

Ein neuer Optikkurs für die Sekundarstufe I, der sich an Lernschwierigkeiten und Schülervorstellungen orientiert

von Hartmut Wiesner

Lernschwierigkeiten im Optik-Einführungsunterricht

Viele Lernschwierigkeiten der Schüler beruhen darauf, daß die beim Lerner bereits vorhandenen Vorstellungen in einem hohen Maß aktiv in die Aufnahme und Verarbeitung neuer Informationen eingreifen. Neue Informationen werden durch die bereits vorhandenen Denk- und Wissensstrukturen bewertet und interpretiert. Dabei werden Teile weggelassen, anders als vom Lehrer beabsichtigt eingeordnet, es werden Teile hinzugefügt usw.

Liegen die physikalischen Ideen quer zu im Alltag bewährten Vorstellungen der Schüler, ist ohne gezielte Bemühungen der Mißerfolg abzusehen. Hinzu kommt, daß sich bei den Schülern aufgrund der ständig erlebten eigenen Inkompetenz auch eine negative Einstellung zum Physikunterricht aufbaut, mit allen Konsequenzen für die Motivation, den Lernerfolg, die Kurswahl etc. Nachfolgend werden einige Beispiele von Lernschwierigkeiten zur Optik, die bei Schülern sehr oft auftreten, angeführt. Ausführlichere Überblicke sind in [1]

und [2] und für das Spiegelbild in [3] gegeben worden.

Zum Sehen beleuchteter Gegenstände

Eine physikalisch akzeptable Vorstellung, wie es kommt, daß man beleuchtete Gegenstände sehen kann, ist für das Verständnis der elementaren Optik grundlegend, insbesondere der Aspekt, daß Gegenstände durch Beleuchten angeregt werden, selbst Licht abstrahlen, also selbst zu Sendern von Licht werden. Und genau dies bereitet den Schülern größte Schwierigkeiten.

Hier zwei typische Schülerreaktionen (Gymnasiasten) auf das Lehrangebot einer Sender-Strahlungs-Empfänger-Vorstellung:

S: Also ich finde erst einmal sehr komisch, daß ein (Playmobil)Männchen Licht ausstrahlen soll.

I: Das glaubst du nicht?

S: Naja, so ganz –

I: Du kannst ruhig ganz deutlich sagen, was du unglaubwürdig findest.

S: Nee, weil man das Licht nicht sieht, das das Playmobil-Männchen in unser Auge bringt. Und deshalb kann man das auch nicht glauben.

An dieser Antwort wird deutlich, daß es nicht so einfach ist, Schüler zur Akzeptanz einer physikalisch akzeptablen Sehvorstellung zu bringen. Eine weitere Äußerung:

I: Wie findest du denn diese Erklärung für das Sehen?

S: Ich kann mir das eigentlich nicht vorstellen, daß so ein Männchen, – die strahlen ab? Das kann ich mir nicht so richtig vorstellen. Wenn es einen Spiegel hätte, oder so was. Aber so ein Männchen, so ein normales Männchen, wo nichts glitzert, das kann ich mir nicht vorstellen.

Auch der zweite Aspekt einer physikalischen Sehvorstellung, daß von den wahrgenommenen Gegenständen Licht ins Auge fallen muß, damit sie wahrgenommen werden können, wird von fast einem Drittel der Schüler in unserer Untersuchung abgelehnt. Eine recht weit entfernte, angeknipste Taschenlampe kann man zwar sehen, aber Licht kommt nicht zum Beobachter, und erst recht gilt dies für beleuchtete Gegenstände.

Damit ist klar, daß die Bildkonstruktionen, die im Optikunterricht eine große Rolle spielen, bei vielen Schülern keine physikalische Fundierung haben: wenn man z. B. das von einer Linse oder einem Fernrohr erzeugte Bild eines Baumes betrachtet, und überzeugt ist, daß vom Baum kein zur Linse strömendes Licht ausgeht, was für einen physikalischen Sinn kann dann für die Schüler die Strahlenkonstruktion überhaupt haben?

Spiegelbilder

Sehr hartnäckig hält sich die Auffassung, daß das Bild beim ebenen Spiegel auf dem Spiegel ist. Dahinter kann es nicht sein, „weil er nicht durchsichtig ist“ oder „weil eine Wand dahinter ist, es kann doch nicht in der Wand sein“.

Viele Schüler bleiben bei einer Vorstellung, die sinngemäß folgendermaßen lautet: Der Spiegel erzeugt ein

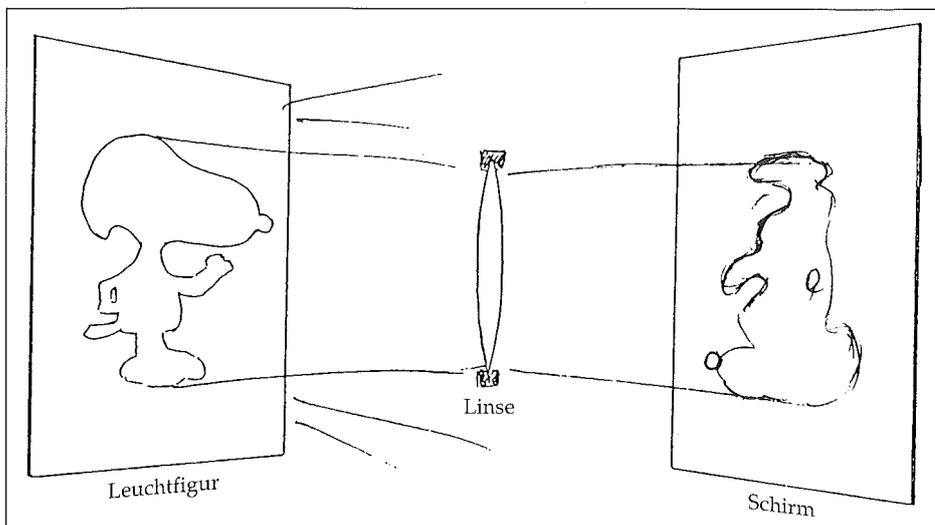


Abb. 1: Schülerskizze mit holistischer Vorstellung zur Abbildung durch eine Sammellinse.

Bild von dem, was er vor sich „sieht“, und wirft dies zurück. Beispielsweise hat für sie ein Taschenspiegel ein größeres Gesichtsfeld, wenn man ihn von sich weiter weg hält, und demzufolge müßte man mehr von seinem Gesicht sehen. Sie sind dann sehr erstaunt, daß dies nicht der Fall ist.

Die Gegenstände, von denen wir Spiegelbilder sehen, brauchen kein Licht abzustrahlen, damit ein Spiegelbild zu sehen ist. Es liegt auf der Hand, daß den Schülern auf einer solchen Grundlage Spiegelbildkonstruktionen völlig unverständlich bleiben müssen.

Reelles Bild bei einer Sammellinse

Hartnäckig hält sich eine holistische Vorstellung (s. [4]) über den Abbildungsvorgang: das Bild geht als Ganzes durch die Linse zur Mattscheibe (in der Linse wird es umgedreht) (Abb. 1).

Hält man eine ringförmige Blende vor die Linse, so sind viele Schüler der Meinung, daß ein Teil des Bildes abgeschnitten oder daß es kleiner wird. Und das glauben tatsächlich auch einige Schüler bei der Demonstration zu sehen. Wird die Hälfte der Linse abgedeckt, ist nach Schülermeinung nur noch die Hälfte des Bildes zu sehen. Kluge Schüler knobeln allenfalls darüber nach, ob man die obere oder die untere Hälfte des Gegenstandes sieht.

Farben

Daß Sonnenlicht eine „blaumachende“ Lichtsorte enthält, halten viele Schüler für absurd. Die Demonstration der spektralen Zerlegung durch ein Geradsichtprisma deuten sie als Beleg dafür, daß das „Ding da“ – das Prisma – das Licht gefärbt hat.

Allgemeine Gesichtspunkte zum Optikkurs und Überblick

Eine naheliegende Konsequenz aus den skizzierten Ergebnissen ist es, solche verbreiteten Vorstellungen in ihrer lernerschwereren Wirkung ernstzunehmen und ihnen durch einen gezielten Aufbau des Unterrichts wirksam zu begegnen.

Mit dem in der Übersicht auf S. 9 skizzierten Lehrgang haben wir für den Bereich der elementaren Optik versucht, diesen Anspruch in eine praktikable Unterrichtskonzeption umzusetzen. Diesen Lehrgang (s. [5]) entwickeln wir (P. Engelhardt, D. Herdt, H. Wiesner) seit 10 Jahren, ausgehend von einem Vorschlag von W. Jung.

Ausgangspunkt im Unterricht sind – wenn immer dies möglich ist – vielfältige subjektive Wahrnehmungen der Schüler, insbesondere die beobachtbaren Bilder (Bilder beim Spiegel, optische Hebung, Knickung eines im Wasser stehenden Stabes, Bilder bei Linsen und beim Prisma, ...). Ziel des Unterrichts ist die Erklärung, wie diese Bilder zustandekommen und warum sie die beobachteten Eigenschaften haben.

Methodisch wird dabei so vorgegangen, daß zuerst die Erscheinungen und ihre Bedingungen eingehend untersucht werden (z. B.: Wo sehe ich das Spiegelbild? Welche Eigenschaften hat es? Wie verändert es sich, wenn der Gegenstand verschoben wird? etc.). Für diese Beobachtungen werden in der Regel Schüler- oder Hausexperimente mit einfachen Mitteln durchgeführt (s. z. B. den Arbeitsauftrag zur Brechung). Anschließend wird die Frage, wie die betreffende Erscheinung zustandekommt, in zwei Schritten beantwortet. Zunächst wird der Lichtweg vom Gegenstand über bzw. durch das optische System untersucht, und dabei werden die grundlegenden Gesetze wie z. B. das Reflexionsgesetz oder das Brechungsgesetz ermittelt. Im anschließenden Schritt wird die gerade aktuelle Gruppe von Erscheinungen unter Anwendung dieser Gesetze „erklärt“.

Als roter Faden (physikalische Rahmenvorstellung) zieht sich durch den Lehrgang die Sender-Strahlungs-Empfänger-Vorstellung als elementare physikalische Theorie des Sehens. Sie wird im folgenden meist als SEV abgekürzt. Diese Vorstellung ermöglicht es den Schülern, die strahlengeometrischen Konstruktionen mit den wahrgenommenen Bildern in Beziehung zu bringen. Wegen der Betonung der Wahrnehmung, also des Sehens von Gegenständen oder optischen Bildern, sollte das Auge stets in die Beschreibungen und Erklärungen miteinbezogen werden. Da die Orte der beobachtbaren Bilder (oder Bildpunkte) in der Diskussion im Unterricht eine wichtige Rolle spielen, muß dafür eine für die Schüler einleuchtende Festlegung getroffen werden. Diese besteht in der Verabredung, daß ein Bild (bzw. ein Bildpunkt) dort ist, worauf das Auge akkommodiert. Da dies oft nicht einfach zu „sehen“ bzw. schwer quantifizierbar ist, wird zur objektiven Feststellung des Bildortes ein als Entfernungsmesser geeichtes Augen- bzw. Kameramodell verwendet (ausführlicher dazu später). Durch das konsequente Einbeziehen des

Auges bzw. des Augen-/Kameramodells werden virtuelle Bilder in weitgehend gleicher Weise betrachtet wie die reellen Bilder und stellen damit keine Besonderheit dar.

Zur Unterrichtsstrategie ist noch anzumerken, daß wir keine gezielte Konfliktstrategie anwenden, bei der die Schüler zu Beginn eines Themas ihre Vorstellungen entwickeln und äußern sollen. Mehrere frühere, eigene Versuche, auf diesem Wege aus den gesammelten, spontan geäußerten Vorstellungen die erwünschten physikalischen zu entwickeln, waren wenig erfolgreich. Insbesondere bei den grundlegenden physikalischen Ideen (Abstrahlung von Licht durch Beleuchten; „ $I = \text{const}$ “; Trägheitsprinzip; ...) mangelt es an unmittelbar überzeugenden Experimenten, und es kostet enorm viel Unterrichtszeit, wenn alle Vorschläge seriös diskutiert werden. Relativ rasch stellen sich die Schüler darauf ein, „ihre“ Vorstellung durch ad hoc-Annahmen zu verteidigen, was sehr schnell dazu führen kann, daß die Diskussion nur durch Expertenmitteilung durch den Lehrer beendet werden kann. Und das provoziert zu Recht den Schülervorwurf, weshalb man dann so lange „herumgeredet“ habe, wenn am Ende doch die Lehrermittlung steht. Enttäuschend war für mich weiterhin das mehrfach beobachtete Ergebnis, daß nach einem Unterricht, der mit einem ausgiebigen „Herauskitzeln“ von Schülervorstellungen und ausführlicher Diskussion darüber begann, weit mehr Schüler ausgereifte Fehlvorstellungen hatten als zu Beginn. Dies ist für mich heute durchaus verständlich, weil bestimmte Fehlvorstellungen plausibler als die physikalischen Ideen sind und ihr ausführliches Besprechen viele Schüler erst davon überzeugt. Mit unserer Strategie versuchen wir deshalb, die Schüler durch recht enge Lehrerführung an den kritischen und grundlegenden Stellen (z. B. Sehvorstellung) zur Akzeptanz der physikalischen Sicht zu bringen, zumindest als eine sinnvolle Möglichkeit. Die dazu notwendigen Phänomene und Argumente wurden zunächst in Einzellehrgesprächen auf ihre Wirksamkeit hin überprüft, dann den Bedingungen des Klassenunterrichts angepaßt und im Schulunterricht erprobt (siehe letzter Abschnitt).

Der nachfolgend beschriebene Optikkurs ist abgestimmt auf die 7. Klassenstufe und als Baukastenangebot gedacht, aus dem individuelle Kurse zusammengestellt bzw. ergänzt werden können. Die Auswahl und

Anordnung der Themenbereiche ist – bis auf die Einheiten 1 und 5 – weitgehend konventionell, wie die folgende Übersicht zeigt. Die Einheiten 6–9 werden in [6] ausführlich beschrieben.

Unterrichtseinheit 1: Einführung der Sender-Strahlungs-Empfänger-Vorstellung des Sehens

Der hier zur Verfügung stehende Platz erlaubt es nicht, unseren Kurs im Detail vorzustellen. Ich beschränke mich auf die grundlegende Einheit 1 (s. im folgenden) und auf die Einheiten 10 bis 13 (s. weiter unten).

Vorbereitungen

Bereits zu Beginn des Unterrichts werden die Schüler aufgefordert, nach ineinandersteckbaren Papprohren Ausschau zu halten (Kameramodell zur Verdeutlichung zeigen) und sich ebenfalls Sammellinsen mit einer Brennweite zwischen 10 und 15 cm (Brennweite abschätzen lassen durch Abbilden weit entfernter Gegenstände auf ein Blatt Papier) zu besorgen. Die Linsen werden später zum Einbau in die Lochkamera benötigt, damit diese als Entfernungsmesser verwendet werden kann. Oft sind Optiker bei der Beschaffung behilflich, indem sie sich Ausschlußrohlinge von den Linsenher-

stellern zuschicken lassen oder alte Brillengläser sammeln. Da die Brillenglasrohlinge recht groß sind, haben einige Schulen, in denen Lehrer nach unserer Konzeption unterrichten, einen Satz Linsen (ca. 5 cm Durchmesser) ohne Fassung bei einer Lehrmittelfirma gekauft und diese an die Schüler für die Dauer des Optikkurses ausgeliehen.

Schritt 1: Einführung in den Inhaltsbereich „Optik“

In dieser einführenden Gesprächsphase sollen die Schüler für den kommenden Unterricht motiviert werden, indem ihnen einige optische Erschei-

Übersicht über die Unterrichtseinheit

UE 1: Sender-Empfänger-Vorstellung des Sehens (SEV)

Einführung in den Themenbereich Optik. Lochkamera als ein einfaches Augenmodell. Sender-Empfänger-Vorstellung des Sehens selbstleuchtender Körper. Bau einer Lochkamera. Beobachtungen mit der Lochkamera. Das Sehen beleuchteter Gegenstände. Primäre und sekundäre Lichtquellen als Lichtsender. Die Streuung von Licht; Streuung von Licht an Teilchen in der Atmosphäre.

UE 2: Ausbreitung des Lichtes

Ausbreitungsgeschwindigkeit. Licht als kontinuierliche Strömung. Geradlinige Ausbreitung (Umkehrbarkeit der Lichtwege).

UE 3: Schatten, Mondphasen, Finsternisse

Die Entstehung von Schatten. Schattenkonstruktion. Schattengröße. Kern-, Halb- und Übergangsschatten. Mondphasen. Mond- und Sonnenfinsternisse.

UE 4: Bildentstehung bei der Lochkamera

Ungestörte Durchdringung von Lichtbündeln. Leuchtfleck-zu-Bildfleck-Abbildung durch die Lochkamera. Richtungsbestimmung mit der Lochkamera. Abbildungsgleichung und -maßstab bei der Lochkamera.

UE 5: Das Kameramodell als Entfernungsmesser

Probleme bei der Optimierung des Lochkamerabildes (Einbau einer Sammellinse). Das Kameramodell als Entfernungsmesser.

UE 6: Das Spiegelbild

UE 7: Das Reflexionsgesetz

UE 8: Spiegelbild und Reflexionsgesetz

UE 9: Weitere Beispiele für das Reflexionsgesetz und das Spiegelbild

UE 10: Das Brechungsgesetz
Hausexperimente zur Brechung. Weg des Lichtes vom Gegenstand (Münze) ins Auge. Brechungsgesetz (qualitative Fassung). Brechungsgesetz (quantitative Fassung). Brechung eines Lichtbündels an einer gekrümmten Grenzfläche.

UE 11: Brechungsgesetz und Bildkonstruktion

Konstruktion des virtuellen Bildes bei der optischen Hebung. Optische Hebung bei senkrechter Beobachtung. Beobachtung und Konstruktion. Geknickter Stab (qualitative Erklärung). Planparallele Platte.

UE 12: Totalreflexion

Hausexperimente und Schülerexperimente. Konstruktion des Lichtweges. Grenzwinkel der Totalreflexion. Ergänzende Versuche und Anwendungen.

UE 13: Reelles Schirmbild und Luftbild einer Sammellinse

Beobachtungen zum reellen Bild (Bildgröße/-weite, Gegenstandsgröße/-weite). Reelles Luftbild (Ortsbestimmung; Schirm, Entfernungsmesser), Fleck-zu-Fleck-Abbildung.

UE 14: Bildkonstruktion bei Sammellinsen

Brennpunkt und -weite. Verlauf ausgezeichneter Lichtbündel. Bildkon-

struktionen. Gegenstands- und Bildweite.

UE 15: Abbildungsgesetz und b-g-Diagramm bei Sammellinsen

Messung von g , b , G und B . Abbildungsgesetz $B/G = b/g$ (experimentell). b - g -Diagramm. Anwendungsbeispiele und -aufgaben. Herleitung der Linsenformel.

UE 16: Sammellinse als Lupe

Beobachtung von Lupenbildern. „Abbildungsgrenzen“ der Sammellinse.

Messen der virtuellen Bildweite. Erklärung des virtuellen Bildes (Konstruktion). Anwendung des b - g -Diagramms auf virtuelle Bilder.

UE 17: Zerstreuungslinse und Prisma

Beobachtung von Bildern bei der Zerstreuungslinse. Eigenschaften der Zerstreuungslinsen und ihre Wirkung auf Lichtbündel. Strahlenverlauf durch die Zerstreuungslinse. Erklärung des virtuellen Bildes (Konstruktion). Anwendung des b - g -Diagramms und Übung der Bildkonstruktion. Beobachtung von Bildern am Prisma. Strahlenverlauf durch das Prisma. Erklärung des virtuellen Bildes am Prisma (qualitativ). Dispersion.

UE 18: Linsenfehler

Wirkung einer Blende auf die Abbildungsqualität bei Linsen. Verlauf achsenferner Strahlen durch die Linse. Farbfehler bei der Linse. Korrektur von Linsenfehlern.

Weitere Unterrichtseinheiten behandeln die Themen optische Apparate und Farben.

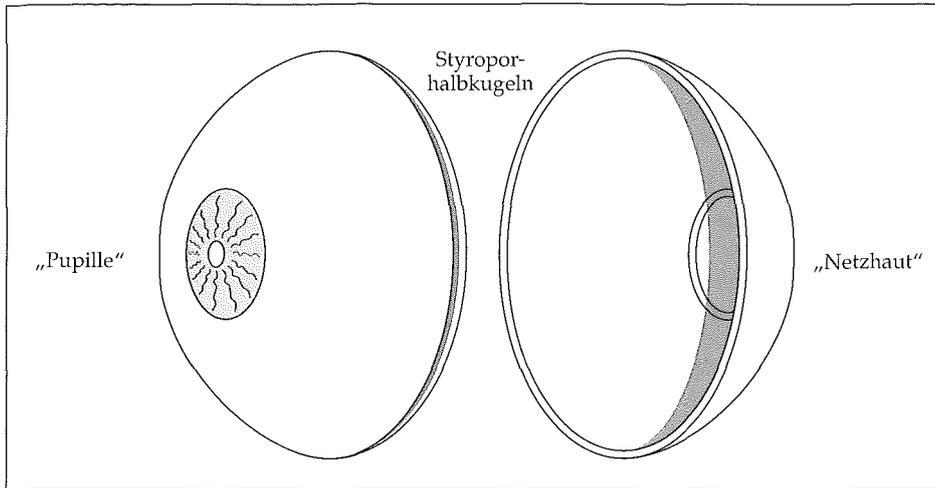


Abb. 2: Lochkamera als einfaches Augenmodell.

nungen demonstriert werden, einige Geräte gezeigt werden und Anwendungen angesprochen werden, um deren physikalisches Verständnis es gehen soll (z. B. vom ebenen Spiegel bis zum gekrümmten Spiegel, Kaleidoskop, Endoskopie, Mikroskop o. ä.). Der Hinweis, daß wir den größten Teil der Information über die Außenwelt über den optischen Sinneskanal empfangen, unterstreicht die Bedeutung der Optik.

Schritt 2: Die Lochkamera als einfaches Augenmodell

Ein anatomisches Modell des menschlichen Auges aus der Biologiesammlung wird (evtl. als Wiederholung aus dem Biologieunterricht) auseinandergenommen, seine Teile (vor allem Pupille und Netzhaut) und die prinzipielle Funktion des Auges werden besprochen: Von wahrgenommenen Gegenständen muß ein Bild auf der Netzhaut entstanden sein.

Die Frage, ob ein im wesentlichen aus Pupille und Netzhaut bestehendes Gebilde auch als „Auge“ angesehen werden kann, wird durch Hinweis auf das Auge des Kopffüßlers und durch Demonstration des Bildes mit der in Abb. 2 skizzierten Lochkamera in Form eines Augenmodells „geklärt“ (Styroporkugel mit kleiner Öffnung und transparentem Zeichenpapier als „Netzhaut“; Styropor innen schwarz anstreichen).

Als leuchtende Körper eignen sich besonders gut eine Kohlefadenlampe, ein selbstangefertigtes Leuchtbild (das später zur Abbildung durch Linsen herangezogen werden kann), ein Leuchtpfeil oder eine Perleins. Das Leuchtbild kann hergestellt werden, indem aus dünner Pappe eine Figur herausgeschnitten und mit hochtransparentem Zeichenpapier oder Butter-

brotpapier hinterklebt wird. Von der Rückseite wird die Figur gleichmäßig mit einer Experimentierlampe beleuchtet.

Will man die für Schüler besonders interessante Frage, weshalb oben mit unten und links mit rechts vertauscht sind, hier nicht aufkommen lassen – sie kann erst später ausführlich genug diskutiert werden –, muß eine entsprechende symmetrische Leuchtfigur verwendet werden.

Ausgehend von dem beobachteten Lochkamerabild des Modellauges wird im Gespräch mit den Schülern diskutiert, ob „etwas“ von der Leuchtfigur in die „Pupille“ des Modellauges kommen muß, wenn dort auf der „Netzhaut“ ein Bild entsteht. Die Antwort ist recht eindeutig, denn dieses Ding aus Styropor und Transparentpapier ist sicherlich kein aktiver Apparat in dem Sinne, daß er etwas abstrahlt, das den Gegenstand abtastet, diese Information an das Modellauge zurückmeldet und es veranlaßt, das entsprechende Bild auf dem Transparentpapier zu zeigen.

Das Klassengespräch wird zu dem Ergebnis geführt, daß die Lampe bzw. das Leuchtbild Licht (in fast alle Richtungen) abstrahlt. Ein Teil des Lichtes, das in Richtung des Modellauges abgestrahlt wird, fällt durch die Pupille in das Modellauge ein, und auf der „Netzhaut“ entsteht ein Bild. Wie das genauer vor sich geht, wird etwas später erklärt (UE 4).

Diese Vorstellung wird auf das Sehen mit dem menschlichen Auge übertragen und etwa folgendermaßen formuliert: Die Sonne, Lampe, Leuchtfigur, ... strahlt Licht in alle Richtungen ab, auch in Richtung unseres Auges. Fällt ein Teil dieses Lichtes in unser Auge, sehen wir ein Abbild des Gegenstandes, der das Licht abstrahlt.

Die unverzichtbare Erweiterung dieser Vorstellung auf das Sehen beleuchteter Gegenstände bereitet den Schülern erhebliche Schwierigkeiten. Ein recht überzeugendes Argument für die Schüler liefert das beobachtete Lochkamerabild einer beleuchteten Figur. Im nächsten Schritt baut sich deshalb jeder Schüler eine Lochkamera. Mit Absicht ist eine etwas aufwendigere Konstruktion gewählt worden, damit später mit geringem Aufwand die Lochkamera durch Einbau einer Sammellinse zu einem Entfernungsmesser erweitert werden kann, mit dem der Ort von Gegenständen, reellen Luftbildern und insbesondere virtuellen Bildern bestimmt werden kann. Die folgende Bauanleitung war bereits in [7] abgedruckt und erläutert worden (Abb. 3).

Schritt 3: Bau der Lochkamera

Um Unterrichtszeit zu sparen, können die Schüler ihre Lochkameras auch zu Hause bauen. Solange wie sie dann im Unterricht benötigt werden, werden sie zusammen in einem großen Karton in der Schule aufbewahrt.

Schritt 4: Die Sender-Strahlungs-Empfänger-Vorstellung (SEV) des Sehens

In diesem Schritt soll nun die für Schüler besonders schwierige SEV für Gegenstände erarbeitet werden, die erst bei Beleuchtung durch die Sonne oder eine Lampe sichtbar werden.

Zu Beginn wird wiederholt, daß ein Bild bei der Lochkamera dadurch entsteht, daß Licht vom abgebildeten Gegenstand in die Öffnung der Lochkamera einfällt. Die beobachtbare Lochkameraabbildung kann damit als ein Kriterium dafür angesehen werden, daß vom abgebildeten Gegenstand Licht abgestrahlt wird. Entsprechend bietet sich die folgende Vorgehensweise an: Zunächst wird das Lochkamerabild eines beleuchteten Gegenstandes beobachtet, dann wird der Lichtweg besprochen und in diesem Zusammenhang die Lichtstreuung verdeutlicht. Im Detail kann dies folgendermaßen durchgeführt werden. Vor einen möglichst dunklen Hintergrund (z. B. schwarzes Filztuch) wird eine weiße (Comic-)Figur gehängt und mit einer hellen Lampe (möglichst 500 bis 1000 Watt) beleuchtet. Jeder Schüler beobachtet das Bild, das in seiner Lochkamera entsteht. Eine Alternative oder Ergänzung wäre ein möglichst hell bekleideter Mitschüler, der auf dem Lehrertisch steht.

Eine recht überzeugende Demonstration für die Lichtstreuung kann mit farbigen Pappen oder einem mit

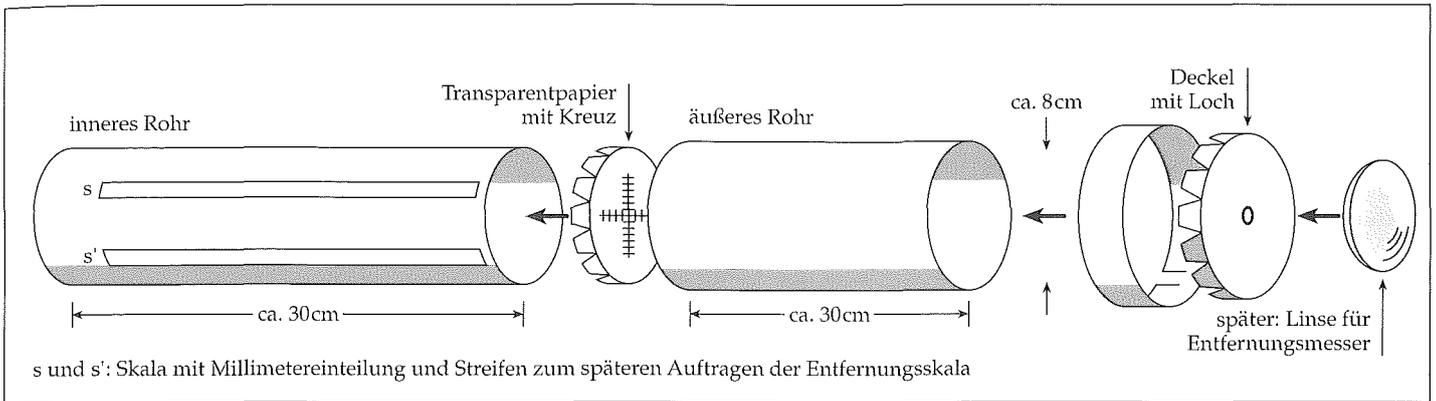


Abb. 3: Bauanleitung für eine Lochkamera, die später zum Entfernungsmesser ausgebaut wird.

verschiedenen Plaka-Farben angestrichenen Pappkarton durchgeführt werden. Vor die Fotolampe gehalten, ergeben sich sehr deutliche Farbeffekte an den Wänden und der Decke. Bereits ein weißes Blatt Papier, von einer hellen Lampe beleuchtet, ergibt beeindruckende Aufhellungseffekte.

Als Ergebnis dieses Unterrichtsschrittes wird die Sender-Empfänger-Vorstellung für beleuchtete Körper sinngemäß folgendermaßen formuliert: „Die Sonne (die Lampe, die Kerze, ...) strahlt Licht nach allen Seiten ab. Ein Teil des Lichtes fällt auf den Körper. Dadurch strahlt auch die Oberfläche des Körpers Licht ab, d. h. der Körper wird zu einem Zwischensender von Licht. Fällt von dem Licht, das der beleuchtete Körper abstrahlt, ein Teil in das Auge ein, entsteht dort auf der Netzhaut ein Bild des Gegenstandes und der Wahrnehmungszreiz wird ausgelöst.“

Wichtig ist, daß sich der Lehrer (z. B. durch Anwendungsbeispiele) vergewissert, daß die Schüler diese Vorstellung akzeptiert haben und anwenden können.

Zu den Begriffen „primäre“ und „sekundäre“ Lichtquellen

Wir betonen nun das Gemeinsame dieser beiden Typen von Lichtquellen, nämlich aufgrund einer Anregung zu einem Sender von Licht zu werden. Der Unterschied liegt in der Art des Anregungsmechanismus (z. B. Erhitzen oder Bestrahlen mit Licht). Mit der begrifflichen Struktur unseres Lehrgangs am besten vereinbar ist es, sekundäre Lichtquellen als „Zwischensender“ zu bezeichnen.

Schritt 5: Der Begriff der Streuung und erste Anwendungen der SEV

Die Abstrahlung von Licht (aufgrund von Beleuchten) ohne deutliche Vordrucksrichtung, also die Streuung von Licht, ist der allgemeine Fall für die

Abstrahlung von Licht. Zur deutlichen Absetzung von dem Wort Reflexion, das von vielen Schülern sehr undifferenziert verwendet wird (z. B.: „das Licht wird durch die Linse hindurch reflektiert“), sollte konsequent von Streuung gesprochen werden, wenn diese gemeint ist. Die verbreitete Bezeichnung „diffuse Reflexion“ führt in der Regel zu falschen und blockierenden Vorstellungen und sollte deshalb nicht verwendet werden.

Die bekannte Erfahrung, daß beleuchtete Gegenstände von verschiedenen Personen aus unterschiedlichen Richtungen gesehen werden können, bedeutet, daß Licht, vom Gegenstand in die unterschiedlichen Beobachtungsrichtungen abgestrahlt, gewissermaßen in alle Richtungen „verstreut“ wird. In Anlehnung daran wird für beleuchtete Gegenstände der Begriff Streuung für die Abstrahlung von Licht in alle möglichen Richtungen eingeführt.

Streuung von Licht an Partikeln in der Atmosphäre

Die Streuung von Licht an kleinen Partikeln ist für eine Reihe von Phänomenen verantwortlich und wird zum Beispiel als methodisches Hilfsmittel zur Demonstration des Verlaufs von Lichtbündeln verwendet. So kann im Unterricht der Lichtkegel einer Demonstrationslampe zunächst ohne und anschließend mit eingeblasenem Rauch oder Kreidestaub betrachtet und dann diskutiert werden: Von verschiedenen Plätzen aus kann der Lichtkegelbereich gesehen werden, also wird von dort aus Licht in diese Richtungen gestreut.

Recht verblüffend ist es, wenn ein Pullover im Lichtkegel ausgeschüttelt wird.

Weitere, alltägliche Erscheinungen können in diesem Zusammenhang diskutiert werden: heller Himmel, Dämmerung,...

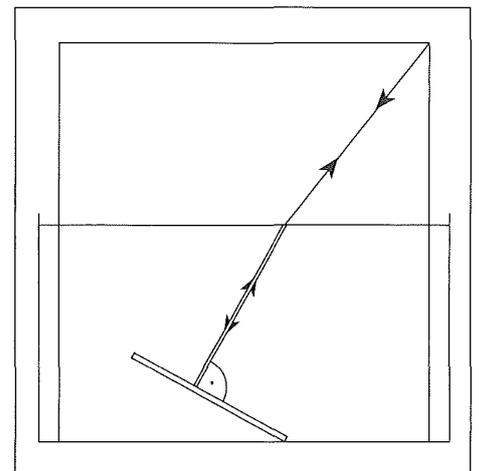


Abb. 4: Umkehrbarkeit der Lichtwege bei der Brechung.

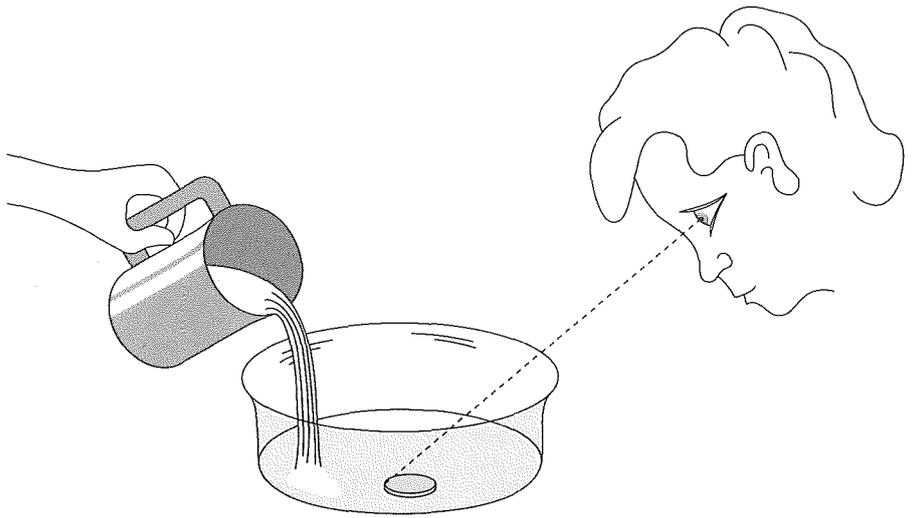
Zu den Unterrichtseinheiten 10 – 13: Brechung und Totalreflexion, Brechungsgesetz und Bildkonstruktion

Die im folgenden beschriebenen Einstiegsversuche („auftauchende“ Münze und „Fischestechen“) führen die Schüler zuerst als Hausexperimente durch (vgl. Aufgabenblatt 1).

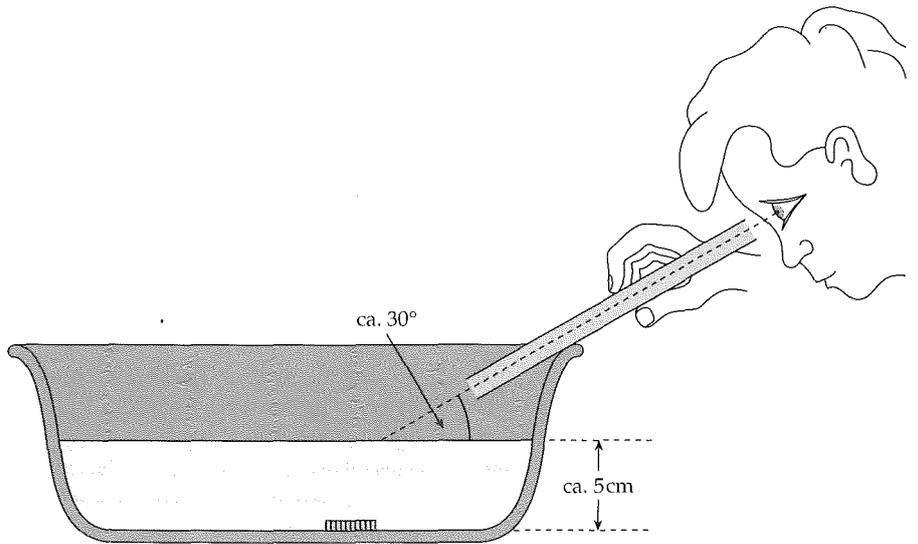
Im Klassengespräch berichten die Schüler ihre Beobachtungsergebnisse und können diese anhand bereitstehender Anordnungen korrigieren.

Durch den Ort der Münze und das bis dicht an die Wasseroberfläche reichende Rohr ist der Lichtweg von der Münze bis zum Auge weitgehend festgelegt. Dies führt zu einem qualitativen Verständnis der Brechung. Daß das Licht innerhalb des Wassers geradlinig verläuft, wird von den Schülern von vornherein erwartet und kann sehr einfach durch ein Lichtbündel, eingestrahlt in Wasser mit Fluorescin oder mit dem „Apparat zur Brechung und Reflexion“ von Leybold gezeigt werden.

1. Auf den Boden eines Topfes oder einer Schüssel legst du eine Münze. Setze dich so, daß du gerade noch den hinteren Rand der Münze siehst. Gieße vorsichtig Wasser in den Topf oder die Schüssel, ohne den Kopf zu bewegen. Was beobachtest du? Notiere!



2. Besorge dir ein ca. 10 cm langes Stück von einem Trinkhalm, durch den du einen Schaschlikspieß schieben kannst. Fülle in eine flache Schüssel etwa 5 cm hoch Wasser. Lege eine Münze so in die Schüssel, daß du den von dir entfernten Rand durch den Trinkhalm sehen kannst, wobei der Trinkhalm einen Winkel von etwa 30° zur Wasseroberfläche haben soll. Ohne die Lage des Halmes zu verändern, schiebst du den Spieß durch den Trinkhalm. Trifft der Spieß den Rand der Münze? Notiere, was du beobachtet hast!

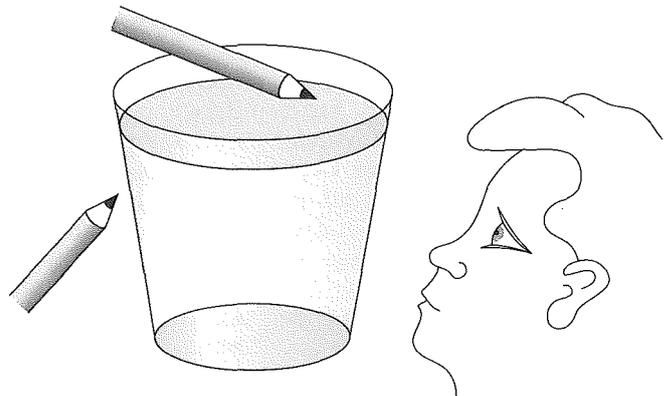


Aufgabenblatt 1

In ein Glas mit geraden Wänden füllst du Wasser. Blicke von unten schräg gegen die Wasseroberfläche. Halte einen Bleistift, deinen Finger oder irgendeinen Gegenstand (a) dicht über die Wasseroberfläche und (b) seitlich neben das Glas.

1) Was beobachtest du in den Fällen (a) und (b)?

2) Wie sieht die Wasseroberfläche aus?



Aufgabenblatt 2

Bevor quantitative Messungen an der optischen Scheibe durchgeführt werden, empfiehlt sich der folgende einfache Versuch, der sowohl das Prinzip der Umkehrbarkeit der Lichtwege bestätigt, als auch das Brechungsverhalten gleichzeitig für die beiden Übergänge Luft-Wasser und Wasser-Luft zeigt (s. Abb. 4). Ein Lichtbündel fällt an einem weißen Plastikschirm streifend so in ein Wasserbecken (mit Fluorescein), daß es senkrecht auf einen Spiegel trifft und in sich selbst zurückgeworfen wird. Durch leichtes Verschieben der Lampe können die beiden gegenläufigen Lichtbündel getrennt werden. Dadurch wird belegt, daß tatsächlich zwei Lichtbündel vorhanden sind.

Nach Einführung des Einfallslotes kann das Brechungsgesetz qualitativ für beide Übergänge formuliert werden: Beim Übergang von Wasser nach Luft wird ein Lichtstrahl vom Einfallslot weg gebrochen usw.

Die Messungen an der optischen Scheibe zeigen, daß keine proportionale Zuordnung zwischen Einfallswinkel und Brechungswinkel besteht. Da in der Regel die Sinusfunktion noch nicht zur Verfügung steht, müssen entsprechende Tabellen für Einfallswinkel und Brechungswinkel aufgestellt werden, möglichst für verschiedene Materialien.

Mit Hilfe dieser Tabellen kann nun das virtuelle Bild der „gehobenen“ Münze strahlengeometrisch konstruiert werden.

Die optische Hebung bei senkrechter Beobachtung kann sehr deutlich objektiv mit dem Entfernungsmesser nachgewiesen werden, indem abwechselnd auf den im Wasser liegenden Gegenstand und auf einen neben dem Gefäß liegenden Vergleichsgegenstand scharf gestellt wird (vgl. Abb. 5).

Anschließend erfolgt die Konstruktion des Bildes. Dabei sollten wegen der Abhängigkeit des Bildortes vom Öffnungswinkel des von der Münze ausgehenden Lichtkegels (s. [8], [9]) diese Winkel den Schülern vorgegeben werden

Auf einem Arbeitsblatt weisen die Schüler durch Konstruieren nach, daß das Ausmaß der optischen Hebung von der Wassertiefe abhängt. Mit dem Entfernungsmesser kann dies in Schülerversuchen bestätigt werden. Diese Ergebnisse erlauben nun eine qualitative Erklärung des Phänomens „geknickter“ Stab.

Als recht ergebnisreiches Übungsbeispiel sollte die seitliche Versetzung (bei schräger Blickrichtung) eines Gegen-

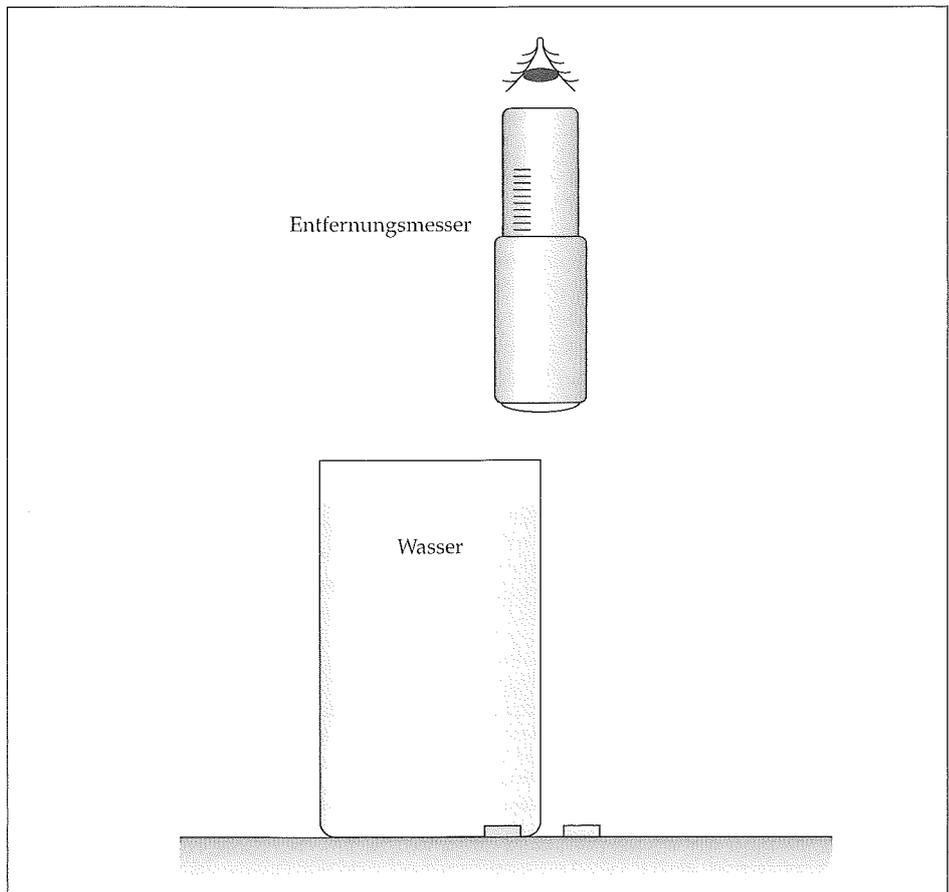


Abb. 5: Objektive Demonstration und Messung der optischen Hebung mit Hilfe des Entfernungsmessers.

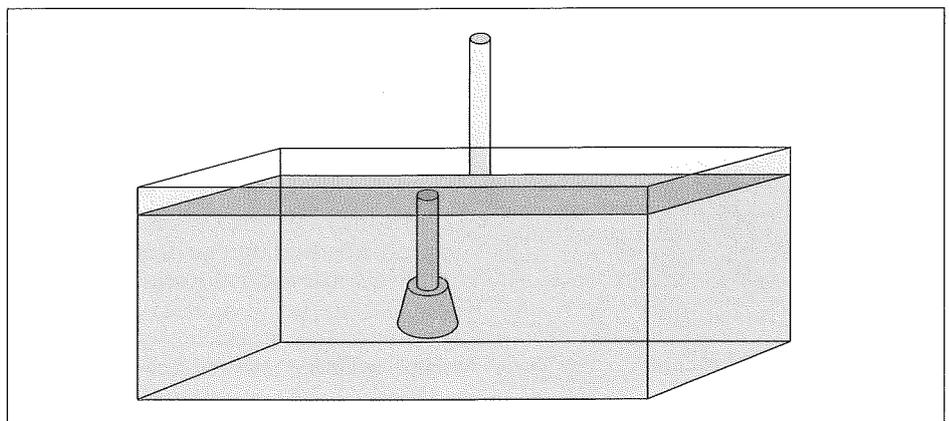


Abb. 6: Seitliche Versetzung bei planparalleler Platte.

standes bei der Beobachtung durch eine planparallele Platte (wassergefüllte quaderförmige Plexiglasschachtel, Plexiglasblock o. ä.) qualitativ und durch strahlengeometrische Konstruktion erklärt werden (vgl. Abb. 6).

Totalreflexion

Die Schüler führen wieder zunächst einige Beobachtungen zum Phänomen durch (z. B. die auf dem folgenden Arbeitsblatt beschriebenen Hausexperimente) (vgl. Aufgabenblatt 2).

In der Klasse wird dann zunächst

geklärt, daß von der Bleistiftspitze über der Wasseroberfläche offensichtlich kein Licht durch das Wasser ins Auge kommen kann. Ein Konstruktionsversuch verdeutlicht, daß für den Übergang Wasser-Luft kein Brechungswinkel existiert (die Parallelversetzung durch die Glaswand ändert daran nichts und sollte außer Betracht bleiben).

Analog kann die Totalreflexion beobachtet werden, wenn eine mit Wasser gefüllte Plexiglasschachtel auf ein beschriebenes Blatt gestellt wird und man versucht, durch die Seitenwand die Schrift zu lesen (vgl. Abb. 7).

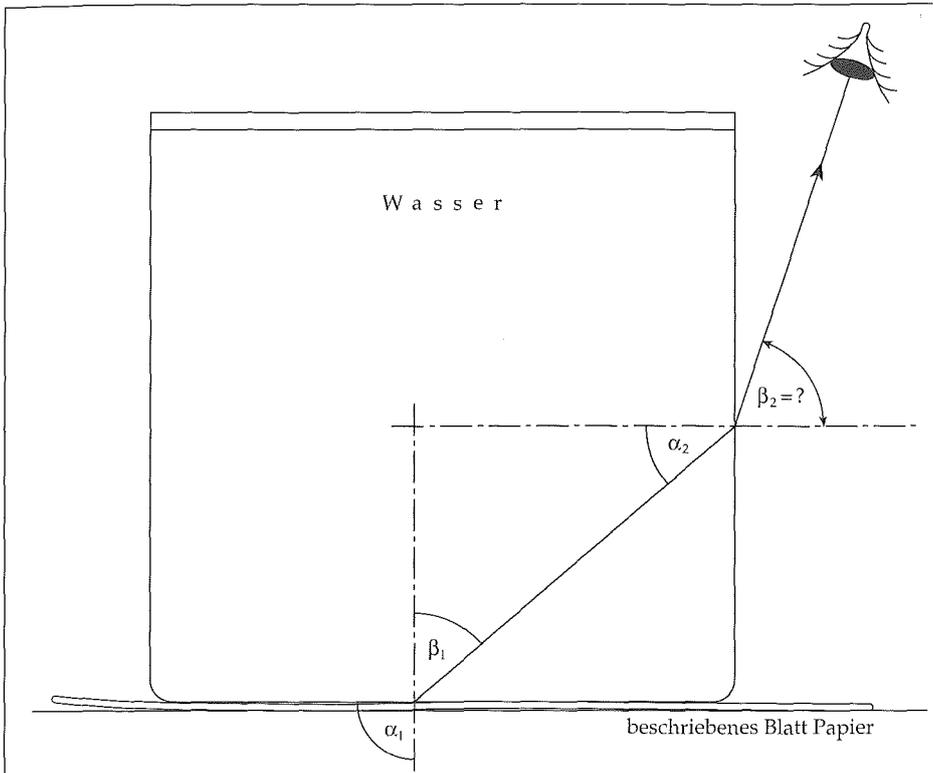


Abb. 7: Blick durch eine Seitenwand eines Wasserquaders: Existiert ein Winkel $\beta_2 < 90^\circ$?

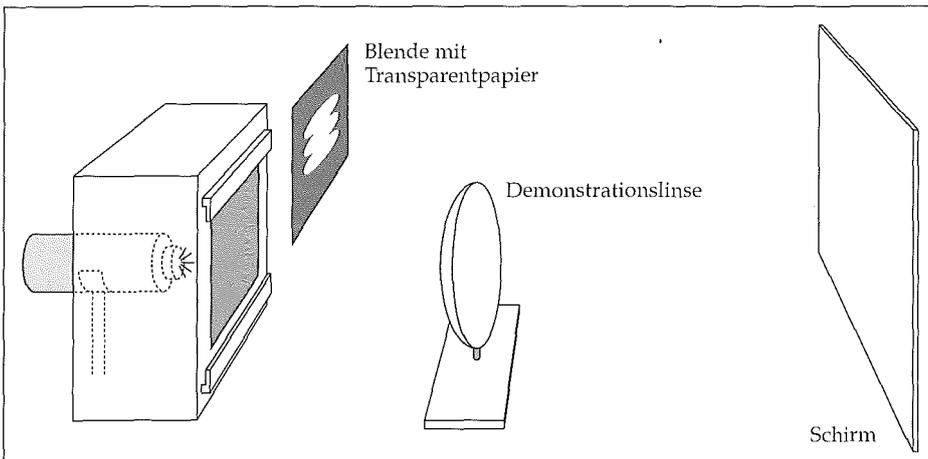


Abb. 8: Anordnung zum qualitativen Verständnis der Fleck-zu-Fleck-Abbildung.

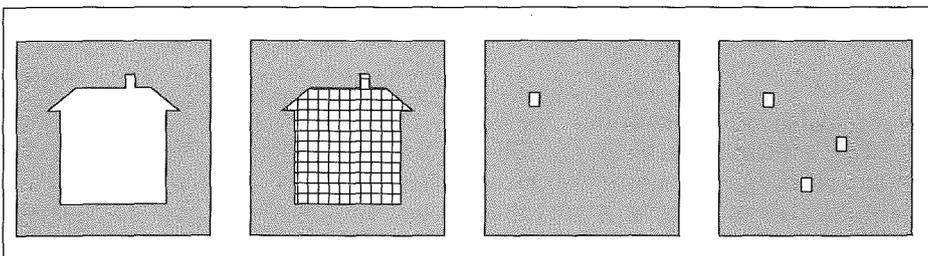


Abb. 9: Folge von Leuchtbildern zur Fleck-zu-Fleck-Abbildung.

Nur bei sehr steiler Blickrichtung kann ein Teil der Schrift gelesen werden. Bei einem Plexiglasblock gelingt auch dies nicht mehr.

Abschließend werden Lichtleiter und als Anwendung das Endoskop besprochen.

Bilder einer Sammellinse

Als letztes Beispiel zur Verdeutlichung unseres Lehrgangs soll noch kurz auf die Behandlung der reellen Bilder bei einer Sammellinse eingegangen werden.

Die für die Schüler interessanteste Eigenschaft einer Sammellinse besteht darin, daß sie abbildet. Deshalb wird bewußt nicht mit dem Verlauf von Lichtstrahlen beim Durchgang durch eine Linse begonnen, sondern die Schüler beobachten zu Beginn ausgiebig Luft- und Schirmbilder einer Sammellinse. Für die Beobachtungen bieten sich die zum Bau des Entfernungsmesser bereits verteilten Linsen an. Die Schirmbilder können mit einem Blatt Papier aufgefangen werden. Zur Demonstration für alle Schüler im anschließenden Klassengespräch ist die Verwendung einer möglichst großen Linse günstig, z. B. eine aus zwei Uhrschalen zusammengeklebte und mit Wasser gefüllte Linse von etwa 30 cm Durchmesser, die jeder leicht selbst herstellen kann (s. [10]). Eine solche Linse ist recht lichtstark, so daß in geringfügig abgedunkeltem Raum gut ausgeleuchtete Gegenstände deutlich abgebildet werden. Problemlos können hier die Begriffe Gegenstands- und Bildweite bzw. -größe eingeführt werden. Als erstes Ergebnis wird festgehalten: Zu jeder Gegenstandsweite gibt es eine bestimmte Bildweite, und das Bild ist seitenverkehrt und steht auf dem Kopf.

Der Schirm wird anschließend weggenommen, und das Luftbild wird beobachtet. Mit Hilfe des Entfernungsmessers wird nachgewiesen, daß das Luftbild an der gleichen Stelle wie das Schirmbild liegt. Als nächster Schritt wird mit Hilfe der Anordnung in Abb. 8 und der dazugehörigen Folge von Leuchtbildern in Abb. 9 eine qualitative Fleck-zu-Fleck-Erklärung des Abbildungsvorganges entwickelt. Dazu ist die leuchtende Oberfläche – gedanklich – in kleine Leuchtflecke zu zerlegen. Als überzeugende Veranschaulichungshilfe kann das Leuchtbild 2 in Abb. 9 abgebildet oder eine Folie mit einem Rechteckraster direkt vor die Leuchtfigur gehalten werden. Was passiert mit dem von einem Fleck ausgehenden Licht? Für die Abbildung durch die Linse kann nur der vom Fleck ausgehende und auf die Linse auftreffende Lichtkegel relevant sein. Was macht die Linse damit? Ein Leuchtbild mit nur einer kleinen Öffnung zeigt: auf dem Schirm entsteht das Bild des Flecks. Die Linse macht also aus dem divergenten Lichtkegel einen konvergenten, was durch streifenden Einfall auch leicht demonstriert werden kann.

Als nächstes wird die gleichzeitige Abbildung von drei Flecken des Leuchtbildes diskutiert. Dazu wird das

Einleckbild durch eines ausgetauscht, in dem drei Öffnungen vorhanden sind (am besten mit unterschiedlich farbigen Stückchen Scheinwerferfolie hinterklebt, damit Leucht- und Bildfleck eindeutig zugeordnet werden können). Abwechselnd wird je ein Fleck abgedeckt. Auf dem Schirm ist zu beobachten, daß die Flecken unabhängig voneinander abgebildet werden. Die drei Lichtkegel stören sich also gegenseitig nicht. Dies wird dann auf die Gesamtheit der Leucht- und Bildflecken verallgemeinert (vgl. Abb. 8 und 9).

Die Diskussion darüber, was bei Teilabdeckungen der Linse mit dem Bild passieren wird, hat sich als besonders lehrreich erwiesen.

Die eben besprochene qualitative Erklärung kann nicht die Frage beantworten, wo die Spitzen der aus der Linse austretenden Lichtkegel liegen, also wo das Bild ist. Dies wird zu dem Problem geführt, wo sich möglichst günstig ausgewählte Lichtstrahlen schneiden. Von hier ab setzt ein weitgehend konventioneller Unterricht über Strahlenoptik ein.

Nach diesem Schema werden auch die virtuellen Bilder der Sammel- und Zerstreuungslinsen behandelt: Beobachten der Bilder; Wo liegen die Bilder (Entfernungsmesser)? Was beobachte ich, wenn ich die Gegenstandsweite verändere? Wie kommen die Bilder zustande (qualitative Erklärung mit Hilfe von Lichtbündeln)? Strahlenoptik (Verlauf ausgezeichneter Strahlen).

Durchführung und Ergebnisse einer vergleichenden Felduntersuchung

Liefert ein Unterricht, bei dessen Planung die bisher bekannten Lernschwierigkeiten berücksichtigt wurden und der in der beschriebenen Weise durchgeführt wurde, auch die erhofften Lernerfolge, d. h. werden die Lernschwierigkeiten wirksam reduziert? Zur Beantwortung dieser Frage wurde von D. Herdt eine breit angelegte Felduntersuchung durchgeführt (s. [11] und [12]).

Im Schuljahr 1987/88 wurden der Unterricht und die Untersuchungen in zwei Parallelgruppen mit insgesamt fünfzehn Schulklassen (Gymnasial- und Realschulen) aus dem Großraum Frankfurt durchgeführt. In der Versuchsgruppe (6 Klassen, 143 Schüler; 5 Gymnasialklassen und eine Realschulklasse) wurden die Schüler nach dem eben beschriebenen Lehrgang unter-

richtet. Als Kontrollgruppe (9 Klassen, 208 Schüler; 7 Gymnasialklassen und 2 Realschulklassen) wurden die Schüler traditionell unterrichtet, d. h. mit Schwerpunkt auf den Konstruktionen der geometrischen Optik. Die Lehrer der Versuchsgruppe erhielten den ausgearbeiteten Lehrgang, ein Schülertext lag nicht vor. Die Lehrer der Kontrollgruppe waren sorgfältig ausgewählt worden. Sie galten als engagiert und erfolgreich. Eine Überlegenheit der Lehrer der Versuchsgruppe war nicht anzunehmen.

Um sicherzustellen, daß beide Gruppen vor dem Unterricht über vergleichbare kognitive Voraussetzungen verfügten, wurden in beiden Gruppen ein Intelligenztest, ein Test zum logischen Denken und ein Optik-Vortest durchgeführt. Aufgrund der Ergebnisse dieser Voruntersuchung konnte man ausschließen, daß die Schüler der Versuchsgruppe bereits zu Beginn des Optikunterrichts über bessere kognitive Startvoraussetzungen verfügten als die Schüler der Kontrollgruppe.

Nachuntersuchungen (nach 1 Jahr Optikunterricht)

Mit einem Abschlußtest zur Optik, der von allen Schülern bearbeitet worden ist, wurde der Lernerfolg in beiden Gruppen erhoben. Bei den insgesamt zwanzig Items handelte es sich ausschließlich um Fragen zum elementaren Grundwissen in Optik, wie es auch im üblichen strahlengeometrischen Optikunterricht der Kontrollgruppen angestrebt wurde (Sehvorgang, Lochkamera-Abbildung, Reflexion und Spiegelbild, Brechung, Bildkonstruktion bei der Sammellinse, Dispersion, farbige Schatten, Körperfarben).

Als ein Maß für den globalen Lernerfolg in Optik wurde für jeden Schüler eine Gesamtpunktzahl (maximal 40 Punkte) ermittelt.

Vergleich des Gesamtlernerfolgs zwischen den Gruppen

Der Lernerfolgsmittelwert der Versuchsgruppe war 23,8, der der Kontrollgruppe 9,9. Der Mann-Whitney-U-Test ergab einen hochsignifikanten Unterschied zugunsten der Versuchsgruppe.

Die Lernerfolgsmittelwerte der Versuchsklassen lagen zwischen 17,3 und 32,8, die der Kontrollklassen zwischen 6,5 und 16,7. Damit lag die beste der 9 Kontrollklassen noch unterhalb der schwächsten Versuchsklasse, was darauf hindeutet, daß die Lehrervariable kaum für den deutlichen Unterschied verantwortlich sein kann.

Interessant ist weiterhin, daß die Schüler der Versuchsgruppe auch bei den Items aus der geometrischen Optik, bei denen die Kontrollgruppenschüler einen Übungsvorteil hatten, signifikant besser abschnitten.

Abschließend ist also festzustellen, daß das Lernen der elementaren Optik erheblich erfolgreicher durchgeführt werden kann, wenn das bereits vorhandene Wissen über die Wissens- und Denkstrukturen der Schüler bei der Planung des Unterrichts gezielt berücksichtigt wird.

Literatur

- [1] Wiesner, H.: Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten im Bereich der Optik. In: Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie 34, Heft 13, 1986, S. 25 – 29.
- [2] Wiesner, H.: Verbesserung des Lernerfolgs im Unterricht über Optik I: Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten. In: Physik in der Schule, 1992, S. 286 – 290.
- [3] Wiesner, H.: Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten mit dem Spiegelbild. In: Naturwissenschaften im Unterricht Physik 40, Heft 14, 1992, S. 16 – 18.
- [4] Wiesner, H.: Lehrgespräche zur Abbildung durch Linsen. In: Behrendt, H. (Hrg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie, Alsbach Leuchtturm: 1993, S. 265 – 267.
- [5] Wiesner, H., Herdt, D., Engelhardt, P.: Unterricht Physik. Experimente – Medien – Modelle. Köln, Aulis-Verlag 1993.
- [6] Wiesner, H., Herdt, D.: Unterricht über Spiegel: Bericht über einen Versuch zur Verbesserung des Lernerfolgs. In: NiU Physik 40, Heft 14, 1992, S. 19 – 26.
- [7] Wiesner, H., Engelhardt, P.: Einführung in die Optik. Fachmethodische Folgerungen aus Untersuchungen zu Lernschwierigkeiten. Ein Unterrichtsversuch. In: Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie 35, 1987, S. 380 – 384.
- [8] Buchholz, I.: Zum Bild von Punkten und Gegenständen unter Wasser. In: Praxis der Naturwissenschaften/Physik 2/1980, S. 269 – 279.
- [9] Saxler, J.: Zum Abbildungsfehler bei der Brechung an ebenen Grenzflächen. In: PdN Physik 2/1989, S. 38 – 41.
- [10] Wiesner, H.: Hinweise zum Bau eines Augenmodells und wassergefüllter Demonstrationslinsen. In: Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie 33, 1985, S. 202 – 207.
- [11] Herdt, D., Wiesner, H.: Vergleichende Untersuchungen zum Lernerfolg verschiedener Konzeptionen für den Einführungsunterricht in Optik (Sekundarstufe I). In: Vorträge der Frühjahrstagung des FA Didaktik der DPG, Gießen 1990, S. 451 – 455.
- [12] Herdt, D.: Vergleichende Untersuchung eines neuen Lehrgangs – Einführung in die elementare Optik. Essen, 1990.

Privatdozent Dr. Dr. Hartmut Wiesner, geb. 1936.

Adresse: Gräfstr. 39, Postfach 11 19 32, D-60054 Frankfurt, Telefon (069)798-35 75.