

Elementare physikalische Modellvorstellungen zu Lichtphänomenen

H. Joachim Schlichting Universität Münster

*Spaltet immer das Licht! Wie öfters strebt ihr zu trennen,
Was euch allen zum Trutz eins und ein Einziges bleibt.*

Johann Wolfgang von Goethe

Licht ist eine wesentliche Voraussetzung dafür, dass wir die uns umgebenden Dinge sehen. Von den Eigenschaften des Lichts hängt es maßgeblich ab, wie wir sie sehen bzw. wie sie uns erscheinen. Im Folgenden soll beispielhaft gezeigt werden, wie man ausgehend von optischen Alltags- und Naturerscheinungen über lebensweltliche Vorstellungen hinaus zu elementaren physikalischen (Modell-)Vorstellungen über das Verhalten des Lichts gelangen kann. Johann Wolfgang von Goethe hat sich stets dagegen gewehrt (siehe oben), das Licht zu spalten und in Strahlen zu zerlegen. Will man jedoch zu physikalischen Beschreibungen gelangen, so kommt man nicht umhin, verallgemeinerungsfähige Merkmale des Lichts zu erarbeiten, die für sich betrachtet abstrakt und konstruiert wirken. Sie haben aber den für die physikalische Sehweise typischen Vorteil, dass die Vielzahl von Lichtphänomenen auf wenige Prinzipien zurückgeführt werden können. Diese Merkmale sind den Lichterscheinungen nicht unmittelbar anzusehen. Sie können aber mit Hilfe von Experimenten motiviert und nahe gelegt werden.

Zur Beschreibung von Lichtphänomenen, die im Rahmen der geometrischen Optik erklärt werden können – und auf solche wollen wir uns im folgenden beschränken – erweist sich das Konzept des *Lichtstrahls* als wesentliches theoretisches Konstrukt. Dem entsprechend werden wir zunächst der Frage nachgehen, wie man zu der Vorstellung des *Lichtstrahls* kommen kann. Dabei spielt die Lehre, die man aus Schattenphänomenen ziehen kann, eine wesentliche Rolle. Anschließend geht es um die Frage, wie mit Hilfe des *Lichtstrahlkonzepts*

- a) die Entstehung von Spiegelbildern und
 - b) die Veränderungen (Brechung) des Lichts beim Durchgang durch durchsichtige Medien wie Wasser oder Glas
- erklärt werden können.

Licht strahlt

Die Lichterscheinungen haben die Eigenschaft der Strahlenförmigkeit nicht gleichsam ablesbar an sich. Auch wenn die Schülerinnen und Schüler das

Wort *Lichtstrahl* sehr schnell im Munde führen, kann nicht davon ausgegangen werden, dass damit robuste Vorstellungen verbunden werden. Es be-



Abb. 1: Lichtstrahlen durch „Sonnenstäubchen“ sichtbar geworden.

darf vielmehr einer bewussten Anstrengung, die Lichterscheinungen „mit den Augen derjenigen zu sehen, die von geometrischer Optik noch nichts wussten und die Vorstellung eines Lichtstrahls neuartig und revolutionär gefunden hätten“ (Wagenschein 1988, S. 23). Martin Wagenschein fordert für den Unterricht diese „bewusste, nüchterne Anstrengung“, die „das *Licht* zur Wahrnehmung kommen lässt, um von dort den *Lichtstrahl*“ zu entwickeln (ebd.). Und Walter Jung weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass das Konzept des *Lichtstrahls* sich zwar theoretisch bilden lasse, wenn man eine Vorstellung von Geradlinigkeit und Licht habe. Der inhaltliche Aspekt der Geradlinigkeit könne aber nur in Verbindung mit Phänomenen, etwa dem Spannen einer Schnur erfasst werden. „Und der so vielleicht zuerst ‚theoretisch‘ eingeführte Ausdruck *Lichtstrahl* gewinnt nur Inhalt, wenn er in Verbindung mit optischen Phänomenen gesehen wird, z.B. mit Schattenbildung“. (Jung 1979, S. 18f). Ohne den Bezug zu den Phänomenen kann kein scharfer Begriff entstehen, der geeignet ist, Erfahrung zu organisieren.

Ein solcher Phänomenbezug kann zum Beispiel durch Situationen herbeigeführt werden, in denen das Licht sich „strahlenförmig“ verhält. Dies tritt in günstigen Fällen natürlicherweise auf, wenn das

Licht durch die Öffnungen im Blätterdach von Bäumen auf ähnliche Weise hindurch „schießt“ wie Wasser durch feine Löcher in einem Gefäß (Abb. 1). Diese Analogie zum Verhalten von Wasser mag es gewesen sein, durch die erstmalig die Auffassung nahe gelegt wurde, dass sich Licht bewegt und unter Umständen ähnlich wie eine Flüssigkeit ausbreitet.

An dieser Stelle sollte jedoch darauf hingewiesen werden, dass der Vergleich mit Wasser leicht zu Fehlvorstellungen Anlass geben kann. Denn was man hier sieht, sind nicht die Lichtstrahlen, sondern an Staub- und Nebelteilchen zu den Seiten abgelenktes Streulicht. Da wir Licht nur wahrnehmen können, wenn es in unsere Augen gelangt, können wir aufgrund dieses Streulichts indirekt auf Lichtstrahlen schließen, die in ganz andere Richtungen laufen.

Auf solche sich natürlicherweise ergebenden Situationen kann und muss man nicht warten. In der Physik werden sie gezielt herbeigeführt, indem man die Natur den theoretischen Konzepten entsprechend (in diesem Fall: das Konzept des Lichtstrahls) arrangiert. Man spricht dann von einem

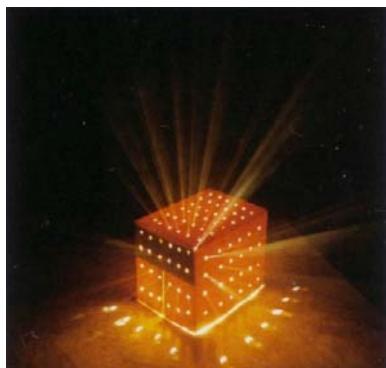


Abb. 2: Künstlich erzeugte Lichtstrahlen.

physikalischen Experiment. Mit Hilfe von derartigen Experimenten wollen wir im folgenden zeigen, wie ganz unterschiedliche Lichtphänomene mit Hilfe des Lichtstrahls auf wenige physikalische Zusammenhänge zurückgeführt und damit erklärt werden können.

Im **1. Experiment** geht es darum zu zeigen, dass das von einer Glühlampe ausgehende Licht mit einfachen Mitteln dazu gebracht werden kann zu „strahlen“. Dazu wird ein Karton mit Löchern versehen und dann über eine Glühlampe gestülpt. Anschließend stäubt man feinen Kreidesstaub u.ä. über die Öffnungen und macht so etwas wie die Spur der in alle Richtungen weisenden Lichtstrahlen sichtbar. Dadurch wird die Vorstellung nahe gelegt, dass das von einer Lichtquelle ausgehende Licht radial in alle Richtungen ausgesendet wird, auch wenn dies direkt so nicht zu sehen ist.

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass Licht nur dann gesehen wird, wenn es in unsere Augen fällt. Alle Dinge, die wir sehen, sehen wir daher durch das von diesen Dingen ausgehende und in unsere Augen gelangende Licht. Daraus folgt, dass jeder sichtbare Gegenstand Licht aussendet und als (indirekte) Lichtquelle angesehen werden kann. Die direkten Lichtquellen sind eigentlich nur dazu da, Licht hervorzubringen und die Gegenstände zu beleuchten, damit diese es ihrer Beschaffenheit entsprechend modifiziert wieder aussenden können.

Dem schon sehr früh entwickelten Konzept des Lichtstrahls sollte eine außerordentlichen Karriere für das Verständnis des Lichts und dessen wissenschaftlicher Erfassung beschieden sein. Die Helligkeitsstiftende Erscheinung des Lichts, der auf dem ersten Blick weder Strahlförmigkeit noch Geradlinigkeit anhaftet, wird durch das Konzept des Lichtstrahls auf gerade Linien und damit auf geometrische Objekte reduziert, die es möglich machen, dass mit Licht Geometrie getrieben werden kann. Die euklidische Geometrie wurde daher schon sehr früh auf das Verhalten des Lichts angewandt und kann viel allgemeiner als Vorläufer für die Mathematisierung der Physik angesehen werden.



Abb. 3: Geworfene und aufgefangene Schatten

Um Missverständnissen vorzubeugen. Wir behaupten nicht, Licht bestehe aus Strahlen. Wir gehen jedoch davon aus, dass sich Licht in zahlreichen Situationen so verhält, dass es mit Hilfe von Strahlen bzw. geraden Linien beschrieben werden kann. Von der Mächtigkeit der geometrischen Beschreibung des Lichtes, überzeugt man sich, wenn es darum geht, das Verhalten des Lichts in gegebenen Situationen vorherzusagen und zu erklären.

Schatten – Löcher im Licht

Wenn Licht durch Öffnungen in einem undurchsichtigen Medium fällt, wird eine geradlinige Lichtausbreitung nahe gelegt. Doch dies ist nur ein Phänomen von vielen. Auch Schatten, die durch Gegenstände hervorgerufen werden, die man in den Strahlengang einer Lichtquelle stellt zeugen von der Geradlinigkeit der Lichtausbreitung. Wird der Schatten einer Person auf eine Fläche, wie in Abb. 3 auf ein zum Trocknen aufgehängtes Bettlaken geworfen, so kann man eine bekannte Person am Profil des Schattenbildes erkennen. Denn die im Licht stehende Person blendet einen Teil des auf die Leinwand gestrahlten Lichtes aus, den Schatten, der genau dem Umriss der Person entspricht. Das ist nur möglich, wenn sich Licht geradlinig fortpflanzt.

In einem **Experiment 2** können wir uns dies verdeutlichen: Ein quadratisches im Lichte einer Glühlampe oder Kerze stehender Gegenstand wird vor einer Leinwand aufgestellt. Infolgedessen erscheint

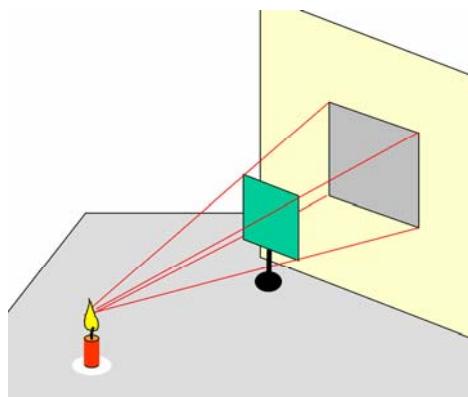


Abb. 4: Lichtstrahlen und Schatten

ein vergrößertes Schattenbild des Gegenstandes auf der Leinwand. Spannt man jeweils einen Faden von den Ecken des Bildes über die entsprechende Ecke des Gegenstandes bis zur Leuchte, so stellt man fest, dass alle Fäden in der Leuchte zusammenlaufen. Damit wird ein kleiner Ausschnitt der von der Leuchte radial in alle Richtungen gehenden Licht-



Abb. 5: Der Schatten offenbart die Struktur einer Oberfläche

strahlen kenntlich gemacht. Die Entstehung des Schattens lässt sich damit erklären, dass die auf den Schattengeber auftreffenden Strahlen aufgehalten werden und ein der Querschnittsform des Schattengebers entsprechendes Loch ins Licht reißen. Man kann sich leicht davon überzeugen, dass aufgrund der auseinanderlaufenden Lichtstrahlen der Schatten umso größer wird, je weiter die Leinwand entfernt wird oder je näher die Leuchte an den Schattengeber heranrückt (Abb. 4).

Schatten erzählen vom Licht, weil durch sie „die Körper ihre Form offenbaren.“ (da Vinci 1990, S. 229). Das gilt nicht nur für Schlagschatten, die wie in unserem Experiment den Umriss des Körpers auf eine Leinwand „malen“. Es gilt auch für Schatten, die auf einem Gegenstand selbst entstehen. Ohne derartige Schattierungen wäre die Form des in Abb. 5 dargestellten Bettlakens nicht zu erkennen. Maler haben umgekehrt diese Schattierungen ausgenutzt, um auf einer zweidimensionalen Leinwand dreidimensionale Gegenstände täuschend echt abzubilden.

VorSPIEGELung falscher Tatsachen, oder:
Ich bin dort, wo ich nicht bin

*Aus einer einzigen Erfahrung
von der Reflexion eines Lichtstrahls
macht euch der Mathematiker die ganze Katoptik¹.*

Georg Christoph Lichtenberg

Schatten wurden und werden auch heute noch zuweilen mit Spiegelbildern verwechselt. Das kommt vor allem dann vor, wenn es sich um unvollkommene Alltagsspiegel wie Wasseroberflächen, Glas-

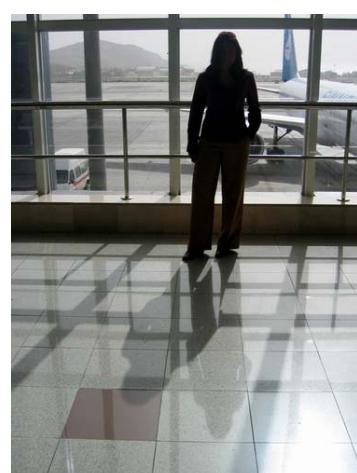


Abb. 6: Schatten oder Spiegelbild oder beides?

¹ Katoptik ist eine heute kaum noch benutzte Bezeichnung für den Teil der geometrischen Optik, die sich mit Reflexionen befasst.

scheiben oder glatte Fußböden handelt, bei denen ein großer Teil des Lichtes verschluckt und diffus reflektiert wird (Abb. 6).

Ein Spiegelbild ist aber eindeutig von einem Schatten zu unterscheiden (Schlichting 2004). Während ein Schatten nur den Umriss eines Körpers korrekt wiedergibt, ist das Spiegelbild dem Original täuschend ähnlich. Man denke nur an Narziss, der sein Spiegelbild für real hielt und sich darin verliebte (Ovid 1992, S. 74). Die Wiedergabtreue eines Spiegels kommt anschaulich gesprochen dadurch zustande, dass die von einem Körper ausgehenden und unter einem bestimmten Einfallswinkel auf



Abb. 7: Man muss sich schon bemühen, um zu erkennen, was die reale und was die Spiegelwelt ist.



Abb. 8: Das Kleinkind versucht sein Spiegelbild zu ertasten (Foto freundlicherweise von Fritz Siemsen zur Verfügung gestellt).

dem Spiegel auftreffenden Lichtstrahlen unter einem gleich großen Ausgangswinkel wieder reflektiert werden.

Der Vorgang erinnert an einen gegen eine Wand geworfenen Ball, der unter einem gleich großen Winkel abprallt, unter dem er auf die Wand traf. Jemand der von der Wand nichts weiß, muss den Eindruck haben, als käme er von einer hinter der Wand werfenden Person. Dieses Bild lässt sich auf die Lichtstrahlen übertragen. Wenn sie vom Gegenstand kommend auf den Spiegel auftreffen, werden sie gewissermaßen nur umgeknickt und er-

scheinen in derselben Ordnung, wie sie vom Original ausgegangen sind. Wegen der damit verbundenen Richtungsänderung, von der unsere Augen nichts „wissen“ können, scheint der Licht aussendende Gegenstand hinter dem Spiegel in einer „Spiegelwelt“ zu stehen. Allerdings ist es nur „Alice hinter den Spiegeln“ vergönnt, diese Spiegelwelt zu betreten (Carroll 1974).



Abb. 10: Eine Überlagerung von realer und Spiegelwelt, wie sie auf jedem Stadtbummel wahrgenommen werden kann.



Abb. 9: Bilderrätsel: Was ist das?

Man sieht die Spiegelbilder so weit hinter dem Spiegel, wie sich die Originale vor dem Spiegel befinden. In den meisten Fällen, wird diese Sehweise jedoch durch das Wissen um die Anwesenheit des Spiegels und dessen physischer Undurchdringbarkeit gestört. Ein Kleinkind, das dieses Wissen noch nicht hat, sieht sein gespiegeltes Gesicht hinter dem Spiegel und sucht es dort zu ertasten (Abb. 8).

Auch durchsichtige Medien wie Glas- und Wasserflächen können zu Spiegeln werden. Wer hätte nicht schon einmal sein eigenes Spiegelbild in einer Fensterscheibe begutachtet oder sich von der aus den Tiefen eines ruhigen Sees mit herausstrahlenden Sonne, geblendet gefühlt. Die natürliche und wissenschaftlich-technische Welt sind erfüllt von Spiegelungen dieser Art (Abb. 7). Wenn man in der

Hektik des Alltags überhaupt einen Blick dafür zu entwickeln imstande ist, werden sie zu veritablen Bildrätseln (Abb. 10) oder zu einem fantastischen Spiel mit der Spiegelsymmetrie (Abb. 9).

Dabei kann es zuweilen zu Irritationen aufgrund der Unvollkommenheit der Spiegelung kommen. Durchsicht und Reflexion „vermischen“ reale Gegenstände hinter der Scheibe mit gespiegelten Gegenständen vor der Scheibe. Wenn dabei auch noch

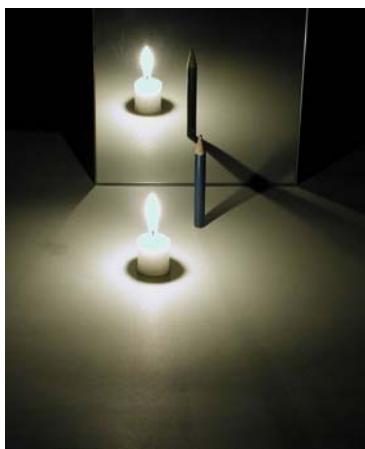


Abb. 11: Das Spiegelbild eines Schattens ist wieder ein Schatten.

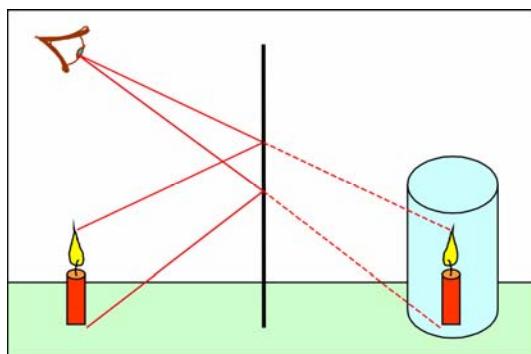


Abb. 12: Das Spiegelbild liegt genau so weit hinter dem Spiegel wie der Gegenstand davor.

Spiegelungen von Spiegelungen hineingeraten, wird die Komplexität der Bilder oft bis zur Un durchschaubarkeit im doppelten Wortsinn gesteigert (Abb. 10).

Die Eigenschaft von Glas, Licht teilweise durchzulassen und teilweise zu reflektieren kann man in einem einfachen **Experiment 3** illustrieren. Dabei wird eine Kerze in ein Glas Wasser gestellt, so dass auch der Docht mit Wasser bedeckt ist und hinter eine Glasscheibe gestellt. Anschließend positioniert man eine gleichartige brennende Kerze vor der Glasscheibe. Nun blickt man durch die Scheibe und verschiebt das Wasserglas mit der Kerze so, dass das Spiegelbild der Flamme genau an der Stelle zu sehen ist, wo sich der Docht der Kerze im Wasser-

glas befindet. Jemand der arglos durch die Scheibe schaut, hat den Eindruck einer im Wasser brennenden Kerze (Abb. 12).

Natürlich glaubt man nicht, was man sieht und versucht, den Trick zu entlarven. Durch Ausmessen kann man feststellen, dass die Kerze und ihr Spiegelbild gleich weit von der Scheibe entfernt sind: Das Spiegelbild eines Gegenstands liegt genau so weit hinter dem Spiegel, wie der Gegenstand selbst davor.

Dieses Beobachtungsergebnis kann man aber auch zeichnerisch mit dem Modell des Lichtstrahls gewinnen. Dazu wählt man (z.B. durch Probieren) den Lichtstrahl aus, der – sagen wir – von der Spit-



Abb. 13: In einem an drei Seiten verspiegelten Fahrstuhl sieht man sogar eine Spiegelung der unendlichen Spiegelreihe.
ze der Kerze ins Auge reflektiert wird, indem man



Abb. 14: Ein Würfel zwischen zwei fast parallelen Spiegelfliesen.

das Reflexionsgesetz: $Einfallsinkel = Ausfallsinkel$ anwendet. Es kann nur einer sein. Vom Fußpunkt der Kerze muss der Strahl in eine etwas andere Richtung laufen, um das Auge zu treffen. Da das Auge nicht „weiß“, dass der Lichtstrahl zwischendurch geknickt wurde, „geht es davon aus“, dass das Licht einen gleich langen geraden Weg zurückgelegt hat. Dort sieht man die Spitze

der Kerze. Für die unzähligen weiteren Strahlen gilt natürlich Entsprechendes.

Hier wird einmal mehr deutlich, was das Modell des Lichtstrahls leistet: Man kann das Spiegelbild voraussagen, indem man es nach den Regeln der Geometrie konstruiert oder berechnet. Dadurch wird einmal mehr verständlich, warum die Physik oft sehr künstliche Modelle der Realität konstruiert. Sie wird dadurch in die Lage versetzt, physikalische Ereignisse (wenigstens im Idealfall) exakt vorherzusagen.

Spiegelbilder spiegeln nicht nur reale Objekte. Selbst Schatten erfahren durch einen Spiegel eine Verdopplung. Oder muss man sagen: Auch das Licht einer gespiegelten Kerze ruft einen Schatten

dem vorderen Spiegel seitlich etwas vorbeischauen kann. Alternativ dazu kann man auch ein Loch in die rückwärtige Beschichtung des vorderen Spiegels kratzen und durch das Loch blicken. Die geringe Abweichung von der Parallelität der Spiegel führt zu einer leicht gekrümmten Folge des Spiegelbildes.

Das legt ein weiteres **Experiment 5** nahe. Man stellt zwei an einer Seite mit einem Klebeband verbundene Fliesen wie ein geöffnetes Buch mit verschiedenen Öffnungswinkeln auf (Abb. 15). Je nach der Größe des Winkels werden die dazwischen liegenden Objekte unterschiedlich oft reflektiert, wobei wiederum kein Unterschied zwischen realen und gespiegelten Objekten gemacht wird. Man kann sich leicht überlegen, dass man bei Win-

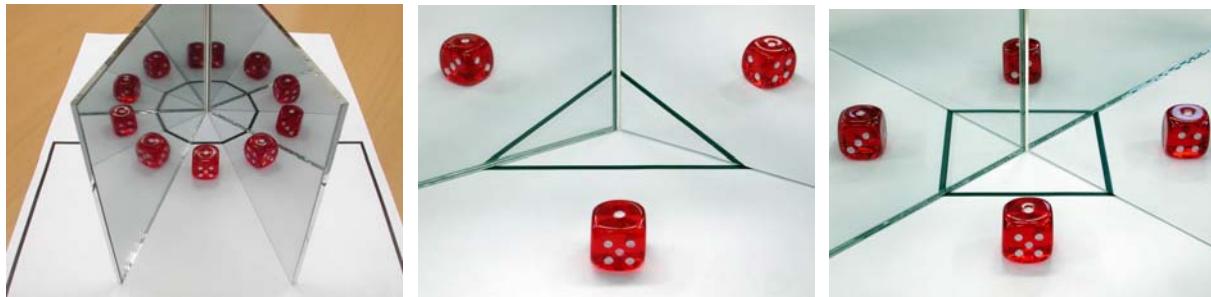


Abb. 15: Je weiter man das Spiegelbuch schließt, desto größer ist die Zahl der Spiegelwürfel.



Abb. 17: Verschiedene Formen von Kaleidoskopen.

hervor und zwar nicht nur von einem realen Gegenstand, sondern auch von einem gespiegelten (Abb. 11)?

Dass Spiegelbilder selbst gespiegelt werden, kann man oft im Alltag erfahren. Es genügt, dass sich zwei Spiegel gegenüber stehen. Tritt man dazwischen, so wird man nicht nur durch jeden Spiegel abgespiegelt, sondern jedes Spiegelbild des Spiegelbildes ist ebenfalls in den Spiegeln zu sehen und ebenso das Spiegelbild des Spiegelbildes des Spiegelbild und so weiter bis ins Unendliche bzw. bis nichts mehr zu erkennen ist (Abb. 13).

Diesen Blick in die Unendlichkeit kann man durch ein sehr einfaches **Experiment 4** ermöglichen. Dazu stellt man zwei Spiegelfliesen (aus dem Baumarkt) fast parallel so zueinander auf, dass man an



Abb. 16: Eine Glaskugel vertauscht nicht nur links und rechts, sondern auch oben und unten, die in einem ganzzahligen Verhältnis zum Vollwinkel von 360° stehen, symmetrische Gebilde entstehen.

Bei einem Winkel von 60° nimmt das Spiegelbuch die Form des bekannten Kaleidoskops an. Beim Kaleidoskop werden bunte Teile zwischen die beiden fixierten Spiegel gelegt, die beim Schütteln immer wieder neue Formen annehmen und durch die sechsfache Spiegelung zu schönen symmetrischen Gebilden zusammengesetzt werden (Abb. 17). Versieht man auch noch die dritte Seite durch einen Spiegel, dann kommt es auch noch zu einer Spiegelung des sechsfachen Spiegelbildes, die ihrerseits in den anderen Spiegeln gespiegelt wird usw.

Ein einfaches Taschenkaleidoskop kann man sich leicht selbst herstellen (**Experiment 6**), indem man



Abb. 18: Gegenstände die eine Wasseroberfläche schräg durchdringen scheinen einen Knick zu haben.



Abb. 19: Eine in einem leeren Becher gerade nicht mehr zu sehende Münze wird sichtbar, wenn man Wasser einfüllt. Die von der Münze ausgehenden Lichtstrahlen werden gebrochen, so dass das Licht aus einem kleineren Winkel zu kommen scheint.

drei Spiegelstreifen (sie können aus fester Spiegelfolie bestehen) mit den Spiegelflächen nach innen zu einem gleichseitigen Dreieck zusammenfügt. Blickt man durch dieses dreieckige Rohr, so sieht man die Gegenstände vielfach gespiegelt und verdreht (Abb. 17 Mitte). Wie dies geschieht kann man mit Hilfe des Spiegelfliesenbuchs erklären. Es gibt so große Kaleidoskope, dass sich Menschen zwischen das Spiegeldreieck stellen und über das Gedränge in einer unüberschaubar großen Zahl von gespiegelten Menschen staunen können (Abb. 17 rechts).

Ein Knick in der Optik

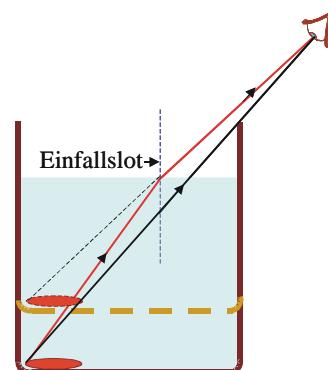
Der gerade Stecken erscheint im Wasser krumm.

Michel de Montaigne

Wasser oder Glas sind lichtdurchlässig. Nicht ganz, wie wir weiter oben gesehen haben. Ein Teil des Lichtes wird reflektiert, so dass es zu Spiegelungen kommt. Aber das ist nicht alles. Bei dickeren Gläsern oder Wasserschichten erscheinen die Gegenstände, auf die man durch das Glas oder das Wasser hindurch blickt verändert. Sie sehen geknickt und verkürzt aus. Man kann dies häufig in der Natur beobachten. Schilfrohr, das die Wasseroberfläche durchdringt, scheint unterhalb des Wassers geknickt (Abb. 18 rechts). Man kann sich dies in einem sehr einfachen **Experiment 7** vor Augen führen, indem man z.B. einen Bleistift in ein Glas mit Wasser stellt und von oben betrachtet (Abb. 18, links).

Natürlich wird nicht der Bleistift gebrochen, sondern die Lichtstrahlen, wenn sie von dem Teil des Bleistifts unterhalb der Wasseroberfläche durch diese hindurch in unser Auge gelangen.

Diese *Lichtbrechung* führt dazu, dass alles, was unter Wasser ist, etwas angehoben erscheint. Bäche sehen flacher aus und die uns auf diese Weise näher



gebrachten Steine auf dem Grund des Baches sehen größer aus als sie in Wirklichkeit sind: „*Reiner Bach, du entstellst nicht den Kiesel, du bringst ihn dem Auge / Näher, so seh' ich die Welt, ***; wenn du sie beschreibst*“ (Friedrich Schiller).

Ein **Experiment 8** soll diesen Sachverhalt in einer Art Zauberstück verdeutlichen. Man legt eine Münze in einen Becher und bittet einen Schüler oder eine Schülerin, von einer Stelle, von der die Münze gerade so eben nicht zu sehen ist, in den Becher zu blicken (Abb. 19 links). Gießt man jetzt Wasser in den Becher, so wird für den Betrachter wie durch Zauberei die Münze sichtbar (Abb. 19

Mitte). Schaut man genau hin, so erkennt man, dass der Boden des Bechers mitsamt der Münze geho-

gehalten wurden, so dass die gesamte Münze zu sehen ist.



Abb. 20: Da sich die vom Auto ausgehenden Lichtstrahlen im Brennpunkt kreuzen, scheinen die von der Vorderfront des von links hinter das Wasserglas fahrenden Autos von rechts zu kommen.

ben erscheint. In der geringeren Tiefe sieht man einen Teil des Becherbodens und mit ihm die Münze.

Dieser erstaunliche Befund lässt sich mit Hilfe des Modells der Lichtstrahlen erklären (Abb. 19 rechts). Ohne Wasser sieht man gerade noch den äußersten Randstrahl (schwarz eingezeichnet) der Münze, alle anderen Strahlen gehen am Auge vor-

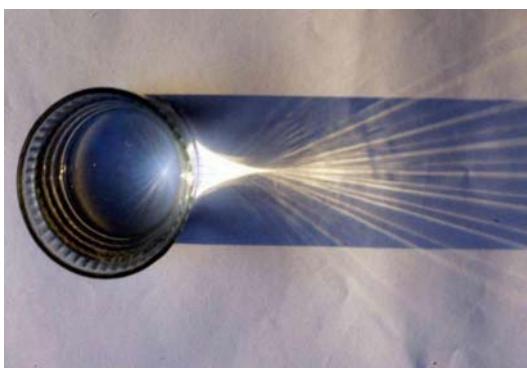


Abb. 21: Im Schattenbereich des transparenten Wasserglases wird das Licht gesammelt. Im vorliegenden Fall zerfällt das Licht aufgrund einer vertikalen Riffelung des Glases sogar in einzelne Strahlen, die zeigen, dass sich die Lichtstrahlen im Brennpunkt überschneiden.

bei oder stoßen gegen die Becherwand. Nach dem Einfüllen des Wassers gelangt vom äußeren Rand der Münze ein ganz anderer Strahl ins Auge. Denn beim Austritt aus dem Wasser werden Lichtstrahlen vom Einfallslot (einer gedachten Linie senkrecht auf der Wasseroberfläche) weg gebrochen. Das Auge „weiß“ jedoch nichts vom Knick des Lichtstrahls und geht davon aus, dass er aus geradliniger Verlängerung der Richtung kommt, aus der er ins Auge gelangt. Das Ende dieses „gedachten“ Lichtstrahls liegt aber höher als der wirkliche Randpunkt der Münze. Aufgrund dieser Brechung der Lichtstrahlen gelangen jetzt auch von allen anderen Punkten der Münze ausgehenden Strahlen ins Auge, die ohne das Wasser von der Becherwand ab-

Licht, das von einem optisch dünneren Medium (z.B. Luft) unter einem bestimmten Winkel zum Einfallslot in ein optisch dichteres Medium (z.B. Wasser oder Glas) gelangt, wird zum Einfallslot hin gebrochen und zwar umso stärker, je größer der Winkel ist. Beim Übergang vom optisch dichten ins optisch dünne Medium wird es umgekehrt vom Einfallslot weg gebrochen. Würde man den ins Wasser eintretenden Lichtstrahl in dieselbe Richtung zurückschicken, nähme er denselben Weg. Man sagt auch: Der Lichtweg ist umkehrbar.

Noch interessanter als beim Durchgang durch ebene Grenzflächen zwischen verschiedenen Medien sind die Veränderungen der Lichtwege beim Durchgang durch runde bzw. gekrümmte Grenzflächen. Das kann man sich wieder in einem einfachen **Experiment 9** veranschaulichen. Man stellt ein Glas Wasser in den Strahlengang der Sonne (oder einer anderen Lichtquelle) und beobachtet zunächst einmal, dass das durchsichtige Glas Wasser einen Schatten wirft mit einem hellen Lichtfleck darin (Abb. 21).

Wie kann das sein? Ursache ist die Brechung des Lichts. Weil es vom optisch dünneren ins dichtere Medium übergeht, wird es zum Einfallslot hin gebrochen. Geht man von parallelen Lichtstrahlen aus (z.B. Sonnenlicht), so treffen die mittleren Strahlen nahezu senkrecht auf das runde Glas (der Winkel zum Einfallslot ist nahezu Null), während der Einfallswinkel zum Rande hin immer größer wird. Die das Glas nur noch streifenden Randstrahlen treffen unter einem Einfallswinkel von 90° ein. Mit zunehmendem Einfallswinkel wird aber die Ablenkung der Lichtstrahlen immer stärker, so dass sie sich hinter dem Glas überschneiden und zu einem Brennfleck (im Idealfall Brennpunkt) gebündelt werden. Wir haben zufällig ein Glas mit vertikalen Riffelung gefunden, durch die das Licht in einzelne Strahlenbündel zerlegt wird. Denkt man

sich an jedem Riffel ein Einfallsslot eingezeichnet, so wird die stärkere Brechung der Strahlen zum Rand hin unmittelbar einleuchtend. Der mittlere Strahl geht ungebrochen durch das Glas hindurch.

Weil im Brennpunkt das gesamte auf das Glas auftreffende Licht zusammenläuft, gelangt es nicht zu den anderen Stellen hinter dem Glas. Dort herrscht Schatten. Zerlegt man das Licht in Strahlen, so erkennt man, dass diese sich im Brennpunkt überkreuzen: die von links kommenden Lichtstrahlen laufen nach rechts und die von rechts kommenden laufen nach links auseinander.

Die Einsicht, dass sich die Lichtstrahlen eines Gegenstandes beim Durchgang durch eine rundes Wasserglas überkreuzen und damit die linke Seite des Gegenstandes mit der rechten zu vertauschen scheinen, hilft uns, auf den ersten Blick sehr merkwürdig anmutende Vorgänge wie etwa den folgenden zu erklären (**Experiment 10**): Man lässt ein Spielzeugauto von links nach rechts hinter einem Wasserglas herfahren (Abb. 20). Zunächst scheint das Vorderteil zu verschwinden, obwohl das Glas



Abb. 24: Auch kleine Wassertropfen brechen das Licht so, dass es sich in einem im Schatten des Tropfens liegenden Brennpunkt sammelt

ganz durchsichtig ist. Wenn es die Mitte des Glases überschreitet, erscheint es rechts am Glasrand und läuft der wahren Fahrtrichtung des Autos entgegen bis es zur Verschmelzung kommt. Wie man sich anhand von Abb. 21 klarmachen kann, werden die Lichtstrahlen des Vorderteils nach rechts weg gebrochen und fallen nicht ins Auge. Das Glas erscheint hier durchsichtig, weil Licht von ganz anderen Stellen hinter dem Glas kommt. Erst wenn die Mitte überschritten wird, werden die Lichtstrahlen vom vorderen Teil des Autos von der rechten Seite nach links gebrochen und somit sichtbar.

Erstaunlich ist, dass bei solchen Überlagerungen der Lichtstrahlen keine gegenseitige Störung auftritt. Jeder Lichtstrahl der einen anderen trifft, verhält sich so, als ob es die anderen gar nicht gäbe. *Lichtstrahlen können sich frei überlagern*. Diese Eigenschaft ist neben der geradlinigen Ausbreitung als eine weitere wichtige Eigenschaft des Lichtes anzusehen. Wasserstrahlen verhalten sich ganz an-

ders, sie beeinflussen sich, indem sie z.B. aneinander abprallen.

Während ein Zylinder (unser Wasserglas) nur in einer Richtung gekrümmmt ist und daher beim Durchblick nur links mit rechts vertauscht, ist eine Kugel allseitig gekrümmmt. Was kann man erwarten, wenn



Abb. 22: Ein Wassertropfen auf einem Blatt lässt die Blattadern vergrößert hervortreten.

man durch eine Glaskugel blickt? Wie Abb. 16 zeigt, vertauscht die Kugel nicht nur Links und Rechts, sondern auch Oben und Unten. Wenn man sich vielleicht schon mal darüber gewundert hat, warum nach einem Regenschauer Wassertropfen an der Fensterscheibe im unteren Teil stets hell sind



Abb. 23: Wassertropfen an Fensterscheiben sind im unteren Teil im Allgemeinen hell?

(Abb. 23), so hat man hier die Erklärung: Wassertropfen sind – wenn auch deformierte – Kugeln. Sie vertauschen neben Links und Rechts auch Oben und Unten. Unten sieht man daher stets den hellen Himmel.

Glas und Licht verbessern die Sicht

*Die Welt jenseits der geschliffenen Gläser ist wichtiger, als die jenseits der Meere,
und wird vielleicht nur von der jenseits des Grabes
übertroffen.* Georg Christoph Lichtenberg

Lichtsammlung (Fokussierung) in Brennpunkten beobachtet man sehr oft in seiner Umwelt. Wassertropfchen beispielsweise (Abb. 24) sammeln das

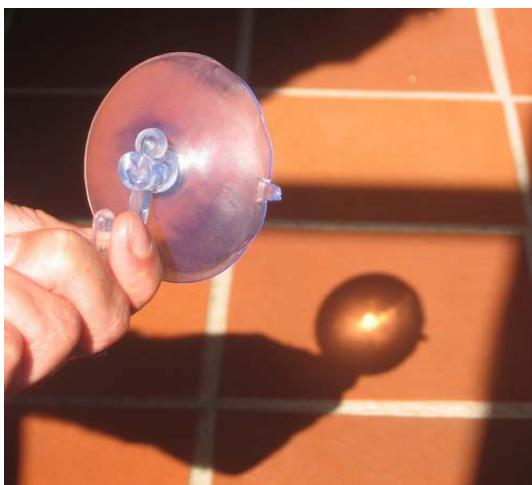


Abb. 25: Der Brennpunkt eines Saughakens aus Kunststoff.

Licht in ihrem Schattenbereich ebenso wie gekrümmte, transparente Glas- oder Kunststoffobjekte (Abb. 25). Wenn man sie dicht vor Gegenstände hält, so kann man eine erstaunliche Feststellung machen: sie stellen die Dinge nicht mehr auf dem Kopf, sondern lassen sie größer erscheinen als sie sind. Dies kann man bereits an einem auf einem Schilfblatt hängenden Wassertropfen sehen: die Rippen des Blattes erscheinen beim Blick durch

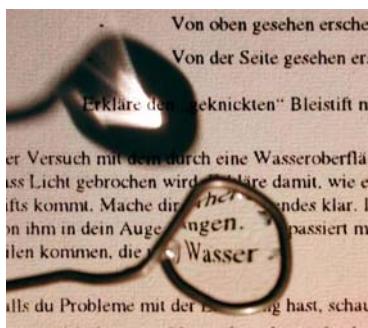


Abb. 26: Eine Drahtschlaufe mit Wassertropfen als primitive Lupe.

Wassertropfen deutlich vergrößert (Abb. 22).

Durchsichtige gerundete bzw. linsenförmige Objekte, die entfernte Gegenstände verkleinert sowie verkehrt (Links- und Rechtsvertauschung und Kopfstehen) erscheinen lassen und die nahe Gegenstände vergrößern, nennt man Sammellinsen. Die Entfernung von der Linse in der die Eigenschaft zu

vergrößern in die Eigenschaft umzukehren umschlägt, nennt man Brennweite. An diesem Umstlagspunkt befindet sich der Brennpunkt.

In einem einfachen **Experiment 11** biegt man eine Büroklammer oder einen anderen Draht so, dass eine Drahtschlinge entsteht. Taucht man sie in Wasser, so bleibt darin ein Wassertropfen in hängen. Hält man diesen Tropfen z.B. über kleine Schrift, so sieht man die Buchstaben vergrößert (Abb. 26), aufgrund der unregelmäßigen Krümmung des Tropfens aber auch verzerrt. Doch wer käme schon auf die Idee, Wassertropfen als Seehilfe zu benutzen. Dazu würde man auf eine Lupe oder eine Brille zurückgreifen. Aber wer weiß, wie es war, als es diese Dinge noch nicht gab? Hat vielleicht der Blick durch einen Wassertropfen oder ein gekrümmtes Stück Bergkristall die Menschen überhaupt erst auf

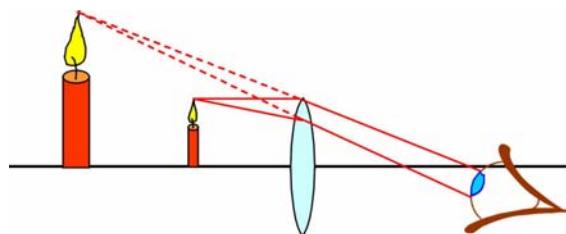


Abb. 27: Durch Brechung der Lichtstrahlen – wie hier am Beispiel zweier Strahlen von der Spitze der Kerzenflamme gezeigt – erscheint dem Auge der Gegenstand vergrößert. Denn die Strahlen scheinen aus der rückwärtigen Verlängerung der Richtung der eintreffenden Strahlen zu kommen.

die Idee gebracht, durch gezieltes Bearbeiten von durchsichtigen Kristallen und später Gläsern optische Geräte herzustellen?

Die Linse wird in den Worten des Physikers und Aufklärers Georg Christoph Lichtenberg als eine der größten Entdeckungen der Menschheit angesehen, führte sie doch in Form von Fernrohr, Mikroskop, Spektrometer, usw. zu völlig neuen Ein- Aus- und Ansichten. Sie halfen im wahrsten Sinne des Wortes neue Welten zu erschließen. Neben dem Kosmos und Mikrokosmos gehört auch die heutige wissenschaftlich- technische Welt dazu, die nicht zuletzt durch optische Technologien so revolutioniert wurde, dass sie mit der Alltagswelt Lichtenbergs nicht mehr zu vergleichen ist (vgl. Schlichting 2003a und 2003b).

Die Fähigkeit einer (Sammel-) Linse durch sie hindurch betrachtete Gegenstände zu vergrößern, lässt sich wiederum im Modell der Lichtstrahlen erklären. Demnach werden die Strahlen, die von jedem Punkt des Gegenstandes in alle Raumrichtungen gestrahlt werden, in der Linse gebrochen und damit aus der ursprünglichen Richtung abgelenkt. In Abb. 27 wird dies am Beispiel zweier von der Spitze der Kerzenflamme ausgehender Strahlen gezeigt. Sie

werden beim Durchgang durch die Linse (zum Einfallslot hin) gebrochen bevor sie das Auge erreichen. Dem Auge scheinen die Strahlen aus der rückwärtigen Verlängerung der Richtung zu kommen, in der sie eintreffen, also von einem Punkt, der dem Bild einer vergrößerten Kerze entspricht. Da diese Argumentation für jeden Punkt der Kerze gilt, könnte man so im Prinzip die vergrößerte Kerze Punkt für Punkt konstruieren.



Abb. 28: Ein Weinglas als Doppel linse.



Abb. 29: Blick durch eine hohle, luftgefüllte Glaskugel, die in ein Wasserbecken getaucht wurde.

Wir hatten bereits festgestellt, dass auch Wassergläser wie Linsen wirken. Untersucht man verschiedene geformte Gläser, so kann man eine merkwürdig Feststellung machen. Blickt man durch Weingläser, die wie das in Abb. 28 dargestellte Glas auf einen entfernten Gegenstand, so erscheint er wie man erwarten würde, im unteren Teil des

Glasses verkehrt, aber im oberen richtig herum. Der obere Teil wirkt also umgekehrt wie eine Sammellinse. Man nennt sie Zerstreuungslinse. Der Unterschied kommt durch die unterschiedliche Krümmung zustande. Während eine Sammellinse nach

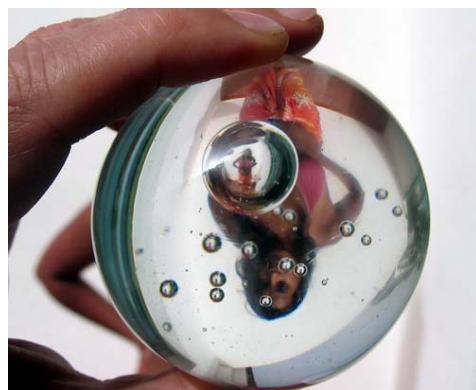


Abb. 30: Eine Kugellinse. Sie vertauscht nicht nur links und rechts, sondern auch oben und unten.

außen gekrümmt ist, ist eine Zerstreuungslinse nach innen gekrümmt. Dadurch kann es nicht zu einer Überkreuzung von Lichtstrahlen kommen (die wir als Ursache für die Vertauschung der Seiten eines Gegenstandes erkannt haben), so dass das Bild zwar verkleinert und ggf. verzerrt erscheint, aber ansonsten in der ursprünglichen Anordnung erhalten bleibt.

Außer von der Krümmung der Grenzfläche des durchsichtigen Gegenstandes hängt die Lichtbrechung wesentlich davon ab, ob das Licht vom optisch dünneren ins optisch dichtere Medium übergeht oder umgekehrt. Eine nach außen gekrümmte (konvexe) Linse (z. B. eine Kugel), die sich in Luft als Sammellinse verhält, wird zu einer Zerstreuungslinse, wenn sie mit Luft gefüllt ist und sich in wässriger oder gläserner Umgebung befindet. Das kann man in einem **Experiment 11** nachvollziehen. Dazu bringt man eine hohle, luftgefüllte transparente Kugel (Glas- oder Plastikkugel aus Bastelladen) unter Wasser und schaut durch sie hindurch auf einen entfernten Gegenstand. Wie erwartet erscheint er richtig herum (Abb. 29).

Wenn man seine Alltagswelt nach „Linsen“ absucht, wird man vielleicht auch auf Gegenstände stoßen wie den in Abb. 30 dargestellten kugelförmigen Briefbeschwerer aus Glas. Er hat die Besonderheit, Luftblasen zu enthalten. Blickt man durch ihn hindurch auf eine Person, so sieht man sie durch die Glaskugel verkleinert und verkehrt herum. Die kleinen Luftblasen, die ja mit dem optisch dünneren Material der Luft gefüllt sind, wirken jedoch wie Zerstreuungslinsen und zeigen die Person richtig herum und aufrecht.

Zusammenfassung

„Worte zu dem zu finden, was man vor Augen hat - wie schwer kann das sein. Wenn sie dann aber kommen, stoßen sie mit kleinen Hämmern gegen das Wirkliche, bis sie das Bild aus ihm wie aus einer kupfernen Platte getrieben haben“. Auch wenn Walter Benjamin, von dem dieser Satz stammt, dies sicher nicht im Hinblick auf eine physikalische Erfassung der Lebenswelt gemeint hat, trifft es ziemlich genau jenen gedanklichen Prozess, den wir hier am Beispiel einiger optischer Alltagsphänomene zu demonstrieren versucht haben. Obwohl das Alltägliche offen vor uns liegt, bedarf es einer bewussten Anstrengung, darin Phänomene zu entdecken, die Grundschulkinder erstaunen lassen verbunden mit dem Wunsch sie näher in Augenschein zu nehmen. Selbst wenn man über die bewusste Wahrnehmung und das Staunen darüber nicht hinaus gelangt, ist schon viel gewonnen. Die Welt wird für reichhaltiger, indem sie gemäß des Kinderspiels „Ich sehe etwas, was du nicht siehst“ immer mehr Phänomene entdecken, über die sie bislang achtlos hinweggesehen hatten. Sie merken, dass die Tapete der Alltagswelt interessante Strukturen, rätselhafte Bilder und einfach nur schöne Anblicke enthält.

Vielleicht geht das (Forschungs-) Interesse der Kinder aber so weit, mehr wissen und Fragen nach dem „Wie“ und „Warum“ beantworten zu wollen. Der dadurch eingeschlagene Weg erfordert einige Verallgemeinerungen und Abstraktionen, die nicht immer leicht sind, aber die Möglichkeit beinhalten, viele auf den ersten Blick neu und unverständlich erscheinende Phänomene zu erklären und sich dadurch anzueignen. Wenige Elemente: der Lichtstrahl, die geradlinige Ausbreitung des Lichtes, das Reflexionsgesetz, die Brechung des Lichtes beim Übergang von optisch unterschiedlichen Medien sind nötig, um einen großen Teil des von Phänomenen der geometrischen Optik geprägten visuellen Feldes qualitativ erklären und verstehen zu können. Auch wenn die Kinder dadurch noch nicht zu physikalischen Modellierungen im engeren Sinne vordringen mögen, sie befinden sich aber auf jeden „auf dem Wege zur Physik“.

Literatur:

Carroll, Lewis: Alice hinter den Spiegeln. Frankfurt: Insel 1974.

da Vinci, Leonardo: Sämtliche Gemälde und die Schriften zur Malerei (Hrsg.) Chastel, André. München: Schirmer Mosel 1990; S. 229

Jung, Walter: Aufsätze zur Didaktik der Physik und Wissenschaftstheorie. Frankfurt: Diesterweg 1979

Ovid: Metamorphosen. Das Buch der Mythen und Verwandlungen. Frankfurt: Fischer 1992

Schlichting, H. Joachim: Physik - eine Perspektive der Realität. Probleme des Physikunterrichts (Teil 1 u. 2). Physik in der Schule 34/9, 283- 288 und 34/10, 339- 342 (1996)

Schlichting, H. Joachim: Die Welt jenseits der geschliffenen Gläser. Zur Bedeutung des Sehens in der klassischen Physik. PhyDid 1/2 (2003) S. 9-18

Schlichting, H. Joachim: Sichtbarkeit jenseits des Lichts. Zur Bedeutung des Sehens in der modernen Physik. PhyDid 2/2 (2003), 81-89

Schlichting, H. Joachim: Schatten, Bild und Spiegelung. Physik in unserer Zeit 35/5 (2004) S. 245

Wagenschein, Martin; Bannholzer, Agnes; Thiel, Siegfried: Kinder auf dem Wege zur Physik. Stuttgart: Klett 1973.

Wagenschein, Martin: Naturphänomene sehen und verstehen. Stuttgart: Klett 1988, S. 23