).

Eine Zwangsexmatrikulation – so die Kritik – könne aber nichts zur Ordnung an den Hochschulen beitragen, was nicht auch durch Maßnahmen des Hausrechts zu erreichen wäre, zumal sich das Hausrecht auch gezielt auf einzelne Veranstaltungen oder bestimmte Zeiten anwenden lässt, um z.B. prinzipiell ein Studium zu ermöglichen, aber zu verhindern, dass bestimmte Personen sich begegnen. Zudem sei die Zwangsexmatrikulation eine Einschränkung des Grundrechts auf Berufsfreiheit, die angemessen, notwendig und wirkungsvoll sein müsse, was in diesem Fall nicht gegeben sei.

In Zeiten, in denen es zahlreiche Möglichkeiten gibt, auch online an Hochschulveranstaltungen teilzunehmen, sei zudem nicht mehr nachvollziehbar, warum mit einem Hausverbot ein Ende des Studiums einhergehen müsste. Angesichts dessen habe die Zwangsexmatrikulation faktisch die Funktion einer Strafe

und verstoße damit gegen das Doppelbestrafungsverbot.

4.2. Tempo versus Rechtsstaatlichkeit des Verfahrens

Immer wieder wird in der Debatte darauf verwiesen, dass das allgemeine Recht bereits Maßnahmen zum Schutz vor Diskriminierung und sexueller Übergriffigkeit umfasst und dies zusammen mit regulären Gerichtsverfahren auch der richtige Ort dafür sei.

Eine Kritik besteht darin, dass es absurd sei, solche schwerwiegenden Übergriffigkeiten mit dem Kleben von Stickern und Sitzblockaden in einem Atemzug zu behandeln.

Vor allem aber wird dem entgegen gehalten, dass die regulären Verfahren in solchen Fällen trotz der Möglichkeit von Eilverfahren oft zu langsam seien, was allerdings die Frage aufwirft, wieso das universitäre Ordnungsrecht schneller sein sollte als die reguläre Judikative.

Kritiker*innen des Ordnungsrechts führen in diesem Kontext an, dass das Ordnungsrecht in der Tat oft schneller gewesen sei, aber vor allem deshalb, weil es rechtsstaatliche Prinzipien nicht berücksichtige: Es gebe keine angemessene Beweisfeststellung und faktisch würden bei straf- oder zivilrechtlich relevanten Fragen Vorverurteilungen vorgenommen, das Maß der verhängten Sanktionen sei willkürlich, Anklage und Urteil lägen bei derselben Institution. Zusammend mit dem faktischen Verstoß gegen das Doppelbestrafungsverbot (siehe oben) habe dies dazu geführt, dass es in den letzten 50 Jahren in ganz Deutschland lediglich zwei ordnungsrechtliche Verfahren gegeben habe, die einer gerichtlichen Überprüfung standgehalten haben [29]. Um die Allgemeinheit einzuschüchtern, würden damit letztlich grundgesetzwidrig an Personen Exempel statuiert, die nicht den finanziellen und politischen Background hätten, um sich vor Gericht gegen diese Maßnahmen zu wehren.

Gleichzeitig gibt es aber auch Beispiele, bei denen Hochschulen der Kritik mangelnder Rechtsstaatlichkeit begegnen, indem sie relativ genaue Richtlinien für das Ordnungsrecht festlegen, die Entscheidungen in breiter aufgestellten und transparent arbeitenden Gremien unter Beteiligung aller Mitgliedergruppen einerseits und juristisch geschulter Personen andererseits fällen, und / oder an reguläre Gerichtsprozesse angelehnte Verfahren etablieren.

4.3. Missbrauch und disziplinierender Charakter

Wie bereits in 2.6 dargestellt ging das Ordnungsrecht neben den Prüfungsrestriktionen aus dem Disziplinarrecht hervor, welches vor allem, aber nicht nur im Nationalsozialismus als Instrument autoritärer Repression eingesetzt wurde. [13]

Auch wenn es heute nicht mehr um ein Disziplinarrecht gehe, sei auch das Ordnungsrecht von Anfang an und erklärtermaßen auf Einschüchterung und das Niederhalten legitimer Proteste gerichtet gewesen.

Der faktische Verstoß gegen das Doppelbestrafungsverbot und der Verstoß gegen rechtsstaatliche Prinzipien seien kein Zufall, sondern systematisch darauf angelegt, Studierende, deren politische Ausrichtung nicht passe, von der Ausübung ihrer Grundrechte abzuhalten. [17]

4.4. Probleme lösen versus Probleme loswerden

Ein weiterer Kritikpunkt besteht darin, dass Zwangsexmatrikulationen – ähnlich wie bei der Abschiebung Straffälliger ohne deutsche Staatsbürgerschaft – darauf gerichtet seien, ein Problem bloß aus der eigenen Institution loszuwerden und anderen in die Schuhe zu schieben, anstatt Verantwortung für die Lösung des Problems zu übernehmen. Gerade Hochschulen seien aber dafür prädestiniert, Konflikte zu rationalisieren und problematisches Verhalten nicht zu individualisieren oder gar zu pathologisieren, sondern von seinen gesellschaftlichen Wurzeln her aufzuarbeiten. [15] Gerade dass sich die Häufigkeit von Diskriminierungen und Übergriffen in verschiedenen Epochen in verschiedenen sozioökonomischen und politischen Situationen stark unterscheiden, zeigte, dass es sich um ein gesellschaftliches Phänomen handele, dass nur im Bezug auf den gesellschaftlichen Kontext aufgearbeitet werden könne.

5. Konsequenzen für die aktuelle Debatte

Dieser kurze historische Abriss zeigt, dass die Debatte um Prüfungsrestriktionen bisher vielleicht zu eng geführt wurde und noch mehr ins Verhältnis gestellt werden muss zur Frage, welche Kultur an den Hochschulen herrschen soll und welche gesellschaftliche Funktion die Hochschulen erfüllen sollen. Historisch entstanden als Zusatz des Ordnungsrechtes erfüllen die Prüfungsrestriktionen auch die bisher wenig diskutierte Aufgabe, durch Leistungsdruck einzuschüchtern und zu entpolitisieren. Bestehende gesellschaftliche Kontroversen werden dadurch tendenziell ins Private oder in andere Institutionen verschoben. Aus Sicht der Autor*innen wäre es dagegen dringend notwendig, dass die Hochschulen mehr Verantwortung für die positive Wendung gesellschaftlicher Krisen übernehmen.

6. Literatur

- [1] Zusammenkunft aller Physik-Fachschaften (2017): Zu Zwangsexmatrikulation <https://zapf.wiki/Datei:Zwangsexmatrikulation.pdf> (Stand 5/2024)
- [2] Brackertz, S., El Miniawy, A., Gehlert, J., Kern-Michler, D., & Längle, M. (2022). Workshop: Konsequenzen aus drei Jahren Studienreformforschung: Ein Beitrag des Studienreform Forums. PhyDid B - Didaktik Der Physik - Beiträge Zur DPG-Frühjahrstagung <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1309>
- [3] Webseite des Studienreform-Forums: Themenseite Prüfungsversuchsbeschränkungen

- <https://studienreform-forum.de/de/themen/pruefungsversuchsbeschraenkungen/> (Stand 5/2024)
- [4] Grüne NRW: Langtagwahlprogramm 2022
https://gruene-nrw.de/dateien/ltw22_Wahlprogramm_gruenernw.pdf (Stand 5/2024)
- [5] Die Linke NRW: Landtagwahlprogramm 2022
https://www.dielinke-nrw.de/fileadmin/lvnrw/LTW_2022/Landtagwahlprogramm_2022_DIE_LINKE.NRW_Stand_18.01.2022_13_Uhr.pdf (Stand 5/2024)
- [6] Grotheer, L.: Coronabedingte Regelstudienzeitverlängerungen – Eine Übersicht der aktuellen Regelungen (2021)
<https://www.fzs.de/2021/12/22/coronabedingte-regelstudienzeitverlaengerungen-eine-uebersicht-der-aktuellen-regelungen/> (Stand 5/2024)
- [7] Bergische Universität Wuppertal: Tag des Studiums 2021
<https://www.youtube.com/watch?v=0imjS-H1w9U4> (Stand 5/2024)
- [8] Juso Hochschulgruppe Köln: Wahlprogramm – Studentische Wahlen vom 4.12. bis zum 8.12.2023 an der Universität zu Köln
<http://juso-hsg.uni-koeln.de/category/wahlen/> (Stand 5/2024)
- [9] Liste Linker Aktiver – Bündnis für eine soziale, zivile und demokratische Hochschule: Wessen Uni? Unsere Uni! Unsere Selbstdarstellung zum Senat bei den studentischen Wahlen vom 4. bis 8. Dezember 2023
<https://www.wendepunkt.uni-koeln.de/wp-content/uploads/2023/11/Senat-Selbstdarstellung-2023-24-Friedensuni-Flyer.pdf> (Stand 5/2024)
- [10] Senat von Berlin: Vorlage – zur Beschlussfassung – über Siebzehntes Gesetz zur Änderung des Berliner Hochschulgesetzes (17. BerHGG-ÄnderungsG)
<https://www.parlament-berlin.de/adosservice/19/IIIPlen/vorgang/d19-1572.pdf> (Stand 5/2024)
- [11] TU Dresden, Prüfungsordnung für den Bachelorstudiengang Internationale Beziehungen
https://www.verw.tu-dresden.de/Amtbek/PDF-Dateien/06-2022/09_ZISpoBA11.07.2022.pdf (Stand 5/2024)
- [12] Laubinger, H.-W.: Studentisches Disziplinarrecht gestern und heute – Eine Skizze – In: Dabior et al: Perspektiven des Öffentlichen Rechts. Nomos, Baden-Baden 201. S. 121
<https://www.nomos-elibrary.de/10.5771/9783845236988-113/studentisches-disziplinarrecht-gestern-und-heute-eine-skizze?page=1>
- [13] Rüstemeier, B., Kley, B.: Renaissance einer schlechten Idee
<https://www.gew-berlin.de/aktuelles/detailseite/renaissance-einer-schlechten-idee> (Stand 5/2024)
- [14] Gesetz über die Hochschulen im Land Berlin (Berliner Hochschulgesetz – BerHGG) in der Fassung vom 26. Juli 2011
<https://gesetze.berlin.de/bsbe/document/jlr-HSchulG2011V18IVZ> (Stand 5/2024)
- [15] Zusammenkunft aller Physik-Fachschaften: Sammlung aller Resolutionen und Positionspapiere
https://zapf.wiki/Sammlung_aller_Resolutionen_und_Positionspapiere (Stand 5/2024)
- [16] asta_information Johann Wolfgang Goethe Universität FfM, 3/1969
https://www.studentenbewegung-frankfurt.de/wp-content/uploads/2020/01/asta_info_69_03_mai.pdf (Stand 5/2024)
- [17] ver.di Berlin-Brandenburg: Hilft Betroffenen nicht und ist ein hochschulpolitischer Rückschritt – ver.di lehnt Einführung von Ordnungsrecht an Berliner Hochschulen ab
<https://bb.verdi.de/presse/pressemitteilungen/+co++1c850240-edac-11ee-9a09-250f18786d9a> (Stand 5/2024)
- [18] Herbert, L. R.: Die akademische Gerichtsbarkeit der Universität Heidelberg: Rechtsprechung, Statuten und Gerichtsorganisation von der Gründung der Universität 1386 bis zum Ende der eigenständigen Gerichtsbarkeit 1867, Heidelberg: heiBOOKS, 2018. <https://doi.org/10.11588/heibooks.348.481>
- [19] Asche, M., Vortrag gehalten bei den Bensheimer Gesprächen 2011 mit dem Titel: Geheime Eliten. Gekürzt abgedruckt in FAZ vom 3. August 2011, Seite N5 Pflanzschule rechtschaffener und dem Vaterlande brauchbarer Männer
- [20] Freitäger, A.: Gleichschaltung durch das Disziplinarrecht: Universitätsrat und Disziplinargericht 1928-1936, Beiträge des Kolloquiums aus Anlass des 40jährigen Bestehens des Universitätsarchivs Köln am, ISSN 1869-9294
- [21] Gerber, H.: Grundfragen des akademischen Disziplinarrechts. In: Deutsches Verwaltungsblatt 70 (1955) zitiert nach Andreas Freitäger, Gleichschaltung durch das Disziplinarrecht: Universitätsrat und Disziplinargericht 1928-1936, Beiträge des Kolloquiums aus Anlass des 40jährigen Bestehens des Universitätsarchivs Köln am, ISSN 1869-9294
- [22] Geisel-Brinck, J. & Brackertz, S. (2019): Essay: Was hat die denn damals bloß geritten? Ein Blick auf die Entstehungsgeschichte von Restriktion zur Vorbereitung ihrer Abschaffung, Artikel des Studienreform-Forums
<https://studienreform-forum.de/de/forum-2019/beitraege-2019/2019/03/26/was-hat-die-denn-damals-blosz-geritten-ein-blick-auf-die-entstehungsgeschichte-von-restriktion-zur-vorbereitung-ihrer-abschaffung/>
- [23] Rüttgers, J.: „Hochschulen für das 21. Jahrhundert“ 1997. Vergleiche: Felicitas von Aretin: Startschuß für Reform – Rüttgers stellt sein

- Konzept „Hochschulen für das 21. Jahrhundert“ vor. Die Welt, 27. Februar 1997.
<https://www.welt.de/print-welt/article634563/Startschuss-fuer-Reform.html>
- [24] Baacke, D., Brinckmann, C., Meyer, E., Georg, D., Schmitz, H., Heuer, D., Weber, K., Skowronek, H., Brinckmann, H., Friedrich, H., Waagemann, C., Lange, D., Ritter, U. (1970): Forschendes Lernen – Wissenschaftliches Prüfen: Ergebnisse der der Arbeit des Ausschusses für Hochschuldidaktik: Bonn
- [25] Sternsloff, H.-W., Elitz, E.: „Das ist nunmal Juristerei“: Interview mit Johannes Strelitz. In: Der Spiegel 10/1969
<https://magazin.spiegel.de/EpubDelivery/spiegel/pdf/45763623>
- [26] Bund demokratischer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler: Zehn Jahre Bologna
<https://www.bdwi.de/forum/archiv/uebersicht/3273447.html> (Stand 5/2024)
- [27] Initiative Neue Soziale Marktwirtschaft: Niedriglohn muss sich lohnen
<https://www.presseportal.de/pm/39474/306945> (Stand 5/2024)
- [28] Initiative Neue Soziale Marktwirtschaft: Initiative Neue Soziale Marktwirtschaft schaltet Anzeige zu Studiengebühren
<https://www.presseportal.de/pm/39474/640715> (Stand 5/2024)
- [29] Ausschuss für Wissenschaft und Forschung des Berliner Abgeordnetenhauses: Wortprotokoll Öffentliche Sitzung 15. April 2024
<https://www.parlament-berlin.de/ados/19/Wiss-Forsch/protokoll/wf19-032-wp.pdf>
- [30] Ewert, P., & Lullies, S. (1985). Das Hochschulwesen in Frankreich: Geschichte, Strukturen und gegenwärtige Probleme im Vergleich.
https://www.ihf.bayern.de/uploads/media/Monographie_12.pdf
- [31] Malter, E.: Wo einst die wilden Kerle einsaßen Bild Karzer
<https://www.fau.de/2015/01/news/wo-einst-die-wilden-kerle-einsassen/> (Stand 5/2024)
- [32] Universität Leipzig: Karzerstrafen (Screenshot)
<https://ual.archiv.uni-leipzig.de/karzerstrafen.-php>

Workshop: Vom Sinn des Physikstudiums

- Motivationen für das Physikstudium und abzuleitende Konsequenzen -

Barbara Obwaller¹, Stefan Brackertz², Manuel Längle³, Jonathan Moeller⁴, Lisa Lehmann⁴, An-nemarie Sich², Robert Bartz², Amr El Miniawy⁵, Milan Ončák⁶, Luise Helmstreit⁷, Ilja List⁴, Paul Opitz⁸, Marwin Handler³, Antonia Bauer⁸

¹Universität Innsbruck, Studienvertretung Physik, ²Universität zu Köln, Fachschaft Physik, ³Universität Wien, Studienvertretung Physik, ⁴Technische Universität Dresden, Fachschaft Physik, ⁵Humboldt-Universität zu Berlin, Fachschaft Physik, ⁶Universität Innsbruck, Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik, ⁷Universität zu Köln, Institut für Geophysik und Meteorologie, ⁸Technische Universität Dresden, ⁹Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, FSI Mathe/Physik/DS

orga@studienreform-forum.de

Kurzfassung

Warum studieren Personen eigentlich Physik? Was sind ihre Ziele und was spornt sie an? Die Frage nach dem "Warum" kann Auslöser für Sinnkrisen im Studium sein, welche es zu analysieren gilt. Dabei ist es hilfreich, ein genaueres Verständnis für die Motivation im Studium zu entwickeln, um Konsequenzen und Reformen abzuleiten, die die Studiensituation verbessern können. Thematisiert werden intrinsische und extrinsische Motivationen sowie das Anstreben von Verfügungserweiterung, d.h. dem Entwickeln der eigenen Problemlösestrategien. Im vorliegenden Beitrag wird auch die Frage aufgeworfen, welchen Nutzen Physiker*innen denn für die Gesellschaft haben, die ihnen immerhin das Studium ermöglicht. Hierzu werden technologischer Fortschritt und der Nutzen der Grundlagenforschung, sowie die politische Relevanz physikalischer Forschung diskutiert.

1. Einleitung

Häufig wird in der Physik über stagnierende oder zurückgehende Studierendenzahlen gesprochen. Aus unserer Sicht ist jedoch die Frage 'Wie können wir mehr Schüler*innen für das Physikstudium interessieren?' nicht ausreichend, denn was nützt es, mehr Wasser in die Wanne zu schöpfen, bevor man das Leck gestopft hat?

Begrüßenswerterweise steigt die Bedeutung der Hochschuldidaktik im Diskurs an den Hochschulen, in der DPG [1] aber auch in der Gesetzgebung [2] langsam, aber merklich. Gleichwohl nimmt diese Debatte in der Regel vor allem die Frage in den Blick, wie ein gegebener Inhalt erfolgreicher vermittelt werden kann und selten, welche Prüfungsbedingungen und -verfahren und welche sozialen Bedingungen förderlich sind. Die Frage, welchen Zweck ein Physikstudium in den Augen der verschiedenen Beteiligten eigentlich erfüllen soll und welche Inhalte dafür relevant sind, spielt in diesem Diskurs absurderweise fast keine Rolle [1].

Vor diesem Hintergrund hat das Studienreform-Forum Studierende und Dozierende dazu aufgerufen, Essays zu dieser Frage einzureichen. Diese Beiträge wurden in einem Workshop auf der DPG-Tagung in Greifswald zueinander ins Verhältnis gestellt, um weitere Aspekte ergänzt und daraufhin befragt, welche Konsequenzen sich daraus für die Gestaltung von Physikstudiengängen ableiten lassen. Dieser

Beitrag dokumentiert die Zwischenergebnisse aus dem Workshop und aus den Beiträgen, die sich im supplementary material finden.

Die Beiträge und die Debatte adressieren im Wesentlichen die folgenden Fragenkreise:

- Welche intrinsischen und extrinsischen Beweggründe motivieren Studierende, sich für ein Physikstudium zu entscheiden? Wie behält man die Motivation im Studium?
- Wie ist das Physikstudium als Beitrag zur Verfügungserweiterung bzw. -erhaltung zu sehen?
- Was trägt ein Physikstudium zur Entwicklung der Welt bei?

Diese Aspekte werden in den folgenden Abschnitten näher ausgeführt, um jeweils am Ende des Abschnittes erste mögliche Konsequenzen für die Gestaltung von Physikstudiengängen zu skizzieren.

2. Begriffsklärung

Klassischerweise wird intrinsische sowie extrinsische Motivation unterschieden. Intrinsisch motivierte Verhaltensweisen können als interessenbestimmte Handlungen definiert werden, deren Aufrechterhaltung keine vom Handlungsgeschehen „separierbaren“ Konsequenzen erfordert, etwa Neugier, Exploration, Spontaneität und Interesse an den unmittelbaren Gegebenheiten der Umwelt. Extrinsische Motivation wird dagegen in Verhaltensweisen sichtbar, die mit instrumenteller Absicht durchgeführt wer-

den, um eine von der Handlung separierbare Konsequenz zu erlangen. Sie treten in der Regel nicht spontan auf sondern werden vielmehr durch Aufforderungen in Gang gesetzt, deren Befolgung eine Bekräftigung erwarten lässt. [13]

Bei manchen der in den Essays angeführten Motivationen scheint eine Einordnung in eine dieser beiden Kategorien den Beiträgen nicht ganz gerecht zu werden. Stellt man sich beispielsweise das Szenario einer Studentin vor, die sich zwar nicht besonders für Physik interessiert, es aber als hochrelevantes Wissen auf der Suche nach einer Lösung für den Klimawandel erkannt hat, scheint es zu kurz gegriffen, dies als extrinsische Motivation zu bezeichnen. Hier kommt der Begriff der Verfügungserweiterung ins Spiel, wobei es darum geht, Handlungsstrategien und Fähigkeiten zu erlernen, mit denen man die eigene Situation im Leben verbessert oder die Problemlösefähigkeit / Handlungsfähigkeit erweitert. [14]

3. Intrinsische Motivation - Spaß an der Physik

Beim Lesen der Beiträge zum Call for Papers fällt auf, dass viele eine etwas verklärte oder romantisierte Sicht auf die Physik zu haben scheinen. Oft werden in den Essays intrinsische Motivationen, speziell das Interesse am Fach oder eine Faszination für die Mathematik, stark in den Vordergrund gerückt. Man liest beispielsweise:

„Lastly the reason most Physicists cite when asked about their choice of profession: The vast curiosity and fascination with the complex yet logical structure of the universe is fueled with every new topic that is taught. Complex and sometimes abstract mathematical principles are used as tools of understanding to unravel and understand the universe we live in. Many fall in love with this objective approach of understanding, despite its challenging nature and high level of complexity, and pursue a degree in physics.“ [11]

„Ein weiterer Aspekt meiner Motivation ist das intrinsische Bedürfnis, Dinge verstehen zu wollen. Schon als Kind war ich stets von der Art, auf alles mit 'Warum' zu antworten. Die Physik befriedigt mein inneres Spielkind, meine unersättliche Neugier und der Wunsch nach Wissen waren ausschlaggebend für die Entscheidung, die Physik als mein zweites Hauptfach zu wählen.“ [10]

„Das Universum ist so weitreichend und unverständlich und die Physik eröffnet uns einen naturwissenschaftlichen Blick auf die komplexe Schönheit desselben.“ [6]

Beim Workshop ergab sich ein ähnliches Bild. Man bekommt das Gefühl, den Verfasser*innen und Workshop-Teilnehmer*innen ginge es vorwiegend um die Befriedigung der eigenen Neugier. Es drängt sich der Vergleich zu einem Zitat von Richard Feynman auf: „Physics is like sex: sure, it may give some practical results, but that's not why we do it.“

Hier stellt sich jedoch die Frage, wie repräsentativ selbst eingereichte Essays sowie die Diskussion auf einer Physikdidaktiktagung für durchschnittliche Physikstudierende sind. Es kann davon ausgegangen werden, dass die meisten Studierenden eine gewisse Faszination für das Fach mitbringen, trotzdem ist die Annahme sicher berechtigt, dass diese Faszination und Neugierde nicht alle Studierenden gleich stark antreibt, auch wenn fast alle autobiographischen Beiträge diesen Aspekt in den Mittelpunkt stellen.

4. Extrinsische Motivation

Folgt man den verbreiteten Kategorien von Motivationstheorien [14], wäre zu erwarten, dass die intrinsischen Motivationen, die die Studierenden zu ihrem Studium gebracht haben, mehr oder weniger durch extrinsische Motivation „angefüttert“ werden müssen, damit dieses auch abgeschlossen wird. Es ist vermutlich sinnvoll, zwischen Motivatoren für das Physikstudium als Ganzes und Motivatoren für den Studienalltag/individuelle Lehrveranstaltungen, zu unterscheiden. Letzteres wären beispielsweise Abgabefristen, Klausuren und vor allem Noten. Zu Ersterem könnte man sowohl Jobchancen nach dem Studium als auch technologischen Fortschritt zählen, da hinter beidem eine instrumentelle Absicht des Studiums bzw. des Erlernten stecken. Zum Teil weil von vielen der Begriff der extrinsischen Motivation damit verbunden wird, etwas nur für sich selbst zu tun, wird technologischer Fortschritt und die damit verbundene gesellschaftliche Bedeutung nicht unter den extrinsischen Motivationen sondern unter dem Aspekt der Verfügungserweiterung behandelt.

4.1. Extrinsische Motivation auf Lehrveranstaltungsebene - Abgabefristen, Noten und Co.

Extrinsische Motivatoren wie Abgabefristen und Co. kamen in den Essays eher als Hindernisse zur Sprache, die Studierende vor allem mit dem Gedanken spielen lassen, das Studium abzubrechen:

„Während ich versuchte, drei Übungsblätter pro Woche abzugeben, fiel es leicht, zu vergessen, dass ich das ja freiwillig mache. Nach unnötigen Nachschichten döste ich morgens in der Vorlesung. Mal ein Buch zu lesen, dafür war in meinem selten existenten Zeitplan eigentlich kein Platz. Es blieben Bibliotheksgebühren und das Gefühl, das mit dem Studieren irgendwie nicht richtig zu machen.“ [3]

Im Gegensatz zu den Essays wurde im Workshop auch angesprochen, dass es nach Meinung einiger Teilnehmer*innen ohne Deadlines und verpflichtende Abgaben der Übungsaufgaben vermutlich zu einem schlechteren Studienerfolg käme. Gleichzeitig konnten Erfahrungsberichte von Studierenden einzelner Universitäten, die solche Regelungen gar nicht oder nur in vergleichsweise geringem Maße implementiert haben, dem widersprechen. Dass die Frage der Wirksamkeit und Notwendigkeit von Fristen, Klausuren und Co. als extrinsischer Motivation in den Essays nicht angeschnitten wurde, wird ange-

sichts dieser Debatte vor allem auf das Framing des Call for Papers des Studienreform-Forums zurückgeführt. Darin wurde gefragt, was die Studierenden zum Physikstudium motivierte oder bei der Studienwahl motiviert hatte, nicht jedoch was sie dazu brachte, Hausübungen zu lösen, für Klausuren zu lernen oder Berichte auszuarbeiten.

Konsequenz: Unabhängig davon, ob Abgabefristen und Noten im Studium als extrinsische Motivatoren funktionieren, scheinen sie ein hohes Potenzial zu haben, intrinsische Motivation abzuwürgen, bis hin zum Studienabbruch. Dieser Aspekt muss in der Debatte über Regularien und Restriktionen viel mehr berücksichtigt werden.

4.2. Extrinsische Motivation auf Studiengangsebene - Jobsicherheit und Karrierechancen

Typischerweise wird den Physikstudierenden von vielen beratenden Institutionen ins Ohr gelegt, dass sie im Anschluss an das Studium 'alles' machen könnten. Man würde ihre analytischen Fähigkeiten, ihr Verständnis für Mathematik, ihre Programmierfähigkeiten, Erfahrung im Umgang mit Daten, das systematische Experimentieren und nicht zuletzt ihre Stärke für das Arbeiten in Teams in der Wirtschaft sehr schätzen. Man lernt zu glauben, dass man als Physikstudent*in besonders gut darin ist, neue Themengebiete schnell zu durchdringen, dass man irgendwie alles ein bisschen kann.

Für manche ist die Fülle an Möglichkeiten, die einem nach dem Physikstudium offenstehen, ein wichtiges Argument für die Studienwahl, wie sich sowohl in den Essays als auch im Workshop zeigte. Dies ist ein Weg, sich einerseits viele Türen offen zu halten und nicht ohne fundierte Grundlage verfrüht mehr oder weniger zufällige Lebensentscheidungen treffen zu müssen (Verfügungserweiterung), und andererseits zu einer fragten Arbeitskraft zu werden.

Aufgrund der als gut geltenden Jobchancen scheinen Physikstudierende diesen Punkt vor allem als geklärt abzuhaken und sich im Studienalltag sehr wenig mit der Frage, welcher Beruf nach dem Studium ergriffen werden soll, auseinander zu setzen. Dementsprechend werden die „guten Jobchancen“ oft zur Frage, wieso man Physik studiert, genannt, ohne sich eingehend damit auseinandergesetzt zu haben.

Als Hypothese wird daher vorgeschlagen, dass viele Studierende aus intrinsischer Motivation das Studium wählen, dies aber nicht bedeutet, dass ihnen finanzielle Absicherung egal wäre. Wenn Physikstudierende auf die Frage „Warum studierst du Physik?“ eine floskelhafte Antwort à la „Damit habe ich später gute Jobchancen“ geben, ist diese vage Aussage vermutlich dem geschuldet, dass die Physik-Ausbildung als Jobgarantie wahrgenommen wird und viele glauben, es sich leisten zu können, sich erst viel später konkreter mit der Jobfrage auseinanderzusetzen. Wie später noch heraus gearbeitet wird, liegt es aber auch nahe, dass viele Physikstudierende

nicht als Träumer*in dastehen wollen, die jahrelang studieren, ohne an die Berufsbefähigung zu denken.

5. Verfügungserweiterung und gesellschaftlicher Nutzen

Viele der in den Essays und im Workshop genannten Gründe für ein Physikstudium passen nicht wirklich in die Kategorien intrinsische und extrinsische Motivation und sind von einem starken Gesellschaftsbezug geprägt.

5.1. Physik als Schlüssel zum Umgang mit Komplexität

Immer wieder wird betont, wie sehr die Autor*innen befürworten, sich „schwierigen“ bzw. komplexen Problemen zu stellen. Zunächst einmal ist festzuhalten, dass dies ein klarer Bruch ist mit dem kulturellen Mainstream. Vielmehr ist es aber auch als Antwort zu verstehen auf einen öffentlichen Diskurs, der Widersprüche und die Komplexität der Welt betont, aber darauf nur die immer gleichen zwei unbefriedigenden Antworten gibt: Allgemeine zeitlose Wahrheiten, an die niemand glaubt, und postmoderne Tendenzen, die auf die Multitude der Einzelfälle verweisend jedes Denken in Kategorien ablehnen und zu Ende gedacht alles zu Geschmacksfragen erklären. Tatsächlich gibt die Physik als Alternative zu solchen Plattitüden z.B. mit Symmetrien & Erhaltungsgrößen, systematischen Approximationen, statistischer Physik insgesamt und besonders der Theorie der Phasenübergänge und des Chaos' fundierte und sehr weit reichende Antworten.

5.2. Unsicherheit in Bezug auf die gesellschaftliche Relevanz des Physikstudiums

Ein weiterer Aspekt, der in den Essays immer wieder vorkommt, ist die These, dass die Physik nur wenig zum gesellschaftlichen Fortschritt beitrage, was anscheinend häufiger zu Sinnkrisen im Studium führt. Beispielsweise beschäftigt sich ein Essay [7] mit der Frage, ob es nicht zu einem gewissen Grad selbstüchtig sei, sich in Astrophysik zu spezialisieren:

„Im Laufe des Studiums habe ich mich im Angesicht der vielen Krisen, allen voran des Klimawandels, oft gefragt, ob ich wirklich Astrophysik machen will. Schließlich fällt mir auch keine gute Antwort ein, was es denn konkret bringt, Sternschwingungen oder unerreichbar weit entfernte Quasarspektren zu erforschen. Dann kommt es mit selbstüchtig vor, meine ganze Ausbildung nur zur Erforschung von winzigen Lichtpunkten zu verwenden, wo ich doch neue Möglichkeiten finden könnte, Treibhausgasemissionen zu verringern oder die Effizienz von nachhaltigen Kraftwerken zu erhöhen.“ [7]

Auch in anderen Essays scheinen ein wenig Zweifel mitzuschwingen, ob das Physikstudium eigentlich jemandem nütze („Vielleicht bin ich irgendwann ja gut für die Volkswirtschaft oder mache etwas, das irgendwann weiterhilft.“ [3]) statt nur den Studieren-

den Spaß zu machen und gleichzeitig Gesellschaft, Familie und Co. Geld zu kosten.

Dieses schlechte Gewissen schwingt bei vielen Studierenden mit, insbesondere bei jenen, die sich für Grundlagenforschung interessieren. Aber auch bei Studierenden, die sich mit Gebieten der Physik beschäftigen, die gesellschaftliche Herausforderungen explizit adressieren wie die Umweltphysik ist anscheinend nicht garantiert, dass die eigene Forschung wirklich einen Unterschied im Hinblick auf die großen Fragen der Menschheit wie den Klimawandel oder soziale Ungerechtigkeit macht. Im Zentrum steht hier die Beobachtung, dass die Konsequenzen, die sich bereits aus dem aktuellen physikalischen Erkenntnisstand ergeben, gesellschaftlich nicht in die Wege geleitet werden.

Gibt es überhaupt Bereiche der Physik, in denen man die Sinnfrage völlig befriedigend beantworten kann? Ob das in der Grundlagenforschung der Fall ist, scheint fraglich. Andererseits hat die Grundlagenforschung für manche vielleicht mehr Begeisterungspotential als die angewandte Forschung, da diese manchmal aufgrund ihrer Spezifik auch eintönig oder langweilig wirken kann. Zum Beispiel heißt es in einem Essay:

„Mich persönlich interessiert Astrophysik sehr, sie ist auch ein Grund, warum ich überhaupt angefangen habe, Physik zu studieren. [...] Eine Errungenschaft der Grundlagenforschung ist also, junge Menschen für Forschung zu begeistern, darin ist sie wesentlich effektiver als andere Disziplinen, schließlich ist es unwahrscheinlich, dass Achtzehnjährige sich für ein naturwissenschaftliches Studium entscheiden, weil sie sich brennend für die Abnutzung von Bohrköpfen interessieren.“ [7]

Dies ist jedoch vermutlich etwas zu einseitig. Technologischer Fortschritt und der damit verbundene Nutzen kann zum Beispiel für Studierende, für die ein technischeres Studium infrage gekommen wäre, eine wichtigere Motivation sein als das Erforschen teils sehr abstrakter oder von jeglicher Anwendung scheinbar losgelöster Naturgesetze. Auch hier drohen aufgrund der Spezifik bzw. einer eng abgegrenzten Forschungsfrage Eintönigkeit und Motivationskrisen, die vielleicht dadurch noch größer werden, dass unklar ist, wem die Ergebnisse faktisch dienen.

Spätestens seit der Entwicklung der Atombombe ist es unbestreitbar, dass physikalisches Wissen gesellschaftlich relevant ist und Einfluss auf die politische Lage hat. Dabei sind Physiker*innen Produzent*innen und Vermittler*innen dieses Wissens und somit nicht unpolitisch zu verstehen. Dies wird unter anderem in der Debatte um nukleare Aufrüstung in Deutschland in den 1950ern und der Göttinger Erklärung [12] deutlich, die maßgeblich durch fachliches Wissen, jedoch auch durch eine politische Entscheidung beeinflusst wurde.

Hinzu kommt, dass Physiker*innen aufgrund ihres Studiums, welches als sehr anspruchsvoll wahrgenommen wird, oft eine Art „Wissensautorität“ darstellen oder einen Glaubwürdigkeitszuschuss/-überschuss in Debatten genießen. In wichtigen Krisensituationen diese „Wissensautorität“ zu nutzen, kann dafür sorgen, dass Probleme ernst genommen werden, die sonst untergehen würden. Die Verantwortung die Physiker*innen eo ipso tragen, legt die gesellschaftlichen Relevanz derer nahe, die auf dem Weg sind, Physiker*innen zu werden.

nommen wird, oft eine Art „Wissensautorität“ darstellen oder einen Glaubwürdigkeitszuschuss/-überschuss in Debatten genießen. In wichtigen Krisensituationen diese „Wissensautorität“ zu nutzen, kann dafür sorgen, dass Probleme ernst genommen werden, die sonst untergehen würden. Die Verantwortung die Physiker*innen eo ipso tragen, legt die gesellschaftlichen Relevanz derer nahe, die auf dem Weg sind, Physiker*innen zu werden.

5.3. Arbeitsmarktchancen als Indikatoren für die Relevanz des Studiums

Manche Autor*innen sehen in den Arbeitsmarktchancen einen klaren Indikator für den (gesellschaftlichen) Nutzen:

„Allein die Tatsache, dass viele Physiker*innen in Unternehmensvorständen, Banken, Versicherungen, Anwaltskanzleien, Softwareunternehmen, Forschungsinstituten oder als Bundeskanzlerin arbeiten, zeigt den Nutzen für die Gesellschaft.“ [9]

5.4. Studentisches Interesse an gesellschaftlichen Fragestellungen bleibt oft unerkannt

Die Studierenden stellen sich also Fragen zur gesellschaftlichen Relevanz der eigenen Forschung, nur werden selten befriedigende Antworten gefunden beziehungsweise sind sie manchmal nur indirekt und legitimatorisch. Gleicht man dies mit dem Beitrag von Milan Ončák (einem Lehrenden an der Universität Innsbruck) ab, der konstatiert, dass Studierende vor allem von Arbeitsmarkt-Fragen getrieben seien und zu wenig die Änderung der krisenhaften Welt in den Blick nähmen [8], gibt es im Wesentlichen zwei Möglichkeiten:

- 1) Der Wunsch, für die Gesellschaft nützlich zu sein, wurden in den Essays und im Workshop übertrieben und ist in Wahrheit weit weniger stark. Alle Studierenden sind in erster Linie an ihren Jobchancen interessiert.
- 2) Der Wunsch nach Verfügungserweiterung ist für manche Studierenden tatsächlich so wichtig, wie dies dargestellt wurde, Dozierende bekommen davon aber nichts mit.

Wann immer man totale Homogenität einer Gruppe annimmt (sei dies auch nur auf einen Aspekt bezogen), liegt man fast sicher falsch. Gesellschaftliche Fragen und Probleme dürften zumindest manche Studierenden beschäftigen. Ein möglicher Grund, wieso Studierende die Bedeutung dieser Motivation nicht offen kundtun, könnte sein, dass sie nicht anmaßend oder naiv wirken möchten („Ich studiere Physik, weil ich die Welt verändern / besser machen möchte“).

Konsequenzen :

- 1) Die gesellschaftliche Bedeutung der Physik wird während des Physikstudiums zu wenig deutlich.
- 2) Mehr Dialog zwischen Studierenden und Dozierenden (und auch unter Studierenden) nicht nur über Fragen der Physik oder praktische Gestaltung des Studiums, sondern auch über die eige-

nen Motivationen und die gesellschaftliche Rolle der Physik ist notwendig und muss so etabliert werden, dass er auch dann funktioniert, wenn es nicht einzelne Eisbrecher*innen gibt.

Die Notwendigkeit wird zum einen dadurch gegeben, dass einerseits bei der Planung von Lehrveranstaltungen mehr mit intrinsischer Motivation und weniger mit Deadlines und Co. gearbeitet werden könnte, wenn der Sinn der Aufgaben in einen klaren Kontext gesetzt ist. Zum anderen ist es eine vertane Gelegenheit, wenn man nichts davon weiß, dass andere dasselbe gesellschaftliche Problem (beispielsweise der Klimawandel) genauso brennend stört wie einen selbst. Es steht zu vermuten, dass Personen sich in Bezug auf ein Problem zwar nicht allein in der Lage sähen, eine Lösung herbeizuführen, sehr wohl aber als Team. Wie sollten sich derartige Teams finden, wenn man einander nicht identifizieren kann, weil zu wenig geredet wird?

5.5. Überwindung von Machtverhältnissen und Klärung des Sachzwanges

Das Physikstudium hat nicht nur selbst eine ethische und gesellschaftsrelevante Komponente, sondern kann auch dazu befähigen, sich bei anderen gesellschaftsrelevanten Fragestellungen zu orientieren. In mehreren Beiträgen wird deutlich, dass die Autor*innen mit Krisen der Welt, verbreiteter Unvernunft und Konkurrenz hadern und das Physikstudium im Gegensatz dazu als wohltuenden Hort der Vernunft und Kooperation wahrnehmen. Als bestärkend wird dabei die Erfahrung wahrgenommen, dass Vernunft und Kooperation tatsächlich funktionieren und produktiv sein können und man diesbezüglich auch Mitstreiter*innen finden kann. Ungeklärt scheint aber, inwieweit dies empowerend oder defensiv gelebt wird. Manche könnten beispielsweise dazu tendieren, diesen Hort als wertvollen Schutzraum wahrzunehmen, aus dem politische Fragestellungen fernzuhalten sind. Auch wenn Professor*innen absolute Expert*innen auf ihrem Gebiet sind, dürften manche davor zurückscheuen, politische Entscheidungen zu fordern, deren facettenreiche Konsequenzen für sie nicht absehbar scheinen. Dies dürfte für Studierende, denen selbst die physikbezogene Expertise fehlt, umso stärker gelten.

Ein Essay [4] beschäftigt sich damit, inwiefern Naturwissenschaften zu einer Überwindung der Machtverhältnisse beitragen können, die an der Aufrechterhaltung eines Großteils der Schlüsselprobleme unserer Epoche ein Interesse haben. Hier geht es insbesondere um die Infragestellung von behaupteten Sachzwängen, welche als natürlich dargestellt werden, jedoch eigentlich kulturell bedingt sind.

„Im Gegensatz zu Klafki hat Freire vor allem Erwachsenenbildung im Blick und Menschen, bei denen sich – eher unüblich für Kinder – eine „culture of silence“ etabliert hat. Er führt diese „culture“ maßgeblich darauf zurück, dass das Bewusstsein, dass die Verhältnisse größtenteils menschengemacht

und damit auch von Menschen änderbar sind, nicht nur unterentwickelt, sondern als Herrschaftsinstrument bewusst ausgehöhlt wird. Dementsprechend ist bei Freire die Gegenüberstellung „Natur“ versus „Kultur“ zentral.“ [4]

Eine etwas andere Perspektive machen einige Essays auf, welche die These aufstellen, dass ein allgemeiner Fachkräftemangel beim Probleme-Lösen herrsche und es nur mehr Physikstudierende brauchen würde, um die Welt zu einer besseren zu machen. Es wird immer wieder versucht, Konzepte aus der Physik auf fachfremde Fragestellungen zu übertragen [15], was in der Vergangenheit oft auch begrenzt zielführend war. Eine andere Perspektive wäre jedoch, die Theorien fremder Fachbereiche mittels Wissens aus der Physik auf Plausibilität zu prüfen um so Anwendbarkeitsgrenzen zu identifizieren. Dieser Ansatz wird erst langsam aufgenommen [16].

6. Motivationskiller im Physikstudium

Abgesehen von dem Stress, der aus Noten oder Abgabefristen entsteht, und den Zweifeln, ob man einen sinnvollen Beitrag zur Gesellschaft leistet, wurden noch zwei weitere Faktoren genannt, die bei Studierenden eine Motivations- oder Sinnkrise hervorrufen können.

6.1. „Nur Lehrämter“ sein – Wertschätzung gegenüber Studierenden

Fast durch Zufall wurde beim Workshop ein großer Quell an Frustration aufgedeckt, der speziell Lehramtsstudierende betrifft: Ihnen gegenüber wird häufig abschätzig über ihre im Studium erbrachte Leistung geredet. Ihnen wird immer wieder vorgehalten, sie würden „nur“ Lehramt studieren. Man spricht ihnen ab, Physik zu verstehen und ihre erlangten Kompetenzen werden herabgewürdigt.

Eine Teilnehmerin beim Workshop meinte: „Eins der großen Probleme bei den Lehrern ist, dass man ganz ganz ganz ganz oft gesagt bekommt 'du kannst eigentlich keine Physik, du machst ja Lehramt'. Das nimmt sehr sehr sehr viel Motivation raus und ist einer der großen Gründe für Abbruchquoten. Zumindest bei uns.“

Es wird suggeriert, es gäbe einen Widerspruch zwischen dem Wunsch, Physik auf Lehramt zu studieren, und gut in Physik zu sein. Ebenfalls beim Workshop zitierte eine Teilnehmerin: „Die Lehrämter, das gibt's ja wieder den Pipikram, nur einfaches Zeug.“

Das Resultat davon sind Selbstzweifel und Frust, die teils so weit gehen, dass Personen ihr Lehramtsstudium abbrechen. Dies ist insbesondere aufgrund des Lehrer*innenmangels (speziell in den Naturwissenschaften) katastrophal für die Gesellschaft. Es ist jedoch auch losgelöst vom drohenden Studienabbruch notwendig, diese Geringschätzung zu thematisieren, da sie für die betroffenen Studierenden eine vernichtende Wirkung haben.

6.2. Selbstständiges Lernen lernen und Weiterentwicklung der Lehre – Studierendensache oder geteilte Verantwortung?

Die Motivation im Studium leidet bei manchen auch dann stark, wenn man zwar eigentlich weiß, wofür man all die Arbeit auf sich nimmt, aber zweifelt, ob man diese bewältigt bekommt. Ein Essay [5] thematisiert, dass es in Sachen Lerntechniken und Strategien für effizientes Lernen meist keinerlei Unterstützungsangebot von Seiten der Universitäten gebe. Stattdessen wird suggeriert, es wäre selbstverständlich, dass man sich selbstständiges Lernen selbstständig beibringen muss [5]. Ausgehend von der These, dass eine der wichtigsten Aufgaben des Physikstudiums ist, Studierende zum eigenständigen Lernen zu befähigen und dass Lernen die Hauptaufgabe eines Physikstudierenden ist, scheint das Verständnis, das „Wie“ des Lernens zu thematisieren, völlig unverständlich. Alle Beteiligten, von den Studierenden und Universitäten über die Wirtschaft bis hin zu Steuerzahler*innen profitieren offensichtlich, wenn Physiker*innen besser darin sind, komplexe Fragestellungen zu durchdringen und zu beantworten. Gerade auch weil umfangreiche Ressourcen in Physikstudienplätze investiert werden, scheint es fast unverantwortlich Studierende hier nicht besser zu unterstützen. Auch in Anbetracht der Tatsache, dass die sozioökonomischen Herkunft zu einer Selektion der Studierenden führt, ist es relevant in Bezug auf soziale Gerechtigkeit und gesellschaftliche Durchmischung, mehr Unterstützungsangebot zur Verfügung zu stellen.

Auch in [8] wird angeschnitten, dass es Bedarf geben dürfte, sich mehr damit zu beschäftigen, wie der Lernprozess gefördert werden kann, hier wird allerdings das Verhalten der Dozierenden in den Vordergrund gestellt:

„Wenn die Zeitintensität des Physikstudiums angesprochen wird, wird oft argumentiert, dass die Stundenzahl nicht gesenkt werden sollte, sonst wäre das Studium „noch einfacher“. Ich finde, hier wird der Zeitaufwand mit dem Schwierigkeitsgrad verwechselt. [...] In dieser Diskussion geht aber leider auch das Ziel eines guten Unterrichts verloren, nämlich so effizient wie möglich die Materie zu vermitteln. Wir könnten stattdessen analysieren, wie effektiv die Zeit, die man für sein Studium aufwendet, aus der langfristigen Perspektive genutzt wurde.“ [8]

Dabei ist anzumerken, dass es bereits vielerorts vielversprechenden Aufbruch für die Verbesserung der Physik-Lehre gibt, wie u.a. die Beiträge des Studienreform-Forums in den letzten Jahren dokumentiert haben [17]. Allerdings sind dies oft Pilotprojekte, die noch deutlich mehr in die Fläche getragen werden müssen.

Konsequenz : Da die Lehre eine der drei Säulen der Universität ist, sollte sich diese intensiver mit der Frage beschäftigen, wie in Lehrveranstaltungen Wissen verständlicher und effizienter vermittelt werden

kann und andererseits Studierende auch dabei unterstützen, ihr Eigenstudium effizienter zu gestalten.

7. Motivationsspender

Zuletzt soll noch ein Faktor angesprochen werden, der vielleicht nicht ausschlaggebend bei der Studienwahl war (weil man zu dem Zeitpunkt noch nichts davon ahnen konnte), der aber einen massiven Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit haben dürfte, ob Studierende ihr Studium abschließen: Aus den Essays geht hervor, dass das soziale Umfeld innerhalb der Uni und die dortige Zusammenarbeit einen stark Studienabbruch-präventiven Einfluss haben.

„Während meines Studiums sind mir unglaublich viele Menschen begegnet, die ihr Fach lieben und unvergleichlich passioniert zu den unmöglichsten Zeiten an den unmöglichsten Orten über verschiedenste mathematische oder physikalische Probleme diskutieren. Es ist nicht selten, dass man sich um 3 Uhr in einem Studiclub in einer Diskussion über hyperbolische Gitter wiederfindet, die so emotional geführt wird, wie die meisten Menschen über den Artikel für Nutella diskutieren.“ [9]

„Im Studium, merke ich, bin ich nicht nur umgeben von sympathischen Leidensgenoss*innen, sondern von Tüftler- und Grübler*innen, mit denen ich eben nicht nur gut Bier trinken, sondern auch Ideen diskutieren kann.“ [3]

In mehreren Beiträgen wird positiv hervor gehoben, dass der Alltag im Physikstudium trotz hohen Leistungsdrucks wenig von Konkurrenz unter Studierenden geprägt ist. Dies könnte man darauf zurückführen, dass wie erwähnt die Jobsicherheit nach dem Abschluss als gegeben angesehen wird und man sich während des Studiums in erster Linie auf die Physik konzentriert, weil das intrinsische Interesse überwiegt. Man könnte auch argumentieren, dass aufgrund der Härte des Faches und des immensen Aufwandes „allein studieren“ keine Option ist und man mit anderen zusammenarbeiten muss, um nicht unterzugehen.

Konsequenz : Durch die hohe Wichtigkeit des sozialen Umfeldes für das Durchhalten im Studium ist es notwendig, dass sich strukturell mit der Frage befasst wird, wie man die Formung von Lerngruppen o.Ä. fördert. Dies darf nicht gänzlich auf unbezahlte Fachschaftler*innen abgeschoben werden, da dadurch die Verfügbarkeit von wichtigem Unterstützungsangebot an das Freizeit-Ausmaß anderer Studierender gekoppelt ist.

8. Ausblick

Die diesem Beitrag zu Grunde liegenden Essays und der Workshop sind sicher nicht repräsentativ. Allerdings erlauben sie einen tieferen Einblick und teils unerwartete Erkenntnisse über Begründungszusammenhänge anderweitig statistisch untersuchter Befunde und lässt Studierende und Lehrende jenseits

von Fragebögen und standardisierter Interviews zur Sprache kommen.

Die daraus abgeleiteten Vorschläge für Konsequenzen werden in der nächsten Zeit weiter und systematischer vom Studienreform-Forum bearbeitet werden.

9. Literatur

- [1] Heinicke S., Alemanni M., Poster - Arbeitsgruppen Physikdidaktik Quo Vadis
<https://www.dpg-verhandlungen.de/year/2023/conference/samop/part/dd/session/29/contribution/3>
- [2] Ministerium für Kultur und Wissenschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, Bericht der Landesregierung zu Eckpunkten zu einem Gesetz betreffend die Stärkung der Hochschullandschaft (Hochschulstärkungsgesetz)
- [3] Helmstreit, L.: Alles andere als umsonst, Artikel des Studienreform-Forums
<https://studienreform-forum.de/de/forum-2024/beitrage-2024/2024/05/11/alles-andere-als-umsonst/> und im Anhang
- [4] Brackertz, S.: Physik und die Pädagogik der Unterdrückten Welchen Beitrag kann die Physik leisten, um die „culture of silence“ zu durchbrechen?, Artikel des Studienreform-Forums
<https://studienreform-forum.de/de/forum-2024/beitrage-2024/2024/05/30/physik-und-die-paedagogik-der-unterdrueckten/> und im Anhang
- [5] Obwaller, B.: Selbstständiges Lernen lernen als Hauptaufgabe der Physikstudierenden – und welche Konsequenzen daraus für den Unterricht an Hochschulen zu ziehen sind, Artikel des Studienreform-Forums
<https://studienreform-forum.de/de/forum-2024/beitrage-2024/2024/05/10/selbststaendiges-lernen-lernen/> und im Anhang
- [6] Optiz, P.: Physikstudium – Wofür?, Artikel des Studienreform-Forums
<https://studienreform-forum.de/de/forum-2024/beitrage-2024/2024/05/31/physikstudium-wofuer/> und im Anhang
- [7] Tockner, M.: Wofür Physik studieren, Artikel des Studienreform-Forums
<https://studienreform-forum.de/de/forum-2024/beitrage-2024/2024/05/31/wofuer-physik-studieren/>
- [8] Ončák, M.: Sinn des Physik-Studiums: Haben wir schon die richtigen Fragen gefunden?, Artikel des Studienreform-Forums
<https://studienreform-forum.de/de/forum-2024/beitrage-2024/2024/05/10/sinn-des-physik-studiums-haben-wir-schon-die-richtigen-fragen-gefunden/> und im Anhang
- [9] List, I.: Mein Blick auf Physik, Artikel des Studienreform-Forums
<https://studienreform-forum.de/de/forum-2024/beitrage-2024/2024/05/09/mein-blick-auf-physik/> und im Anhang
- [10] Bauer, A.: Warum Physik? Warum Lehramt? Warum Physiklehramt?, Artikel des Studienreform-Forums
<https://studienreform-forum.de/de/forum-2024/beitrage-2024/2024/05/09/warum-physik-warum-lehramt-warum-physiklehramt/> und im Anhang
- [11] Handler M.: Studying Physics – What for?, Artikel des Studienreform-Forums
<https://studienreform-forum.de/de/forum-2024/beitrage-2024/2024/05/31/studying-physics-what/> und im Anhang
- [12] Böhme, E.: Zwischen Restauration und Rebellion. Die Georgia Augusta und die politische Kultur Göttingens in den fünfziger Jahren, demnächst in: Göttinger Jahrbuch 2005; Friedensinitiative Garchinger Naturwissenschaftler (Bearb.): 30 Jahre Göttinger Erklärung. Nachdenken über die Rolle des Wissenschaftlers in der Gesellschaft (Schriftenreihe Wissenschaft und Frieden 11), München 1987
<https://www.uni-goettingen.de/de/die+%C3%B6ttinger+erkl%C3%A4rung+1957/54319.html>
- [13] Deci, E. L., & Ryan, R. M. (1993). Die Selbstbestimmungstheorie der Motivation und ihre Bedeutung für die Pädagogik. In: Zeitschrift für Pädagogik, 39(2), 223-238
https://www.pedocs.de/frontdoor.php?source_opus=11173
- [14] Markard, M.: „Begabung, Motivation, Eignung, Leitung“ In: Forum Wissenschaft 1/1998: 36-40.
- [15] Galam, S.: „Sociophysics: a physicist's modeling of psycho-political phenomena“. Springer, New York, 2012
- [16] Sornette, D.: „Why Stock Markets Crash: Critical Events in Complex Financial Systems“. Princeton Science Library, 2017
- [17] Webseite Studienreform-Forum
<https://studienreform-forum.de/de/>

Der Einfluss von Visualisierungen auf die Güte von Likert-Skalen oder wie Umfragen unbewusst das Antwortverhalten von Teilnehmenden beeinflussen können

Teresa Tewardt*, Lisa Stinken-Rösner*

*Universität Bielefeld, Physik und ihre Didaktik, Universitätsstraße 25, 33615 Bielefeld
ttewardt@physik.uni-bielefeld.de

Kurzfassung

Bei Fragebogenerhebungen mit jüngeren Lernenden werden die Antwortniveaus von Likert-Skalen häufig durch Icons veranschaulicht. Dies soll den Lernenden ein Gefühl für die Abstufungen der Antwortniveaus vermitteln (Ouwehand et al., 2021). Die Verwendung von Visualisierungen birgt jedoch gleichzeitig die Gefahr, dass das Antwortverhalten der Teilnehmenden verzerrt wird, z.B. durch eine emotionale Konnotation der Visualisierungen. Die vorliegende Studie geht der Frage nach, inwiefern verschiedene Formen der Visualisierungen zu Unterschieden im Antwortverhalten von Lernenden führen. Hierfür wurden N = 635 Lernende im Alter von 10-12 Jahren, nach dem Besuch des Schülerlabores „teutolab-physik“, befragt. Die Fragebögen erheben das Interesse beim Experimentieren (Fechner, 2009) und unterscheiden sich ausschließlich in den unterstützenden Visualisierungsformen. Die Zuordnung der verschiedenen Visualisierungen in Form von Smileys, Daumen, Handybalken oder einem Farbverlauf zu den Teilnehmenden erfolgte randomisiert. Die Auswertung ergab signifikante Differenzen im Antwortverhalten der Teilnehmenden, in Abhängigkeit von der Visualisierungsform.

1. Likert-Skalen in der physikdidaktischen Forschung

Likert-Skalen sind die mit Abstand am häufigsten verwendeten psychometrischen (Kurz-)Skalen in den Sozialwissenschaften (Döring & Bortz, 2016). Anhand mehrerer Indikatoren (Items) wird ein Konstrukt erfasst, welches von außen nicht direkt beobachtbar ist (ebd.). Dafür beurteilen die Teilnehmer*innen alle Items entlang vorgegebener mehrstufiger Antwortniveaus. Die Niveaustufen repräsentieren, wie stark die teilnehmende Person einem Item zustimmt oder es ablehnt. Es liegt zunächst ein ordinale Skalenniveau vor. Geht man zusätzlich davon aus, dass die Abstände zwischen den Antwortoptionen gleich groß und mittels Zahlen darstellbar sind, kann eine Intervallskalierung angenommen werden. In diesem Fall wird der Skalenwert über das arithmetische Mittel bestimmt.

Die physikdidaktische Forschung als Teil der empirischen Bildungswissenschaft greift oftmals auf Likert-Skalen als Erhebungsinstrumente zurück (Döring & Bortz, 2016). Bei Befragungen von Lernenden, die anonym oder mit wenigen personenbezogenen Daten durchgeführt werden, sind Likert-Skalen sehr bildgebend (ebd.). Durch das Ankreuzen der Antworten können keine Rückschlüsse auf Teilnehmende anhand von Schriftmustern gezogen werden, was wiederum die Anonymität dieser gewährleistet. Typische Einsatzfelder von Likert-Skalen in der physikdidaktischen Forschung sind: Erhebung des Interesses (z.B. Riese & Kulgemeyer et al., 2015), Selbstwirksamkeitserwartungen von Lehrkräften oder Lernenden (z.B. Rabe, Krey & Meinhardt, 2012), Erhebung von

Fähigkeiten und Performanz Lernender (z.B. Schreiber, Theyßen & Dickmann, 2016).

1.1. Herausforderung: Antwortniveaus

Es ist bekannt, dass Lernende Unterstützung bei der Einordnung ihrer eigenen Meinung in die vorgegebenen Antwortniveaus von Likert-Skalen benötigen (Jamieson, 2004; Ouwehand et al., 2021). Neben der verbalen Erläuterung des Testinstrumentes wird eine visuelle Unterstützung empfohlen (Ouwehand et al., 2021). Insbesondere die Visualisierung der konsistenten Abstände zwischen den Niveaustufen, welche die Voraussetzung für die Annahme der Intervallskalierung darstellt, sollen durch Visualisierungen unterstützt werden. Typische Beispiele sind der Einsatz von Smileys (Pantiri, 2023), Daumen (Sullivan, 2013) oder Farbskalen (Stinken, 2017). Einige dieser Visualisierungen haben jedoch den Nachteil, dass sie eine emotionale Konnotation besitzen, welche gegebenenfalls das Antwortverhalten der Teilnehmer*innen beeinflussen kann. Reynolds-Keefe et al. haben bereits 2009 eine Studie zu Visualisierungshilfen von Likert-Skalen durchgeführt. Hierbei wurden Smileys, Sonne/Wolke und Worte mit 136 Grundschüler*innen auf ihre Validität hin geprüft. Diese Studie ergab keine Varianzen im Antwortverhalten der Lernenden.

Die systematische Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Visualisierungen auf das Antwortverhalten an einer größeren Stichprobe mit älteren Lernenden, stellt ein Forschungsdesiderat dar. Diese Studie soll eine erste Einschätzung des Forschungsgebietes ermöglichen und an die bisherigen Ergebnisse (Reynolds-Keefe et al., 2009) anschließen.

2. Forschungsfrage und Hypothese

Aufgrund des oben beschriebenen Forschungsinteresses und daraus abgeleitetem Desiderat kann folgende Forschungsfrage formuliert werden:

Inwiefern können Differenzen im Antwortverhalten auf unterschiedliche Visualisierungshilfen zurückgeführt werden?

Hierbei wird die Nullhypothese angenommen, dass verschiedene Visualisierungen keine Unterschiede im Antwortverhalten der Teilnehmer*innen hervorrufen. Dementsprechend wird weiterhin angenommen, dass die interne Konsistenz der Skala unabhängig von der unterstützenden Visualisierungsform ist (vgl. Reynolds-Keefe, 2009).

3. Studiendesign

Zur Beantwortung der Forschungsfrage, wurde ein Studiendesign geplant, um entsprechende Daten zu verschiedenen Visualisierungshilfen zu erheben. Im Folgenden wird die Entscheidung, die Daten in einer Laborstudie zu erheben erläutert und das methodische Vorgehen begründet.

3.1. Setting: Das „teutolab-physik“

Das „teutolab-physik“ ist ein Schülerlabor der Universität Bielefeld, in dem Lernende eigenständig physikalische Experimente durchführen und gemeinsam Erklärungsansätze formulieren. Dies geschieht unter der Anleitung und Betreuung von geschulten Studierenden und abgeordneten Lehrkräften.

Der Besuch einer Schulklasse im „teutolab-physik“ folgt einem standardisierten Ablauf für jede Altersstufe. Alle Lernenden führen die gleichen Experimente, unterstützt durch dieselben Personen, durch. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass alle Schüler*innen vergleichbare Erfahrungen während ihres Besuches sammeln, selbst wenn sie von unterschiedlichen Schulen kommen und an unterschiedlichen Tagen das „teutolab-physik“ besuchen.

Durch die breite Zielgruppe des Angebots im „teutolab-physik“ sind verschiedene Bildungsniveaus vertreten, was die Voraussetzung für eine große und vielfältige Stichprobe schafft. Die Kombination aus Stichprobengröße, Diversität, Kontrolle und möglicher Varianz macht das Schülerlabor zu einer besonders geeigneten Umgebung für die vorliegende Untersuchung.

3.2. Methodik

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurde, passend zum Setting der Erhebung, die psychometrische Kurzsкала zum situativen Interesse beim Experimentieren (Fechner, 2009) als exemplarisches Instrument ausgewählt und um verschiedene Visualisierungshilfen ergänzt. Die Skala besteht aus sechs Items, die auf einer 5-stufigen Likert-Skala von den Befragten beantwortet werden:

- Beim Experimentieren habe ich mich wohl gefühlt.

- Beim Experimentieren habe ich über nichts anderes nachgedacht.
- Die Experimente haben mir Spaß gemacht.
- Ich freue mich auf die nächsten Experimente.
- Die Experimente waren langweilig.
- Beim Experimentieren ist die Zeit sehr schnell vergangen.

Ausgehend vom Originalinstrument wurden vier Versionen mit zusätzlichen Visualisierungen entwickelt. Daraus ergaben sich vier Experimental- und eine Kontrollgruppe.

Die Kontrollgruppe erhielt die Kurzsкала vollkommen ohne Visualisierungen, die Niveaustufen waren mit Worten beschriftet („stimmt gar nicht“, „stimmt kaum“, „stimmt etwas“, „stimmt ziemlich“, „stimmt sehr“). Die vier Experimentalgruppen bekamen den Fragebogen ebenfalls mit wörtlicher Beschriftung der Niveaustufen und Visualisierungshilfen zur zusätzlichen Unterstützung. Bei den vier Visualisierungshilfen handelte es sich um Daumen, Smileys, Handybalen und einen Farbverlauf. Diese wurden randomisiert in den Schulklassen nach dem Besuch des „teutolab-physik“ verteilt und von den Schüler*innen bearbeitet. Die verschiedenen Visualisierungsformen sind in Abbildung 1 dargestellt.

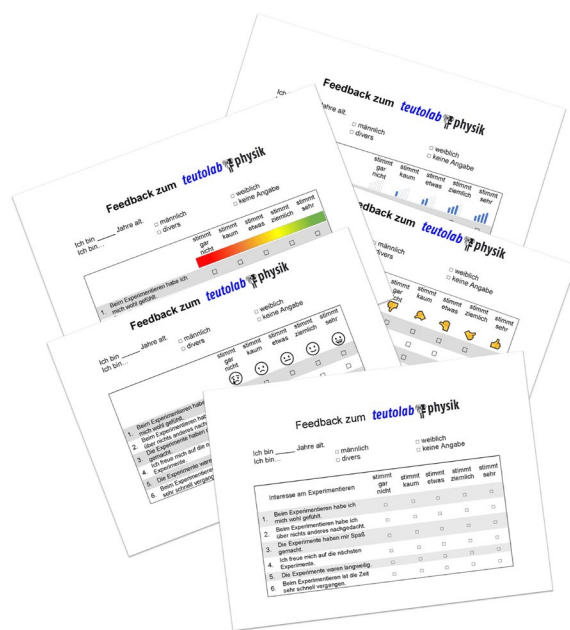


Abb. 1: Verwendete Fragebögen der Erhebung.

Die Erhebung fand über einen Zeitraum von drei Monaten statt. Die erhobenen Daten wurden im Anschluss digitalisiert, in SPSS eingepflegt und mittels statistischer Analysen ausgewertet. Aufgrund der hohen Standardisierung der Erhebung im „teutolab-physik“, welche bereits in Abschnitt 3.1. erläutert wurde, werden die erhobenen Daten als konsistent und vergleichbar eingestuft. Fehlende Werte oder Kreuze, die zwischen zwei Niveaustufen lagen wurden aus der Statistik ausgeschlossen. Dies war bei fünf Fragebögen der Fall.

3.3. Stichprobe

Es wurden 635 Lernende nach dem Besuch des „teutolab-physik“ befragt. Diese waren zwischen zehn und zwölf Jahren ($\bar{X} = 11,3$ Jahre) alt und besuchten die 5. oder 6. Klasse einer weiterführenden Schule.

Die Stichprobengröße ($N = 630$ bei fünf ausgeschlossenen Fragebögen, vgl. 3.2) verteilt sich auf insgesamt fünf Gruppen. Die Kontrollgruppe ohne Visualisierungshilfen bestand aus $n = 89$ Lernenden. Die vier Experimentalgruppen erhielten Fragebögen mit zusätzlichen Visualisierungen in Form von Smileys ($n = 135$), Daumen ($n = 136$), Handybalken ($n = 137$) oder Farbverläufen ($n = 133$), diese sind auf Abbildung 1 dargestellt.

4. Auswertung und Ergebnisse

Die Daten der Experimentalgruppen wurden jeweils mit der Kontrollgruppe mittels eines t-Test für unabhängige Stichproben verglichen. Zudem wurde die interne Konsistenz der Skala getrennt innerhalb der fünf Gruppen ermittelt.

Während der Datenerhebung konnte beobachtet werden, dass Fragebögen mit zusätzlichen Visualisierungshilfen in Form von Smileys unter den Schüler*innen am beliebtesten waren. Nach der zufälligen Zuteilung der Fragebögen innerhalb der Lerngruppe, wurde vermehrt von Schüler*innen der Wunsch geäußert, auch einen Fragebogen mit Smileys haben zu wollen. Teilweise ging dies so weit, dass Kinder versucht haben, diese Fragebögen ihren Mitschüler*innen wegzunehmen. Skalen ohne Visualisierungshilfen wurden von den Lernenden weniger euphorisch kommentiert.

4.1. Auswirkung der Visualisierungen auf das Antwortverhalten

Beim Vergleich der Mittelwerte von Abbildung 2 fallen geringe Unterschiede zwischen den vier Experimentalgruppen mit zusätzlichen Visualisierungsformen und der Kontrollgruppe auf. Bei den Visualisierungsformen Smileys und Daumen beurteilen die Lernenden ihre Erlebnisse im Schülerlabor leicht positiver. Ein t-Test für unabhängige Stichproben zeigt, dass zwischen Smileys und der Kontrollgruppe ($t(135) = 1,9, p = .026$), sowie Daumen und der Kontrollgruppe ($t(136) = 2,5, p = .005$) signifikante Unterschiede vorliegen. Zwischen den anderen Experimentalgruppen und der Kontrollgruppe konnten keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden.

4.2. Auswirkung der Visualisierungen auf die interne Konsistenz der Skala

Tabelle 1 zeigt die interne Konsistenz der genutzten Skala für die Kontrollgruppe sowie die der vier Experimentalgruppen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Fragebögen ohne Visualisierungshilfen die beste interne Konsistenz aufweisen. Diese ist als gut einzustufen (Blanz, 2015). Eine ebenfalls gute interne Konsistenz konnte, für die Fragebögen mit Handybalken als zusätzliche Visualisierungshilfe, nachgewiesen werden (ebd.).

Tab. 1: Cronbachs Alpha der verschiedenen Visualisierungshilfen.

Visualisierung	Cronbachs Alpha
keine	.814
Handybalken	.801
Farbverlauf	.780
Smileys	.749
Daumen	.699

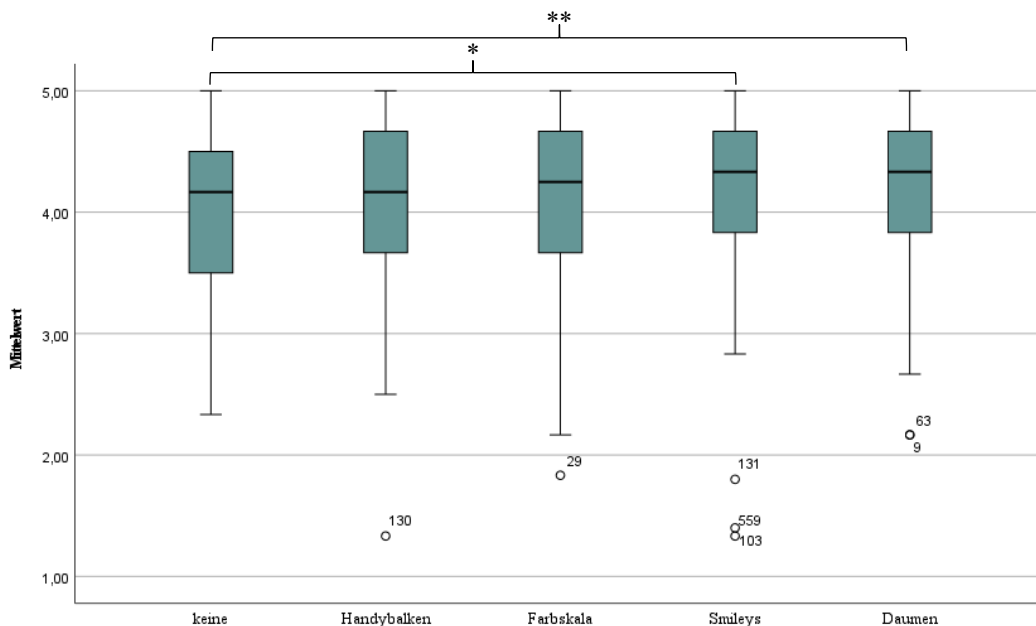


Abb. 2: Boxplots der Ergebnisse.

Die interne Konsistenz für die Visualisierungen Smileys und Farbverlauf liegen in einem akzeptablen Bereich (Blanz, 2015). Die interne Konsistenz der Skala für die zusätzliche Visualisierungshilfe Daumen ist als fragwürdig einzustufen (ebd.). Die interne Konsistenz der Kurzsкала scheint somit von den Visualisierungshilfen beeinflusst zu werden.

Auf Grundlage der Ergebnisse der Studie kann die Forschungsfrage (siehe Abschnitt 2.) wie folgt beantwortet werden. Die angenommene Nullhypothese, dass verschiedene Visualisierungen keine Unterschiede im Antwortverhalten der Teilnehmer*innen hervorrufen wird verworfen. Es wird die Gegenhypothese aufgestellt, dass die Differenzen im Antwortverhalten auf die verwendeten Visualisierungen zurückgeführt werden können. Zusätzlich wird die interne Konsistenz der Skala maßgeblich von den Visualisierungshilfen beeinflusst.

5. Diskussion

Die Erhebung des situativen Interesses am Experimentieren erfolgte einmalig nach dem Besuch des Schülerlabors „teutolab-physik“. Ohne vorherige Erhebung des experimentellen Interesses können die Verschiebungen im Antwortverhalten nicht ausschließlich auf die Visualisierungshilfen zurückgeführt werden. Dies wirkt sich limitierend auf die Generalisierbarkeit der Aussagen dieser Studie aus.

Zusätzlich können Einschränkungen in der Aussagekraft der Studie durch die, im Vergleich zu den vier Experimentalgruppen, kleinere Kontrollgruppe begründet sein. Des Weiteren ist die Verschiebung des Antwortverhaltens in den positiven Bereich kritisch zu betrachten, da an dieser Stelle der Deckeleffekt Einfluss nehmen kann.

Die Kurzsкала zum situativen Interesse am Experimentieren wurde für diese Studie ausgewählt, da sie bereits Teil des Projektes war, durch dessen Vorstellung auf einer Tagung die vorliegende Fragestellung inspiriert wurde. Dabei wurde die Kurzsкала von Fechner (2009) von den Vortragenden um Smileys ergänzt. Ein weiterer Faktor für die Wahl dieser Skala ist, dass sie zum Grundkonzept des „teutolab-physik“ passt. So wurde sichergestellt, dass der Fragebogen von den Teilnehmenden sinnvoll in den Kontext des Besuches eingeordnet werden konnte.

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass die Ergebnisse darauf hindeuten, dass die Visualisierungshilfen mit Smileys und Daumen das Antwortverhalten positiv beeinflussen, was auf die emotionale Konnotation zurückzuführen sein könnte. Farbverläufe suggerieren Antwortmöglichkeiten zwischen den Niveaustufen der Likert-Skala, da sie ein Spektrum abbilden. Zusätzlich ist der Farbverlauf für Menschen mit Farbsehschwäche ungeeignet. Gleichzeitig sinkt die interne Konsistenz der Skalen. Vergleichbare interne Konsistenzen, zum exemplarischen Instrument, ohne signifikante Differenzen im Antwortverhalten, konnten für die Visualisierungshilfen Farbskala, die

jedoch nicht barrierefrei ist, und Handybalken nachgewiesen werden.

Die Handybalken werden daher als geeignet eingestuft, da diese weder an Emotionen, noch an das Farbsehvermögen der Lernenden geknüpft sind. Die interne Konsistenz der Kurzsкала wird durch die visuelle Unterstützung mit Handybalken am geringsten gesenkt. Darüber hinaus stellen die Handybalken klar abgegrenzte Stufen dar und verleiten nicht zum Ankreuzen zwischen den Antwortniveaus.

5.1. Ausblick

Die Verwendung einer anderen Kurzsкала könnte Deckeleffekte reduzieren. Hierfür könnten Items verwendet werden, die weniger polarisierend ausfallen und insgesamt kritischer sind.

In dieser Studie wurden lediglich vier Visualisierungshilfen für Likert-Skalen einbezogen. Diese sind nicht die einzigen Visualisierungshilfen, die in der empirischen Bildungswissenschaft zu finden sind. Hierbei könnte der Pool der möglichen Visualisierungen erweitert werden.

Eine weitere Möglichkeit, die Forschung an dieser Stelle aufzugreifen, wäre, die Untersuchung der emotionalen Konnotation der Ergebnisse für Smileys und Daumen im Vergleich zu Handybalken und Farbverlauf. Hierbei würde der Fokus darauf liegen, ob die Unterschiede in der internen Konsistenz der verschiedenen Visualisierungen tatsächlich emotionsgebunden zu begründen sind.

Die gezielte Manipulation der Niveaustufen wird teilweise bereits im Marketing eingesetzt. Empirische Forschungsergebnisse zur Urteilverzerrung liegen jedoch nicht vor.

6. Literatur

- Blanz, M. (2021). *Forschungsmethoden und Statistik für die Soziale Arbeit: Grundlagen und Anwendungen*. Kohlhammer Verlag.
- Döring, N. & Bortz, J. (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*. (6. Aufl.). Springer Verlag.
- Fechner, S. (2009). *Effects of context-oriented learning on student interest and achievement in chemistry education*. Logos Verlag.
- Jamieson, S. (2004). Likert scales: how to (ab)use them. *Medical Education*, 38(12), 1217–1218. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2929.2004.02012.X>
- Laerhoven, H., Zaag-Loonen, H. & Bhf, D. (2004). A comparison of Likert scale and visual analogue scales as response options in children's questionnaires. *Acta Paediatrica*, 93(6), 830–835. <https://doi.org/10.1111/j.1651-2227.2004.tb03026.x>
- Ouwehand, K., Kroef, A. V. D., Wong, J. & Paas, F. (2021). Measuring cognitive load: Are there more valid alternatives to likert rating scales?. *Frontiers in Education*, 6, 702616.

- Pantiri, G., Wilhelm, T., Burkhardt, L. M., Wenzel, V., Lühken, A. & Katzenbach, D. (in Druck). Inklusiver NaWi-Unterricht: Erprobung von Lernstationen zu Farben. In H. v. Vorst (Hrsg.), *Frühe naturwissenschaftliche Bildung*.
- Rabe, T., Krey, O. & Meinhardt, C. (2012). Physikdidaktische Selbstwirksamkeitserwartungen zukünftiger Physiklehrkräfte I. In S. Bernholt (Hrsg.), *Inquiry-based Learning - Forschendes Lernen* (S. 635–637). IPN-Verlag.
- Reynolds-Keefer, L., Johnson, R., Dickenson, T. & McFadden, L. (2009). Validity issues in the use of pictorial Likert scales. *Studies in Learning, Evaluation, Innovation and Development*, 6(3), 15–24.
- 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. *Zeitschrift für Pädagogik*, 61, 55–79.
- Schreiber, N., Theyßen, H. & Dickmann, M. (2016). Wie genau beurteilen Schülerinnen und Schüler ihre eigenen experimentellen Fähigkeiten? – Ein Ansatz zur praktikablen Diagnostik experimenteller Fähigkeiten im Unterrichtsalltag. *PhyDid A – Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 1(15), 49–63.
- Stinken, L. (2017). *"Ich hoffe du weißt das zu schätzen?!" Eine Erhebung der Schätzkompetenz in der Sekundarstufe I*. Logos Verlag.
- Sullivan, G. & Artino, A. (2013). Analyzing and interpreting data from likert-type scales. *Journal of graduate medical education*, 5(4), 541-542. <https://doi.org/10.4300/JGME-5-4-18>

Danksagung

Wir bedanken uns bei den Mitarbeiter*innen des „teutolab-physik“ und bei den Schüler*innen für ihre rege Teilnahme an der Studie. Die Unterstützung und das Engagement des Schülerlabors sowie die Beiträge der Lernenden haben die Forschung maßgeblich vorangetrieben.

Ein einfaches Modell für die Vorhersage von CO₂ Konzentrationen in der Atmosphäre in Abhängigkeit von globalen CO₂ Emissionen

Michael Vollmer *, Wolfgang Eberhardt +

* FB Technik, TH Brandenburg, 14770 Brandenburg, + Institut für Optik und atomare Physik, TU Berlin
vollmer@th-brandenburg.de

Kurzfassung

Es wird das vielleicht einfachst mögliche Modell vorgestellt, mit dem zeitabhängige CO₂ Konzentrationen $c(t)$ in der Atmosphäre ausgehend von verschiedenen globalen Emissionsszenarien für CO₂ berechnet werden. Dazu wird eine einzelne inhomogene lineare Differenzialgleichung 1. Ordnung hergeleitet, deren Parameter sich aus den quantitativen Daten des global carbon project sowie Mauna Loa Daten für CO₂ Konzentrationen errechnen. Das Modell wird erstens getestet am Zeitraum 1960 bis 2020 mit vergleichsweise guter quantitativer Übereinstimmung zu Messdaten. Zweitens wird für zwei typische IPCC Emissions-Szenarien ein Vergleich der Modellvorhersagen mit denen der komplexen IPCC Earth-System-Klimamodelle diskutiert mit qualitativer Übereinstimmung des zeitlichen Verlaufs. Drittens werden Ergebnisse einiger ausgewählter neuer Emissionsszenarien präsentiert. Ungeachtet einiger Abweichungen zu komplexeren Klimamodellen zeichnet sich unser Modell durch zwei wichtige Vorteile für die Lehre aus. Zum einen ist es sehr einfach für Studierende und begabte Schüler nutzbar, da die erforderliche Lösung der Differentialgleichung bereits mit handelsüblicher Tabellenkalkulationssoftware wie z.B. Excel programmiert werden kann. Dadurch gestattet es zum anderen auch sehr einfach, den zeitlichen Verlauf von Emissionsszenarien zu verändern und innerhalb weniger Sekunden Veränderungen aufgrund geänderter Eingaben zu berechnen. Insofern eignet sich das Modell sehr gut als Einstieg in das Thema Klimamodellierung in einführenden Hochschulvorlesungen zum Themenbereich Kohlenstoffkreislauf und Klimawandel. In der Schule kann es gegen Ende der Sekundarstufe 2 beispielsweise im Projektunterricht zum Themenkomplex Nachhaltigkeit in Physik und/oder Mathematik eingesetzt werden.

1. Einleitung

Der Klimawandel mit all seinen Auswirkungen auf die Lebensbedingungen auf der Erde ist zur Zeit eines der wichtigsten, aber vor allem auch der komplexesten Phänomene unserer Welt. Generell werden sehr detaillierte Modelle benutzt, um aus den globalen anthropogenen Kohlendioxidemissionen die sich daraus ergebenden Treibhauskonzentration in der Atmosphäre zu berechnen.

Letztere dienen wiederum als Input für andere komplexe Modelle, die entsprechende Änderungen von Klimaparametern wie Temperatur, Niederschlagsmuster, Verschiebung von Klimazonen auf der Erde, Anstieg des Meeresspiegels und vieles mehr vorherzusagen. Ebenso können auch Extremwetterereignisse durch den Klimawandel wahrscheinlicher werden. Je komplexer die Modelle sind, desto schwieriger ist es für Nichtfachleute, alle Aspekte quantitativ zu verstehen, selbst für andere Wissenschaftler aus den Bereichen Physik, Chemie, Biologie, Mathematik usw.

Treibhauseffekt und Klimawandel mit allen damit zusammenhängenden physikalischen Prozessen sind natürlich auch in Fachzeitschriften für den Physikunterricht behandelt worden (z. B. [1-3]). Der globale

Kohlenstoffkreislauf auf der Erde mit der Modellierung der Kohlenstoffaufnahme durch den Ozean und die Biosphäre als Input für alle Klimamodelle ist dabei eines der komplexeren Themen. Neben vielen Forschungsarbeiten (z.B. [4-6]) und IPCC-Reviews ([7], Kap. 5 in [8]) zu diesem Thema wurden vereinfachte Modelle für die Kohlenstoffaufnahme von Ozean und Biosphäre auch in der Hochschullehre eingeführt (z.B. [9-12]). Sie behandeln den Kohlenstoffkreislauf in der Regel mit sogenannten box models. Darin werden die verschiedenen CO₂-Senken als Kästen behandelt, und Differentialgleichungen beschreiben den Austausch an den Grenzflächen zwischen den Kästen. Anspruchsvollere Modelle fügen vertikale Diffusions- und Konvektionsprozesse im Ozean hinzu. In den didaktischen Modellen wurden bis zu 7 Boxes eingeführt: Atmosphäre, Biosphäre, Boden, Ozeanoberfläche, mittlerer Ozean, tiefer Ozean und Ozeansedimente. Die Zahl der zur Beschreibung benötigten Differentialgleichungen und der darin enthaltenen Parameter wächst mit der Anzahl der Boxes, bei größerer Anzahl wird es schnell mathematisch komplex.

Außerdem ist bekannt, dass der Austausch zwischen verschiedenen Kohlenstoffreservoirs nur dann

durch lineare Modelle beschrieben werden kann, wenn der Kohlenstoff in jedem Reservoir gut vermischt ist. Deshalb muss der ozeanische CO_2 -Austausch in verschiedenen Tiefenbereichen durch nichtlineare Gleichungen beschrieben werden [5].

Offensichtlich ist eine große Anzahl von Differentialgleichungen, einige darunter nichtlinear, mit entsprechender Zahl von Parametern ein Hindernis für die Vermittlung des Themas auf einführendem Niveau. Dementsprechend bieten diese Gleichungen kein wirklich tiefgehendes Verständnis der zugrunde liegenden physikalischen Prozesse.

Um hier Abhilfe zu schaffen möchten wir das vielleicht einfachst mögliche Box Modell vorstellen, ein lineares Zwei-Box-Modell. Eine Box ist die Atmosphäre, die andere beschreibt die kombinierte CO_2 -Senke von Ozean und Land. Dieser einfache Ansatz ist näherungsweise gerechtfertigt, da der Austausch zwischen der obersten Ozeanschicht und der Tiefsee nur auf sehr langen Zeitskalen von mehreren hundert Jahren stattfindet [13].

Dieses Modell kann dazu beitragen, ein intuitives Verständnis des ersten Schritts des Klimawandels zu fördern, d. h. die Vorhersage der Kohlendioxidkonzentrationen in der Atmosphäre. Es basiert auf sehr einfachen Argumenten des globalen Kohlenstoffkreislaufs und einer vernünftigen – durch Daten des Global Carbon Project [14] gestützten - Annahme, wie die globalen CO_2 -Senken von den atmosphärischen CO_2 -Konzentrationen abhängen.

Als Startparameter verwendet das Modell beispielsweise empirisch bekannte CO_2 - Emissions- und Senken-Daten für das Jahr 2021 (siehe Abbildung 4 in [14]). Im Jahr 2021 haben die kombinierten Senken von Ozean und Land 6,4 Gt Kohlenstoff, d.h. 23,5 Gt CO_2 aufgenommen. In der Atmosphäre verblieben etwa 19 Gt, entsprechend 45 % der globalen Emissionen. In der Vergangenheit schwankte dieser Anteil α_{Atm} und er wird auch in Zukunft je nach Emissionen erheblich schwanken. Überraschenderweise war er jedoch in den letzten 60 Jahren nahezu konstant (siehe Abbildung 9 in [14]).

Das Modell stützt sich auf empirische Daten aus dem Zeitraum 1960 bis 2020, die zeigen, dass der jährlich gemittelte Anteil der globalen CO_2 -Senken Ozean und Land zusammen in etwa linear von der atmosphärischen CO_2 -Konzentration abhängt.

Diese Annahme führt zu einer einfachen Differentialgleichung, welche die Veränderung der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre in Abhängigkeit von den zeitabhängigen globalen anthropogenen CO_2 -Emissionen beschreibt. Das Modell liefert sofort eine natürliche Zeitskala für Veränderungen der atmosphärischen Konzentrationen. Es ermöglicht auch die Abschätzung erwarteter maximaler CO_2 -Konzentrationen und deren Änderungen als Funktion der Zeit für eine Reihe von Emissionsszenarien.

Die wenigen Parameter des Modells werden aus den empirischen Daten der CO_2 -Emissionen und Senken

des Zeitraums 1960 bis 2020 abgeleitet. Um trotz der extremen Vereinfachungen des Modells Vertrauen in die Ergebnisse zu gewinnen, vergleichen wir zunächst die Vorhersagen in Abhängigkeit von den bekannten Emissionen für den Eingabezeitraum 1960 bis 2020. Die Ergebnisse, die nur die Ausgangsbedingungen von 1960 und die Modellparameter verwenden, stimmen recht gut mit den Literaturdaten [15] überein.

Daher sind wir überzeugt, dass das Modell auch als sinnvoller Ausgangspunkt für die Analyse atmosphärischer CO_2 -Konzentrationen für andere Emissionsszenarien dienen kann. Deshalb vergleichen wir die Modellergebnisse auch mit denen von zwei aktuellen IPCC-Szenarien. Wir diskutieren Einschränkungen und mögliche Probleme, aber auch Vorteile des Modells. Für die Vermittlung des Themas in der Lehre ist das Modell besonders hilfreich, um einen schnellen, intuitiven Einblick in die Veränderungen der atmosphärischen CO_2 -Konzentration in Abhängigkeit von weiteren Emissionsszenarien zu geben. Aufgrund seiner mathematischen Einfachheit eignet es sich besonders für den einführenden Unterricht zu den Grundlagen des Klimawandels. Lernende können die Gleichung bereits mit einem einfachen Tabellenkalkulationsprogramm wie Excel lösen.

2. Das Modell

Im Mittel herrscht auf der Erde ein globales Gleichgewicht zwischen Quellen und Senken von CO_2 (s. Abbildung 4e, [14]). Die wichtigsten Quellen sind Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe sowie Emissionen aus Landnutzungsänderungen, insbesondere das Brandrodren von Wäldern. Die Senken sind neben der Aufnahme durch die Atmosphäre das Binden von CO_2 durch die Vegetation an Land und die Aufnahme durch die Ozeane aufgrund von direkter Absorption, Karbonatbildung und Algenwachstum.

Neue Studien, als Global Carbon Project bezeichnet, fassen die Ergebnisse für das globale Kohlenstoffbudget von 1850 bis 2021 mit einer Projektion für 2022 [14] zusammen. Darin zeigt sich, wie die globalen anthropogenen CO_2 -Emissionen Q_{tot} innerhalb der letzten sechs Jahrzehnte durch Deposition in den Ozeanen, an Land sowie in der Atmosphäre verteilt wurden.

Aus den Daten des globalen Kohlenstoffkreislaufs (siehe Abbildung 9 in [14]) lässt sich ablesen, dass die Deposition von CO_2 in der Atmosphäre von 1960 bis 2020 einen überraschend konstanten Anteil von $\alpha_{\text{atm}} \approx 0,45$ an den Gesamtemissionen ausmachte (der Einfachheit halber vernachlässigen wir die 1% des nicht bilanzierten Kohlenstoffbudgets). Gemeinsam mit dem Anstieg des atmosphärischen CO_2 ist die Aufnahmekapazität der Senken in den Ozeanen und an Land ungefähr linear gewachsen. Die Senken nehmen derzeit etwas mehr als die Hälfte (den Anteil $(1-\alpha)$, d. h. 55 %) aller Emissionen auf.

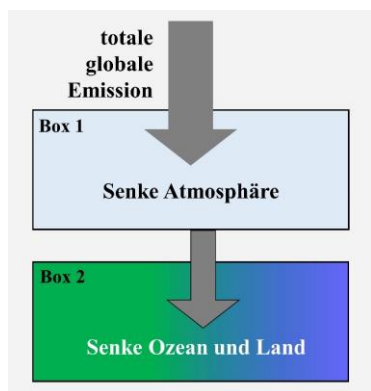


Abb. 1: Schematische Darstellung des Modells. Die totale globale Emission wird in die Atmosphäre eingetragen. Die kombinierten Senken Ozean und Land entnehmen CO₂ proportional zum Partialdruck in der Atmosphäre.

In unserem Modell gehen wir im Allgemeinen aber nicht davon aus, dass dieser Anteil α_{atm} eine Konstante ist, sondern dass er sich mit der Zeit ändern kann. Eine schematische Darstellung des Modells ist in Abbildung 1 zu sehen.

2.1. Eingangsdaten und Annahmen

Um abzuschätzen, wie die totale globale Emission Q_{tot} in die Atmosphäre zu einer Veränderung der atmosphärischen CO₂-Konzentration führt, verwenden wir den folgenden Ansatz:

Die globale Gesamtemission ist $Q_{tot} = Q_{LN\ddot{A}} + Q_{fossil}$, wobei der fossile Beitrag Q_{fossil} gegenwärtig viel größer ist als $Q_{LN\ddot{A}}$ von LandNutzungsänderungen. Für das Jahr 2021 beläuft sich Q_{fossil} auf 37,0 Gt CO₂ (37 Gt pro Jahr = 37Gt/a) und der zusätzliche Beitrag von $Q_{LN\ddot{A}} \approx 4$ GT CO₂/a führt zu einem Gesamtbetrag von etwa 41 Gt CO₂/a [14].

Die Deposition in Senken ist $S_{tot} = S_{Ozean} + S_{Land} + S_{atm}$ und im Gleichgewicht gilt $Q_{tot} = S_{tot}$. Daraus folgt

$$S_{atm} = (Q_{tot} - (S_{Ozean} + S_{Land})) \quad (1)$$

Jede Aufnahme von CO₂ in die Atmosphäre führt natürlich zu einer Änderung der atmosphärischen Konzentration. Dafür setzen wir an

$$\frac{dc}{dt}(t) = \beta S_{atm} = \beta(Q_{tot} - (S_{ocean} + S_{land})) \quad (2)$$

wobei die Konstante β (in ppm/Gt) die Umrechnung des jährlichen Eintrags von CO₂ (in Gt/a) zur daraus resultierenden jährlichen Veränderung der atmosphärischen Konzentration (in ppm/a) beschreibt.

Im Zeitraum 1960 bis 2021 können aufgrund der Datenlage (Abbildung 2) die Senken von Ozean, Land und Atmosphäre angenähert werden als

$$S_{atm} = \alpha_{atm} \cdot Q_{tot} \approx 0,45 \cdot Q_{tot} \quad (3a)$$

und

$$S_{Ozean} + S_{land} = (1 - \alpha_{atm}) \cdot Q_{tot} \quad (3b).$$

Die Senkenleistung stieg in diesem Zeitraum in etwa proportional zu den Gesamtemissionen. Deshalb

machten die Senken von Land und Ozean kombiniert in diesen 6 Dekaden etwa konstante Anteile der Gesamtemissionen aus, insgesamt etwa 55%.

Deshalb beschreiben wir neben der Atmosphäre als erster Box, Ozean und Land zusammen als eine zweite Box. Aufgrund der Nord-Süd-Asymmetrie der Landmassen auf der Erde führt die Vegetationsaufnahme zu einer periodischen jährlichen Zeitabhängigkeit, die sich im bekannten Sägezahnprofil der globalen CO₂-Daten [15] zeigt, mit Schwankungen von etwa $\pm 2,5$ ppm um 1960 bis etwa $\pm 3,5$ ppm um 2020. Da wir nur langfristige Veränderungen modellieren wollen, diskutieren wir nur Jahresmittelwerte, d. h. wir gehen nicht weiter auf saisonale Schwankungen ein.

Die Deposition von CO₂ im Ozean und in der Biosphäre erfolgt über den Zwischenschritt der ursprünglichen Ablagerung in der Atmosphäre. Der Transport von CO₂ aus der Luft in das Wasser des Ozeans oder die Vegetation erfolgt über die jeweiligen Grenzflächen. Es ist plausibel, dass die Ablagerung von der Anzahl der CO₂-Moleküle, die auf diese Grenzfläche treffen abhängt, d.h. von der CO₂-Konzentration c_{atm} . Für dieses einfachste Modell nehmen wir an, dass die Deposition linear von c_{atm} abhängt. Natürlich können Ozean und Biosphäre verschiedene Proportionalitätskonstanten haben. Der Einfachheit halber und um den Nutzen dieser grundlegenden Modellannahme zu verdeutlichen, verwenden wir aber nur eine einzige Proportionalitätskonstante für die kombinierte CO₂-Aufnahme durch Ozean und Land, da sie ja als eine gemeinsame Box angesehen werden. Quantitativ setzen wir deshalb für die gesamte zeitabhängige CO₂-Ablagerung in Ozean und Biosphäre folgende lineare Beziehung an:

$$(S_{Ozean} + S_{Land}) = k \cdot c(t) + b \quad (4).$$

Im weiteren Verlauf werden wir in Abbildung 3 zeigen, dass diese Modellannahme durch die bekannten globalen Kohlenstoffdaten der letzten 60 Jahre gut gerechtfertigt ist. Unter Verwendung von Gl. 4 kann Gl. 2 wie folgt umgeschrieben werden

$$\frac{dc}{dt}(t) = \beta(Q_{tot} - k \cdot c(t) - b) \quad (5a).$$

Dies führt letztlich auf eine inhomogene Differentialgleichung 1. Ordnung

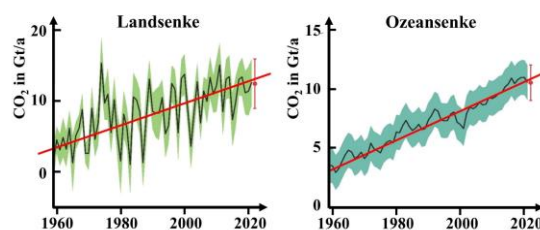


Abb. 2: Beträge der CO₂ Senken von Land (29%) und Ozean (26%) im Zeitraum 1960 bis 2020 [14]

$$\frac{dc}{dt}(t) + \beta \cdot k \cdot c(t) = \beta(Q_{tot}(t) - b) \quad (5b).$$

Die gesamte folgende Modellierung und ihre Diskussion gründet sich auf Gl. 5 mit den drei Parametern β , k und b sowie die für jedes Szenario definierten Eingangsdaten der globalen CO₂ Emissionen Q_{tot} .

2.2. Modellparameter aus bekannten Daten

Vor der Lösung der Differentialgleichung (Gl.5b) für verschiedene Emissionsszenarien $Q_{tot}(t)$, diskutieren wir die Modellparameter β , k und b . Sie können aus bekannten oder geschätzten Größen des Erdsystems abgeleitet werden, und zwar

- den globalen Kohlenstoff- oder CO₂-Emissionen pro Jahr: Schätzungen liegen bei $Q_{tot,2021} = 41$ Gt im Jahr 2021 [14]. Die IPCC-Modellprojektionen mit denen wir unser Modell später vergleichen, liegen mit $Q_{tot} \approx 40$ Gt/a um 2020 in der Nähe [8].
- den globalen atmosphärischen Mauna Loa CO₂-Konzentrationen von 1960 bis 2022 [15]. 2021 betrug der Jahresmittelwert $c_{atm,2021} = 416,4$ ppm.
- der aktuellen Wachstumsrate der jahresgemittelten CO₂-Konzentration in der Atmosphäre: Im Jahr 2021 beträgt sie $dc/dt(t) \approx 2,37$ ppm/a [15].

Aus den Gleichungen 2 und 3 für das Jahr 2021 ergibt sich daher $2,37 \text{ ppm/a} = \beta \cdot \alpha_{2021} \cdot 41 \text{ Gt/a}$, was bei $\alpha_{2021} = 0,45$ den Wert $\beta = 0,128 \text{ ppm/Gt}$ ergibt. Im Folgenden nehmen wir diesen konstanten β -Wert für unser Modell im Emissionsbereich oberhalb von etwa 20 Gt/a an. Dieses entspricht in etwa den Emissionen im Jahre 1960, also dem Beginn des Zeitraums für den wir das Modell betrachten. Der Kehrwert $1/\beta \approx 7,8 \text{ Gt/ppm}$ entspricht der globalen CO₂-Deposition in Gt in die Atmosphäre, welche zu einem Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration um 1 ppm führt.

Die anderen Konstanten k und b ergeben sich aus empirischen Daten der Senken und Fit-Verfahren unter Verwendung von Gl. 4. Insbesondere haben wir die Daten für die dekadisch gemittelte jährliche CO₂-Aufnahme durch Land und Ozeane als Funktion der Zeit aus Tabelle 6 von [14] verwendet. Die Zeitskala wurde mit Hilfe der Keeling-Kurve der Mauna Loa-Daten [15] in eine atmosphärische CO₂-Konzentrationskala übertragen. Das Ergebnis ist in Abbildung 3 dargestellt, welche die jährliche CO₂-Aufnahme im Ozean und an Land als Funktion der atmosphärischen CO₂-Konzentration zwischen 1960 und 2020 zeigt.

Die lineare Anpassung der Daten (mit $R^2 = 0,916$) zeigt eine recht gute lineare Abhängigkeit). Daraus ergeben sich die Parameter k und b , die in allen folgenden Simulationen verwendet werden. Das Produkt $\beta k = 0,0196/a$ ist unabhängig von dem angenommenen Q_{tot} . Der inverse Wert definiert die Zeitkonstante des Modells

$$\tau = \frac{1}{\beta k} = 51 a \quad (6).$$

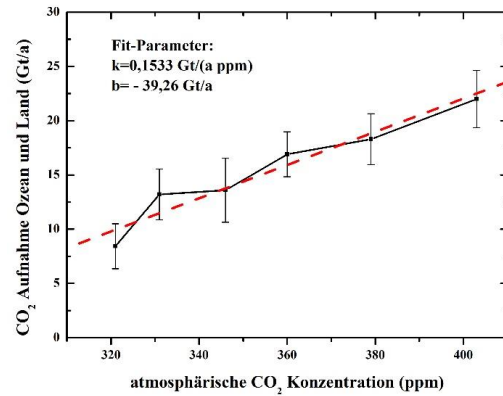


Abb. 3: 10-Jahresmittel der jährlichen CO₂ Aufnahme von Land und Ozean als Funktion der atmosphärischen CO₂ Konzentration im Zeitraum 1960 bis 2022. Die Senkendenaten stammen von [14], die Umrechnung der Zeitskala in c_{atm} erfolgte über die Mauna Loa Datenreihe [15]. Die gestrichelte Linie stellt eine lineare Anpassung an die Daten mit Unsicherheiten dar.

Diese Zeitkonstante beschreibt die Reaktionszeit des Systems auf jegliche Veränderungen. Sie spiegelt nicht die Verweilzeit des CO₂ in der Atmosphäre wider, die aufgrund der großen Flüsse zwischen den verschiedenen Reservoirs wesentlich kürzer ist. Tab. 1 fasst alle Modellparameter zusammen.

Tab. 1: Modellparameter und Eingangsdaten für die Simulationen

$Q_{tot, 2021}$ $\approx 41 \text{ Gt/a}$	$c_{Atm,2021}$ $\approx 416,4$ ppm	$\frac{dc}{dt} (2021)$ $\approx 2,37 \text{ ppm/y}$
$\alpha_{2021} = 0,45$	$k = (0,1533 \pm 0,0205)$ Gt/(a·ppm)	
$\beta = 0,128$ ppm/Gt	$b = (-39,26 \pm 7,29) \text{ Gt/a}$	

2.3. Gültigkeitsbereich des Modells und Zeitabhängigkeit des Parameters α

Erstens stellen wir fest, dass die Fitkurve in Abbildung 3 Abweichungen von den gemessenen Werten anzeigt. Dies ist teilweise auf die recht großen Fehlerbalken der verfügbaren globalen Senken-Daten zurückzuführen. Für $c_{2021} = 416,4 \text{ ppm}$ würde Gl. 5 so zu einer Aufnahme durch Ozean und Land von etwa 24,6 Gt/a führen, was bei 41 Gt/a Emissionen eine Aufnahme von 60 % und nicht die erwarteten 55 % bedeuten würde. Wir erwarten also tatsächlich Abweichungen in der Größenordnung von 5-10 % für die Aufnahme an Land und im Meer, wenn wir das Modell mit Emissionsszenarien vergleichen. Dem ungeachtet sollten die Trends einige Erkenntnisse liefern.

Zweitens haben wir die Modellparameter k und b als konstant angenommen. Es ist offensichtlich, dass diese empirisch gestützte Annahme nur ab den 1960er Jahren, nachdem die große Beschleunigung einsetzte, einigermaßen gut funktioniert. Das heißt, dass unsere Modellergebnisse nur für Konzentrationen oberhalb von 315 ppm, für die nach Abbildung 3 die lineare

Beziehung von Gl. 4 für die Senken gegenüber der Konzentration gilt, sinnvoll sind. Diese Beschränkung ergibt sich rein rechnerisch auch schon aus der Tatsache, dass die gesamten Ozean- und Landsenken für Konzentrationen unterhalb von etwa 255 ppm negativ werden würden. Es ist zwar physikalisch nicht auszuschließen, dass die Senken bei stark abfallenden atmosphärischen CO₂ Konzentrationen auch wieder zu Quellen werden, aber unser Modell hier ist viel zu einfach, um diesen Punkt zu bestimmen.

Für den Zeitraum von 1960 bis 2020 wurde festgestellt, dass der Anteil α der Aufnahme von CO₂ durch die Atmosphäre ungefähr konstant ist. Vor etwa 1950 sind die Daten zu Emissionen und Senken jedoch viel kleiner, schwankend und unsicherer (siehe Abbildung 3 in [14]). Dies wird in unserem einfachen Modell nicht beschrieben.

Wir wissen, dass die CO₂-Konzentration in der vorindustriellen Zeit vor 1850 relativ stabil um 280 ppm lag. Gehen wir sinnvollerweise davon aus, dass es auch damals einige natürliche Emissionen gab, muss der Anteil der atmosphärischen Aufnahme α gleich Null gewesen sein und alle Emissionen wurden letztlich durch Ozean und Land aufgenommen. Im Modell bedeutet dies, dass der Fitparameter k vor 1850 den Wert Null hatte. Fazit: nicht nur α sondern auch k und b müssen sich als Funktion der Zeit zwischen 1750 und 1960 geändert haben.

In unserem einfachen Modell wollen wir derartige Komplikationen vermeiden. Daher beschränken wir alle Simulationen auf Emissionsmengen, die für Daten nach 1960 gelten, d. h. auf CO₂-Gesamtemissionen von über etwa 16 Gt/Jahr. Infolgedessen enden alle unsere Simulationsszenarien mit Rückgängen der totalen Emissionen in der Regel bei etwa 50 % der derzeitigen Emissionen, d. h. bei etwa 20 Gt/a.

Drittens muss α auch in der Zukunft zeitabhängig sein. Kehren wir zu den empirischen Daten aus Abbildung 3 zurück, wonach der Anteil der CO₂-Aufnahme durch Ozean und Land proportional zur atmosphärischen CO₂-Konzentration ist. Wenn dies zutrifft, hängt der Wert von α automatisch von dem gewählten Emissionsszenario ab.

Nehmen wir zum Beispiel fiktiv an, die globalen Emissionen blieben konstant. Der entsprechende Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration würde zu einem Anstieg der Aufnahme durch Ozean und Land führen (Gl. 4). Bei konstanten Emissionen muss entsprechend der Anteil der atmosphärischen Aufnahme α abnehmen. Bei einem steileren Anstieg der Emissionen könnte α sogar konstant sein oder zunehmen. Diese Beispiele zeigen, dass der Anteil α der atmosphärischen CO₂-Aufnahme durch globale Emissionen in der Tat je nach Emissionsszenario von der Zeit abhängen wird. Bei allen Szenarien mit konstanten oder rückläufigen Emissionen muss α abnehmen. Ein solches Verhalten der sich ändernden atmosphärischen Aufnahme und Senkenleistung wird auch für viel anspruchsvollere Erdsystemmodelle erwartet,

wie im jüngsten IPCC-Bericht zusammengefasst. Auch in diesen Fällen wird die atmosphärische CO₂-Konzentration letztlich nach einem Maximum wieder abnehmen (siehe Beispiele unten).

2.4. Modellieren mit zeitabhängigen Emissionen

Normalerweise hängen die globalen Emissionen $Q_{\text{tot}}(t)$ in Gl. 5b von der Zeit ab. Wann immer wir ein Szenario für $Q_{\text{tot}}(t)$ haben, können wir Gl. 5b numerisch lösen, um $c(t)$ zu finden. Um saisonale Effekte auszuschalten, verwenden wir Zeitschritte von $\Delta t=1$ Jahr. Ausgangspunkt ist die Berechnung von $\frac{dc}{dt}(t)$. Offensichtlich ist

$$c(t + \Delta t) = c(t) + \frac{dc}{dt}(t) \cdot \Delta t \quad (7)$$

Mit Gl. 5b und Gl. 7 können wir jedes beliebige Emissionsszenario modellieren.

Aufgrund der Einfachheit des Modells kann es sogar von Studierenden oder begabten Schüler*innen gelöst werden, z. B. mit einem programmierbaren Tabellenkalkulationsprogramm wie Excel. Tabelle 2 zeigt einen Ausschnitt aus einer möglichen Excel-Datei. Die erste Spalte gibt das Jahr an, die zweite ist der Input der Szenarien in Form der gesamten zeitabhängigen globalen Emissionen $Q_{\text{tot}}(t)$. Die 3. und 4. Spalte berechnen daraus $\beta \cdot (Q_{\text{tot}}(t) - b)$ und $\beta \cdot k \cdot c(t)$, deren Differenz, die Konzentrationsänderung pro Zeitintervall, in der fünften Spalte gezeigt ist. Alternativ kann die 5. Spalte auch direkt berechnet werden. Die sechste Spalte gibt schließlich die Konzentration an, wobei die erste Zeile die vorgegebene Startkonzentration des jeweiligen Startjahres ist. Zum Beispiel ist 316 ppm der Start am 31.12.1959 und 317 ppm die Konzentration am Ende des Folgejahres.

Tab 2: Beispiel einer möglichen Exceltabelle zur Berechnung der atmosphärischen CO₂-Konzentration bei gegebenen Modellparametern. Input ist die zeitabhängige totale globale Emission in Spalte 2. Sie bestimmt die dc/dt in Spalte 5 und daraus die neue Konzentration am Ende des Jahres (Spalte 6)

1: t Jahr	2: Q _{tot} Gt/a	3: $\beta(Q_{\text{tot}}-b)$ ppm/a	4: $\beta k c(t)$ ppm/a	5: 3- 4 dc/dt(t) ppm/a	6: c(t+Δt) ppm
					316.0
1960	17	7.20..	6.19..	1.007..	317.0..
1961	17.39..	7.25..	6.21..	1.038..	318.0..
1962	17.78..	7.30..	6.23..	1.068..	319.1..
...

3. Ergebnisse

3.1. Konstante Emissionen

Die einfachste Lösung von Gl. 5b ergibt sich für konstante Emission Q_{tot} . In diesem Fall besteht die Lösung der inhomogenen Gleichung aus der Summe der Lösung der homogenen Gleichung und einer speziellen Lösung der inhomogenen Gleichung. Wir beginnen mit dem (unrealistischen) Fall, dass es für die nächsten Jahrhunderte eine konstante globale Emission gibt, die gleich der Emission von 2021 ist, d.h.

$Q_{\text{tot}}(t)=41 \text{ Gt/a}$. Die spezielle Lösung wird für $t \rightarrow \infty$ gefunden, wenn $dc/dt = 0$. In diesem Fall ist

$$c_{\infty} = \frac{(Q_{\text{tot}}-b)}{k} \quad (8a).$$

Der Gleichgewichtswert aus $Q_{\text{tot}}=41 \text{ Gt/a}$, b und k ist $c_{\infty} \approx 524 \text{ ppm}$. Bei dieser Konzentration ist die atmosphärische CO_2 -Aufnahme gleich Null, d. h. wir erwarten eine starke Abnahme von α mit der Zeit.

In ähnlicher Weise liefert Gl. 8a das Ergebnis für die CO_2 -Gleichgewichtskonzentration bei $t \rightarrow \infty$ für jede Situation, in der sich $Q_{\text{tot}}(t)$ schließlich einem konstanten Wert nähert. Bei $Q_{\text{tot}}=20 \text{ Gt/a}$, d. h. $\approx 50 \%$ der derzeitigen Emissionen, würde die Erde bei 387 ppm landen, d. h. bei Konzentrationen, die wir in den 1980er Jahren hatten.

Die Lösung der inhomogenen Gleichung ist einfach eine abfallende Exponentialfunktion

$$c(t) = c_0 e^{-\beta kt} = c_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (8b)$$

mit der Zeitkonstante $\tau=1/(\beta k) \approx 51 \text{ a}$, d.h. die Veränderung der atmosphärischen Konzentrationen wird durch eine Zeitkonstante von etwa 50 Jahren bestimmt. Unter der Randbedingung, dass $c(t=0)=c_{2021}$ ist, ergibt sich für die Lösung von Gl. 5b bei konstantem Q_{tot}

$$c(t) = (c_{2021} - c_{\infty}) e^{-\beta kt} + c_{\infty} \quad (8c).$$

Abbildung 4a zeigt den Verlauf der atmosphärischen CO_2 -Konzentration dieser analytischen Lösung als Funktion der Zeit. Etwa 95 % der Konzentrationsdifferenz ($c_{2021} - c_{\infty}$) werden nach drei Zeitkonstanten, d. h. um 2170, erreicht. Abbildung 4b zeigt erwartete Gleichgewichtswerte als Funktion der jeweils konstanten Emissionsrate Q_{tot} . Würde die Welt ihre derzeitigen Emissionen auf 82 Gt/a verdoppeln und diese dann lange Zeit konstant halten, ergäbe sich eine CO_2 -Gleichgewichtskonzentration um 790 ppm.

Natürlich ist die Annahme einer konstanten Emission für Jahrhunderte auf dem gegenwärtigen Niveau völlig unrealistisch. Abbildung 4 soll nur die einfachste, und rein akademische, mathematische Lösung des Modells zeigen. Wenn überhaupt, kann sie als qualitative Vorhersage dessen dienen, was bis zum Jahr 2100 passieren könnte, wenn die jetzigen oder ähnliche Emissionen in diesem Jahrhundert beibehalten werden und die Aufnahme durch Ozean und Land weiterhin linear mit der atmosphärischen CO_2 -Konzentration zunimmt.

Generell zeigt Abbildung 4 zudem ein sehr wichtiges Ergebnis, das prinzipiell auch andere Modelle liefern. Nach unserem heutigen Wissen über den Kohlenstoffkreislauf, das sich in mehr als 60 Jahren angesammelt hat [14], sollte jedes Szenario mit konstanten Emissionen irgendwann zu einer stabilen, konstanten CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre führen. Zwar war solch eine ideale stabile Konfiguration in der Natur auch in der vorindustriellen Zeit über viele

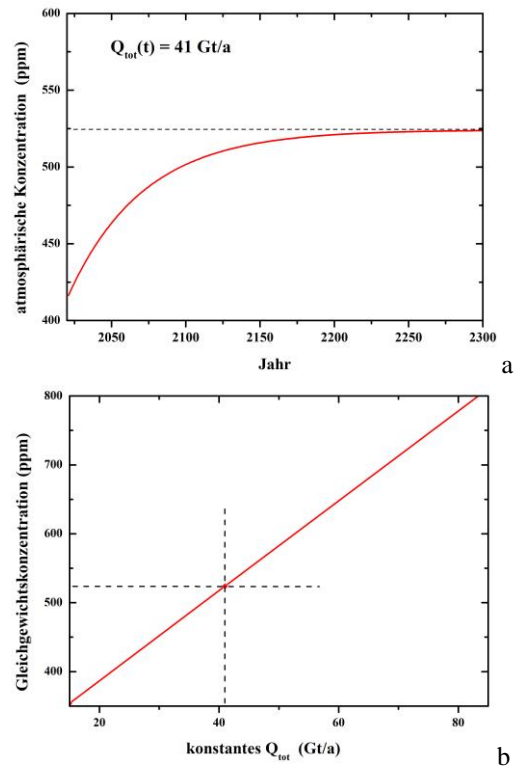


Abb. 4: a) Atmosphärische CO_2 -Konzentrationen für konstante globale Emissionen von 41 Gt/a. Es stellt sich ein Gleichgewichtswert von etwa 524 ppm ein. b) Änderung der Gleichgewichtskonzentration bei jeweils konstanter globaler Emission. Die Emissionsdaten von 2021 sind durch die vertikale gestrichelte Linie angedeutet, die sich ergebende Gleichgewichtskonzentration durch die horizontalen gestrichelten Linien.

Jahrtausende nicht vollständig gegeben, die Variationen in den 2000 Jahren vor 1850 lagen aber in einem relativ engen Bereich von 275 ppm bis 285 ppm. Auch in den 800 000 davor liegenden Jahren gab es auf Zeitskalen weniger Tausend Jahre immer recht stabile Gleichgewichte, deren Konzentrationen jedoch wegen der Eiszeiten auf längeren Zeitskalen von 10 000 bis 100 000 Jahren Schwankungen zwischen 190 und 290 ppm unterworfen waren. Zwischenfazit des Modells: immer wenn wir konstante Mengen an CO_2 emittieren, wird die atmosphärische CO_2 -Konzentration ein neues Gleichgewicht erreichen und nicht unbegrenzt ansteigen.

3.2. 1960 bis 2022: Modell und Messdaten

Um zu sehen, wie gut unser Modell auf etwas realistischere Emissionsszenarien anwendbar ist, vergleichen wir zunächst die Modellvorhersage für den Zeitraum 1960 bis 2020 mit den aufgezeichneten Mauna Loa-Messungen der atmosphärischen CO_2 -Konzentrationen (Abbildung 5) (die Differenzen der globalen zu den lokalen Mauna Loa Daten sind gering [15]).

Das Modell verwendete Q_{tot} -Werte, die linear von 17 auf 41 Gt/a steigen (blau). Ausgangspunkt war der 31.12. 1959 mit 316 ppm. Der Zeitraum bis 2021

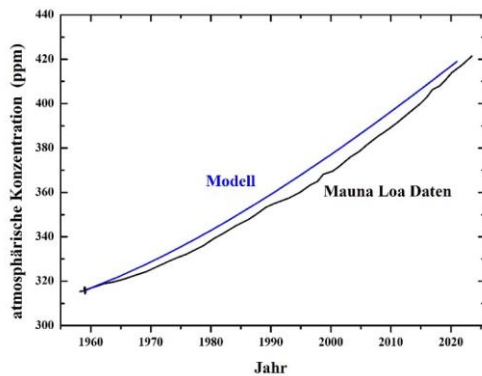


Abb. 5: Vergleich der Mauna Loa-Daten der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen (untere Linie) mit den Modellergebnissen (obere Linie). Das Modell beginnt mit 316 ppm im Jahr 1960. Die Gesamtemissionen Q_{tot} steigen im Modell linear von 17 Gt/Jahr (1960) auf 41 Gt/Jahr (2021).

wurde dann anhand des Modells berechnet. In Anbetracht der Einfachheit des Modells ist die quantitative Übereinstimmung mit den gemessenen Daten recht gut. Das war erwartbar, da die Modellparameter auch aus diesem Datensatz stammen. Der Trend ist jedenfalls eindeutig und die Abweichungen betragen nur wenige ppm. Dies ermutigt uns, das Modell auch auf zukünftige Emissionsszenarien anzuwenden.

3.3. Vergleich zu IPCC Szenarien

Der jüngste IPCC-Bericht aus dem Jahr 2021 diskutiert eine Reihe von Szenarien für die globalen Kohlendioxidemissionen, die bei etwa 40 Gt/Jahr im Jahr 2020 starten. Da die Veröffentlichung eines Berichts viel Zeit in Anspruch nimmt, vermuten wir, dass die vorgestellten IPCC-Modelle aus dem Jahr 2015 stammen. Wir vergleichen unsere Modellergebnisse mit zwei dieser Szenarien, dem SSP1-2.6 und dem SSP2-4.5-Szenario (kurz als 126 und 245 bezeichnet). Der Vergleich mit den anderen Szenarien ist ähnlich (siehe Abbildung 5.25a,b,c in [8]).

Von 2015 bis 2085 wurden die globalen Emissionen aus den IPCC-Szenarien verwendet (siehe auch unten). Da unser Modell nur für Emissionen sinnvoll ist, die größer sind als die um 1960, haben wir jedoch keine Emissionswerte unter 20 Gt/Jahr verwendet. Deshalb haben wir ab etwa 2085 konstante Werte von 20 Gt/a angesetzt. Da das IPCC-Szenario im Jahr 2015 begann, haben wir eine entsprechende Startkonzentration von 402 ppm verwendet.

Unser Modell zeigt die gleichen Trends wie die IPCC-Vorhersagen, liefert aber niedrigere Werte für die Konzentrationen (siehe Abbildung 6). Die maximalen Konzentrationen aus unserem Modell treten 2040 (für 126) und 2073 (für 245) auf, d. h. etwa 25 Jahre früher als die IPCC-Ergebnisse, und sie sind im Vergleich zu den IPCC-Vorhersagen um etwa 40 ppm (126) und mehr als 100 ppm (245) niedriger. Diese recht großen Unterschiede sind darauf zurückzuführen, dass unser Modell erheblich von den Annahmen des IPCC bezüglich der kombinierten Aufnahme

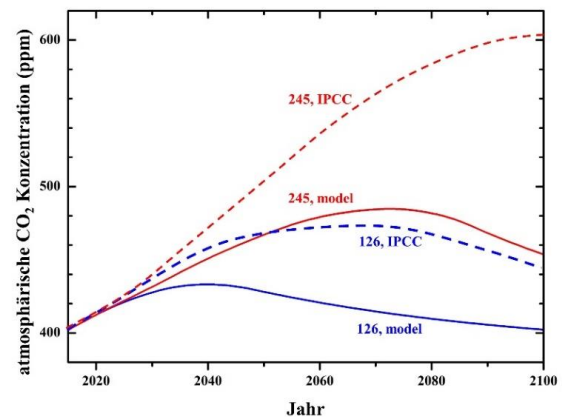


Abb. 6: Vergleich der atmosphärischen CO₂ Konzentrationen unsers Modells mit denen der IPCC Szenarien 126 und 245. Die zwei letzten Ziffern entsprechen dem, den angenommenen Emissionen äquivalenten, zusätzlichen Strahlungsantrieb (radiative forcing), hier also 2.6 W/m² und 4.5 W/m².

aus Meer und Land abweicht. Wir diskutieren zunächst die generelle Kurvenform.

In unserem Modell führt jede zeitabhängige Emission, die jetzt bei 40 Gt/Jahr beginnt und anschließend langsam abnimmt, zunächst immer zu einem Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration c_{atm} . Denn zur Zeit liegt die kombinierte CO₂-Aufnahme von Ozean und Land bei etwa 22 Gt CO₂/Jahr und der verbleibende Teil verbleibt in der Atmosphäre. Die höhere atmosphärische Konzentration c_{atm} führt jedoch nach Gl. 4 zu einem Anstieg der CO₂-Aufnahme durch Ozean und Land, vorausgesetzt, der über 60 Jahre beobachtete lineare Trend hält an.

Der Anteil der Aufnahme durch Ozean und Land wird daher zunehmen und den Anstieg in der Atmosphäre verlangsamen. Bei abnehmender Emission Q_{tot} muss es irgendwann eine maximale Konzentration c_{atm} geben, bei der die kombinierte Aufnahme durch Meer und Land genau dem Emissionseintrag entspricht. Im Maximum beträgt die Aufnahme durch Land und Ozean dann dem Bruchteil 100 % und $\alpha_{\text{atm}}=0$.

Bei weiter sinkenden Emissionen können Ozean und Land dann mehr CO₂ aufnehmen als emittiert wird. Infolgedessen kann CO₂ aus der Atmosphäre in die Senken verlagert werden, und die atmosphärische Konzentration nimmt ab.

Dieses generelle Verhalten ist bekannt und wurde z. B. auch in [16] beschrieben: Das atmosphärische CO₂ wird abnehmen, sobald die anthropogenen Nettoemissionen (Emissionen minus Senken aus negativen Emissionstechnologien) kleiner werden als die jährliche Aufnahme durch die natürlichen Senken. Insofern war natürlich die allgemeine Kurvenform unserer Modellergebnisse sowie die der IPCC-Szenarien erwartet. Die quantitativen Unterschiede zwischen beiden liegen in den Annahmen unseres Modells im Vergleich zu den IPCC-Szenarien. Insbesondere nehmen

die IPCC Szenarien unterschiedliche Zeitabhängigkeiten von $\alpha(t)$ bzw. der Senkenleistung von Ozean und Land an.

Die genauen Annahmen des IPCC-Modells sind im neuesten IPCC-Bericht nicht explizit erwähnt, können aber aus Abbildung 5.25 von [8] abgeleitet werden. Dort sind Vorhersagen für Senken-Daten von Ozean und Land dargestellt - allerdings mit recht großen Unsicherheitsbalken, insbesondere für die Land-Daten.

Abbildung 7a,b zeigt einen entsprechenden Vergleich der kombinierten Ozean- und Landsenke in unserem Modell und den IPCC-Modellen. Die IPCC-Modelle gehen von viel geringeren Senken im Ozean und in der Biosphäre aus, d. h. von einem größeren Anstieg des atmosphärischen CO_2 . Deshalb verschieben sich die Maxima, die für $(S_{\text{Ozean}}(t) + S_{\text{Land}}(t)) = Q_{\text{tot}}(t)$ auftreten sollten.

Die Ursachen der Unterschiede liegen in nichtlinearen Reaktionen der Senken [8] die in den verwendeten Erdsystemmodellen (ESMs) des Kohlenstoffkreislaufs angenommen werden. In den IPCC Szenarien wird eine verringerte CO_2 -Aufnahme durch den Boden aufgrund von Landnutzungsänderungen (Entwaldung ...) sowie eine verringerte Aufnahme durch die Ozeane angenommen. Dies kann aufgrund einer verringerten Pufferkapazität des Kohlenstoffsystems im Ozean eintreten.

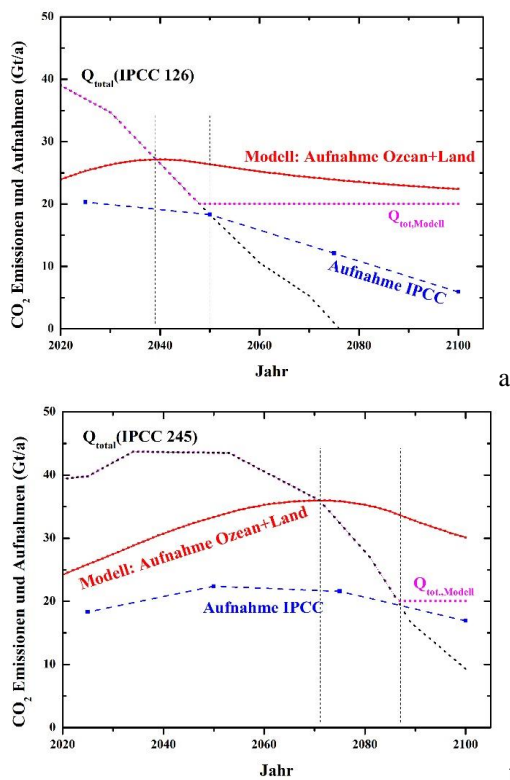


Abb. 7: Angenommene globale totale Emissionen Q_{tot} und CO_2 -Aufnahmen durch Ozean und Land im Modell und den IPCC Szenarien 126 (a) und 245 (b). Die Abweichungen sind zurückführbar auf geringere CO_2 Senken von Ozean und Land in den Erdsystemmodellen der IPCC Szenarien.

Wir gehen hier nicht weiter auf das komplexe Thema der Abschwächung der Senken in den IPCC Szenarien ein und erwähnen nur, dass eine kürzlich erschienene Veröffentlichung den Trend abnehmender Senkenkapazität gezeigt hat, der mit etwa 0,5 % pro Jahr jedoch noch nicht sehr ausgeprägt ist [6]. Eine andere Veröffentlichung [17] berichtet, dass die ozeanische Senke größer ist als derzeit angenommen. Im IPCC Bericht (S.772 in [8]) wird angemerkt, dass es zur Zeit noch keinen direkten Beweis für eine Abschwächung der Senken gibt, obwohl diese erwartet werden. Um das Verhalten der Senken besser einfach modellieren zu können, wäre eine vereinfachte, quantitativ nachvollziehbare, Erklärung wünschenswert.

Wir fassen den Vergleich unseres Modells mit dem Zeitraum 1960 bis 2020 (Abbildung 5) und den IPCC-Modellen (Abbildung 6) zusammen. Der Zeitraum 1960 bis 2020 ist recht gut modelliert. Dies ist nicht überraschend, da während dieses Zeitraums der Anteil α_{atm} des in der Atmosphäre abgelagerten CO_2 etwa konstant war und die Modellparameter von diesem Zeitraum stammen.

Im Vergleich zu den IPCC-Modellen 126 und 245 können die wichtigsten Merkmale der atmosphärischen CO_2 -Konzentrationen mit unserem Modell qualitativ zufriedenstellend beschrieben werden. Falls die Annahme, dass die kombinierte Senke von Ozean und Land auch in der Zukunft linear mit der atmosphärischen CO_2 -Konzentration zunimmt, fällt der Anstieg der atmosphärischen CO_2 -Konzentrationen jedoch immer deutlich geringer, d.h. deutlich optimistischer, aus als in den IPCC-Szenarien. Die Gründe für die offensichtlichen quantitativen Abweichungen (Unterschiede in der Zeitabhängigkeit α zwischen unserem Modell und den IPCC-Erdsystemmodellen) könnten in einer Unterrichtssequenz zu Emissionsszenarien weiter ausgearbeitet werden. Dies erfordert jedoch eine tiefere Auseinandersetzung mit den IPCC-Erdsystemmodellen und ihren Annahmen, was den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen würde.

Ungeachtet der quantitativen Unterschiede zu den aktuellen IPCC-Modellen kann man aus unserem einfachsten möglichen Zwei-Box-Modell viel darüber lernen, wie die Veränderung von Parametern in Emissionsszenarien zu Veränderungen der jeweiligen atmosphärischen Konzentrationen führt.

3.4. Weitere ausgewählte Emissionsszenarien

Sobald Lernende das erforderliche Tabellenkalkulationsprogramm geschrieben oder Gl. 5b auf andere Weise gelöst haben, kann das Modell im Unterricht auch dafür verwendet werden, ausgewählte neue Emissionspfade zu diskutieren, die durch ihre $Q_{\text{tot}}(t)$ -Werte im 21. Jahrhundert vorgegeben werden. Unser Ausgangspunkt ist dabei immer 2021 mit einer anfänglichen CO_2 -Konzentration von 416,4 ppm. Zunächst wollen wir modellieren, wie sich die atmosphärischen Konzentrationen verändern, wenn der Zeitrahmen für die Emissionsreduzierung verlängert

wird. Wir starten mit globalen Emissionen $Q_{\text{tot}}(2021) = 41$ Gt und analysieren fünf verschiedene Szenarien. Zunächst nehmen wir einen linearen Rückgang der globalen CO₂-Emissionen $Q_{\text{tot}}(t)$ an, der durch die Zeit $t_{50\%}$ bis zum Erreichen von 20 Gt/a, d.h. $\approx 50\%$ der derzeitigen Emissionen charakterisiert ist. Zwei Beispiele für $t_{50\%} = 50$ Jahre (0/0/50, grün) oder $t_{50\%} = 100$ Jahre (0/0/100, pink) sind in Abbildung 8a eingetragen. Nach Erreichen des 20 Gt/a Niveaus werden modellbedingt konstante Emissionen angenommen.

Weiterhin nehmen wir in einem dritten Szenario an, dass die Emissionen zunächst noch 20 Jahre lang konstant bleiben, bevor ein Rückgang innerhalb von $t_{50\%} = 50$ Jahre erfolgt (0/20/50, blau). Die beiden letzten Beispiele gehen zunächst von einem 10-jährigen Anstieg auf 50 Gt/Jahr (10/10/50, schwarz) bzw. 60 Gt (10/10/50, rot) aus, dann von einer kurzen 10-jährigen Plateauphase, bevor ein 50-jähriger linearer Rückgang auf 20 Gt/a erfolgt. Die resultierenden atmosphärischen CO₂-Konzentrationen dieser 5 Szenarien sind in Abbildung 8b dargestellt.

Wir betrachten zunächst die Szenarien mit sofort erfolgreichem linearem Rückgang der Emissionen in 50 oder 100 Jahren. Die offensichtlichste Veränderung beim Übergang von 50a (grün) auf 100a (pink) ist eine höhere maximale Konzentration in der Atmo-

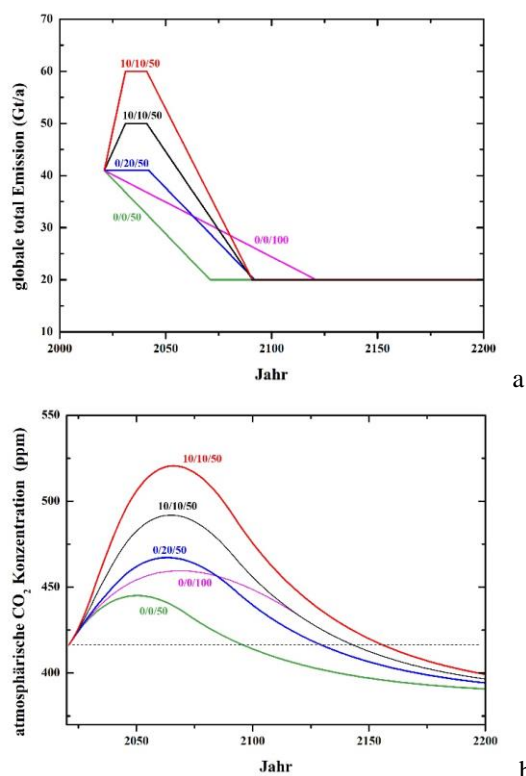


Abb. 8: a) Verschiedene Emissionsszenarien $Q_{\text{tot}}(t)$ von 2020 bis 2200 starten jeweils bei 41 Gt/a und enden alle (modellbedingt) bei 20 Gt/a; b) resultierende atmosphärische Konzentrationen; die Zahlentripel bedeuten (Zeitdauer Anstieg / Zeitdauer konstanter Emission / Zeitdauer Abfall auf 20 Gt/a) mit Zeiten in Jahren.

sphäre, die von 445 ppm auf ≈ 460 ppm steigt. Außerdem dauert es auch viel länger, bis das heutige CO₂-Niveau wieder erreicht ist. Für das hier optimistischste Szenario der Verringerung 0/0/50 dauert es bereits mehr als 65 Jahre, bis die atmosphärischen Konzentrationen wieder das derzeitige Niveau von, sagen wir, 420 ppm erreichen. Für 0/0/100 hat sich dieser Zeitraum bereits auf etwa 115 Jahre verlängert. Die realistischeren Emissionsszenarien, obwohl immer noch optimistisch, gehen von einem anfänglichen 20-jährigen Plateau aus oder sogar einem 10-jährigen Anstieg, gefolgt von einem 10-jährigen Plateau, bevor jeweils ein 50-jähriger Rückgang folgt. Alle diese Szenarien haben höhere Maximalkonzentrationen von 467 ppm (0/20/50, blau), 492 ppm (10/10/50, schwarz) und sogar fast 521 ppm (10/10/50, rot). Alle Szenarien benötigen auch recht lange Zeiträume jenseits von 100 Jahren, um zumindest wieder das heutige Niveau zu erreichen. Da die maximale Konzentration mit dem Temperaturanstieg zusammenhängt, ist es offensichtlich, dass nur das Szenario (0/0/50, grün) eine Chance hat, das abgespeckte Pariser Ziel von 2°C zu erreichen. Der Zeitraum, in dem die globalen Emissionen zurückgehen, ist von entscheidender Bedeutung: jede nennenswerte Verlängerung über 30 bis 50 Jahre hinaus muss vermieden werden.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Wir haben ein einfaches lineares Zwei-Box-Modell für die CO₂-Aufnahme in die Atmosphäre und die gemeinsame Senke Ozean/Land beschrieben. Es ermöglicht die Schätzung der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen als Funktion der globalen zeitabhängigen CO₂-Emissionen. Die Parameter des Modells basieren auf bekannten Daten des globalen Kohlenstoffbudgets sowie gemessener atmosphärischer CO₂-Konzentrationen für den Zeitraum 1960 bis 2021. Die Anwendbarkeit des Modells ist auf globale Emissionen oberhalb von etwa 50 % der derzeitigen Emissionen, d.h. auf ≥ 20 Gt/a beschränkt.

Die für 1960 bis 2020 empirisch gestützte Grundannahme des Modells ist, dass die CO₂-Aufnahme durch Ozean und Land linear von der atmosphärischen CO₂-Konzentration abhängt. Trotz der Einfachheit des Modells stimmen die Ergebnisse für diesen Zeitraum recht gut quantitativ mit den gemessenen Daten überein. Zudem stimmen sie auch qualitativ mit den Vorhersagen der aktuellen IPCC-Modellszenarien überein. Die jeweiligen quantitativen Abweichungen sind auf die Unterschiede der Annahmen der zukünftigen globalen CO₂-Aufnahme durch Senken zwischen unserem Modell und den Erdsystemmodellen der IPCC-Szenarien zurückzuführen.

In dieser Hinsicht verhält sich unser Modell ähnlich wie viele andere einfache Klimamodelle (SCMs). Ein Vergleich vieler SCMs (meist Modelle mit vielen Boxen) mit vollwertigen Erdsystemmodellen (ESMs) zeigt [18], dass ESMs systematisch eine geringere Kohlenstoffaufnahme im Ozean annehmen als SCMs.

Ähnliche Unterschiede gibt es auch bei der Land-senke. Folglich sind immer Unterschiede zwischen SCMs und ESMs zu erwarten. Allerdings haben einfache Modelle und damit auch unser Modell einen besonderen Vorteil gegenüber den komplexeren Erd-systemmodellen.

Unser Modell ermöglicht sehr schnelle qualitative Vorhersagen atmosphärischer CO₂-Konzentrationen für nahezu beliebige zeitabhängige Emissionsszenarien. Dies wurde für eine Reihe von Fällen demonstriert. Wir stellen fest, dass sich nach Übergangszeiten von etwa 100 bis 150 Jahren, je nach verwendetem Emissionsszenario, neue Gleichgewichts-CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre einstellen, die unterhalb des derzeitigen Niveaus von 420 ppm liegen können. Dies mag optimistischer erscheinen, als es tatsächlich ist. Denn in dieser langen Zeitspanne müssen wir mit den Folgen des Klimawandels zu-recht kommen. Deshalb gilt auf jeden Fall, dass wir sofort mit einer schnellen Reduktion der Treibhaus-gasemissionen beginnen müssen. Zudem werden im Modell mehrere Dinge vorausgesetzt. Erstens nehmen wir an, dass die Senkenwirkung von Ozean und Land auch weiterhin linear von der atmosphärischen Konzentration abhängt. Zweitens haben wir alle po-tenziellen zusätzlichen Senkenveränderungen oder hohe Emissionseinträge durch Kippelemente ver-nachlässigt. Dazu zählen beispielsweise weiteres Ab-holzen von Regenwäldern genauso wie durch den jetzt fortschreitenden Klimawandel ausgelöstes Frei-setzen von bislang gespeichertem Methan aus auftau-endem Permafrostboden etc.

Ungeachtet dieser Vereinfachungen weist unser Mo-dell eine Reihe von Vorteilen auf. Seine Einfachheit ermöglicht eine leichte Anwendbarkeit für den ein-führenden Unterricht zum Thema, und es erlaubt auch eine Vielzahl von studentischen Modellierungen, z.B. in Laborkursen oder sogar als Hausarbeit. Schließlich bietet dieses Modell eine einfache und schnelle Me-thode zur Untersuchung der Auswirkungen neuer, Emissionsszenarien auf die atmosphärischen Kon-zentrationen als Näherung erster Ordnung. Damit eig-net es sich sehr gut als erster Einstieg in das Thema komplexer Klimamodellierung.

5. Literatur

- [1] Onorato, P. et al, (2011): *'Home made' model to study the greenhouse effect and global warming*, Eur. J. Phys. 32, 363
- [2] Wilson, D.J.; Gea-Banacloche, J. (2012): *Simple model to estimate the contribution of atmospheric CO₂ to the Earth's greenhouse effect*, American Journal of Physics 80, 306–315
- [3] Schwartz, S.E. (2018): *Resource Letter GECC-2: The Greenhouse Effect and Climate Change: The Intensified Greenhouse Effect*, American Journal of Physics 86, 645–656
- [4] Roether, W. (1980): *The effect of the ocean on the global carbon cycle*, Experientia 36/9, 1017-1025
- [5] Joos, F. et al. (1996): *An efficient and accurate representation of complex oceanic and bio-sphere models of anthropogenic carbon uptake*, Tellus 48 B, 397-417
- [6] Bennedsen, M.; Hillebrand, E.; Koopman, S.J. (2019): *Trend analysis of the airborne fraction and sink rate of anthropogenically released CO₂*, Biogeosciences 16, 3651–3663
- [7] Prentice, I.C. et al (2001): *The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide*, Ch. 3 in Climate Change 2001: The Scientific Basis, IPCC
- [8] Canadell, J.G. et al, (2021): *Global Carbon and Other Biogeochemical Cycles and Feed-backs*, Chap. 5 in Climate Change: The Physi-cal Science Basis, WG1 contribution to 6th Assessment Report of IPCC, Eds. V. Masson-Del-motte et al , Cambridge University Press, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- [9] Hoppenau, S. (1992): *Future concentrations of atmospheric greenhouse gases CO₂, CFC, and CH₄: An assessment on the educational level* , American Journal of Physics 60, 408–415
- [10] Holter, Ø.; Ingebretsen, F. ; Kanestrøm, I. (1999): *Analytic CO₂ model calculations and global temperature*, Eur. J. Phys. 20, 483-494
- [11] Tomizuka, A. (2009): *Is a box model effective for understanding the carbon cycle?*, American Journal of Physics 77, 156–163
- [12] Fano, G. (2010): *A primer on the carbon cycle*, American Journal of Physics 78, 367–376
- [13] Metz, B. et al (Eds) (2005): *Carbon Dioxide Capture and Storage*, Chapter 6, Ocean Storage, IPCC, Cambridge University Press, <https://www.ipcc.ch/report/carbon-dioxide-capture-and-storage/>, see also: <https://archive.ipcc.ch/report/srccls/>
- [14] Friedlingstein, P. et al, (2022): *Global Carbon Project 2022*, Earth Syst. Sci. Data 14, 4811-4900, <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>
- [15] Mauna Loa Data of atmospheric CO₂ and other greenhouse gases from the Global Monitoring Laboratory / Earth System Research Laboratories, <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>
- [16] *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda*. Washing-ton, DC: The National Academies Press (2019). doi: <https://doi.org/10.17226/25259>
- [17] Wang, W.-L. et al (2023): *Biological carbon pump estimate based on multidecadal hydro-graphic data*, Nature, Dec. 6th <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06772-4>
- [18] Melnikova, I. et al (2023): *Assessing carbon cycle projections from complex and simple models under SSP scenarios*, Climate Change 176, 168 <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03639-5>

Lernlabor zur Photolumineszenz-Spektrometrie didaktisch rekonstruiert

Kai Bliesmer*, Martin Esmann*, Lukas Lackner*, Diyar Sadiq⁺

*Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Carl-von-Ossietzky-Straße 9-11, 26129 Oldenburg

⁺Zakho International Road, Duhok, Kurdistan Region-Iraq

kai.bliesmer@uni-oldenburg.de

Kurzfassung

Im Beitrag wird Entwicklungsforschung für ein Schülerlabor zur Photolumineszenz-Spektrometrie beschrieben. Das Labor wurde in der Zusammenarbeit zwischen der Physikdidaktik Oldenburg sowie der Fachphysik an den Standorten Oldenburg und Zakho (Irak) ausgestaltet. Als Entwicklungsansatz wurde das Modell der Didaktischen Rekonstruktion gewählt. Das Schülerlabor hat eine Doppelfunktion inne: Einerseits sollen Schülerinnen und Schüler auf dem Gebiet der Photolumineszenz-Spektrometrie Kompetenzen in den Bereichen Fachwissen (--> Ziel A: Wissenskommunikation) und Erkenntnisgewinnung (--> Ziel B: Wissenschaftskommunikation) aufbauen. Andererseits sind aber auch die Kolleginnen und Kollegen aus dem Irak selbst eine Zielgruppe des Schülerlabors. Denn diese möchten durch die Zusammenarbeit lernen, wie man im Irak mittels Schülerlaboren Wissenschaftskommunikation betreiben kann. Diesbezüglich dient das Schülerlabor als Blaupause für die irakischen Kolleginnen und Kollegen und als Kontext, um die fachdidaktische Entwicklungsforschung zur Gestaltung von Schülerlaboren zu verdeutlichen (--> Ziel C: fachdidaktische Wissenschaftskommunikation).

1. Ausgangslage

Die Arbeitsgruppe "Quantenmaterialien" an der Universität Oldenburg kooperiert im Bereich der Nano-Optik seit einigen Jahren mit fachwissenschaftlichen Kollegen aus dem Irak. Die Kooperation wird vom DAAD gefördert und dient der Entwicklungszusammenarbeit. Diese Entwicklungszusammenarbeit beschränkt sich seit neustem nicht mehr nur auf fachwissenschaftliche Forschung, sondern erstreckt sich nun auch auf fachdidaktische Inhalte: Die irakischen Kollegen wünschen sich, befähigt zu werden, Wissenschaft adressatengerecht an Schülerinnen und Schüler im Irak kommunizieren zu können; um die Bedeutung von Wissenschaft für die Entwicklung des Landes zu unterstreichen und um wissenschaftlichen Nachwuchs zu generieren. Zur diesbezüglichen Unterstützung ist die AG Physikdidaktik Oldenburg zum Projekt hinzugestoßen. Sie unterstützt die fachwissenschaftlichen Kollegen bei der Wissenschaftskommunikation. Weil von den Projektpartnern berichtet wurde, dass Vermittlungsformate im Irak dominieren, die vornehmlich auf Lehrkräftevorträge und auf das Memorisieren von Fakten setzen, wurde ein Format für die Wissenschaftskommunikation gewählt, das hierzu ein Gegengewicht bildet: Das Schülerlabor. Schülerlabore stehen somit im fachdidaktischen Anteil des Projekts im Fokus.

2. Theoretische Fundierung

Der fachdidaktische Teil des Projekts geht von der Prämisse aus, dass es sich bei Schülerlaboren um mächtige Instrumente der Wissenschaftskommunikation handelt. Denn sofern sie mittels Problemlösesitu-

ationen und entlang von Experimenten Eigenaktivität und Kreativität der Schülerinnen und Schüler anzuregen gedenken, passen sie gut zur Selbstbestimmungstheorie der Motivation (Deci & Ryan, 1993). Wie Sajons (2020) zeigt, sollten Schülerlaborangebote, kontextorientiert, problemorientiert und autonomieorientiert ausgerichtet sein (s. Abb.1), um ihr motivierendes Potenzial bestmöglich entfalten zu können.

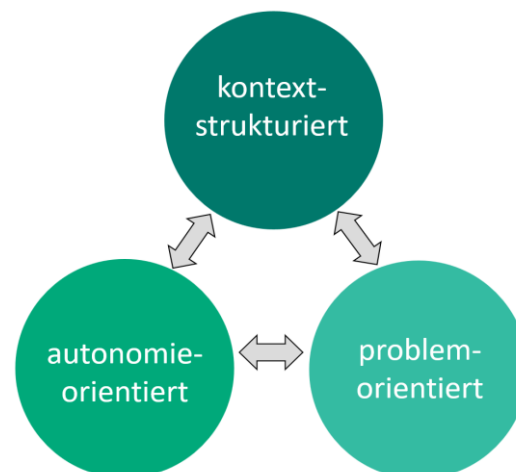


Abb. 1: Angezielte Schülerlabor-Charakteristika

Gegenüber den fachwissenschaftlichen Kollegen gilt zu betonen, dass Lehr-Lern-Situation nicht theorie- los aus dem Bauch heraus gestaltet werden, sondern dass die Fachdidaktik über etablierte, lernpsychologisch fundierte Theorien und Modelle verfügt, auf deren Basis neue Lehr-Lern-Situationen – somit auch Schülerlabore – entwickelt, beforscht und schließlich wei-

terentwickelt werden (Patrick, 2023). Ein geeignetes Modell, das seine Eignung für die fachdidaktische Wissenschaftskommunikation bereits bei der Zusammenarbeit mit Ausstellungsagenturen zur Entwicklung von Science Center-Exponaten unter Beweis gestellt hat (Bliesmer & Komorek, 2023), ist die Didaktische Rekonstruktion (Duit et al., 2012). Denn das Modell spiegelt sehr prägnant die Essenzen fachdidaktischen Arbeitens wider: Fachliche Sicht und Lernendensicht auf zu vermittelnde Inhalte sind gleichermaßen bedeutsam; beide Perspektiven müssen aufeinander bezogen werden, um auf Grundlage ihres Vergleichs eine didaktische Strukturierung zu gestalten, die sowohl der fachlichen Sachstruktur als auch den Lernendenperspektiven Rechnung trägt. Für Klärung in beiderlei Bereichen ist Forschung nötig und auch für die Untersuchung der Lernwirksamkeit entwickelter didaktischer Strukturierungen bedarf es empirischer Forschung. Forschung und Entwicklung sind im Modell der Didaktischen Rekonstruktion also eng miteinander verknüpft.

3. Ziele und Zielgruppen

Das Schülerlabor hat zwei Zielgruppen. Das sind zum einen Schülerinnen und Schüler. Bei ihnen wird zwischen zwei Zielebenen differenziert: Die erste Ebene zielt auf Kompetenzentwicklung im Fachwissen. Sie sollen Wissen hinsichtlich derjenigen physikalischen Grundideen aufbauen, die benötigt werden, um das Konzept der Photolumineszenz-Spektrometrie entschlüsseln zu können (--> Ziel A: Wissenskommunikation). Die zweite Ebene zielt auf Kompetenzentwicklung im Bereich der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung: Die Teilnehmenden am Schülerlabor sollen zusätzlich für naturwissenschaftliche Arbeitsweisen im Feld der Photolumineszenz-Spektrometrie sensibilisiert werden; also erfahren, wie der Arbeitsalltag von Personen aussieht, die auf diesem Gebiet forschen (--> Ziel B: Wissenschaftskommunikation).

Neben Schülerinnen und Schülern sind aber auch die Kollegen aus der Fachwissenschaft eine Zielgruppe des Schülerlabors. Denn die fachdidaktische Beteiligung am Projekt zielt nicht nur darauf, ein Schülerlabor zu entwickeln, sondern den Fachwissenschaftlern auch die fachdidaktischen Entwicklungsschritte zu beschreiben, um sie zu befähigen, in ihrem Heimatland selbst ein Schülerlabor einzurichten. Deshalb muss die fachdidaktische Entwicklungsforschung zur Realisation des Schülerlabors mit ihnen reflektiert werden, damit sie den Sinn und Nutzen der schlussendlich entwickelten didaktischen Strukturierung des Schülerlabors nachvollziehen können. So kann bspw. das Streben nach der Förderung von Eigenaktivität aufseiten der Schülerinnen und Schülern nur nachvollzogen werden, wenn das Lernen konstruktivistisch betrachtet und die Selbstbestimmungstheorie der Motivation angelegt wird. Das Schülerlabor zur Photolumineszenz-Spektrometrie ist mit Blick auf diese Zielgruppe eine Blaupause und ein Anlass über

fachdidaktische Entwicklungsforschung zu sprechen (--> Ziel C: Fachdidaktische Wissenschaftskommunikation). Abb.2 fasst die Ziele und Zielgruppen zusammen.

Zielgruppe: Schüler:innen

- Ziel A: Wissenskommunikation
- Ziel B: Wissenschaftskommunikation

Zielgruppe: Fachwissenschaftler:innen

- Ziel C: Fachdidaktische Wissenschaftskommunikation

Abb. 2: Übersicht über Ziele und Zielgruppen

4. Umsetzung des Projekts

Im Hinblick auf die Zielgruppe der Schülerinnen und Schüler wird für beide Zielebenen je eine separate Didaktische Rekonstruktion (Abb.3) durchgeführt, um entsprechende Lernmaterialien für ein Schülerlabor zu entwickeln.



Abb. 3: Aufgaben in der Didaktischen Rekonstruktion

Zwei Teams mit je vier Lehramtsstudierenden führen die Didaktischen Rekonstruktionen unter enger Betreuung durch Fachwissenschaft und Fachdidaktik durch. Die Aufgabenteilung erfolgt, da die Entwicklung eines Schülerlabors aufwendig ist. Das macht Teamarbeit nötig, damit die Studierenden ihre Arbeitskraft scharf definierten Aufgabenstellungen widmen können und nicht überfordert werden. Beide Didaktische Rekonstruktionen sind mittlerweile abgeschlossen. Lernmaterialien liegen vor. Aktuell arbeitet nun ein drittes Team daran, die entwickelten Lernmaterialien so miteinander zu verbinden, dass ein Schülerlabor mit einem Umfang von 2x90 Minuten resultiert. Dieses dritte Team hat ebenfalls die Aufgabe, das Schülerlabor zu erproben und erste Rückschlüsse auf dessen Lernwirksamkeit zu ziehen.

Im Hinblick auf die Zielgruppe der fachwissenschaftlichen Kollegen finden zusammen mit allen an der Entwicklung beteiligten Studierenden regelmäßige Besprechungen statt, in denen der aktuelle Stand der Schülerlaborentwicklung besprochen und reflektiert

wird. Personen aus der Fachdidaktik berichten über dies auf Konferenzen des Projekts.

Im Folgenden werden zunächst die zentralen Ergebnisse der beiden abgeschlossenen Didaktischen Rekonstruktionen zur Erfüllung von Ziel A und Ziel B präsentiert. Im Anschluss wird mit Blick auf Ziel C von der fachdidaktischen Wissenschaftskommunikation berichtet. Der Artikel schließt mit einem Ausblick auf aktuell anstehende Arbeiten.

5. Didaktische Rekonstruktion I (Ziel A)

Die erste Didaktische Rekonstruktion zielt auf den Bereich der Wissenskommunikation. Es geht darum, Lernmaterialien zu entwickeln, mit deren Hilfe physikalische Grundideen vermittelt werden können, die nötig sind, um das Prinzip der Photolumineszenz-Spektrometrie entschlüsseln zu können. Die Struktur der folgenden Unterkapitel ist durch die Aufgabenfelder der Didaktischen Rekonstruktion vorgegeben (s. Abb.3).

5.1. Fachliche Klärung

Wegen der engen Zusammenarbeit mit den fachwissenschaftlichen Kollegen, die im zu rekonstruierenden Themengebiet forschen, wurden zur fachlichen Klärung primär Experteninterviews (Bogner, Littich & Menz, 2005) durchgeführt. Diese wurden ergänzt durch Dokumentenanalysen von fachwissenschaftlichen Literaturquellen (Demtröder, 2017; 2021; Eichler & Eichler, 2010; Heim, 2002; Hertel & Schulz, 2017; Jüstel & Schwung, 2016), die während der Experteninterviews empfohlen wurden. Die fachliche Klärung wurde entlang des Konzepts der Elementarisierung (Bleichroth, 1991) vorgenommen, das darauf zielt, physikalische Grundideen herauszuarbeiten, die für die Entschlüsselung des Konzepts der Photolumineszenz-Spektrometrie zwingend erforderlich sind. Um die fachliche Klärung zu strukturieren, wurden die Abläufe am Versuchsaufbau zur Photolumineszenz-Spektrometrie chronologisch analysiert: Ausgehend vom eingesetzten Laserlicht und dessen Manipulation, um es auf die Probe zu bringen, über die hierdurch erfolgte Anregung der Probe bis hin zur Analyse des von der Probe ausgesendeten Lichts. Im Folgenden werden die wichtigsten Eckpunkte der Elementarisierung beschrieben.

Für ein Verständnis der Photolumineszenz-Spektrometrie ist es zunächst elementar, die Bedeutung des Einsatzes von Laserlicht nachzuvollziehen. Es wird eingesetzt, weil es über eine spezifische Energie verfügt und somit bei der späteren Analyse nicht mit dem von der Probe ausgesandten Licht konfligiert. Der komplexe Aufbau bei der Photolumineszenz-Spektrometrie wird verständlich, wenn er durch das Ziel begründet wird, Laserlicht exakt auf das Probenmaterial zu applizieren. Dazu müssen Lernende verstehen, dass sich Licht durch Spiegel und Linsen manipulieren lässt. Trifft das Licht die Probe, so ist es elementar, dass ein Stoff in ein höheres Energieniveau angeregt werden kann und es dabei spezifische Anre-

gungsniveaus gibt, die für einen bestimmten Stoff fix sind, also eine Art Fingerabdruck darstellen. Dass der Stoff bei Relaxation in den Grundzustand Licht mit der Energiedifferenz zwischen zwei Niveaus abgibt, ist ebenfalls zentral. Zuletzt ist für eine Entschlüsselung der Photolumineszenz-Spektrometrie relevant, dass nachvollzogen wird, wie die Analyse des von der Probe ausgesandten Lichts mittels Gitterspektrometrie funktioniert. Beispielhaft seien im Folgenden fünf herausgearbeitete Elementaria aufgeführt:

- E1: Für die Photolumineszenz-Spektrometrie ist Laserlicht nötig, denn es ist sortenreines Licht, hat also eine ganz bestimmte Energie.
- E2: Licht wird durch Spiegel umgelenkt sowie durch Linsen geweitet/gebündelt, um die zu untersuchende Probe präzise treffen zu können.
- E3: Laserlicht regt die Probe in verschiedene höhere Energieniveaus an. Diese Niveaus sind quantisiert, d. h. sie sind durch mehrere fest definierte Niveaus spezifisch festgelegt.
- E4: Relaxiert die Probe auf niedrigere Energieniveaus, emittiert sie eine Lichtmischung, die den Energiedifferenzen zwischen den Energieniveaus entspricht und sich analysieren lässt.
- E5: Mittels Gitterspektrometrie wird die emittierte Lichtmischung nach Energien sortiert; hierdurch lässt sich die Probe charakterisieren.

5.2. Erfassung von Lernendenperspektiven

Geleitet durch die Ergebnisse der fachlichen Klärung wurden im nächsten Schritt in der fachdidaktischen Literatur Schülervorstellungen (Wilhelm & Schecker, 2018) recherchiert, die eine Bedeutsamkeit für die Vermittlung der herausgearbeiteten Elementaria erwarten lassen. Im Hinblick auf den Versuchsaufbau zur Photolumineszenz-Spektrometrie, der vornehmlich aus Spiegeln und Linsen besteht, sind Schülervorstellungen von der Reflexion von Licht sowie von der Manipulation von Licht mittels Linsen bedeutsam. Dazu zählt beispielsweise die Vorstellung, dass Licht wie ein Pingpong-Ball an einem Spiegel reflektiert wird (S1) oder auch, dass Licht nur zurückgeworfen wird, wenn der Einfallswinkel 0 beträgt, bei anderen Einfallswinkeln hingegen reflektiert wird (S2) (Hopf & Haagen-Schützenhöfer, 2018). Weiterhin bedeutsam ist, dass die meisten Schülerinnen und Schüler ein Strahlenmodell des Lichts internalisiert haben (S3), sie eher die Lichtquellenstärke für die Reichweite des Lichts verantwortlich machen, ohne Aspekte wie Streuverluste oder die Verteilung des Lichts auf eine größere Fläche zu berücksichtigen (S4) und sie der Meinung sind, dass der Linsendurchmesser die Bildgröße bestimmt (S5) (Hopf & Haagen-Schützenhöfer, 2018). Dies lässt erwarten, dass es Schwierigkeiten geben könnte, den von Spiegeln und Linsen dominierten Versuchsaufbau der Photolumineszenz-Spektrometrie nachzuvollziehen zu können. Da das Gitterspektrometer entscheidend ist, um das von der Probe ausgesendete Licht zu analysieren und es auf den Phänomenen der Beugung und Interferenz

basiert, sind entsprechende Vorstellungen ebenfalls zu berücksichtigen. So äußern die Schülerinnen und Schüler die Vermutung, dass es sich beim Hauptmaximum bei der Beugung am Einzelspalt um eine Abbildung der Lichtquelle handelt (S6). Darüber hinaus sind sie der Meinung, dass – sofern die Breite eines Spalts kleiner ist als die Wellenlänge des einstrahlenden Lichts – keine Beugung auftreten könne, da das Licht nicht durch den Spalt passe (S7) (Hopf & Haagen-Schützenhöfer, 2018).

5.3. Didaktische Strukturierung

In Absprache mit den fachwissenschaftlichen Kollegen wurde beschlossen, ein Exit-Game zu entwickeln, das Schülerinnen und Schülern erlaubt, spielerisch in den Kontext der Photolumineszenz-Spektrometrie einzutauchen und dort Rätsel/Probleme zu lösen.

Für das Exit-Game wurde der folgende Kontext gewählt: Die Teilnehmenden werden während der Experimente von Assistenten des verschwundenen Physikers Prof. Dr. Farid Al-Photolumina betreut, der auf dem Gebiet der Photolumineszenz-Spektroskopie forscht. Sie müssen verschiedene Rätsel lösen, um den verschwundenen Professor wiederzufinden und werden dabei von Hinweisen angeleitet, die der Professor hinterlassen hat. Die Experimente finden im Rahmen eines entwickelten Exit-Games statt, in dem die Schülerinnen und Schüler nach dem Modell des explorativen Lernens (Liebig, 2012), spielerisch-problemorientiert die in der fachlichen Klärung herausgearbeiteten Elementaria erarbeiten. Das Exit-Game besteht aus Experimenten, in die auch Lehrervorträge eingebunden sind, wenn sich bestimmte Inhalte nicht allein experimentell vermitteln lassen. Zu Beginn erhalten die Teilnehmenden eine Schatzkarte.

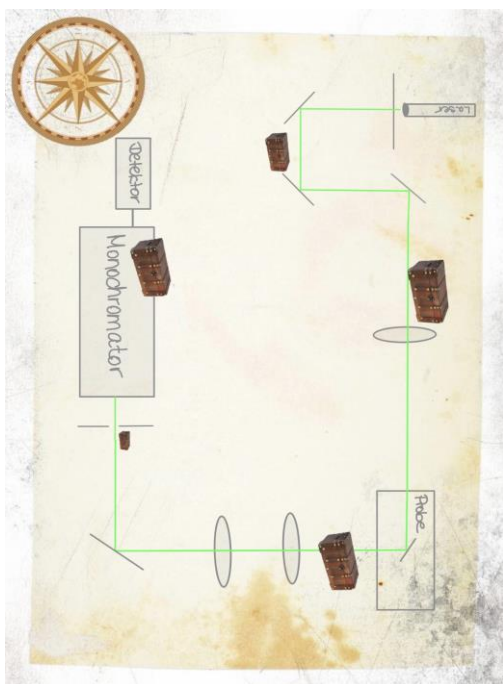


Abb. 4: Schatzkarte als Advance Organizer

Die Karte stellt einen stark vereinfachten Aufbau eines Photolumineszenz-Spektrometers dar und fungiert als Advance Organizer, um zu verhindern, dass die didaktische Strukturierung zu stark zersplittert. Die didaktische Strukturierung des Exit-Games ist zudem stark von den recherchierten Schülervorstellungen beeinflusst worden, die an den Experimentierstationen explizit thematisiert werden. Die Experimentierstationen sind in der Komplexität der physikalischen Prinzipien ansteigend angeordnet. Für alle Stationen wurden jeweils Hilfekarten entwickelt, sodass die Teilnehmenden den Schwierigkeitsgrad der Stationen selbst regulieren können. Überdies sind die Stationen so gestaltet, dass sie bei erfolgreicher Problemlösung einen Code erhalten, der eine Truhe öffnet, die Informationen zur jeweils nächsten Station enthält. Die Stationen werden im Folgenden kurz beispielhaft vorgestellt.

5.3.1. Station 1

Es ist eine selbst gebastelte Kiste gebaut worden, die mit Spiegeln bestückt werden kann und an deren Seiten sowie teilweise in der Mitte Hindernisse eingebaut sind. Ziel ist es, das Licht eines Lasers, der in eine Vorrichtung gesteckt wird, so um Hindernisse zu lenken, dass es auf ein festgelegtes Target trifft.



Abb. 5: Experimentierbox mit verstellbaren Spiegeln

5.3.2. Station 2

Hier erhalten die Schüler unscharfe Skizzen des Professors, die es scharf zu stellen gilt. Mithilfe von Spiegeln muss Licht hierzu umgelenkt und mit Linsen manipuliert werden. Dabei sind viele verschiedene Positionen der Spiegel und Linsen möglich, was eine gewisse Offenheit für die Schüler ermöglicht, die zur Exploration anregt.

5.3.3. Station 3

In Anlehnung an die vorige Station haben die Schüler nun die Aufgabe, die scharf gestellte Skizze zu vergrößern. Hierfür benötigen sie im Gegensatz zum vorigen Rätsel zwei Linsen. Sie sollen ihre Erkenntnisse über die Brennweite einer Linse anwenden, um die Schirmposition für eine Vergrößerung zu bestimmen.

5.3.4. Station 4

Im Kontext erteilt der Professor in einer Nachricht den Auftrag, die Zusammensetzung von Licht unter die Lupe zu nehmen. Mithilfe eines Gitters sollen die Schüler einen Versuchsaufbau realisieren, der das Licht einer Optikleuchte so beugt, dass unterschiedliche Lichtfarben auf dem Schirm zu beobachten sind.



Abb. 6: Beugung von Licht an einem Gitter

5.3.5. Station 5

In der letzten Experimentierstation des Exit-Games geht es um die Wellenlängenbestimmung des vorab gebeugten Lichts. Hierbei wird mittels Rotfilters nur eine bestimmte Wellenlänge ausgewählt, damit die Schüler einen klaren Auswertefokus erhalten.

5.3.6. Ergänzendes

Zwischen den Experimentierstationen 3 und 4 erhalten die Schüler Informationen zur Anregung von Proben durch Laserlicht, da dies, in Ergänzung zu den an den Experimentierstationen vermittelten Grundideen, für die Entschlüsselung der Photolumineszenz-Spektrometrie unabdingbar ist. Als Finale des Exit-Games haben die Schülerinnen und Schüler die Aufgabe, den Aufbau eines Photolumineszenz-Spektrometers zu erklären, indem sie die an den Experimentierstationen erarbeiteten Elementaria auf den realen Versuchsaufbau anwenden.

6. Didaktische Rekonstruktion II (Ziel B)

Aus dieser Didaktischen Rekonstruktion sollen Lernmaterialien resultieren, die auf Kompetenzen im Bereich der Erkenntnisgewinnung abzielen; es geht also um Wissenschaftskommunikation: Lernende erfahren im Kontext der Photolumineszenz-Spektrometrie

mehr über die alltäglichen Aufgaben der Personen, die in diesem Bereich forschen.

6.1. Fachliche Klärung

Auch hier erfolgte die fachliche Klärung in enger Zusammenarbeit mit den am Projekt beteiligten fachwissenschaftlichen Kollegen. Hierzu wurden Experteninterviews (Bogner, Littich & Menz, 2005) durchgeführt. Es war den Kollegen besonders wichtig, neben dem Zyklus des naturwissenschaftlichen Arbeitens (McComas, 2020), Tätigkeiten im Detail zu benennen, die Laien üblicherweise nicht bekannt sind: Hierzu zählt ständige Weiterbildung und Recherche. Auch sei zu betonen, dass es sich bei Forschungsgeldern meist um Drittmittel handelt, die mittels Anträge kompetitiv eingeworben werden müssen, was bedeutende Anteile der alltäglichen Arbeitszeit umfasst. Selbst wenn die Gelder letztlich eingeworben werden konnten, bedarf es Zeit, sie zu verausgaben, da die zu beschaffenden Geräte oftmals so komplex sind, dass es nur wenige Firmen weltweit gibt, die in der Lage sind, sie zu fertigen und die Lieferzeiten daher viele Monate betragen. Für die Interviewten ist zudem bedeutsam, dass Messungen viele Male durchgeführt werden müssen, um in den Daten Muster erkennen zu können, hierfür ist neben der Laborarbeit auch viel Arbeitszeit im Büro vonnöten. Im Hinblick auf die soziale Eingebundenheit betonen sie, dass es sowohl Phasen der Team- als auch der Einzelarbeit gibt. Teamarbeit findet im Vorfeld der Forschung statt, wenn gemeinsam in der AG die Forschungsfragen formuliert und die zu deren Beantwortung nötigen Forschungsaufgaben delegiert werden. Es folgt im Labor tendenziell eine Zeit der Einzelarbeit, bis zu dem Zeitpunkt, an dem die erhobenen Daten im Team interpretiert werden. Im Anschluss werden die Erkenntnisse nach außen kommuniziert, wo sie im Peer-Review-Verfahren überprüft und schlussendlich auf Konferenzen vorgestellt werden. Zusammenfassend wurden folgende Elementaria formuliert:

- E1: Forschung im Bereich der Photolumineszenz-Spektrometrie folgt einem Zyklus aus der Formulierung von Hypothesen/Forschungsfragen sowie deren experimenteller Überprüfung.
- E2: Um Hypothesen/Forschungsfragen formulieren zu können, bedarf es ständiger Weiterbildung und Recherche.
- E3: Zur Finanzierung der Forschung müssen mittels Forschungsanträge Gelder bei Drittmittelgebern eingeworben werden.
- E4: Für die Forschung müssen bei Spezialfirmen komplexe Gerätschaften gekauft werden, auf die teils monatelang gewartet werden muss.
- E5: Um Muster in den Daten erkennen zu können, müssen Experimente häufig durchgeführt werden.
- E6: Formulierung von Hypothesen/Forschungsfragen sowie Dateninterpretation sind Teamleistungen, Laborarbeit erfolgt auch einzeln.

- E7: Forschungsergebnisse werden in der Community kritisch überprüft (Peer-Review), Paper veröffentlicht und auf Konferenzen vorgestellt.

6.2. Erfassung von Lernendenperspektiven

Lernendenperspektiven, die für die herausgearbeiteten Elementaria eine Relevanz erwarten lassen, finden sich in Form von Schülervorstellungen zum Bereich der Natur der Naturwissenschaften in der fachdidaktischen Literatur. Für die Didaktische Rekonstruktion wurden ausgewählte Schülervorstellungen recherchiert, die von Schecker, Wilhelm, Hopf und Duit (2018) dokumentiert wurden. Im Kapitel von Höttecke und Hopf (2018) wird von folgenden Vorstellungen berichtet: Schülerinnen und Schüler setzen Experimenten mit Ausprobieren gleich und sind nicht in der Lage, Beziehungen zwischen Hypothese bzw. Forschungsfrage, Experiment, Forschungsdaten und Interpretation herzustellen (S1). Auch assoziieren sie mit Naturwissenschaftlern Einzelgänger, die ihrer Forschungsarbeit allein nachgehen (S2) und dabei mit sehr komplexen und gefährlichen Gerätschaften arbeiten (S3). Stark von der Forschungsrealität weicht die Vorstellung ab, dass in Experimenten bereits einzelne Messungen wahre Werte ergeben; hier wird die statistische Natur von Messwerten verkannt; zudem werden Messfehler nicht mit Ungenauigkeiten, sondern mit fehlerhaften Messungen assoziiert (S4). Die Vorstellung, dass die Naturwissenschaften unfehlbar seien, kann eine Sekundärvorstellung nach sich ziehen, gemäß derer es bei naturwissenschaftlicher Arbeit keiner Konsensbildung bedarf, da Forschung nur klare Fakten produziert, die für sich selbst sprechen und eindeutig sind (S5). Letzteres muss insbesondere berücksichtigt werden, wenn Laien das teaminterne Ringen um die Interpretation von Daten und das Konzept des Peer-Review-Verfahrens verdeutlicht wird.

6.3. Didaktische Strukturierung

Um Schülerinnen und Schülern naturwissenschaftliche Arbeitsweisen im Kontext der Photolumineszenz-Spektrometrie zu verdeutlichen, ist eine Führung durch das Labor mit direktem Kontakt zu den Wissenschaftlern allein nicht ausreichend. Denn eine solche Führung kann die in der fachlichen Klärung herausgearbeiteten Elementaria, nicht angemessen abbilden. Daher wurde beschlossen, Video-Vignetten (Rutsch, Seidenfuß, Vogel, Dörfler & Rehm, 2017; Benz, 2020) zu entwickeln. Hierbei handelt es sich um Filmszenen, die alltägliche Aufgaben der Wissenschaftler zeigen, die im Bereich der Photolumineszenz-Spektrometrie forschen. Gemeinsam mit der Medienabteilung der Universität Oldenburg und den am Projekt beteiligten Fachwissenschaftlern wurde ein Skript für die anzufertigen Filmszenen entwickelt. Als Inspiration für die Ausgestaltung der Szenen fungierten die im vorigen Kapitel recherchierten Schülervorstellungen, sodass diese durch die Filmszenen zum Thema gemacht werden können. Bezugspunkt des Films ist der Doktorand Lukas Lackner. Das Filmteam begleitet ihn und sein Team bei alltäglichen

Aufgaben, die von einer Off-Stimme erklärt werden. In den zentralen Szenen des Films geht es um:

- Den typischen Zyklus beim naturwissenschaftlichen Arbeiten, basierend auf hypothesengeleitetem Experimentieren.
- Die Bedeutung von Recherchen und eigenverantwortlicher Weiterbildung, um im Forschungsgebiet ständig up to date zu bleiben.
- Die Notwendigkeit, Forschungsanträge zu schreiben, um so Drittmittel für die Finanzierung der Forschung akquirieren zu können.
- Die Einzigartigkeit und Komplexität der zur Forschung nötigen Gerätschaften, aus denen lange Lieferzeiten resultieren.
- Die statistische Natur der Messwertaufnahme, die erfordert, Experimente viele Male durchzuführen, um Muster in den Daten erkennen zu können.
- Das Wechselspiel aus Team- und Einzelarbeit in den verschiedenen Phasen des Forschungszyklus'.
- Das Ziel, die Ergebnisse auf Konferenzen zu präsentieren und in einem Paper zu veröffentlichen, die im Peer-Review Verfahren geprüft werden.

Unter dem folgenden Link können die zu einer Datei zusammengefassten Szenen eingesehen werden. Für das Schülerlabor ist zu beachten, dass dort die Szenen einzeln und nicht am Stück gezeigt werden:

<https://cloudstorage.elearning.uni-oldenburg.de/s/DBXGQxLFYkHbZxt>

7. Fachdid. Wissenschaftskommunikation (Ziel C)

Wie eingangs beschrieben, sind auch die fachwissenschaftlichen Kollegen Zielgruppe im Projekt, da bei ihnen fachdidaktisches Lernen angeregt werden soll. Diese fachdidaktische Wissenschaftskommunikation wurde und wird realisiert, indem auf den projektinternen Konferenzen (Summerschools & Winterschools) auch alle fachdidaktischen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten vorgestellt werden. Hier wurde im ersten Schritt die konstruktivistische Sichtweise auf das Lernen (Reich, 2010), die Selbstbestimmungstheorie der Motivation (Deci & Ryan, 1993) sowie das Modell der Didaktischen Rekonstruktion (Duit et al., 2012) vorgestellt. Es wurde erklärt, worum es sich bei Schülerlaboren handelt und weshalb sie als mächtige Instrumente der Wissenschaftskommunikation aufzufassen sind. Im weiteren Verlauf der Konferenzen wurde stets der Fortschritt vorgestellt, wie im Aufgabengeflecht im Modell der Didaktischen Rekonstruktion schrittweise vorangeschritten wurde, um ein Schülerlabor zur Photolumineszenz-Spektrometrie zu entwickeln. Ergänzt wurde die Teilnahme an den Konferenzen durch direkte Konsultationen mit den Fachwissenschaftlern. Diese haben stets an der fachlichen Klärung mitgewirkt, waren also auch direkt an der Didaktischen Rekonstruktion beteiligt. Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion hat sich als sehr gut kommunizierbarer Advance Organizer für die fachdidaktische Entwicklungsforschung erwiesen, da

es Essenzen fachdidaktischen Arbeitens ausdrückt: Das Ringen um eine fachlich angemessene Elementarisierung, das Bemühen um die Perspektive der Lernenden sowie eine didaktische Strukturierung des Lehr-Lern-Angebots, die danach strebt, sowohl der fachlichen Sicht als auch der Sichtweise der Lernenden gerecht werden und die es überdies empirisch zu untersuchen und iterativ weiterzuentwickeln gilt.

8. Zwischenfazit und Ausblick

Die zur Erreichung der Ziele A und B nötigen Didaktischen Rekonstruktionen sind abgeschlossen. Lernmaterialien in Form eines Exit-Games und Video-Vignetten liegen vor. Zurzeit wird unter Beteiligung von Lehramtsstudierenden daran gearbeitet, das Exit-Game mit den zur Verfügung stehenden Filmszenen zu einem Schülerlaborangebot zu verbinden; es gilt somit: Schülerlabor = Exit-Game + Video-Vignetten. Zusammenfassend werden die teilnehmenden Schülerinnen und Schüler also an den Experimentierstationen arbeiten und kleinere Vorträge hören, um sich Kompetenzen zu erarbeiten, mit dem sie das Exit-Game bewältigen können. Flankiert wird dies durch Vignetten davon, wie reale Personen der Fachwissenschaft im Bereich der Photolumineszenz-Spektrometrie forschen, was am Schluss des Schülerlabors in einer Führung durch das Forschungslabor kulminiert.

Die Ausgestaltung des Schülerlaborangebots wird im Juni 2024 abgeschlossen. Sodann wird das Angebot erprobt und empirisch untersucht. Ziel der Erprobung wird es sein, die Kompetenzentwicklung der Lernenden sowohl im Hinblick auf den Bereich des Fachwissens als auch im Hinblick auf den Bereich der Erkenntnisgewinnung zu untersuchen. Die Erkenntnisse werden eingesetzt, um das Angebot zu verbessern, also stetig an die Bedarfe der Lernenden anzupassen. Die Untersuchungen erfolgen ebenfalls im Modell der Didaktischen Rekonstruktion. Denn die Didaktische Rekonstruktion endet nicht mit der erstmaligen Entwicklung von Lehr-Lern-Situationen, sondern ist iterativ angelegt: Empirische Erkenntnisse über die Wirksamkeit einer didaktischen Strukturierung fließen ggf. in eine Neuauswahl der Elementaria ein oder können neue Schülervorstellungen zu Tage bringen, sodass die didaktische Strukturierung des Schülerlaborangebots anzupassen ist.

Die Zusammenarbeit zwischen Fach- und Fachdidaktik konnte Synergien freisetzen: Die Personen aus der Fachwissenschaft erhalten eine Unterstützung bei der Wissenschaftskommunikation und lernen fachdidaktische Theorien und Modelle kennen. Umgekehrt resultieren für die Fachdidaktik spannende Forschungsfelder, in die sich überdies Lehramtsstudierende im Rahmen von Abschlussarbeiten einbinden lassen. Die Zusammenarbeit mit der Fachwissenschaft ist auch insofern sinnstiftend, als diese im Hinblick auf die zu entwickelnden Lehr-Lern-Situationen eine starke Authentizität herstellen und als Wächter der fachlichen Angemessenheit fungieren, was eine gewisse Entlastung darstellt. So wird aus dem Zusammenspiel mit

der Fachdidaktik, welche die Adressatengerechtigkeit empirisch im Blick behält, die Kernidee der Didaktischen Rekonstruktion gut realisiert: Die Herstellung einer Balance zwischen fachlicher Angemessenheit und Adressatengerechtigkeit bei der Entwicklung von neuen Lehr-Lern-Situationen.

9. Literatur

- Benz, J. (2020). Lehren und Lernen mit Vignetten in allen Phasen der Lehrerbildung—eine Einführung. In M. E. Friesen et al. (Hrsg.), *Vignettenbasiertes Lernen in der Lehrerbildung. Fachdidaktische und pädagogische Perspektiven* (S.12-27). Beltz Juventa.
- Bleichroth, W. (1991). Elementarisierung, das Kernstück der Unterrichtsvorbereitung. *Naturwissenschaft im Unterricht. Physik*, 2(6), 4-11.
- Bliesmer, K. & Komorek, M. (2023). Mit dem Modell der Didaktischen Rekonstruktion fachdidaktische Denkweisen, Arbeitsweisen und Haltung kommunizieren. In K. Bliesmer & M. Komorek (Hrsg.), *Didaktische Rekonstruktion – fachdidaktischer Ansatz für aktuelle Bildungsaufgaben* (S. 25-42). BIS-Verlag.
- Bogner, A., Littich, B. & Menz, W. (2005). *Das Experteninterview. Theorie, Methode, Anwendung*. VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Deci, E. L. & Ryan, R. M. (1993). Die Selbstbestimmungstheorie der Motivation und ihre Bedeutung für die Pädagogik. *Zeitschrift für Pädagogik* 39(2), 223-238.
- Demtröder, W. (2017). *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*. Springer.
- Demtröder, W. (2021). *Experimentalphysik 1: Mechanik und Wärme*. Springer.
- 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. Retrospective and Prospective* (S. 13-37). Sense Publishers.
- Eichler, J. & Eichler, H.-J. (2010). *Laser – Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. Springer Spektrum.
- Haagen-Schützenhöfer, C. & Hopf, M. (2018). Schülervorstellungen zur geometrischen Optik. In H. Schecker, M. Wilhelm, M. Hopf & R. Duit (Hrsg.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis* (S. 89-114). Springer.
- Heim, I. (2002): *Darstellung und Charakterisierung von Cadmiumsulfid-Aluminiumoxid-Nanokompositen* (Dissertation). Universität Duisburg-Essen.
- Hertel, I. V. & Schulz, C.-P. (2017). *Atome, Moleküle und optische Physik 1 – Atome und Grundlagen ihrer Spektroskopie*. Springer.

- Höttecke, D. & Hopf, M. (2018). Schülervorstellungen zu Nature of Science. In H. Schecker, M. Wilhelm, M. Hopf & R. Duit (Hrsg.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis* (S. 271-287). Springer.
- Jüstel, T. & Schwung, S. (2016): *Leuchtstoffe, Lichtquellen, Laser, Lumineszenz*. Springer.
- Liebig, S. (2012). Entdeckendes Lernen – wieder entdeckt? In M. Bönsch & A. Kaiser (Hrsg.), *Basiswissen Pädagogik. Unterrichtskonzepte und -techniken: Entdeckendes, forschendes, genetisches Lernen* (S. 4-16). Hohengehren.
- McComas, W. F. (2020). *Nature of Science in Science Instruction. Rationales and Strategies*. Springer.
- Patrick, P. (2023) (Hrsg.). *How People Learn in Informal Science Environments*. Springer.
- Reich, K. (2010). *Systemisch-konstruktivistische Pädagogik. Einführung in die Grundlagen einer interaktionistisch-konstruktivistischen Pädagogik*. Beltz.
- Rutsch, J. Seidenfuß, M. Vogel, M. Dörfler, T. & Rehm, M.: *Fachdidaktische Unterrichtsvignetten in Forschung und Lehre: Überblick über Forschungsarbeiten und Einsatzmöglichkeiten. Beiträge zur Lehrerinnen- und Lehrerbildung*, 35(3), 487-505.
- Sajons, C.-M. (2020). *Kognitive und motivationale Dynamik in Schülerlaboren. Kontextualisierung, Problemorientierung und Autonomieunterstützung der didaktischen Struktur analysieren und weiterentwickeln*. Logos.
- Schecker, H. Wilhelm, M., Hopf, M. & Duit, R. (2018) (Hrsg.). *Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*. Springer.
- Wilhelm, T. & Schecker, H. (2018). *Strategien für den Umgang mit Schülervorstellungen*. In H. Schecker, M. Wilhelm, M. Hopf & R. Duit (Hrsg.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis* (S. 39- 62). Springer.

Danksagung

Viele Menschen haben an der Entwicklung des Schülerlabors mitgewirkt und ihre Kreativität einfließen lassen. Ich danke der AG Quantenmaterialien an der Universität Oldenburg für die Kontaktaufnahme und auch den Projektpartnern der Universität Zakho. Namentlich hervorheben möchte ich alle mitwirkenden Lehramtsstudierenden: Nina Behrmann, Sebastian Stahnke, Jan-Christoph Metz, Daniel Krein, Lars Schmidt, Tobias Ellerbrock, Matteo Grimm, Jann Rada sowie Rieka Hausmann und Lucas Hofer. Vielen Dank für eure (fortlaufende) engagierte Mitwirkung!

Physical and robust forecast of the climate

Jannes von Bargaen*, **, Hans-Otto Carmesin*,***,****

*Gymnasium Athenaeum, Harsefelder Str. 40, 21680 Stade

**Brecht-Schule Hamburg, Norderstr. 163, 20097 Hamburg

***Studienseminar Stade, Bahnhofstr. 5, 21682 Stade

****Universität Bremen, 28334 Bremen

jannes.vonbargaen@gmx.de, Hans-Otto.Carmesin@athenetz.de

Kurzfassung

Unser Klima ist ein Thema für alle. Deshalb sollte jeder in der Lage sein, den Klimawandel zu verstehen und nachzuvollziehen. Zu diesem Zweck entwickeln wir eine Reihe von Modellen für die zeitliche Entwicklung des Klimas. Auf diese Weise können diese Modelle schrittweise und in einem reibungslosen Lernprozess verstanden werden. Außerdem organisieren wir die Modelle so, dass eine robuste und überprüfbare Vorhersage möglich ist. Wir führen genaue Analysen durch, indem wir unsere berechneten Daten sorgfältig mit gemessenen Werten vergleichen. So kann jeder seinen persönlichen CO₂-Ausstoß überprüfen und konkrete Maßnahmen ergreifen.

Abstract

Unser Klima ist ein Thema für alle. Deshalb sollte jeder in der Lage sein, den Klimawandel zu verstehen und nachzuvollziehen. Zu diesem Zweck entwickeln wir eine Reihe von Modellen für die zeitliche Entwicklung des Klimas. Auf diese Weise können diese Modelle schrittweise und in einem reibungslosen Lernprozess verstanden werden. Außerdem organisieren wir die Modelle so, dass eine robuste und überprüfbare Vorhersage möglich ist. Wir führen genaue Analysen durch, indem wir unsere berechneten Daten sorgfältig mit gemessenen Werten vergleichen. So kann jeder seinen persönlichen CO₂-Ausstoß überprüfen und konkrete Maßnahmen ergreifen.

1. Introduction

Anthropogenic climate change is a change in global temperature caused solely by humans. From the beginning of industrialization until the year 2000, it increased by about 0.5 – 1.0 Kelvin (K). The Problem of the climate change is the leading to rising temperatures and is already causing noticeable effects such as extreme weather events, rising sea levels and changes in ecosystems. It is a global problem that urgently requires global solutions.

We want to show, that the climate change is a big problem und the temperature will rise in the next few years to levels, where these extreme weather conditions will cause serious issues.

The aim is to develop a generally comprehensible and verifiable core climate model based on the Stefan-Boltzmann law. Mathematical and model-theoretical approximations are necessary for every climate model. In the current project, these are systematically and robustly designed and presented in a comprehensible and verifiable way. We compare the calculations with measured values such as the Keeling Curve. We will also make optimizations by adding further greenhouse gases and feedbacks. A decisive aspect is the relevance in the context of current political and social global climate goals and includes the prognosis of how far these are in line with reality with our calculations. Achieving the climate targets

of the Paris Climate Agreement is the minimum that we as the Earth's population must achieve to ensure that the Earth remains liveable and that we have sufficient living space to feed ourselves by preserving agricultural land. There is only one atmosphere for all the earth's inhabitants. It therefore makes no sense for only individual countries to agree and comply with climate agreements, as CO₂ savings must be achieved as a whole. We will use transparent programming and presentation so that the modeling process is comprehensible. People without specific specialist knowledge can check their personal and social CO₂ emissions and derive concrete measures for action. In this way, we not only want to draw attention to previously neglected savings measures, but also motivate people to change their everyday habits by rethinking. Various "CO₂ footprint calculators" are already available on the Internet for this purpose, for example from the WWF or the Federal Environment Ministry of Germany.

2. The calculation of the climate

2.1. Calculations using the Stefan-Boltzmann law

The aim of us is to calculate the climate with natura and anthropogenic greenhouse effect in 4 models. We calculate these climate changes with the Stefan-Boltzmann law, see Carmesin et al. (2018, p. 160-167).

The Stefan-Boltzmann law says that a body with a temperature T emits thermal radiation, thereby the power density S is:

$$S = \sigma \cdot T^4 \quad \{1\}$$

Sigma (σ) is the Stefan Boltzmann constant:

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \quad \{2\}$$

This new variant of the long-term calculation also allows us to determine the tipping point at which the temperature rises inexorably. For this tipping point not to occur, we must stay below 3 degrees of global warming.

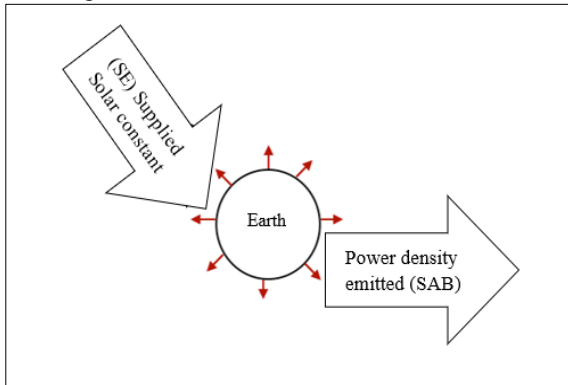


Fig. 1: Global radiation balance of absorption and emission: The Earth's sun rays correspond to the supplied solar constant (S_E) = Power density of the sun's rays. The energy radiated from the earth corresponds to the power density emitted (S_{ab})

The four models of the Stefan-Boltzmann law:

1. Earth without atmosphere
2. Earth with natural atmosphere and natural greenhouse gases
3. Earth with natural atmosphere, natural greenhouse gases, and anthropogenic greenhouse gases
4. Emission of CO2 in the coming years (with a solution approach)

2.2. Overview of all models of the method:

The following is a general overview of the models by first explaining all important measured data and then analyzing and calculating them. All four models refer to the Stefan-Boltzmann law, which forms a robust basis for my calculations.

Supplied solar constant = Power density of the sun's rays for the earth corresponds to $S_E = 1367 \frac{W}{m^2}$

The power density emitted corresponds to $S_{ab} = 341.75 \frac{W}{m^2}$ $S_E = 1367 \frac{W}{m^2} : 4 = 341.75 \frac{W}{m^2}$

Model 1: Earth without atmosphere

Emitted power density $S_{ab} = 341.75 \frac{W}{m^2}$:
temperature (T) = 5.48 C°

Model 2: Earth with a natural atmosphere

Typical emitted power density $S_{ab} = 391.75 \frac{W}{m^2}$:
temperature (T) = 15.16 C°

Model 3: The earth with a natural atmosphere ($391.75 \frac{W}{m^2}$) out of model 2, plus the anthropogenic greenhouse effect ($2.7 \frac{W}{m^2}$).

Emitted power density $S_{ab} =$

$$391.75 \frac{W}{m^2} + 2.7 \frac{W}{m^2} = 394.45 \frac{W}{m^2}$$

Increase in temperature (T) = 0.5°C

These are the results for the first three models. We have decided to create a much more complex climate modeling in model 4.

3. Complex physical and mathematical climate model with future forecast (model 4)

The focus of our project will be the fourth model, we want to mark the focus on the climate forecast, which shows the CO2 emissions in the coming years and have a solution approach. In model four we will have a fusion of a physical model and a mathematical model.

3.1. Application of the power series

In climate modeling, the choice of mathematical method is crucial to adequately account for the complexity and diversity of climatic phenomena. While a Fourier series is often used to approximate periodic functions, when modeling the climate system or geophysical system, we encounter non-periodic phenomena that cannot be effectively described by a Fourier series, see Gönnert, et al. (2004). Therefore, the power series offers a more suitable alternative to model such non-periodic phenomena.

The power series provides a flexible approximation to non-periodic functions by using polynomials with arbitrary powers of the independent variables. This allows us to capture complex relationships between different factors, such as the course of temperature in the past, in a mathematically precise way and to model them in the future. In contrast, the Fourier series is limited to the representation of periodic functions and cannot adequately account for non-periodic variations in the climate system.

A central physical law, which is also of crucial importance in climate modeling, is the Stefan-Boltzmann law. This law describes the radiant power of a blackbody as a function of its absolute temperature. By using the power series in conjunction with the Stefan-Boltzmann law, climate models can provide a more realistic representation of the climate system and take into account complex phenomena such as the greenhouse effect and feedback mechanisms. By combining mathematical principles with physical laws, this approach allows us to model the climate system more accurately and comprehensively.

3.2. Basics of the long-term forecast

3.2.1. Application of greenhouse gases

The first model calculations were carried out using the global average of CO2 emissions (4.8 tons). We also included other relevant greenhouse gases for optimization purposes. Using the graph figure 2 from the Federal Environment Agency, see Federal Environment Ministry of Germany (2018), we calculated a percentage value for the individual other greenhouse gases. This source is a reliable and robust representation of global greenhouse gas emissions, but it was only available as a graph.

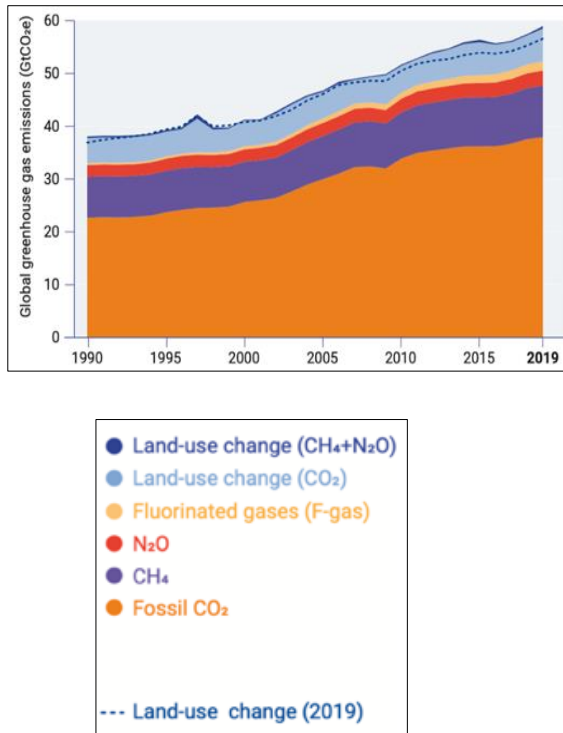


Fig. 2: Graphic from the Federal Environment Ministry of Germany. The graphic is a serious and robust representation of global greenhouse gas emissions.

We have therefore calculated our own percentage values for the individual gases, in which CO₂ emissions represent 100%. By using a ruler as an aid and read off the graph in cm and converted it into a percentage using a calculator. Thus, we get a gas factor that reflects the other greenhouse gases. The gas factor of 1.5547 summarizes the five other relevant greenhouse gases and optimizes my long-term forecast. This is multiplied by the CO₂ emissions, resulting in an average global CO₂-equivalent emission of 7463 kg.

3.2.2. Application of the Keeling Curve

In the extensive Excel spreadsheet, we applied the Keeling Curve, an extremely fascinating and scientifically sound representation of measured data that has tracked CO₂ levels in our atmosphere since 1959, see Earth observatory NASA (2005). This curve, named after the renowned scientist Charles David Keeling who created it, provides a remarkably accurate snapshot of changes in the concentration of carbon dioxide in our air. Its data is the centerpiece of the research and analysis, and we use it as the primary source for all “ppm” (parts per million) values, which describe the proportion of CO₂ in the atmosphere in particles per million.

In addition to the continuity of the Keeling Curve, we also draw on a variety of other data sources to enrich my analyses. These sources include data from ice cores, which provide valuable insights into past climate conditions. From this data, we not only extract information, but also obtain key values such as the initial value for ppm (ppm₀), which represents the current CO₂ content in the atmosphere.

Another important parameter that we derive is my factor, which is given as 1.0031. This factor

represents the annual rate of temperature change and serves as a measure of the average annual temperature increase. It is of crucial importance for the analyses, as it is applied annually to the global average CO₂-equivalent emissions. It is both multiplied and divided, especially when we retrospectively refer to.

The integration of all these different data sources and the consideration of parameters such as the factor and the ppm₀ value from the Keeling Curve allow me to examine complex relationships related to climate change in detail. Our analyses not only provide insights into past developments, but also forecasts for the future based on a solid scientific foundation.

3.2.3. Calculation of the temperature

This Excel program for climate prediction focuses on the calculation of the emitted power density (S_{ab}) and the resulting temperature development. The temperature is calculated using the previously calculated emitted power density and the Stefan-Boltzmann law. The following formula applies:

$$T = \left(\frac{S_{ab}}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \quad \{3\}$$

Therefore, σ is the Stefan-Boltzmann constant.

In summary, the visual comparison of the calculated temperature differences from the Excel program with the measured values shows that the model provides a plausible approximation of the actual climate changes. The graph illustrates the importance of such forecasting models for understanding global climate change and underlines the need for continuous monitoring and improvement of precision.

4. Methods, results and goal achievement

4.1. Goal achievement

The goal is to develop a comprehensible and verifiable climate model. We succeeded in doing this with the Excel spreadsheet for the long-term forecast and the resulting findings (point 4). We produced very accurate analyses by mathematical and physical modeling, taking into account robust laws of nature and measurement data that are precise and generally recognized in science. The data of the Keeling Curve, the Stefan-Boltzmann law and the addition of further greenhouse gases have been explained and incorporated in a comprehensible manner.

The results of this climate forecast reflect the goal of precise climate modeling. By creating a graph that compares the calculated temperatures from the Excel program of my long-term climate modeling with the actual measured values of the temperature, see Fig. (6), a remarkably small deviation from reality was achieved.

4.1.1. Problem

Mankind has existed for more than 4 million years and learns through experience. When a dangerous situation is suspected, neural areas are activated that activate people to protect themselves from them. These assumptions create problem solutions that start a learning process.

By resolving other similar situations, the brain stores successful behaviors as experience and can then recall

them more automatically in the future because the synaptic connections required for this strengthen. At the same time, unsuccessful processes are forgotten again.

We will take these neural learning processes into account and apply them to the development of the climate forecast by first presenting the basic problem and then using a guess based on previous knowledge to check it, which will lead us to the solution. This method is called hypothetic deduction.

The basic problem now is that the following gap forms in our equation.

$$C(t) \rightarrow \Delta S_{ab}(c) \Rightarrow \Delta T(t) = \text{Climate forecast}$$

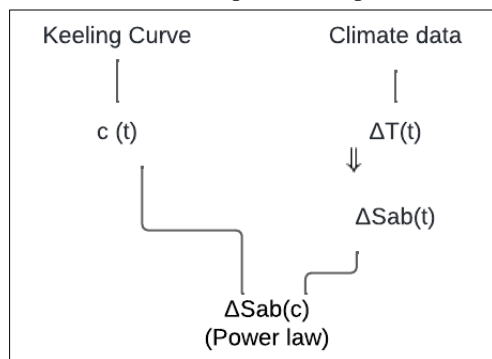
→: Power law
 ⇒: Stefan – Boltzmann law

Our power law, shown here in green, is uncertain and incomplete. Delta S is missing, so the equation is not complete, and the calculations have not yet been finalized. This completion of the equation is a crucial point for the climate forecast.

4.1.2. Guess/Assumption (Flowchart)

To solve the equation and find the missing delta S, we create a step-by-step method by calculating all the components for the equation. This is the representation of our assumption taking into account our previous knowledge.

This is a brief overview of the following method and the basic foundation of climate modeling. Here, the climate modeling method is explained step by step in a flowchart. Each step is then explained individually.



⇒: Stefan – Boltzmann law
 –: Regression

Fig. 3: The flowchart

The flowchart shows the individual steps for developing the climate forecast. Starting from presenting the problem and developing a guess as to how a solution can be achieved, to checking our assumed solution approach as a regression and finally checking the solution. With this procedure, which is shown as a flow chart, we want to solve the problem mathematically and physically. We were stimulated by the physical laws of the tidal range of water levels as a function of time. We used a power law as a mathematical method. The Fourier series helps represent complex periodic phenomena but is replaced by the power series because the Fourier series does not take non-periodic aspects into account precisely enough.

With this method we assume that we solve the equation and thus develop the climate forecast.

$$C(t) \rightarrow \Delta S_{ab}(c) \Rightarrow \Delta T(t) = \text{Climate forecast}$$

→: Power law
 ⇒: Stefan – Boltzmann law

4.1.3. Verification as regression

Now we performed the steps in the flowchart.

4.1.3.1 Measured values 1959-2022

This first calculation examines the relationship between the Keeling Curve, which represents the concentration of CO2 in the atmosphere in parts per million (ppm), and our calculated temperature data in degrees Celsius. The Keeling Curve, named after the American scientist Charles David Keeling, is a fundamental tool for monitoring CO2 concentrations in the atmosphere and is considered an important indicator of anthropogenic influence on climate.

We create a regression using the year 2000 as reference date and the value 369.55 ppm as reference value for CO2 (reference value depending on reference date).

$$c(t) = 0.0128t^2 + 1.8636t + 370.31 \quad \{4\}$$

$$R^2 = 0.9995$$

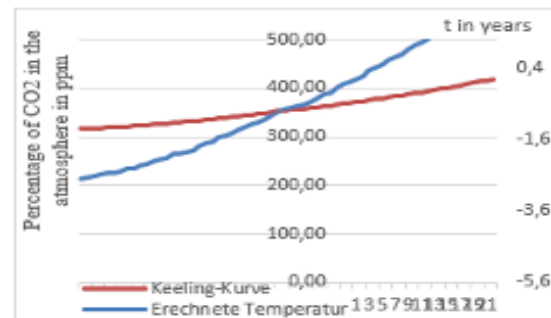


Fig. 4: Graphical representation of the measured values from 1959-2022 as a regression. The Keeling Curve (orange) is shown for comparison with the temperature we calculated (blue) from climate modeling

4.1.3.2 Temperature anomaly

Following the analysis of the Keeling Curve and its relationship to the temperature data, we examined the temperature anomalies in the period from 1959 to 2022. The year 1981 from the data from the German Weather Service DWD was used as a reference point and the temperature anomalies were calculated relative to this reference date, see German Weather Service DWD (2024). The reference value was set at 278.283 Kelvin to ensure a uniform basis for the analysis. The results of this analysis led to the derivation of a precise equation {5}.

$$\Delta T = 0.0002t^2 - 0.0112t + 0.0275 \quad \{5\}$$

$$R^2 = 0.9465$$

This equation provides a fundamental basis for further investigation of temperature dynamics and helps to deepen our understanding of the mechanisms of climate change.

With the equation we have just found, which gives the delta of the temperature as a function of time, we can now continue our calculations using the Stefan-Boltzmann law. Using the temperature data given by equation {5}, we can calculate the power density Sab. We arrive at the delta of the power density Sab as a function of time.

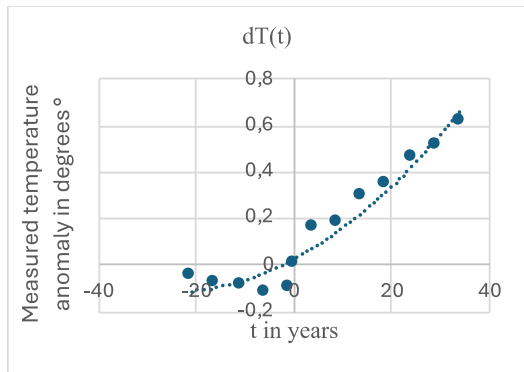


Fig. 5: Graphical representation of the temperature anomalies (x-axis) in the period from 1959 to 2022 (y-axis)

4.1.3.3 Power density and power series

Now that we have a data value for the CO2 concentration in each year (step 1) and a value for the temperature anomaly in each year (step 2), we can now form the unique power series. This says that the delta of the power density Sab is dependent on the CO2 concentration.

$$\Delta S_{ab}(c) \rightarrow T(c)$$

Now that we have the emitted power density as a function of the CO2 concentration see {6}, we can calculate the temperature as a function of the CO2 concentration. This is done with the Stefan Boltzmann law.

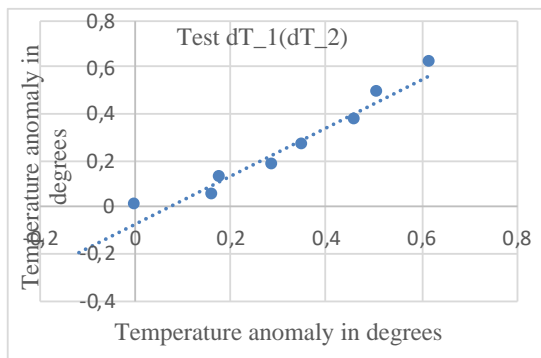


Fig. 6: Very good test regression in relation to the given initial data. On the y-axis we have the measured temperature anomaly in degrees and on x-axis we have the calculated anomaly in degrees.

Before we determine the power series, we test in graph (6) whether our previous calculations are accurate. We do this by comparing the two temperature anomalies in a regression. Since the regression value is close to 1, this is very accurate and we can now determine the power series in graph (6).

From the regression between the delta of the temperature and the CO2 concentration we get our equation {6} which forms the power series.

$$\Delta S_{ab} = 0.0002c + 0.0545c - 0.0646 \quad \{6\}$$

$$R^2 = 0.9989$$

This is the calculation basis that we use for the later climate forecast.

We now switch from regression as the basis of the calculation to the power series, as regressions are potentially erroneous due to their data-based nature.

4.1.4. Solving of the problem

By applying the method used in the previous section, we have now found the solution for the procedure and can now carry out a climate forecast

$$C(t) \rightarrow \Delta S_{ab}(c) \Rightarrow \Delta T(t) = \text{Climate forecast}$$

→: Power law (complete Solution)

⇒: Stefan – Boltzmann law

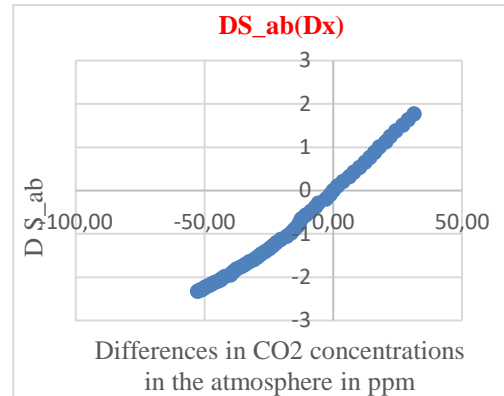


Fig. 7: We create a graph from the data values for the CO2 concentration and the difference from the power density in Watts per square meter and on the x-axis the difference in CO2 concentration in the atmosphere in ppm.

4.2. Graphical representation of target achievement (forecast)

Our aim is to develop a comprehensible and verifiable climate model. The model should be able to make precise climate forecasts for the future. By developing a mathematically and physically correct climate model, the years up to 2100 were modeled and thus a climate forecast was created. Graph (9) first shows the temperature development in the past (1959-2023) and then models the temperature change up to the year 2100. It can be seen that the 1.5 degrees limit will be exceeded in 2045 and thus compliance with the agreed 2 degrees target of the temperature increase of the Paris Climate Agreement, see United Nations, Collection of International Treaties: Paris Agreement (2020) will be broken. In 2100, the temperature increase will be around 3.7 degrees, which will have fatal consequences for humans and their environment.

Climate change, mainly caused by human activity, is leading to rising temperatures and extreme weather. Its consequences are manifold: rising sea levels threaten coasts, biodiversity loss endangers ecosystems, food shortages threaten, health risks increase and economic damage is significant. There is an urgent need to reduce our CO2 emissions and take adaptation measures to mitigate these consequences.

4.3. Solution

In this Solution, we present a climate prediction program developed to reduce the global temperature increase by simulating annual savings. Increasing global warming is one of the most significant challenges of our time. In order to tackle this phenomenon effectively, it is crucial to develop innovative solutions.

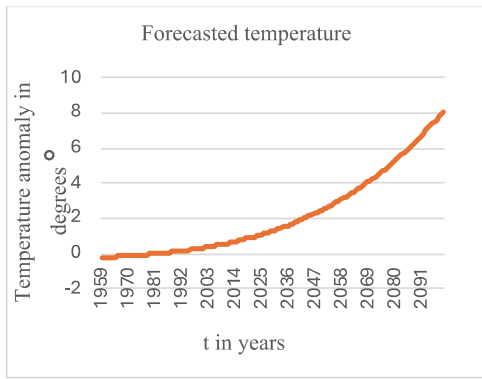


Fig. 8: Forecast temperature until 2100. On the y-axis we have the temperature in degrees Celsius and on the x-axis the time in years.

4.3.1. Solution approach 1: Temperature behavior without greenhouse gas savings

Our approach is based on a specific factor that can simulate annual savings. This factor is 1.0031 if no greenhouse gases are saved per year. This factor is derived from the trend of the Keeling Curve.

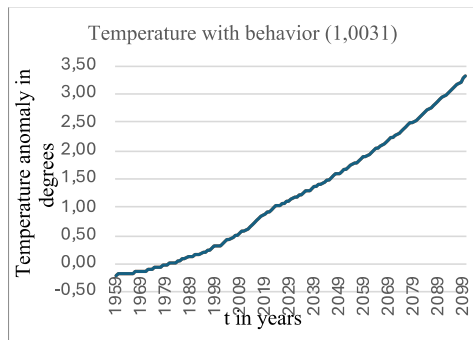


Fig. 9: Temperature behavior without greenhouse gas savings (3.1‰). On the y-axis we have the temperature in degrees Celsius and on the x-axis the time in years.

4.3.2. Solution approach 2: Temperature development, with yearly savings in all greenhouse gases

By being able to manually adjust the factor, we can now model the climate forecast by taking annual savings into account. As an example of such an adjustment of the factor, we consider the transition from the normal state (1.0031) to the factor 1.001, which corresponds to an annual saving of 2.1 per thousand.

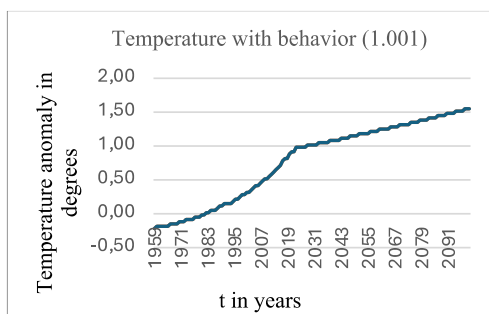


Fig. 10: Temperature behavior with greenhouse gas savings from 1 per million every year. On the y-axis we have the temperature in degrees Celsius and on the x-axis the time in years.

5. Didactic concept

The limitation of climate change is a present – day key topic (Klafki 1993). However, the decision makers in most institutions failed to achieve an effective limitation of carbon dioxide emissions. As a consequence, the permanent increase of the average temperature of the atmosphere is not limited. This ineffectiveness is especially clear, as the fact of the anthropogenic climate change by carbon dioxide emissions is known for more than 100 years, see Arrhenius (1896).

Thus, the limitation of climate change requires a broader basis: In the topic of climate change, most individuals should be able to distinguish facts from mere opinion or even fake news. For it, most individuals should be able to trace the arguments and calculations of a robust climate model. For it, most people should take part in the enlightenment, see Kant (1784), in order to overcome their immaturity, at least in the topic of climate change.

For it, a robust model has been developed, in which students can trace all steps from the only used non-trivial physical law, the Stefan Boltzmann law, to the calculation of anthropogenic climate change, see Carmesin et al. (2018). Thereby, in addition, the students can confirm the robustness of the result. In order to understand the economic mechanisms underlying climate change, mathematical game theory, including Nash equilibria, has been used as a basis for a climate game, see Carmesin and Rumpel (2019). With it, students can discover the essential economic effects and they can calculate the respective Nash equilibria.

In this paper, we improve the robust climate model, so that a robust forecast becomes traceable and calculable for most individuals.

6. Experience with teaching

The robust model has been tested in physics courses in classes 10 or 11.

In the first 90 minutes, IR radiation is explored experimentally, and the power density

$$S = \frac{P}{A}$$

is introduced. This lesson is valuable, as it provides many applications and a useful basis for the following.

In the second 90 minutes, the Stefan Boltzmann law is discovered experimentally, and the Stefan Boltzmann constant is measured. For it, a thermometer is used, see Carmesin et al. (2018), or an IR camera is applied. This lesson is insightful, as it shows a universal source of radiation, in contrast to particular radiation emitted by atoms and molecules.

In the third 90 minutes, radiation equilibria are investigated experimentally and theoretically, see Carmesin et al. (2018). This lesson provides a robust, useful and confirmed concept of equilibria underlying local and global climate.

In the fourth 90 minutes, the climate is derived for several planets without considering the atmosphere. Hereby, also the habitable zones of extrasolar planets are explored. This lesson provides a robust,

empirically confirmed and extendible concept of climate models.

In the fifth 90 minutes, Wien's displacement law is discovered experimentally. This law is essential for the greenhouse effect.

In the sixth 90 minutes, the natural greenhouse effect of Earth is derived and investigated. This lesson provides a confirmed and clarifying concept of the realistic climate at Earth.

In the seventh 90 minutes, the anthropogenic climate change is derived and explored. This model is enlightening, as it provides a deep and robust understanding of climate change.

In the eighth 90 minutes, the students calculate climate forecast. For many students, this lesson is still surprising, as it shows how fast the temperature increases and the climate changes. This founded realization causes consternation by some students.

In the ninth 90 minutes, solutions of the climate change based on solar power are explored, see Carmesin (2009), Carmesin, Martens, Rösler (2012).

In the tenth 90 minutes, solutions of the climate change based on wind energy are explored, see Carmesin et al. (2017, page 52).

When the topic is taught at this pace, the students are enabled and enlightened in the topic of anthropogenic climate change. The examination at the end of this teaching unit regularly showed good results. In order to explore economic mechanism underlying climate change, a climate game can be played additionally.

7. Didactic concept for cyber space

The project aims to provide learners with a basic understanding of the links between their individual behavior and global climate change. Through the use of interactive and customizable climate modeling, learners can simulate their own CO₂ emissions based on personal behaviors and observe the impact of these choices on the climate. This allows learners to visually and quantitatively understand the direct consequences of their actions on the environment, promoting a change in climate-damaging behavior through reflection.

This project is particularly valuable didactically because it breaks down abstract concepts of climate change to a tangible, personal level. Instead of viewing climate change as a distant, global problem, the simulation allows learners to experience the direct link between their everyday lives and the resulting climate changes. The interactive nature of the simulation encourages active learning, enabling learners to gain knowledge independently through experimentation and observation. Furthermore, reflecting on the results deepens understanding and encourages learners to adopt more sustainable behaviors in their own lives.

By combining theoretical knowledge with practical application and reflection, this project serves as an effective didactic method for raising awareness of climate change and promoting behavior change. It enables learners not only to acquire knowledge, but also to see themselves as active contributors to a more sustainable future.

8. Summary of the results

Through the publication on my homepage <http://jannesvonbargen.de> and various public lectures, including at school events and poster presentations at the German Physical Society (DPG), it is possible to present these calculations. This means that anyone, even without in-depth specialist knowledge, can understand and try out the necessary savings in general CO₂ emissions for our planet.

We created a transparent programming and presentation. This means that anyone can check their personal and social CO₂ emissions and derive specific measures for action. The total savings targets can be transferred using "CO₂ footprint calculators", for example from the WWF or the Federal Environment Ministry of Germany, and a change in your own everyday habits can be derived from this. The comparison to check climate modeling in relation to current political and social global climate goals is of crucial importance.

The results of the recently concluded World Climate Conference in Dubai and the Paris Climate Agreement should become verifiable through this modeling to what extent agreed targets are in line with reality. Achieving the climate targets of the Paris Climate Agreement is the minimum that we as the Earth's population must achieve to ensure that the Earth remains livable and that we have sufficient living space to feed ourselves by preserving agricultural land.

There is only one atmosphere for all the earth's inhabitants. It therefore makes no sense for only individual countries to agree and comply with climate agreements, as CO₂ reductions must be achieved as a whole.

Continuing from the dissemination efforts and implications of this calculation, it is imperative to underscore the broader societal implications of climate modeling and carbon reduction efforts. By democratizing access to climate data and empowering individuals to actively engage in emission reduction measures, we lay the foundation for collective action towards a sustainable future.

The comparison between the outcomes of climate modeling and the global climate goals outlined in significant agreements such as the Paris Climate Agreement and the results of events like the World Climate Conference in Dubai serves as a crucial checkpoint for assessing progress and ensuring accountability. Verifying the alignment between modeled projections and real-world outcomes not only enhances the credibility of climate science but also informs policy decisions and shapes international cooperation in combating climate change.

Furthermore, the imperative of achieving the targets set forth in international climate agreements cannot be overstated. These targets serve as a baseline for collective action aimed at preserving the habitability of our planet and ensuring the availability of essential resources such as agricultural land. Recognizing the interconnectedness of global climate systems underscores the necessity for comprehensive and coordinated efforts towards emission reduction on a global scale.

The didactic concept focuses on enabling individuals to distinguish facts from opinions through a robust climate model based on the Stefan-Boltzmann law and game theory to understand economic impacts. In experience with teaching, a ten-step lesson plan leads students through experiments and theory to grasp climate change and explore solutions like solar and wind energy. The didactic concept for cyberspace uses interactive simulations to link personal behaviors with climate impacts, promoting active learning and sustainable behavior.

In conclusion, the pursuit of climate targets outlined in global agreements necessitates a paradigm shift towards collective responsibility and action. By bridging the gap between climate modeling outcomes and real-world implications, we pave the way for informed decision-making and concerted efforts towards a sustainable future for generations to come.

9. Literature

- Arrhenius, Svante (1896): On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. *Phil. Mag. And J. of Science*. 41, pp. 237-276.
- Carmesin, Hans-Otto (2009): Projekttag Energie in Klasse 7: Von Fotovoltaik bis Biodiesel. Tagungs-CD Fachdidaktik Physik, Nordmeier, Volker and Grötzebauch, Helmuth, DPG, Berlin, ISBN: 978-3-86541-371-0.
- Carmesin, Hans-Otto and Martens, Klaus and Rösler, Karl (2012): Fotovoltaik im Unterricht - Dreifacher Wirkungsgrad - eine Revolution in der Solartechnik? *MNU*, 65/6, pp. 340-348.
- Carmesin, Hans-Otto et al. (2017). *Universum Physik 9/10 Niedersachsen*. Berlin: Cornelsen, p. 52.
- Carmesin, Hans-Otto et al. (2018). *Universum Physik Einführungsphase Gymnasium Niedersachsen G9*. Berlin: Cornelsen, pp 160-167.
- Carmesin, Hans-Otto and Rumpel, Verena Lydia (2019): Den Klimawandel spielerisch entdecken und erkunden - Planspiel und mathematische Spieltheorie - Teil I. *MNU*, 2019(1), pp. 34-39.
- DWD German Weather Service. Global average temperature: DWD German Weather Service. URL: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar>, (download 5/2024).
- Federal Environment Ministry of Germany (2018). Graphic for global greenhouse gas emissions, Berlin.
- Gönnert, Gabriele et al. (2004). Characterization of tidal curve, *The Coast*, 68, 99-141.
- Kant, Immanuel (1784): Beantwortung der Frage: Was ist Aufklärung? *Berlinische Monatsschrift*, 4, pp. 481-494.
- Klafki, Wolfgang (1993): Grundlinien einer gegenwarts- und zukunftsbezogenen Konzeption, *Pädagogische Welt*, 47, pp. 28-33.
- NASA (2005): NASA Earth observatory. URL: <http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/NasaNews/ReleaseImages/20051007/02.jpg>, (download 5/2024).
- NASA (2024): The Keeling Curve. URL: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/5620/the-keeling-curve> (download 5/2024).
- United Nations, Collection of International Treaties: Paris Agreement (2020), URL: https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_en (download 5/2024).
- United Nations, Depository, Status of Treaties, Collection of International Treaties: Paris Agreement (2020), Chapter XXVII 7.d., (download 5/2024).

Acknowledgment

We are grateful to Inga von Bargaen for her support with organizational and planning parts of the project. The structuring aid in writing this essay was a valuable aid.

Jannes would like to thank his teachers at the Brecht School in Hamburg, who released him from classes at any time when necessary and who shows him great appreciation, which motivates Jannes.

Students Analyse the Impact of the H_0 Tension on the Worldview

Hans-Otto Carmesin*

*¹Gymnasium Athenaeum, Harsefelder Straße 40, 21680 Stade

²Studienseminar Stade, Bahnhofstr. 5, 21682 Stade

³Universität Bremen, Fachbereich 1, Postfach 330440, 28334 Bremen
hans-otto.carmesin@t-online.de

Abstract

In everyday life, we are used to space and time. Thereby, it is very effective and clear to organize our life and our knowledge chronologically. Hereby, the Big Bang is the starting point of our chronological knowledge. Thereby, the rate of expansion of space as well as the age t_0 of the universe are derived from an observed value $H_{0,obs}$. It is the observed value of a fundamental key quantity: the Hubble constant H_0 . However, there are different observed values $H_{0,obs}$. For instance, the cosmic microwave background CMB provides $t_{0,CMB} = 13.83$ billion years, whereas radiation with the cosmological redshift $z = 0.055$ provides $t_{0,z=0.055} = 12.66$ billion years. Obviously, the difference is essential for our chronological organization of our knowledge about the world. Carmesin (2023a) derived the dynamics of volume in nature, the volume dynamics, VD. They bridge general relativity and quantum physics. In this paper, we use the VD to derive the theoretical values of $H_{0,theo}(z)$ as a function of the cosmological redshift z , in precise accordance with observation. For that derivation, we provide a learning process, so that you can directly use the concept in your courses. The learning process has been tested in various learning groups, and experiences are reported.

1. Introduction

1.1. On Einstein's idea of Λ

The expansion of space can be derived from general relativity, GR, see Einstein (1917), Friedmann (1922) and Lemaitre (1927). Thereby, a uniform scaling of space is derived. In general, such a uniform scaling can be described by the time evolution of a scale radius $r(t)$ in Fig. (1): When space expands by a factor q , then r is multiplied by q . That evolution is described by the following differential equation, DEQ:

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}(\rho_r + \rho_m + \rho_K + \rho_\Lambda) \text{ with } H = \frac{\dot{r}}{r} \quad \{1\}$$

Hereby, G is the universal constant of gravity, and H is the Hubble parameter. Moreover, four densities are distinguished, so that each density has a characteristic scaling behaviour as a function of the scale radius r :

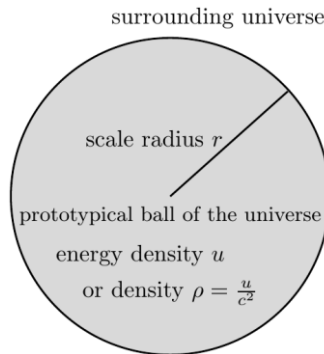


Fig. 1: A prototypical ball of the universe with a scale radius r and an energy density u . The energy density can be expressed in terms of a density or dynamic density $\rho = \frac{u}{c^2}$.

ρ_r is the density of radiation, ρ_m is the density of matter, including cold dark matter, CDM, see Planck collaboration (2020), ρ_K is the density of a curvature parameter, it is zero according to observation, see Planck collaboration (2020), and Carmesin (2023c) proved it, ρ_Λ is the density of the cosmological constant, it does not change as a function of the scale radius r . The model in Eq. {1}, including Λ and CDM, is called Λ CDM cosmology, Workman et al. (2022).

1.2. On the Λ CDM model

Insights about the age t_0 of the universe can be achieved by an analysis of the present-day values of the Λ CDM model. A present-day value of a quantity is marked by the subscript zero. For instance, the present-day value of the time is t_0 , see Fig. (2):

$$t_{\text{present-day}} =: t_0 \text{ with } t_{\text{Big Bang}} =: 0 \quad \{2\}$$

At value $\rho_K = 0$, the density is called critical density:

$$\rho_{\text{present-day}} =: \rho_{cr,0} \quad \{3\}$$

The ratios of the particular densities and the critical density are called density parameter:

$$\Omega_\Lambda =: \frac{\rho_\Lambda}{\rho_{cr,0}} \ \& \ \Omega_m =: \frac{\rho_m}{\rho_{cr,0}} \ \& \ \Omega_r =: \frac{\rho_r}{\rho_{cr,0}}; \quad \{4\}$$

According to the cosmological redshift, the densities in Eq. {1} are functions of the scale radius:

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \cdot \rho_{cr,0} \cdot \left(\Omega_r \frac{r_0^4}{r^4} + \Omega_m \frac{r_0^3}{r^3} + \Omega_\Lambda \right) \quad \{5\}$$

In the Λ CDM model, the present-day value of the Hubble parameter H is regarded as a constant, named Hubble constant:

$$H(t_0) =: H_{0,\Lambda\text{CDM}} = \sqrt{\frac{8\pi G}{3} \rho_{cr,0}} = \frac{1}{t_{H_0}} \quad \{6,7\}$$

Its inverse is called Hubble time t_{H_0} . The present-day time is equal to the Hubble time multiplied by the following integral I_0 :

$$t_0 = t_{H_0} \cdot I_0 \text{ \& } I_0 = \int_0^1 \frac{x \cdot dx}{\sqrt{\Omega_r + \Omega_m x + \Omega_\Lambda x^4}} \approx 0.95 \quad \{8\}$$

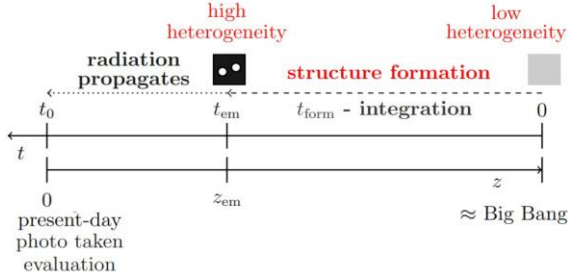


Fig. 2: The time t after the Big Bang and the corresponding cosmological redshift: Heterogeneity or structure in the universe has been evolving since the Big Bang. Structure is observed with help of radiation or objects emitted at a time of emission t_{em} . Such objects can be electromagnetic waves, neutrinos or gravitational waves. So, a photograph of the heterogeneity at t_{em} can be taken.

The age of the universe is a calendar date. Thus, t_0 cannot be derived from universal constants of physics. Instead, t_0 is measured. Hence, the Hubble time t_{H_0} is measured. Thence, H_0 is measured. This is an opportunity to check the Λ CDM model: H_0 can be measured by using physical objects that have been emitted at a time t or a corresponding cosmological redshift z or a scaled time \tilde{t} , see e. g. Hobson (2006), Carmesin (2019a):

$$\tilde{t} := \frac{t}{t_{H_0}} = \frac{1}{1+z} \text{ or } \tilde{t}_{em} = \frac{1}{1+z_{em}} \quad \{9\}$$

Thus, in general, the observed values $H_{0,obs}$ of the H_0 form a function of the cosmological redshift:

$$H_{0,obs}(z) = \text{function}(z) \quad \{10\}$$

If that function is a constant, then the Λ CDM model is confirmed. Otherwise, the Λ CDM model is falsified according to the hypothetico-deductive testing, see e. g. Kircher, Girwidz und Häußler (2001, section 4.1.2), Niiniluoto, Sintonen, Wolenski (2004, S. 214). As the level of confidence is above 5σ , that function is not a constant, see Riess et al. (2022).

1.3. On the observed values of $H_{0,obs}$ and t_0

Using the cosmic microwave background, CMB, emitted at $z_{CMB} = 1090.3$, the Planck collaboration (2020) achieved the following observed value:

$$H_{0,obs}(z = 1090.3) = 66.88 (\pm 0.92) \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}} \quad \{11\}$$

Hereby, the unit Megaparsec is as follows, see Workman et al. (2022):

$$1 \text{ Mpc} = 3.085\,677\,581\,49 \cdot 10^{19} \text{ km}$$

$$\text{Thus, } H_{0,obs} = 2.167 (\pm 0.03) \cdot 10^{-18} \frac{1}{\text{s}} \quad \{12\}$$

The observed density parameters are as follows, see Planck collaboration (2020) or Carmesin (2019a): Thereby, $\Omega_\Lambda = 0.679 (\pm 0.013)$ $\{13\}$

$$\text{Hence, } \Omega_m = 0.321 (\pm 0.013) \quad \{14\}$$

$$\text{Hereby, } \Omega_r = 9.625 \cdot 10^{-5} \quad \{15\}$$

$$\text{Thus, } I_0 = 0.9455 \quad \{16\}$$

Thus, the age of the universe is as follows:

$$t_{0,CMB} = 13.83 (\pm 0.24) \cdot 10^9 \text{ years} \quad \{17\}$$

The density parameters have also been derived from the VD, see Carmesin (2021a). Based on the observation of galaxies at an averaged cosmological redshift (z) = 0.055, Riess et al. (2022) observed:

$$H_{0,obs} = 73.04 (\pm 1.01) \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}} \quad \{18\}$$

With it and with Eqs. {13} to {16}, the age of the universe is as follows:

$$t_{0,z=0.055} = 12.66 (\pm 0.22) \cdot 10^9 \text{ years} \quad \{19\}$$

1.4. On the formation of volume in nature

By definition of the cosmological constant, see Einstein (1907), the corresponding observed energy density $u_{\Lambda,obs} = c^2 \cdot \rho_{\Lambda,obs}$ is that energy density, that does not change as a function of the scale radius or of the cosmological redshift, see Eq. {5}. For instance, if a measurement A device can measure an energy density u_A , that does not change as a function of the cosmological redshift z , then u_A is equal to $u_{\Lambda,obs}$ or u_A is a part of $u_{\Lambda,obs}$. The energy density of volume in nature, $u_{vol} = c^2 \cdot \rho_{vol}$, does not change as a function of the scale radius. Accordingly, u_{vol} is a part of $u_{\Lambda,obs}$. In the following, u_{vol} is analysed:

When the space expands, then a global formation of volume, GFV, occurs. This is caused by a local formation of volume, LFV. We will analyse how LFV causes GFV, and we will derive the energy density u_{vol} from that process. For it, we will use the dynamics of volume in nature, the volume dynamics, VD, see Carmesin (2024a) or Carmesin (2023a, 2021a). As a first test of that VD, the VD provides the curvature of space in the vicinity of a mass, see Fig. (3).

1.5. Epistemology

Kircher, Girwidz und Häußler (2001, section 4.1.2) describe the hypothetic deductive method. In the epistemological literature, this method is also called hypothetico-deductive testing (Niiniluoto, Sintonen, Wolenski 2004, S. 214). The method consists of three steps: In the hypothetic step, a thesis or hypothesis is suggested for testing. In the deductive step, implications are derived. In the third step, the implications are compared with observation. Hereby, in principle, a falsification should be possible. This method is used here as well as in Carmesin (2024a-g, 2017, 2018a-b, 2019a-b, 2020a-c, 2021a-d, 2022a-c, 2023a-f).

2. Didactic analysis

2.1. On LFV

2.1.1. Physical analysis

The VD have been derived directly from evident properties of volume, this is presented in a parallel paper in this report about the DPG conference in March 2024 in Greifswald, see Carmesin (2024a), or

Carmesin (2023a, 2021a). For the present purpose, the locally formed volume, LFV, is essential, see Carmesin (2023a), Carmesin (2024a, g): For it, the normalized rate $\underline{\dot{\epsilon}}_L$ of LFV is defined: If the increment of additional volume $\underline{\delta V}$ forms during an increment of time $\underline{\delta \tau}$ in an increment dV_L of volume, then that volume forms at the following normalized rate $\underline{\dot{\epsilon}}_L$:

$$\underline{\dot{\epsilon}}_L = \frac{\underline{\delta V}}{\underline{\delta \tau} \cdot dV_L}, \text{ see Fig. (3)} \quad \{20\}$$

The law of LFV is: At a gravitational field $|\vec{G}^*|$, there occurs, LFV, at the following normalized rate:

$$\underline{\dot{\epsilon}}_L = \frac{|\vec{G}^*|}{c} \text{ or } \underline{\dot{\epsilon}}_{L,ii} = \frac{|\vec{G}^*|}{c} \quad \{21\}$$

At a d_{GP} based distance R , a mass M causes the field:

$$\vec{G}^*(R) = -\frac{GM}{R^2} \cdot \vec{e}_L \text{ with direction vector } \vec{e}_L \quad \{22\}$$

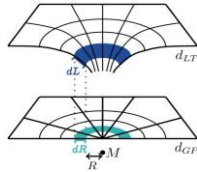


Fig. 3: In the vicinity of a mass M or effective mass M_{eff} , the radial increment dL of the light travel distance d_{LT} is increased with respect to the original increment dR that would occur in the limit M to zero. This increment dR is called gravitational parallax distance d_{GP} , see Carmesin (2023a). Hereby, $dV_L = 4\pi R^2 dL$ and $dV_R = 4\pi R^2 dR$.

2.1.2. Didactic analysis

In a didactic step, the relations {20} to {22} are introduced and exercises are performed. A derivation in Carmesin (2023a or 2024a) is used. Thus, this step has no special learning barrier.

2.2. Introduction of the process of GFV by LFV

2.2.1. Physical analysis

(1) That process is analysed in an especially ideal case, in a universe that consists of volume only.

(2) At a location R_0 , a region with the size of a probe volume dV_0 is marked, see Fig. (4). R_0 and dV_0 can be chosen freely. R_0 and dV_0 are constant or fixed during the whole process.

(3) During the time t_0 since the Big Bang until now, the present volume of the universe has been forming. In particular, in that region, the amount dV_0 of volume forms during t_0 .

(4) The formation of the volume in dV_0 is caused by dynamic masses dM_j in the universe.

(5) Thus, we will add all increments of LFV that are caused in dV_0 by the dynamic masses dM_j in the universe. Remind that these consists of volume only.

2.2.2. Didactic analysis

In a first didactic step, the elements (1) to (4) of the process are introduced with help of Fig. (4). This step has no special learning barrier, as the four elements

describe a clear process of formation and propagation of volume according to Eqs. {20} to {22}.

In didactic step two, the plan (5) is developed. This step has no special learning barrier for students familiar with analysis.

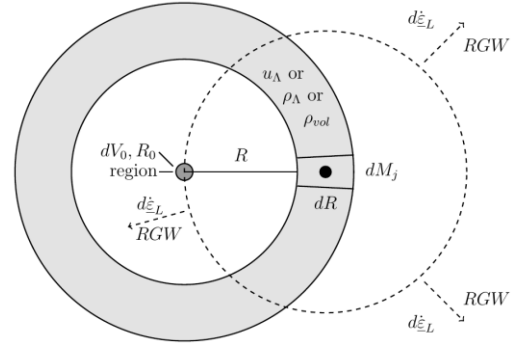


Fig. 4: A dynamic mass dM_j at a distance R from the analysed region (dark grey) with the size dV_0 causes LFV. It propagates in all directions in terms of RGWs, see Carmesin (2023a, 2024a). At a distance R , the mass dM_j causes LFV at a rate $d\underline{\dot{\epsilon}}_L$.

2.3. Homogeneous and heterogeneous density

2.3.1. Physical analysis

The density of radiation ρ_r is essential only in the early universe. In the early universe, heterogeneity is negligible, see e. g. Kravtsov and Borgani (2012) or Carmesin (2021a). Thus, it suffices to analyse the homogeneous density of radiation only.

\vec{r}	ρ_m	$L_{\text{box}} = 8 \frac{\text{Mpc}}{h}$ with $h = \frac{H}{100 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}}}$
	$\rho_{m,\text{het}}$	
	δ	$\rho_m(t, \vec{r}) = \rho_{m,\text{hom}}(t) + \rho_{m,\text{het}}(t, \vec{r})$ $\rho_{m,\text{het}}(t, \vec{r}) = \rho_{m,\text{hom}}(t) \cdot \underbrace{\delta(t, \vec{r})}_{\text{overdensity}}$
	σ_8	$\sigma(t) = \sqrt{\langle \delta^2(t, \vec{r}) \rangle_{\vec{r}}}$ and $\sigma(t_0) = \sigma_8$

Fig. 5: A dynamic mass dM_j at a distance R from the analysed region (dark grey) with the size dV_0 causes LFV. It propagates in all directions in terms of RGWs, see Carmesin (2023a, 2024a). At a distance R , the mass dM_j causes LFV at a rate $d\underline{\dot{\epsilon}}_L$.

Heterogeneity is analysed as indicated in Fig. (5):

$$\rho_{m,\text{hom}}(t) := \langle \rho_m(t, \vec{r}) \rangle_{\vec{r}} \quad \{23\}$$

$$\rho_{m,\text{het}}(t, \vec{r}) := \rho_m(t, \vec{r}) - \rho_{m,\text{hom}}(t) \quad \{24\}$$

The ratio of the density of heterogeneity and the homogenous density is called overdensity:

$$\delta(t, \vec{r}) := \frac{\rho_{m,\text{het}}(t, \vec{r})}{\rho_{m,\text{hom}}(t)} = \text{overdensity} \quad \{25\}$$

$$\sigma(t) := \sqrt{\langle \delta^2 \rangle_{\vec{r}}(t)} \quad \{26\}$$

$$\sigma_8 := \sigma(t_0), \text{ cosmological parameter} \quad \{27\}$$

2.3.2. Didactic analysis

The concept of the observation of heterogeneity is very clear and intuitive, see Fig. (5). So it is presented in one step. Thereby, there occurs one special learning barrier: The length of the box is scaled by

the Hubble parameter. This makes sense according to the following analysis at the level of monotonicity: At large values of H , the values of the density ρ are large. Correspondingly, the values of the scale radius are small. Accordingly, the chosen length of the box is small. There is no special learning barrier, as the procedure of the measurement is an arbitrary definition. Thus, nothing has to be derived.

2.4. Sources of fields and squared fields

2.4.1. Physical analysis

Fields \vec{G}^* can form LFV. For it, we analyse fields and squared fields in various states:

Firstly, we analyse eigenstates $|n_\mu\rangle$ of the number operator and general states, see Carmesin (2024b,g): The matrix element of the generalized field in a general state $|z_\mu\rangle$ is determined as follows:

$$\langle z_\mu | \vec{G}^* | z_\mu \rangle = \sqrt{\frac{\hbar G c^2}{2\omega_\mu}} \int d\mu \vec{k}_\mu \frac{f_\mu}{i} \langle z_\mu | a_\mu^+ + a_\mu | z_\mu \rangle \quad \{28\}$$

Proposition 1: Field of an eigenstate $|n_\mu\rangle$:

In an eigenstate $|n_\mu\rangle$, that matrix element is zero, $\langle n_\mu | \vec{G}^* | n_\mu \rangle = 0$. The proof is in Carmesin (2024g). Secondly, we analyse coherent states:

$$|z_\mu\rangle = \exp\left(-\frac{|z_\mu|^2}{2}\right) \cdot \sum_{n_\mu=0}^{\infty} \frac{z_\mu^{n_\mu}}{\sqrt{n_\mu!}} |n_\mu\rangle \quad \{29\}$$

Proposition 2: Field of a coherent state $|z_\mu\rangle$:

In a coherent state in Eq. {29}, the expectation value of the field is the following nonzero function:

$$\langle z_\mu | \vec{G}^* | z_\mu \rangle = \sqrt{\frac{\hbar G c^2}{2\omega_\mu}} \int d\mu \vec{k}_\mu \frac{f_\mu}{i} \text{Re}(z_\mu) \langle z_\mu | z_\mu \rangle \quad \{30\}$$

The proof is in Carmesin (2024g).

The field of a coherent state has very small fluctuations. So it can be interpreted as a classical field, see e. g. Ballentine (1998, section 19.4).

Thirdly, we analyse the volume formed by a homogeneous density $\rho_{m,hom}(t)$ of matter, see Eq. {23}. Such a density consists of many small masses m_j .

Each such mass causes a field and a rate $\dot{\epsilon}_{L,jj} = \frac{|\vec{G}^*|}{c}$ in its very near vicinity, see Eqs. {21} and {22}. As the masses are part of a homogeneous density $\rho_{m,hom}(t)$, these fields cancel to zero, and the rates $\dot{\epsilon}_{L,ii}$ average, whereby they transform to an isotropic rate $\dot{\epsilon}_{L,iso}$, see Carmesin (2023a):

Theorem 1: Law of the rate of formation of isotropic volume by a homogeneous density:

In a homogeneous system consisting of objects that cause fields with relatively small fluctuations, such as fields of coherent states, the VPs form as follows:

- (1) At a microscopic portion of energy or mass, there is a rate $\dot{\epsilon}_{jj}$ of unidirectional formation of volume.
- (2) Correspondingly, the object causes a field in its near vicinity.
- (3) The fields, caused at many such objects, average to zero. Consequently, the object of the homogeneous

system causes no long range field. Thereby, the object forms unidirectional rates $\dot{\epsilon}_{jj}$ in its near vicinity. The unidirectional rates $\dot{\epsilon}_{jj}$ of many objects in the homogeneous system transform to an isotropic rate $\dot{\epsilon}_{iso}$. Thus, such masses of the homogeneous system do not contribute to the rate at the probe volume. Consequently, the energy density u_{vol} in a homogeneous universe is the same as the energy density of volume u_{vol} in an empty universe, see Carmesin (2023a, 2024c). The proof is in Carmesin (2024g).

2.4.2. Didactic analysis

In a first didactic step, the field of a state is analysed. For it, the algebra of number operators is applied to the field or generalized field of the VD. Moreover, the field is exact also in curved space. Furthermore, for the case of quantum states including nearly classical coherent states, the field can be evaluated with help of simple algebraic relations. Thus, the field is reliable and exact even for the case of quantum states. Altogether, the field provides the intuition of the gravitational field and the reliability of exact evaluations. Accordingly, there is no special learning barrier in this step, for learners familiar with the algebra of ladder operators in the VD.

In step two, the field of a coherent state is used, Carmesin (2024g), so there is no special learning barrier.

In a third didactic step, the energy density of volume is derived. For it, the cancellation of field vectors is discussed. That process is intuitive, without special learning barrier. The transformation from $\dot{\epsilon}_{jj}$ to an isotropic rate $\dot{\epsilon}_{iso}$ occurs as a result of the averaging of fields and rates $\dot{\epsilon}_{jj}$, see Carmesin (2023a).

2.5. Volume caused by volume

The volume caused by LFV has several sources. One of the sources is volume. For it, a possible averaging of generalized gravitational fields is analysed next:

2.5.1. Physical analysis

A VP with a circular frequency ω and with a minimal energy E_{min} represents a quantum, and it has the following generalized kinetic energy, see Carmesin (2024b, Eq. {39}): $E_{min}(\omega) = \frac{\hbar\omega}{2}$ {31}

Consequently, the VP is in the number state zero, see Carmesin (2024b, Eq. {72}): $|n_\mu\rangle = 0$ {32}

Proposition 3: Law of the nonzero squared field:

The squared field has a nonzero expectation value:

$$\langle n_\mu | \vec{G}_{gen}^2 | n_\mu \rangle = G \int d\mu \hbar\omega_\mu \left(n_\mu + \frac{1}{2}\right) \delta_{\mu\mu'} \quad \{33\}$$

The proof is in Carmesin (2024g). Next, u_{vol} is derived for the ideal case of an empty universe:

Theorem 2: Law of the derived energy density of volume in an empty universe.

In a universe consisting of volume only, the process of GFV from LFV causes the following energy density of pure volume:

$$u_{\Lambda,theo} = \frac{c^2 H_0^2}{4\pi G} = u_{vol,pure}, \quad \text{thus,} \quad \{34\}$$

$$\rho_{vol,pure} = \frac{H_0^2}{4\pi G} = 5.600 (\pm 0.155) \cdot 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \&$$

$$\Omega_{vol} = \frac{2}{3} \quad \{35\}$$

We name it the energy density of pure volume:

$$u_{vol,pure} = u_{vol} \quad \& \quad \rho_{vol,pure} = \rho_{vol}$$

The same result holds for the homogeneous universe.

This result is in precise accordance with observation.

The proof is in Carmesin (2024g).

2.5.2. Didactic analysis

In a first didactic step, the squared field is analysed with help of the algebra of ladder operators. Such an analysis has already been analysed in section (2.4). This step has no special learning. In the second step, the energy density of volume is derived with help of the process of GFV by LFV. That derivation has already been analysed in Carmesin (2024c).

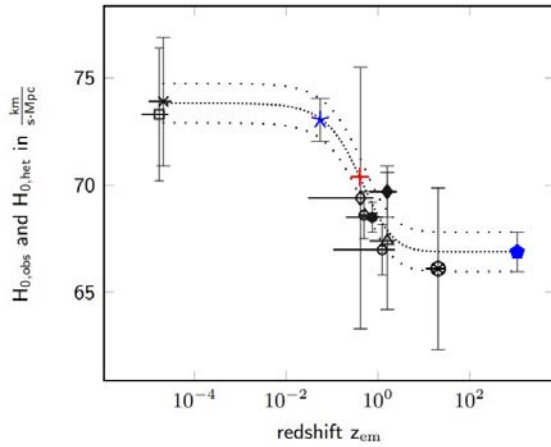


Fig. 6: The Hubble constant as a function of the cosmological redshift. Data points show various measurements. The densely dotted line represents the present theory. Data and theory are in precise accordance. Full circle: Square: Blakeslee (2021). \times : Pesce et al. (2020) and Addison et al. (2018). Star \star : Riess et al. (2022). Diamond: Escamilla-Rivera and Najera (2022). Circle: Philcox et al. (2020). Abbott et al. (2020). Full diamond: Cao et al. (2021). Δ : Birrer et al. (2020). \otimes : Cimatti and Moresco (2023). Pentagon: Planck collaboration (2020).

2.6. Volume caused by a heterogeneous density

2.6.1. Physical analysis

Theorem 3: Law of the derived Hubble constant as a function of the cosmological redshift.

(1) In a heterogeneous universe, the process of GFV from LFV causes the following Hubble constant as a function of the cosmological redshift:

$$H_{0,het} = H_{0,\Lambda CDM} \sqrt{\Omega_{\bar{m}} + \Omega_{vol} \cdot (1 + \kappa)^\xi} \quad \{47\}$$

Hereby, $H_{0,\Lambda CDM} = \sqrt{\frac{8\pi G}{3} \cdot \rho_{cr}}$ is the Hubble constant of the Λ CDM model of cosmology. The density parameter $\Omega_{\bar{m}} = \Omega_m + \Omega_r$ is used. Ω_{vol} is the density parameter of the volume. It is essentially equal to the density parameter of the cosmological constant, Ω_Λ .

Ω_Λ includes the density of volume and of the volume caused by the heterogeneity. That heterogeneity is the source of the time dependence of the Hubble constant.

(2) Parameters: κ describes the additional rate caused by heterogeneity. The exponent ξ describes the effect of that additional rate upon the Hubble constant. These parameters are determined as follows:

$$\kappa(\tilde{t}_{em}) = \frac{\Omega_{\bar{m}} \cdot \sigma_8 \cdot \tilde{t}_{em}^2}{2\Omega_{vol}} \quad \text{and} \quad \xi = \frac{\ln(w_+)}{\ln(y)} \quad \& \quad y = 1 + \kappa$$

$$\text{with } w_+ = \frac{\Omega_{vol} \cdot y^2}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4\Omega_{\bar{m}}}{\Omega_{vol}^2 y^2}} \right) \quad \{48\}$$

(3) Time evolution of the Hubble constant: The time evolution of the Hubble constant is shown in Fig. (6). The derived theoretical results are in precise accordance with observation. Moreover, the theory predicts the full function $H_{0,theo}(z)$. The proof is presented in Carmesin (2024g).

2.6.2. Didactic analysis

In a first didactic step, the concept of the overdensity is applied to a dynamic mass dM_j . This step has no special learning barrier. This step is valuable, as it provides insight into the observation of the time evolution of structure in the universe.

In a second didactic step, the law of LFV is applied to the overdensity of a dynamic mass dM_j . Thereby, squares and standard deviations are derived. This step has no special learning barrier. This step is insightful, as it shows how the VD and the LFV are applied to fluctuations. Moreover, this step is very insightful, as it shows that even fluctuations with a vanishing average cause additional LFV. This is the ultimate source of the Hubble tension.

In a third didactic step, the linear growth theory is applied to the standard deviation derived in part (2). Though the derivation of linear growth theory is quite complex, see Carmesin (2021a), the application of that theory is extremely simple. Hence, this step has no special learning barrier. This step is very valuable, as it shows how a simple law of structure formation is achieved for the case of standard deviations.

In a didactic step (4), the derived rate caused by heterogeneity is related to the rate caused without heterogeneity. Thereby, an approximation in leading order is applied. This step has a small mental learning barrier, as students might think about the reliability of the approximation. As a result, a simple factor κ is derived. Thus, this step has a very clear structure. Thence, this step has no special learning barrier. This step is very valuable and insightful, as it shows how rates can be separated and related to each other.

In a didactic step (5), the effects of the additional rate caused by heterogeneity upon the Hubble constant is derived. The effect is highly nonlinear. Moreover, the effect is mediated by the density ρ_Λ . Thus, this step has a high metacognitive learning barrier. In fact, it is

impossible that the students plan a useful and effective treatment on their own. On the other hand, the derivation is exact. Thus, the students achieve a large amount of success in the treatment of this nonlinear and mediated effect. The metacognitive barrier is overcome by clear instructions of all applied steps, see Carmesin (2024g). Moreover, an explicit method of measurement is introduced, so that a clear relation to reality is provided. With it, there is no remaining special learning barrier. This step is very insightful, as it shows that even though the rates and the growth could be analysed in a linear manner, this is not so in the case of the Hubble constant. This is insightful, as the source of that nonlinearity is the fact that the Hubble constant corresponds to the age of the universe, which integrates all growth effects from the Big Bang to the present-day time t_0 .

In a didactic step (6), the exponent introduced in part (5) is derived. In principle, this can be achieved numerically. However, a general equation is more useful. The students are provided with the plan that a quadratic equation is achieved with help of appropriate substitutions. With it, the students can derive the exponent on their own. So they can achieve self-esteem in an especially efficient manner.

In didactic steps (7) and (8), the Hubble constant is evaluated for the case of the CMB and $z = 0.055$. These cases are especially valuable, as they show that the local value of the Hubble constant has been achieved at a confidence level above 5σ . These steps have no special learning barrier.

In didactic steps (9), the derived Hubble constant as a function of the redshift is related to observed values. This step has no special learning barrier. This step is very insightful, as it relates observation with the derived results. This step is the essential step in the hypothetico-deductive testing. Students are encouraged to discuss this testing in a founded and critical manner.

In a didactic step (10), properties of the density of volume are summarized. For it, the properties derived here as well as properties derived with help of the Planck scale are used, see Carmesin (2017, 2018a-b, 2019a-b, 2020a-b, 2021a-b, 2023a, 2024g). As all properties have already been derived, this step has no special learning barrier. This topic is very insightful. Moreover, some learners can connect new and prior knowledge, this has a high learning efficiency, see Hattie (2006).

3. Experience: learning process and learners

The experiences with learning groups have been documented in terms of photographs of the blackboard and with help of additional reports. These are summarized as follows.

Since 2021, see Carmesin (2021a), the topic has been presented in several general studies courses at the university. The learning process was enriched by a permanent discussion of the achieved results and by

exercises about the derived relations. In particular, the learning process took place as follows:

The law of locally formed volume has been treated in advance. In first unit in section (1), the Hubble tension is presented and the age of the universe is analysed with it. This step is very exciting to the students, as the time evolution of the universe is reanalysed with significant effects. The unit requires 90 minutes, including exercises and discussions.

In a separable second unit, the derivation of $\rho_{\Lambda, \text{theo}}$ has been achieved. For it, the process of GFV by LFV is treated. This includes the derivation of $\rho_{\Lambda, \text{theo}}$ and the law of the derived energy density of volume in an empty universe, as well as the exercises and discussion. This unit provides a large amount of self-esteem, as the students learn how to derive on their own the energy density u_{vol} , corresponding to 67 % of all energy. This unit requires 90 minutes.

In another separable and third unit, the cancellation of fields is analysed. This can be achieved in a semiclassical manner, see Carmesin (2021a, 2023a). That semiclassical treatment requires 30 minutes and is intuitive.

Here, this didactic step is achieved with help of ladder operators applied to the fields of the VD. This step requires 90 minutes. The learners achieve a lot of generalizable competence in this step. Correspondingly, many learners like this algebraic method.

The main unit is section (2.5), the derivation of the time evolution of the Hubble constant. This unit can be presented in 90 minutes in the form of a lecture. The students are very interested in that derivation, after they explored the age of the universe in unit (1), after they derived the dark energy in unit (2), and after they analysed the algebraic structure of fields and their averages in unit (3).

A quantum gravity group of a research club meets 90 minutes each week. Thereby topics such as quantum computers, cosmology, astrophysics or quantum gravity are treated. In that group, essentially the same learning process has been treated in several courses since 2021. Also in this case, all questions have been discussed directly, and exercises have been performed.

Altogether, in all learning groups, the learners asked questions. These have been discussed directly in a fully sufficient manner. Moreover, exercises have been used in order to achieve sufficient training, metacognitive activity and familiarity with the new concepts. In some of the exercises, the students were instructed so that they were able to achieve parts of the derivations on their own. This is an efficient test of the ability of the students, and it provides self-esteem to the students in a convincing manner.

4. Discussion

Space is an ubiquitous entity of everyday life. Moreover, time is basic for the chronological organisation

of events and knowledge. Accordingly, all essential cultures developed a useful and relatively precise calendar system, see Hoskin (1999).

In modern physics and cosmology, a surprising mystery occurred: the Hubble tension and the local value of the Hubble constant, see Riess et al. (2022). It showed that the traditional Λ CDM model of cosmology cannot explain the observed time evolution of the universe since the Big Bang in a sufficient manner. This exciting mystery is treated in this course in a conclusive, exact and precise manner.

For it, the dynamics of volume in nature are analysed systematically. In fact, that volume-dynamics, VD, explain the essential present-day physical theories: gravity, general relativity and QP. Indeed, this broad and exact basis is essential in order to solve the problem of the Hubble tension. In fact, equipped with the VD, the students can learn how to solve the Hubble tension problem on their own, and how to predict future observations of $H_0(z)$. Thereby, they learn many valuable, insightful and generalizable tools, methods, concepts and theories: beyond the theories that are not able to solve the Hubble tension!

In fact, the VD have been used successfully to solve other problems of fundamental physics. For it, see the other reports about my contributions to the DPG conference in spring 2024 in Greifswald.

Indeed, also the students can apply the VD in order to solve more fundamental problems of physics in the future.

Altogether, we show how the volume of the universe forms in a permanent process. Moreover, we show that the heterogeneity is an additional source for such formation of volume. Indeed, we show in a precise manner, that this heterogeneity is the source of the Hubble tension. Moreover, we derive an advanced value for the age of the universe. This is a gradual impact of the Hubble tension on the world view. Moreover, the Hubble tension indicates that volume in nature forms permanently and locally at masses, energies, volume portions and even at fluctuations – and that volume in nature flows at the velocity of light, whereas we and other masses move slowly.

The learning process is based on the hypothetic deductive method, see the section about the epistemology. Such a testing of a hypothesis and such a deduction from prior knowledge have a high learning efficiency, see Hattie (2006). Moreover, the learning process uses everyday life contexts, so that the learning is meaningful, see Muckenfuß (1995) and achieves an additional high learning efficiency, see Hattie (2006). In the particular case, applications to quantum cryptography and quantum computing are very motivating. For more interesting examples, see Carmesin (2020c).

The learning process of the process of GFV by LFV has been tested in several learning groups. The learning process includes four units with 90 minutes each.

This has been tested at university courses as well as in research club courses. In all these learning groups, the students were able to perform exercises and to use instructions in order to derive parts of the theory. Thus, the topic provides a large amount of self-esteem to the learners.

5. Literature

- T. M. C. Abbott, et al. (2020) Dark Energy Survey Year 1 Results: Cosmological Constraints from Galaxy Clustering and Weak Lensing, *Phys. Rev. D*, 102, pp 1-34.
- G. E. Addison, D. J. Watts, C. L. Bennett, M. Halperin, G. Hinshaw, J. L. Weiland (2018) Elucidating Λ CDM: Impact of Baryon Acoustic Oscillation Measurements on the Hubble Constant Discrepancy, *ApJ*, 853(2), pp 1-12.
- Ballentine, L. E. (1998). *Quantum Mechanics*. London and Singapore: World Scientific Publishing.
- J. P. Blakeslee et al. (2021) The Hubble Constant from Infrared Surface Brightness Fluctuation Distances. *The Astroph. Journal*, 911(65), pp 1-12.
- S. Birrer, et al. (2020) TDCOSMO: IV. Hierarchical time-delay cosmography - joint inference of the Hubble constant and galaxy density profiles. *Astronomy and Astrophysics*, 643, pp 1-40.
- Burisch, C. et al. (2022). *Universum Physik Gesamtband SII*. Berlin: Cornelsen Verlag.
- Carmesin, Hans-Otto (2017a). *Vom Big Bang bis heute mit Gravitation: Model for the Dynamics of Space*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2017b). *Schülerinnen und Schüler entdecken Gravitationswellen mithilfe von Computereperimenten*. *PhyDid B*, pp 11-18.
- Carmesin, Hans-Otto (2018a). *Entstehung dunkler Energie durch Quantengravitation - Universal Model for the Dynamics of Space, Dark Matter and Dark Energy*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2018b). *Entstehung der Raumzeit durch Quantengravitation - Theory for the Emergence of Space, Dark Matter, Dark Energy and Space-Time*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2019a). *Die Grundschwingungen des Universums - The Cosmic Unification - With 8 Fundamental Solutions based on G, c and h*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2019b). *A Novel Equivalence Principle for Quantum Gravity*. *PhyDid B*, pp 1-9.
- Carmesin, Hans-Otto (2020a). *The Universe Developing from Zero-Point Energy: Discovered by Making Photos, Experiments and Calculations*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2020b). *Explanation of the Rapid Enlargement of Distances in the Early Universe*. *PhyDid B*, pp 9-17.
- Carmesin, Hans-Otto et al. (2020): *Universum Physik, Qualifikationsphase, Niedersachsen*. Berlin: Cornelsen Verlag.
- Carmesin, Hans-Otto (2021a). *Quanta of Spacetime Explain Observations, Dark Energy, Graviton and Nonlocality*. Berlin: Verlag Dr. Köster.

- Carmesin, Hans-Otto (2021b). *Cosmological and Elementary Particles Explained by Quantum Gravity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2021c). *The Elementary Charge Explained by Quantum Gravity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2021d). Lernende erkunden die Raumzeit. *Der Mathematikunterricht*. 67(2), 47-56.
- Carmesin, Hans-Otto (2022a). *Quantum Physics Explained by Gravity and Relativity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2022b). Explanation of Quantum Physics by Gravity and Relativity. *PhyDid B*, pp 425-438.
- Carmesin, Hans-Otto (2022c). How Excitations of Vacuum Form Matter. *PhyDid B*, pp 447-458.
- Carmesin, Hans-Otto (2022d). *The Electroweak Interaction Explained by and Derived from Gravity and Relativity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2023a). *Geometric and Exact Unification of Spacetime, Gravity and Quanta*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2023b). {Students Exactly Derive Quantization and its Universality. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2023c). { Students Derive an Exact Solution of the Flatness Problem. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2023d) Fundamental Solution to the Cosmological Constant Problem. *Results in Physic*. Preprint.
- Carmesin, Hans-Otto (2023e) Derivation of Dark Energy and of the Source of the Hubble Tension. *MNRAS*. Preprint.
- Carmesin, Hans-Otto (2024a). Students Learn the Fundamental Exact Unification of Gravity, Relativity, Quanta and Elementary Charge. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024b). Students Learn to Derive Universal Properties of Gravitons. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024c). Students Learn to Derive the Energy Density of Volume. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024d). Students Analyse the Impact of the H_0 Tension on the Worldview. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024e). Students Learn to Derive Nonlocality from Fundamental Physics. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024f). Students Learn to Solve the Cosmological Constant Problem. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024g). *How Volume Portions Form and Found Light, Gravity and Quanta*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Cimatti, Andrea and Moresco, Michele (2023). Revisiting oldest stars as cosmological probes: new constraints on the Hubble constant. *Astrophys. Journal*. 953:149, pp 1-9.
- Einstein, Albert (1917). *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften, pp 142-152.
- C. Escamilla-Rivera and A. Najera (2022). Dynamical Dark Energy Models in the Light of Gravitational-Wave Transient Catalogues. *JCAP*, 2022(3), pp 60-85.
- Friedmann, Albert (1915). *Die Feldgleichungen der Gravitation*. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akad. der Wissenschaften, pp 844-847.
- Hattie, John (2009). *Visible Learning*. London: Taylor and Francis Ltd.
- Hobson, M. P. and Efstathiou, G. P. and Lasenby, A. N. (2006) *General Relativity*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hoskin, Michael (1999) *The Cambridge Concise History of Astronomy*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kircher, Ernst and Girwidz, Raimund and Häußler, Peter (2001) *Physikdidaktik*. 2. Ed. Berlin: Springer.
- Kravtsov, Andrey V. and Borgani, Stefano (2012). Formation of Galaxy Clusters. *Annual Rev. of Astr. and Astrophys.*, 50, pp 353-409.
- Lemaitre, Albert (1915). *Die Feldgleichungen der Gravitation*. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akad. der Wissenschaften, pp 844-847.
- Muckenfuß, Heinz (1995). *Lernen im sinnstiftenden Kontext*. Berlin: Cornelsen
- Niiniluoto, Ilkka and Sintonen, Matti and Wolenski, Jan (2004) *Handbook of Epistemology*. Dordrecht: Springer.
- Perlmutter, Saul et al. (1998) Discovery of a Supernova Explosion at Half the Age of the Universe. *Nature*, 391, pp 51-54.
- D. W. Pesce et al. (2020) The megamaser cosmology project: XIII. Combined Hubble constant constraints, *Astrophysical Journal Letters*, 891, pp L1.
- O. Philcox, M. Ivanov, M. Simonovic and M. Zaldarriaga (2020) Combining Full-Shape and BAO Analyses of Galaxy Power Spectra: A 1.6 % CMB-Independent Constraint on H_0 . *JCAP*, pp 1-42.
- Planck-Collaboration (2020) Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, pp 1-73.
- Riess, Adam G. et al. (2022) A Comprehensive Measurement of the Local Value of the Hubble Constant with 1 $\frac{km}{s-Mpc}$ uncertainty from the Hubble Space Telescope and the SHOES Team. *The Astrophys. J. Lett.*, 934:L7, pp 1-52.
- Workman, R. L. et al. (2022) Review of Particle Physics (by Particle Data Group). *Prog. Theor. Exp. Phys.*, pp 1-2270.

Acknowledgement

I am very grateful to I. Carmesin for many interesting discussions and for proofreading the manuscript. I am also grateful to Matthias Carmesin for interesting discussions.

Students Learn to Derive Universal Properties of Gravitons

Hans-Otto Carmesin*

*¹Gymnasium Athenaeum, Harsefelder Straße 40, 21680 Stade

²Studienseminar Stade, Bahnhofstr. 5, 21682 Stade

³Universität Bremen, Fachbereich 1, Postfach 330440, 28334 Bremen

hans-otto.carmesin@t-online.de

Abstract

The gravitational force is a fact of everyday life. But how does it propagate from a field generating mass M to a probe mass m ? For instance, on its way from Earth to Moon, Apollo 11 had to overcome the gravitational force that Earth exerts upon Apollo 11. How does this force come from Earth to Apollo 11? Newton (1668) realized that that gravitational force is fundamental, without explaining its mechanism. Einstein (1915) proposed that a field generating mass M curves space in its vicinity, so that a probe mass m moves according to that curved space. But how does the curvature propagate? For it Blokhintsev and Galperin (1934) proposed a graviton. Carmesin (2023a) derived the dynamics of volume in nature, the volume dynamics, VD. It bridges general relativity, GR, and quantum physics, QP. This additionally serves the ambitious aim to bridge gaps or differences, see Niedersächsisches Kultusministerium (2021). In this paper, we use the VD to derive insightful and useful universal properties of the proposed graviton. For that derivation, we provide a learning process, so that you can directly use the concept in your courses. The learning process has been tested in various learning groups, and experiences are reported.

1. Introduction

1.1. On the propagation of gravity

On its way from Earth to Moon, Apollo 11 had to overcome the gravitational force that Earth exerts upon Apollo 11, Fig. (1). This is an example, in which gravity propagated from Earth to Apollo 11. In the standard model of elementary particles, that propagation of gravity should be instantiated by an elementary particle, the graviton, see Workman et al. (2022).

Carmesin (2023a, 2024a) derived the VD by using evident and reliable properties of volume in nature. This is insight- & useful. Here, the epistemology is based on the established hypothetic deductive method. It is described in the didactic literature, see e. g. Kircher, Girwidz und Häußler (2001, section 4.1.2) and in the epistemological literature, see e. g. Niiniluoto, Sintonen, Wolenski (2004, S. 214). This method is used here as well as in Carmesin (2024a-g, 2017, 2018a-b, 2019a-b, 2020a-c, 2021a-d, 2022a-c, 2023a-f).

Derived universal properties include the wave property, the tensor property, the minimal dimension of space, the zero-point energy, the energy spectrum and the spin. These properties correspond to the graviton proposed by Blokhintsev and Galperin (1934).

Derived results have been used to solve problems of fundamental physics in gravity, GR, & QP.

1.2. On the dynamics of volume in nature

In this section, we summarize results of the VD, see e. g. Carmesin (2021a, 2023a, e, 2024a-g).

1.2.1. Existence of volume-portions

The evident fact that volume has no rest mass, $m_{vol,0} = 0$, implies that the volume in nature propagates at c . Moreover, volume consists of many volume-portions, VPs. A proof is presented in a parallel paper in this report about the DPG conference 2024 in Greifswald, see Carmesin (2024a).

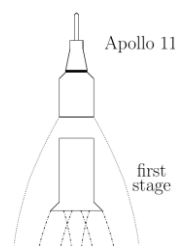


Fig. 1: Apollo 11 on its way to the Moon: The separation of the first stage is observed with a telescope. In this perspective, the length appears reduced.

1.2.2. Measurable additional volume

In the vicinity of a mass M or an effective mass M_{eff} , the light-travel distance d_{LT} can be measured, for instance with light signals, see Fig. (2). Moreover, at the same place, the gravitational parallax distance d_{GP} can be measured. It describes lengths for the case of zero mass or effective mass. The d_{GP} can be measured with help of a pair of hand leads. Proof: Carmesin (2023a, 2024a). An increment of volume dV_L of a cuboid is the product of d_{LT} based lengths of the edges. Similarly, the product of the corresponding

d_{GP} based lengths is the volume dV_R of the cuboid that would occur at zero M or M_{eff} . The difference $\delta V = dV_L - dV_R$ is the additional volume caused by M or M_{eff} . The relative additional volume is $\varepsilon_L = \frac{\delta V}{dV_L}$, see Carmesin (2023a, 2024a).

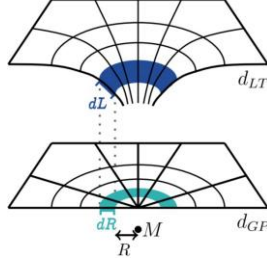


Fig. 2: In the vicinity of M or M_{eff} , the radial increment dL of d_{LT} is increased with respect to the original increment dR that would occur in the limit M to zero.

1.2.3. Propagation of volume

(1) Localizable portions of relative additional volume ε_L and of volume in general propagate, see Fig. (3). This is described by the law of propagation of localizable relative additional volume. E. g., the parts (2) and (3) in that law state the following:

(2) If the relative additional volume ε_L is analysed as a function of τ and \vec{L} , see Fig. (3), then it fulfils the following differential equation, DEQ:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \varepsilon_L = -c \cdot \vec{e}_v \cdot \frac{\partial}{\partial \vec{L}} \varepsilon_L \quad \{1\}$$

Hereby, \vec{e}_v is the radial direction vector, it is also marked by \vec{e}_L . That Eq. implies the Schrödinger equation, SEQ. Proof: Carmesin (2024a).

(3) In principle, there is no difference between a portion δV and a localizable VP. Thus, Eq. {1} holds for each localizable VP. A proof is in Carmesin (2024a).

1.2.4. Curvature caused by volume-portions

In the vicinity of M or M_{eff} , space is curved, Fig. (2). This is implied by Eq. {1}. Proof: Carmesin (2024a).

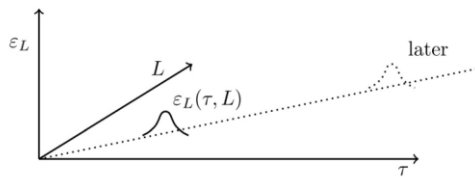


Fig. 3: A localizable portion of relative additional volume ε_L propagates in space. The relative additional volume is analysed as a function of τ and \vec{L} .

1.2.5. Gravitational potential and field

The dynamics in Eq. {1} can be written as follows:

$$c \frac{\partial}{\partial \tau} \varepsilon_L = \vec{e}_v \cdot \frac{\partial}{\partial \vec{L}} \cdot (-c^2 \cdot \varepsilon_L) = \vec{e}_v \cdot \frac{\partial}{\partial \vec{L}} \Phi_{gen} \quad \{2\}$$

The bracket in the above DEQ has the form of a generalized potential Φ_{gen} : $\Phi_{gen} := -c^2 \cdot \varepsilon_L$ {3}

The negative gradient of that generalized potential is the generalized field \vec{G}_{gen} :

$$\vec{G}_{gen} := -\frac{\partial}{\partial \vec{L}} (-c^2 \cdot \varepsilon_L) = -\frac{\partial}{\partial \vec{L}} \Phi_{gen} \quad \{4\}$$

These results are useful, as they provide the curvature in section (1.2.4) and as the field \vec{G}_{gen} in Eq. {4} describes gravity exactly. Proof: Carmesin (2024a).

2. Didactic analysis

2.1. Rate gravity waves

DEQ {1} has harmonic solutions:

2.1.1. Physical analysis

Harmonic waves are solutions of DEQ {2}:

$$\varepsilon_L = \hat{\varepsilon}_{L,\omega} \cdot \exp(-i\omega\tau + i\vec{k} \cdot \vec{L}) \quad \{5\}$$

$$\Phi_{gen} = \hat{\Phi}_{gen,\omega} \cdot \exp(-i\omega\tau + i\vec{k} \cdot \vec{L}) \quad \{6\}$$

Inserting in Eq. {2} yields: $-i\omega c \hat{\varepsilon}_{L,\omega} \cdot \exp(-i\omega\tau + i\vec{k} \cdot \vec{L}) = i\vec{k} \cdot \vec{e}_L \hat{\Phi}_{gen,\omega} \cdot \exp(-i\omega\tau + i\vec{k} \cdot \vec{L})$

In the above Eq., the relations $\vec{k} \cdot \vec{e}_L = k$ and $c = \frac{\omega}{k}$ are used. Thus: $-c^2 \hat{\varepsilon}_{L,\omega} = \hat{\Phi}_{gen,\omega}$ {7}

As a consequence, the solution in Eq. {6} can be expressed as follows: $\Phi_{gen} = -c^2 \cdot \varepsilon_L$ {8}

This relation confirms the potential in Eq. {3}.

In order to provide a more physical interpretation, the derivatives in the DEQ {2} are evaluated as follows:

$$c \varepsilon_L = -\vec{e}_v \cdot \vec{G}_{gen} \quad \{9\}$$

In the above Eq., ε_L describes a ‘rate of the change’ of relative additional volume, and \vec{G}_{gen} describes gravity. Accordingly, the solution in Eqs. {5} and {6} is called rate gravity wave, RGW, Carmesin (2021a).

Based on polar representation of complex numbers,

$$\exp(i\alpha) = \cos(\alpha) + i \cdot \sin(\alpha), \quad \{10\}$$

the waves in Eqs. {5} and {6} can be expressed in terms of sine and cosine functions, if desired.

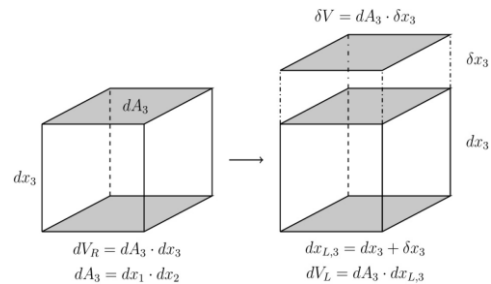


Fig. 4: VPs can be represented with cubes and cuboids.

2.1.2. Didactic analysis

In a first didactic step, a harmonic wave in Eqs. {5} and {6} is used as a solution of DEQ {2} of VD. It can be visualized with help of sine and cosine functions. This step has no special learning barrier.

In a 2nd didactic step, a harmonic wave in Eqs. {5} & {6} is verified. Moreover, it is interpreted as a rate gravity wave. The step has no special learning barrier.

Both steps are very insightful and valuable as the rate gravity waves indicate how the exact gravitational field \vec{G}_{gen} propagates in combination with the ‘rate of change’ ε_L of relative additional volume.

2.2. Tensor property of volume in nature

2.2.1. Physical analysis

Theorem: Law of measurable changes of VPs: In the vicinity of each M or M_{eff} , the following changes of VPs can be measured: (1) additional volume, (2) shear, (3) rotation, (4) translation and (5) linear combinations thereof:

(1) The diagonal tensor elements of change represent the change of a volumetric property, Fig. (4):

$$\varepsilon_{L,jj} = \frac{\delta x_j}{dx_{L,j}} = \frac{\sqrt{|g_{jj}|}^{-1}}{\sqrt{|g_{jj}|}} = 1 - \frac{1}{\sqrt{|g_{jj}|}} \quad \{11\}$$

$\varepsilon_{L,jj}$ is a unidirectional change in direction j .

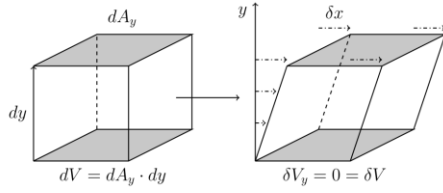


Fig. 5: The left VP is a cube, and it is changed by the operation of shear.

(2) The non-diagonal symmetric tensor elements of change represent shear:

$$\varepsilon_{L,ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta x_i}{dx_{L,j}} + \frac{\delta x_j}{dx_{L,i}} \right) \text{ for } i \neq j \quad \{12\}$$

These tensor elements constitute the non-diagonal symmetric tensor of change, see Fig. (5).

(3) The non-diagonal antisymmetric tensor elements of change represent rotation:

$$\varepsilon_{L,ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta x_i}{dx_{L,j}} - \frac{\delta x_j}{dx_{L,i}} \right) \text{ for } i \neq j \quad \{13\}$$

These tensor elements constitute the non-diagonal antisymmetric tensor of change.

(4) A translation of a VP at a position \vec{L} is represented as follows, see Fig. (3): $\delta \vec{L} = \frac{\partial \vec{L}}{\partial \tau} \cdot \delta \tau$ {14}

The corresponding coordinates of translation are as follows: $\delta L_j = \frac{\partial L_j}{\partial \tau} \cdot \delta \tau$ {15}

Changes of relative additional volume are described by its law of propagation.

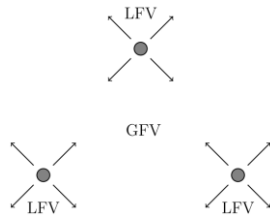


Fig. 6: Unidirectional local formation of volume, LFV, at masses or dynamic masses can summarize to isotropic global formation of volume, GFV.

(5) Linear combinations of the changes in (1) to (4) can be measured. In particular, the isotropic change can be measured, see Fig. (6):

$$\varepsilon_{L,iso} = \sum_j^D \varepsilon_{L,jj} \text{ with } \varepsilon_{L,ii} = \varepsilon_{L,jj} \quad \{16\}$$

Proof: Part (1): d_{GP} distances dx_j and d_{LT} distances $dx_{L,j}$ can be measured. Thus, changes of VPs in parts (1) to (5) can be measured. Q. e. d.

2.2.2. Didactic analysis

In step (1), unidirectional change is analysed. This step has no special learning barrier. It is insightful that additional volume is not necessarily isotropic.

In step (2), shear is analysed. This step has no special learning barrier. It is insightful that volume can change without forming any additional volume.

In step (3), rotation of a VP is analysed. This step has no special learning barrier. Note that VPs can rotate.

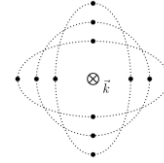


Fig. 7: A gravitational wave propagates in a direction \vec{k} .

In the plane orthogonal to \vec{k} , the wave exhibits positive and negative additional volume in a periodic manner.

In step (4), the translation is analysed. It has no special learning barrier. It is insightful to realize that the propagation corresponds to the isometry of translation. In principle, a reflection could also be possible.

In step (5), linear combinations are analysed. In particular, isotropic formation of additional volume is presented. It has been essential in the isotropic expansion of space since the Big Bang. It represents global formation of volume, GFV, and it can be derived from local formation of volume, LFV, see e. g. Carmesin (2023a). This step has no special learning barrier.

2.3. Dimension of volume in nature

In order to analyse possible dimensions of volume or space in nature, we study gravitational waves:

2.3.1. Physical analysis

(1) A gravitational wave propagates in a direction \vec{k} , and it exhibits changes in the direction orthogonal to \vec{k} . These can be described by the following tensor of relative additional volume in the plane orthogonal to \vec{k} , and there are two linear polarisations, see e. g. Abbot et al. (2016) or Carmesin (2017b) and Fig. (7):

$$\varepsilon_{ij} = \hat{\varepsilon} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad \& \quad \varepsilon_{ij} = \hat{\varepsilon} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \{17\}$$

As a consequence, gravitational waves require a space that has at least three dimensions. Moreover, gravitational waves are waves of periodic variation of additional volume in nature, see Eq. {17}.

(2) Binary stars can lose kinetic energy with help of gravitational waves in an efficient manner. Consequently, gravitational waves are important for mergers of binary stars or black holes. Such mergers are essential for the formation of structure in the universe.

(3) An additional information may be considered: The time evolution of space since the Big Bang has been analysed with help of additional volume that propagates in the form of gravitational waves. As a test, the energy density ρ_Λ of the cosmological constant Λ has been derived. It is in precise accordance with observation, see Carmesin (2018a-b, 2019a-b, 2021a-d). Thus, space needs to have at least three dimensions.

(4) In physics, subsystems of three-dimensional space are often analysed. For instance, graphene is often modelled as a two-dimensional system. The investigation of such subsystems does not change the fact that present – day space has at least three dimensions.

2.3.2. Didactic analysis

In a first step, the physics of gravitational waves are summarized. This step has no special learning barrier. In a second didactic step, binary stars are analysed. This step has no special learning barrier.

Step (3) provides information. It is no didactic step.

Step (4) provides a clarification of three-dimensional space and the analysis of a lower-dimensional subsystem. This step has no special learning barrier.

2.4. Gaussian wave packets

2.4.1. Physical analysis

(1) The following Gaussian wave packets are solutions of DEQ {1} for $\varepsilon_L(\tau, \vec{L})$. The time derivative of that DEQ provides the following DEQ for $\partial_\tau \varepsilon_L = \dot{\varepsilon}_L$:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \varepsilon_L = -c \cdot \vec{e}_v \cdot \frac{\partial}{\partial \vec{L}} \varepsilon_L \quad \{18\}$$

This is the generalized Schrödinger equation, whereby $\Psi = t_n \cdot \varepsilon_L$ is the wave function and t_n is a normalization factor, see e. g. Carmesin (2024a, 2023a, 2022a-b). Thus, the above DEQ holds for Ψ as well. As the above DEQ for Ψ is the same as DEQ {1} for ε_L , the analysis of the respective solutions is equivalent.

In a one-dimensional subspace with a coordinate x_j , a Gaussian wave packet with a characteristic wave vector $k_{0,j}$, can be described as follows, see Landau and Lifschitz (1965) or Greiner (1979, chapter 3):

$$\Psi_j = v_j \cdot \exp\left(i \cdot k_{0,j} \cdot x_j - \frac{x_j^2}{4\sigma_j^2}\right)$$

Hereby, $v_j = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{1}{4}} \sqrt{\sigma_j}}$ is the normalization factor.

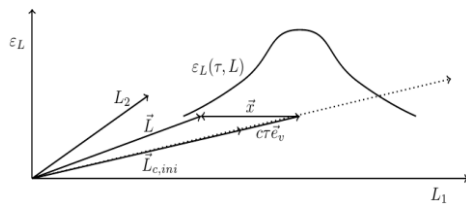


Fig. 8: VP with an initial position of the centre at $\vec{L}_{c,ini}$. The VP moves, during a time τ , the centre moves to $\vec{L}_{c,ini} + c\tau \vec{e}_v$. The VP has a form (similar to an orbital in an atom). A part is shifted by a vector \vec{x} from the centre, so the part is at a coordinate \vec{L} , in an external frame.

In an external frame, see Fig. (8), the object propagates at the velocity c . The corresponding wave function is achieved by substituting x_j by $L_j - L_{c,j}$. Hereby, $L_{c,j}$ is the coordinate of the local maximum of Ψ . This is similar to the local maximum of ε_L in Fig. (3). Moreover, the local maximum propagates from an initial value $L_{c,ini,j}$ to the following values:

$$L_{c,j} = L_{c,ini,j} + c \cdot \tau \quad \& \quad x_j = L_j - L_{c,ini,j} - c \cdot \tau$$

Consequently, the wave function is as follows:

$$\Psi_j = v_j \cdot \exp\left(ik_{0,j}(L_j - L_{c,j}) - \frac{(L_j - L_{c,j})^2}{4\sigma_j^2}\right)$$

We check that the wave function solves DEQ {18}:

$$i\hbar \partial_\tau \Psi_j = -i\hbar c \partial_{L_j} \Psi_j, \quad \text{with}$$

$$\partial_{L_j} \Psi_j = ik_{0,j} \Psi_j - \frac{L_j - L_{c,j}}{2\sigma_j^2} \Psi_j \quad \text{and}$$

$$\partial_\tau \Psi_j = -ik_{0,j} c \Psi_j + c \frac{L_j - L_{c,j}}{2\sigma_j^2} \Psi_j, \text{ thus}$$

$$\begin{aligned} \hbar c k_{0,j} \Psi_j + i\hbar c \frac{L_j - L_{c,j}}{2\sigma_j^2} \Psi_j \\ = \hbar c k_{0,j} \Psi_j + i\hbar c \frac{L_j - L_{c,j}}{2\sigma_j^2} \Psi_j \end{aligned}$$

This shows that the above Gaussian wave packet obeys the DEQ {18}. In contrast, in the non-relativistic SEQ, a Gaussian wave packet broadens in its time evolution. It is a consequence of $\omega \propto k^2$ in the non-relativistic SEQ, see Greiner (1979, chapter 3).

In fact, it is a very valuable property of the DEQ {18} and of the volume in nature, that Gaussian wave packets are stable. The reason for it is that $m_{0,vol} = 0$.

In 3D space, the wave function is, see Fig. (8):

$$\Psi = v \cdot \exp\left(i \vec{k}_0 \vec{x} - \frac{\vec{x}^2}{4\sigma_j^2}\right) \quad \& \quad \vec{x} = \vec{L} - \vec{L}_{c,ini} - c\tau \vec{e}_v$$

This Ψ solves DEQ {1}, see Carmesin (2024g), and Ψ does not broaden during the time evolution.

2.4.2. Didactic analysis

In step(1), a Gaussian wave packet of a VP is presented in a one-dimensional subsystem. For it, an external frame is introduced. Moreover, the wave function is verified as a solution of the DEQ {18}. This step has no special learning barrier. The step is very valuable, as the wave packets do not broaden as a function of time. This is an important insight, as it shows that wave functions that do not broaden are fundamental, they have $m_{0,vol} = 0$, and they solve the fundamental VD in DEQ {18}. In contrast, the broadening of wave functions is a particular phenomenon that occurs in wave packets of masses, since masses change the relation between ω and k , as a consequence of the energy mass relation $E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$.

In step (2), the Gaussian wave packet in a one-dimensional subsystem is transferred to three-dimensional space. This step has no special learning barrier. The

step is valuable, as Gaussian wave packets do not broaden in 3D space.

2.5. Minimal energy of volume-portions

2.5.1. Physical analysis

(1) The SEQ exhibits the Heisenberg uncertainty relation, Carmesin (2024g): $\Delta x_j \cdot \Delta p_j \geq \frac{\hbar}{2}$ {19}

Gaussian wave packets exhibit, Carmesin (2024g):

$$\Delta x_j \cdot \Delta p_j = \frac{\hbar}{2}, \text{ in Gaussian wave packets } \{20\}$$

In D dimensional space, see Olofsson and Andersson (2012, proposition 2.5.1): $\Delta|\vec{x}| = \Delta x_j \cdot \sqrt{D}$ {21}

$$\text{Similarly: } \Delta|\vec{p}| = \Delta p_j \cdot \sqrt{D} \quad \{22\}$$

$$\text{Thus: } \Delta|\vec{x}| \cdot \Delta|\vec{p}| = \frac{D \cdot \hbar}{2} \quad \{23\}$$

(2) As a consequence, the fluctuations of the vector occur at a ball with the radius $\Delta|\vec{x}|$. The fluctuation with the minimal energy E_{min} is the fluctuation with the largest wavelength: $\lambda_{max} = 2\pi \cdot \Delta|\vec{x}|$ {24}

$$\text{The circular frequency is: } \omega = \frac{2\pi c}{\lambda_{max}} \quad \{25\}$$

$$\text{Eqs. \{24-25\} yield: } \omega = \frac{c}{\Delta|\vec{x}|} \quad \{26\}$$

The minimal energy E_{min} is equal to $c \cdot \Delta|\vec{p}|$. Thus, Eqs. {23} & {26} yield: $E_{min} = \frac{D \cdot \hbar \cdot c}{2\Delta|\vec{x}|}$ {27}

$$E_{min} = D \cdot \frac{\hbar \cdot \omega}{2}, \text{ in } D - \text{dimensional space } \{28\}$$

(3) If a one-dimensional subsystem is analysed, then the minimal energy of a VP is equal to the above energy divided by D :

$$E_{min} = \frac{\hbar \cdot \omega}{2}, \text{ in a 1-dimensional subsystem } \{29\}$$

(4) The above energy of the fluctuations includes no potential or field. Consequently, it is a completely kinetic energy. This fact is also confirmed in parallel papers in this report about the DPG conference 2024 in Greifswald.

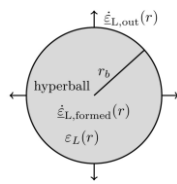


Fig. 9: A localizable and stationary portion of relative additional volume ε_L in its own system.

2.5.2. Didactic analysis

In step (1), the uncertainty relation is applied to a VP in its own frame and in an external frame in various dimensions. This step has no special learning barrier. The step is insightful, as it shows how fluctuations combine in several dimensions.

In a second didactic step, the VP with minimal energy is analysed. This step has no special learning barrier. The step is insightful and very valuable, as it provides the energy of the minimal uncertainty at the VP.

In a third didactic step, the result is transferred to a one-dimensional subsystem. This step has no special learning barrier. The step is useful, as the complexity

of a three-dimensional system can often be reduced with help of one-dimensional subsystems.

In step (4), fluctuation energy is identified with kinetic energy. For it, other forms of energy have been excluded. This step has no special learning barrier.

2.6. Wave packet with minimal energy

In this section, a derived, modified, corrected, generalized version of quantum field theory is presented. The proofs are in Carmesin (2024g).

2.6.1. Physical analysis

Theorem: Transformation of a wave packet:

(1) A Gaussian wave packet $\varepsilon_{L,p}(\tau, \vec{L})$, with a polarization p can be transformed with Fourier integrals, see e. g. Landau and Lifschitz (1965, § 5 and § 15):

$$b_\mu(\tau) = v_b \cdot \exp(-i\omega_\mu \tau) \quad \{30\}$$

$$\langle b_\mu | b_{\mu'} \rangle_t = \int_{-\infty}^{\infty} b_\mu(\tau) b_{\mu'}^{cc}(\tau) d\tau = \delta(\mu - \mu') \quad \{31\}$$

Hereby, cc marks the conjugate complex. In general, the index μ includes possible polarization directions or indices marking tensors. Moreover, $\langle b_\mu | b_{\mu'} \rangle$ is a scalar product in the Hilbert space of the solutions of the DEQ {1}, and $\delta(\mu - \mu')$ is the Dirac delta function (or delta distribution), see Kumar (2018). v_b, v_f are normalisation factors.

$$f_\mu(\vec{k}_\mu, \vec{L}) = v_f \cdot \exp(i \vec{k}_\mu \cdot \vec{L}) \quad \{32\}$$

$$\langle f_\mu | f_{\mu'} \rangle = \int \int_{-\infty}^{\infty} f_\mu f_{\mu'}^{cc} d^3L \propto \delta(\vec{k}_\mu - \vec{k}_{\mu'}) \quad \{33\}$$

$$\langle f_\mu | f_{\mu'} \rangle = 4\pi \int_0^\infty f_\mu(k_\mu, L) f_{\mu'}^{cc}(k_{\mu'}, L) L^2 dL \quad \{34\}$$

$$\langle f_\mu | f_{\mu'} \rangle = 4\pi \cdot \delta(k_\mu - k_{\mu'}) \quad \{35\}$$

(2) The transformed wave packet is described by $\varepsilon_L(\tau, \vec{L})$, a potential $\Phi_{gen}(\tau, \vec{L})$, and amplitudes $\hat{\varepsilon}_\mu$:

$$\varepsilon_L(\tau, \vec{L}) = \int d\mu \hat{\varepsilon}_\mu \cdot b_\mu(\tau) \cdot f_\mu(\vec{k}_\mu, \vec{L}), \quad \{36\}$$

$$\Phi_{gen}(\tau, \vec{L}) = \int d\mu \hat{\Phi}_{gen,\mu} \cdot b_\mu(\tau) \cdot f_\mu(\vec{k}_\mu, \vec{L}), \quad \{37\}$$

The transformed energy is:

$$E_\mu = \frac{c^2}{2G} \hat{\varepsilon}_\mu \hat{\varepsilon}_\mu^{cc} b_\mu b_\mu^{cc} (\omega_\mu^2 - c^2 k_\mu^2) \ \& \ E = \int d\mu E_\mu \quad \{38\}$$

Theorem: Eigenvalue generating operator:

$$(3) E_\mu \text{ is expressed with: } q_\mu = \frac{c}{\sqrt{G}} \cdot \hat{\varepsilon}_\mu b_\mu \quad \{39\}$$

$$p_\mu := \frac{\partial}{\partial \tau} q_\mu = i \cdot \omega_\mu q_\mu = \frac{ic^2 \hat{\varepsilon}_\mu b_\mu k_\mu}{\sqrt{G}} \quad \{40\}$$

$$E_\mu = \frac{1}{2} (q_\mu q_\mu^{cc} \omega_\mu^2 - p_\mu p_\mu^{cc}) \quad \{41\}$$

The derivative $\frac{\partial}{\partial \tau}$ is irreversible. The generalized kinetic energy is: $E_{gen,kin,\mu} = \frac{q_\mu q_\mu^{cc} \omega_\mu^2}{2}$ {42}

$$\text{The squared wave vector is: } k_\mu^2 = \sum_j^3 k_{\mu,j}^2 \quad \{43\}$$

(4) Eigenvalue generating operators are introduced:

$$\hat{k}_\mu = \frac{i}{c} \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} \text{ or } \hat{p}_\mu = i \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} q_\mu, \text{ thus } \quad \{44\}$$

$$\hat{E}_\mu = \frac{1}{2} (q_\mu q_\mu^{cc} \omega_\mu^2 - \hat{p}_\mu \hat{p}_\mu^{cc}) \quad \{45\}$$

The time averaged commutator is:

$$\left[[q_\mu, p_\mu^{cc}] \right]_t = i \omega_\mu \cdot q_\mu q_\mu^{cc} \cdot \delta(\mu' - \mu) \quad \{46\}$$

Theorem: Excitation generating operator:

$$(5) \text{Ladder operators: } q_\mu = \frac{\alpha}{\omega_\mu} \cdot (a_\mu^+ + a_\mu) \quad \{47\}$$

$$p_\mu = i \cdot \alpha \cdot (a_\mu^+ - a_\mu) \quad \{48\}$$

$$\alpha \text{ is chosen so that: } [a_\mu, a_\mu^+] = \delta(\mu' - \mu) \quad \{49\}$$

$$\text{Thus: } \alpha^2 = \frac{\omega_\mu^2 q_\mu q_\mu^{cc}}{2} \quad \{50\}$$

$$\hat{E}_{\mu,1D} = 2 \alpha^2 \cdot \left(a_\mu^+ a_\mu + \frac{1}{2} \right) \quad \{51\}$$

Theorem: number- and energy spectrum:

$$(6) \text{ Eigenvalues } n_\mu \text{ and eigenvectors } |n_\mu\rangle \text{ of the number operator in } \hat{E}_{\mu,1D}: N_\mu := a_\mu^+ a_\mu \quad \{52\}$$

$$N_\mu |n_\mu\rangle = n_\mu |n_\mu\rangle; a_\mu |n_\mu\rangle = \sqrt{n_\mu} |n_\mu - 1\rangle \quad \{53\}$$

$$a_\mu^+ |n_\mu\rangle = \sqrt{n_\mu + 1} |n_\mu + 1\rangle \quad \{54\}$$

$$\langle n'_\mu | a_\mu | n_\mu \rangle = \sqrt{n_\mu} \delta_{n'_\mu, n_\mu - 1} \text{ for } n_\mu > 0 \quad \{55\}$$

a_μ^+ : raising operator, a_μ : lowering operator with, $a_\mu |0\rangle = 0$; $a_\mu |1\rangle = |0\rangle$. The number spectrum is as follows: $n_\mu \in \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ \{56\}

Thus, the lowest energy is the zero-point energy, ZPE: $E_{\mu,1D} = \frac{1}{2} \cdot \hbar \omega_\mu = ZPE_\mu$ \{57\}

(7) Interpretation: Firstly, the ZPE_μ in Eq. {57} is equal to the kinetic energy.

Secondly, we derived that the complete energy of the analysed VP is zero, see Eq. {38} and $c = \frac{\omega_\mu}{k_\mu}$.

Thirdly, the question of the origin of the nonzero ZPE_μ arises. This origin is traceable: That ZPE_μ originates from the commutator. That nonzero commutator arises from the derivative. That derivative is not reversible. Thus, the theory based on that derivative can only predict differences and correlations, but not absolute values. These absolute values are predicted by the present theory of VD: The VD provides the complete ZPE, it is zero:

$$E_\mu = \frac{c^2}{2G} \hat{\varepsilon}_\mu \hat{\varepsilon}_\mu^{cc} b_\mu b_\mu^{cc} (\omega_\mu^2 - c^2 k_\mu^2) = 0 \quad \{58\}$$

Hereby, we used $c = \frac{\omega_\mu}{k_\mu}$. Moreover, the above Eq. shows that the potential energy compensates the generalized kinetic energy of the ZPE. In contrast, the ZPE in $E_{\mu,1D}$ provides the information about the generalized kinetic energy only, so it is incomplete.

The full energy spectrum is obtained from the ZPE state $|0\rangle$ by application of the ladder operator a_μ^+ .

The incomplete ZPE in 3D space consists of three one-dimensional projections of the ZPE:

$$E_{\mu,3D} = \frac{3}{2} \cdot \hbar \omega_\mu = ZPE_{\mu,3D} \quad \{59\}$$

2.6.2. Didactic analysis

In step (1), we summarize the Fourier transformation. It is explained with the analogues of optical and acoustic spectral analysis. Thus, it can be understood in principle, moreover, the algebra can be confirmed.

This step has a medium sized learning barrier, as two frames are considered in the Gaussian wave packet: In an external frame, the Gaussian wave packets propagate. In the own frame, there is a Gaussian function.

In step (2), the transformed energy is derived algebraically. So, there is no special learning barrier.

In step (3), abbreviations q_μ and p_μ are introduced. This step has no special learning barrier.

In step (4), eigenvalue generating operators are introduced and used. Algebraically, this step has no special learning barrier. Moreover, it is clear that the derivative cannot be inverted. This provides a medium-sized mental barrier. This barrier is overcome by a discussion of the consequences.

In step (5), ladder operators are introduced by a linear transformation. There is no special learning barrier.

In step (6), the number operators and their spectrum are derived. This step has no special learning barrier.

Moreover, the energy is interpreted. This step has a medium-sized mental learning barrier, as it must be realized, that the derived algebra provides differences only. Thus, the absolute value of the energy is derived with help of the VD. Altogether, the algebra of QFT is derived. In contrast, before, QFT has been regarded as a set of ideas and tools, see Peskin and Schroeder (1995). As a consequence, the present derived version has the correct and non-diverging energy, in contrast to diverging energy in present – day QFT. Thus, the present derived version of QFT is modified and corrected and generalized.

2.7. Spin

2.7.1. Physical analysis

(1) The spins and tensors can be characterized by their behaviour with respect to a rotation in three-dimensional space, see Landau and Lifschitz (1965, § 58).

(2) Rank two tensors describe the VPs. Moreover, rank two tensors have periodicity $\varphi_{per} = \pi$, see Carmesin (2024g).

(3) According to the VD, wave functions are described by the Schrödinger Eq., SEQ, or by the generalized Schrödinger Eq., GSEQ, see Carmesin (2024a.g). In a magnetic field \vec{B} , the energy of a

particle with spin \vec{S} is as follows, see Sakurai (1994, section 3.2, we use SI units):

$$H = -\frac{e}{m_e} \vec{B} \cdot \vec{S} = \omega S_z; \quad \omega = \frac{|e|B}{m_e}; \quad S_z = \frac{\hbar}{2} \quad \{60\}$$

Hereby, m_e is the mass of the electron, S_z is the eigenvalue of the spin in the z -direction, and ω is the circular frequency of the precession. As a consequence of the SEQ or GSEQ, the periodicity is, see e. g. Carmesin (2024g): $\varphi_{per} = \frac{2\pi\hbar}{S_z} \quad \{61\}$

$$\text{In particular, } \varphi_{per} = \pi \quad \text{for } S = 2\hbar \quad \{62\}$$

(4) As a consequence of items (1-3), VPs have spin 2.

This result is in accordance with the usually assumed value, see Workman et al. (2022).

2.7.2. Didactic analysis

In a first didactic step, the criterion of equal periodicity is introduced. This provides no special difficulty.

In step two, the periodicity of tensors is derived. This is achieved by algebraic transformations, so it provides no special learning barrier.

In step (3), the energy & periodicity of a spin in a field are analysed. This step requires to confirm the solution of the SEQ or GSEQ, see Carmesin (2024g). Thus, the step has no special learning barrier.

In step four, the criterion in item (1) is applied to the results in (2-3). There is no special learning barrier.

The result represents an important universal property.

3. Experience: learning process and learners

Experiences with learning groups have been documented via photographs of the blackboard and via additional reports. These are summarized as follows.

VPs and DEQ {1} have been derived before.

(I) In a main block, the solutions of DEQ {1}, the transformations of these solutions, the operators q_μ , p_μ , a_μ^\dagger , a_μ and N_μ have been derived as follows:

During the first 90 minutes, in a general studies course at the university, the harmonic solutions of DEQ {1} have been derived. For it, an Ansatz has been proposed, and the students verified that this Ansatz solves DEQ {1}. The learning process took place similarly in a research club. Moreover, these solutions have been derived in several general studies courses and research club courses since 2021. Hereby, the students achieve competence in solving DEQs.

During the second 90 minutes, in a university general studies course, the Gaussian wave packets have been derived as solutions of DEQ {1}. For it, an Ansatz has been proposed, and the students verified that the Ansatz solves DEQ {1}. The learning process took place similarly in a research club. Hereby, the students achieve competence in realizing and discussing the usefulness of wave packets in fundamental physics, see e. g. Fig. (8). Additionally, the students improve their competence in solving DEQs on their own.

During the next 45 minutes, in a general studies course, the standard deviations Δx_j , Δp_j , $\Delta|\vec{x}|$ and $\Delta|\vec{p}|$ have been derived. And the corresponding uncertainty relations $\Delta x_j \cdot \Delta p_j = \frac{\hbar}{2}$ and $\Delta|\vec{x}| \cdot \Delta|\vec{p}| = \frac{\hbar}{2}$ have been derived, for the case of Gaussian wave packets. Hereby, students achieve competence in analysing fluctuations mathematically and physically.

During the next 45 minutes, in the general studies course, the scalar products in Hilbert space and the energy E_μ have been derived. Hereby, the high activity of the students in the derivation of the solutions during the first 180 minutes of the learning process provided an effective basis for the understanding. Hereby, students achieve competence in analysing scalar products and functions in Hilbert space.

During the following 90 minutes, in the general studies course at the university, the summarizing variables q_μ and p_μ have been introduced. Moreover, the students derived the corresponding commutators.

The ladder operators have been introduced, and the students derived the respective commutators. During these derivations, the students achieve competence in analysing algebraic structures in Hilbert space.

During the following 45 minutes, in the general studies course, the number operator and the matrix elements of the ladder operators have been derived. Moreover, the spectrum has been derived. Furthermore, the students realized that the derivative causes a loss of information, so that only difference and correlations are reliable in the algebra of the ladder operators and number operators. In contrast, absolute values, such as the zero-point energy, are obtained from the original and more general VD. As the students had already experience in deriving commutators and other algebraic results from the preceding blocks, it was not necessary that the students derive all algebraic results on their own. Instead, the activity of the students was focused to the discourse and discussion. This turned out to be very appropriate, as the students achieved an overview in this manner. During these derivations, the students achieve competence in using ladder operators and number operators in Hilbert space.

(II) The remaining results have been derived:

During 90 minutes, in several general studies courses at the university since 2021, the tensor properties of the relative additional volume has been derived, see section (2.2). With it, several further results have been derived, see e. g. Carmesin (2023a). The learning process took place similarly in various research club courses since 2021. During these derivations, the students achieve competence in analysing tensors.

Since 2019, during a block of 45 minutes, and in several general studies courses at the university as well as in several research club courses, the smallest possible dimension of space has been derived, see section (2.3). During these derivations, the students achieve competence in deriving implications, and in discussing the corresponding conditions.

Since 2021, during a block of 45 minutes, and in several general studies courses at the university as well as in several research club courses, the spin of the graviton has been derived. During these derivations, the students achieve competence in deriving implications, and in discussing the corresponding conditions.

Since 2021, during a block of 30 minutes, and in several general studies courses as well as in several research club courses, the universal properties of the graviton have been discussed. During these discussions, the students achieve competence in discussing conditions, generality or universality of results.

In all these learning groups, students were able to perform exercises and to use instructions in order to derive parts of the theory. Moreover, the students discussed achieved results and analysed the corresponding conditions. Thus, the topic provides a large amount of self-esteem to the learners.

4. Discussion

The gravitational force is present in everyday life. However, the question remains: How does gravity propagate from a field generating mass to a probe mass? In present-day physics, there are two different concepts: GR proposes that curvature of space & time describe gravity, see e. g. Einstein (1915) or Hobson (2006). In contrast, in the framework of the other three fundamental interactions, a force propagates in the form of a boson of interaction, see Blokhintsev & Galperin (1934); Workman et al. (2022).

Here, the more general and fundamental dynamics of volume in nature is used: Thereby, the curvature of space is derived and treated in a parallel paper, see Carmesin (2024a) or Carmesin (2023a). In this paper, the insightful properties of the boson of interaction are derived. As a consequence, the graviton is fundamentally derived. Thus, for the first time, the graviton is fundamentally founded from a general theory, which implies gravity and GR and QP, and which solves the fundamental problems of these theories, see Carmesin (2024g). In particular, both above mentioned views are represented as special cases of the VD. In particular, the key DEQ $\{1\}$ of VD is a basis.

In general, that DEQ holds for tensors, correspondingly, the tensor property of the graviton is elaborated in a clarifying manner. In fact, this is confirmed by an analysis starting at the Planck scale and providing the correct energy density of volume, see e. g. Carmesin (2018a-b, 2019a-b, 2020a-b, 2021a-b, 2023a, 2024d). With it, the insightful minimal dimension of volume in nature is derived: $D = 3$.

For the basic DEQ $\{1\}$, the valuable harmonic solutions and Gaussian wave packets are derived as solutions. Moreover, the key result of universal quantization is used in order to derive the very useful wave packets with minimal energy of the fluctuations, a kinetic energy. The result is the kinetic zero-point energy. Moreover, the insightful complete energy and the kinetic energy of a wave packet are derived.

For the case of the important kinetic energy, the minimal value as well as the excitation states, the spectrum, the ladder operators and the algebraic structure are derived. In this manner, a derived, founded valuable and enlightening modified, corrected and generalized QFT is derived.

Altogether, the analysis of the graviton provides many deep insights and useful tools, such as a founded and derived modified QFT.

The learning process is based on the hypothetic deductive method, see the section about the epistemology. Such a testing of a hypothesis and such a deduction from prior knowledge have a high learning efficiency, see Hattie (2006). Moreover, the learning process uses everyday life contexts, so that the learning is meaningful, see Muckenfuß (1995) and achieves an additional high learning efficiency, see Hattie (2006). In the particular case, applications to quantum cryptography and quantum computing are very motivating. For more examples, see Carmesin (2020c).

The learning process has been tested in several learning groups. The complete learning process takes 615 minutes at university courses as well as in research club courses. Thereby, the main part of the exact field theory, QP and derived modified QFT is most valuable and requires 360 minutes, including exercises, discussions and instructed derivations. In all these learning groups, the students were able to take part in instructed derivations and founded discussions. Thus, the topic provides a large amount of self-esteem to the learners.

5. Literature

- Blokhintsev, D. I. and Galperin, F. M. (1934). Neutrino hypothesis and conservation of energy. *Pod Znamenem Marxisma*, 6, pp 147-157.
- Carmesin, Hans-Otto (2017a). *Vom Big Bang bis heute mit Gravitation: Model for the Dynamics of Space*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2017b). *Schülerinnen und Schüler entdecken Gravitationswellen mithilfe von Computereperimenten*. *PhyDid B*, pp 11-18.
- Carmesin, Hans-Otto (2018a). *Entstehung dunkler Energie durch Quantengravitation - Universal Model for the Dynamics of Space, Dark Matter and Dark Energy*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2018b). *Entstehung der Raumzeit durch Quantengravitation - Theory for the Emergence of Space, Dark Matter, Dark Energy and Space-Time*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2019a). *Die Grundschwingungen des Universums - The Cosmic Unification - With 8 Fundamental Solutions based on G, c and h*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2019b). *A Novel Equivalence Principle for Quantum Gravity*. *PhyDid B*, pp 1-9.
- Carmesin, Hans-Otto (2020a). *The Universe Developing from Zero-Point Energy: Discovered by Making Photos, Experiments and Calculations*. Berlin: Verlag Dr. Köster.

- Carmesin, Hans-Otto (2020b). Explanation of the Rapid Enlargement of Distances in the Early Universe. *PhyDid B*, pp 9-17.
- Carmesin, Hans-Otto et al. (2020): *Universum Physik, Qualifikationsphase, Niedersachsen*. Berlin: Cornelsen Verlag.
- Carmesin, Hans-Otto (2021a). *Quanta of Spacetime Explain Observations, Dark Energy, Graviton and Nonlocality*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2021b). *Cosmological and Elementary Particles Explained by Quantum Gravity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2021c). *The Elementary Charge Explained by Quantum Gravity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2021d). Lernende erkunden die Raumzeit. *Mathematikunterricht*. 67(2), 47-56.
- Carmesin, Hans-Otto (2022a). *Quantum Physics Explained by Gravity and Relativity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2022b). *Explanation of Quantum Physics by Gravity and Relativity*. *PhyDid B*, pp 425-438.
- Carmesin, Hans-Otto (2022c). How Excitations of Vacuum Form Matter. *PhyDid B*, pp 447-458.
- Carmesin, Hans-Otto (2022d). *The Electroweak Interaction Explained by and Derived from Gravity and Relativity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2023a). *Geometric and Exact Unification of Spacetime, Gravity and Quanta*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2023b). {Students Exactly Derive Quantization and its Universality. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2023c). {Students Derive an Exact Solution of the Flatness Problem. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2023d) *Fundamental Solution to the Cosmological Constant Problem*. *Results in Physic*. Preprint.
- Carmesin, Hans-Otto (2023e) *Derivation of Dark Energy and of the Source of the Hubble Tension*. *MNRAS*. Preprint.
- Carmesin, Hans-Otto (2024a). *Students Learn the Fundamental Exact Unification of Gravity, Relativity, Quanta and Elementary Charge*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024b). *Students Learn to Derive Universal Properties of Gravitons*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024c). *Students Learn to Derive the Energy Density of Volume*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024d). *Students Analyse the Impact of the H_0 Tension on the Worldview*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024e). *Students Learn to Derive Nonlocality from Fundamental Physics*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024f). *Students Learn to Solve the Cosmological Const. Problem*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024g). *How Volume Portions Form and Found Light, Gravity and Quanta*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Einstein, Albert (1915). *Die Feldgleichungen der Gravitation*. *Sitzungsberichte der Königl. Preussischen Akademie der Wissenschaften*, pp 844-847.
- Greiner, Walter (1997) *Theoretische Physik 4: Quantenmechanik*. Frankfurt M.: Harri Deutsch Verlag.
- Hattie, John (2009) *Visible Learning*. London: Taylor and Francis Ltd.
- Hobson, M. P. and Efstathiou, G. P. and Lasenby, A. N. (2006) *General Relativity*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kircher, Ernst; Girwidz, Raimund and Häußler, Peter (2001) *Physikdidaktik*. 2. Ed. Berlin: Springer.
- Kumar, A. (2018). *Fundamentals of Quantum Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Landau, Lew and Lifschitz, Jewgeni (1965) *Course of Theoretical Physics III – Quantum Mechanic*. 2. Ed. Oxford: Pergamon Press.
- Kultusministerium Niedersachsen (2021). *Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) an öffentlichen allgemeinbildenden und berufsbildenden Schulen sowie Schulen in freier Trägerschaft*. Rd. Erlass, d. MK, 1.3.2021, Az. 23.5 80009/ 1 - VORIS 22410.
- Muckenfuß, Heinz (1995). *Lernen im sinnstiftenden Kontext*. Berlin: Cornelsen
- Newton, Isaac (1686) *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. London: Jussu Societatis Regiae ac typis Josephi Streater.
- Niiniluoto, Ilkka; Sintonen, M.; Wolenski, Jan (2004) *Handbook of Epistemology*. Dordrecht: Springer.
- Olofsson, P.; Andersson, M. (2012) *Probability, Statistics & Stochastic Processes*. New York: Wiley.
- Peskin, Michael, E. and Schroeder, Daniel V. (1995) *An Introduction to Quantum Field Theory*. Boca Raton - London - New York: CRC Press.
- Sakurai, J. J. and Napolitano, J. (1994) *Modern Quantum Mechanics*. New York – London - Delhi: Addison-Wesley.
- Workman, R. L. et al. (2022) *Review of Particle Physics (by Particle Data Group)*. *Prog. Theor. Exp. Phys.*, pp 1-2270.

Acknowledgement

I am very grateful to I. Carmesin for many interesting discussions and for proofreading the manuscript. I am also grateful to Matthias Carmesin for interesting discussions.

Zentrale Motive der MINT-Identitätsverhandlung

- Studiendesign und Forschungsfragen -

Markus Elsholz*, Agnes Birner*, Florian Frank*, Thomas Trefzger⁺

*Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Mathematisches, Informatisches und Naturwissenschaftliches Didaktikzentrum (M!ND), ⁺Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik
markus.elsholz@uni-wuerzburg.de

Kurzfassung

Die Entscheidung junger Menschen, sich intensiver mit Themen aus dem MINT-Bereich auseinanderzusetzen und darüber hinaus ihre eigene berufliche Perspektive in MINT-Berufen zu sehen, wird von vielfältigen Faktoren in schulischen und außerschulischen Kontexten beeinflusst. Der Beitrag skizziert eine geplante Studie, die Motive junger Menschen für oder gegen ein Engagement im MINT-Bereich beleuchtet. Im Rahmen der Erhebung wird die Dynamik von Bildungsentscheidungen sowie die Berufsorientierung der teilnehmenden Jugendlichen längsschnittlich nachgezeichnet. Das zentrale Forschungsinteresse dreht sich um die Fragen, wie sich junge Menschen zu MINT positionieren und welche Rolle schulische und außerschulische Erfahrungen dabei spielen. Zur Untersuchung dessen werden in einer quantitativen längsschnittlichen Erhebung zentrale Konstrukte der Berufsorientierung erhoben, zusätzlich wird eine Teilstichprobe qualitativ begleitet. Die qualitativen Daten erlauben tiefere Einblicke in individuelle Abwägungs- und Entscheidungsprozesse und lassen Rückschlüsse auf die Bedarfe junger Menschen zu, die bei der Ausgestaltung außerschulischer Angebote und Impulse berücksichtigt werden sollten.

1. Einleitung

Vor dem Hintergrund aktueller globaler und gesellschaftlicher Herausforderungen, beispielsweise begründet durch den Klimawandel, fordert der Präsident von acatech Jan Wörner bei der Vorstellung des aktuellen MINT Nachwuchsbarometers 2024 ein gesteigertes Bewusstsein für die Relevanz von MINT-Kompetenzen und -Berufen, insbesondere bei jungen Menschen (Uhlhaas, 2024). Verschärft wird das Problem durch einen eklatanten Fachkräftemangel und hohen Abbruchquoten in MINT-Ausbildungsberufen und -Studienfächern, was laut der Vorstandsvorsitzenden der Joachim Herz Stiftung, Sabine Kunst, „falsche Erwartungen junger Menschen an diesen Berufsweg“ aufdecke (Uhlhaas, 2024).

Wie also positionieren sich junge Menschen zu dem Bereich, der durch Inhalte und Kompetenzen aus der Mathematik, der Informatik, den Naturwissenschaften und der Technik gebildet wird? Was erwarten junge Menschen aktuell tatsächlich von ihrem späteren Beruf und welche dieser Eigenschaften oder Werte sehen sie insbesondere bei MINT-Berufen erfüllt bzw. gerade nicht erfüllt? Aus welchen Quellen speist sich darüber hinaus die Informiertheit junger Menschen über MINT und damit verbundene Berufe? Und: Welche Ereignisse – im schulischen und außerschulischen Kontext – tragen gewinnbringend dazu bei, ein realistisches Bild verschiedener Berufe zu vermitteln, sodass junge Menschen verschiedene Optionen mit den eigenen Vorstellungen und

Fähigkeitseinschätzungen abgleichen und eine begründete Entscheidung treffen können?

Diesen Fragen widmet sich das Forschungsprojekt DynaMINT (Dynamiken MINT-bezogener Bildungs- und Berufsentscheidungen von Kindern und Jugendlichen), das am Mathematischen, Informatischen und Naturwissenschaftlichen Didaktikzentrum (M!ND) der Julius-Maximilians-Universität Würzburg durchgeführt wird. Ziel des Projekts ist die längsschnittliche Untersuchung der Selbstpositionierung von Schülerinnen und Schülern (SuS) zu MINT, ausgedrückt u. a. in ihrer Orientierung zu Berufen im MINT-Bereich bzw. außerhalb des MINT-Bereichs und ihren im Schulkontext getroffenen Bildungswegentscheidungen (z. B. in der Form der Fächerwahl).

2. Theoretische Rahmung

Die Studie nimmt explizit Bildungs- und Berufsaspirationen von jungen Menschen mit Bezug auf den MINT-Bereich in den Blick und arbeitet längsschnittlich Entscheidungsdynamiken und deren beeinflussende Faktoren heraus. Aus Erwartungs-Wert-Modellen (Wigfield & Cambria, 2010) wie auch aus Rahmenmodellen zur Identitätsverhandlung (Archer et al., 2020; Hazari et al., 2010) lässt sich ableiten, dass diese Dynamik neben dem schulischen Unterricht in den MINT-Fächern mit seinen Einflüssen auf das Selbstkonzept und Wirksamkeitserwartungen der SuS (vgl. die Studie IdentMINT, Christ et al., 2023) durch eine Vielzahl weiterer Faktoren bestimmt wird: Wertzuschreibungen (schulisch wie außerschulisch vermittelt), Role-Models (Sjaastad, 2012),

Informiertheit und stereotype Vorstellungen (Hannover & Kessels, 2002; Carli et al., 2016), die Darstellung von MINT in der Öffentlichkeit und den Medien (Esch, 2011), außerschulische Lernorte (Dou et al., 2019) aber auch regionale Gegebenheiten (Hartung et al., 2022) spielen zentrale Rollen.

Aus all den schulischen und außerschulischen (Lern-)Erfahrungen und Einflüssen formen Kinder und Jugendliche ein für sie konsistentes Bild von sich (Interessen, wahrgenommene Fähigkeiten, Ziele, etc) und ihrer Umwelt – hier: dem MINT-Bereich und zugeordneten Berufen. Vor dem Hintergrund der Person-Umwelt Theorie (Holland, 1997; Su et al., 2015) führt eine möglichst gute Passung der Vorstellungen zur eigenen Person und den Anforderungen der Umwelt (hier: dem MINT-Bereich) zu einem weiteren Engagement der Person.

Forschung zu Berufs- und Studienzufriedenheit zeigt, dass u.a. eine realistische Einschätzung der eigenen Person sowie der Anforderungen des Berufes zu Zufriedenheit im Arbeitsumfeld führt und Abbruch- bzw. Wechselquoten reduziert (Kristof-Brown et al., 2005; Besa, 2020).

3. Forschungsinteresse

Vor dem Hintergrund der oben skizzierten Person-Umwelt Theorie ist es für SuS relevant, belastbare Vorstellungen von den eigenen Fähigkeiten sowie den Möglichkeiten und Herausforderungen spezifischer Berufsbilder zu entwickeln. Entsprechend fordern die Lehrpläne der Bundesländer auch berufsinformierende Angebote an den Schulen (z. B. Berufsberatung durch die Agentur für Arbeit) bzw. werden Praktika zur Erkundung des Berufsalltags vorgeschrieben. Doch auch außerschulische Lernorte können authentische Einblicke in verschiedene Berufsfelder vermitteln (Weßnigk, 2013; Weisermann et al., 2018) und auch das persönliche Gespräch mit Vertreter*innen eines bestimmten Berufs (im Bekanntenkreis oder im Rahmen einer Berufsinformationsmesse) kann Bildungs- und Berufswahlentscheidungen beeinflussen. Das Forschungsinteresse der Studie dreht sich daher um die Frage, welche Erfahrungen und Eindrücke für die Dynamik der Selbstpositionierung junger Menschen zu MINT und MINT-Berufen relevant sind. Konkret lassen sich die folgenden Forschungsfragen formulieren:

- Forschungsfrage 1: Wie entwickelt sich die MINT-Berufsorientierung und ausgewählte der MINT-Berufsorientierung zugehörige Konstrukte (berufsbezogene Werte, wahrgenommene fachliche und überfachliche Kompetenzen) bei Kindern und Jugendlichen im Verlauf der Sekundarstufe I?
- Forschungsfrage 2: Wie beeinflusst die Teilnahme an schulischen und außerschulischen Zusatzangeboten die Entwicklung der MINT-Berufsorientierung und der zugehörigen Konstrukte?
- Forschungsfrage 3: Wie moderiert die Gestaltung der Zusatzangebote bzw. die Wahrnehmung der Gestaltung durch die Kinder und Jugendlichen den Einfluss der Teilnahme auf die Entwicklung der MINT-Berufsorientierung und der zugehörigen Konstrukte?
- Forschungsfrage 4: Wie entwickeln Kinder und Jugendliche ihre MINT-Identität im Verlauf der Sekundarstufe I?
- Forschungsfrage 5: Welche Aushandlungsprozesse (z. B. Aushandlung von MINT-Identität) beeinflussen die Bildungswegentscheidungen von Kindern und Jugendlichen?
- Forschungsfrage 6: Welchen Einfluss auf ihre Bildungswegentscheidungen schreiben Kinder und Jugendliche schulischen und außerschulischen Zusatzangeboten zu?

Die Studie beinhaltet dafür quantitative und qualitative Erhebungen, um das Spannungsfeld der MINT-Selbstpositionierung der SuS möglichst detailliert zu erfassen. Forschungsfragen 1 bis 3 sollen primär quantitativ (mittels Fragebögen) bearbeitet werden, während sich die Inhalte der Forschungsfragen 4 bis 6 besser durch qualitative Methoden abbilden lassen. Einzelne zentrale Konstrukte (Berufsabsichten in Form der Berufsorientierung respektive des Berufswunsches und Interaktion mit MINT in Form der schulischen und außerschulischen Beschäftigung mit MINT-Themen respektive Wahrnehmung von MINT-Zusatzangeboten) werden sowohl quantitativ als auch qualitativ erfasst.

4. Studiendesign

4.1. Stichprobe

Die Studie wird in zwei Bundesländern (Bayern und Baden-Württemberg) mit zwei regionalen Schwerpunkten durchgeführt. Damit fließen unterschiedliche regionale Voraussetzungen (ländliche vs. städtische Prägung, Dichte kleiner und mittlerer Unternehmen, Präsenz von Industrie und Universität, ...) mit Implikationen u. a. auf die Bereitstellung und Nutzung außerschulischer Angebote in die Studie ein, sodass ein detaillierteres Bild der Einflussfaktoren für Bildungswegentscheidungen gezeichnet werden kann.

Die Erhebungen beziehen SuS der Jahrgangsstufen 7 bis 10 aller weiterführender Schularten ein. Um die Dynamik der Positionierungsprozesse nachzeichnen zu können, werden die teilnehmenden SuS über einen Zeitraum von zwei Schuljahren (2024/25 und 2025/26) längsschnittlich begleitet. Es ist geplant, drei Kohorten zu folgen: Kohorte 1, beginnend in der 7. Jgst.; Kohorte 2, beginnend in der 8. Jgst.; und Kohorte 3, beginnend in der 9. Jgst. (Tab. 1). Pro Kohorte sollen dabei jeweils 40 Klassen pro weiterführender Schulart untersucht werden. Aus dieser Stichprobe wird ein Subsample von ca. 40 SuS für leitfadengestützte Interviews ausgewählt.

Tab. 1: Kohortenverteilung über die weiterführenden Schularten und Schuljahre 2024/25 & 2025/26

	Jahrgangsstufe			
	7	8	9	10
Mittelschule/ Werkrealschule	■	■*	■*	■
Realschule	■	■	■*	■*
Gymnasium	■	■	■*	■*
Gemeinschafts- schule	■	■	■*	■*
<i>Erhebungszeitraum</i>	■ SJ 24/25		■ SJ 25/26	

Mit * markierte Kohorten werden qualitativ begleitet.

Der Fokus auf die Jahrgangsstufen 7 bis 10 erlaubt Aussagen über die Positionierung und Berufsorientierung zu MINT vor dem Hintergrund nahender Schulabschlüsse in Mittel- bzw. Werkrealschule, Realschule und Gemeinschaftsschule bzw. der Entscheidung für inhaltliche Schwerpunktsetzungen im Gymnasium in der Sekundarstufe II. Diese strukturellen Rahmenbedingungen fordern Entscheidungen und bildungsbiographische Weichenstellungen von den Kindern und Jugendlichen, welche sowohl durch schulische Maßnahmen (Angebote zur Berufsorientierung), ergänzende externe Angebote (z. B. Schülerlaborbesuche) wie auch durch Ereignisse im privaten Umfeld (z. B. Gespräche im Freundes- und Bekanntenkreis) angestoßen und moderiert werden können. Gerade in dieser Phase des Übergangs von unreflektierten, der kindlichen Erfahrungswelt entstammenden Berufswünschen zu zunehmend fundierten, an eigenen Fähigkeiten und Möglichkeiten orientierten Perspektiven, möchte die Studie zu einem Verständnis der Dynamik und ihrer beeinflussenden Faktoren beitragen.

4.2. Erhebungsplan und -instrumente

Die quantitativen Haupterhebungen werden zwei Mal pro Schuljahr stattfinden. Nimmt die Klasse zwischen den Haupterhebungen an einem außerschulischen Angebot teil, so werden die Eindrücke der SuS wie auch die Einschätzung der Lehrkraft mittels einer Zwischenerhebung festgehalten. Die Interviews mit ausgewählten SuS finden ebenfalls zwei Mal pro Schuljahr statt. Auch hier halten die teilnehmenden SuS Eindrücke aus außerschulischen Angeboten zwischen den Interviewterminen in einer online-Kurzbefragung fest.

Der Fragebogen für die quantitative Haupterhebung beinhaltet Items zur Erfassung der Berufsorientierung (angelehnt an Lykkegard & Ulriksen, 2019), der berufsbezogenen Werte (adaptiert von Weinhardt & Schupp, 2014; Gebhardt & Beck, 2020; Schnell & Hoffmann, 2022), der Selbstzuschreibungen

überfachlicher Kompetenzen (adaptiert von Lehmann et al., 2021), des schulischen Selbstkonzepts (adaptiert von Dickhäuser et al., 2002) sowie Items zur Erfassung der Beschäftigung mit MINT in schulischen und außerschulischen Kontexten (adaptiert von Lin & Schunn, 2016).

Für die Zwischenerhebung zur Erfassung der Eindrücke außerschulischer bzw. schulergänzender Angebote kommt eine nach Pawek (2009) adaptierte Skala unter Bezug auf die von Freericks et al. (2017) formulierten Feindimensionen der Didaktik außerschulischer Lernorte zum Einsatz.

Die Leitfragen für die qualitative Erhebung adressieren die Bereiche SuS-Identität, insbesondere MINT-Identität, und beeinflussende Faktoren wie significant others und science capital (entwickelt auf Grundlage von Archer et al., 2020; Hazari et al., 2010; Rabe & Krey, 2018). Darüber hinaus werden Narrative zu Bildungswegentscheidungen in Zusammenhang mit der Wahrnehmung von MINT in schulischen und außerschulischen Kontexten erfragt (auf der Grundlage von Lyykegard & Ulriksen, 2019; Sjøberg & Schreiner, 2019).

4.3. Auswertungsabsicht

Mit den quantitativ erhobenen Daten soll längsschnittlich die Entwicklung der Berufsorientierung untersucht werden. Dafür werden die Daten zu den berufsbezogenen Werten, zur Selbsteinschätzung in den überfachlichen Kompetenzen und zum Selbstkonzept in ausgewählten Schulfächern mit den Einschätzungen der Relevanz dieser Faktoren für MINT- und Nicht-MINT-Berufe genutzt, um ein Maß für den Person-Umwelt-Fit zu generieren. Die Entwicklung dieses Maßes kann in Zusammenspiel mit den zusätzlich erhobenen Informationen (Beschäftigung mit MINT, Besuch von Zusatzangeboten der Berufsorientierung mit und ohne MINT-Bezug) genutzt werden, um zu untersuchen, wie die unterschiedlichen SuS bestmöglich im Sinne einer Berufsorientierung unterstützt und informiert werden können. Da viele der Zusatzangebote im Klassenverband besucht werden, ist hier die Nutzung eines Mehrebenenmodells zur Auswertung geplant. Im Mehrebenenmodell können die Unterschiedlichkeiten der Klassenverbände berücksichtigt werden, was eine genauere Aussage über die Einflüsse auf SuS-Ebene ermöglicht.

Durch die qualitative Erhebung der aufgeführten Aspekte in leitfadengestützten Interviews zu verschiedenen Zeitpunkten sollen zum einen die individuellen Bildungsverläufe der SuS nachgezeichnet und zum anderen ein Vergleich zwischen einzelnen Bildungsbiografien ermöglicht werden. So wird die Rolle von schulischen, schulergänzenden und außerschulischen Einflussfaktoren beschrieben und die Gewichtung der verschiedenen Faktoren herausgearbeitet.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Individuelle Bildungsverläufe werden selten auf die hier skizzierte Weise, also längsschnittlich, qualitativ

und quantitativ, erfasst. Die geplanten Erhebungen werden zum Schuljahr 2024/25 starten. Sie erlauben umfassende Einblicke in die Art und Weise, wie und auf welcher Grundlage sich junge Menschen in Bezug auf den MINT-Bereich positionieren und für sich verhandeln, ob und inwieweit dieser Bereich (berufs-)perspektivisch für sie relevant ist. Die Ergebnisse der Studie sollen dazu beitragen, junge Menschen in diesem Aushandlungsprozess möglichst zielführend durch schulische wie auch außerschulische Maßnahmen zu begleiten. Dafür werden im Projekt Handlungsempfehlungen für die pädagogische Praxis abgeleitet, die zu dem übergeordneten Ziel beitragen, junge Menschen zu eigenverantwortlichen Gestaltenden der eigenen Bildungsbiografie zu machen.

6. Literatur

- Archer, L., Moote, J., MacLeod, E., Francis, B., & DeWitt, J. (2020). *ASPIRES 2: Young people's science and career aspirations, age 10-19*. UCL Institute for Education.
- Besa, K.-S. (2020). Passung und berufliche Identität als Prädiktoren der Studienzufriedenheit von Lehramtsstudierenden. *PraxisForschungLehrer*innenBildung. Zeitschrift für Schul- und Professionsentwicklung*, Bd. 2 Nr. 5, 6-15. <https://doi.org/10.4119/PFLB-3950>
- Carli, L. L., Alawa, L., Lee, Y., Zhao, B., & Kim, E. (2016). Stereotypes About Gender and Science: Women ≠ Scientists. *Psychology of Women Quarterly*, 40(2), 244–260. <https://doi.org/10.1177/0361684315622645>
- Christ, L.-M., Krey, O., Bub, F., & Rabe, T. (2023). Identitätsaushandlungen von Schüler*innen zu MINT im Anfangsunterricht. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1343>
- Dickhäuser, O., Schöne, C., Spinath, B., & Stiensmeier-Pelster, J. (2002). Die Skalen zum akademischen Selbstkonzept. *Zeitschrift für Differentielle und Diagnostische Psychologie*, 23(4), 393–405. <https://doi.org/10.1024//0170-1789.23.4.393>
- Dou, R., Hazari, Z., Dabney, K., Sonnert, G., & Sadler, P. (2019). Early informal STEM experiences and STEM identity: The importance of talking science. *Science Education*, 103(3), 623–637. <https://doi.org/10.1002/sce.21499>
- Esch, M. (2011). MINT und Chancengleichheit in fiktionalen Fernsehformaten – Einführung und ausgewählte Ergebnisse einer Programmanalyse. In Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hrsg.), *MINT und Chancengleichheit in fiktionalen Fernsehformaten*.
- Freericks, R., Brinkmann, D., & Wulf, D. (2017). *Didaktische Modelle für außerschulische Lernorte*. Institut für Freizeitwissenschaft und Kulturarbeit e.V. an der Hochschule Bremen.
- Gebhardt, A., & Beck, M. (2020). Was ist Jugendlichen wichtig im (Berufs-)Leben? *bwp@Berufs- und Wirtschaftspädagogik - online*, 38, 1–36.
- Hannover, B., & Kessels, U. (2002). Challenge the science-stereotype. Der Einfluss von Technik-Freizeitkursen auf das Naturwissenschaften-Stereotyp von Schülerinnen und Schülern. <https://doi.org/10.25656/01:3955>
- Hartung, A., Weßling, K., & Hillmert, S. (2022). Interplay between family background and labour-market conditions in shaping students' occupational status expectations. *Journal of Education and Work*, 35(4), 405–421. <https://doi.org/10.1080/13639080.2022.2073338>
- Hazari, Z., Sonnert, G., Sadler, P. M., & Shanahan, M. (2010). Connecting high school physics experiences, outcome expectations, physics identity, and physics career choice: A gender study. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(8), 978–1003. <https://doi.org/10.1002/tea.20363>
- Holland, J. L. (1997). *Making vocational choices: A theory of vocational personalities and work environments* (3rd ed). Psychological Assessment Resources.
- Kristof-Brown, A. L., Zimmerman, R. D., & Johnson, E. C. (2005). Consequences of individual's fit at work: A meta-analysis of person-job, person-organization, person-group, and person-supervisor fit. *Personnel Psychology*, 58(2), 281–342. <https://doi.org/10.1111/j.1744-6570.2005.00672.x>
- Lehmann, L., Engelhardt, D., & Wilke, W. (2021). Entwicklung eines digitalen Instruments zur Feststellung relevanter Kompetenzen im Maschinenbau – Vom ideellen Kompetenzprofil zur praxistauglichen Messung. In L. Lehmann, D. Engelhardt, & W. Wilke (Hrsg.), *Kompetenzen für die digitale Transformation 2020* (S. 107–123). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-62866-9_8
- Lin, P.-Y., & Schunn, C. D. (2016). The dimensions and impact of informal science learning experiences on middle schoolers' attitudes and abilities in science. *International Journal of Science Education*, 38(17), 2551–2572. <https://doi.org/10.1080/09500693.2016.1251631>
- Lykkegaard, E., & Ulriksen, L. (2019). In and out of the STEM pipeline – a longitudinal study of a misleading metaphor. *International Journal of Science Education*, 41(12), 1600–1625. <https://doi.org/10.1080/09500693.2019.1622054>
- Pawek, C. (2009). *Schülerlabore als interessesfördernde außerschulische Lernumgebungen für Schülerinnen und Schüler aus der Mittel- und Oberstufe* [Monographie, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel]. [urn:nbn:de:gbv:8-diss-36693](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:8-diss-36693)
- Rabe, T., & Krey, O. (2018). Identitätskonstruktionen von Kindern und Jugendlichen in Bezug

- auf Physik – Das Identitätskonstrukt als Analyseperspektive für die Physikdidaktik? *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 24(1), 201–216.
<https://doi.org/10.1007/s40573-018-0083-x>
- Schnell, T., & Hoffmann, C. (2022). Die helle und die dunkle Seite von Sinn im Beruf, erfasst mit dem ME-Work Inventar. *Wirtschaftspsychologie aktuell*, 3(22), 38–42.
- Sjaastad, J. (2012). Sources of Inspiration: The role of significant persons in young people's choice of science in higher education. *International Journal of Science Education*, 34(10), 1615–1636.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2011.590543>
- Sjøberg, S., & Schreiner, C. (2019). The ROSE project—The development, key findings and impacts of an international low cost comparative project—Final Report, Part 1 (of 2) (Part 1).
- Su, R., Murdock, C., & Rounds, J. (2015). Person-environment fit. In P. J. Hartung, M. L. Savickas, & W. B. Walsh (Hrsg.), *APA handbook of career intervention, Volume 1: Foundations*. (S. 81–98). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/14438-005>
- Uhlhaas, C. (2024). MINT Nachwuchsbarometer 2024: Mit kollaborativen Methoden und KI die MINT-Bildung stärken. *idw - Informationsdienst Wissenschaft*.
<https://idw-online.de/de/news833453>
- Weinhardt, M., & Schupp, J. (2014). Multi-Itemskalen im SOEP Jugendfragebogen (234; SOEP Survey Papers). Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin.
<https://hdl.handle.net/10419/106410>
- Weisermann, M., Parchmann, I., & Schwarzer, S. (2018). Berufsorientierung als Teil einer Verknüpfung von Schule & Schülerlabor. In C. Maurer (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe* (S. 424–427).
- Weßnigk, S. (2013). *Kooperatives Arbeiten an industrienahen außerschulischen Lernorten*. Dissertation.
- Wigfield, A., & Cambria, J. (2010). Expectancy-value theory: Retrospective and prospective. In T. C. Urdan & S. A. Karabenick (Hrsg.), *Advances in Motivation and Achievement* (Bd. 16, S. 35–70). Emerald Group Publishing Limited.
[https://doi.org/10.1108/S0749-7423\(2010\)000016A005](https://doi.org/10.1108/S0749-7423(2010)000016A005)

Förderhinweis

Die Studie wird im Rahmen des Projekts DynaMINT (Dynamiken MINT-bezogener Bildungs- und Berufsentscheidungen von Kindern und Jugendlichen) durch die Wittenstein-Stiftung gefördert.