

# Groß und klein – nah und fern

## Der Sehwinkel als Leitfaden im Optikunterricht

H. Muckenfuß

### 1 Wahrnehmung und Technikorientierung

Sich verschlechternde Rahmenbedingungen für den Physikunterricht betreffen die Optik in der Sek. I oft in besonderem Maß. Gegenwärtig führt fast jede Lehrplanrevision zu Kürzungen in diesem Bereich. In manchen Lehrplänen ist keine Optik mehr im Pflichtbereich vorgesehen, in anderen ist sie auf das Ziel reduziert, die Abbildung mit einer Sammellinse und ihre technischen Anwendungen strahlenoptisch zu erklären. Wahrnehmungsphänomene fallen als Unterrichtsinhalte dieser Verengung der Zielperspektive zum Opfer. So gibt es z. B. Lehrpläne, die das *Reflexionsgesetz* als verbindlichen Inhalt vorschreiben, *Spiegelbilder* dagegen ausdrücklich in den fakultativen Ergänzungsbereich verweisen oder überhaupt nicht behandelt haben wollen. Die Frage, wozu man denn das Reflexionsgesetz lernen soll, wenn es nicht zur Erklärung alltäglicher Phänomene dient, bleibt weitgehend offen.

Es ist leicht, dieses Beispiel um weitere zu ergänzen: Das *Brechungsgesetz* wird behandelt, um den Lichtweg an Linsen darstellen zu können – *Brechungsphänomene* in der Natur, am Aquarium, im Lehrschwimmbecken tauchen dagegen höchstens als „Einstieg“ auf, nicht als zentraler Unterrichtsinhalt, den es zu klären gilt. Die optische Abbildung mit der *Sammellinse* wird oft behandelt, als sei sie eine *Folge* der „ausgezeichneten Strahlen“, mit denen dann auch ausgiebig konstruiert wird. Das Grundphänomen der optischen Abbildung – ohne das m. E. ihr Verständnis nicht möglich ist – nämlich das *Lochkamerabild*, braucht aber wiederum nach den Vorgaben vieler Lehrpläne im Unterricht nicht vorzukommen.

Die Beispiele sollen zeigen, daß die Reduktion der Optik-inhalte keine pädagogisch neutrale Kürzung darstellt. Es findet zugleich eine Akzentverschiebung statt – weg von den sinnlicher Primärerfahrung zugänglichen Phänomenen, hin zu den Artefakten der Naturwissenschaft im Sinne formaler Theorieelemente und technischer Produkte. Die Auseinandersetzung mit der *Natur* wird zunehmend substituiert durch den Erwerb von Kenntnissen aus der *Naturwissenschaft*. Beides ist jedoch unverzichtbar und wechselseitig aufeinander angewiesen, es sei denn, naturwissenschaftliche Bildung werde auf den Erwerb von Knowhow reduziert, auf Verfügungswissen, das für bestimmte Berufsfelder qualifiziert. Diese Tendenz hat den Physikunterricht in den letzten Jahrzehnten an seine Akzeptanzgrenze getrieben [1].

Der Optikunterricht kann seinen Ausgang bei Alltagserscheinungen nehmen, die oft zugleich Gegenstand der Literatur und der Kunst, der Mythologie und der Philosophie, der Psychologie und Biologie sind. Daß die Phänomene in manchen Aspekten auch der physikalischen Erklärung zugänglich sind, macht es möglich, die Relation der Physik zu anderen Bereichen sichtbar zu machen. Daher bietet der Optikunterricht wie kaum ein anderes Teilgebiet der Physik die Chance, Wissenschaftsverstän-

digkeit grundzulegen. Er macht erfahrbar, wie der Mensch ein Naturbild gewinnt, das die sinnliche Wahrnehmung übersteigt, aber doch an sie gebunden bleibt, weil unsere Denkfähigkeit sich *im Rahmen* unserer Wahrnehmungsfähigkeit entfaltet.

Auf naturwissenschaftlichen Ausstellungen, die sich an die allgemeine Öffentlichkeit richten („Phänomene“ etc.) kann beobachtet werden, wie sehr die Besucher von Wahrnehmungsphänomenen fasziniert sind. Von ihnen sind nämlich nicht nur Einsichten in die Natur zu erwarten; sie decken darüber hinaus auch ein Stück weit die Möglichkeiten und Grenzen auf, denen menschliches Erkennen unterworfen ist. Ihr Beitrag zum Menschenbild macht Wahrnehmungsphänomene so interessant. Es ist schwer zu verstehen, warum gerade der Physikunterricht glaubt, darauf verzichten zu können.

Im folgenden geht es nicht darum, wie die Fülle an Wahrnehmungsphänomenen dazu dienen kann, da und dort den Unterricht aufzulockern. Im Vordergrund steht vielmehr die Frage, wie Aspekte der Wahrnehmung genutzt werden können, um dem Optikunterricht eine didaktische Struktur zu verleihen, die den traditionellen Aufbau bereichert und ergänzt. *Ein* Beispiel dazu wird in den nächsten Abschnitten erläutert.

### 2 Das Emmertsche Gesetz

#### Peinlich: Jäger erschießt Kuh

Weiler im Allgäu – Nicht einen wildernden Hund, den er 100 Meter entfernt wähnte, sondern eine doppelt so weit entfernt stehende Jungkuh hat ein Jäger erschossen. Er sei überzeugt gewesen, in der Dunkelheit auf den wildernden Hund zu schießen, beteuert der Waidmann. Er habe die Augen des Tiers leuchten gesehen und der Umriß des Tieres habe der Größe eines Hundes entsprochen. „Saumäßig schad“ findet der Landwirt den Verlust des Schumpen ... (Schwäbische Zeitung vom 26. 10. 95)

Des Waidmanns Mißgeschick liegt ein Gesetz zugrunde, dem unsere Wahrnehmung unterworfen ist, und das experimentell leicht dargestellt werden kann:

*Versuch:* Hält man ein Lineal mit ausgestrecktem Arm vor das Gesicht (Abstand Auge–Lineal ca. 0,6 m) und peilt einen Schreibstift ( $l = 0,2\text{m}$ ) aus unterschiedlicher Entfernung an (60, 120, 180 cm usw.), so erhält man den in der Tabelle dargestellten Zusammenhang. Die entsprechende Gesetzmäßigkeit wird in der Wahrnehmungspsychologie *Emmertsches Gesetz* genannt. In seiner umgangssprachlichen Fassung erscheint es fast trivial: „Je weiter etwas entfernt ist, desto kleiner sieht es aus“ (Abb. 1).

Physikalisch betrachtet, bestimmt der Sehwinkel, wie groß ein Gegenstand auf der Netzhaut abgebildet wird. Dieser Winkel ist sowohl von der Entfernung als auch von der Größe eines Gegenstandes abhängig (Abb. 2).

Entfernung $g$	Größeneindruck $B$	Produkt $g \cdot B$
$g = 0,6 \text{ m} = g_1$	$B = 0,2 \text{ m} = B_1$	$g_1 \cdot B_1$
$g = 1,2 \text{ m} = 2 g_1$	$B = 0,1 \text{ m} = \frac{1}{2} B_1$	$2 g_1 \cdot \frac{1}{2} B_1 = g_1 \cdot B_1$
$g = 1,8 \text{ m} = 3 g_1$	$B = 0,07 \text{ m} = \frac{1}{3} B_1$	$3 g_1 \cdot \frac{1}{3} B_1 = g_1 \cdot B_1$
usw.	usw.	$g \cdot B = \text{const.}$



Abbildung 1: Akazien in der Savanne

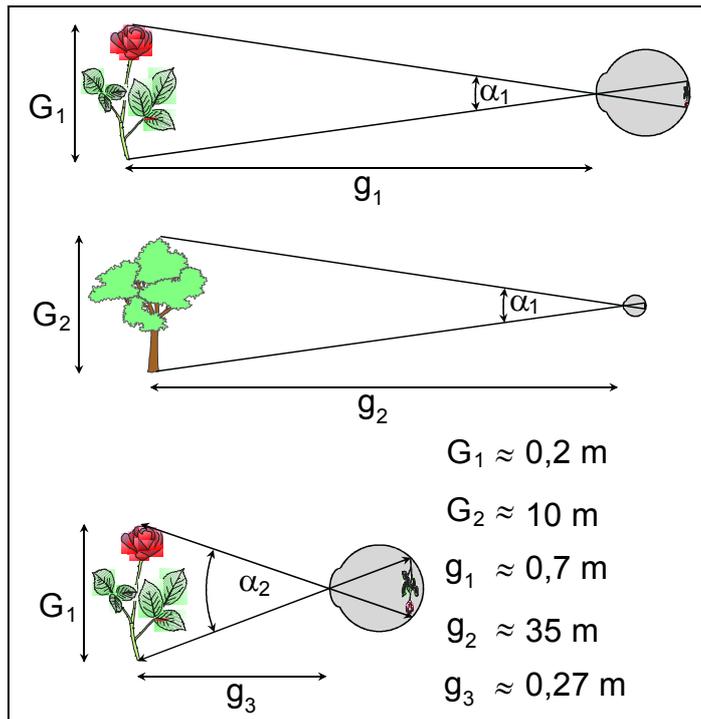


Abbildung 2: Zum Zusammenhang zwischen Sehwinkel  $\alpha$ , Entfernung  $g$  und Gegenstandsgröße  $G$

Dies ist der Grund für die Mehrdeutigkeit des Größen- und Entfernungseindrucks („Hund in der Nähe“ oder „Kuh in der Ferne“; s. o.). Nur wenn eine der beiden Größen feststeht, wird die andere richtig wahrgenommen. Die unbewusste Annahme, daß ein erfahrungsmäßig bekannter Gegenstand weiter entfernt ist, wenn er uns kleiner erscheint, nennt man *Größenerhaltung*. Dieser psychologische Mechanismus dringt nur in Sonderfällen ins Bewußtsein, z. B. wenn Größe und Entfernung direkt verglichen werden können (Abb. 3).

Der *wahrgenommene* Größen- und Entfernungseindruck ist von vielen physikalischen und psychologischen bzw. neurophysiologischen Randbedingungen abhängig. Objektivierbar ist dabei nur der Sehwinkel bzw. die Größe des Netzhautbildes. Eben weil der Wahrnehmungseindruck nicht ausschließlich durch objektiv-physikalische Bedingungen festgelegt ist, ist der Sachverhalt pädagogisch interessant; denn er zeigt, daß Erkennen ein aktives Konstruieren bedeutet und nicht ein reproduktives Internalisieren objektiver Tatbestände.



Abbildung 3: Bewußte Wahrnehmung der Perspektive

### 3 Der Sehwinkel als „Täuschungsparameter“

Von besonderem Interesse sind Bedingungen, unter denen das Emmertsche Gesetz im Sinne eines psychologischen „Erhaltungssatzes“ versagt. Meist wirken dabei mehrere Faktoren zusammen. Hier die wichtigsten:

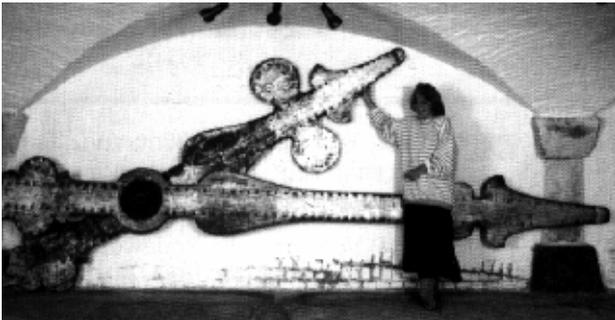
*Fehlende oder irreführende Anhaltspunkte für die Entfernungseinschätzung:* Dem Jäger, der eine Kuh erschoss, weil er sie mit einem Hund verwechselte, fehlten offensichtlich zuverlässige Anhaltspunkte für die Entfernungseinschätzung. In der fortgeschrittenen Dämmerung nahm er die Umgebung nicht mehr differenziert genug wahr, um die unbewusste Größenannahme für das Tier zu korrigieren. Ähnliches kennen Autofahrer von Nebelfahrten. Das gedämpfte Licht der Scheinwerfer entgegenkommender Autos suggeriert eine zu große Entfernung. Die Fahrzeuge scheinen sich unheimlich schnell zu nähern, ihre Größe scheint explosionsartig anzuwachsen. Daß bei Entfernungstäuschungen die Erfahrung eine wichtige Rolle spielt, ist leicht einzusehen. Wer in einer Mittelgebirgslandschaft aufgewachsen ist, wird bei Wanderungen im Hochgebirge Höhen und Entfernungen der Berge leicht unterschätzen, weil den entsprechenden Sehwindeln die bisherigen Erfahrungen zugeordnet werden. Wüstenlandschaften oder das offene Meer sind den meisten Mitteleuropäern nicht sehr vertraut. Entfernungs- und Größenschätzungen sind in solchen Landschaften sehr spekulativ.

*Fehlende Erfahrung bezüglich der Gegenstandsgröße:* Wer erstmals ein Großraumflugzeug, einen Braunkohlebagger oder einen Heißluftballon aus unmittelbarer Nähe sieht, ist von den Dimensionen meist sehr beeindruckt. Offenbar unterschätzen wir bei so außergewöhnlichen

Dingen Größe und Entfernung, weil wir ihnen unpassende Erfahrungswerte zuordnen.

*Unterschätzungstendenz bei großen Entfernungen:* Wir haben nicht nur im übertragenen, sondern auch im wörtlichen Sinn einen „begrenzten Horizont“. Er wird in einer Entfernung wahrgenommen, die – in freier Landschaft – meist wesentlich kleiner ist, als die tatsächliche Sichtweite. Spätestens oberhalb von ca. 1 km schätzen wir Entfernungen zu kurz, um so mehr, je weiter ein Gegenstand tatsächlich entfernt ist. Schließlich können wir ab einer bestimmten Distanz keine Entfernungsunterschiede mehr feststellen. Wahrnehmungsmäßig hat die Welt dort ihre Grenze. Ein Schiff am Horizont scheint zunächst nur anzuwachsen, ohne daß sich der Entfernungseindruck ändert, ebenso eine Lokomotive, die sich auf einem kilometerlangen geraden Schienenstück nähert. Die Unterschätzungstendenz bei großen Entfernungen läßt uns die Gegenstände verkleinert erscheinen.

*Unterschätzungstendenz bei vertikalen Blickrichtungen:* Beim Blick von einem hohen Turm in die Straßen einer Stadt, sehen die Menschen, Autos usw. stark verkleinert aus. Auch wenn man von unten nach oben schaut, fällt die scheinbare Verkleinerung besonders auf. Kinder bringen diese Erfahrung oft unbefangen zum Ausdruck.



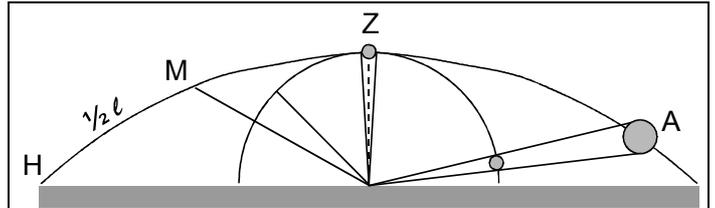
**Abbildung 4: Stundenzeiger einer Kirchturmuhr in Originalgröße**

Abb. 4 zeigt als Beispiel den Sperrholznachbau des Stundenzeigers der Michaeliskirche in Hamburg in Originalgröße. Auf fehlende Anhaltspunkte bezüglich der Entfernung und auf fehlende Erfahrung kann die überproportionale scheinbare Verkleinerung beim Blick nach oben oder unten nicht allein zurückgeführt werden, denn dann könnte auch eine Täuschung in umgekehrter Richtung möglich sein. Wahrnehmungspsychologische Experimente zeigen, daß das starke Unterschätzen von Entfernungen in Richtungen, die von der Horizontalen abweichen, zu unserer biologischen Grundausstattung gehört [2], [3]. Da der Sehwinkel aber unabhängig von der Blickrichtung der tatsächlichen Entfernung entspricht, erscheinen uns Gegenstände in vertikaler Richtung kleiner als in horizontaler. Die bekannteste Täuschung dieser Art ist die vergrößert erscheinende Abendsonne, oder der scheinbar größere Durchmesser des aufgehenden Vollmondes im Vergleich mit den scheinbaren Durchmessern in der oberen Kulmination.

Daß es sich dabei um eine psychologische Täuschung handelt, läßt sich experimentell leicht zeigen: Man bildet sowohl die mittäglich „kleine“ als auch die abendlich „große“ Sonne mit einer langbrennweitigen Linse (z. B.

$f = 2 \text{ m}$ ) ab oder fotografiert beide Situationen. Die Bilder zeigen einen exakt gleichen Durchmesser der Sonne. Auch ein direkter Sehwinkelvergleich liefert dieses Ergebnis: Man mißt den scheinbaren Durchmesser mit der Schieblehre bei ausgestrecktem Arm. (Das Ergebnis fällt kleiner aus, als man unbefangenerweise erwartet, nämlich ca. 5 mm. Da der Abstand Auge – Schieblehre etwa 0,6 m beträgt, entspricht  $2\pi r/360 \approx 1^\circ \approx 1 \text{ cm}$ .)

Die Ursache der Täuschung ist im scheinbar flachen Verlauf des „Himmelsgewölbes“ zu sehen. Wir nehmen die Distanz zum Zenit als deutlich kleiner wahr als die zum Horizont. Dies läßt sich mit verschiedenen Experimenten zeigen [2], [3]. Eines davon soll anhand von Abb. 5 erläutert werden:



**Abbildung 5: Die Abplattung des „Himmelsgewölbes“ verursacht den Eindruck einer vergrößerten Abendsonne**

Fordert man unbefangene Beobachter auf, die Richtung anzugeben, in der der Bogen (nicht der Winkel!) zwischen Zenit Z und Horizont H etwa halbiert ist, dann liegt der angegebene Punkt M zwischen  $15^\circ$  und  $30^\circ$  über dem Horizont. Würde man das Himmelsgewölbe als halbkreisförmige Kuppel wahrnehmen, müßte der Winkel  $45^\circ$  betragen. Tatsächlich ändert sich der Sonnenabstand während ihres Tageslaufs nicht. Der Beobachter sieht sie also immer unter dem gleichen Sehwinkel (ca.  $0,5^\circ$ ). Eben deshalb muß der abendlichen Sonne im Punkt A ein größerer Durchmesser zugeschrieben werden als im Punkt Z. Denn ein weiter entfernter Gegenstand erscheint nur dann unter dem gleichen Sehwinkel, wenn er größer ist.

Das Thema „Sehwinkel“ berührt viele Bereiche, die nicht in erster Linie Inhalt des Physikunterrichts sein können. Dies gilt beispielsweise für das jahrhundertelange Ringen um perspektivisch korrekte Darstellungen in der Kunst, für die mathematische Behandlung der Perspektive, für architektonische Tricks, mit denen vor allem in der Hochrenaissance versucht wurde, Größen- und Tiefeneindrücke bei Bauwerken zu verstärken u.v.a. In der Filmindustrie ist eine ganze Sparte damit beschäftigt, Kulissen in unterschiedlichsten Maßstäben anzufertigen, um z. B. eine Bergszene im Studio filmen zu können, oder Kosten zu sparen, indem man das verkleinerte Modell eines Gebäudes abbrennen läßt statt einer „Millionenvilla“. Die 3-D-Darstellung in zweidimensionalen Medien bietet viele Möglichkeiten, den Sehwinkel als Täuschungsparameter einzusetzen (Abb. 6).

Damit soll auch angedeutet sein, wie sehr die Thematik dem Anliegen fächerübergreifenden Unterrichtens entgegenkommt. Dem kann im Rahmen des Artikels nicht weiter nachgegangen werden. Hinsichtlich der Sachinformationen liefert [4, Kap. 8] einen guten Überblick. Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich auf Hin-

weise, wie der Sehwinkel als „didaktischer Leitfaden“, den Optikunterricht zu strukturieren vermag.



Abbildung 6: Zur Vortäuschung falscher Größenverhältnisse in zweidimensionalen Medien

#### 4 Der Sehwinkel als „didaktischer Leitfaden“

Zusammen mit den physikalischen Randbedingungen seines Geltungsbereichs bietet das Emmertsche Gesetz eine Orientierungshilfe, um wichtige Wahrnehmungsphänomene so in den Optikunterricht zu integrieren, daß der Unterricht in systematischer Weise und durch motivierende Inhalte auf erkenntnistheoretische Ziele ausgedehnt wird. Das traditionelle Anliegen, nämlich die Bedingungen und Gesetze der optischen Abbildung zu klären, soll dabei nicht ersetzt, sondern lediglich ergänzt werden. In Abb. 7 sind die beiden didaktischen Stränge und wesentliche Zusammenhänge zwischen den Inhalten in einer Übersicht dargestellt. Die Pfeile verweisen auf mögliche Abfolgen der Unterrichtseinheiten, die sich als praktikabel erwiesen haben. Die oben kritisierte Verengung der Zielperspektive tritt auf, wenn der Unterricht nur dem Leitfaden „optische Abbildung“ folgt, und dabei lediglich auf den „Import“ des Brechungs- und evtl. des Reflexionsgesetzes angewiesen ist.

Im traditionellen Unterricht wird der Sehwinkel – wenn überhaupt – oft nur im Zusammenhang mit Mikroskop und Fernrohr angesprochen. In diesem Fall wird seine grundsätzliche Bedeutung für den Wahrnehmungsvorgang nicht deutlich, denn er erscheint dann als Größe, die vor allem benötigt wird, um die Wirkungsweise der komplexen optischen Apparate zu erklären. Demgegenüber soll der didaktische Leitfaden „Sehwinkel“, die grundsätzliche Bedeutung der Größen- und Entfernungseindrücke für den Wahrnehmungsvorgang hervorheben. Denn ob wir in den Spiegel schauen, Fische im Aquarium beobachten oder eine Lupe benutzen: die Tiefen- und Größeneindrücke sind ganz wesentlich (wenn auch nicht ausschließlich) eine Folge des Sehwinkels. Zu dem in Abb. 7 skizzierten didaktischen Leitfaden „Sehwinkel“ werden im abschließenden Abschnitt noch einige Anmerkungen gemacht.

Auf eine Diskussion des Leitfadens „optische Abbildung“ muß hier verzichtet werden. Einige grundsätzliche Überlegungen enthält der Beitrag „Vorschläge zur Komplexitätsreduktion bei der Abbildung mit Sammellinsen“ (in diesem Heft). Ausführlichere Informationen gehen aus einigen Schulbüchern und den dazugehörigen Lehrerbüchern hervor, für die der Autor im Optikeil verantwortlich zeichnet. Eine recht weitgehende Umsetzung der beiden „didaktischen Leitfäden“ war beispielsweise in den Gymnasialwerken [5] und [6] möglich. Auch ist der Beitrag „Zur Didaktik virtueller Bilder“ (in diesem Heft) in diesen Zusammenhang einzuordnen.

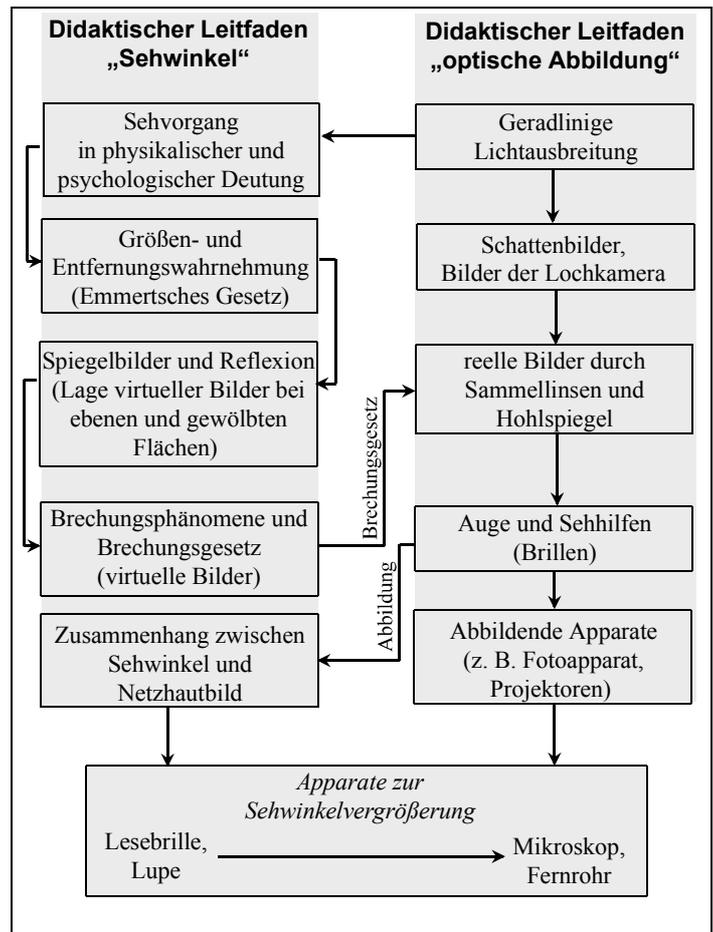


Abbildung 7: Anordnung wichtiger Unterrichtseinheiten in zwei didaktischen Leitfäden mit schematischer Darstellung des Beziehungsgefüges

#### 5 Hinweise zu einigen Unterrichtsinhalten

*Der Sehvorgang:* Forschungsbefunde zeigen, daß Schülerinnen und Schüler die scheinbar einfachen Vorstellungen zur Lichtausbreitung und die physikalische Deutung des Sehvorganges als „empfangen von Licht“ oft nicht dauerhaft lernen (z. B. [7], [8], [9]). Die Lernschwierigkeiten zum Sehvorgang sind aber m. E. nur zu einem geringen Teil auf eine defizitäre Präsentation der physikalischen Theorie im Unterricht zurückzuführen. Vielmehr entsteht das Problem, wenn vermittelt wird, ausschließlich die physikalische Deutung des Sehvorganges sei wirklichkeitsangemessen. Unsere alltägliche Erfahrung liefert nämlich in durchaus zutreffender Weise den Eindruck, daß wir Gegenstände nur wahrnehmen, wenn wir auf-

merksam sind, wenn wir also eine aktive Anstrengung unternehmen, um die uns umgebende Sinneswelt optisch zu differenzieren. Oft bringt uns z. B. erst der durch ein Bild vermittelte besondere Blick eines Fotografen zu Bewußtsein, was wir an einem Gebäude, in einer Landschaft oder im Gesichtsausdruck eines Menschen bislang „übersehen“ hatten. Das „Empfangen von Licht“ kann dies keineswegs verhindern.

Dieser Sachverhalt, also die psychischen Bedingungen der optischen Wahrnehmung, hat auch unsere Sprache geprägt. Wir „werfen einen Blick“ auf einen Gegenstand, „schauen zum Fenster hinaus“, wundern uns über den „stechenden Blick“ eines zornigen Menschen, oder wir „sehen ganz genau hin“, um den Frosch zwischen den Seerosenblättern zu entdecken. Nichts in unserer Sprache deutet auf ein „Empfangen von Licht“ als Bedingung für das Sehen hin.

Die in der Sprache enthaltenen Vorstellungen vom Sehvorgang stoßen bei Schülerinnen und Schülern auf viel Verständnis und Zustimmung. Die subjektiven Erfahrungen beim Sehen sind in dieser psychologischen Deutung des Sehvorganges leichter wiederzufinden als in der physikalischen. Im Sinne eines auf Wissenschaftsverständlichkeit abzielenden Unterrichts erscheint es nicht sinnvoll, die Idee einer vom Auge ausgehenden Aktivität als „Fehlvorstellung“ einzuordnen, handelt es sich doch um eine Interpretation, die dem Wahrnehmungsvorgang prinzipiell gerecht wird. Zwar senden die Augen keine „Sehstrahlen“ aus, aber daß wir uns beim Sehen aktiv verhalten, daß wir psychisch alles andere als passive Empfänger sind, ist nicht weniger Wirklichkeit, als daß unser Auge in der physikalischen Betrachtung als Lichtempfänger fungiert.

Gemäß dieser Auffassung ist es wichtig, den Schülerinnen und Schülern bewußt zu machen, daß die physikalische Deutung des Sehvorganges sich grundlegend von der psychologischen unterscheidet, daß aber beide Erklärungsweisen (je nach Erkenntnisabsicht) der Wirklichkeit angemessen sind. Erst diese Einsicht liefert die Kriterien dafür, zu entscheiden, in welchen Zusammenhängen die jeweilige Erklärungsweise angebracht ist. „Alltagsvorstellungen“ durch physikalische substituieren zu wollen, ist nicht nur wenig aussichtsreich, sondern in vielen Fällen auch wenig sinnvoll.

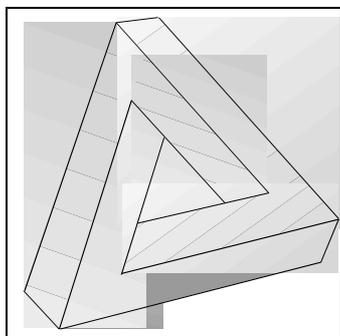


Abbildung 8: „Unmögliche“ Dreibalkenkonstruktion

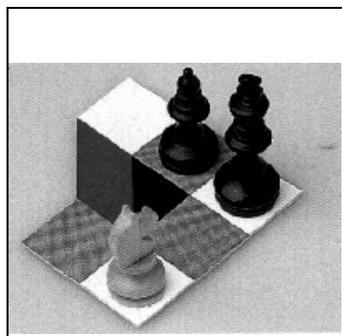


Abbildung 9: Foto einer „unmöglichen“ Realsituation

Um die Grenzen der physikalischen Deutung des Sehvorganges bewußt zu machen, ist die Behandlung optischer Täuschungen und anderer Wahrnehmungsleistungen unumgänglich. Die sogenannten unmöglichen Figuren sind

ein Beispiel für Inhalte, die den Physikunterricht nicht nur beleben, sondern die auch eine Verständnisvoraussetzung für das Spezifische der physikalisch-reduktionistischen Interpretation des Sehvorganges bilden (Abb. 8 und 9).

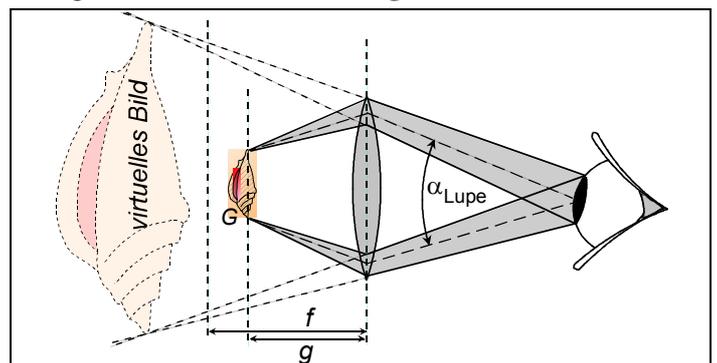
Das *Emmertsche Gesetz* mit den weiter oben (Abschnitte 2 und 3) behandelten Zusammenhängen baut dann nahtlos auf der erweiterten Betrachtung des Sehvorganges auf. Der Sehwinkel wird dabei als physikalische Größe eingeführt, mit deren Hilfe die psychologischen Mechanismen der Größen- und Entfernungswahrnehmung erfaßt und genauer beschrieben werden können, ohne daß zusätzliche optische Apparate das zu behandelnde Gegenstandsfeld verkomplizieren.

*Virtuelle Bilder:* Die Behandlung der virtuellen Bilder ist mit vielen didaktischen Problemen behaftet. Ihr ist deshalb ein eigener Beitrag in diesem Heft gewidmet („*Zur Didaktik virtueller Bilder*“). Im hier gegebenen Zusammenhang mögen einige Hinweise genügen:

Sofern Spiegelbilder, Brechungsphänome oder das Lupebild überhaupt Gegenstand des lehrplanmäßig vorgesehenen Unterrichts sind (s. o., Abschnitt 1), stehen meist geometrische Konstruktionen zum virtuellen Lichtweg im Vordergrund. Dabei wird dann mehr oder weniger explizit vermittelt, wir sähen Bilder dort, wo sich die rückwärtig verlängerten Randstrahlen der Lichtbündel schneiden, die unseren Gesichtssinn erreichen. In (nicht repräsentativen) Befragungen bei Studienanfängern habe ich sogar bei einer Mehrheit Zustimmung für die Aussage erhalten „*Spiegelbilder sieht man, weil sich die rückwärtig verlängerten Lichtstrahlen hinter der Spiegelebene in Bildpunkten schneiden.*“ Eine solche Kausalität ist selbstverständlich nicht gegeben; denn die „rückwärtig verlängerten Strahlen“ haben keine Entsprechung in der Realität in dem Sinne, daß inter dem Spiegel Licht nachzuweisen wäre, das den Bildeindruck hervorruft.

Der mathematisch konstruierbare virtuelle Bildort entspricht zudem nur in Ausnahmefällen der *wahrgenommenen* Bildlage. Im Falle des erhabenen Spiegels nimmt man Gegenstände meist in einer größeren Entfernung wahr, als es den tatsächlichen Verhältnissen entspricht (z. B. Rückspiegel, Verkehrsspiegel). Die Bildkonstruktion liefert aber ein gegenteiliges Ergebnis (vergl. dazu den Beitrag „*Zur Didaktik virtueller Bilder*“).

Der Widerspruch zwischen dem geometrisch konstruierten und dem wahrgenommenen Bild wird anhand von Abb. 10 deutlich. Die Konstruktion liefert für  $g < f$  eine Bildweite  $b$ , die größer ist als die Gegenstandsweite, für  $g = f$  wird  $b$  sogar „unendlich“ groß. Der Wahrnehmungseindruck liefert aber  $b \leq g$ .



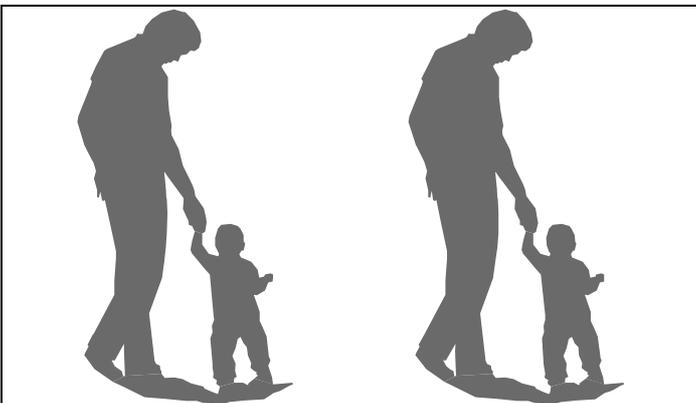
**Abbildung 10: Zur Konstruktion und Schinkelveränderung beim Lupenbild für  $g < f$**

Die Lösung dieser scheinbaren Widersprüche liefert das Emmertsche Gesetz. Das mathematisch konstruierbare Bild ergibt den Sehwinkel, unter dem wir das virtuelle Bild wahrnehmen. Diesem Sehwinkel wird unbewußt der entsprechende Entfernungseindruck zugeordnet.

Das unbewußte psychologische Gesetz der Größenerhaltung erzeugt allerdings nur solange einen entsprechenden Entfernungseindruck, als dieser nicht durch andere Parameter beeinflusst wird. Betrachtet man beispielsweise in einem erhabenen Spiegel Gegenstände so, daß der gesamte Lichtweg kleiner als 2 m ist, so stellt sich sehr oft eine Unsicherheit hinsichtlich des Entfernungseindrucks ein. Das Gehirn erhält in diesem Fall widersprüchliche Informationen zur Entfernung. Der Sehwinkel deutet auf einen vergrößerten Abstand hin, der Konvergenzwinkel zwischen den beiden Augachsen aber auf einen verkleinerten. (Ist die Richtung der beiden Augachsen um mehr als zwei Grad verschieden, so wird der Unterschied in der Bildlage der beiden Netzhautbilder als Tiefeninformation interpretiert.)

Die Differenz zwischen den Tiefeninformationen aus Seh- und Konvergenzwinkel kann auch zu einem veränderten Größeneindruck führen. Dazu kann mit Hilfe der beiden Bilder in Abb. 11 ein kleines Experiment durchgeführt werden. Es erfordert allerdings etwas Übung beim binokularen Sehen: Betrachtet man die beiden Piktogramme mit „überkreuzten Augen“, dann verschmelzen sie zu einem Bild, das in der Mitte zwischen Papier- und Bildebene zu schweben scheint. (Damit das linke Auge das rechte Bild und das rechte Auge das linke abbildet, tippe man mit einer Bleistiftspitze zwischen die beiden Bilder. Dann nähert man die Spitze den Augen, wobei man sie unablässig fixieren muß, bis sich die beiden Bilder decken. Die räumliche Lage des Bildes stabilisiert sich meist nach etwas Übung, wenn man die Bleistiftspitze wieder aus dem Gesichtsfeld entfernt.)

Das zum räumlichen Eindruck „verschmolzene“ Bild, erscheint nur halb so groß wie die gedruckten Einzelbilder. Der Sehwinkel bzw. die Größe des Netzhautbildes bleibt natürlich unverändert, entsprechend der Entfernung Auge – Papierebene. Aber der Konvergenzwinkel zeigt eine nur halb so große Entfernung an. Das Gehirn muß daher eine Gegenstandsgröße zuordnen, die bei halber Entfernung ein gleich großes Netzhautbild liefert.

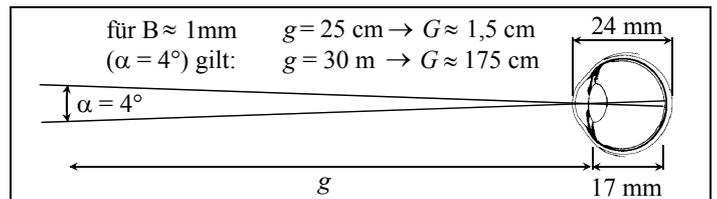


**Abbildung 11: Bei „gekreuztem Blick“ verschmelzen die beiden Bilder zu einem verkleinerten Bild, das in der halben Entfernung zur Papierebene erscheint**

Bei den virtuellen Bildern, die durch Brechung an ebenen Flächen hervorgerufen werden, kann es ebenfalls zu unterschiedlichen Tiefeninformationen aus Seh- und Konvergenzwinkel kommen. Dies wird hier nicht weiter erörtert (vergl. den Beitrag „Zur Didaktik virtueller Bilder“).

*Netzhautbild und Sehwinkel:* Die bisher im Zusammenhang mit dem Emmertschen Gesetz besprochenen Phänomene erfordern nicht unbedingt das Verständnis der optischen Abbildung. Für einen sinnvollen Unterrichtsaufbau ist naheliegend, nach der Behandlung der Reflexions- und Brechungsphänomene zum didaktischen Leitfaden „optische Abbildung“ überzugehen (s. Abb. 7). Von den abbildenden „Apparaten“ kommt dem Auge der größte Stellenwert zu, wenn die Klärung von Wahrnehmungsphänomenen das hier vorgeschlagene Gewicht erhalten soll.

Das Interesse an der Wirkungsweise des Auges ist nach empirischen Befunden vor allem bei Mädchen größer als an technischen Geräten (s. z. B. [1, S. 49-55]). Entsprechende Einsichten betreffen wieder nicht nur die Außenwelt, sondern auch den Menschen selbst. Im hier gegebenen Zusammenhang ist die Abbildung im Auge vor allem deshalb von Belang, weil sie den Zusammenhang zwischen Netzhautbild und Sehwinkel erschließt. Mit guter Näherung sind Sehwinkel und Netzhautbild proportional. Dafür ist vor allem die konstante Bildweite verantwortlich.

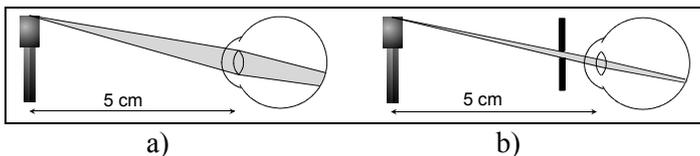


**Abbildung 12: Zusammenhang zwischen der Größe des Netzhautbildes  $B$ , dem Sehwinkel  $\alpha$  und der Gegenstandsweite  $g$  bzw. Gegenstandsgröße  $G$**

Der Augapfel hat normalerweise einen Durchmesser von 24 mm und eine Systembildweite von ca. 17 mm (Abb. 12). Diese entspricht für das auf unendlich akkommodierte Auge der Brennweite  $f$ . Für die Standardsehweite von  $s = 25$  cm verkleinert sich  $f$  auf 15,9 mm (ca. 63 Dioptrien). Das Winkelauflösungsvermögen im Netzhautzentrum (Fovea) liegt bei ca. 0,5 Bogenminuten. Dies entspricht dem Durchmesser der Sehzellen (Zapfen) bzw. dem Zentrenabstand zweier Zapfen von 2,5  $\mu$ m. Unter diesem Winkel wird z. B. ein Fünfmärkstück aus 200 m Entfernung wahrgenommen.

*Apparate zur Sehwinkelvergrößerung:* Je größer das Netzhautbild eines Gegenstandes ist, desto mehr Sehzellen sind beteiligt und desto detailreicher ist die Abbildung. Wenn es darauf ankommt, einen Gegenstand möglichst differenziert wahrzunehmen, so ist deshalb ein großer Sehwinkel die wichtigste Voraussetzung. Er wird in den meisten Fällen dadurch erreicht, daß man den Abstand zum Auge (Gegenstandsweite  $g$ ) verkleinert. Eine der Grenzen, auf die man dabei stößt, ist der maximale Brechwert des Auges. Er führt zu einer kleinstmöglichen Gegenstandsweite – Nahgrenze genannt –, die bei Schulkindern etwa bei 10 cm liegt, oberhalb des 20. Lebensjahrs aber pro Dekade durchschnittlich um 10 cm zu-

nimmt. Der einfachste „Trick“ die Nahgrenze zu überwinden, ist die *Lochlupe*: Man steche mit einer Nadel ein Loch ( $\varnothing \leq 1 \text{ mm}$ ) in einen Papierschnipsel. Hält man das Loch direkt vor die Augenpupille, so kann man die vorliegende Textseite bei guter Beleuchtung bis auf wenige Zentimeter dem Auge nähern und den Text lesen. Für Brillenträger ersetzt das Loch die Brille. Von dem Text erhalten wir einen vergrößerten Bildeindruck. Wir betrachten ihn nämlich in einem Abstand der außerhalb des Erfahrungsbereiches liegt, in dem das Emmertsche Gesetz gilt, was bedeutet, daß die unbewußte Verrechnung von Größe und Entfernung nicht funktioniert.



**Abbildung 13: Zur Wirkungsweise der Lochlupe**

Ohne das Loch sehen wir den Text nur höchst verschwommen (Abb. 13 a). Die Lochblende sorgt mit der Verschmälerung der Lichtbündel für eine ausreichende Schärfentiefe zulasten der Bildhelligkeit (Abb. 13 b). Soll das Bild hell bleiben, wird das Loch durch die Lupe ersetzt, die sinnvollerweise ebenfalls unmittelbar vor das Auge gehalten wird. (Zwar bleibt bei der Lupe die Sehwinkelvergrößerung auch erhalten, wenn man den Abstand zum Auge erheblich vergrößert, jedoch wird dann das Gesichtsfeld kleiner.)

Wenn sich bei älteren Menschen die Nahgrenze wesentlich vergrößert, so brauchen sie eine Lesebrille, z. B. um Texte wieder bis auf die Standardsehweite von 25 cm an das Auge heranzuführen zu können. In diesem Fall unterstützt eine Sammellinse den Brechungsapparat des Auges, indem sie die Divergenz der einfallenden Lichtbündel mehr oder weniger stark verringert. Im Gegensatz zu den Brillen für Fehlsichtigkeiten, kommt es bei den Lesebrillen nicht auf das exakte Einhalten der Brennweite an. Deshalb kann man sie im Supermarkt kaufen.

Von der Abbildung im Auge führt der didaktische Leitfaden Sehwinkel über Lochlupe, Lupe, Lesebrille schließlich zu den komplexeren Apparaten für die Sehwinkelvergrößerung, vorrangig also Fernrohr und Mikroskop. Das Verständnis dieser Apparate setzt sowohl die Kenntnis der optischen Abbildung für das Zwischenbild als auch die Einsicht in das Prinzip der Sehwinkelvergrößerung bei der Lupe voraus. Wenn manche Lehrpläne diese Geräte unter dem Stichwort „Abbildung“ – nur durch ein Komma vom Fotoapparat getrennt – zu Behandlung vorsehen und zugleich alle in diesem Artikel aufgeführten Wahrnehmungsphänomene einschließlich der Behandlung des Auges bestenfalls im Wahlbereich vorsehen, werden pädagogische Chancen für sinnstiftendes Lernen verspielt.

## Literatur

- [1] MUCKENFUß, Heinz: Lernen im sinnstiftenden Kontext. Entwurf einer zeitgemäßen Didaktik des Physikunterrichts. 358 S., Berlin: Cornelsen 1995.
- [2] MINNAERT, Marcel: Licht und Farbe in der Natur. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser 1992.

- [3] ROCK, Irvin: Wahrnehmung. Vom visuellen Reiz zum Sehen und Erkennen. Heidelberg: Spektrum-Verlag.
- [4] FALK, Davis S.; BRILL, Dieter R.; STORK, David G.: Ein Blick ins Licht. Einblicke in die Natur des Lichts und des Sehens, in Farbe und Fotografie. Übersetzt von Anita Ehlers. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser, Springer 1990.
- [5] CORNELSEN - Physik für Gymnasien. Ausgabe D, Band 1. Berlin: Cornelsen 1994.
- [6] CORNELSEN - Physik für Gymnasien. Ausgabe BW, Band 2. Berlin: Cornelsen 1994.
- [7] JUNG, Walter: Erhebungen zu Schülervorstellungen in der Optik (Sekundarstufe I). In: physica didactica 8/1981, Heft 3 S. 137–153
- [8] JUNG, Walter: Ergebnisse einer Optik-Erhebung. In: physica didactica 9/1982 Heft 1, S. 19–34
- [9] WIESNER, Hartmut (1986): Vorstellungen im Bereich der Optik. In: Naturwissenschaften im Unterricht (Physik/Chemie) 34/1986 Nr. 13, S. 25–29

---

Anschrift des *Verfassers*: Dr. Heinz Muckenfuß, Pädagogische Hochschule Weingarten, Kirchplatz 2, 88250 Weingarten

---