

Werkzeuge und Flügel des Geistes

Die Rolle von Experimenten in der Lehre

Manfred Euler

Die Bedeutung von Experimenten für die Vermittlung der notorisch „harten“ Physik rückt wieder stärker in das Zentrum des Interesses. So nehmen Experimente zwar einen Großteil der Unterrichtszeit in Anspruch, doch beschränken sie sich häufig darauf, Phänomene vorzustellen oder zu veranschaulichen. Daher ist eine Renaissance des Experimentierens erforderlich.

Im Bereich der vorschulischen Bildung und der Grundschule machen zahlreiche Projekte Kinder über explorativ-forschende Erfahrungen mit naturwissenschaftlichen Phänomenen und technischen Systemen vertraut. Diese Initiativen wirken, denn die Kinder sind begeistert und engagiert bei der Sache. Im weiterführenden Bereich demonstrieren viele Schülerlabore, dass zielorientierte experimentelle Tätigkeiten und Projekte die Aufgeschlossenheit von Jugendlichen für Naturwissenschaft und Technik nachhaltig verbessern können [1]. Wie muss sich der Unterricht verändern, um die Möglichkeiten des Lernens durch Experimentieren in der Schule besser zu nutzen?

Die Schulphysik ist keinesfalls nur das theorielastige Kreidefach, als das sie oft gilt. Im Gegenteil: Videostudien zeigen, dass im physikalischen Anfangsunterricht die Durchführung, Vor- und Nachbereitung von Experimenten rund zwei Drittel der Unterrichtszeit in Anspruch nehmen [2]. Doch mit den experimentellen Aktivitäten erschließen sich oft nur unzureichende Lernmöglichkeiten: Nur selten werden die Schülerinnen und Schüler aktiv – etwa, indem sie Fragen formulieren oder Versuche planen und auswerten.

Auch wenn die Lernenden in Schülerübungen selbst praktisch arbeiten, vollziehen sie dabei oft nur



phaeno / Lars Landmann

Projekte wie hier am Science Center „phaeno“, in denen Kinder und Jugendliche sich experimentell mit Physik und Technik auseinandersetzen, haben Hochkonjunktur.

Anleitungen nach. Vor einem Experiment werden nur selten Erwartungen formuliert, Vermutungen geäußert, Hypothesen angeregt. Die Schüler haben wenige Gelegenheiten, ihren eigenen Vorstellungen nachzugehen, ihr Wissen selbst zu konstruieren, zu prüfen und zusammen mit den Mitschülern weiterzuentwickeln. Die Einbindung von Experimenten in ein Unterrichtskonzept, das die Lernenden aktiviert und zu eigenständiger Auseinandersetzung anregt, erweist sich als verbesserungsbedürftig.

Die aktuelle PISA-Studie bestätigt den Befund, dass experimentelle Aktivitäten an sich noch nicht Motivation und Lernerfolg garantieren.^{#)} Die Studie hat Muster des Experimentierens im Unterricht sowie Aspekte des forschenden Lernens erhoben und mit der Leistung und dem Sachinteresse der Schüler in Beziehung gesetzt. Dabei zeigt sich, dass Unterricht, der Experimente nutzt und zum Denken anregt, am besten die Interesse- und Kompetenzentwicklung der Schüler fördert. Traditioneller lehrerzentrierter Unterricht mit wenig Gelegenheit zum Experimentieren und eigenem Nachdenken und Erklären erzielt dagegen höhere Testleistungen,

verringert aber das Schülerinteresse sehr stark. Ein drittes Unterrichtsmuster, das zwar viele Aktivitäten des Experimentierens umsetzt, aber weniger zum eigenen Denken anregt, ist zwar motivational ansprechend, sichert aber das fachliche Verständnis nur unzureichend [3]. Obwohl diese Typisierung des naturwissenschaftlichen Unterrichts noch sehr grob ist und fach- sowie bundeslandspezifische Besonderheiten berücksichtigen muss, zeigt sie dennoch klar die Herausforderung an die Unterrichtsgestaltung.

Wie gelingt eine bessere Balance zwischen der begrifflich-konzeptuellen Vermittlung von Physik und experimentellen Zugängen, die die Schüler dazu anregt, sich eigenständig und kreativ mit Physik auseinanderzusetzen? Warum lohnt es sich, den mühsameren Weg des Experimentierens einzuschlagen, wo sich testrelevantes Wissen durch Frontalunterricht offenbar besser vermitteln lässt? Um dies zu beantworten, diskutieren wir die Besonderheiten physikalischer Lern- und Erkenntnisprozesse und die Rolle experimenteller Tätigkeit für den Aufbau physikalisch tragfähiger mentaler Modelle. Die reflektierte Verbindung konkreter Erfahrungen

#) PISA ist die Abkürzung für „Programme for International Student Assessment“, mehr Informationen unter www.pisa.oecd.org.

Prof. Dr. Manfred Euler, Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften, Universität Kiel, Olshausenstr. 62, 24098 Kiel

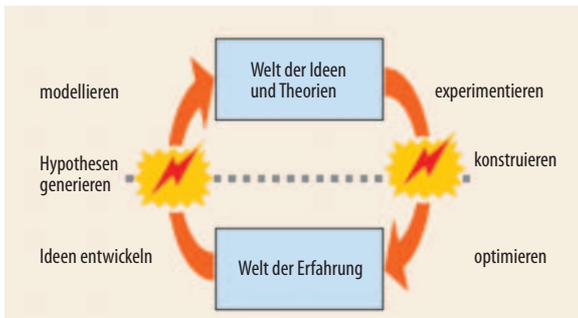


Abb. 1 Physikalische Lern- und Erkenntnisprozesse sind produktive Zyklen von Experimentieren und Modellieren. Kreative Akte vermitteln dabei zwischen Erfahrungs- und Ideenwelt.

mit abstrakten Ideen und allgemein gültigen Prinzipien ist der Kern wissenschaftlicher Kreativität, deren bessere Förderung im Unterricht unser aller Anliegen sein muss.

Ein produktives Wechselspiel

Zum Wesen physikalischer Arbeitsweisen gibt es viele Vorstellungen. Konsens besteht über das zyklisch-iterative Wechselspiel von Experimentieren und Modellieren, das die Welt der Erfahrungen mit der Welt der Theorien und Ideen verbindet (Abb. 1). In der Wissenschaftstheorie und in der Lehre herrschte lange Zeit eine formal-logische Sicht des Forschungsprozesses vor, in der die Theorie Priorität erhält und Experimente dazu dienen, Theorien zu überprüfen. Dieses Modell thematisiert die Wissensgenese nur unzureichend.

Demgegenüber stellen heutige Theorien semantische und modelltheoretische Aspekte physikalischer Arbeitsweisen in den Vordergrund [4]. Modelle repräsentieren Teilaspekte der Erfahrungswelt [5]. Unser Wissen basiert auf und entfaltet sich in Modellen, die den Zugang zu Phänomenen und Theorien

vermitteln. Dem Experimentieren kommen vielfältige Rollen für die Generierung von Wissen zu. Bedeutsam ist vor allem das explorative Experimentieren, das die Lernenden mit Neuem, Unerwartetem und Erklärungsbedürftigem konfrontiert [6 – 8]. Experimente sind jedoch nicht theoriefrei, sondern setzen mehr oder minder explizite Modellvorstellungen um. Sie entfalten dabei eine Doppelfunktion: Als konkrete Werkzeuge erlauben sie es, gezielt in ein physikalisches System einzugreifen, während Gedankenexperimente die Modellbildung unterstützen.

In der Kognitionsforschung vollzieht sich eine ähnliche modelltheoretische Wende. Aktuelle Theorien gehen davon aus, dass Kognition auf dynamischen Prozessen beruht, die Wahrnehmen, Handeln und Introspektion verbinden [9]. Mentale Modelle spielen dabei eine zentrale Rolle. Sie simulieren die Teilaspekte der Außenwelt, die relevant sind, um Handlungen zu planen, zu steuern und zu bewerten. Theoretische Begriffe und experimentelle Handlungen sind demnach erheblich enger verschränkt, als bisher angenommen wurde. Insofern sind auch die abstraktesten Vorstellungen in konkreten Erfahrungs- und Handlungsmustern verankert.

Wissen entfalten

Zahlreiche Studien belegen, wie wichtig mentale Simulationen sind, um physikalische Prozesse zu verstehen [10]. Sie ermöglichen es, aus statischen Bildern dynamische Abläufe zu generieren (Abb. 2). Dabei gehen wir weitgehend intuitiv

vor und entfalten implizites Wissen, das auf vorangegangenen Wahrnehmungen und Handlungen aufbaut. Einfache Abläufe lassen sich gut durchspielen. Kompliziertere Systeme erfordern es, lokale Teilsimulationen zu einer globalen Sichtweise zusammenzuführen, was mit wachsender Komplexität immer schwieriger wird. Um dies selbst zu erfahren, führen Sie das Gedankenexperiment aus Abb. 3 durch und lesen erst danach weiter!

Dieses Beispiel macht die Grenze mentaler Simulationen deutlich. Viele sehen intuitiv einen falschen „inneren Film“ und stellen sich zwei gegeneinander gestellte rotierende Pyramiden vor. Nur wenige erkennen, dass die Würfecken nicht in einer Ebene rotieren. Ergänzend zu den impliziten, analogen, modellbasierten Strategien bedarf es expliziter, logisch-algorithmischer Strategien, um ein zutreffendes Modell des rotierenden Würfels zu generieren. Exemplarisch wird daran klar, wie schwierig es ist, physikalische Prozesse mental zu modellieren, und warum Physik häufig als unanschaulich und kontraintuitiv gilt.

Wir müssen lernen, mit den eingeschränkten Möglichkeiten unseres kognitiven Systems produktiv umzugehen. Vor allem die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses gilt als limitierend [11]. So können wir nur mit vier bis sieben Informationseinheiten explizit operieren. Um das Arbeitsgedächtnis zu entlasten, müssen wir Informationen reduzieren. Eine Strategie besteht darin, komplexere Konzepte zu kompakteren Einheiten zusammenzufassen. Bei Bedarf lassen sich diese wieder zu detaillierteren Modellen entfalten. Das erfordert, regelbasiertes explizites und modellbasier-

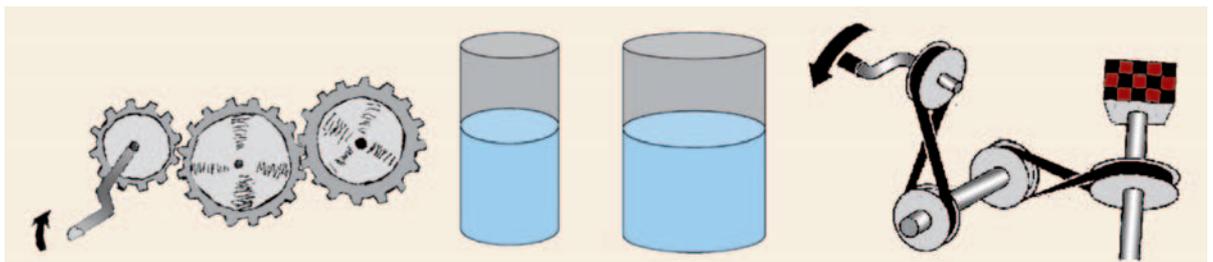


Abb. 2 Mentale Modelle erlauben es, Experimente in Gedanken ablaufen zu lassen. In welcher Richtung dreht sich

das letzte Zahnrad? Aus welchem Gefäß wird das Wasser zuerst auslaufen, wenn man beide gleich weit kippt? Was ist der

Drehsinn des Würfels, wenn man an der Kurbel in der angegebenen Richtung dreht?

tes implizites Wissen sinnvoll zu verbinden. Zusätzlich müssen wir lernen, Hilfsmittel für die Wissenskonstruktion zu nutzen, wie z. B. Bilder, schematische Darstellungen oder Formeln. Die Komplexität der Problemlösung verlagert sich dabei teilweise in die verwendeten (mathematischen) Werkzeuge.

Auch experimentelle Handlungen tragen dazu bei, Wissen zu verkörpern und theoretische Konzepte in der Erfahrung zu verankern. Das experimentelle Spiel hilft, uns in die Systeme hineinzuversetzen und ihr Verhalten konkret und in Gedanken nachzuvollziehen. Das sich bei der Modellierung entfaltende implizite, prozedurale Wissen lässt sich als „Intuitionsmotor“ auffassen, mit dem man schnell ein Problem durchdringen und eine explizite Argumentation meist umgehen kann. Es lässt sich leicht entfalten, indem eine Handlung die nächste triggert. Allerdings repräsentieren mentale Simulationen nur fragmentarische, lokale Aspekte. Darüber hinaus erschwert der auf Erfahrungen der Alltagswelt beruhende mechanistische Charakter unserer Intuitionen den Zugang zu Konzepten moderner Physik.

Trotz der Beschränkungen steckt ein großes Potenzial im impliziten, prozeduralen Denken. Es spricht einiges dafür, dass kreative Verknüpfungen eher im modellbasierten und nicht im logischen Modus ablaufen. Der relativ mühelose intuitive Umgang mit mentalen Simulationen ist prädestiniert dafür, vielfältige Möglichkeiten zu erkunden und Neues zu entdecken. Komplementär dazu benötigt man die logisch rationale Sicht, um die kreativen Denkmöglichkeiten an der Wirklichkeit zu testen. Kreativitäts- und Abstraktionsleistungen entstehen aus dem Zusammenwirken dieser beiden komplementären Hauptformen unseres Denkens.

Aktiv Lernen

Als Konsequenz für die Lehre gilt es, theoretisch-konzeptuelle und experimentell-praktische Zugänge besser zu verschränken. Expe-

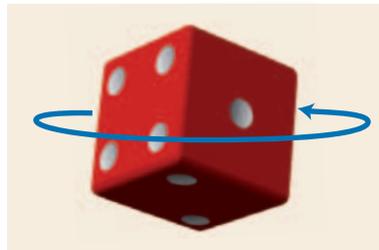


Abb. 3 Schließen Sie die Augen und stellen sich einen Würfel vor, der auf eine Ecke gestellt wird und um die Raumdiagonale rotiert. Welche Bahnen beschreiben die anderen Ecken?

rimentelle Arbeiten sollten den aktiven Wissenserwerb unterstützen. Eine Episode aus der eingangs erwähnten Videostudie möge dies verdeutlichen.

Der Lehrer demonstriert den Oersted-Versuch und zeigt, wie das Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters eine Magnethöhle ablenkt. Um das Phänomen zu festigen, gibt er danach ein Kabel an die Klasse. Jeder Schüler hat eine Kompassnadel zur Verfügung und kann untersuchen, wie sie in der Nähe des stromführenden Kabels abgelenkt wird. Zweifellos ist dies ein schönes Experiment, weil es die Möglichkeit bietet, viel zu entdecken und zu modellieren. Als Beobachter erwartet man, dass der Lehrer auf ein für technische Anwendungen wichtiges Ergebnis hinarbeitet. Die Frage, wie sich das schwache Magnetfeld eines Leiters verstärken lässt, steht im Raum. Die Lernenden hätten es buchstäblich in der Hand, aus dem Kabel eine Leiterschleife und schließlich eine Spule zu formen. Doch der Lehrer stößt nichts dergleichen an. Stattdessen geht er im Stoffplan weiter und demonstriert das Magnetfeld einer Spule selbst.

Diese Episode ist exemplarisch dafür, wie die mit dem Experimentieren verbundenen Lernmöglichkeiten für die Visualisierung und mentale Modellbildung unzureichend ausgeschöpft werden. Trotz vieler Experimente vermittelt der Unterricht vor allem Fakten. Die für ein nachhaltiges Lernen und Verstehen unabdingbaren eigenständigen Konstruktionsleistungen der Lernenden entfalten sich kaum. Nur selten entwickeln und prüfen Schüler eigene Ideen und finden mögliche Anwendungen.

Flügel des Geistes

Unsere pädagogischen Bemühungen sollten stärker darauf zielen, physikalisches Arbeiten als einen kreativen Prozess erlebbar zu machen. Dazu ist nicht immer eine aufwändige Laborumgebung erforderlich. Bereits mit Alltagsmaterialien gelingt es, ein experimentelles Spiel anzuregen, das komplexe Modellierungsprozesse anstößt. Das folgende Beispiel vermittelt weitreichende Ideen zur Strukturbildung und veranschaulicht Prinzipien, die für die Dynamik von Lebensprozessen bedeutsam sind.

Dazu ist ein gewöhnlicher Gummiring erforderlich, den man dehnt und mehrere Dutzend Male verdrillt. Verkürzt man dieses helixartig gewundene Band, entstehen bei einer gewissen Länge schleifenartige Objekte (**Abb. 4**). Bei kompletter Entspannung bildet das Gummiband ein knäuelartiges dreidimensionales Gebilde. Dehnt man das Band langsam wieder, entfalten die Schleifen sich. Wir kennen den Effekt aus dem Umgang mit aufgerollten Rasenmäherkabeln oder Gartenschläuchen. Sie verdrillen beim unachtsamen Entrollen und können „verwursteln“. Was uns im Alltag stört, hat die Evolution kreativ genutzt.

Das Gummiband ist ein makroskopisches Modell für die Strukturbildungsprozesse bei der Proteinfaltung: Aus der Faltung einer eindimensionalen Polypeptidkette entstehen reproduzierbar komplexe dreidimensionale Gebilde,

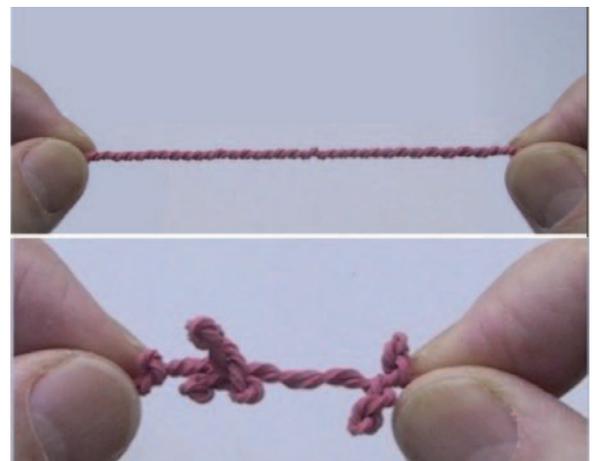
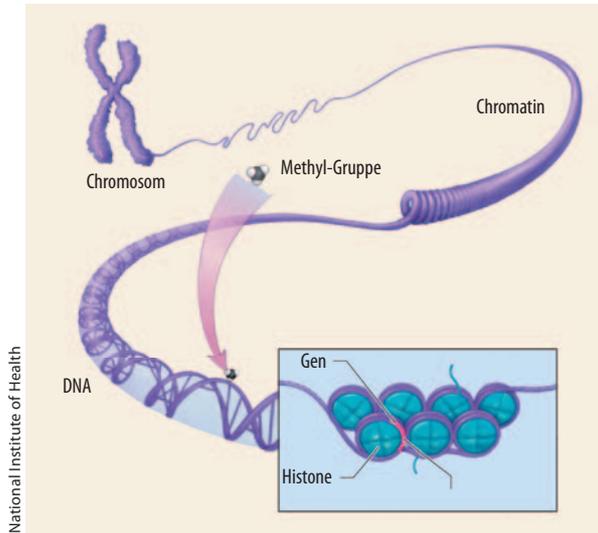


Abb. 4 Verdrillt man ein Gummiband (oben) und verändert dann die Zugspannung, so bilden sich Schleifen (unten).



National Institute of Health

Abb. 5 Der rund zwei Meter lange DNA-Faden bildet ein Chromosom, das einen Durchmesser von nur 1,5 μm hat. Dazu wird der Faden um Proteine, die Histone, herumgewickelt. Die dabei entstehende Struktur wird perlschnurartig aneinandergereiht.

die in der Zelle Lebensprozesse aufrechterhalten. Eine quantitative Auswertung der Ziehexperimente ermöglicht Einsichten über energetische und entropische Prozesse bei der elastischen Verformung von Polymeren [12].

Bei höheren Lebewesen besteht das Problem, die in der Basensequenz des DNA-Strangs gespeicherte genetische Information im Zellkern kompakt, aber leicht zugänglich unterzubringen. Dabei spielt Schleifenbildung eine wichtige Rolle [13]. Die DNA-Doppelhelix ist inhärent gewunden und schlingt sich um Proteinmoleküle. Dieser Komplex kondensiert zu einem größeren Strang, der wiederum neue Schleifen bildet (Abb. 5). Diese lassen sich zum Ablesen leicht entpacken. Die Aktivierung und Deaktivierung dieser Chromatin-Schleifen ist Grundlage der Expression und Regulation von Genen [14].

Magie kreativer Verwandlungen

Die Beispiele unterstreichen die produktive Rolle experimenteller Handlungen, um abstrakte Prinzipien zu erschließen. Experimente sind mehr als nur Werkzeuge, um Ideen zu verkörpern und Theorien in der Wirklichkeit zu testen. Sie sind auch Flügel unseres Geistes, um Möglichkeiten konkret oder in Gedanken auszuloten und

Neues zu erschaffen. Sie regen Analogiebetrachtungen und Modellbildungen an, die weit über den engeren mechanischen Kontext der Experimente hinaus weisen.

Die Verwandlungen des Gummiband-Universums machen einen magischen Moment begreifbar: In komplexen Systemen können neue Strukturen entstehen, wenn man die Randbedingungen geeignet verändert. Physikalisch lassen sich die Verwandlungen des Bandes in der Sprache dynamischer Systeme modellieren. Ob unsere produktiven geistigen Prozesse in ähnlicher Weise physikalisch reduzierbar sind, ist Gegenstand philosophischer Kontroversen. Die Parallelität verweist auf die Möglichkeit universeller dynamischer Prozesse, die der Bildung und dem Erkennen von Strukturen zugrunde liegt. Die Vermutung liegt nahe, dass diese Universalität unser analoges, modellbasiertes Denken ermöglicht und trotz mancher Sackgassen und Rückschläge letztlich so erfolgreich macht.

Kreative Potenziale fördern

Dieser Artikel stellt die generative Rolle des Experimentierens bei der Entwicklung produktiver Ideen in den Vordergrund. Hier bestehen weiterhin große Herausforderungen an die Lehre. Physik als Schulfach leidet unter einem wenig kreativen Image. Dieses müssen wir verbessern, wenn wir die dringend benötigten kreativen Köpfe für die Naturwissenschaften gewinnen wollen. Zum Negativimage tragen Unterrichtsmethodik und Stofffülle bei. Das Standardmodell der Lehre ist noch immer das fragend-entwickelnde Gespräch. Entsprechend dem erwähnten systematischen Wissenschaftsideal liegt der Fokus auf der logisch-linguistischen Vermittlung von Wissen über Physik. Das physikalische Arbeiten, insbesondere das eigenständige Handeln im Rahmen des Modellierens und Experimentierens, kommt zu kurz.

Physikalische Erkenntnis entsteht aus dem produktiven Zusammenspiel von formell-systematischen mit informell-explorativen

Prozessen. Forschend zu lernen ist ein ebenso natürlicher wie authentischer Zugang zu Naturwissenschaften und Technik, der ein offenes, herausforderndes, aber zugleich auch ein systematisch strukturiertes und unterstützendes Lernumfeld erfordert – eine Balance, die eine hohe fachliche und pädagogische Qualifikation der Lehrkräfte voraussetzt. Die didaktische Forschung steht weiter vor der Aufgabe, die Bedingungen des Lernens durch Experimentieren systematisch zu klären. Wir wissen insbesondere noch zu wenig darüber, wie Lernende im Verlauf ihrer kognitiven Entwicklung aus konkreten Interaktionen zunehmend abstrakte Vorstellungen aufbauen. Dass man sich in der Früherziehung und im Grundschulbereich verstärkt um naturwissenschaftliche Experimente kümmert, macht Hoffnung. Doch wir sind weit davon entfernt, in den weiterführenden Gliedern der Bildungskette diese erneuerte Kultur des naturwissenschaftlich-technischen Experimentierens, Modellierens und Konstruierens so umzusetzen, wie es wünschenswert wäre. Hier sind Schule und universitäre Lehrerbildung gefordert.

- [1] K. Engeln und M. Euler, *Physik Journal*, November 2004, S. 45
- [2] M. Tesch, *Das Experiment im Physikunterricht*, Logos, Berlin (2005)
- [3] M. Prenzel et al. (Hrsg.), *PISA 2006 in Deutschland*, Waxmann, Münster (2008)
- [4] R. Giere, *Science without laws*, Univ. Chicago Press, Chicago (1999)
- [5] D. Bailer-Jones, *Int. Studies in the Philosophy of Science* 17, 59 (2003)
- [6] I. Hacking, *Representing and Intervening*, Cambridge Univ. Press, Cambridge (1983)
- [7] R. Crease, *The Prism and the Pendulum: The Ten Most Beautiful Experiments in Science*, Random House, New York (2003)
- [8] F. Steinle, *Physik Journal*, Juli 2004, S. 47
- [9] L. Barsalou, *Annu. Rev. Psychol.* 59, 617 (2008)
- [10] M. Hegarty, *Trends in Cognitive Sciences* 8, 280 (2004)
- [11] P. Kirschner, J. Sweller und R. Clark, *Educational Psychologist* 41 (2), 75 (2006)
- [12] M. Euler, *Physics Education* 43, 305 (2008)
- [13] H. Schiessel, *J. Phys.: Condens. Matter* 15, R699 (2003)
- [14] P. Fraser und W. Bickmore, *Nature* 447, 413 (2007)