

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

Hartmut Wiesner

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

Kurzfassung

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

1. Einführung

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

Beispiel 1: Der elektrische Stromkreis

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

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

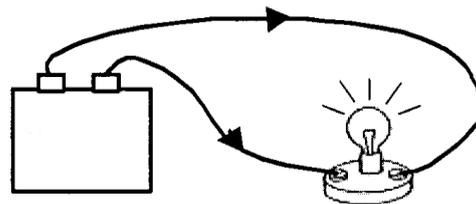


Abb. 1: Zweizuführungsvorstellung

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

Beispiel 2: Optik

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

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

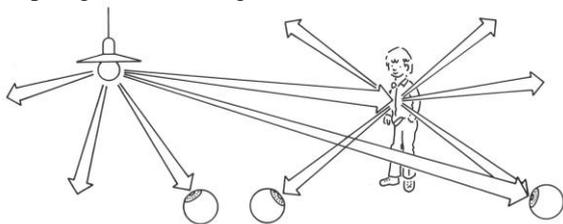


Abb. 2: Das Schema der Sender-Strahlungs-Empfänger-Vorstellung für das Sehen beleuchteter Objekte (aus [3,1993])

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

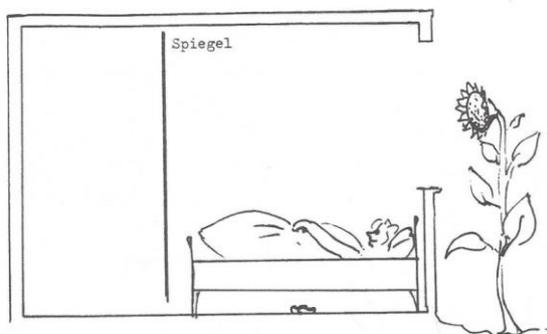


Abb. 3: Wo sieht Claudia das Spiegelbild der Sonnenblume? Erkläre, wie das Spiegelbild zustande kommt! (aus [4])

Beispiel 3: Kurvenfahrt

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

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

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

Beispiel 4: Wechselwirkungsprinzip

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

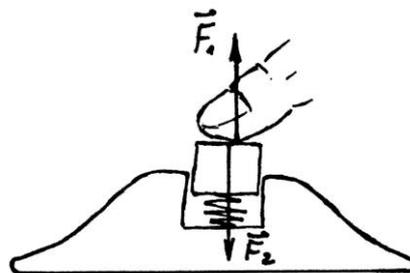


Abb. 4: Tafelbild zum „Klingelproblem“

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

Beispiel 5: Elektrische und magnetische Felder

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3. Entwicklung von Unterrichtseinheiten, ausgehend von Lernschwierigkeiten

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

Beispiele: Einführung in die Optik, Energie und Wärmelehre

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

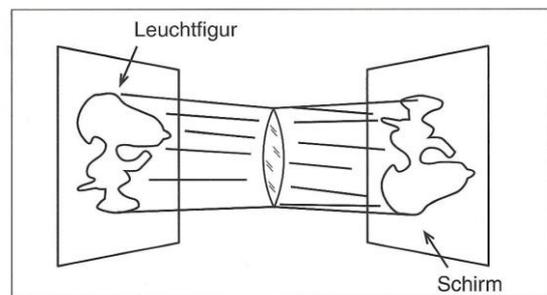


Abb. 5: Schülerskizze - holistische Abbildung durch eine Sammellinse (aus [3,1996])

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

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

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

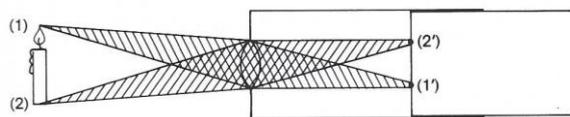


Abb. 6: Schema der qualitativen Fleck-zu-Fleck-Abbildung (aus [3,1996])

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

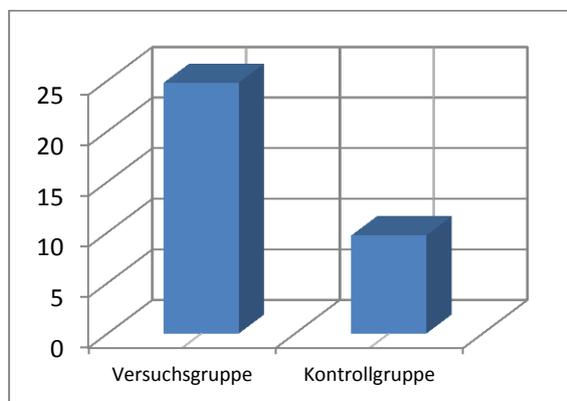


Diagramm 1: Ergebnisse einer Vergleichsuntersuchung zur Einführung in die Optik [4]

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

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

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

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

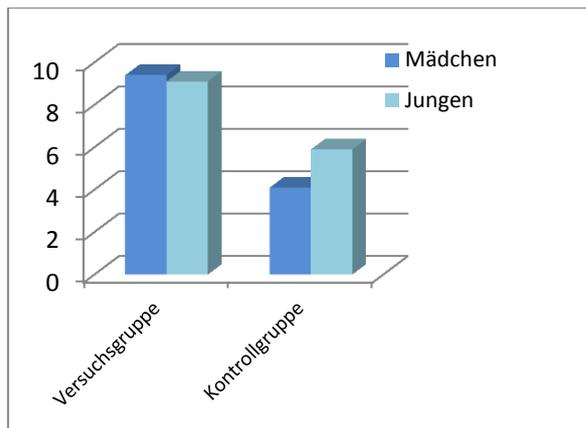


Diagramm 2a: Ergebnis des Lernerfolgs in der Vergleichsuntersuchung von Bader [7] zu Energie (maximal erreichbare Punktzahl im Abschlusstest: 14)

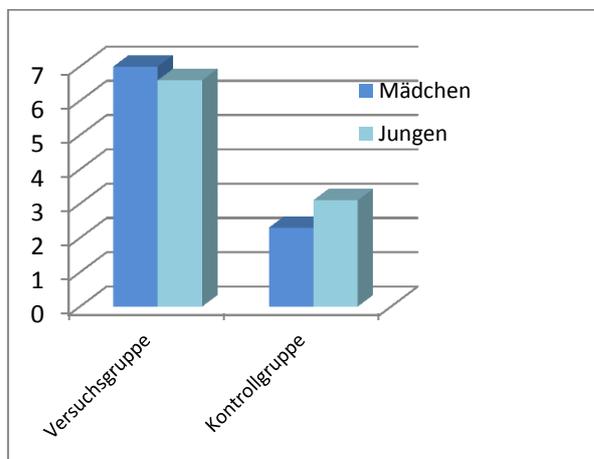


Diagramm 2b: Ergebnis des Lernerfolgs in der Vergleichsuntersuchung von Bader [7] zur Wärmelehre (erreichbare Punkte im Abschlusstest maximal 13)

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

4. Ergänzungen zum theoretischen Hintergrund

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

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

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



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

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

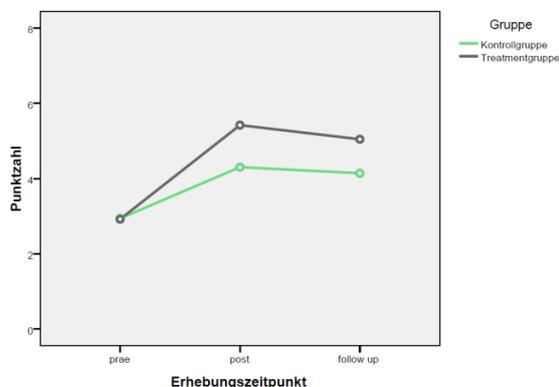


Diagramm 3: Ergebnisse aus der Vergleichsuntersuchung zur Einführung in die Mechanik [13]

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

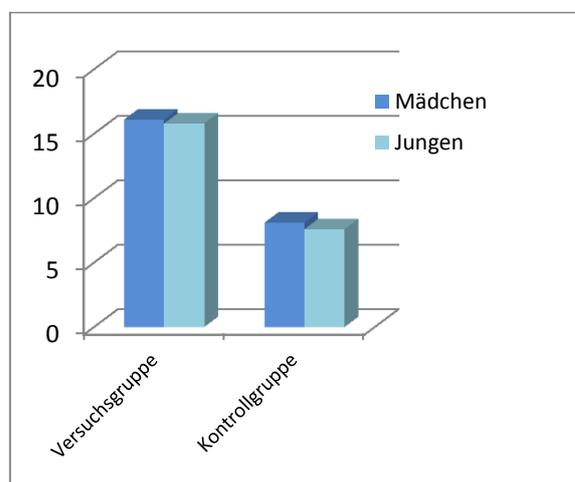


Diagramm 4: Lernerfolge in der Vergleichsuntersuchung von Späth [20]

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

5. Überlegungen zu weiterführender fachdidaktischer Forschung

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

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

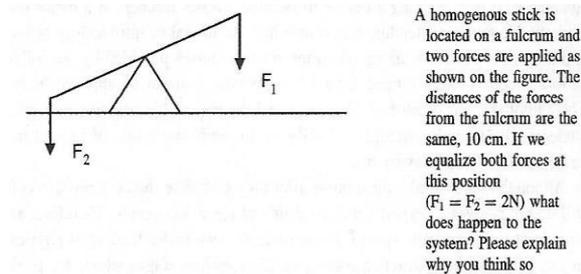


Abb. 8a: Teilaufgabe zu Drehmoment und Drehmomentgleichgewicht

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

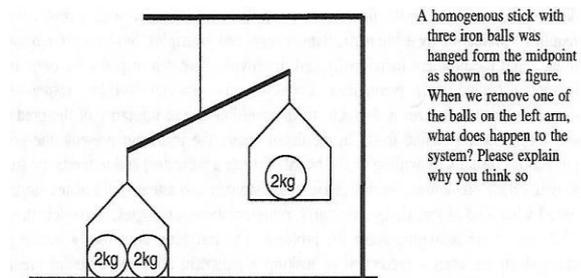


Abb. 8b: Teilaufgabe 2

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

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

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

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

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

Struktural elements	Readout Strategies
	Causal Net
Performance criteria	Integration
	Invariance

Tabelle 2: Elemente einer coordination class

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

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

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

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

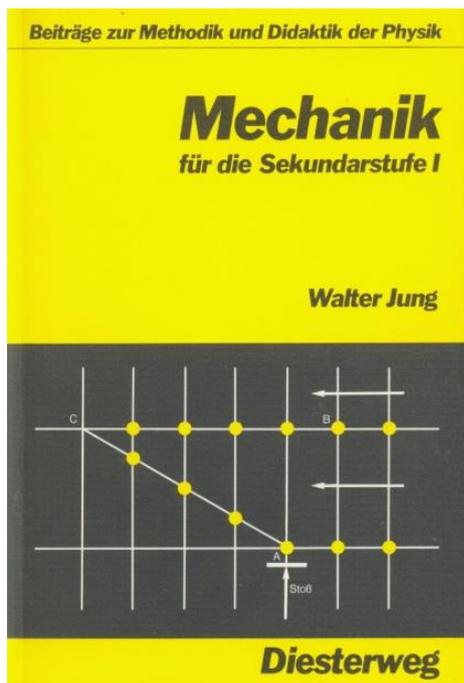


Abb. 9: Titelseite des Lehrgangs von Jung mit der symbolischen Darstellung des senkrechten Stoßes

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

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

Eine Liste für das *causal net* lautet:

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

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

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

6. Schlussbemerkungen

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

7. Literatur

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

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

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