

Hinderliche Vorstellungen

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

Hartmut Wiesner

Wir blicken auf 130 Jahre Physikunterricht zurück, praktiziert von vielen klugen und engagierten Lehrkräften. Und doch tauchen im Unterricht immer wieder Lernschwierigkeiten auf. Warum ist es so schwierig, erfolgreiche Unterrichtsangebote zu entwickeln? Die physikdidaktische Forschung der letzten Jahrzehnte hat gezeigt, dass es dringend erforderlich ist, Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten zu kennen und zu berücksichtigen, um gute Lernerfolge erzielen zu können.

In der ersten deutschsprachigen „Didaktik und Methodik der Physik“ schrieb Ernst Grimsehl 1911 [1]: „Daß natürlich die Schüler bei gedankenloser Anwendung die beiden Begriffe [v , a] 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.“ Inzwischen sind mehr als 100 Jahre vergangen, und die Frage ist berechtigt, ob die Schülerinnen und Schüler noch immer große Schwierigkeiten haben, Physik zu lernen. Die vorläufige Antwort ist: ja. Aber es gibt inzwischen einige bemerkenswerte Teilerfolge. Zunächst zwei Beispiele, um zu verdeutlichen, welche Art von Lernschwierigkeiten gemeint ist:

■ **Wechselwirkungsprinzip:** Häufig wird „*actio = reactio*“ falsch verstanden. In Didaktikveranstaltungen stelle ich seit Jahren Lehramtsstudierende vor das folgende Problem: Jemand möchte klingeln und drückt mit einer Kraft \vec{F}_2 gegen den Klingelknopf (Abb. 1). Die Reaktionskraft \vec{F}_1 wirkt genauso stark entgegen und kompensiert \vec{F}_2 . Folglich ist es nicht möglich, den Klingelknopf – entgegen der Erfahrung – in Bewegung zu setzen. Wo liegt der Denkfehler?

Interessant und bedenklich ist, dass von den Studierenden in den letzten Jahrzehnten sehr selten jemand eine physikalisch angemessene Lösung anbieten konnte. Die häufigste Argumentation setzt das Wechselwirkungsprinzip in der Anfangsphase außer Kraft: Zunächst ist die angreifende Kraft \vec{F}_2 etwas größer als die Reaktionskraft, sodass sich der Klingelknopf in Bewegung setzt. Erst in der anschließenden Phase sind beide Kräfte gleich groß. Warum findet man nach Studium der Mechanik dieses Antwortverhalten?

■ **Elementare Optik:** Schülerinnen und Schüler lehnen die Vorstellung vehement ab, dass die Ober-

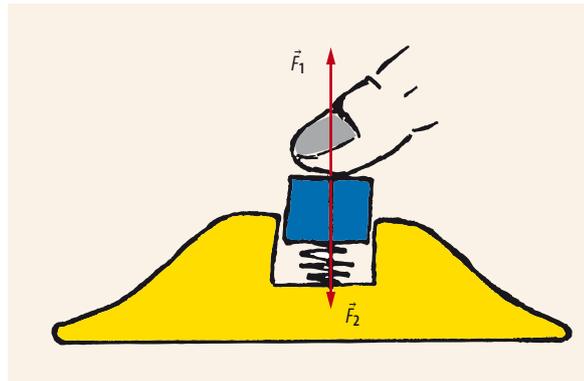


Abb. 1 Gemäß des dritten Newtonschen Gesetzes gilt Kraft gleich Gegenkraft. Bedeutet das also, dass der Finger einen Klingelknopf nicht in Bewegung setzen kann, weil der Knopf ja mit gleicher Kraft der Bewegung entgegenwirkt?

fläche sichtbarer Gegenstände durch Beleuchten dazu angeregt wird, selbst Licht abzustrahlen, und dass von diesem gestreuten Licht ein Teil ins Auge fallen muss, um dort den Wahrnehmungsreiz auszulösen. Hier spricht man von der Sender-Strahlungs-Empfänger-Vorstellung (Abb. 2).

Vor allem dieser Befund macht es verständlich, dass der traditionelle Unterricht mit Schwerpunkt auf strahlengeometrischen Konstruktionen weitgehend erfolglos ist. Diese bleiben für Schülerinnen und Schüler im Großen und Ganzen ein 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 der Aufgabe in Abb. 3 aus einer Vergleichsuntersuchung nachvollziehbar [2]: Nach „normalem“ Optikunterricht können nur 13,9 Prozent der Schülerinnen und Schüler den Ort des Spiegelbildes richtig angeben und nur 1,5 Prozent eine Erklärung dafür liefern.

Diese Lernschwierigkeiten sind bekannt. Warum hat es so lange gedauert, sie systematisch zu erforschen und wenigstens punktuell zu bearbeiten? Ein wesentlicher Grund dafür ist der bis in die 1970er-Jahre dominierende Behaviorismus. Dafür kennzeichnend sind die Beschränkung auf beobachtbares Verhalten und der Verzicht auf Theorien über innere Prozesse. In der Konsequenz waren die kognitiven Prozesse, die im Kopf der Lernenden bei der Aufnahme und Verarbeitung von Informationen ablaufen, nicht von Interesse.

Prof. Dr. Dr. Hartmut Wiesner, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, LMU München, Geschwister-Scholl-Platz 1, 80539 München – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Robert-Wichard-Pohl-Preises 2018 auf der DPG-Jahrestagung in Erlangen

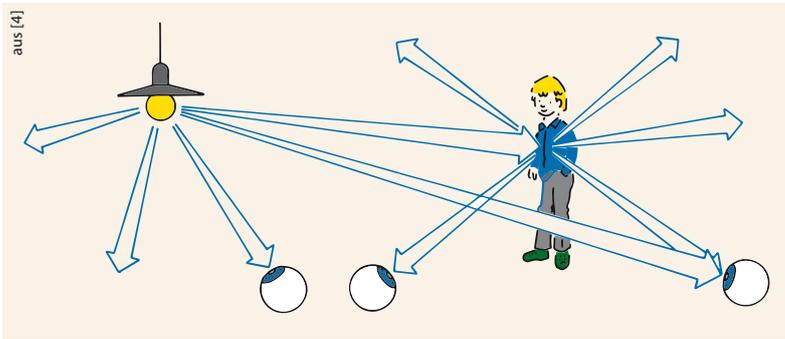


Abb. 2 Gemäß der Sender-Strahlungs-Empfänger-Vorstellung wird die Person angeleuchtet und dadurch dazu ange- regt, selbst Licht abzustrahlen. Ein Teil davon muss ins Auge des Betrachters fal- len, damit er die Person tatsächlich sieht.

So ist nachvollziehbar, dass sich die inhaltspezifischen Schwierigkeiten beim Lernen von Physik und das Lösen physikalischer Probleme nicht angemessen betrachten und bearbeiten ließen.

Anfang der 70er-Jahre vollzog sich mit der kognitiven Wende ein entscheidender und grundlegender Wandel. Das Verstehen kognitiver Prozesse im menschlichen Gehirn rückte ins Zentrum des Interesses. Der moderat-konstruktivistische Ansatz, der inzwischen weithin akzeptiert ist, beruht auf der Annahme, dass die Aufnahme und Verarbeitung von Information mittels vorhandener Wissens- und Denkstrukturen erfolgt. Neue Informationen gewinnen nur mit Hilfe des aus dem Langzeitgedächtnis abgerufenen Wissens eine Bedeutung. Die Lernenden konstruieren somit ihre eigene Realität. Dass dieser individuelle Konstruktionsprozess leicht in eine aus Sicht der Physiklehrkraft unerwünschte Richtung laufen kann, ist verständlich und erklärt zu einem großen Teil die anfangs beschriebenen Lernschwierigkeiten.

Schülervorstellungen als Ausgangspunkt

Mit der kognitiven Wende begann in der Fachdidaktik eine intensive Erforschung der Vorstellungen, auf welche die Schülerinnen und Schüler im Unterricht zurückgreifen, um Physik zu verstehen. Inzwischen sind weite Inhaltsbereiche der Physik sehr detailliert

1) In der Bibliographie zu Schülervorstellungen von Pfundt und Duit waren 2009 mehr als 8440 Arbeiten zu Schülervorstellungen registriert: archiv.ipn.uni-kiel.de/stcse.

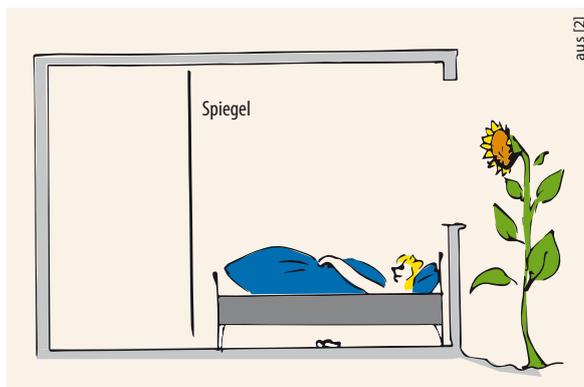


Abb. 3 Nach „traditionellem“ Optikunterricht kann kaum ein Schüler angeben, wo das Mädchen das Spiegelbild der Sonnenblume sieht und wie dieses zustande kommt.

untersucht und dokumentiert [3].¹⁾ Die Kenntnis und Berücksichtigung der Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten ist die unabdingbare Voraussetzung, um Unterrichtseinheiten mit guten Lernerfolgen zu konstruieren.

Neben der Ablehnung der Streuung von Licht ist die „holistische Abbildung“ eine weitere bedeutende Schwierigkeit (Abb. 4): Demzufolge wandert nach Schülermeinung ein Bild als Ganzes von der Figur zur Projektionsfläche. Nach mehreren vorangegangenen Entwicklungsstufen seit 1980 haben Herdt et al. einen Optiklehrgang entwickelt [4]. Die Vermittlung der Sender-Strahlungs-Empfänger-Vorstellung und ihre konsequente Anwendung im gesamten Lehrgang ist hierbei ein wesentliches Kennzeichen. Dass bei der anfänglichen Ablehnung eine zielgerichtete Führung durch die Lehrkraft und überzeugende Demonstrationen erforderlich sind, liegt auf der Hand [4].

Bei den abbildenden Systemen führt die Lehrkraft als didaktische Reaktion auf die holistische Vorstellung die Fleck-zu-Fleck-Abbildung durch Lichtbündel ein (Abb. 5). Dabei geht es vor allem darum, eine qualitative Vorstellung einzuüben. Die Fleck-zu-Fleck-Abbildung erklärt, wie ein Bild beispielsweise bei der Sammellinse entsteht. Sie erklärt aber noch nicht, wo genau und wie groß es ist. Der von einem Gegenstandsfleck ausgehende Lichtkegel wird gebündelt und gibt auf dem passend aufgestellten Schirm einen Bildfleck. Später helfen geeignet ausgewählte Randstrahlen der Bündel dabei, Ort und Größe des Bildes formal zu konstruieren.

Über den Unterricht von fast einem Schuljahr zeigte der neue Lehrgang eine höchst signifikante Überlegenheit bei sechs Versuchs- und neun Kontrollklassen [2]. Für die mittleren Lernerfolge ergaben sich für die Versuchsgruppe 24,8 und die Kontrollgruppe 9,7 von maximal 40 Punkten. Bemerkenswert war weiterhin, dass die Versuchsgruppe auch die Items mit strahlengeometrischen Konstruktionen erheblich erfolgreicher lösen konnte. So nannten fast 77 Prozent der Schülerinnen und Schüler der Versuchsgruppe den Ort des Spiegelbildes (Abb. 3) korrekt und fast 29 Prozent erklärten das Zustandekommen des Spiegelbildes. In der Kontrollgruppe gelang das nur knapp 14 bzw. 1,5 Prozent der Schülerinnen und Schüler.

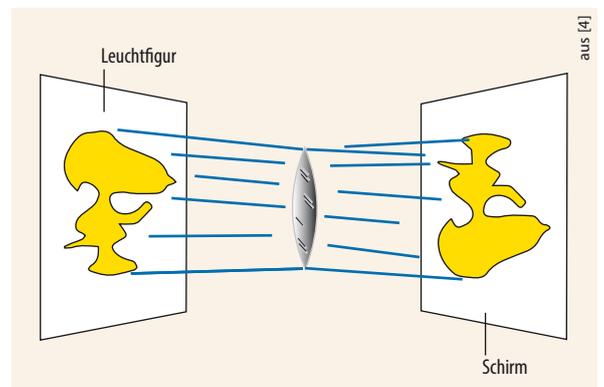


Abb. 4 Schülenskizze zur holistischen Abbildung durch eine Sammellinse. Demnach wandert das Bild als Ganzes zur Projektionsfläche.

Vergleichbare deutliche Verbesserungen im Lernerfolg gab es auch bei Unterrichtseinheiten zu Energie und Wärmelehre, ebenfalls entwickelt unter Berücksichtigung bekannter Lernschwierigkeiten [5]. Bei diesen beiden Themen wurde auch zwischen Mädchen und Jungen verglichen: Erreichen die Mädchen der Versuchsgruppe gleiche Lernleistungen wie die Jungen, ergibt sich bei der Kontrollgruppe – wie häufig beobachtet – ein Unterschied zu Ungunsten der Mädchen.

Von der Theorie in den Unterricht

Bei diesen Beispielen galt die Aufmerksamkeit nicht nur der konstruktivistischen Lernauffassung. Die Arbeiten orientierten sich auch an den Ideen des Design-based-Research. Dieses Forschungs- und Entwicklungsprogramm reagiert unter anderem auf die Kritik, dass die Forschungsergebnisse der Fachdidaktik sowie der Pädagogik und Psychologie hinsichtlich der realen Probleme im Unterricht zu wenig nützlich sind. Design-based-Research strebt eine fruchtbare Synthese zwischen Grundlagenforschung und dem Lösen authentischer, praktischer Probleme an. Es geht darum, gute funktionierende Lernumgebungen zu gestalten und gleichzeitig an Theorien des Lehrens und Lernens zu arbeiten [6]. Ein Beispiel für ein solches Projekt ist die Entwicklung der zweidimensionalen Dynamik für den Physikanfangsunterricht [7] – beginnend mit den Arbeiten von W. Jung et al. über zahlreiche Zwischenprojekte bis zu den aktuellen Lehrerhandreichungen [8]. Zentrale Ideen dabei sind: Geschwindigkeit von Anfang an als vektorielle Größe (in Pfeildarstellung), Newtonsche Bewegungsgleichung in der Kraftstoßformulierung $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$ und mit ihr qualitatives Argumentieren. Ein Schlüsselphänomen ist der senkrechte Stoß auf eine von zwei parallel laufenden Kugeln (Abb. 6). Weitere Besonderheiten des Konzeptes sind der Verzicht auf den Beschleunigungsbegriff und eine weitgehende Reduzierung der Kinematik. Der Vergleich mit dem üblichen Unterricht auf Basis eindimensionaler Mechanik ergab eine statistisch hoch signifikante Überlegenheit des zweidimensionalen Zugangs [9].

Eine weitere wichtige Orientierung für die physikdidaktische Forschung und Entwicklung erfolgte mit den Theorien zum Begriffswchsel (oder vielleicht treffender formuliert zur Begriffsentwicklung) und deren Aussagen darüber, warum und wann es so schwierig ist, physikalische Begriffe zu lernen und wie man erfolgversprechender vorgehen sollte. Es gibt inzwischen mehrere Theorien, die unterschiedliche Aspekte betonen. Nach der Theorie von M. Chi et al. von 1994 sind ausgeprägte Lernschwierigkeiten zu erwarten, wenn der physikalische Begriff einer anderen Kategorie als in der Alltagsvorstellung zuzuordnen ist. Kraft zählt im Alltag beispielsweise zur Kategorie „Eigenschaft eines Körpers“ (der Ringer hat Kraft). In der Physik beschreibt die Kraft dagegen die Relation zwischen einwirkendem Körper und dem Körper, auf den eingewirkt wird. Licht ist im Alltagsverständnis ein

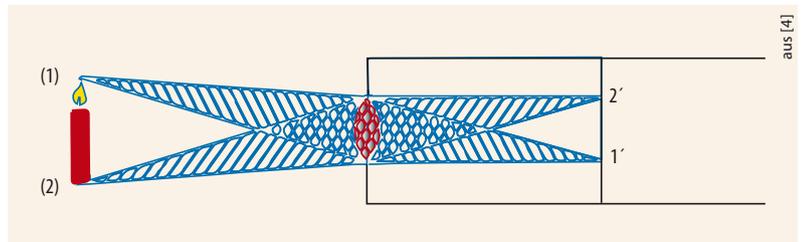


Abb. 5 In einem modernen Optikunterricht soll die Fleck-zu-Fleck-Abbildung die holistische Abbildung ablösen. Wo

genau das Bild auftritt und wie groß es exakt ist, erklärt diese qualitative Vorstellung noch nicht.

Zustand oder eine Substanz („hellmachend“), in der Physik ein Prozess, eine elektromagnetische Strömung.

In der Framework Theory von S. Vosniadou et al. gilt die Annahme, dass die Kinder schon sehr früh theorieähnliche, kohärente Wissensstrukturen entwickeln, die durch zahlreiche Alltagserfahrungen bestätigt wurden und deshalb tiefverwurzelt und schwer zu verändern sind [10]. Diese Theorie passt recht gut zu denjenigen Ergebnissen der Forschung, bei der relativ stabile und weit verbreitete Schülervorstellungen auftraten. In der Einschätzung zumindest des kurzfristigen Lernens ist sie eher skeptisch und damit übereinstimmend mit den oft enttäuschenden Lernerfolgen im Physikunterricht.

Andererseits sind die bereits angeführten Beispiele zu Optik, Energie und Wärmelehre ein Hinweis, dass eine optimistischere Sicht angebracht erscheint. Eine solche Theorie haben A. A. diSessa et al. im Rahmen des „Knowledge-in-pieces“-Ansatzes ausgearbeitet. Demnach gilt das Vorwissen der Schülerinnen und Schüler weniger als Hindernis für den Konzeptwechsel, sondern eher als Anknüpfungsmöglichkeit. Die Theorie passt auch besser zu Befunden, dass eine Reihe der von Schülern geäußerten Vorstellungen instabil, fluide und stark kontextabhängig sind. DiSessas Theorie basiert auf der Annahme, dass das Wissen von Novizen aus einer Vielzahl von lose oder gar nicht verbundenen Elementen besteht, den „phenomenological primitives“ oder p-primes [11]. Lässt man einen Gegenstand los, fällt er nach unten. Das ist normales,

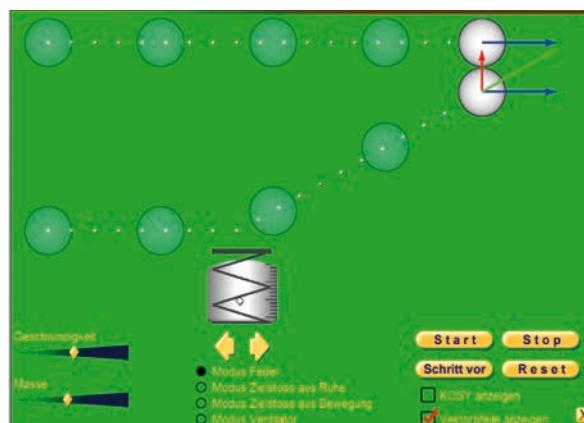


Abb. 6 Zwei Kugeln rollen von links nach rechts. Die untere wird an der dritten Position senkrecht zur Bewegung gestoßen. Das Stroboskopbild zeigt, wie sich die Bahnen beider Kugeln schließlich kreuzen.

2) In einer ergänzten Fassung dieses Beitrags, eingereicht bei Phyd B, wird am Beispiel des senkrechten Stoßes beschrieben, wie groß die Zahl der Informations-elemente und Schlussfolgerungen ist, die die Schülerinnen und Schüler koordinieren müssen, um zur angestrebten physikalischen Einsicht zu kommen. Eine systematische Untersuchung könnte die für das Lernen kritischen Punkte aufdecken.

erwartetes Verhalten und wird nicht weiter hinterfragt. P-primes sind quasi die atomaren Grundbausteine des Alltagsverständnisses und werden je nach Situation unterschiedlich stark aktiviert. Eine Reihe bekannter Schülervorstellungen lassen sich als p-primes klassifizieren. Lernschwierigkeiten treten auf, wenn im Lernangebot Reize dominant sind, die ungeeignete p-primes aktivieren. Für die Entwicklung von Unterrichtskonzepten bietet es sich daher an, Situationen zu finden, die anknüpfungsfähige p-primes aktivieren und gleichzeitig solche unterdrücken, die das Lernen hemmen. Diese lernförderlichen Schlüsselsituationen gilt es, in mühsamer empirischer Forschung zu finden und ihre positive Wirkung empirisch nachzuweisen. Sind für einen bestimmten Inhaltsbereich Situationen bekannt, in denen geeignete p-primes aktiviert werden, lässt sich davon ausgehend die Lernumgebung konstruieren. Die bisher genannten erfolgreichen Projekte wurden in Anlehnung an eine entsprechende Strategie entwickelt.

Ein weiteres Beispiel für die Wirksamkeit dieser Vorgehensweise ist die Entwicklung und Überprüfung eines Unterrichtskonzepts für 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 [12] ein Unterrichtskonzept entwickelt und evaluiert, das die Spannung als Differenz des elektrischen Potentials einführt – die magnetische Wirkung hat sich als gutes Argument gegen den Stromverbrauch erwiesen. Auch hier zeigte sich eine sehr hohe Überlegenheit.

Jan-Philipp Burde hat in seiner gerade abgeschlossenen Dissertation eine Erweiterung vorgenommen und dem Potential eine anschaulichere Deutung gegeben: Das Potential ähnelt demnach dem (elektrischen) Druck in einem Elektronengas. Die empirische Vergleichsuntersuchung hat beeindruckend gezeigt, dass die Lernenden nach diesem Konzept ein deutlich verbessertes Verständnis einfacher Stromkreise erlangen [13, 14].

Schlussbemerkungen und Ausblick

Die Berücksichtigung der Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten im Rahmen des moderaten Konstruktivismus, der Variante des Knowledge-in-Pieces-Ansatzes und des Design-based-Research führten für verschiedene Inhalte der Schulphysik zu deutlichen Verbesserungen des Lernerfolgs. Mit den entsprechenden Unterrichtskonzeptionen sind natürlich auch – wie bei jedem anderen Unterrichtsentwurf – bestimmte Lernziele verbunden, die man akzeptieren oder ablehnen kann. Wenn man die dort angestrebten Ziele akzeptiert, bleibt noch immer ein erheblicher Spielraum für Verbesserungen des Lernerfolgs. Die in den letzten Jahren im Rahmen der „coordination classes“ durchgeführten Untersuchungen zum Ver-

ständnis physikalischer Begriffe (z. B. [15]) lassen vermuten, dass die Lernprozesse für weiterführende Forschungen und Entwicklungen systematischer und weit mehr ins Detail gehend als bisher zu untersuchen sind.²⁾ Inhaltsspezifische Feinheiten, die uns bisher entgangen sind und zu Lernschwierigkeiten führen – oder im günstigsten Fall erfolgreiche Anknüpfungsmöglichkeiten bieten –, ließen sich damit besser als bisher als Voraussetzung für die Entwicklung erfolgreicherer Unterrichtskonzepte finden. 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.

Literatur

- [1] E. Grimsehl, Didaktik und Methodik der Physik, Becksche Verlagsbuchhandlung, München (1911)
- [2] D. Herdt, Einführung in die elementare Optik. Vergleichende Untersuchung eines neuen Lehrganges, Westarp, Essen (1990)
- [3] R. Driver et al., Making Sense of Secondary Science, Routledge, London (1993 oder 2014)
- [4] H. Wiesner, P. Engelhardt, D. Herdt, Unterricht Physik, Optik I, Aulis Verlag Deubner, Köln (1993) bzw. Optik II (1996)
- [5] M. Bader, Vergleichende Untersuchung eines neuen Lehrganges „Einführung in die mechanische Energie und Wärmelehre“, Dissertation Universität München (2001); bit.ly/2KzHJ93
- [6] M. Hopf und H. Wiesner, in: S. Kolling (Hrsg.), Beiträge zur Experimentalphysik, Didaktik und computergestützten Physik, Logos, Berlin (2007), S. 37
- [7] H. Wiesner et al., Dynamik in den Mechanikunterricht, Jahresversammlung des FV Didaktik der DPG, Hannover (2010)
- [8] H. Wiesner et al., Mechanik I: Kraft und Geschwindigkeitsänderung, Aulis, Hallbergmoos (2011); T. Wilhelm et al., Mechanik II: Dynamik, Erhaltungssätze, Kinematik, Aulis, Hallbergmoos (2013)
- [9] V. Tobias, Newton'sche Mechanik im Anfangsunterricht, Logos, Berlin (2010)
- [10] S. Vosniadou und I. Skopeliti, Science and Education 23, 1427 (2014)
- [11] A. diSessa, in: G. Forman und P. Putfall (Hrsg.), Constructivism in the Computer Age, Lawrence Erlbaum Publishers, Hillsdale (1988), S. 49
- [12] S. Späth, Überarbeitung und empirische Untersuchung eines Unterrichtskonzeptes zur Einführung in die Elektrizitätslehre, Zulassungsarbeit, LMU München; bit.ly/2yV8Xp8
- [13] J.-P. Burde, Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzeptes zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells, Dissertation, U Frankfurt/Main (2018)
- [14] J.-P. Burde und Th. Wilhelm, Physik Journal, Mai 2018, S. 27
- [15] O. Ozdimir, Instr. Sci. 41, 81 (2013)

DER AUTOR

Hartmut Wiesner studierte Physik in Leipzig, Marburg und Frankfurt am Main und promovierte in theoretischer Physik. Anschließend war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Didaktik der Physik an der Universität Frankfurt tätig und absolvierte das Staatsexamen für das Lehramt an Gymnasien. Er schloss das Studium der Erziehungswissenschaften und die Promotion an und habilitierte schließlich in Didaktik der Physik. Von 1994 bis zu seiner Emeritierung war er Professor für Didaktik der Physik an der LMU München.

