

Christian Ucke

## Die Optik des Auges

Verbreitete Fehler und irreführende Darstellungsweisen

Vielfach wird heute versucht, neueste Forschungsergebnisse schon für das Niveau von Schulen plausibel und verständlich zu machen. Das ist natürlich zu begrüßen. Nicht vernachlässigt werden sollte aber darüber die Aufarbeitung und Revidierung scheinbar gesicherten Lehrstoffes. Dies soll im folgenden am Beispiel der Optik des Auges und damit zusammenhängender Fragen illustriert werden.

Bei der Behandlung der geometrischen Optik wird in vielen Schulbüchern für Realschulen, Fachoberschulen, Gymnasien (Mittelstufe, Oberstufe, Kollegstufe usw.), auch in Lehrhandbüchern das Auge als Anwendungsbeispiel herangezogen. Die Durchsicht einer Reihe von Schulbüchern möglichst neuer Auflage ergab, daß dabei oft unzeitgemäße Benennungen, irreführende Darstellungen bis hin zu falschen Analogieschlüssen auftreten. Die häufigsten dieser teils harmlosen teils aber schwerer wiegenden „Fehler“ seien im weiteren angeführt und kritisch beleuchtet, wobei einige didaktische Überlegungen eingestreut werden.

### 1. Normgerechte Bezeichnungen?

Mit Vorteil kann man in der Optik des Auges den Begriff des *Brechwertes* verwenden. Das durchweg übliche Wort Brechkraft (= Brechwert) sollte gemäß einer DIN-Empfehlung [1] nicht mehr gebraucht werden. Es handelt sich bei Brechkraft ja garnicht um eine Kraft im physikalischen Sinn. Da der Begriff und das Wort Brechwert den Schülern in den meisten Fällen unbekannt sein dürfte, kann es nur nützen, seine Einführung gemäß der DIN-Empfehlung vorzunehmen (auf die korrekte Definition komme ich später noch zurück). Das Gesetz über Einheit im Meßwesen von 1969 verwendet leider auch noch den Namen Brechkraft.

Etwas schwieriger ist es mit dem Begriff *Brechzahl* (= Brechungsindex). Entsprechende DIN-Normen [2], [3], [4] sehen meist nur das Wort Brechzahl vor, jedoch wird zum Teil in Klammern auch Brechungsindex verwendet [5]. Internationale Normen (SI-Einheiten) sehen ebenfalls beide Worte vor [6]. Mir scheint jedoch, daß Brechungsindex ein mühsameres Wort ist (z.B. was den Plural anbetrifft).

Im übrigen gilt hier, daß es sich um eine Frage der Übereinkunft und des einheitlichen Gebrauchs handelt und dadurch im allgemeinen eine leichtere Verständigung erzielt wird [7]. Dieses Ziel der Normen wird aber nicht immer erreicht. Nach meinen Erfahrungen werden die Wörter Brechzahl und Brechwert (die etwas ganz unterschiedliches bedeuten) leichter miteinander verwechselt (auf Grund der Wortähnlichkeit), als Brechungsindex und Brechkraft. Trotzdem plädiere ich für den Gebrauch der kursiv hervorgehobenen Ausdrücke. Ein Beispiel für eine Verwirrung stiftende bzw. Kopfschütteln auslösende Wortschöpfung der DIN-Normen sei an dieser Stelle angeführt: Statt *Akkommodationsbreite* (Brechwertdifferenz zwischen maximal und minimal akkommodiertem Auge in Dioptrien; Akkommodation schreibt man übrigens mit zwei m) wird in DIN 58 208 [1] dafür „maximaler Akkommodationserfolg“ vorgeschlagen.

Das verständliche Bemühen um exakte Definitionen hat für wissenschaftliche Zwecke seine volle Berechtigung. Für die Umgangssprache bzw. auch für den Physikunterricht in der Schule kann die Verwendung normgerechter Ausdrücke geradezu verständnishemmend wirken. Damit ist auch klargestellt, daß ich keineswegs in allen Fällen für den Gebrauch normgerechter Ausdrücke plädiere. Die Qual der Wahl, was gerade noch geeignet für den Unterricht erscheint, trifft zum wenigsten den Lehrer, der sicher überfordert wäre, wenn er auch noch stets neueste Normen berücksichtigen sollte, abgesehen davon, daß Normen für allgemeinbildende Schulen nicht bindend sind. Die Auswahl muß z.T. von Fachwissenschaftlern, mehr noch von Fachdidaktikern, sowie den Leitern der Studienseminare vorgenommen werden.

## 2. Schlechte Ausdrucksweise

Wenn gesagt wird, daß die Pupille die ins Auge fallende *Lichtmenge* regele, so wird der Schüler diese Ausdrucksweise schon verstehen und akzeptieren. Im fachwissenschaftlichen Sinn ist sie aber falsch. Da Lichtmenge als Produkt aus Lichtstrom mit der Zeit definiert ist [8], und der Lichtstrom die letztlich entscheidende Größe für die Pupillenweite ist, würde aus der obigen Ausdrucksweise streng genommen folgen, daß beim Ansehen einer gleich hell bleibenden Fläche die Pupillenweite sich mit der Zeit verkleinerte. Es sei hier erwähnt, daß die Pupillenweite auch durch chemische Wirkstoffe verändert werden kann, daß sogar psychologische Faktoren (Schmerz, Freude) Einfluß haben und noch weitere Wirkfaktoren existieren. Dies ist der fachwissenschaftliche Aspekt.

Didaktisch gesehen, läßt sich die obige Ausdrucksweise leicht vermeiden: Man sage einfach Licht statt Lichtmenge. Es ist jedenfalls nicht falsch, wenn die Schüler lernen, daß durch das ins Auge gelangende Licht die Pupillenweite beeinflußt wird. Es können dann auch keine falschen Vorstellungen induziert werden, die möglicherweise mit späteren exakten Definitionen interferieren.

Wenn statt von *Zapfen* (in der Netzhaut) die Rede von Zäpfchen ist, so mutet das komisch an. Die letzteren haben im allgemeinen eine andere medizinische Bedeutung. Zugegeben sei, daß die Bezeichnungen Stäbchen und Zapfen etwas inkonsequent gebraucht werden, insoweit, als sich nur in einem Fall eine Verkleinerungsform durchgesetzt hat.

## 3. Unklare Begriffe

Mit dem Begriff *Weitsichtigkeit* und seiner Erklärung sind viele Mißverständnisse verbunden. Streng genommen ist er fachwissenschaftlich, d.h. im Sinne der Augenärzte und Augenoptiker nicht definiert. Teilweise wird auch empfohlen, ihn nicht zu benutzen. Dennoch wird er auch in diesen Berufssparten häufig verwendet. Man versteht dann unter Weitsichtigkeit die sog. *Übersichtigkeit* (grch. Hyperopie) bei der entweder bei normaler Augenlänge der Brechwert zu klein oder bei normalem Brechwert die Augenlänge zu kurz ist. Falsch ist es, wenn man sagt, daß die Brennweite der Linse zu groß ist, denn es kommt auf die Brennweite des ganzen Auges an, die nur zum kleineren Teil von der Augenlinse beeinflußt wird.

Die Übersichtigkeit ist im Grunde genommen eine unphysiologische Erscheinung, da sie ja eine Abweichung vom Normalen darstellt. Allerdings definiert die Medizin unphysiologisch nicht so streng. Übersichtigkeiten von wenigen Dioptrien werden als „normal“ innerhalb der physiologischen Schwankungsbreite angesehen.

Oft verwechselt bzw. fälschlich gleichgesetzt wird Weitsichtigkeit und *Alterssichtigkeit*. Die Alterssichtigkeit (grch. Presbyopie) ist dadurch definiert, daß sich die Akkomodationsbreite des Auges durch Alterungsvorgänge in der Linse vermindert, was bedeutet, daß der Nahpunkt vom Auge wegrückt, während der Fernpunkt unverändert bleibt. Ein Alterssichtiger kann daher in der Ferne scharf sehen, wenn nicht gerade eine Fehlsichtigkeit vorliegt; für die Nähe braucht er eine Brille. Alterssichtigkeit ist in jedem Falle eine normale physiologische Erscheinung. Sowohl Übersichtige wie Kurzsichtige können demnach alterssichtig werden.

Der Nahpunkt eines Übersichtigen ist wie beim Alterssichtigen vom Auge weggerückt, der Fernpunkt liegt allerdings hinter der Netzhaut (für Schüler wohl zunächst ziemlich uneinsichtig). Es kann sogar sein, daß auch der Nahpunkt hinter der Netzhaut liegt, wenn nämlich eine sehr starke Übersichtigkeit vorliegt. In diesem Fall kann auch bei stärkster Akkommodation kein scharfes Bild auf der Netzhaut erzeugt werden. Die Akkomodationsbreite ist beim Übersichtigen normal (im Gegensatz zum Alterssichtigen).

Ein Übersichtiger sollte im allgemeinen *ständig* seine Brille tragen, auch wenn es ihm gelingt, nur durch Akkommodation (aber ohne Brille) in der Ferne scharf zu sehen.

In der Umgangssprache wird fast ausschließlich der Begriff weitsichtig gebraucht. Die Schüler kommen (im Gegensatz zu dem Begriff des Brechwertes bzw. Brechkraft) mit festen und teilweise falschen Vorstellungen darüber in den Unterricht. Es ist zwar schwierig, vertraute oder eingebürgerte Vorstellungen zu berichtigen bzw. zu verdrängen, jedoch ist das wohl zum Teil Aufgabe des Physikunterrichts, zumindest wo es um die fachlichen Aspekte geht. Auch glaube ich, daß die Begriffe alterssichtig und übersichtig (weitsichtig) leichter zu erklären und auseinanderzuhalten sind als beispielsweise der Unterschied zwischen träger und schwerer Masse.

#### 4. Unzulängliche Definitionen und falsche Schlüsse

Schon mehrfach wurde der Begriff Brechwert benutzt. Im allgemeinen wird er in Schulbüchern zu eng definiert, woraus eine Reihe von Schwierigkeiten resultieren. Es sei zunächst die *exakte Definition* aus DIN 58 208 gegeben:

*Brechwert* (Zeichen  $D$ , Einheit dpt) ist der Kehrwert der in m angegebenen reduzierten bildseitigen bzw. dingseitigen Brennweite:

$$D = \frac{n'}{f'} = -\frac{n}{f}$$

(Eine Länge reduzieren heißt, sie durch die zugehörige Brechzahl teilen).

(Zur Nomenklatur ist zu bemerken, daß ein Strich bei optischen Größen (Brechzahl  $n'$ , Brennpunkt  $F'$ ) bedeutet, daß sich die Größen auf den Bildraum beziehen. Querbalken (Brennweite  $\bar{f}$ , Brennpunkt  $\bar{F}$ ) beziehen sich entsprechend auf den Objektraum. Von Vorzeichen (es heißt nicht umsonst  $D = -n/\bar{f}$ ) sei hier aber im weiteren abgesehen; es würde m. E. im Schulunterricht zu weit führen, sie zu beachten. Sie sind enthalten in DIN 1335).

An dieser Definition sind zwei Dinge wichtig: Einmal geht die Brechzahl wesentlich ein, zum zweiten wird zwischen bild- und dingseitiger Brennweite unterschieden. Gerade beim Auge, das kein optisches System in Luft, sondern sozusagen ein Immersionssystem darstellt, kommen auch wirklich verschiedene Brechzahlen in Bild- und Dingraum vor. Im Gegensatz zu Linsen in Luft, deren Brechwert man mit der Formel  $D = 1/f$  richtig ermittelt, würde die gleiche Formel beim Auge zu falschen Resultaten führen. Bevor dies näher erläutert wird, sei darauf hingewiesen, daß aus dem gleichen Grund (weil ein Immersionssystem vorliegt) sich bild- und dingseitige Brennweite beim Auge unterscheiden (im Gegensatz zu Linsen in Luft).

Geht man davon aus, daß der Brechwert des Auges ungefähr 60 dpt beträgt (es besteht übrigens kein Unterschied zwischen bild- und dingseitigem Brechwert), so ergibt sich mit  $n' = 1,336$  (Brechzahl des Glaskörpers) und  $n = 1$  (Brechzahl Luft)

$$f' \cong 22 \text{ mm}$$

$$\bar{f} \cong 17 \text{ mm}$$

(hier und im folgenden handelt es sich bei Zahlenwerten stets nur um grobe Angaben)

Hierbei handelt es sich um die Brennweiten des gesamten Auges (und nicht etwa nur der Augenlinse).

Der Brechwert des gesamten Auges setzt sich zusammen aus dem Brechwert der Augenlinse ( $\sim 15$  dpt) und der Hornhaut ( $\sim 45$  dpt)<sup>1</sup>. Wie man aus diesen Zahlen erkennt, die man relativ leicht aus den optischen Daten (Krümmungsradien, Brechzahl usw.) errechnen kann, trägt die Hornhaut den weitaus größeren Anteil bei. Daraus resultiert auch, daß *hauptsächlich die brechende Wirkung der Hornhaut für die Abbildung im Auge verantwortlich ist* (und nicht die der Linse).

Ein Auge ohne Linse (und das kommt vor, da die Linse häufig aus optischen oder medizinischen Gründen entfernt wird; Routineoperation) erzeugt noch eine recht brauchbare Abbildung, ja es kann sogar sein, daß bei einer starken Kurzsichtigkeit die Entfernung der Linse zu einer scharfen Abbildung für Gegenstände in der Ferne führt.

Bei der zeichnerischen Darstellung des Verlaufs eines auf das Auge treffenden Parallelstrahlbündels sollte man die brechende Wirkung der Hornhaut auch entsprechend berücksichtigen (Abb. 1).

Häufig wird in der Schule die brechende Wirkung des Auges verglichen (und apparativ aufgebaut) mit einer Linse in Luft, hinter der eine Mattscheibe (= Netzhaut) steht. Man kann dies tun, obwohl es ein schlechter Vergleich ist, wie sich aus dem Vorhergehenden ergibt. Man muß sich aber besonders vor einer unkritischen Übertragung der für Luft geltenden Formeln der geometrischen Optik auf die Verhältnisse beim Auge hüten: Will man die Verhältnisse richtig beschreiben, so muß man, da das Auge einen Brechwert von 60 dpt aufweist, für die entsprechende Linse in Luft eine Brennweite von  $f = 1/D \cong 17$  mm vorsehen. Es wäre falsch, eine Brennweite von  $f = 22$  mm zu wählen, da diese Brennweite für das Auge als Immersionssystem gilt.

1 Der genaue Brechwert des Gesamtauges von 59 dpt (unakkommodiertes Normalauge) setzt sich zusammen aus dem Brechwert der Hornhaut (43 dpt), dem der Linse (13 dpt) und einem Anteil, der durch den nicht vernachlässigbaren Abstand zwischen Hornhaut und Linse zustande kommt (3 dpt). In der Schule wird man aber nur in seltenen Fällen diesen letzten Anteil mitbehandeln.

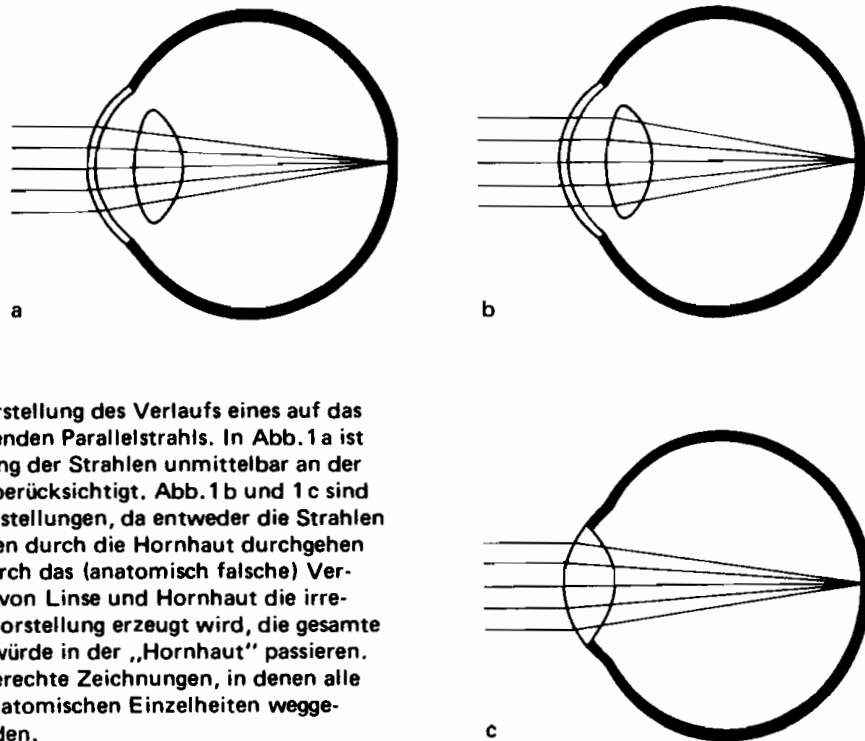


Abb. 1 Darstellung des Verlaufs eines auf das Auge treffenden Parallelstrahls. In Abb. 1 a ist die Brechung der Strahlen unmittelbar an der Hornhaut berücksichtigt. Abb. 1 b und 1 c sind falsche Darstellungen, da entweder die Strahlen ungebrochen durch die Hornhaut durchgehen bzw. da durch das (anatomisch falsche) Verschmelzen von Linse und Hornhaut die irreführende Vorstellung erzeugt wird, die gesamte Brechung würde in der „Hornhaut“ passieren. Maßstabgerechte Zeichnungen, in denen alle feineren anatomischen Einzelheiten weglassen wurden.

Hat man eine Linse der Brennweite  $f = 17 \text{ mm}$  als Ersatz für das (ganze) Auge gewählt, dann darf man mit Recht die für Luft geltenden Abbildungsgleichungen für weitere Rechnungen heranziehen, insbesondere

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f} \quad \text{und} \quad \frac{y}{y'} = \frac{a}{a'}$$

( $a$  = Gegenstandsweite,  $a'$  = Bildweite,  $y$  = Gegenstandsgröße,  $y'$  = Bildgröße;  $a$  und  $a'$  sind von der Linsenmitte aus zu rechnen; genauer muß man von den Hauptebenen ausgehen). Die Anwendung dieser Gleichungen ist unzulässig, wenn  $f = 22 \text{ mm}$  gewählt wurde, da sich dann falsche Proportionen ergeben.

Die allgemeineren und m. E. auch kaum schwierigeren Gleichungen, die für das Auge als Immersionssystem gelten, lauten

$$\frac{\dot{f}}{a} + \frac{f'}{a'} = 1 \quad \text{und} \quad \frac{y}{y'} = n' \frac{a}{a'}$$

( $a$  und  $a'$  sind von den Hauptebenen des gesamten Auges aus zu rechnen;  $n'$  = Brechzahl des Glaskörpers).

Will man tiefer in die Optik des Auges als Immersionssystem eindringen, so kommt man zwangsläufig zu Begriffen wie Hauptebene, Knotenpunkt usw. Für die Schule wird das jedoch oft zu weit gehen.

Man muß sich an dieser Stelle aber fragen, warum eine Einführung in die geometrische Optik gleich mit Linsen beginnt (zwei brechende Flächen) und nicht mit dem einfachsten Fall, nämlich der Behandlung der Abbildungsverhältnisse an einer brechenden Fläche (z.B. Über-

gang Luft – Wasser, Luft – Glas). Dieser Weg würde zwanglos zu den allgemeineren Formeln – wie oben angegeben – führen und hätte den Vorzug, daß Ersatzkonstruktionen wie für das Auge, die allzu leicht zu falschen Vorstellungen führen können, wegfielen<sup>1</sup>.

Zieht man im Unterricht ferner heran, daß Fehlsichtigkeiten mit Brillengläsern korrigiert werden, so muß auch hier zur Vorsicht gemahnt werden. Den Brechwert von Brillengläsern kann man mit der angeführten Definition zwar errechnen und in Dioptrien angeben; er ist aber nicht identisch mit der Dioptrienangabe, die der Augenarzt bzw. Optiker als Maß für die Stärke der Gläser benutzt. Die letzteren verwenden nämlich den sog. Scheitelbrechwert, der sich definitionsgemäß vom Brechwert unterscheidet [1]. Der Unterschied ist zwar für Gläser bis zu einem Brechwert von 5 dpt vernachlässigbar, darüber kann er aber beträchtliche Werte annehmen. Insbesondere, wenn man „praxisnahe“ Übungsaufgaben rechnen läßt, sollte man zumindest als Lehrer um diesen Unterschied wissen.

Um die Vergrößerung von optischen Instrumenten (Lupe, Mikroskop usw.) zu bestimmen, benötigt man die sog. *Bezugssehweite* (= konventionelle, bequeme oder deutliche Sehweite), die auf 25 cm festgelegt ist. Es ist irreführend, wenn behauptet wird, daß in dieser Entfernung von 25 cm am deutlichsten gesehen wird bzw. daß man bequem sähe. Was heißt eigentlich deutlich? Die normale Arbeitssehentfernung beträgt vielmehr ungefähr 40 cm und variiert je nach Beruf und anderen Parametern [9]. Um falsche Assoziationen zu vermeiden, sollte deshalb der Name *Bezugssehweite* benutzt und propagiert werden, da es sich in erster Linie um eine – wenn auch nicht ganz willkürlich festgesetzte – Rechengröße handelt (z.B.  $1/0,25 \text{ m} = 4 \text{ dpt}$ ).

## 5. Schluß

Es ist nicht möglich, alle von mir gefundenen „Fehler“ hier zu behandeln, da sich sonst der Artikel in Einzelheiten verlieren würde. Die vorstehenden Ausführungen richten sich an Lehrer, die diesen Stoff im Unterricht bringen und die weitgehend auf das in den Schulbüchern Stehende angewiesen sind. Sie richten sich aber auch an die Autoren von Schulbüchern, die die Verantwortung für die inhaltliche Richtigkeit des Stoffes in ihrem Buch tragen. Verbunden sei damit der Appell, Normen (die leider nur in größeren Bibliotheken einsehbar sind; zum Bezug zu teuer) zu beachten. Nicht aus einer Normierungswut heraus, sondern aus der eigenen Erfahrung habe ich festgestellt, daß Normen außer Definitionen und Vereinheitlichung von Begriffen eine Reihe nützlicher Hinweise geben. Intime Kenner von DIN-Normen mögen mir kleine Nachlässigkeiten, derer ich mir aber bewußt bin, verzeihen. Ich halte sie im Rahmen dieses Aufsatzes für zulässig.

Auch kann sich jeder (Lehrer oder Autor) an Fachinstitute der Hochschulen bzw. des Staates wenden und um Auskunft zu speziellen Themenkreisen bitten. Daß übrigens auch an den Hochschulen in Vorlesungen oder in Lehrbüchern oft die oben beschriebenen Fehler gemacht werden, steht auf einem anderen Blatt.

1 Im physikalischen Praktikum für Mediziner an der Universität München ist dieser Weg (in Form einer programmierten Unterweisung) schon seit drei Jahren beschritten. Dafür wurde ein maßstabsgerechtes, vielfältig einsetzbares Augenmodell entwickelt. Beziehbar über die Firma F. W. Graumann, 587 Hemer-Westig, Lohstr. 31.

---

(Anschrift des Verfassers: Dr. Christian Ucke, Physik-Department E 20, Technische Universität München, 85747 Garching)

Eingangsdatum: 14.5.1974

#### Literatur

- [1] DIN 58 208 (1972): Begriffe und Zeichen bei Brillengläsern in Verbindung mit dem menschlichen Auge
- [2] DIN 1304 (1971): Allgemeine Formelzeichen
- [3] DIN 1335 (1958): Bezeichnungen in der technischen Strahlenoptik
- [4] DIN 1349 (1972): Durchgang optischer Strahlung durch Medien; Optisch klare Stoffe
- [5] DIN 58 925 (1965): Optisches Glas, Begriffe der optischen Eigenschaften
- [6] Symbole, Einheiten und Nomenklatur in der Physik Document U.I.P. 11 (S.U.N. 65-3) 1965. Braunschweig, Vieweg 1966
- [7] Reeb, K.: DIN-Normen In: MNU 27, (1974), S. 117-118
- [8] DIN 5031 (1970): Strahlungsoptik im optischen Bereich und Lichttechnik
- [9] Schober, H.: Das Sehen, Bd. II. Leipzig: VEB-Fachbuchverlag 1964

*Hinweis:* Es ist zur Zeit ein Normprojekt in Arbeit: „Begriffe der physiologischen Optik“, welches ein Gutteil der behandelten Fragen betrifft.