

Spiegelwelt statt Reflexionsgesetz – Vorschläge zum Anfangsunterricht über Optik

Thomas Weber, Lutz-Helmut Schön

(aus: *NiU Physik* 11 (60), S. 30-36)

Vorbemerkung

Am Beispiel einer Unterrichtssequenz zur Reflexion am ebenen Spiegel wird dargestellt, wie Anfangsunterricht zur Optik gestaltet werden kann, der auf langfristigen und tragfähigen Wissenserwerb ausgerichtet ist. Mit dem "Prinzip Ameise" wird ein Vorgehen vermittelt, das von der unmittelbaren Beobachtung ausgeht, mit der "Spiegelwelt" und den "Lichtwegen" ein Modellverständnis, das bis in die Quantenphysik hinein gültig bleibt. Es folgt ein Ausblick auf den daran anknüpfenden Optikunterricht im Rahmen des "Lichtwegkonzepts".

1 Der Anfang und das Ganze

"Der Anfang ist die Hälfte des Ganzen", wußte schon Aristoteles, und unzählige Male hat sich dieser Satz auch für den Physikunterricht als zutreffend erwiesen. In der Tat zeigen wissenschaftliche Untersuchungen wie die von Lichtfeldt [Lic96], dass gerade anfangs aufgenommene Vorstellungen – insbesondere wenn sie sich mit den Präkonzepten vereinbaren lassen – den späteren Wissenserwerb in überproportional hohem Maße beeinflussen. Wiesner [Wie94] hat sich mit den Präkonzepten zur Optik auseinandergesetzt und einen Unterrichtsgang entwickelt, der sich an den Lernschwierigkeiten und Schülervorstellungen orientiert, aber vom Ansatz her auf die geometrische Optik begrenzt ist.

Wir möchten weitergehende Konsequenzen ziehen: Wenn wir Anfangsunterricht planen, so müssen wir bereits von den ersten Stunden an das berücksichtigen, was den Schülern später im Unterricht begegnet. Nacheinander folgende Lerninhalte sollten aufeinander aufbauen, und keinesfalls darf der Anfangsunterricht Vorstellungen begünstigen, die dem Verständnis später zu lernender Inhalte hinderlich sein könnten.

Wie weit der Physikunterricht davon entfernt ist, diese Anforderung zu erfüllen, zeigt sich deutlich im Unterricht zur Optik, wie er durch die meisten Lehrpläne und Schulbücher nahegelegt wird. Dort wird bereits nach wenigen Unterrichtsstunden mit dem Lichtstrahlmodell eine Betrachtungsweise eingeführt, die in der Interferenz- und Quantenoptik im Oberstufenunterricht kaum wieder aufgegriffen wird. Vielmehr besteht bei der frühzeitigen Einführung dieses Modells die Gefahr einer Verwechslung mit der Realität. Wenn Schüler aber glauben,

Die Form des Mondes	1. Std.	Licht und Dunkelheit. Erfahrung des Sehens.
	2. Std.	Auswertung der Beobachtungen zu "Licht und Dunkelheit", HA: Mondbetrachtungen.
	3. Std.	Zeichnen der einseitig beleuchteten Kugel von verschiedenen Standpunkten. Schülerübung
	4. Std.	Der Lauf des Mondes. Regeln und Vorhersagen
	5. Std.	Der Mond fährt mit. Die Blickrichtung zu bewegten Objekten
weiße Schatten	6. Std.	Der Schattenwürfel. Beobachtung verschiedener Schattenphänomene
	7. Std.	Das Prinzip Ameise. Eine Möglichkeit, Kernschatten und Übergangsschatten zu beschreiben
	8. Std.	Das Prinzip Ameise II. Erklärung des weißen Schattens
	9. Std.	Schatten verschiedener Lichtquellen. Die Abhängigkeit von der Form der Lichtquelle
	10. Std.	Die Lochkamera. Anwendung des "Prinzips Ameise"
Doppelschattenexperiment	11. Std.	Hat der Spiegel eine Farbe? Die Entdeckung des Spiegels
	12. Std.	Die Spiegelwelt. Doppelschattenexperiment
	13. Std.	Schatten in der Spiegelwelt. Der Zylinder vor dem Spiegel
	14. Std.	Das Spiegelgesetz. Schülerübungen
	15. Std.	Das Spiegelgesetz. Schülerübungen
	16. Std.	Die Auflösung des Doppelschattenexperiments
Lichtwege bei der optischen Hebung	17. Std.	Der gerade und der geknickte Stab. Die optische Hebung
	18. Std.	Messung der optischen Hebung
	19. Std.	Die Totalreflexion
	20. Std.	Der Blick durch die Schusterkugel. Die Wirkung einer Kugellinse

Abbildung 1: Stundenübersicht zu unserer Anfangsoptik. Die Kästen links deuten übergeordnete Problemstellungen an, die grau unterlegten Stunden werden in diesem Artikel beschrieben.

das Licht bestehe wirklich aus Strahlen, so ist das in der Tat ein nicht zu unterschätzendes Hindernis für die spätere Deutung von Interferenzphänomenen.

Auch über kürzere Unterrichtszeiträume hinweg scheint die Kohärenz des Unterrichts gering zu sein. So ist das Thema "Schatten" meist Gegenstand der ersten Optik-Stunden, um dann bei der Behandlung der Brechung und der Reflexion links liegengelassen zu werden. Könnte man nicht, statt bei der Reflexion und der Brechung das problematische Lichtstrahlmodell einzuführen, einfach mit den Schatten weiterarbeiten? Eine bessere inhaltliche Abstimmung von Unterrichtsinhalten sollte es auch ermöglichen, größere Spannungsbögen im Unterricht zu schaffen, die für die Schüler die Zusammenhänge zwischen zeitlich auseinanderliegenden Stunden spürbar und transparent machen.

Am Beispiel einer kurzen Unterrichtssequenz von vier Stunden zur Einführung der Reflexion in einer siebten Klasse möchten wir aufzeigen, wie Anfangsunterricht durchgeführt werden kann, der auf langfristigen Wissensaufbau hin orientiert ist.¹ Die dazwischenliegenden normal gedruckten Abschnitte sollen anhand dieser Beispiele einige didaktische Aspekte unseres Unterrichtsganges näher erläutern. Der Unterricht wurde in einem Berliner Gymnasium im Rahmen des SINUS-Programms (Modul 5: kumulatives Lernen) durchgeführt [Bun96, S. 93]. Anhand dieses Beispiels erläutern wir auch einige didaktische Aspekte unseres Unterrichtsganges. Abbildung 1 auf der vorherigen Seite zeigt einen Überblick über den gesamten Unterrichtsgang. Am Ende des Artikels soll angedeutet werden, welche Anknüpfungspunkte wir uns für den Optikunterricht nach dem Lichtwegkonzept in den höheren Klassen vorstellen.

2 Die Entdeckung des Spiegels

Zu Unterrichtsbeginn ist es dunkel im Physikraum. Nur schemenhaft hebt sich vorn das mit schwarzen Tüchern² zugehangene Pult ab. Kaum deutlicher ist darauf ein helles Rechteck zu erkennen. Nun schaltet der Lehrer die an der Decke angebrachte Experimentierleuchte ein. Schräg von oben fällt ein Lichtkegel auf das Rechteck. "Auf der hellen Fläche befindet sich ein Deckel", erklärt der Lehrer und schiebt eine kreisrunde Abdeckung (③ in Abbildung 2 auf der nächsten Seite) etwas beiseite. Die schmale Sichel einer ebenfalls kreisförmigen Öffnung wird unter dem Deckel sichtbar. Tiefschwarz erscheint sie inmitten der hellen Fläche aus weißer Pappe.

Schnell wird die erste Vermutung, durch die Öffnung sei das darunterliegende schwarze Tuch zu sehen, verworfen, denn das Schwarz der Öffnung erscheint viel dunkler als das der herumliegenden

¹Um dem Leser ein anschauliches Bild zu geben, schildern wir einzelne Unterrichtsabschnitte aus der Sicht eines Beobachters möglichst detailliert, aber ohne den Anspruch, dass der Unterricht genau so abzulaufen habe. Diese unterrichtsnahen Abschnitte des Beitrags sind im folgenden serifenlos gesetzt.

²Die Beschaffung einiger großer Tücher im Stoffhandel ist nicht ganz preiswert, lohnt sich aber für viele Gelegenheiten im Physikunterricht, bei denen störende Lichtreflexe vermieden oder Räume besonders gut abgedunkelt werden sollen. Häufig kann schwarzer Vorhangstoff z. B. von einer Theatergruppe geliehen werden.

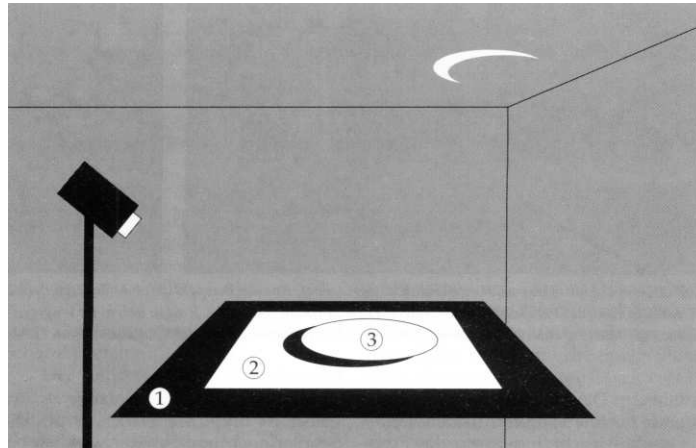


Abbildung 2: Anordnung zur "Entdeckung des Spiegels". Auf schwarzem Tuch ① liegt ein großer Spiegel unter einem weißen Zeichenkarton ②, in den ein kreisrundes Loch geschnitten ist. Das Loch wird von einer etwas größeren weißen Kreisscheibe ③ verdeckt, deren Rand von unten geschwärzt ist.

Tücher, die nun fast grau aussehen. Die Klasse spaltet sich in zwei Parteien: Einige suchen nach immer neuen Materialien, die gleichzeitig schwarz sind und eine glatte Oberfläche haben - eine schwarze Steinplatte oder eine Glasplatte, die sich auf einer schwarzen Unterlage befindet. Andere hingegen sind radikaler: Sie vermuten, der Lehrer hätte zuvor ein Loch in den Tisch gesägt, in das man nun hineinsehen könne.

Schließlich bemerkt einer den Lichtfleck an der Decke, gegenüber der Lampe. "Der hat ja die gleiche Form wie die Öffnung!" Sofort ist klar, dass sich in der Öffnung ein Spiegel befindet, doch es bleibt Verwunderung darüber, warum der Spiegel dort so schwarz aussieht. Oder war es vielleicht doch ein Loch, in dem sich eine weitere Lampe befindet? Könnte nicht der Lichtfleck an der Decke auch durch eine Lampe in dem Loch erzeugt werden?³

Diesen Raum hinter dem Spiegel, der hier den Eindruck eines Loches erweckt und in dem alle Gegenstände zu sehen sind, die sich vor dem Spiegel befinden, bezeichnen wir von nun an als "Spiegelwelt". Der Spiegel selbst ist, da er farblos ist und da man die Spiegelwelt durch ihn hindurch sieht, in dieser Vorstellung ein Fenster zur Spiegelwelt. Keinesfalls befinden sich die Spiegelbilder "auf dem Spiegel". Bald haben sich die Schüler an diese Betrachtungsweise gewöhnt, und ihnen fällt auf, wie oft man im Alltag einer Spiegelwelt begegnet: Im Supermarkt, wo durch die Spiegelwelt das Obst- und Gemüseangebot vergrößert wird, im Schlafzimmer, wo der verspiegelte Schrank den Raum auf das Doppelte anwachsen lässt usw.

Wenn ein Unterrichtsabschnitt zur Reflexion bzw. zum Spiegel von einem Phänomen ausgehend begonnen werden soll, können leicht Schwierigkeiten dadurch entstehen, dass die Schüler nicht einsehen, warum sie sich mit dem Phänomen gründlich auseinandersetzen sollen. Jedes

³Einen ähnlichen Zugang, bei dem die hinter dem Spiegel erscheinende Lichtquelle betrachtet wird, wählt Kiupel [Kiu00].

Kind hat schließlich schon unzählige Male einen Spiegel gesehen und glaubt genau zu wissen, wo sich die Spiegelbilder befinden, welche Eigenschaften sie haben usw. Zu trivial erscheint das Untersuchungsobjekt, um sich auf eine ernsthafte Beobachtung einzulassen, viel zu klar die eigene (Fehl-)vorstellung, um sie wirklich in Frage zu stellen.

Wir möchten die Schüler, indem wir den Spiegel verfremden, zunächst verunsichern, dann aber zu genauen Beobachtungen provozieren [Sch83]. Der Anreiz zur Beobachtung gelingt um so besser, je rätselhafter das Objekt ist und um so mehr es daran zu entdecken gibt. Und je besser die Beobachtung gelingt, desto eher sind die Schüler bereit, vorhandene Fehlvorstellungen aufzugeben.

3 Das Doppelschattenexperiment

Die Stunde ist noch nicht zuende. "Nun", sagt der Lehrer, "werde ich meine Hand über den Spiegel halten." Sofort ist den Schülern klar, was passieren wird: Der Spiegel reflektiert das Lichtbündel der Lampe an die Decke, die Hand wirft einen Schatten in diesem Lichtbündel, also wird ein Schatten der Hand an der Decke zu sehen sein. – Dieser Gedankengang etwa lässt sich aus den Antworten der Schüler rekonstruieren. Der Lehrer tut das offenbar Überflüssige: Langsam schiebt er, etwa 10 cm über dem Spiegel, seine Hand über die Spiegelfläche, langsam erscheint vom Rand her kommend ein Schatten der Hand an der Decke. Unbeirrt bewegt der Lehrer seine Hand weiter, bis etwas Überraschendes passiert: Während der vorhandene Schatten sich zur Mitte des Lichtflecks hin bewegt, erscheint vom Rand her ein zweiter handförmiger Schatten, obwohl der Lehrer nach wie vor nur die eine Hand über den Spiegel hält (Abbildung 3). Weitere merkwürdige Dinge sind zu beobachten: Der zweite Schatten sieht etwas anders aus als der erste. Er bewegt sich auch, aber nur dann, wenn sich der erste Schatten bewegt, d.h. wenn der Lehrer seine Hand über dem Spiegel bewegt. Dreht der Lehrer seine Hand um die Längsachse, so scheinen sich beide Schattenprojektionen mitzudrehen, allerdings in entgegengesetzter Richtung. Eine Steigerung des Erstaunens ergibt sich, als der Lehrer zusätzlich seine zweite Hand über den Spiegel schiebt... Die Schüler sind ratlos. Jemand vermutet, es sei ein doppelter Spiegel vorhanden, kann sich aber davon überzeugen, dass es sich um einen ganz gewöhnlichen Spiegel handelt. Jetzt klingelt es zum Stundenende.

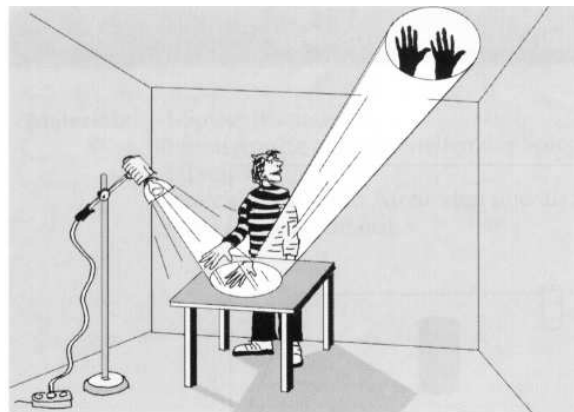


Abbildung 3: Prinzipskizze zur Durchführung des Experiments "Doppelschatten".

Dass die Stunde, kurz nachdem das Problem aufgeworfen ist, zuende geht, mag als Versehen oder als Planungsfehler erscheinen. Nach dem üblicherweise in der Didaktik gelehrt und

vielfach praktizierten Ablauf einer problemorientierten Unterrichtsstunde müssten die Schüler jetzt noch weitere Vermutungen zu den doppelten Schatten nennen, eine Lösung erarbeiten und schließlich ein Ergebnis formulieren. Davon sind wir in dieser Stunde noch weit entfernt, doch dahinter steckt Absicht: Indem wir das Problem erst kurz vor Stundenende aufwerfen, möchten wir den Schülern Gelegenheit geben, sich bis zur nächsten Stunde ohne Zeitdruck und ohne die führende Hand des Lehrers Gedanken über das merkwürdige Phänomen zu machen, anderen darüber zu berichten und mit ihnen gemeinsam nachzudenken. Dahinter steckt die Annahme, dass ein eindrucksvolles Problem, solange es ungelöst ist und Zweifel hervorruft, die Schüler wirklich bewegt – bereits Wagenschein hat diesen Zustand beschrieben und ihn als "produktive Verwirrung" bezeichnet [Wag92]. Wenn wir solche Denkprozesse zwischen den einzelnen Physikstunden anstoßen, dann stellen wir eine bessere Verbindung zwischen ihnen her als es andernfalls möglich wäre. Für die Schüler sind spürbare Verbindungen zwischen den Stunden unseres Erachtens eine wichtige Grundlage für den kumulativen Aufbau von Wissen.

In diesem Fall gehen wir mit unserer Unterrichtsplanung sogar noch einen Schritt weiter. Das im Raum stehende Problem ist so komplex, dass es sich auch nicht in der folgenden Stunde abschließend lösen lassen wird. Am Ende der nächsten Stunde werden die Schüler das Phänomen zwar mit Hilfe der Spiegelwelt besser beschreiben können, aber erst nach weiteren zwei Stunden werden sie eine Gesetzmäßigkeit kennen, die ihnen eine von Fehlvorstellungen bereinigte Erklärung ermöglicht (s.u.). Die Doppelschatten stellen also eine Leitlinie dar, anhand derer die Inhalte der folgenden Stunden erarbeitet werden sollen. Daraus ergibt sich ein größerer Spannungsbogen für den Unterricht, der mit der Problemstellung beginnt, mehrere Stunden umfasst und mit der Anwendung des schließlich erarbeiteten Gesetzes auf die Ausgangssituation des Doppelschattenexperimentes endet. Weniger komplexe Probleme ermöglichen zwar im allgemeinen schnellere Lösungen, aber keine langen Spannungsbögen. Gerade lange Spannungsbögen verbinden Inhalte mehrerer Stunden miteinander (vertikale Vernetzung) und fördern so den Wissensaufbau.

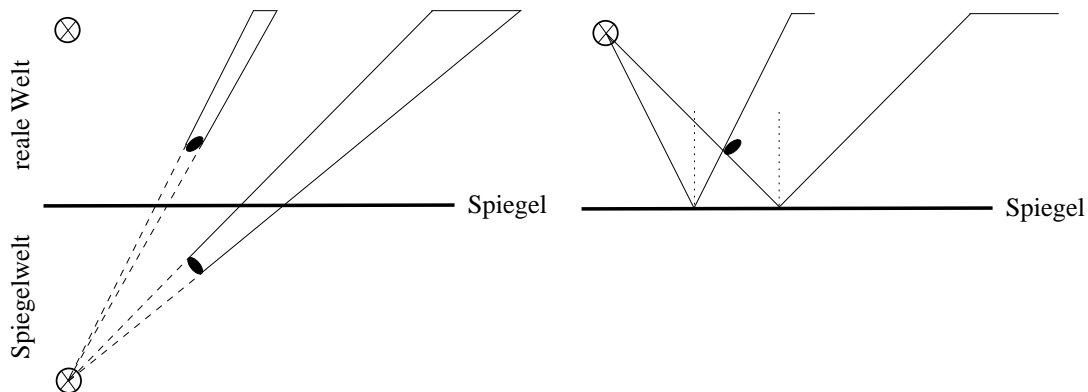
Inhaltlich wurde mit dem Doppelschattenexperiment die Reflexion am ebenen Spiegel eingeführt. Gleichzeitig haben wir damit aber auch ein weiteres Experiment zum vorangegangenen Thema "Schatten" durchgeführt (siehe Abbildung 1 auf Seite 2). Es ist uns wichtig, das alte Wissen aufzugreifen, es zu erweitern und in neue Zusammenhänge zu stellen. So halten wir nicht nur das bisher erworbene Wissen länger frisch und gewinnen Anknüpfungspunkte für den nachfolgenden Wissenserwerb, sondern die Schüler erfahren auch, dass sich das bisherige Lernen gelohnt hat und ihnen nun nützlich sein kann.

4 Lösungsansatz mit dem Prinzip "Prinzip Ameise"

In der folgenden Stunde bleiben die von uns erhofften Lösungsvorschläge aus. Dennoch scheinen sich zumindest einige Schülerinnen und Schüler in der Zwischenzeit gedanklich damit beschäftigt zu

haben. Bei der Beschreibung der Beobachtungen an dem wieder aufgebauten Experiment werden auch Details zu den Bewegungen der Schatten genannt.

Der Lehrer ist darauf vorbereitet und reagiert, indem er "Meisi" hochhält, eine kleine Ameisenatnappe, die an einem Zeigestock befestigt ist. Nach kurzem Überlegen haben gleich mehrere Schüler eine Idee, wie es weitergehen könnte.



(a) Ausgehend von Beobachtungen der "Ameise" und mit Hilfe der eingezeichneten Spiegelwelt erhält man eine Konstruktion aus gerade Verbindungslinien (Schattengrenzen).

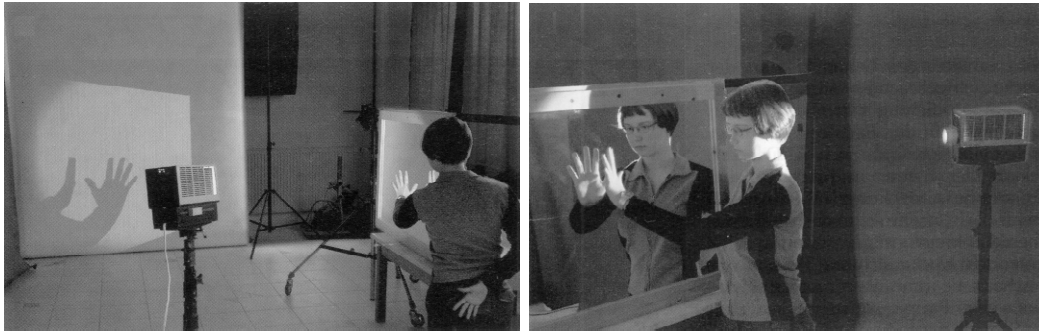
(b) Bei der sonst üblichen Konstruktion kommt man ohne die Spiegelwelt aus, aber es müssen Hilfslinien (Lote) eingezeichnet und Winkel gemessen werden. Der Punkt S_1 kann auf dem Niveau des Anfangsunterrichts nur durch Probieren gefunden werden.

Abbildung 4: Konstruktion der Doppelschatten.

Die Ameisenatnappe "Meisi" steht in unserem Unterricht für das "Prinzip Ameise" [Hei95]: Eine Ameise, die an einer Wand (oder einer Zimmerdecke) entlang krabbelt, auf die – infolge der Lichtquellen und Schattenkörper in der Umgebung – ein Muster aus Licht und Schatten fällt, könnte beschreiben, auf welche Weise der Schatten an ihrem Aufenthaltsort entsteht, da sie beobachten kann, welche Lichtquellen durch welche Schattenkörper verdeckt werden (Abbildungen 4 und 5). Da "Meisi" nicht sprechen kann, ist es in solchen Fällen Aufgabe der Schüler, sich an den Ort der Ameise zu begeben und ihre Beobachtungen zu nennen. Mit Hilfe des "Prinzips Ameise" lässt sich die Entstehung komplexer Schattenmuster beschreiben.

Aus dem Sammlungsraum wird eine Leiter geholt und so aufgestellt, dass einzelne Schüler Beobachtungen vom Ort der Schatten an der Decke durchführen können. Die Hand des Lehrers wird durch eine Hand aus Pappe ersetzt, um eine dauerhafte Beobachtung zu ermöglichen.

Tief unterhalb des Spiegels sieht der Schüler, während er von der Leiter nach unten blickt, die Spiegellampe. Bewegt er sein Auge in den einen der beiden Schatten, so bemerkt er, wie die Spiegellampe von der Hand in der Spiegelwelt verdeckt wird, bewegt er es in den anderen der



(a)

(b)

Abbildung 5: Doppelschattenexperiment, horizontal angeordnet. Aus der Perspektive des äußeren Beobachters sind die doppelten Schatten auf dem Schirm zu sehen (a); aus der Perspektive der Ameise ist hingegen zu erkennen, wodurch die Schatten erzeugt werden – hier befindet sich die Ameise in dem Schatten, den der Kopf der Spiegelperson im Licht der Spiegellampe wirft (b).

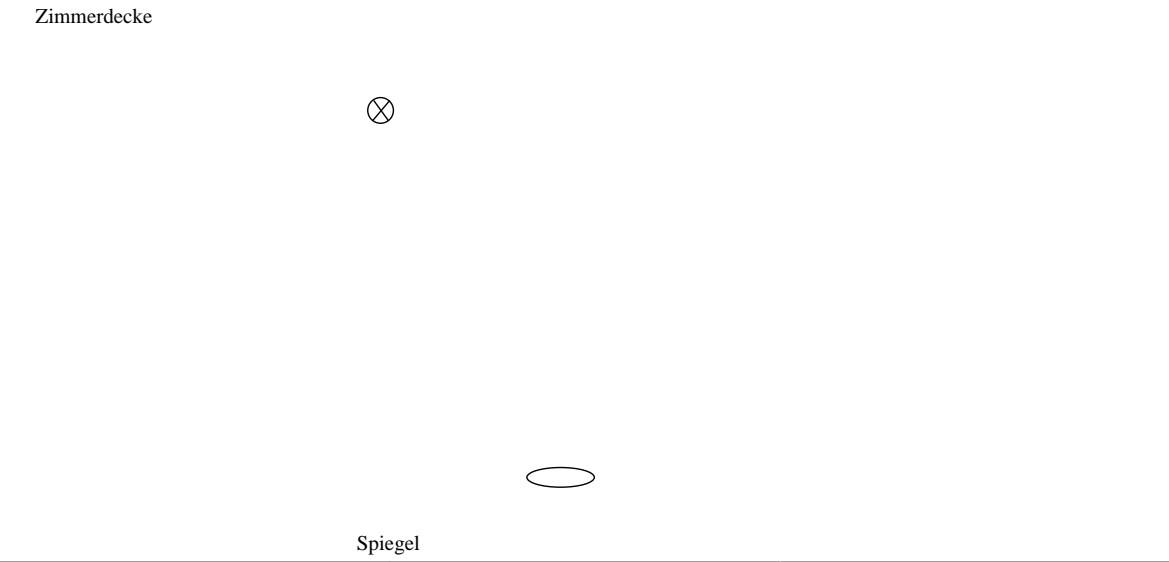
beiden Schatten, so erkennt er, dass die Spiegellampe nun von der wirklichen Hand über dem Spiegel verdeckt wird.

Die Interpretation der Beobachtungen ist für die Schüler nicht unbedingt einfach. Oft wird die unter dem Spiegel sichtbare Lichtquelle nicht als Spiegellampe akzeptiert, die Hand und die Spiegelhand werden nicht als unterschiedliche Objekte gedeutet. Hier empfiehlt es sich Hilfen anzubieten (Abbildung 6 auf der nächsten Seite): So kann der Verlauf der von Lampe und Spiegellampe erzeugten Lichtkegel zunächst ohne die Schattenhände beschrieben werden. Die Unterscheidung von Hand und Spiegelhand gelingt leichter, wenn die Ober- und Unterseite der Papphand unterschiedlich gefärbt sind.

Mit dem Prinzip Ameise und der Spiegelwelt werden in dieser Stunde gleich zwei tragende Prinzipien unserer Anfangsoptik aufgegriffen. Beide Prinzipien werden in wechselnden Zusammenhängen immer wieder angewendet und bilden so einen Leitfaden des Unterrichts. Das im Zusammenhang mit dem Thema "Schatten" eingeführte "Prinzip Ameise" steht gleichzeitig für den phänomenologischen Zugang in unserer Anfangsoptik: Die Schüler betrachten Experimente nicht mehr nur von außen, sondern werden als Lichtempfänger einbezogen und somit Teil des Experiments. Das Prinzip Ameise trägt also zum Aufbau des Wissens bei, indem es durchgehend verwendet wird, und kommt den jüngeren Schülern entgegen, indem es die sinnliche Wahrnehmung in den Mittelpunkt rückt.

Arbeitsblatt:
Das Doppelschattenexperiment

Zimmerdecke



Spiegel

Aufgabe:
Trage die gespiegelte Hand und die gespiegelte Lichtquelle ein. Erkläre dann durch Einzeichnen, wie die beiden Schatten an der Decke entstehen!

Abbildung 6: Arbeitsblatt zum Doppelschattenexperiment

5 Licht und Schatten in der Spiegelwelt

In der folgenden Stunde wird der bisher horizontal liegende Spiegel aufgerichtet, damit wir gemeinsam Beobachtungen durchführen und darüber sprechen können. Vor dem Spiegel liegt ein großes Blatt weißes Papier, das im Spiegel weiterzugehen scheint. Die Hand aus dem Doppelschattenexperiment wird durch einen einfacheren Körper ersetzt, zum Beispiel eine zylindrische Vase, die vor dem Spiegel aufgestellt wird, die Experimentierleuchte wird durch eine Kerze ersetzt.

Dass die Spiegelkerze einen Schatten des Zylinders vor dem Spiegel wirft, ruft einiges Erstaunen bei den Schülern hervor, dass der von der realen Kerze am realen Zylinder erzeugte Schatten in die Spiegelwelt hineinfällt, ebenso. Allmählich werden alle erkennbaren Schatten von den Schülern beschrieben (vgl. [Sch94]) – nur zwei Schatten sind aufgrund der unvollständigen Abdunkelung kaum zu sehen, und zwar die Schatten von Kerze und Spiegelkerze, die im Licht der jeweils anderen Kerze entstehen. Diese Schatten bleiben daher unerwähnt.

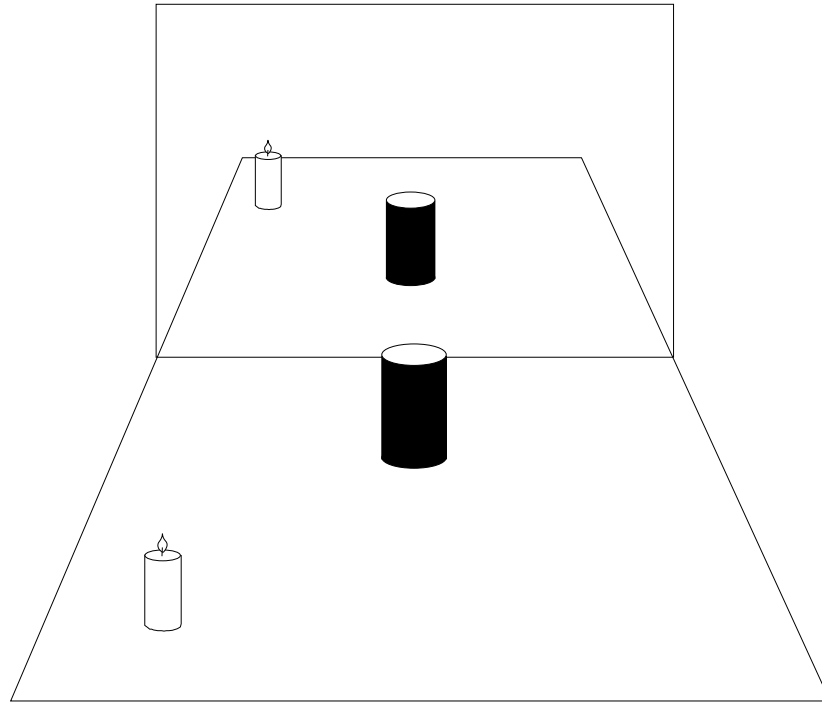
Um die Ergebnisse festzuhalten wird von den Schülern eine Zeichnung angefertigt, die gezeichneten Schatten werden gemeinsam nummeriert und diese Nummern in eine Matrix eingetragen, aus der dann abgelesen kann, wie die Schatten entstehen (Arbeitsblatt in Abbildung 7 auf der nächsten Seite). Als sich herausstellt, dass zwei Felder in der Matrix leer bleiben, wollen die Schüler das Experiment noch einmal sehen, doch der Lehrer besteht darauf, vorher genauere Angaben zu den unbeobachteten Schatten machen zu lassen. Anschließend werden diese beiden Schatten im Experiment gesucht. Die Schüler sind sichtbar stolz darauf, dass ihre Vorhersage zutreffend war.

Auch in dieser Stunde bleibt bei den Schülern eine deutliche Skepsis gegenüber der Spiegelwelt vorhanden. Der Widerspruch, dass wir mit einer Spiegelwelt arbeiten, die es in Wirklichkeit gar nicht gibt, scheint unausgesprochen im Raum zu stehen. Nach der Stunde bemerkt ein Schüler: "Wenn ich hinter den Spiegel gucke, ist da keine Spiegelwelt. Die Spiegelwelt gibt es gar nicht." Es ist gut so, dass diese Skepsis da ist. Vielleicht fördert der Lehrer sie sogar, indem er mehrmals hervorhebt: "Die Gegenstände in der Spiegelwelt kann man zwar sehen, aber nicht anfassen!"

Andererseits erfahren die Schüler dass die Spiegelwelt eine in vielen Fällen geeignete Beschreibungsweise ist. Schattenphänomene in der Spiegelwelt lassen sich genau so beschreiben, wie die Schüler es gewohnt sind. Das Prinzip Ameise sowie das zuvor unterrichtete Schema zur Beschreibung von Schatten werden von den Schülern mit dem Konzept der Spiegelwelt verknüpft. Sogar erfolgreiche Vorhersagen für Experimente lassen sich mit Hilfe der Spiegelwelt machen.

Fast unbemerkt haben wir damit begonnen, ein modernes Modellverständnis anzulegen, das bis in den Unterricht zur Quantenmechanik hinein tragfähig bleiben soll. An die Stelle anschaulicher, mechanistischer Modelle, zu denen aus unserer Sicht das Lichtstrahlmodell gehört, tritt eine abstrakte "Vorhersagekraft" der Theorie. So schrieb Paul A. M. Dirac, Mitbegründer

Arbeitsblatt:
Schatten in der Spiegelwelt



Aufgaben:

1. Trage deine Beobachtungen in die Skizze ein.
2. Ordne allen Schatten den richtigen Platz in der Tabelle zu, indem du die jeweilige Nummer aus dem Tafelbild einträgst

Lichtquelle			
Schattenkörper		Kerze	Spiegelkerze
Zylinder			
Spiegelzylinder			
Kerze			
Spiegelkerze			

Abbildung 7: Arbeitsblatt zur Spiegelwelt

der Quantenmechanik [Pie96]: "Die einzige Aufgabe der theoretischen Physik besteht darin, Vorhersagen zu machen, die sich mit der Erfahrung vergleichen lassen, und es ist durchaus unnötig, irgendeine befriedigende Beschreibung über den gesamten Verlauf der Vorgänge zu geben." Ganz offensichtlich ist die Spiegelwelt in der Hinsicht unbefriedigend, dass sie nicht ein greifbarer Teil der Wirklichkeit ist; mit Hilfe der Spiegelwelt lassen sich aber optische Erscheinungen bei der Reflexion zutreffend vorhersagen. Es könnte lohnend sein, dieses Verständnis explizit mit den Schülern zu diskutieren und auf diese Weise bewusst zu machen.

6 Das Spiegelgesetz

Durch eigenes Experimentieren sollen die Schüler nun herausfinden, wo sich die Gegenstände in der Spiegelwelt befinden. Mit Spiegelkacheln aus dem Baumarkt und Teelichtern lassen sich dazu einfache Experimente durchführen, wobei für das erste der Experimentierraum sehr gut abgedunkelt werden muss.

Die erste der beiden Schülerübungen führt die Schüler zu der Erkenntnis, dass sich das Spiegelteelicht hinter dem Spiegel befindet. Manche erkennen bereits, dass es sich etwa ebenso weit dahinter, wie das brennende Teelicht vor dem Spiegel befinden muss (siehe Abbildungen 8 und 9). Das gleiche gilt für nichtleuchtende Gegenstände. Wird nämlich das Teelicht ausgeblasen, ändert sich der Ort des Spiegelteelichts nicht.

In dem zweiten Experiment prüfen die Schüler, was "hinter dem Spiegel" bedeutet. Dazu führen sie Messungen mit dem Geodreieck durch. Ergebnis ist ein von den Schülern formuliertes Spiegelgesetz: "Der Spiegel halbiert die Verbindungslinie zwischen Teelicht und Spiegelteelicht und steht senkrecht zu ihr." (vgl. [Pie96]).

Der Lehrer schließt den mit dem Doppelschattenexperiment begonnenen Spannungsbogen, indem er die Folie mit den anfänglichen Vermutungen noch einmal präsentiert. Die Schüler korrigieren ihre frühere Darstellung und zeichnen Spiegelhand und Spiegellampe dem Spiegelgesetz entsprechend ein. Die Orte der Schatten an der Decke zu konstruieren, stellt nun keine ernsthafte Schwierigkeit mehr dar.

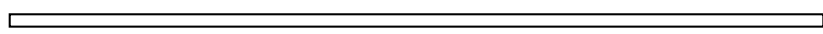
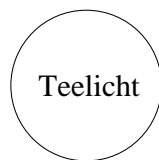
In der ersten Schülerübung wenden die Schüler eine Arbeitstechnik an, die im späteren Optikunterricht noch größere Bedeutung bekommen wird: die Rekonstruktion des Verlaufs von Lichtwegen durch das Nachzeichnen von Schattengrenzen. Diese Darstellung von Lichtwegen tritt in unserem Unterricht an die Stelle des Zeichnens von Lichtstrahlen.

7 Ausblick: Lichtwegkonzept

Wenn der Anfangsunterricht die Hälfte des ganzen (Optik)unterrichts bilden soll, so müsste noch ebenso ausführlich über die andere Hälfte – den Unterricht in der Mittel- und Oberstufe – berichtet werden. Hier können wir nur in Kürze andeuten, an welchen Stellen in unserem

Arbeitsblatt:

Wo befindet sich die Spiegelkerze?

 Spiegel

Material: 1 Spiegelkachel
1 Stativmuffe zum Aufstellen der Spiegelkachel
1 Teelicht
Streichhölzer (zum Anzünden und als Schattenkörper)
Stifte (zum Zeichnen)

Aufgabe:

Arbeitet in kleinen Gruppen zu zweit oder zu dritt zusammen. Stellt die Spiegelkachel auf der vorgezeichneten Linie und das Teelicht auf dem Kreis auf. Zündet das Teelicht nun an. Zeichnet diejenigen Schatten nach, die von der Spiegelkerze am Rand des Spiegels erzeugt werden. Verlängert nun die Schattengrenzen der gezeichneten Schatten in Richtung der Spiegelkerze. Was stellt ihr fest?

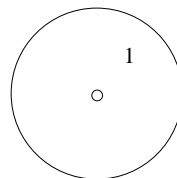
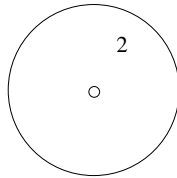
Abbildung 8: Schülerübung zum Spiegelgesetz. Die Kerze hinter dem Spiegel muss mit dem Spiegelbild der Kerze vor dem Spiegel zur Deckung gebracht werden.

Arbeitsblatt:

Die Spiegelgesetze

Stelle den Spiegel so auf, dass das in der Spiegelwelt zu sehende Bild von Kreis 1 mit dem "wirklich vorhandenen" Kreis 2 zusammenfällt.

Zeichne die Lage des Spiegels als Linie ein!

**Ergebnisse:**

1.

2.

Abbildung 9: Arbeitsblatt zum Spiegelgesetz.

Gesamtkonzept für die Optik Anknüpfungspunkte bestehen; für genauere inhaltliche Darstellungen sei auf die angegebene Literatur [Erb92, Erb95] verwiesen.

Im Mittelstufenunterricht greifen wir die Betrachtung von Lichtwegen wieder auf, deren Verlauf in Experimenten mit Hilfe von Schattengrenzen rekonstruiert wird. Die Untersuchung der optischen Weglängen von Lichtwegen führt zum Fermatschen Prinzip, aus dessen Perspektive die verschiedenen Phänomene der Geometrischen Optik betrachtet werden. Im Oberstufenunterricht lernen die Schüler mit dem Zeigerformalismus nach Feynman eine abstrakte Beschreibungsweise für das Licht kennen, die es gestattet, Interferenzphänomene zu beschreiben. Auch der Zeigerformalismus arbeitet mit Lichtwegen, so dass auf das Wellenmodell an dieser Stelle verzichtet werden kann. Im Vergleich zum Wellenmodell ist die Darstellung im Zeigerformalismus abstrakter und besitzt gleichzeitig eine größere Vorhersagekraft, beispielsweise bei der Berechnung von Intensitäten in Interferenzmustern. Dies unterstützt das von uns bereits im Anfangsunterricht angelegte Modellverständnis.

Mit dem Lichtwegkonzept liegt ein Unterrichtsgang für die gesamte Optik bis hin zur Atomphysik vor, dessen inhaltliche Struktur darauf ausgerichtet ist, den Wissensaufbau von Anfang an über mittlere und lange Zeiträume hinweg zu fördern. Als Ganzes wird es die angestrebte Wirkung auf den Wissensaufbau wohl am besten entfalten können. An diejenigen, die Optik neu unterrichten wollen, sei also eine Aufforderung Goethes gerichtet: "Lass den Anfang mit dem Ende / Sich in Eins zusammenzieh!"

Literatur

- [Bun96] BUND-LÄNDER-KOMMISSION FÜR BILDUNGSPLANUNG UND FORSCHUNGSFÖRDERUNG (Hrsg.): *Gutachten zur Vorbereitung des Programms "Steigerung der Effizienz des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts"*. Bonn, 1996 . – S. 93
- [Erb92] ERB, R.: Geometrische Optik mit dem Fermat-Prinzip. In: *Physik in der Schule* 30 (1992), S. 291–295
- [Erb95] ERB, R.: Optik in der Oberstufe. In: *Physik in der Schule* 33 (1995), Nr. 2, S. 51–56
- [Hei95] HEINZERLING, H.: Vom Sehen zur Optik. In: *NiU-Physik* 6 (1995), Nr. 29, S. 11–15
- [Kiu00] KIUPEL, M.: Geometrische Optik – ohne Lichtstrahlen. In: *NiU-Physik* 11 (2000), Nr. 56, S. 44–46
- [Lic96] LICHTFELDT, M.: Lernweg einer Schülerin – Einzelfallstudie aus dem Langzeit-Forschungsprogramm "Wege zum Atombegriff". In: DUIT, R. (Hrsg.) ; RHÖNECK, Chr. (Hrsg.): *Lernen in den Naturwissenschaften*. Kiel, 1996, S. 324–352

- [Pie96] PIETSCHMANN, H. *Phänomenologie der Naturwissenschaft*. 1996
- [Sch83] SCHÖN, L.: Physik erleben! Beispiele aus der Optik. In: A. SCHARMANN, u.a. (Hrsg.): *Vorträge der Frühjahrstagung der DPG FA Didaktik*. Gießen, 1983, S. 79–87
- [Sch94] SCHÖN, L.: Ein Blick in den Spiegel – Von der Wahrnehmung zur Physik. In: *Physik in der Schule* 32 (1994), Nr. 1, S. 2–5
- [Wag92] WAGENSCHHEIN, M. *Verstehen Lehren: Genetisch – Sokratisch – Exemplarisch*. 1992
- [Wie94] WIESNER, H.: Ein neuer Optikkurs für die Sekundarstufe I, der sich an Lernschwierigkeiten und Schülervorstellungen orientiert. In: *NiU-Physik* 5 (1994), Nr. 22, S. 7–15