

FLORIAN THEILMANN

Physikalisches Verstehen als fachbezogene Kompetenz

Understanding physics – a content specific competence

Zusammenfassung

Das Problem, dass Schüler die Unterrichtsinhalte des Physikunterrichtes in "Hybridmodellen", also unphysikalischen "Modellmischungen" konzeptualisieren, wird erkenntnistheoretisch und im Hinblick auf die Anforderungsbereiche des Kompetenzbereichs Fachwissen der Bildungsstandards hin analysiert. Aus beiden Gesichtspunkten heraus ergibt sich die Perspektive auf die fachbezogene Kompetenz eines *spezifisch physikalischen Verstehens*, das inhaltlich, im Sinne der Bildungsstandards und unter dem Gesichtspunkt von *scientific literacy* charakterisiert wird. Die Fragen nach pädagogischen Voraussetzungen und Implikationen dieses Verstehens werden bis hin zu Vorschlägen für dessen schulisches Erfassen und (alternative) Curricula verfolgt.

Schlüsselwörter: Verstehen, fachbezogene Kompetenzen, Bildungsstandards, Interesse, physikalische Modelle.

Abstract

It is a common problem that students conceptualize the physics taught in a hybrid and inconsistent mixture of different models. We analyze this situation both epistemologically and with respect to the standards and *scientific* Here the demand for a specific competence of *physical understanding* emerges which is characterized as regards content and with respect to the standards of education. We pursue the question of pedagogical premises and implications and give suggestions for empirical testing and curricular implementation.

Keywords: Understanding, Competence, Standards of Education, Interest, Physical Models.

1 Einleitung

Die Frage danach, wie Physikunterricht gelingt, gestaltet oder verbessert werden kann, ist auch die Frage danach, wie Denken innerhalb der Physik funktioniert. Physikalische Fragestellungen oder Phänomene werden im Allgemeinen im Kontext von (u. U. konkurrierenden) Modellvorstellungen gestellt bzw. bedacht, und so wird Physik auch gelehrt. Es ist daher konsequent, dass in den letzten Jahren "Modellkompetenz" und "Lernen über Modelle" verstärkte Aufmerksamkeit erfahren (Mikelskis-Seifert, 2002; Leisner, 2005; Mikelskis-Seifert, 2006). Die damit umrissene Praxis der Konzeptualisierungen im Physikunterricht erweist sich im "wahren Leben" allerdings schnell

als höchst unphysikalisches Durcheinander: die Schüler leben erschreckend oft mit "Hybridvorstellungen", in denen Sprech- und Denkweisen aus völlig verschiedenen Modellzusammenhängen vermischt werden, um Beobachtungen oder Problemstellungen einer (offenbar für wünschenswert gehaltenen) Scheinerklärung zuführen zu können. Die Analyse des damit gestellten Problems – die hier durch das Okular einer "erscheinungsorientierten" oder an Wagenschein orientierten Physik vorgenommen wird – eröffnet den Blick auf zweierlei: Es werden einerseits pädagogische Gesichtspunkte sichtbar, die fordern, ein *spezifisch physikalisches Verstehen* und ein damit eng verbundenes *exploratives Interesse* als fachbezogene Kompetenzen ernst zu nehmen,

zu erforschen und zu fördern. Zugleich wird deutlich, dass sich dieser bisher wenig beachtete Aspekt der komplexen Wirklichkeit von Lernen und Lehren differenziert und konstruktiv auf die Begrifflichkeit der Bildungsstandards beziehen lässt.

2 Hybride Erklärungsstrategien von Schülern

In Martin Horns jüngst vorgelegter Dissertation (Horn, 2007, 209 ff.) findet sich das Transkript eines Schülerinterviews, das mit der Frage "Was stellen Sie sich unter Licht vor?" beginnt. Martin Horn interessiert sich im Umfeld von Unterricht zum Thema Holographie dafür, wie und warum Schüler Modelle benutzen, wenn sie aufgefordert werden, einen physikalischen Sachverhalt zu schildern. Ein Auszug aus dem "prototypischen" Dialog von Interviewer und Schüler – nachdem die Stichwörter Strahlen-, Wellen- und Teilchenmodell gefallen und ein wenig dargestellt sind – geht es um eine (graphische und inhaltliche) Darstellung des Wellenmodells:

- I: *Also, eine Welle wandert praktisch von einem Punkt zum anderen?*
- S: Nein, eine Welle ist an und für sich konstant, oder? Ja, genau. Naja, was heißt konstant? Eine Welle ist Träger einer Information oder ein Teilchen wandert auf der Welle entlang.
- I: *Aba. Wo ist denn hier das Teilchen jeweils? Wenn Sie mir das mal kurz zeigen könnten?*
- S: Das beschreibt diese Bahn. (S. zeigt auf die Sinuskurve.)

Die Liste solcher Zitate, von hilflosen Versuchen, Zusammenhänge rund um die Interferenzerscheinungen einigermaßen frei und zusammenhängend aus den Schülern

herauszuholen, ließe sich leicht verlängern (Horn, Leisner & Mikelskis, 2002; Mikelskis & Rabe, 2006). Und man fühlt sich zwanglos an eigene Erlebnisse mit eigenen Schülern erinnert, oder an die keineswegs weniger abenteuerlichen Exkurse zur Physik, die man mit Studenten mittleren Semesters zu eigentlich gar nicht exotischen Fragen wie "Warum wärmt ein Schlafsack?" oder elementaren Sachverhalten wie dem hydrodynamischen Paradoxon haben kann. Oder allerdings auch an ernsthafte fachliche Diskussionen, in denen versucht wird, einen noch fremden Sachverhalt mit den Vorstellungen, die einem eben zur Verfügung stehen, näher zu kommen. Letztlich gehört auch die schon klassische Aussage, am Doppelspalt gehe das Elektron durch beide Spalte, genau in diese Kategorie unorthodoxen Argumentierens.

Was mit der Vermischung von Inhalten und Denkbewegungen verschiedener Modelle verfehlt wird, ist die eindeutige (Re-)Konstruktion der Erklärung für das physikalische Phänomen, die ja der Zweck des Modells war.¹ Erfolg oder Misserfolg spiegelt sich nicht nur in den Interviews, sondern lässt sich durch *concept mapping* quantitativ erheben; Martin Horn schlussfolgert (Horn, 2007, 212), dass in seinem Problemzusammenhang Schülerinnen und Schüler, die eine ausgeprägte Trennschärfe zwischen den unterschiedlichen Lichtmodellen vornehmen und die Modelleigenschaften in differenzierter Weise beschreiben oder zumindest anwenden können, die Beschreibung der physikalischen Grundlagen weit besser gelingt als Schülern, die eine ausgeprägte Modellmischung aufweisen. Sie (offenbar erstere, FT) erklären die Holographie in der Regel nahezu konsistent.

¹ Zum Thema "Eindeutigkeit" des Erklärens vgl. auch die Dissertation von Susann Hartmann (Hartmann, 2004)

3 Erklären: Zurückführen auf Modelle

Hier lohnt es sich innezuhalten und sich anzusehen, was von den Schülern eigentlich verlangt wird: Sie sollen etwas erklären und dazu "konsistent" Modelle benutzen. "Modelle" sind hier nicht irgendwelche Abbilder der Wirklichkeit, sondern maßgeschneiderte Vorstellungen von der Sache, die mit dem Ziel einer mathematischen Modellierung des Sachverhalts formuliert werden. Ein solches *Erklärungsmodell* ist typischerweise eine Schilderung des beobachteten Vorgangs oder Sachverhaltes in einer Sprechweise, die einen anderen, als elementar vorgestellten Vorgang als Referenz benutzt. Eine archetypische Form dieser Art naturwissenschaftlichen Denkens ist etwa die Schilderung des klassischen Atomismus im Bestseller *Sophie's Welt* (Gaarder, 1999) – nämlich die Zurückführung der vielfältigen Gegenstandswelt auf die atomistischen "Legosteine", die schlicht verschieden zusammengesetzt werden. Die Grundfigur ist, dass die komplizierte Natur verständlicher erscheint, indem sie als konstituiert von überschaubar vielen Grundprinzipien und -vorgängen gedacht wird. Das Nachdenken über die Welt findet damit allerdings nicht mehr "in der Welt" statt: Der Erfahrungswelt wird eine Nebenwelt mit eigenen Gesetzen und Inhalten an die Seite gestellt, diskutiert wird nicht die Erfahrungswirklichkeit, sondern eine Art "Gleichnis"².

Für den, der in diese Art Denken eingeführt wird, stellt sich damit aber eine neue Frage: Wie wirklich ist diese Nebenwelt, ja, ist sie vielleicht *wirklicher* als die Erfahrungswelt (weil es ja "eigentlich" so ist)? Indem sich das Nachdenken über die Sache hier in verschiedene Ebenen verzweigt, wird zugleich eine metakognitive Auseinandersetzung eröffnet (Mikelskis-Seifert, 2002). Das populäre naturwissenschaftliche Den-

ken gerät hier in eine Spannung zwischen einem besänftigenden "ist doch nur ein Modell!" einerseits und der selbstverständlichen Tradition der Kant'schen "Dinge an sich" (eventuell verbunden mit der psychologische Tatsache einer Sehnsucht nach einfachen Antworten). Es droht ein Kurzschluss, im dem der Modellwelt und den "Modell-Dingen" dieser Status zugewiesen – und weiteres Nachdenken eingestellt – wird. Doch vor dem Bekenntnis zu einer bestimmten Form physikalischen Denkens liegt die Einsicht, dass es um eine denkerische Auseinandersetzung mit der durch Alltag und Experimente gegebenen Erfahrungswirklichkeit gehen muss – nur dann ist Physik *empirische* Naturwissenschaft. Das heißt, der Wirklichkeitscharakter der im Modell gegebenen "Nebenwelt" bemisst sich nicht an der vermeintlichen Wirklichkeit der Nebenweltsgegenstände (also an einer vorausgesetzten Wirklichkeit des verwendeten Bildes), sondern an der Äquivalenz der damit implizierten Struktur *möglicher Erfahrung* mit der Struktur *tatsächlicher Erfahrung*. Die Realitätsfrage lässt sich somit auch pragmatisch stellen – gegenüber dem Schattenwurf sind Lichtstrahlen und ein vorgestellter Teilchenfluss in der Beleuchtung "gleich wahr", gleich real, *weil gleich plausibel*. Anders gesagt: nicht die Strahlen oder Teilchen sind wirklich und deshalb erklärend, sondern es geht schlicht um *Angemessenheit* des verwendeten Bildes, um Kompatibilität zur Beobachtung und um prediktives Potenzial. Der tastbare Kristall ist wirklich, ist äußerliche Tatsache, wir können ihn sehen und anfassen und anderes mehr; sein Zusammengesetztsein aus Atomen steht außer Zweifel, doch ist *deren* Wirklichkeit etwa durch die Stöchiometrie oder Beugungsexperimente gegeben, sie muss ohne die geschilderte Realitäts-Rückversicherung einer Anfassbarkeit auskom-

² Offenbar war ein Gutteil der zähen Rezeption Newtons bei seinen Zeitgenossen dessen expliziter Ablehnung dieser Art naturwissenschaftlichen Argumentierens geschuldet, vgl. (Newton, 1983).

men und ist damit ontologisch von einer grundsätzlich anderen Art.³

Dabei sind uns verschiedene Modelle allerdings verschieden zugänglich oder sympathisch: Dirac soll bei seiner Formulierung der Quantenmechanik von seiner Expertise in projektiver Geometrie profitiert haben, Werner Heisenberg von seiner Vertrautheit mit der Gedankenwelt der Antike; immer wenn Atome oder Elektronen ins Spiel kommen, sprechen teilchenhafte Modellvorstellungen uns durch ihre Anschaulichkeit und "Handfestigkeit" an, vielleicht weil sie an die Selbstverständlichkeit des Im-Leib-Steckens appellieren. Wenn hier die Wirklichkeitsfrage nicht sauber gestellt und beantwortet wird, stehen zumindest im Unterricht (zu) schnell Modellvorstellungen mehr oder weniger gleichberechtigt neben, ja vielleicht sogar über der Erfahrungswelt. Diese Vielheit von möglichen "Bezugssystemen" bildet die Umgebung für die *Erklärungskompetenz*, die oben in Sachen Holographie versuchsweise abgefragt wurde – es galt dort, die wesentlichen Charakteristika realer holographischer Experimente zu kennen und sie jeweils im Rahmen *eines* angemessenen Erklärungsmodells deuten, also interpretieren zu können.

4 Verstehen vs. Erklären

Naturwissenschaftliche Einsicht wird in diesem gedanklichen Milieu schnell synonym dafür, jeweils ein schlagkräftiges oder wenigstens plausibles Erklärungsmodell parat zu haben. Das ist für den Unterricht nicht unbedingt ein Problem: entlang von Themen werden bestimmte Lerninhalte – nämlich Erklärungsmodelle – angeboten, deren erfolgreiche Aneignung in diesem eingeschränkten Rahmen gut funktioniert und geprüft werden kann. Abbildung mit Linsen: Geometrie mit "Strahlen"; Photoeffekt: eine

Art Lichtatomismus; Interferenz: Quasimaterielle Wellen. Ein Schema des Typs "Stichwort – Erklärung bzw. Erklärungsmodell" für die Verknüpfung von Inhalten heißt in der Informatik "assoziative Liste" oder *hash*. So bemisst sich physikalisches Verständnis am Umfang und an der Korrektheit der Listeneinträge, und an der Kompetenz, sie gegenüber physikalischen Themenstellungen aufzurufen. Umgekehrt: Wenn ein Schüler oder Student aus der Rolle fällt und Modelle mischt bzw. nicht die orthodoxe Erklärungsvariante reproduziert, verstößt er gegen die Spielregeln, denn er soll die verschiedenen Erklärungsmodelle kennen *und* auseinanderhalten können. Naturwissenschaft erscheint analog zum Problem, sich als Neuling mit der Etikette eines fremden Königshauses oder Clubs zurechtzufinden. Das mulmige Gefühl, das sich gegenüber dieser Lesart von naturwissenschaftlichem Denken einstellen kann, korrespondiert damit, dass sich damit das eigentliche Projekt, nämlich etwas von der Welt außerhalb des Klassenzimmers verstehen zu wollen, zu verflüchtigen droht. Die Auseinandersetzung zwischen Schüler und Lehrer dreht sich intensiv und differenziert um Inhalte, um Gedanken und Gedankenbewegungen, die sich immer weniger auf ein Verstehen-Wollen von *physis*, also Natur im weiteren Sinn, richten, sondern – wie in einem mathematischen Gedankengebäude – um vorgestellte Inhalte, um deren Konsistenz und um deren ordentliche Verwaltung. Wenn Modellmischung ein Problem ist, muss die Lösung nicht ein Training hin auf sauber ausdifferenzierte Modelltrennung oder eine "Modellkompetenz" als solche sein. Im Sinne des oben formulierten Anspruchs von Physik, über Naturgeschehen nachdenken zu wollen, braucht es nicht einfach "mehr Ordnung" im Kopf des Lernenden, sondern zuerst Bewusstsein für den Kontext, der die Bilderwelt des Modells legi-

³ Für das analoge Beispiel der Unterscheidung einer mechanistischen und einer "optischen Optik" vgl. Berkeley (1975) Maier (1993) und Grebe-Ellis (2005).

timiert. Für Interferenzerscheinungen oder Holographie ginge es so etwa nicht darum, dem Schüler möglichst dauerhaft einzuprägen, warum das Photonenbild – das doch das modernste Modell in der Reihe ist! – jetzt doch wieder nicht gut sein soll und wo das aber dennoch anzuwenden ist, sondern ihn an die Einsicht heranzuführen, „*dass Licht zu periodischen Phänomenen fähig ist*“ (Wagenschein, 1970).⁴ „Wellenoptisch“ daran ist, dass die Helligkeit geometrisch denselben Regeln folgt wie vorgestellte Muster aus Wellen entsprechend kleiner Wellenlänge unter entsprechenden Reflexionsbedingungen.

Mit anderen Worten: Modelldenken ist eine Form physikalischen Argumentierens im Unterricht, die aktuelles *Verstehen* von Phänomenen verfehlen kann, ohne dass Kategorien wie „falsch“ und „richtig“ greifen würden. Beide Zugriffsmodi, „Erklären“ und „Verstehen“, gehen auf eine gedankliche Verarbeitung physikalischer Erscheinungen und Fragen, doch im ersten Fall *funktional*, mit dem Ziel einer Einordnung in einen vorauszusetzenden, bestehenden Diskurs, im zweiten Fall mit dem Ziel einer „Rationalisierung“, einer persönlichen und adäquaten kognitiven *Aneignung*, die versucht, einzelne Fakten und Inhalte zu integrieren, zu vertiefen und möglichst das „wie wenn“, das Bewusstsein von gemachten Analogien bewahrt. Wenn die Sache so ausgesprochen ist, ist auch der Wert von Modellen klar ansprechbar – etwa, dass sie prägnant den Rahmen für Begriffe und Denkbewegungen geben, die das Verstehen braucht, oder dass sich an ihnen wissenschaftlicher Diskurs studieren und üben lässt.

5 Verstehen als eigenständige Kompetenz

Die oben skizzierte Gegenüberstellung von einem auf „Erklären“ zugeschnitten Umgang mit Physik und dem Versuch, Schüler zum „Verstehen“ zu bringen, lässt sich auf die Frage naturwissenschaftlicher bzw. physikalischer Kompetenz im Sinne der deutschen Bildungsstandards (Kultusministerkonferenz, 2004b) abbilden.⁵ Die KMK sagt offen (Kultusministerkonferenz, 2004a, S. 5), dass der Akzent auf fachbezogene Kompetenzen wesentlich durch die Ergebnisse internationaler Vergleichsstudien zu Bildungsleistungen (i. e. durch den darüber entstandenen öffentlichen Druck) motiviert ist – Bildungsstandards sind mit Zielblick gesetzte „Wissensnormen“. Die Präambel zu den Bildungsstandards im Fach Physik hält fest: „Die in vier Kompetenzbereichen festgelegten Standards beschreiben die notwendige physikalische Grundbildung.“ Der Topos einer *notwendigen physikalischen Grundbildung* ist hier weniger harmlos, als es auf den ersten Blick scheinen mag – notwendig *wofür?* Die Hybridvorstellungen und fortgeschrittene Varianten des Umgangs mit Modellen lassen sich in diesem konzeptionellen Rahmen als Kompetenzstufen des Umgangs mit einem physikalischen Inhalt im Bereich Fachwissen schildern, die Basiskonzepte (mehr oder weniger) adäquat benutzen bzw. integrieren. So können wir sagen, Hybridvorstellungen sind in der Dimension „Anforderungsbereiche“ (ABe) des KMK-Kompetenzmodells noch (defiziente) Spielarten der „Wiedergabe“, korrekte Mo-

⁴ Wenn zwei Lichtquellen (z. B. durch Immer-näher-Rücken) für den Betrachter ununterscheidbar werden, gliedern sich die Sichtbeziehungen periodisch in räumliche Bereiche gesteigerter Helligkeit („konstruktive Interferenz“) und von verhinderter Sicht („destruktive Interferenz“). Zum Verstehen gehört, diese Erscheinungen systematisch an Beugungerscheinungen oder die Optik dispersiver Medien anzuschließen.

⁵ Die KMK folgt bekanntlich der Kompetenzdefinition von Weinert (Weinert, 2001): Kompetenzen sind „die bei Individuen verfügbaren oder durch sie erlernbaren kognitiven Fähigkeiten und Fertigkeiten, um bestimmte Probleme zu lösen, sowie die damit verbundenen motivationalen, volitionalen und sozialen Bereitschaften und Fähigkeiten, um die Problemlösungen in variablen Situationen erfolgreich und verantwortungsvoll nutzen zu können“.

dellverwendung reicht dagegen mindestens hinein in den AB "Anwendung". Eine Einordnung hin auf *scientific literacy* (SL) (Bybee, 1997) würde ein hybrides Argumentieren mit Modellmischungen als Symptom bloß nominaler SL nehmen, während das Lernziel "konsistentes Erklären" auf eine funktionale SL geht.

Die nächste Kompetenzstufe wäre dann im Jargon der ABe der "Transfer" bzw. im Jargon der SL "konzeptionelle und prozedurale SL". Der damit implizierte Kompetenzschritt ist dabei von der Art wie der, den wir oben zwischen "Erklären" und "Verstehen" beschrieben haben – diese nächsthöhere Stufe von SL ist definiert als (Schecker & Parchmann, 2006)

Verständnis zentraler naturwissenschaftlicher Ideen und Verfahren, Herstellung von Beziehungen zwischen Fakten, Begriffen und Prinzipien, naturwissenschaftliche Fragestellungen und Untersuchungsmethoden erkennen und anwenden.

Das den Kompetenzstufen der KMK zugrundeliegende Kompetenzstrukturmodell ist erklärtermaßen zunächst auf "Stoffvermittlung" ausgelegt⁶, und das impliziert, Transferfähigkeit bzw. konzeptionelle SL ergäbe sich (oder ließe sich anschließen), wenn "nötige Grundbildung", also ein bestimmter Stand in nominaler und funktionaler SL erreicht ist. Die Fähigkeit, Natur zu verstehen, erscheint in Form höherer Kompetenzstufen, die zwar zum bewährten Kanon pädagogisch-didaktischer Ziele gehören, sich aber nicht geradlinig aus Stoffwiedergabe oder -anwendung ableiten lassen. Die "Innenseite" von Transferfähigkeit oder konzeptioneller SL ist z. B. ein noch einzugrenzendes, spezifisch "exploratives Interesse" für die Um-

und Mitwelt⁷ und das, was in ihr stattfindet. Daneben geht es um eine fachbezogene gedankliche Beweglichkeit, es geht darum, neue Fragen und Probleme im Fachkontext zunächst überhaupt als solche zu erkennen und dann diese nicht nur in konvergenten, sondern auch in divergenten Denkbewegungen zu adressieren und schließlich auch zu integrieren. So beinhaltet "Verstehenskompetenz" eine grundsätzlich andere Haltung zur Welt, die in der Schule Gelerntes ins Leben trägt – und erst dann wird Wissen zu Bildung.⁸

Insgesamt herrscht also Konsens, dass physikalisches "Verstehen" (im skizzierten Sinn) auch im Sinne der Bildungsstandards ein zentrales Motiv oder gar das eigentlich Anzustrebende ist – ein Verstehen, das sich in selbstständig gefundenen neuen Ideen und Fragen äußern muss, das neue Aspekte und Widersprüche zu altem Wissen sucht, und also *nicht* ohne Bruch innerhalb des in den Bildungsstandards gegebenen Rahmens zu erreichen ist. Hier muss allerdings erneut Unbehagen aufkommen: Im Bekenntnis zu einer "Verstehenskompetenz", die über einen virtuoseren Umgang mit mehr oder weniger komplexen Erklärungen hinausgeht, liegt damit auch die Herausforderung, das Erreichen oder Nicht-Erreichen dieses Ziels letztlich nicht an Regelanforderungen, sondern am Lernenden und letztlich sogar an außerschulischen Gesichtspunkten festzumachen. Wenn die Sache einmal so ausgesprochen ist, ist also auch die Frage gestellt, wie wir dann diese Kompetenzstufe – oder eben vielleicht eher: diese *andere, prozedurale und konzeptionelle Kompetenzform* empirisch erfassen, wie wir einen solchen Lern-

⁶ Man muss das Argumentarium der KMK (Kultusministerkonferenz, 2004a) an manchen Stellen so verstehen, dass Ziel der Bildungsstandards ist, einen Schulbetrieb zu implementieren, der in schultypischen Tests gut abschneidet, vgl. etwa die Antwort zu Frage 3 in (Kultusministerkonferenz 2004a).

⁷ Vgl. auch die Arbeiten von Friedrich Steinle zu Faraday oder Goethe (Steinle, 1998, 2006) – im übrigen sind diese beiden Männer nicht nur hervorragende Naturforscher gewesen, sondern auch sog. *fachwissenschaftliche Laien!*

⁸ Vgl. zum Thema "Kompetenz und Bildung" auch Höttecke (2006).

vorgang selbst verstehen und in Kompetenzmodellen abbilden⁹ – und *last but not least* wie wir dieser Situation pädagogisch gerecht werden.

6 Ein eingeschobenes Beispiel: Halbschatten

Die hohe Mittagssonne des Julis beleuchtet den Efeu am Aufgang des Hauses sehr steil von oben. Die wenigen Stufen sind praktisch genau nach Süden ausgerichtet und über der kleinen Plattform vor der Haustür liegt auf der Hausseite die deutliche Schattenlinie der Dachtraufe, auf der Seite des Geländers der unregelmäßige Schatten des Efeus. Spätestens der zweite Blick zeigt allerdings markante Unterschiede zwischen den beiden Schatten. Der Schatten des Dachs ist auffallend unscharf und wirkt auch weniger dunkel als der Schatten unterm Efeu. Letzterer erweist sich bei näherem Hinsehen allerdings selbst ebenfalls als zusammengesetzt (oder überlagert) aus Einzelschatten unterscheidbarer Blätter und Stengel, die selbst unterschiedlich scharf ausfallen. Eingehendere Untersuchung bringt eine einfache Struktur der Angelegenheit zutage: je näher der Schattenwerfer am "schattenzeigenden" Boden ist, desto schärfer und dunkler wird der geworfene Schatten. Die Sache mit dem Schatten ist also wohl komplizierter als oben in der Modelldebatte behauptet: Schatten ist gar nicht gleich Schatten und eine wirklich scharfe Schattengrenze scheint auch unter Bedingungen, die wellenoptische Effekte sicher ausschließen, nur von Gegenständen möglich, die sich sehr nahe am "Schirm" befinden.

Die Sache lässt sich natürlich vertiefen: warum ist das so? Ein verblüffend einfacher Gedanke erweist sich ganz ohne Konstruktion von Strahlengängen als ausgesprochen erhellend. Schatten, das sind die Bereiche

des Bodens, wo keine Sonne hin scheint, weil der Schattenwerfer sie verdeckt. Die unscharfen Randzonen erscheinen, weil es zwischen "Sonne ganz sichtbar" und "Sonne ganz verdeckt" Positionen gibt, von denen aus die Sonne *teilweise* sichtbar ist – es herrscht dort "Halbschatten". Gut, aber wie ist das: ein und dieselbe Sonne ist ja in allen Fällen Lichtquelle, wieso sind die Übergangsbereiche dann verschieden breit? Eine Antwort liefert die Gegenfrage: Was ist denn auf den Stufen an verschiedenen Orten *zu sehen*? Die verschiedenen Grade der Unschärfe von Schattenkanten sind unter diesem Gesichtspunkt Spielarten eines anderen optischen Genres, nämlich von Perspektive und Parallaxe: ein Käfer, der auf dem Schirm die Schattenzonen durchwandert, sieht die Sonne ("optisch unendlich fern") mitwandern und die Gegenstände seines Gesichtsfeldes sich gegeneinander verschieben. Die Halbschattenbereiche ergeben sich bei teilweise verdeckter Sonne; auf seinem Weg sieht er die immer noch ferne Dachtraufe ein wenig langsamer mitziehen (entsprechend einer breiten Halbschattenzone), das nahe Blatt aber schnell zurückbleiben (entsprechend einer schmalen Halbschattenzone). Und auch die verschiedenen Grade der Helligkeit klären sich aus der Käferperspektive sofort auf: Im Schatten des Daches ist immer noch ein großes Stück heller Himmel zu sehen, nicht aber direkt unter einem tiefen Efeublatt. Das Nebeneinander verschieden heller und verschieden scharfer Schatten unter eigentlich sonst recht vergleichbaren Entstehungsbedingungen leuchtet nun ein gutes Stück besser ein, die Ausgangsbeobachtung wurde in den Kontext ihres Zustandekommens eingebettet. Einmal darauf aufmerksam, findet man überall Gelegenheit, Beobachtungen dazu zu machen. Eine Haltestange im Türbereich einer Berliner S-Bahn kann Hauptdarsteller in einer furiosen Schau werden,

⁹ Für einen Versuch siehe Rehm (2006).

in der es zwischen scharfem Schlagschatten und den immer wieder erstaunlichen "hellen Schatten" vor dem Fenster vorbeiziehender Objekte eine Menge Physik zu sehen gibt. Am Sonnentaler unter einem sonnenbeschienenen Baum erscheint der Sonnenumriss, die Situation wird zur *camera obscura* unter freiem Himmel. Halbschatten erweist sich als noch reichlich ungenauer Begriff für eine breite Spanne von Beobachtungen, die sich wiederum einem allgemeineren optischen Prinzip unterordnen lassen: Lampe und Blende konkurrieren zwar gleichsam um Sichtbarkeit, sie bringen sich aber je nach Geometrie der Sichtverhältnisse zwischen den Polen "Sonnentaler" und "scharfer Schatten" gegenseitig zur Geltung – indem sie selbst zurücktreten (Maier, 1993, 2004).



Abb. 1: Schatten von Bäumen und Dach in der Wintersonne an einer Hauswand. Die verschiedenen Schatten sind – je nach Abstand – nicht nur sehr verschieden scharf, sie sind auch verschieden hell.

7 Integrierendes Denken im Angesicht der Erscheinung

Das Thema "Verstehen" wird periodisch neu erfunden und spielt etwa bei Martin Wagenschein und Autoren seiner Tradition eine zentrale Rolle (Wagenschein, 1999; Buck & Mackensen, 2006; Buck, 1996). Als "genuines Verstehen" ist es der Schlüsselbegriff, wenn es gilt, das reale Sich-Verbinden einer Erfahrung mit einem Deutungskontext (im Gegensatz zu gleichsam bloß nachahmendem oder reproduzierendem, im obigen Sinn "nominalem" Verstehen) anzusprechen (Rehm, 2006; Aeschlimann & Buck, 2007). Es ist nötig, ein hohes Maß an begrifflicher Schärfe zustande zu bringen, um auch nur die wichtigsten Differenzierungen der kognitiven Aktivitäten sichtbar zu machen, die das Begriffsfeld "Verstehen" abdeckt – und dabei zugleich eine ernsthaftere Herausforderung. Der voranstehende Exkurs möge erhellen, in welcher Art "Verstehen" hier in den Blick genommen werden soll: Verstehen meint hier einen vom Lernenden aktiv durchzumachender *Prozess*, in dem ein Problem gestellt, begrifflich durchdrungen und das damit Erreichte *universalisiert* wird. Es geht solange weiter, wie buchstäblich *interesse*, Beteiligung gewährleistet ist. Das Verstehen-Wollen, das Eintreten auf eines der gemachten Angebote, ist dabei eine innere Bewegung, die wir dem Schüler nicht abnehmen können, eine Bewegung hin auf das Teilnehmen- oder Dabeisein-Wollen mit dem Gebotenen.

Die Disziplin Physik zu lehren verlangt nun aber mehr als nur Wecken und Binden von Interesse im Sinne von Neugier, von Sympathie, von Zuschauen- oder Unterhalten-sein-Wollen – Physik wird zur Physik, indem sie ihre Themen *auf ihre Art* integriert, sammelt, aufeinander bezieht. *Physikalisches Verstehen* ist die Fähigkeit, immer selbstständiger einen immer größer werdenden Kreis von Erscheinungen und Fragestellungen auf solche Art zu bedenken. Teilgebiete der Physik, etwa Mechanik, Optik, Wärmelehre etc., bezeichnen einerseits charakteristische

Situationen und ebenso charakteristische Sätze potentieller Erfahrungen, die in solch typischen Situationen zu machen sind. Andererseits hat jedes Teilgebiet ganz bestimmte Begriffe und Methoden hervorgebracht, die diese Erfahrungen ordnen und aufeinander beziehen – etwa im Gebiet der Mechanik “Kräfte, Trägheit, Impuls”, im Gebiet der Optik “Helligkeit, Farbe, Sichtverbindung, optische Wege”, in der Wärmelehre “Temperatur, Wärmekapazität, Entropie”. Ein physikalisches Problem entsteht, indem eine Erfahrungssituation – eine Alltags- oder Naturerfahrung, ein Experiment etc. – in physikalischen Begriffen beschrieben und auch *befragt* wird. Eine eventuelle Antwort entsteht in einem spezifisch physikalischen Diskurs – hierher gehören Modellierungen, oder aber Überlegungen wie die des obigen Exkurses. Diese Antwort wird dann wiederum im Allgemeinen noch keine Bedeutung für die Erfahrungswelt haben – sie muss dafür nicht nur gleichsam zurückübersetzt, sondern auch in ihrer *Relevanz*, ihren Implikationen und in ihrer Bedingtheit interpretiert werden. Insgesamt schauen wir auf einen gedanklichen Prozess, der “Bedeutung schafft”, indem Tatsachen durch sachgemäße Konzeptualisierung aufeinander bezogen werden. Diese kognitive Aktivität ist nicht mehr nur reproduktiv oder anwendend, wenn der Lernende diesen Integrationsprozess selbst sucht und führt – die nächste Kompetenzstufe ist erreicht.

Der Lehrende wird dabei immer mehr zum Partner: Das Leben ist gleichsam gepflastert mit Gelegenheiten, vermeintlich Bekanntes unter neuen Gesichtspunkten zu entdecken, Gelegenheiten, die im Unterricht geteilt werden können und keineswegs notwendig vom Lehrer zum Schüler weisen. Wenn wir neben dem stoff- oder prüfungs-orientierten, eher reproduktiven Lernen ein genuines Feld des Verstehens, also eines explorativen und autonomen Umgangs mit den Inhalten des Fachs anerkennen, erscheint eine Vielzahl von Parametern und Modalitäten des Lernprozesses in anderem Licht. Aufgabe des Lehrenden ist immer weniger, “Stoff zu

vermitteln”, also wohldefinierte Repräsentationen von physikalischen Inhalten zum Gegenstand des Lernprozesses zu machen, sondern selbstständige Prozesse zu ermöglichen, zu moderieren und zu individualisieren – einschließlich der konstituierenden inneren Suchbewegungen, also dabei unvermeidlichen Pannen, Fehler und Irrwege (Rehm & Murmann, 2007).

8 Exploratives Interesse

Wenn das “Verstehen” einmal so thematisiert ist, ist auch besprechbar, dass es nicht als eine Art krönender Abschluss an Lernen und bodenständige Stoffvermittlung anschließt, sondern einen gesunden Lernprozess wohl ständig begleitet. *Verständiges Lernen* wäre vielleicht ein geeigneter Terminus für einen Lernprozess der im obigen Sinne ständige Transfer-, Integrations- und Vertiefungsprozesse einschließt. Hier wird das Thema offenbar pädagogisch und es lohnt der Blick in die Praxis: Erscheinungsorientiertes Arbeiten setzt von vorneherein dort an, indem physikalische Tatsachen nicht als Stoff-Items erscheinen, sondern Aspekte eines Kennenlernprozesses sind, mit dem ein größeres Thema erkundet wird. Eine Reihe von gut beschriebenen und unterrichtserprobten Beispielen für einen solchen Ansatz liegen ebenso vor wie Arbeiten zum methodischen und wissenschaftstheoretischen Hintergrund – siehe etwa (Maier, 1993; Mackensen & Ohlendorf, 1998; Grebe-Ellis & Theilmann, 2006; Sommer, 2005; Grebe-Ellis, 2005; Theilmann, 2006, 2007a, 2007b). An dieser Stelle soll vor allem ein Aspekt in den Blick genommen werden: Wenn wir einmal anfangen, den sicheren Handlauf loszulassen, den ein klar umrissener Stoffumfang, speziell konstruierte Berechnungsprobleme und ein sicherer, spürbarer Abstand von Schulphysik zu den Alltagserfahrungen bieten, wenn unberechenbare Fragen auftauchen und wir uns Sätze wie “Hm, das weiß ich so auf Anhieb auch nicht” sagen hören, was hält dann das

Projekt Unterricht am Laufen, was gibt Elan, Ziele, Themen, Rechtfertigung? Ein Gefühl für die Wichtigkeit des Fachs Physik scheint, bei allen Vorbehalten, bei den Schülern breit vorhanden, Interesse an physikalischen Unterrichtsthemen lässt sich durch "sinnstiftenden Kontext" aus Lebenswelt oder Gesellschaft fördern (Muckenfuß, 1985). *Interesse an Physik* erscheint dabei als "aktualisiertes" oder "situationales" Interesse, in der individuellen Interesse im Sinne einer "persönlichen Disposition" auf eine hinreichend ansprechende Lernumgebung trifft (Krapp, 1992). Für den geschilderten, zunehmend selbstständig verfolgten Verstehensprozess müssen die "damit verbundenen motivationalen, volitionalen und sozialen Bereitschaften und Fähigkeiten" (Weinert, 2001) über das Über-sich-ergehen-Lassen von Unterricht offenbar hinausgehen. Hier kommt das zentrale Merkmal der *Selbstintentionalität* bei Interessehandlungen in den Blick (Krapp & Schiefele, 1989), die nun allerdings gegenüber einem *neuen* Gegenstand zu entwickeln ist. Was braucht es dafür? Die hier vertretene These ist, es braucht angemessene Begegnung mit physikalischen Fragen, es braucht individuelle und altersspezifische Erfolgserlebnisse des Lernenden bei der Suche nach Antworten (eben das "physikalische Verstehen") und es braucht das ureigene Erlebnis, dass das Leben dadurch reicher wird (Buck, 2006). Unabhängig von der konkreten Auslegung eines Modells zur Wirkungsweise von Interesse ist daran das Motiv der positiven Rückkopplung von mit den Interessehandlungen (hier: das Verfolgen physikalischer Fragen) verbundenen Erlebnissen an das innere Gefüge der seelischen Prozesse, die diese Handlungen hervorbringen. Und: auch hier geht es um einen qualitativen Sprung – entwickelt und gefördert werden soll nicht ein bestimmtes Interesse *an etwas*, sondern die Motivation und seelische Kraft dafür, sich *überhaupt* fragend, erkundend und ausdauernd auf etwas zu beziehen, *was man noch nicht kennt*.

Nicht die vielfach erforschten Präferenzen in Hinblick auf Schulfach, bestimmte Fachgebiete, Inhalte oder Unterrichtstätigkeiten oder auch lebensweltliche Bezüge und Kontexte etc. sind hier somit Thema, sondern ein *exploratives Interesse*, das mehr eine Erkenntnisgrundhaltung als eine inhaltliche Ausrichtung des individuellen Gegenstandsbezugs ist (Prenzel, 1988; Lehrke, 1988; Hoffmann, Häußler & Lehrke, 1998). Die Aufgabe des Lehrers ist es, diese Erkenntnishaltung zu entwickeln – in den Schülern, aber auch in sich selber. Die geschilderten Erfolgserlebnisse so zu ermöglichen, dass über solchem Unterricht eine "Wachheit" für ein größeres physikalisches Thema entsteht, ist eine Sache des pädagogischen Handwerks. Eigene Erfahrungen gehen in die Richtung, dass vor allem eigenes authentisches Interesse des Lehrers an der Unterrichtssituation für die Schüler zum Schlüssel für den gewünschten Schritt wird – exploratives Interesse will vorgelebt sein.

9 Wie wird Verstehen empirisch?

Das Wort "Verstehen" bezeichnet mindestens zwei nahe beieinanderliegende und doch recht verschiedene Seiten eines kognitiven Prozesses: die sachgemäße Repräsentation eines Sachverhaltes in den zur Verfügung stehenden Begriffen und das innere Erlebnis, einen Sachverhalt so gegenwärtig zu haben, dass man seine wesentlichen Aspekte und Beziehungen überschauen und zu anderen Erlebnisbereichen in Beziehung setzen kann. Ersteres schildert die Sache "von außen", hin auf einen konzeptionellen Rahmen, an dem sich etwa "Sachgemäßheit" festmachen lässt. Die zweite Lesart von Verstehen erfährt unter phänomenographischen Gesichtspunkten oder als "genuines Verstehen" immer mehr Aufmerksamkeit. In wie weit Unterricht beim Schüler Verstehen im äußerlichen Sinne ermöglicht hat, lässt sich durch bewährte¹⁰ oder speziell darauf zugeschnittene Erhebungsmethoden – etwa *concept maps* oder die Tests,

die Rehm (2007) vorschlägt, geeignete schriftliche oder mündliche Interviews oder auch durch Sichtung selbstständig verfasster Beschreibungen oder Zusammenfassungen in Schülerheften beleuchten. Hier wird eine andere Schicht des Lernens (und Lernerfolgs) sichtbar als bei der Konfrontation mit klassischen Physikprüfungen, wobei auch sprachliche und darstellerische Fähigkeiten (und Schwierigkeiten) des Unterrichts und der Schüler auf den Prüfstand kommen.

Während das Abschneiden in Tests entscheidend ist für den schulischen Erfolg, steht zu vermuten, dass gelungenes Verstehen – und ein darüber gewachsenes positives Verhältnis zum Fach – nicht nur zum schulischen Erfolg, sondern auch zu anderen Parametern einer Lernbiographie korreliert. Während etwa Interesse offenbar *per definitionem* mehr oder weniger fachbezogen ist, ist *Interessefähigkeit*, also Wachheit und Offenheit als Teil des individuellen Persönlichkeitsprofils weit weniger fachgebunden, und auf diesem Wege mögen fachspezifische Lernerfolge auch in anderen Fächern fruchtbar werden. Solche Korrelationen, etwa zur Einstellung gegenüber dem Fach, zu Interessenschwerpunkten oder zum Berufswunsch, aber auch zur Fähigkeitsbildung in anderen Fächern und Lebensfeldern, versprechen spannende Einsichten in Lernprozesse und Ansatzpunkte für deren Verbesserungen. Für die Gestaltung von naturwissenschaftlichem Unterricht, der Offenheit gegenüber Fachanliegen oder Berufsorientierung hin aufs Fach fördern will, eröffnen sich hier neue Möglichkeiten umfassender Qualitätssicherung. Die in diesem Text vertretene Lesart von Verstehen nimmt darüber hinaus den prozessualen Charakter dieser schwer abstrahierbaren inneren Tätigkeit (oder Seite des Seelenlebens) in den Blick. Es geht nicht nur um (Fach)Wissen oder um den Erfolg beim

„Beibringen“, sondern um die Ausbildung einer individuellen Fähigkeit, sich ein aufgeworfenes Thema *und seine Behandlung* zueigen zu machen und selbstständig weiterzuverfolgen. Hier kommt plötzlich eine Reihe von Tugenden ins Blickfeld, die naturwissenschaftliche Fähigkeiten wie „Wiedergabe“ oder „Anwendung“ aufs wertvollste ergänzen: Empathie, Erfindungsreichtum oder auch „Befriedigung durch/Bedürfnis nach gedanklicher Klarheit und Ordnung“. So stellt sich die Frage nach einer *Didaktik des Verstehens* gewissermaßen auf lange Sicht. Es ist selbstverständliches Ziel jedes sich selbst ernstnehmenden Physikunterrichts, das Verstehen von physikalischen Sachverhalten zu fördern – lässt sich das empirisch erfassen? Fördern wir belegbar im Unterricht auch die Fähigkeit, sich im obigen Sinn zu interessieren? Pädagogik nach Wagenschein und erscheinungsorientierte Physik haben ihre Berührungspunkte genau dort, wo diese Frage gestellt werden darf. Wir hoffen plausibel gemacht zu haben und durch weitere Arbeit zu zeigen, dass diese Frage nicht nur legitim ist, sondern neue, konstruktive Perspektiven in der aktuellen Forschung zu naturwissenschaftlichen Kompetenzen eröffnet.

¹⁰ In durch R. Erb betreuten Staatsexamensarbeiten (Einsiedler, 2007; Krause, 2007) finden sich empirische Ergebnisse, in denen das krasse Nebeneinander von korrekt gelernten Inhalten zur Optik und diesen widersprechenden Vorstellungen von Licht thematisiert wurde. Hier müsste ein erfolgreiches Verstehen *per definitionem* signifikante und quantifizierbare Verbesserungen zeigen!

Literatur

- Aeschlimann, U., & Buck, P. (2007). Über vier Modi Gravitation zu verstehen und zwei Auffassungen, wie mit der Pluralität der (genuinen) Schülerverständnisse umgegangen werden soll. In D. Höttecke (Ed.), *Kompetenzen, Kompetenzmodelle, Kompetenzentwicklung – Tagungsband der GDGP-Tagung in Essen 2007* (pp. 188-190). Berlin: Lit Verlag.
- Berkeley, G. (1975). *Philosophical Works. (An essay towards a new theory of vision)*. London: J. M. Dent.
- Buck, P. (1996). Über physikalische und chemische Zugriffsmodi. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 3, 25 – 38.
- Buck, P. (Ed.). (2006). *Wie gelangt ein Mensch zu Sinn? Eine Installation zu Fragen der Pädagogik*. Stuttgart: Freies Geistesleben.
- Buck, P., & Mackensen, M. (2006). *Naturphänomene erlebend verstehen*. Köln: Aulis.
- Bybee, R. (1997). Towards an Understanding of Scientific Literacy. In W. Gräber & C. Bolte, (Eds.), *Scientific Literacy* (pp. 37 – 68). Kiel: IPN
- Einsiedler, O. (2007). *Schülervorstellungen zur Ausbreitung des Lichts*. Wissenschaftliche Hausarbeit zur ersten Staatsprüfung, Pädagogische Hochschule Schwäbisch Gmünd, Fakultät II: Physik.
- Gaarder, J. (1999). *Sophie's Welt*. München: DTV.
- Grebe-Ellis, J. (2005). *Grundzüge einer Phänomenologie der Polarisation*. Berlin: Logos.
- Grebe-Ellis, J., & Theilmann, F. (Eds.). (2006). *Open Eyes 2005. Tagungsband*. Berlin: Logos.
- Hartmann, S. (2004). *Erklärungsvielfalt*. Berlin: Logos.
- Hoffmann, L., Häußler, P. & Lehrke, M. (1998). *Die IPN-Interessenstudie Physik*. Kiel: IPN.
- Horn, M. (2007). *Entwicklung und Evaluation eines Unterrichtskonzeptes zur Holographie mit Untersuchungen von Lernprozessen zur Interferenzoptik*. Dissertation (Didaktik der Physik). Universität Potsdam.
- Horn, M., Leisner, A. & Mikelskis, H. (2002). *Schülervorstellungen zur Holographie*. In V. Nordmeier & A. Oberländer (Eds.), *Tagungs-CD der DPG-Frühjahrstagung 2002*.
- Höttecke, D. (2006). Kompetenz und Bildung – ein Vermittlungsversuch. In V. Nordmeier & A. Oberländer (Eds.), *CD zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der DPG*. Berlin: Lehmanns Media
- Krapp, A. (1992). Konzepte und Forschungsansätze zur Analyse des Zusammenhangs von Interesse, Lernen und Leistung. In A. Krapp & M. Prenzel (Eds.), *Interesse, Lernen, Leistung. Neuere Ansätze der pädagogisch-psychologischen Interessenforschung* (pp. 9 – 52). Münster: Aschendorf.
- Krapp, A., & Schiefele, H. (1989). Haben Sie Interesse! *Psychologie heute*, 16(12), 40 – 45.
- Krause, R. (2007). *Vorstellungen zur optischen Abbildung*. Wissenschaftliche Hausarbeit zur ersten Staatsprüfung, Pädagogische Hochschule Schwäbisch Gmünd, Fakultät II, Physik.
- Kultusministerkonferenz. (2004a). *Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz. Erläuterungen zur Konzeption und Entwicklung*. Neuwied: Luchterhand.
- Kultusministerkonferenz. (2004b). *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss (Jahrgangsstufe 10)*. Neuwied: Luchterhand.
- Lehrke, M. (1988). *Interesse und Desinteresse am naturwissenschaftlich-technischem Unterricht*. Kiel: IPN.
- Leisner, A. (2005). *Entwicklung von Modellkompetenz im Physikunterricht*. Berlin: Logos.
- Mackensen, M., & Ohlendorf, H. (1998). *Modellfreie Optik. Zur Physik der 12. Klasse*. Pädagogische Forschungsstelle Kassel.
- Maier, G. (1993). *Optik der Bilder*. Dürnau: Kooperative Dürnau.
- Maier, G. (2004). *blicken – sehen – schauen*. In J. Grebe-Ellis (Ed.) *Beiträge zur Physik als Erscheinungswissenschaft* (pp. 224 - 236). Dürnau: Kooperative Dürnau.
- Mikelskis, H., & Rabe, T. (2006). *Schülervorstellungen zur Beugung am Spalt*. In J. Grebe-Ellis & F. Theilmann (Eds.), *open eyes 2005 – Tagungsband* (pp. 91 – 110). Berlin: Logos.
- Mikelskis-Seifert, S. (2002). *Die Entwicklung von Metakonzepten zur Teilchenvorstellung bei Schülern*. Berlin: Logos.
- Mikelskis-Seifert, S. (2006). *Modellmethode als epistemologisches und didaktisches Konzept. Physik-Didaktik. Praxisbandbuch für die Sekundarstufe I und II* (pp. 120 – 138). Berlin: Cornelsen.
- Muckenfuß, H. (1985). *Lernen im sinnstiftenden Kontext*. Berlin: Cornelsen.
- Newton, I. (1983). *Optik oder Abhandlung über Spiegelungen, Brechungen, Beugungen und Farben des Lichts*. (Vorwort von Markus Fierz). Braunschweig: Vieweg.
- Prenzel, M. (1988). *Die Wirkungsweise von Interesse*. Opladen: Westdeutscher Verlag.
- Rehm, M. (2006). *Allgemeine naturwissenschaftliche Bildung – Entwicklung eines vom Begriff "Verstehen" ausgehenden Kompetenzmodells. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 12, 23 – 44.
- Rehm, M. (2007). *Testaufgaben zur Erhebung des Verstehens als Fähigkeitsmerkmal naturwissenschaftlicher Kompetenz. chimica didactica et cetera artes*, 33, 105 – 136.

- Rehm, M., & Murmann, L. (2007). Verstehen *lehren* und Erfahrungslernen. *Lehren und Lernen*, 2, 34 – 39.
- Schecker H. & Parchmann I. (2006). Modellierung naturwissenschaftlicher Kompetenz. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 12, 45 – 67.
- Sommer, W. (2005). *Zur phänomenologischen Beschreibung der Beugung im Konzept optischer Wege*. Berlin: Logos.
- Steinle, F. (1998). Exploratives vs. theoriebestimmtes Experimentieren: Ampères frühe Arbeiten zum Elektromagnetismus. In M. Heidelberger & F. Steinle (Ed.), *Experimental Essays – Versuche zum Experiment* (pp.272-297). Baden-Baden: Nomos.
- Steinle, F. (2006). “Das Nächste ans Nächste reihen”: Goethe, Newton und das Experiment. In J. Grebe-Ellis & F. Theilmann (Eds.), *open eyes 2005. Tagungsband* (pp. 179-202). Berlin: Logos Verlag.
- Theilmann, F. (2006). *Expeditionen in die Mechanik*. Stuttgart: Edition Waldorf.
- Theilmann, F. (2007). Jenseits von Goethe und Newton. *Erziehungskunst*, 5, 499 – 504.
- Theilmann, F. (2008). Der Gedanke im Kontext. Zur Charakteristik einer erscheinungsorientierten Physik. *Der Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht*, 61(4), 236 – 241.
- Wagenschein, M. (1999). *Verstehen lernen*. Weinheim: Beltz.
- Wagenschein, M. (1970). *Ursprüngliches Verstehen und exaktes Denken*, Band II. (Die periodische Struktur des Lichts). Stuttgart: Klett.
- Weinert, F.E. (2001). *Leistungsmessungen in Schulen. (Vergleichende Leistungsmessung in Schulen – eine umstrittene Selbstverständlichkeit)*. Weinheim: Beltz.

Kontakt

Dr. Florian Theilmann
 Institut für Physik und Astronomie
 Postfach 60 15 53
 14415 Potsdam
[florian.theilmann\(AT\)uni-potsdam.de](mailto:florian.theilmann(AT)uni-potsdam.de)

Autoreninformation

Dr. Florian Theilmann ist Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe für Physikdidaktik an der Universität Potsdam.