

## Probleme der Modellbildung in der Optik

Martin Erik Horn\*, Antje Leisner\*, Helmut F. Mikelskis\*

\*Universität Potsdam, Institut für Physik, Lehrstuhl für Physikdidaktik  
Am Neuen Palais 10, 14469 Potsdam

### Kurzfassung

Durch alle Klassenstufen hindurch werden die Schülerinnen und Schüler im Physikunterricht mit der Frage konfrontiert, was Licht eigentlich sei - eine Frage, die korrekt nicht zu beantworten ist und deshalb durchgehend unter Rückgriff auf Modelle erörtert wird. Dabei treten zahlreiche Modellvorstellungen in Konkurrenz miteinander, was einerseits zu Lernschwierigkeiten führt, andererseits jedoch auch als didaktische Chance begriffen werden kann, wenn neben das Denken in Modellen ein Denken über Modelle tritt.

Anhand von Untersuchungen im Physikunterricht der Sekundarstufe II und mit Physikstudenten werden diese Modellbildungs- und Modellüberwindungsprozesse dargestellt und analysiert. Die Chancen und Möglichkeiten, die ein Einsatz von Computersimulationsprogrammen bei einer Diskussion der unterschiedlichen Lichtmodelle im Unterricht bietet, werden aufgezeigt und ihr Einfluss auf eine strukturierte Modellbildung erörtert.

### Inhalt

1. Einleitung
2. Modellgebrauch und Modellbildungsprozesse
  - 2.1 Optische Dispersion und Refraktion
    - Ziele, Design und Aufbau der Fallstudie
    - Durchführung und Tests
    - Ergebnisse
  - 2.2 Interferenzoptik: Holographie
    - Überblick über die Studie
    - Auswertung der Schülerinterviews
    - Charakteristische Unterrichtsszenen
3. Schlussfolgerungen

#### 1. Einleitung

Das Licht in seiner komplexen physikalischen Natur ist den Menschen seit jeher ein großes Rätsel und es bereitet uns Schwierigkeiten, es zu verstehen. So sagte Einstein einmal: „Den Rest meines Lebens möchte ich damit zubringen, darüber nachzudenken, was Licht ist.“

Im Laufe der Zeit wurden daher viele unterschiedliche Modelle zum Licht entwickelt, die uns helfen sollen, Licht und sein Verhalten erklären zu können: das Strahlenmodell, das Wellenmodell nach Huygens, das Teilchenmodell nach Newton, das Photonenmodell und das Zeigermodell nach Feynman. Die Modelle existieren nebeneinander und sind alle „gleich richtig“. Denn ein Modell kann nicht richtig oder falsch sein, sondern nur zweckmäßig oder unzweckmäßig, da es sich um Veranschaulichungen und Vorstellungen handelt, die außerhalb der Wahrnehmung des Menschen liegen. So kann man zu einem Modell nur feststellen, ob mit ihm ein bestimmtes Phänomen gut, das heißt für den Lernenden verständlich, erklärt werden kann. So können

unterschiedliche Menschen sich ein Phänomen mit unterschiedlichen Modellen erklären, sofern dies in sich schlüssig und logisch ist.

In der Schule werden zurzeit vor allem das Strahlenmodell im Anfangsunterricht gelehrt, das Wellenmodell in der Sekundarstufe I und das Photonenmodell in der Sekundarstufe II. Das Lichtteilchenmodell nach Newton und das Zeigermodell nach Feynman finden kaum Beachtung. Zum Zeigermodell gibt es bereits Untersuchungen und Unterrichtsvorschläge zur Vermittlung und Einbindung in den Unterricht der Sekundarstufe II [1]. Das Teilchenmodell wird häufig nur bei der Behandlung des Photonenmodells nebenbei eingeführt, wenn vermittelt werden soll, dass dieses nicht ausreicht, um sowohl Interferenzen als auch den Photoeffekt zu erklären.

Die fünf Modelle des Lichts lassen sich unterschiedlichen Klassen von Modellen zuordnen (siehe Abb. 1). Man unterscheidet hinsichtlich der verschiedenen Modelltypen zwischen gegenständlichen und abstrakten Modellen [2]. Erstere werden auch als konkrete Modelle oder Gebildemodelle bezeichnet und schließen zum Beispiel den Globus und Modelleisenbahnen mit ein. Die abstrakten Modelle unterteilt man in ikonische (bildhafte) Modelle und in symbolische oder abstrakt-mathematische Modelle [3]. Die ikonischen Modelle sind Erzeugnisse des menschlichen Geistes, Vorstellungen, die sich der Mensch macht von etwas Realem aber sonst unanschaulichen. Je nach Grad des Realitätsbezuges unterscheidet man die ikonischen Modelle in zwei Arten: Solche, die durch Idealisierung der Realität entstehen und solche, die nur in der Vorstellung existieren – mit einem sehr geringen Bezug zur Realität. Das

Strahlenmodell des Lichts ist eine Idealisierung, das Teilchenmodell und das Wellenmodell des Lichts gehören zur zweiten Art der ikonischen Modelle. Der Feynman'sche Zeigerformalismus, der durch didaktische Reduktion aus der Quantenelektrodynamik begründet werden kann, ist ein Beispiel für ein abstrakt-mathematisches Modell. Diese Modelle sind Realitätsgefüge zwischen physikalischen Größen, die gar nicht oder nur zum Teil unmittelbar beobachtet werden können. Sie entziehen sich der anschaulichen Deutung und sind nur als Symbole der Wirklichkeit aufzufassen.

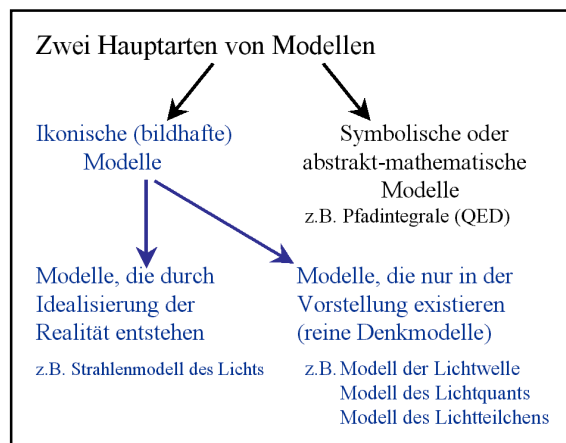


Abbildung 1: Zuordnung der Lichtmodelle zu Modellklassen

Zahlreiche physikalische Phänomene können mit einem einzigen Modell erklärt werden. Ist dieses eingeübt und verankert, wie beispielsweise in der Optik das Strahlenmodell in der Sekundarstufe I, so treten dann Probleme auf, wenn Phänomene betrachtet werden, die mit diesem Modell nicht mehr sinnvoll zu klären sind. Der Übergang zu Interferenzerscheinungen stellt solch eine didaktische Schnittstelle dar. Im Unterricht wird zur Analyse von Experimente zur Interferenzoptik in der Regel das Wellenmodell herangezogen. Da das Wellenmodell einer anderen Modellklasse als das Strahlenmodell zugeordnet ist, stellt der auftretende Modellwechsel zusätzlich einen Modellklassenwechsel dar. Dies bereitet den Lernenden besonders Schwierigkeiten.

An der Universität Potsdam wurden und werden drei Forschungsarbeiten angefertigt, die sich mit dem Lernen mit und von Modellen beschäftigen. Das war zum Ersten die Staatsexamensarbeit von Antje Leisner zu den Modellvorstellungen zum Licht im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe am Beispiel der optischen Refraktion und Dispersion, zum Zweiten ist das die Dissertation von Martin Erik Horn zur Entwicklung und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zur Holographie mit Untersuchungen von Lernprozessen zur Interferenzoptik. Und schließlich hat auch das Dissertationsvorhaben von Antje Leisner zur langfristigen Entwicklung metakzeptueller Kompetenzen im Physik- und Chemieunterricht der

Sekundarstufe I seinen Schwerpunkt auf dem Lernen mit und von Modellen. Ergebnisse aus den ersten beiden Arbeiten werden im Folgenden vorgestellt.

## 2. Modellgebrauch und Modellbildungsprozesse

### 2.1 Optische Dispersion und Refraktion

#### - Ziele, Design und Aufbau der Fallstudie

Es gibt in der Didaktik der Physik zahlreiche Untersuchungen zu den einzelnen Modellen des Lichts. In der Staatsexamensarbeit sollten der Umgang mit allen fünf Modellen des Lichts an einem optischen Phänomen untersucht werden. Aufgrund vorhergehender Studien bestand die Annahme, dass Studierende, die gerade die Schule verlassen haben, kaum über metakzeptuelle Kompetenzen verfügen. Das heißt, ganz kurz gesagt, dass sie nicht mit den unterschiedlichen Modellen problemgerecht umgehen können.

Für die Untersuchung wurde eine Stundenfolge entworfen, die den Zielen der Studie angepasst wurde. Das heißt, es entstand kein Curriculum für die Schule, sondern eine didaktisch sinnvolle Aneinanderreihung von unterrichtsartigen Stunden, die mit sechs Studierenden des ersten Semesters der Physik durchgeführt wurden. Da die Probandenzahl so gering war, wurde eine quantitative Auswertung von vornherein ausgeschlossen.

Die folgenden Fragen standen im Mittelpunkt der Fallstudie anhand denen die „Unterrichtsstunden“ entworfen wurden:

1. Welche Konzepte vom Licht sind vorhanden?
2. Wie arbeiten die Lernenden mit unterschiedlichen Modellen?
3. Wo liegen Probleme beim Modellwechsel?
4. Helfen beim Lernen metakzeptuelle Unterrichtsphasen?
5. Welche Rolle kann bei der Modellbildung der Computer spielen?

Als Messinstrumente wurden ein Wissenstest und ein zu bearbeitendes Concept Map eingesetzt, als auch der Unterricht vollständig videografiert, so dass auch die Studierendenaussagen mit den Tests in Zusammenhang gebracht werden konnten.

Die Studie umfasste acht Stunden á 45 Minuten und wurde jeweils in Doppelstunden unterrichtet. In den ersten zwei Stunden wird den Studentinnen und Studenten der Feynman'sche Zeigerformalismus vorgestellt. Es folgte eine Wiederholung zur allgemeinen Erklärung der optischen Dispersion und Refraktion. Zudem wurde auf Modelle in der Physik und deren Merkmale eingegangen. Im Anschluss wurde die optische Refraktion und Dispersion mit den verschiedenen Modellen des Lichts erklärt. Dabei wurden in jeder Stunde zuerst das Modell und seine Eigenschaften wiederholt. Im Anschluss wurde die Brechung mithilfe des jeweiligen Modells im

sokratischen Gespräch erklärt. Dann folgte jeweils eine Übung, die die Studierenden selbständig durchführten. Sie bestand für die ersten drei Modelle in einer Arbeit am Computer mit den Programmen *phenOpt* bzw. *Albert – Brechungsgesetz* und für das

Zeigermodell im Bestimmen des resultierenden Zeigers auf dem Arbeitsblatt. Die folgende Tabelle zeigt die Themen der einzelnen Stunden und das jeweilige Teilziel.

Stunde	Thema	Teilziel
A1	Vortest, Einführung Feynman'scher Zeigerformalismus	Vorwissen erfassen, Grundlage für Unterricht legen
A2	Zeigerformalismus weiterführen	Zeigermodell am Beispiel der Reflexion anwenden
1.	Einführung und Motivation Zielorientierung Modelle und deren Unterteilung Wiederholung Brechung	Lehrerexperiment Modelle (Definition, Anwendungen, ...) Wiederholung der optischen Refraktion und Dispersion
2.	Geometrische Optik – Strahlenmodell	Wiederholung der Merkmale des Modells Herleitung Brechungsgesetz nach Fermat, quantitativ Übung mit <i>phenOpt</i> Zusammenfassung: Vor- und Nachteile des Modells
3.	Wellenoptik – Wellenmodell	Wiederholung der Merkmale des Modells Herleitung Brechungsgesetz nach dem Huygens'schen Prinzip Erklären der Dispersion Übung mit <i>phenOpt</i> Zusammenfassung: Vor- und Nachteile des Modells
4.	Lichtteilchenmodell nach Newton	Historische Entwicklung Wiederholung bzw. Einführung des Modells Erklärung der Dispersion und Refraktion Übung mit <i>Albert</i> Zusammenfassung: Vor- und Nachteile des Modells
5.	Feynman'scher Zeigerformalismus	(Wiederholung des Modells) Erklären der Refraktion und Dispersion (Arbeitsblatt) Zusammenfassung: Vor- und Nachteile des Modells
6.	Vergleich der Modelle  Nachtest	zum Umgang mit Modellen reflektieren Diskussion der Modelle Überprüfen des Lernzuwachses

Abbildung 2: Struktur des Unterrichts

### - Durchführung und Tests

Bei der Durchführung der Studie standen die selbständigen Tätigkeiten der Studierenden und die sokratischen Gespräche zur Erarbeitung der Model-

le und deren Anwendung am Beispiel der optischen Refraktion und Dispersion im Vordergrund. Als Beispiel wird hier kurz die Erklärung der Refraktion im Lichtteilchenmodell vorgestellt (siehe Abb. 3).

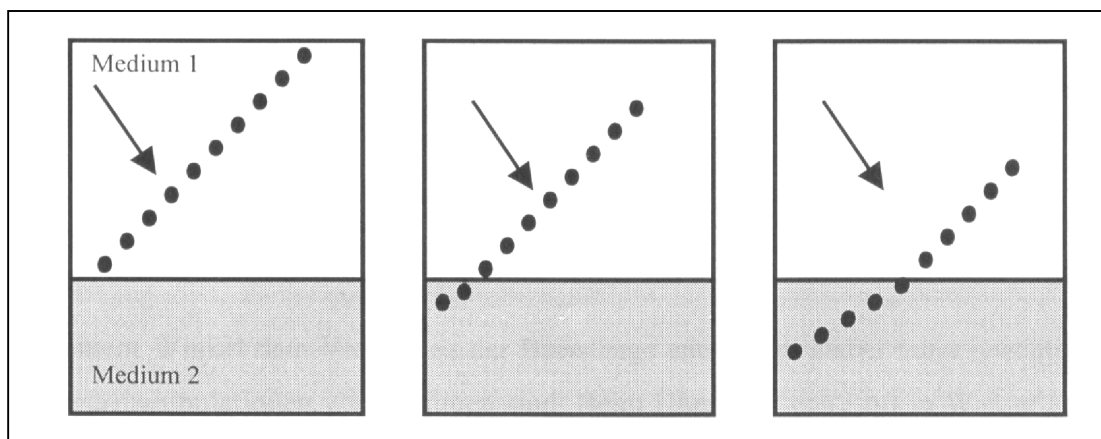


Abbildung 3: Optische Refraktion im Lichtteilchenmodell

Die in Abbildung 3 dargestellte Teilchenkette bewegt sich im Medium 1 mit der Geschwindigkeit  $c_1$ , das erste Teilchen der Kette trifft auf das Medium 2 und da dies optisch dichter ist, ist die Geschwindigkeit  $c_2$  im Medium 2 kleiner als  $c_1$  im Medium 1. Die übrigen Teilchen im Medium 1 bewegen sich mit der ursprünglichen Geschwindigkeit weiter, bis sie ebenfalls in das Medium 2 eintreten und „abgebremst“ werden. Dies führt zum Abknicken der Bewegungsrichtung – zur Brechung der Teilchenkette.

Bei dieser Erklärung äußerte ein Student, nachdem die Refraktion bereits im Strahlenmodell und Wellenmodell erklärt worden war: „Jetzt habe ich das verstanden – die Teilchen in der Luft legen eine größere Strecke [in der gleichen Zeit] zurück als die Teilchen im Wasser.“ Auch bei der Behandlung der anderen Modelle konnten aus den Probandenaussa-

gen Informationen zum Modellgebrauch und Modellverständnis gewonnen werden.

Diese wurden dann mit den Ergebnissen des Tests verglichen. Im Wissenstest benennen die Studierenden im Vortest das Teilchenmodell nicht als Modell des Lichts, aber im Concept Map wird beispielsweise deutlich, dass sie sich Licht auch als Teilchen vorstellen. Zudem sind im Wissenstest auch im Nachtest weiterhin Probleme und Fehlvorstellungen erkennbar, wie die Aufgabe 6 (siehe Abb. 4) zeigt. Die Studierenden wissen, dass die Lichtbrechung eine Rolle spielt, „verwechseln“ aber die Richtung des Lichtes, das für das jeweilige Sehen der Personen sorgt. Die Skizze eines Studenten (Abb. 4) und seine Erklärung zeigen deutlich, dass er indirekt von einer Lichtausbreitung vom Auge zum Objekt ausgeht und die Streuung am Objekt missachtet.

**Aufgabe 6: Der Mensch A steht mehrere Meter vom Ufer entfernt. Kann er den tauchenden Menschen B im Wasser sehen? Kann der Mensch B den Menschen A am Ufer sehen? Erklären Sie die Vorgänge mithilfe einer Skizze!**

“A kann B sehen, da das Licht an der Wasseroberfläche gebrochen wird. Wenn das Licht in ein optisch dichteres Medium übergeht, wird es zum Lot hingebrochen. B kann A auch sehen, da das Licht beim Austritt vom Lot weg gebrochen wird.”

Abbildung 4: Aufgabe 6 mit eingezeichnetem Strahlengang und Erklärung des Studenten

In der Gesamtheit zeigen die Studierenden nach dem Unterricht einen deutlichen Wissenszuwachs im Umgang mit Modellen und es konnten folgende Ergebnisse auf die Untersuchungsfragen gefunden werden.

#### - Ergebnisse

##### 1. Welche Konzepte vom Licht sind vorhanden?

Die Studierenden bringen aus der Schule konkrete, doch zum Teil falsche, Vorstellungen zum Licht mit. Diese sind zu den einzelnen Modellen sehr gefestigt. So erklären sie unterschiedliche Phänomene des Lichts im Strahlenmodell und im Wellenmodell und benennen den Welle-Teilchen-Dualismus. Anwenden können sie den Dualismus zur Erklärung nicht. Das Lichtteilchenmodell nach Newton ist ihnen nicht bekannt, obwohl in den Concept Maps Vorstellungen dieser Art deutlich werden.

##### 2. Wie arbeiten die Lernenden mit unterschiedlichen Modellen?

Die Probanden gehen kaum bewusst mit den Modellen des Lichts um. Sie benutzen die Begriffe „Licht“, „Lichtstrahl“, „Teilchen“ und „Welle“ nahezu synonym. Daher entstehen Vermischungen von Wirklichkeit und Modell.

##### 3. Wo liegen Probleme beim Modellwechsel?

Die Studierenden haben positive Erfahrungen im Umgang mit Modellen gemacht: Dies liegt leider an der hohen Anschaulichkeit der Modelle. Aus diesem Grunde haben sie zum einen beim Erlernen des Zeigerformalismus eine offene Einstellung und tun sich aber zum anderen schwer mit dem hohen Maß an Abstraktion. Sie versuchen daher beim Modellwechsel bzw. dem Erlernen von neuen Modellen das Neue in das Alte einzubinden.

##### 4. Helfen beim Lernen metakonzeptuelle Unterrichtsphasen?

Aufgrund der metakonzeptuellen Unterrichtsphasen, in denen Entstehung, Anwendung und die

Zusammenhänge zu anderen Modellen des Lichts behandelt wurden, wird den Probandinnen und Probanden das Licht in seiner komplexen physikalischen Natur zunehmend besser bewusst. Zudem kommt es weniger zu Vermischungen von Wirklichkeit und Modell, da das Modell und seine Merkmale bewusst benutzt wurden. Dies erhöht das Verständnis für das Arbeiten mit Modellen und damit des jeweiligen Phänomens.

#### 5. Welche Rolle kann bei der Modellbildung der Computer spielen?

Der Computer kann der Veranschaulichung der Modelle dienen. Gerade die dynamische Komponente der Modelle (Fortpflanzen der Wellenberge, Überlagerung und Auslöschung, Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit in unterschiedlichen Medien) lässt sich in Computersimulationsprogrammen sehr gut darstellen. Übungen, in denen die Lernenden das jeweilige Modell selbst anwenden, sind lernunterstützend, da nur durch das Durchführen von Tätigkeiten die Fähigkeit erlangt werden kann, mit Modellen problemgerecht umzugehen.

### 2.2 Interferenzoptik: Holographie

Der zweite an der Universität Potsdam bearbeitete Schwerpunkt im Bereich der Modellbildungsforschung ist die Interferenzoptik. Im Rahmen einer Promotionsarbeit wurden Modellgebrauch und Modellentwicklung von Schülerinnen und Schülern untersucht, die an einem Unterricht zur Holographie teilgenommen haben. Die Unterrichtsreihe wurde an insgesamt fünf Brandenburger Gymnasien in der 13. Jahrgangsstufe unterrichtet. Ihr Aufbau und erste Ergebnisse wurden bereits in [5] und [6] vorgestellt. Die Stichprobengröße betrug 54 Schülerinnen und Schüler.

Die Ziele der Untersuchung waren:

- Entwicklung, Erprobung und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zur Holographie für den Einsatz in der gymnasialen Oberstufe.
- Untersuchung von Schülervorstellungen zur Holographie und zur Interferenzoptik unter besonderer Berücksichtigung von Modellbildungsprozessen.

In diesem Beitrag soll schwerpunktmäßig über die zweite Zielstellung berichtet werden.

#### - Überblick über die Studie

Es wurden die folgenden Evaluationsinstrumente eingesetzt: Anfertigung von Vor-, Nach- und Langzeittests sowie von Concept Maps durch die Lernenden, Videographie des Unterrichts und Durchführung von Schülerinterviews. Zur Untersuchung des Modellverständnisses und des Modellgebrauchs der Schülerinnen und Schüler wurden schwerpunktmäßig die beiden letztgenannten ausgewertet.

Da über die Ergebnisse der ersten Zielstellung bereits berichtet wurde, hier nur ein kurzer Überblick: Die Wirkungsuntersuchung (erste Zielstellung) ergab, dass das Wissen der Lerngruppen über die Grundlagen der Holographie deutlich angestiegen ist. Ausgehend von geringem Vorwissen ist dieser Anstieg höchst signifikant und belegt gute Lernerfolge.

Das Vorwissen der Schülerinnen und Schüler in den Bereichen der geometrischen Optik und der Wellenphänomene lag auf einem höheren Niveau. Es konnten auch hier höchst signifikante, wenn auch nicht so starke, Lerneffekte gezeigt werden. Dies war zu erwarten, da der Unterricht sich auf das Thema der Holographie bezog. Die nachgewiesenen geringeren Lernerfolge in den anderen Bereichen können als positive Nebeneffekte angesehen werden und zeigen den vernetzten, sich auf bereits vorhandene Strukturen stützenden Aufbau der Unterrichtsreihe.

#### - Auswertung der Schülerinterviews

Ein typischer Befund bei Auswertung der im Anschluss an die Unterrichtseinheit mit einzelnen Schülerinnen und Schülern aller Lerngruppen geführten Interviews stellt die fehlende Trennschärfe zwischen den Modellen zum Licht dar. Das Spektrum der aufgefundenen Vorstellungen reicht dabei von teilweisen Überlappungen der Modelle über die Integration eines Modells in ein anderes bis hin zur vollständigen Hybridisierung aller dem Schüler bekannten Modelle, wie dies beispielsweise Abbildung 5 zeigt.

Diese Skizze wurde von einem Schüler eines beteiligten Physikleistungskurses angefertigt, um zu verdeutlichen, wie er sich die Natur des Lichtes vorstellt. Deutlich zu erkennen ist die Einbindung der drei im Unterricht behandelten Modelle. Das Strahlenmodell dient dem Schüler als Grundlage und kognitiver Anker. Um es in seiner Sicht konsistent zu erweitern, postuliert er eine Vergrößerung des Lichtstrahls. In diesem neu geschaffenen Vorstellungsräum, der im Unterricht naturgemäß nicht besetzt wurde, nimmt der Schüler seine Vereinheitlichung vor, indem er den Lichtstrahl als Träger einer Wellenbewegung charakterisiert. Die Welle selbst wird in naiver Teilchenvorstellung als bewegtes Teilchenfeld, einer Kette nicht unähnlich, beschrieben.

Im weiteren Verlauf des Interviews werden die psychologischen Vorteile dieser Hybridanschauungen deutlich: Der Schüler kann die Modellvorstellungen beliebig wechseln, zwischen mehreren Modellvorstellungen pendeln oder selektiv vermischend gerade passende Erklärungsmuster erstellen, sofern ihm die Oberflächenstruktur von dem zu erklärenden Phänomen und dem ausgewählten Modell kongruent erscheint. Zeigen sich Wider-

**Schüler:** Eigentlich ist es so, dass man nicht ein Modell verfeinert, sondern dass man die ganzen Modellvorstellungen eher vermischt. Dass man im Grunde so eine Grundtheorie, sag ich mal, hatte, mit der Strahlenoptik, mit dem Strahlenmodell. Dass man dann darauf gekommen ist, dass ja dieser kleine Strahl, Strahl heißt ja im Grunde genommen eine gerade Linie, wenn man die ganz doll ranzoomt, so eine Art Welle sein könnte. (...) Und wenn ich noch weiter rangehe, dann könnte ich mir zum Beispiel vorstellen, dass irgendwo in dieser Welle da, die Welle aus irgendwelchen Teilchen besteht.

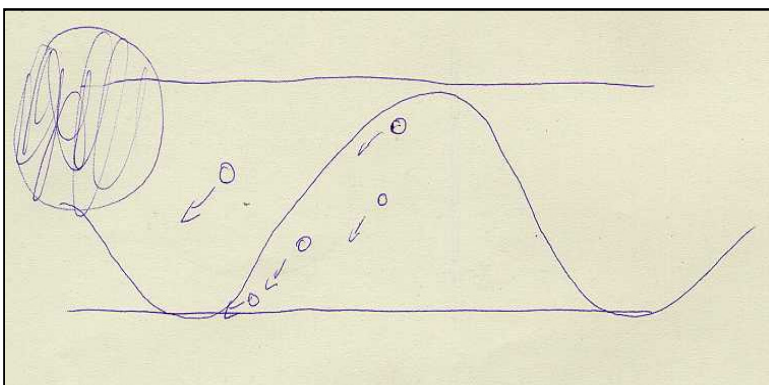


Abbildung 5: Schülerzeichnung und Interviewausschnitt I

sprüche in einer Modellvorstellung, wird konsequent in eine andere Modellvorstellung übergegangen, ohne zu hinterfragen, ob die gewählten Erklärungsmuster physikalisch sinnvoll sind.

Abbildung 6 zeigt ein solches Erklärungsmuster des gleichen Schülers, der mit Hilfe dieser Skizze das Verhalten von Licht am Doppelspalt zu erläutern sucht. Von der Lichtquelle, hier dargestellt als Sonne, skizziert er Lichtstrahlen, die im Sinne einer Fernfeldbeschreibung angesetzt werden. Kurz vor dem Doppelspalt wechselt er die Größenverhältnisse und gleichzeitig die Modellvorstellung. Jetzt argumentiert der Schüler im Photonenmodell, das er wiederum naiv als Teilchenvorstellung präsentiert. Da er die Maxima des Interferenzmusters nicht erklären kann, springt er unvermittelt in eine modifizierte Strahlendarstellung: Mitten im Raum wechselt das Licht seinen Charakter. Ähnlich wie bei der Darstellung von Lichtquellen im Physikunterricht, die sich an der Tafel oft als Quelle von in zahlreiche Richtungen ausgehenden Strahlen dargestellt finden, zeichnet der Schüler von Teilchen

ausgehende Strahlen. Gleichzeitig wählt er eine richtungsselektive Darstellung, die verhindert, dass die Lichtstrahlen gleichmäßig auf den Schirm treffen. Im Interview spricht er währenddessen von „Überlagerung“ und „aufschaukeln“, wodurch er zeigt, dass das Wellenmodell während der gesamten Argumentation nicht verlassen wurde.

Der Schüler verbindet die Modellvorstellungen somit nicht nur zu einem allumfassenden Hybridmodell, sondern arbeitet kognitiv synchron mit mehreren Modellen. Die fehlende Trennschärfe zwischen den Modellvorstellungen muss deshalb als einer der wichtigsten Gründe für ein Scheitern von physikalischen Erklärungsversuchen der Probanden angesehen werden.

In ihrer extremsten Ausprägung geht die Vermengung von Modellvorstellungen so weit, dass die begriffliche Eingrenzung völlig verloren geht. Für solche Schülerinnen und Schülern sind Lichtstrahl, Lichtwelle, Lichtteilchen oder Lichtquant ein und dasselbe und werden sinnlich verwendet.

**Frage:** (...) Weshalb wird tatsächlich an diesen Stellen Licht auftreffen?

**Schüler:** Ja, im Grunde wenn man davon ausgeht, dass das hier wirklich Maxima sind, muss ja eine Überlagerung von Photonen sein - irgendwo oder von Licht, das sich aufschaukelt und Maxima erzeugt und zwischendurch an den anderen Punkten muss ja dann im Grunde eine Abschwächung sein. Das heißt, irgendwie müssen ja hier hinter dem Spalt sich die Photonen, die meinetwegen hier rauskommen, müssen ja auch hier ankommen. Also die müssen irgendwie hier so ein bisschen streuen.

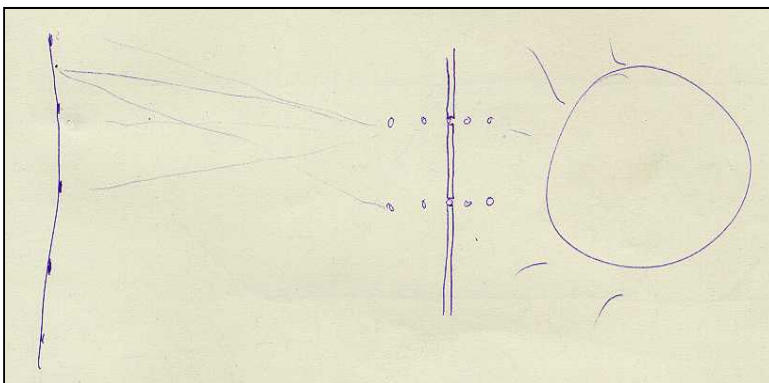


Abbildung 5: Schülerzeichnung und Interviewausschnitt II

Auffallend ist, dass die Modellvorstellungen bei zahlreichen Schülerinnen und Schülern mit einer strikten Hierarchie verbunden sind. Wie der folgende Interviewausschnitt (Abb. 6) zeigt, sieht der Schüler das Strahlenmodell als im Wellenmodell

**Schüler:** Das **Strahlenmodell** ist wirklich nur ein Modell, wo man nur gewisse Eigenschaften beschreiben kann. Das **Wellenmodell** würde Interferenz erklären, die Beugung,... ja, was noch? Wenn sich Wellenberge überlagern, dass da Auslöschung und so entsteht. Und das **Quantenmodell** kann eben erklären, dass das Licht zwar interferiert, aber nicht gleichmäßig, sondern dass die Quanten immer auftreten, wobei sich die Quanten natürlich wieder auf einer Welle bewegen, das würde die Welleneigenschaften erklären; und natürlich entlang des Strahls, damit kann man dann Beugung, ähh... Brechung erklären und so was.

**Frage:** ...das habe ich noch nicht ganz verstanden.

**Schüler:** Das **Wellenmodell** erklärt auch die Eigenschaften der Strahlen und das **Quantenmodell** auch die Eigenschaften des **Wellenmodells und des Strahlenmodells**.

**Frage:** Das heißt, das Quantenmodell umfasst die beiden anderen Modelle?

**Schüler:** Ja, deswegen ist es besser, es ist näher an der Realität.

Abbildung 6: Interviewausschnitt III (Nichterkenntnis von Modellgrenzen durch den Schüler)

enthalten, und das Wellen- und Strahlenmodell als im Quantenmodell enthalten an. Somit werden von ihm neue Modellstrukturen nicht als eigenständige Konstrukte angesehen, sondern als schlichte Erweiterungen bereits bekannter Erklärungsmuster. In der Hierarchie der Modelle stehen zeitlich früher behandelte Modelle aus Sicht dieses Schülers für Modelle mit geringerer Erklärungsmächtigkeit. Infolgedessen wird dem zeitlich am spätesten im Unterricht eingeführten Modell, dem Quantenmodell, eine nahezu omnipotente Stellung zugewiesen.

Die in Schüleraugen überragende Stellung des Quantenmodells wird durch den befragten Schüler dadurch legitimiert, dass das Quantenmodell näher an der Realität liege. Dieser Anspruch geht mit der Vorstellung einher, dass die Realität tatsächlich erkannt werden kann und darüber hinaus vom Lehrer oder anderen Fachautoritäten auch tatsächlich erkannt wurde. Dies ist, wie in der Einleitung ausgeführt, nicht nur beim Licht eine problematische Sichtweise.

Eine genauere Analyse des Interviewausschnittes zeigt einen zweiten Gesichtspunkt der Modellbil-

dung und Modellentwicklung, der nicht nur bei diesem Schüler beobachtet werden konnte: Im ersten, aufzählenden Teil beschränkt sich die Darstellung auf die im Unterricht vermittelten Inhalte. Hier werden die Modelle korrekt und korrekt getrennt beschrieben.

Nach diesem ersten, dem Verfügungswissen entnommenen Teil geht der Schüler interpretierend über die unterrichtliche Darstellung hinaus. Diese Zweiteilung ist ein starkes Indiz dafür, dass (wie bei diesem Schüler) der Umgang mit Modellen im Unterricht auf die reine inhaltliche Vermittlung beschränkt blieb oder die Interpretation von Modellen unscharf und nicht zwischen den einzelnen Modellebenen und der Realität trennend erfolgte. Deshalb sollen im folgenden Abschnitt charakteristische Unterrichtsszenen analysiert werden.

#### - Charakteristische Unterrichtsszenen

Das dem Unterricht zur Holographie zugrunde liegende Konzept [5] sieht eine vertiefte Modelldiskussion in zahlreichen Unterrichtsphasen vor. Trotz der einheitlichen Randbedingungen und des vorgegebenen Konzepts fiel die tatsächliche Unterrichtsgestaltung in den fünf Untersuchungsgruppen im Detail sehr unterschiedlich aus, da die beteiligten Lehrerinnen und Lehrer naturgemäß den ihnen eigenen Unterrichtsstil verfolgten. Darüber hinaus zeigten nicht nur Unterrichtsgespräch und Diskussionsphasen unterschiedliche Schwerpunktsetzungen, sondern auch stark differierende untergründig vorhandene bzw. offen vorgetragene erkenntnistheoretische Positionen der Unterrichtenden.

So kann bereits die einfache Feststellung eines Lehrers bei Erläuterung des Begriffes der „Kohärenz“ (Abb.7) problematische Vorstellungen auslösen.

**Lehrer:** Aber jedes Photon für sich ist eigentlich – und da gibt es natürlich auch modellmäßig verschiedene Darstellungen – ein großer Wellenzug.

Abbildung 7: Lehreräußerung zur Lichtnatur

Hier werden die Teilchennatur und die Wellennatur des Lichtes gleichgesetzt. Da das Verb „sein“ im Deutschen eine stark konstituierende Wirkung aufweist, hat die Aussage „Jedes Photon ist ein großer Wellenzug“ definierenden Charakter und unterbindet eine physikalische sinnvolle Interpretation. Dies weiß auch der Lehrer und schwächt deshalb seine Aussage in zweifacher Hinsicht ab: Erstens vermindert er durch Einfügung des Wortes „eigentlich“ die Wirkung seiner Aussage, wobei die Zielrichtung der Abschwächung für die Schüler noch offen bleibt. Bezieht sich die Abschwächung

auf „jedes“, also die Anzahl der betroffenen Photonen, auf die Photonen an sich oder auf den Aspekt der Gleichsetzung von Photon und Welle? Diese Offenheit versucht der Lehrer durch den zweiten Einschub, dass es „natürlich auch modellmäßig verschiedene Darstellungen“ gäbe, auf die Modellebene zu verengen. Tatsächlich besteht durch solche Aussagen nicht nur die Gefahr, dass die Lernenden verunsichert werden, sondern ebenso, dass sie Modellmischungen und Modellgleichsetzungen als legitime physikalische Argumentationsmuster erleben. Zahlreiche Unterrichtsbeiträge der Schülerinnen und Schüler zeigen, dass sich solche Argumentationsmuster tatsächlich ausgebildet haben. Sie werden nicht immer im Unterricht geklärt.

Darüber hinaus werden die Diskussionsgrundlagen bezüglich Modelltrennung, Modellunterscheidung und Differenzierung zwischen Modell- und Realwelt teilweise nicht erfasst, nicht beachtet oder wie der folgende Unterrichtsausschnitt (Abb. 8) zeigt, oft gewechselt.

**Lehrer:** Was ist also Laserlicht? Hans?  
**Schüler:** Ja, also sehr stark gebündelt, dass es ja Strahlenform annimmt.  
**Lehrer:** Also kein Lichtstrahl?  
**Schüler:** Ja, doch, ein Lichtstrahl. Ich weiß nicht, ob es ein hundertprozentiger Lichtstrahl ist, aber sehr stark gebündelt.  
**Lehrer:** Das ist jetzt genau meine Frage, ist Laserlicht ....  
**Schüler:** Das ist sehr stark gebündeltes Licht und nicht ein Lichtstrahl.  
**Lehrer:** Und warum kann das kein Lichtstrahl sein?  
**Anderer Schüler:** Weil Lichtstrahl ein Modell ist.  
**Lehrer:** Sehr schön. Gut an der Stelle...  
**(teilt Arbeitsbögen aus)**

Abbildung 8: Unterrichtsausschnitt zur Modelldiskussion

Der Lehrer fragt zu Beginn nach den Eigenschaften von Laserlicht und befindet sich damit auf der Ebene realer Erscheinungen. Der Schüler behält diese Ebene zuerst bei, indem er auf die starke Bündelung zu sprechen kommt. Im zweiten Halbsatz wechselt er jedoch in die Modellebene des Strahlenmodells, die von ihm aus der realen Beobachtung einer starken Bündelung abgeleitet wird und so eine Vermengung zwischen Modell und Realität zeigt. Der Lehrer vollzieht diesen Ebenenwechsel nicht nur nach, sondern führt ihn konsequent fort, indem er sich durch seine Frage vollständig auf das Strahlenmodell bezieht. Dieser erfolgte Ebenenwechsel ist dem Schüler allerdings nicht klar. Ob-

wohl er auf die Suggestivfrage des Lehrers mit dem erwünschten Begriff „Lichtstrahl“ argumentiert, hat er die Ebene der realen Erscheinungen noch nicht verlassen, denn er schränkt seine Äußerung durch die Bemerkung, er wisse nicht, ob es ein hundertprozentiger Lichtstrahl sei, stark ein und verweist wiederum auf die starke Bündelung des Laserlichts. Mit dieser Argumentation befindet er sich immer noch auf der Ebene der Realwelt. Diesem Wechsel zurück folgt der Lehrer ebenfalls, indem er zu einer Frage bezüglich des Laserlichts ansetzt. Dies greift der gleiche Schüler wieder durch eine Ebenenvermischung auf: Es handele sich um stark gebündeltes Licht und nicht um einen Lichtstrahl. Da er die Begründung für seine Aussage nicht liefern kann, ist diesem Schüler der von ihm artikulierten Ebenenwechsel allerdings nicht bewusst. Erst ein zweiter Schüler benennt abschließend den Lichtstrahl ausdrücklich als Modellvorstellung, worauf der Lehrer mit dem Unterricht fortfährt.

Die in diesem Unterrichtsausschnitt dargestellten Probleme haben für den Modellgebrauch weitreichende Konsequenzen. So sind Modellmischungen und die Ausbildung von Hybridvorstellungen bei den Schülerinnen und Schülern nicht nur und nicht immer durch einen unreflektierten Umgang mit Modellen zu erklären. Vielmehr können diese Modellmischungen direkt durch den bei vielen Lernenden beobachtete Gleichsetzung von Realität und Modell bzw. der beliebigen nahen Annäherung des Modells an die Realität (siehe Abb. 9) begründet werden.

**Schüler:** ... Dann schafft man ein Modell, also eine Vorstellung, so könnte es sein. Und das ist meiner Meinung nach ein Modell. Und das ist ja nicht gleichzusetzen mit der Realität, dass es wirklich so ist. Also ein Modell ist ja so lange kein Modell, bis es eindeutig bewiesen ist.

Abbildung 9: Schüleräußerung im Unterricht zur Beziehung von Modell und Realität

Durch seine Äußerung zeigt der Schüler im ersten Teil eine ausgesprochen deutliche Differenzierung zwischen Modell und Realität. Seine erkenntnistheoretische Position, dass ein Modell bewiesen werden könne, relativiert diese Unterscheidung zwischen der Welt der realen Erscheinungen und der von Menschen vorgenommenen Modellierungen jedoch. Durch den nicht näher spezifizierten Vorgang des Beweisens wird aus Schülersicht ein Konstrukt aus dem Bereich der Modellwelt in den Bereich der Realwelt überführt.

Zusammen mit der unausgesprochenen Prämisse der Existenz einer eindeutigen Realität hat dies drastische Folgen: Bewiesene Modelle sind äquiva-

lent zur Realität, also sind sie auch äquivalent zueinander. Sollten durch unhinterfragten und oft unbedarften Gebrauch von Modellen im Unterricht diese den Schülern als (im Sinne der obigen Schüleräußerung) bewiesen erscheinen, ist es nur ein kurzer Schritt zur Bildung von Hybridmodellen. Denn gelten Modellkonstrukte als äquivalent zueinander, fällt die Unterscheidung in unterschiedliche Modellklassen und damit die kognitive Trennung der einzelnen Modelle. Elemente aus einem Modell können dann psychologisch problemlos in ein anderes Modell eingebaut werden.

Ein zentraler Punkt bei einer didaktischen Vermittlung physikalischer Modelle sollte deshalb die Beziehung der Modelle zu den beobachtbaren Phänomenen und eine klare Herausarbeitung der Modellgrenzen im Unterricht darstellen. Zeigen Schülerinnen und Schüler keine Trennschärfe zwischen den Modellen untereinander und in Beziehung zur Realwelt, sind sie nicht in der Lage, konsistent und mit physikalischem Sinngehalt Problemstellungen zu bearbeiten. Sie springen zwischen Modellen, Phänomenbeschreibungen und Erklärungsansätzen gleichsam wahllos hin- und her, ohne diese Sprünge zu erkennen.

Im Gegensatz dazu zeigen sich Schülerinnen und Schüler mit ausgeprägtem metakonzeptuellem Verständnis in der Lage, bewusst und problemorientiert von Argumentationsmustern eines Modells in die Ebene eines anderen Modells zu wechseln, diese Wechsel zu benennen, zu begründen und eine klare Unterscheidung zwischen Realwelt und Modellwelt vorzunehmen.

### 3. Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Fallstudie zum Modellgebrauch in der Sekundarstufe II legen nahe, dass in der Praxis zur Behandlung der Optik größeren Wert auf die unterschiedlichen Modelle gelegt werden muss. Die Schülerinnen und Schüler sollen lernen, die Modelle bewusst zu trennen und zu nutzen.

Zurzeit werden die einzelnen Modelle nacheinander eingeführt ohne sie nebeneinander zu stellen. Lediglich das Wellenmodell wird mit dem Strahlenmodell verglichen, um die Unzulässigkeit des Strahlenmodells herauszustellen. Das Versagen des Wellenmodells zur Erklärung des Photoeffekts wird gelehrt und daher das Photonenmodell eingeführt. In diesem Schritt hat das Photonenmodell meist einen ausschließlichen Teilchencharakter. Da mit dem Teilchenmodell (das häufig nicht weiter an anderen optischen Phänomenen angewandt und erklärt wird) aber die Interferenz und Beugung nicht erläuterbar ist, wird auf diesem Wege der Welle-Teilchen-Dualismus des Lichts eingeführt. Diese Vorgehensweise hat die Herausbildung von mindestens zwei Fehlvorstellungen bei den Lernenden zur Folge. Erstens glauben sie, dass das Photon

ein schnelles Teilchen ist und zweitens verstehen sie den Welle-Teilchen-Dualismus als Vorschrift, jeweils das Modell zu nutzen, das sich anbietet.

Es empfiehlt sich folglich in der Sekundarstufe II bei der Behandlung des Lichts

- das Wesen von und den Umgang mit Modellen in der Physik zu wiederholen bzw. neu zu vermitteln;
- die bis dahin bekannten Modelle des Lichts zu wiederholen und in ihren Funktionen nebeneinanderzustellen;
- das Wellenmodell nicht nur zur Erklärung der Beugung und Interferenz zu benutzen und sein Versagen bei der Erklärung des Photoeffekts zu lehren, sondern ebenso für optische Phänomene wie Lichtbrechung und Reflexion;
- zu diskutieren, warum es zum Licht mehrere Modelle gibt und deren Vor- und Nachteile beim Darstellen verschiedener optischer Phänomene;

Der richtige Umgang mit Modellen stellt nicht nur in der Optik eine erhöhte Schwierigkeit für die Schülerinnen und Schüler dar, sondern auch in den anderen Gebieten der Physik und Chemie. Daher befasst sich das Promotionsvorhaben von Antje Leisner mit dem langfristigen Lernen von und mit Modellen in der Sekundarstufe I.

Zum Schluss soll hier noch einmal betont werden, dass sich zwischen fachphysikalischen und fachdidaktischen Gesichtspunkten einer erfolgreichen Modelldiskussion zum Teil erhebliche Unterschiede zeigen können. So gab Richard Feynman auf die Frage bezüglich der Wellen- oder Teilchennatur [3] „Was ist Licht?“ die eindeutige Antwort: „Keins von beiden, sondern etwas Drittes!“ Dieses Dritte, die Quantenelektrodynamik, mag als fachphysikalischer Formalismus die sich experimentell zeigenden Phänomene mit hinreichender Genauigkeit beschreiben.

Die Interpretation dieses fachphysikalischen Dritten offenbart jedoch auch heute noch modelltheoretische Probleme. So schreibt Roger Penrose im Vorwort zu [7]: „**Bei geeigneter Betrachtung erweisen sich Teilchen und Wellen im Quantenbild als gleich.**“, während Jürgen Ehlers in einem zweiten Vorwort zum gleichen Buch [7] betont: „Inzwischen ist es zwar gelungen, in der (...) Quantenmechanik und der (...) Quantenfeldtheorie einen viele experimentelle Tatsachen sehr genau erfassenden mathematischen Formalismus zu konstruieren, der in einem gewissen Sinn die früher benutzten **Bilder der Welle und des Teilchens vermeidet und diese als nur unter bestimmten, einander ausschließenden Umständen anwendbar erweist.**“

Die sich hier zeigende Spannweite zwischen einer

Gleichsetzung von Modellbegriffen und ihrer gegenseitigen Ausschließung zeigt, dass das von Feynman angeführte Dritte fachdidaktisch gänzlich anders zu bewerten ist. Ein drittes, viertes oder weiteres Lichtmodell, wie beispielsweise das Zeigermodell, sollte didaktisch klar getrennt und nur unter ausführlicher Erörterung der Modellgrenzen im Unterricht eingeführt werden.

Dabei ist es unerlässlich, dass im Unterricht

- auf verschiedenen Modellebenen
- unter Nutzung verschiedener Modellwege
- metakonzeptuelle Denkweisen

eingübt werden. Der Einsatz von Computer-Simulationsprogrammen, die einen Modellwechsel bei der Darstellung des Simulationsprozesses zulassen, ist dabei einer der erfolgversprechendsten Ansätze.

### Literatur

- [1] Johannes Werner: Vom Licht zum Atom. Ein Unterrichtskonzept zur Quantenphysik unter Nutzung des Zeigermodells, Logos Verlag, Berlin 2000.
- [2] Peter Goldkuhle: Modellbildung und Simulation im Physikunterricht. Einsatzmöglichkeiten computergestützter Modellbildungssysteme, erschienen in der Reihe: Neue Medien im Unterricht, Soester Verlagskontor, Hamm 1993.
- [3] Wolfgang Bleichroth, Helmut Dahncke, Walter Jung, Wilfried Kuhn, Gottfried Merzyn, Klaus Weltner: Fachdidaktik Physik, 2. überarb. und erw. Auflage, Aulis Verlag Deubner & Co. KG, Köln 1999.
- [4] Antje Leisner: Die Behandlung von Modellvorstellungen zum Licht im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe am Beispiel der optischen Refraktion und Dispersion, Schriftliche Hausarbeit im Rahmen der Ersten Staatsprüfung für das Lehramt Sekundarstufe I/II, Universität Potsdam 2001.
- [5] Martin E. Horn, Helmut F. Mikelskis: Konzeption und Evaluation einer Unterrichtsreihe zur Holographie; in: Renate Brechel: Zur Didaktik der Physik und Chemie – Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung der GDGP in Berlin 2000, Leuchtturm-Verlag, Alsbach/Bergstraße 2001.
- [6] Martin E. Horn, Helmut F. Mikelskis: Schülervorstellungen zur Holographie; in: Volkhard Nordmeier (Red.): Beiträge zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft in Bremen 2001, LOB Berlin 2001.
- [7] John Stachel (Hrsg.): Einsteins Annus mirabilis. Fünf Schriften, die die Welt der Physik revolutionierten, rororo science, Reinbek bei Hamburg 2001.