

**Physik und Medizin**

# **Sehen**

Lehrstuhl für Didaktik der Physik  
Ludwig-Maximilians-Universität München

Giuseppe Colicchia, Andrea Künzl, Hartmut Wiesner

# *Physikalisches und medizinisches Hintergrundwissen zum Thema Sehen*

## **1. Das Auge als optisches Instrument**

Das Auge ist der periphere Teil des Lichtsinnesorgans. Die durch das Licht übertragenen Informationen werden auf der Netzhaut in elektrische Impulse umgewandelt und über Nervenbahnen an das Gehirn weitergeleitet, analysiert und interpretiert.

Das Auge ist eine Kugel von ca. 24 mm Durchmesser. Es besteht aus (s. Bild 1)

- der vorderen Hornhaut (Kornea), die knapp einen Millimeter dick ist, keine eigene Blutversorgung besitzt und völlig durchsichtig ist,
- der Augenkammer, die eine Flüssigkeit (Kammerwasser) enthält,
- der Regenbogenhaut, in deren Mitte sich ein kreisrundes Loch befindet (Pupille),
- der elastischen Linse, die durch ein System feinsten Fäserchen am Ciliarmuskel aufgehängt ist,
- dem Glaskörper, der den Augapfelraum ausfüllt,
- der Netzhaut (Retina), die die hintere innere Oberfläche des Auges auskleidet.

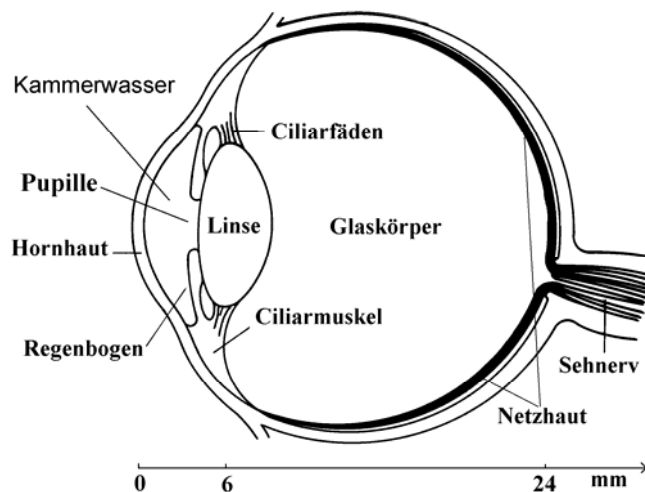


Bild 1: Aufbau des menschlichen Auges (nach Wiesner et al., 1996)

Das sichtbare Licht muss, um die Netzhaut reizen zu können, den optischen Apparat des Auges durchlaufen. Das Licht tritt durch das vordere Auge ein und wird dort gebrochen. Die Brechkraft kann durch verschiedene Faktoren verändert werden: einerseits durch die Kraft der äußeren Muskeln, die zu einer ellipsoiden Deformierung der ganzen Augenkugel, d.h. auch der Hornhaut, führen kann, andererseits durch die unterschiedliche Krümmung der Linsen durch die Ciliarmuskeln (Akkommodation). Die äußere Oberfläche der Hornhaut trägt wegen ihres Überganges zur Luft den wesentlichsten Teil zum Brechwert des Auges bei, etwas mehr als 40 dpt. Die Linsenbrechkraft beträgt nur 10-20 dpt (je nach Akkommodationszustand). Der Abstand der Linse von der Hornhaut (ca. 7 mm) ist relativ gering. Deshalb führt eine bloße Addition dieser Dioptriezahl zu jener der Hornhaut zu einer akzeptablen Näherung.

Das menschliche Auge stellt ein kompliziertes optisches System dar, weil viele Teile des Augapfels mit verschiedenen Brechungsindizes zur optischen Abbildung beitragen (Hornhaut 1,376; Kammerwasser 1,336; Linse 1,385-1,406; Glaskörper 1,336). Es wird daher ein vereinfachtes Modell eingesetzt (das „reduzierte Auge“), bei dem das Augeninnere mit Wasser gefüllt angenommen wird und man sich die Gesamtbrechung des Auges an einer einzigen brechenden Fläche entstanden denkt (Bild 2). Man wählt im „reduzierten Auge“ einen kleineren Krümmungsradius ( $r = 6$  mm) als beim natürlichen Auge (ca. 8 mm), damit

die gleiche Brechung wie beim Auge bewirkt wird. Die Länge des reduzierten Auges beträgt wie beim natürlichen Auge 24 mm, die Brechung ca. 58 dpt, die gegenstandsseitige Brennweite 17 mm und die bildseitige 23 mm. Die Unterschiede zwischen vorderer und hinterer Brennweite ergeben sich aus den Unterschieden im Brechungsindex von Luft und Wasser.

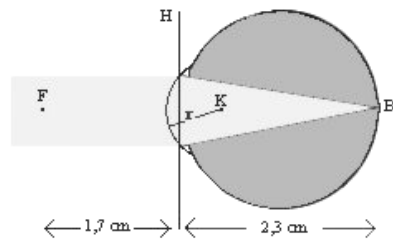


Bild 2: Reduziertes Auge, wobei die Brechung an einer einzelnen Fläche gedacht wird. H Hauptebene, K Knotenpunkt, F und B vorderer und hinterer Brennpunkt.

### Abbildung an einer Kugelfläche

Wir betrachten einen leuchtenden Gegenstand in einem Medium  $n_1$  und ein anderes Medium  $n_2$ , das sich von  $n_1$  kugelförmig abgrenzt (Bild 3).

Die Oberfläche des Gegenstands besteht aus unendlich vielen Punkten. Aus dem Licht, das jeder einzelne Punkt der Oberfläche, z. B. A, divergent aussendet, blendet das abbildende System einen Teil heraus und wandelt es in ein konvergentes Bündel um, das im reellen Bildpunkt A' zusammenläuft.

Alle Bündel, die von den Punkten der Oberfläche stammen und die jeweils einen Bildpunkt liefern, ergeben zusammen die ganze, reelle Abbildung.

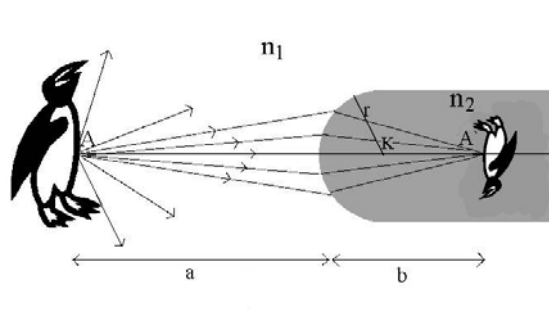


Bild 3: Abbildung durch eine Kugelfläche. Tatsächlich wird natürlich nur die der Kugelfläche zugewandte Gegenstandsfläche abgebildet.

Wenn die Lichtbündel nicht groß sind, gilt die Abbildungsgleichung

$$n_1/a + n_2/b = (n_2 - n_1)/r,$$

wobei  $n_1$  und  $n_2$  die Brechungszahlen,  $a$  und  $b$  die Entfernungen des Objekts und des Brennpunkts von der Kurvenspitze und  $r$  der Radius ist.

Die bild- und die gegenstandsseitige Brennweite,  $f_1$  und  $f_2$ , resultieren aus der Gleichung für  $a = \infty$  und  $b = \infty$ :

$$f_1 = r \cdot n_2 / (n_2 - n_1)$$

$$f_2 = r \cdot n_1 / (n_2 - n_2)$$

Auch auf der Netzhaut entsteht ein verkehrtes Bild. Die zentrale Verarbeitung der äußeren Sinneseindrücke und ein Lernvorgang in frühester Jugend lassen uns das Bild aufrecht erscheinen. Bei Versuchspersonen mit Brillen, die das Bild umdrehen, steht die Welt zunächst auf dem Kopf, aber nach einigen Tagen lernt der Mensch die Informationen so zu verarbeiten, dass er seine Umwelt wieder aufrecht sieht.

## Sammellinsen und Aberration

Eine Sammellinse kann die Strahlen eines parallelen Lichtbündels hinter der Linse vereinigen. Je kleiner die Brennweite ist, desto größer ist die Brechkraft  $D$  der Linse. Ein Maß für die Brechkraft ist der Kehrwert der in Meter (m) gemessenen Brennweite. Für die Brechkraft  $D$  einer Linse gilt:  $D = n_1/f_1 = n_2/f_2$ , wobei  $n_1$  und  $n_2$  die Brechungsindizes der Stoffe sind, die die Linse auf der Gegenstandsseite und der Bildseite umgeben und  $f_1$  und  $f_2$  die gegenstandsseitige und bildseitige Brennweite sind. Wenn  $n_1 = n_2 = 1$  (Linse beiderseitig von Luft umgeben) ist, dann ist  $D = 1/f_1 = 1/f_2$ . Eine Linse mit der Brennweite 1 m hat in diesem Fall an beiden Seiten die Brechkraft 1 Dioptrie.

Einfache Linsen besitzen sphärische Oberflächen, weil sie exakt und kostengünstig herzustellen sind. Achsenferne Strahlen, die durch eine Linse mit sphärischen Oberflächen gehen, werden aber hinter der Linse früher als achsennahe Strahlen fokussiert. Je weiter die einfallenden Strahlen von der Achse entfernt sind, desto mehr weichen sie vom Brennpunkt ab (sphärische Aberration). Der sphärische Fehler macht sich daher bemerkbar, wenn das Lichtbündel breit ist (Bild 4a). Aus diesem Grund wird in der Praxis oft nur der zentrale Bereich einer Linse benutzt.

Auch die Hornhaut und die Linse des Auges haben im Randbereich eine kürzere Brennweite, daher ist dieser störende Einfluß um so kleiner, je enger die Pupillen sind. Das Optimum der Bildqualität liegt bei einem Pupillendurchmesser von ca. 2,4 mm, ein engerer Pupillendurchmesser würde die Abbildungsqualität wegen der Beugungseffekte verschlechtern (Penzlin, 1996).

Bei Linsen sowie bei Augen tritt außerdem die chromatische Aberration ein, weil kurzwelliges Licht stärker gebrochen wird als langwelliges Licht (Bild 4b). Das hat zur Folge, dass das Bündellicht nicht in einem einzelnen Punkt fokussiert wird. Das Auge muss daher für rote Gegenstände stärker als für blaue Gegenstände akkommodiert werden und Rot erscheint meist näher als Blau.

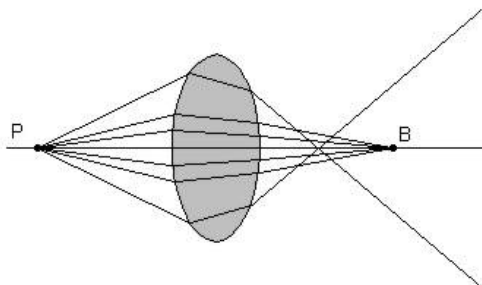


Bild 4a: Sphärische Aberration bei einer Linse. Achsenferne Strahlen werden vor achsennahen Strahlen fokussiert.

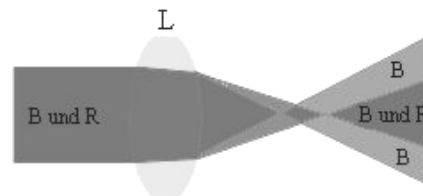


Bild 4b: Chromatische Aberration bei einer Linse. Die blaue Strahlung (B) wird stärker gebrochen als die rote (R).

## Akkommodation

Bei völliger Entspannung ist das Auge auf die Ferne scharf gestellt. Werden nähere Objekte angeschaut, dann werden die Grenzflächen der Linse durch Kontraktion der Ciliarmuskeln (Ringmuskeln) gewölbt. Der Durchmesser des Ciliarmuskels wird kleiner, der Zug der Ciliarfäden auf die Linse wird schwächer, so dass sich die elastische Linse verdicken kann, wodurch sich der Brechwert vergrößert. Auf diese Weise können Objekte in unterschiedlichen Abständen scharf gesehen werden. Bei Vögeln trägt auch die Veränderung der Hornhautkrümmung zur Akkommodation bei (bei der Taube z. B. bis 17 Dioptrien) (Bezzel, 1990).

Als Fernpunkt  $D_f$  bezeichnet man den am weitesten entfernten Ort auf der Augenachse, der ohne Akkommodation scharf gesehen wird. Als Nahpunkt  $D_n$  den Ort auf der Augenachse,

der bei stärkster Akkommodation scharf gesehen wird (25 cm in mittlerem bis 10 cm in jungendlichem Lebensalter).

Die Akkommodationsbreite  $A_B$  ist der Betrag, um den die Brechkraft der Linse geändert werden kann:  $A_B = 1/D_n - 1/D_f$  (in  $m^{-1}$  bzw. Dioptrie)

Kinder können in einem Bereich zwischen 7 cm und  $\infty$  scharf sehen. Das entspricht einer Akkommodationsbreite von  $1/0,07m - 1/\infty \approx 14$  dpt. Bei Pferd, Hund und Katze beträgt die Akkommodationsbreite 2-4 dpt. Kaninchen akkommodieren überhaupt nicht (Penzlin,1996).

## 2. Fehlsichtigkeiten

### Refraktionsbestimmung

Unter Refraktionsbestimmung versteht man die Bestimmung der *zusätzlichen* Brechkraft, die notwendig ist, um auf der Netzhaut ein scharfes Bild zu erhalten. Die einfachste und gebräuchlichste Methode zur subjektiven Bestimmung der Refraktion ist die Prüfung der Sehschärfe (Sehprobe). Es wird zunächst in einem Untersuchungsabstand von 5 m für jedes Auge gesondert (durch Abdecken des anderen) die Sehleistung für die Ferne bestimmt, wobei verschiedene, genormte Sehzeichen (z. B. Zahlen- oder Buchstabenreihen) verwendet werden. Wenn die Sehleistung nicht normal ist, liegt wahrscheinlich ein Brechungsfehler vor. Dann wird durch Vorsetzen entsprechender Brillengläser versucht, normale Sehschärfe zu erreichen.

Die subjektive Prüfung genügt zur Messung der Brechkraft aber nicht in allen Fällen. Dann sind objektive Untersuchungsmethoden (z. B. bei Kinder) notwendig.

Es gibt viele Methoden von objektiven Refraktionsbestimmungen. Einige werden mit einfachen Geräten durchgeführt, andere sind durch Computer voll automatisiert.

### Der Brechungszustand des Auges

Das Verhältnis der optischen Gesamtbrechkraft der Augenmedien zur Achsenlänge des Augapfels bestimmt den Brechungszustand des Auges (Refraktion).

Die normale Refraktion wird als Emmetropie (Normalsichtigkeit) bezeichnet. Hierbei haben die aus dem Unendlichen parallel auf das Auge treffenden Strahlen ihren Schnittpunkt auf der Netzhaut. Bei einem Missverhältnis zwischen Brechkraft und Achsenlänge erfolgt keine punktförmige Vereinigung der einfallenden Strahlen auf der Netzhaut. Diese Sehfehler bewirken, dass auf der Netzhaut statt einer scharfen Abbildung der Objekte eine unscharfe Abbildung entsteht. Selbstverständlich ist eine „punktförmige Vereinigung“ eine vereinfachende Abstraktion. Das Licht könnte nie in einem Punkt gebündelt werden.

Abweichungen von der Normalsichtigkeit können genetisch vorbestimmt sein oder durch einseitige Beanspruchungen der Augen erworben werden.

### Myopie (Kurzsichtigkeit)

Hier ist die Augenachse abnormal lang (tritt häufiger auf) bzw. die Brechkraft der Medien zu stark (seltener auftretend). In diesem Fall vereinigen sich parallel einfallende Strahlen vor der Netzhaut im Glaskörperraum. Auf der Netzhaut entstehen Zerstreuungskreise und damit ein unscharfes Bild. Der Fernpunkt liegt in endlicher Entfernung von dem Auge und auch der Nahpunkt liegt näher am Auge als bei Normalsichtigkeit. Die veränderte Lage des Nahpunktes ist ein Vorteil, der zu nahe liegende Fernpunkt ist jedoch ein Nachteil, der korrigiert werden muss. Die Brillenkorrektur zur Verminderung der Brechkraft erfolgt durch Zerstreuungslinsen, die den Fernpunkt (bzw. den Nahpunkt) weiter vom Auge entfernen.

Die Brechkraft der Korrekturlinse kann folgendermaßen bestimmt werden:

Für das fehlsichtige Auge (Bildweite  $b$ ) mit dem Fernpunkt  $D_f$  gilt

$$1/f_1 = 1/D_f + 1/b \quad (*)$$

Dann muss für die Brennweite  $f$  der Korrekturlinse, die den Fernpunkt nach unendlich verschiebt, unter Benutzung der Additivität der Brechkkräfte für dünne Linsen gelten:

$$1/f_1 + 1/f = 1/\infty + 1/b \quad (**)$$

Wird (\*) von (\*\*) abgezogen, ergibt sich

$$1/f = 1/\infty - 1/D_f = -1/D_f.$$

Liegt der Fernpunkt  $D_f$  des fehlsichtigen Auges z.B. bei 1 m, ist eine Zerstreuungslinse mit der Brennweite  $-1\text{ m}$  bzw. der Brechkraft von  $-1\text{ dpt}$  erforderlich.

Diese Linse verschiebt auch den Nahpunkt, und zwar auf  $17,6\text{ cm}$ .

Auch wenn noch nicht klar ist, wie das Auge von  $17\text{ mm}$  (Geburtslänge) auf  $24\text{ mm}$  (Länge des Auges eines Erwachsenen) wächst bzw. wie Fehlsichtigkeiten entstehen, gibt es Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen Lesen und Kurzsichtigkeit (Schaeffel, 1998).

Bei der Myopie von Schulkindern verstärkt sich die Kurzsichtigkeit in der Jugendzeit bis zum 25. Lebensjahr, allerdings bleibt die Kurzsichtigkeit unter  $-6\text{ Dioptrien}$ .

### **Hyperopie (Weitsichtigkeit)**

Bei diesem Fehler ist die Augenachse abnormal kurz (Achsenmyopie, tritt häufiger auf) bzw. die Brechkraft der brechenden Medien zu schwach (Brechungsmyopie, tritt seltener auf). In diesem Fall würden sich parallel einfallende Strahlen hinter der Netzhaut vereinigen und auf der Netzhaut entsteht ein unscharfes Bild. Die Korrektur zur Erhöhung der Brechkraft erfolgt durch die Sammellinse.

Liegt der Nahpunkt  $D_n$  des fehlsichtigen Auges bei  $D_n > 0,25\text{ cm}$ , wird die Brennweite  $f$  der Korrekturlinse, die den Nahpunkt von  $D_n$  nach  $0,25\text{ cm}$  verschiebt, analog zur obigen Betrachtung bestimmt durch

$$1/f = 1/(0,25\text{ m}) - 1/D_n.$$

Wenn z. B. der Nahpunkt bei  $1,5\text{ m}$  liegt, ist die Brennweite der Korrekturlinse dafür, dass Gegenstände in der normalen Sehweite von  $25\text{ cm}$  scharf gesehen werden können, gegeben durch

$$1/f = 1/(0,25\text{ m}) - 1/(1,5\text{ m}) \approx 3,3\text{ m}^{-1} = 3,3\text{ dpt}.$$

### **Astigmatismus (Stabsichtigkeit)**

Ist die Brechkraft der vertikalen und horizontalen Hornhautmeridiane unterschiedlich, dann treffen sich die einfallenden Strahlen nicht in einen Punkt. Die Brillenkorrektur erfolgt durch zylindrisch geschliffene Gläser, damit die beiden Brechkkräfte gleich werden und der einzige Schnittpunkt der einfallenden Strahlen in der Netzhaut liegen kann.

### **Altersichtigkeit**

Mit dem Alter nimmt durch zunehmende Verhärtung (Sklerose) des Linsenkerns die Linseneastizität ab und daher auch die Akkommodationsfähigkeit, so dass nahe Gegenstände nicht mehr scharf auf der Netzhaut abgebildet werden können. Bemerkbar wird dieser Fehler normalerweise erst nach dem vierten Lebensjahrzehnt. Bei alten Leuten mit Refraktionsfehler

kann der Akkommodationsbereich verschieden sein, jedoch ist die Akkommodationsbreite gering.

Bei über 50 jährigen liegt der Nahpunkt bei 0,5 m. Ihre Akkommodationsbreite beträgt dann nur noch  $1/0,5 \text{ m} - 1/\infty = 2 \text{ dpt}$ .

### **Korrektur von Fehlsichtigkeiten**

Die Fehlsichtigkeiten des Auges werden meistens durch eine Brille korrigiert. Sie führen zu einer wesentlichen Verbesserung der Sehschärfe, allerdings wird das Bild auf der Netzhaut durch eine Zerstreuungslinse verkleinert und durch eine Sammellinse vergrößert. Das kann dann zu einem echten Problem führen, wenn nur ein Auge von starker Fehlsichtigkeit betroffen ist: die beiden Netzhautbilder sind dann unterschiedlich groß.

Heute werden oft Kontaktlinsen verwendet, die direkt auf die Hornhaut aufzusetzen sind und dort durch Adhäsion haften. Wegen des Wegfalls des Hornhautscheitelabstandes zwischen Hornhaut und Brille ist die Bildveränderung auf der Netzhaut unwesentlich. Nachteile von Kontaktlinsen liegen trotz moderner Materialien in der Beeinträchtigung des Stoffwechsels der Hornhaut und in möglichen Infektionen bzw. Allergien.

Die Brechkraft der Hornhaut kann auch chirurgisch verändert werden, indem ihre Krümmung durch Abtragungen geändert wird. In den letzten Jahren ist wegen der guten Ergebnisse, die durch verbesserte Verfahren erreicht wurden, die Zahl von operativen Eingriffen gestiegen, obwohl sie meistens irreversible Korrekturen bedeuten. Bild 5 zeigt, wie die Hornhaut durch Abtragen von Gewebe aus der Oberfläche oder von winzigsten Schichten aus dem Inneren der Hornhaut so modelliert werden kann, dass wieder scharfe Netzhautbilder auch ohne Sehhilfen entstehen (Sachsenweger, 1996).

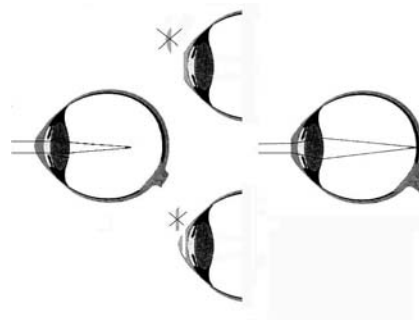


Bild 5: Änderung der Hornhautkrümmung zur Korrektur der Kurzsichtigkeit durch Abtragung von oberflächlichem (oben) bzw. innerem Gewebe (unten).

## **3. Untersuchung am Auge**

### **Der Augenspiegel**

Unter einem Augenspiegel versteht man ein Instrument, das es ermöglicht, den Augenhintergrund zu beleuchten und gleichzeitig den Augenhintergrund zu betrachten.

Bei den ersten Versuchen wurden ebene Glasplatten als Spiegel verwendet. Heute sind Geräte mit Planspiegel, Hohlspiegel oder Prisma in Kombination mit Linsen üblich.

In Bild 6a ist das erste Augenspiegelmodell nach Helmholtz dargestellt, wobei 3-4 schräggestellte (ca.  $60^\circ$ ), planparallele Glasplatten als halbdurchlässiges Medium bzw. Reflektoren wirken. Die nötige Beleuchtungsintensität lässt sich auch allein mit einer Glasplatte als Spiegel und einem größeren Winkel erreichen. Mehrere Glasplatten vermindern aber den Hornhautreflex besser (Helmholtz, 1851).

Die planparallelen Glasplatten waren der geniale Einfall für den Durchbruch der Erfindung, aber nicht die optimale Lösung, weil nur ein sehr kleiner Teil des am Augenhintergrund gestreuten Lichtes das beobachtende Auge erreicht: In Bild 6b, treffen die Strahlen  $S_1$  von der Lichtquelle mit einem Winkel von  $60^\circ$  zur Normalen auf den Spiegel. Ein Teil der Strahlung  $S_2$  wird von allen planparallelen Glasplatten zum Auge reflektiert und ein Teil geht durch Brechung verloren. Der von dem Augenhintergrund gestreute, noch geringere Teil der





## Untersuchung mit dem Augenspiegel

Mit der Erfindung des Augenspiegels haben sich zwei verschiedene Verfahren zur Untersuchung des Augenhintergrundes ergeben: Die direkte (aufrechtes Bild) und die indirekte (umgekehrtes Bild) Methode (Straub,1984; Nover,1970). Die Untersuchung im aufrechten Bild wird durch jene im umgekehrten Bild ergänzt. Die erste verschafft einen größeren Überblick, die zweite gestattet bei stärkerer Vergrößerung Detailbeobachtungen in einem kleineren Ausschnitt. Meistens verwendet man einen Tropfen einer Substanz, um die Pupille zu erweitern und die Akkommodation der Linse auszuschalten. Zur Zeit werden auch andere Mittel (Fotokamera, fluoreszierende Substanzen usw.) benutzt, um Veränderungen, Verletzungen und Entzündungen am Augenhintergrund besser nachweisen zu können. Die Untersuchung im aufrechten Bild ist auch zur Bestimmung von Refraktionsfehlern geeignet.

### Direkte Ophthalmoskopie (Untersuchung im aufrechten Bild)

In Bild 9 ist die Anordnung einer direkten Ophthalmoskopie dargestellt, wobei der Abstand zwischen Beobachter- und Patientenauge nur wenige Zentimeter beträgt. Die von der seitlichen Lichtquelle kommenden Strahlen werden vom Hohlspiegel reflektiert und etwa parallel bis zum untersuchten Auge weitergeführt. Dann treten sie durch die Pupille in das Patientenauge ein.

Ist das untersuchte Auge normalsichtig, so verlässt das von der Netzhaut des Patienten Auges ausgehende Lichtbündel das Auge parallel zum einfallenden Lichtbündel. Falls das Beobachterauge ebenfalls normalsichtig ist, entsteht auf seiner Netzhaut ein scharfes aufrechtes Bild der Patientennetzhaut.

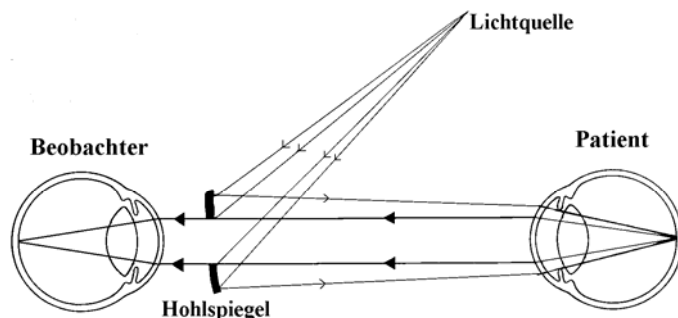


Bild 9: Das von dem Hohlspiegel reflektierte Licht beleuchtet den untersuchten Augenhintergrund, aus dem der gestreute Lichtanteil durch das zentrale Loch im Hohlspiegel zum Beobachterauge kommt, das ein aufrechtes Bild des Hintergrundes des Patienten Auges sieht.

Hat der Patient eine Myopie bzw. Hyperopie, dann entsteht für den Beobachter ein unscharfes Bild. Während der Untersuchung kann man verschieden starke Linsen vorsetzen und dadurch Refraktionsanomalien des Beobachters und des Patienten ausgleichen und ein scharfes Bild des Augenhintergrundes erhalten: Die zur Scharfeinstellung notwendigen Linsen lassen zugleich die Höhe des Brechungsfehlers erkennen. Ist aber das Beobachterauge ametrop (fehlsichtig), dann muss zur Erreichung eines scharfen Bildes der Brechwert der Korrekturlinse gleich der Summe der Brechwerte der beiden Augen (Beobachter- und untersuchtes Auge) sein.

Im Fall eines Astigmatismus, läßt sich die Refraktionsanomalie mit normalen Linsen nicht ausgleichen. Das Bild des Augenhintergrundes bleibt unscharf, wodurch das Erkennen diskreter Veränderungen erschwert ist.

In einer direkten Ophthalmoskopie erscheint das Bild des Augenhintergrundes vergrößert. Der Vergrößerungsfaktor  $V$  beruht darauf, dass das System Hornhaut-Linse des untersuchten Auges als Sammellinse wirkt. Nach der Formel  $V = s_0/f$  ist der Vergrößerungsfaktor bei normalsichtigen Augen etwa 15, weil  $s_0$  definitionsgemäß die auf 25 cm festgesetzte deutliche Sehweite bezeichnet und  $f$  bei entspannter Akkommodation ca. 1,7 cm beträgt. Im hochmyopen Auge ist die Vergrößerung höher.

Weist die Netzhaut Niveaudifferenzen auf, so benötigt man verschiedene Linsen, um die auf der Netzhaut liegenden Strukturen scharf zu sehen. Auf diese Weise lassen sich recht exakte Niveaumessungen vornehmen, wobei ein Unterschied von 3 dpt etwa 1 mm entspricht.

### **Indirekte Ophthalmoskopie (Untersuchung im umgekehrten Bild)**

Die Anordnung einer Ophthalmoskopie im umgekehrten Bild unterscheidet sich von jener im aufrechten Bild durch Einfügen einer Sammellinse zwischen dem untersuchten Auge und dem Hohlspiegel. Außerdem ist der Abstand zwischen Arzt und Patient größer (Bild 10).

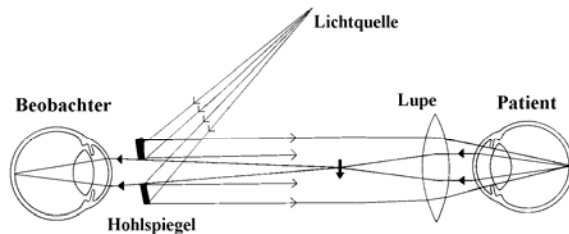


Bild 10: Anordnung einer Untersuchung im umgekehrten Bild. Der Beobachter sieht ein auf dem Kopf stehendes Bild des Augenhintergrundes.

Die Linse (normalerweise +10 bis + 30 dpt) wird wenige Zentimeter vor dem Auge des Patienten in den Strahlengang eingesetzt. Man erhält auf diese Weise im vorderen Brennpunkt der Lupe ein Bild der Netzhaut des Patienten, auf das der Beobachter in genügend großem Abstand sein Auge akkomodieren muss. Es ist ein umgekehrtes Bild: Was unterhalb der Pupille liegt, erscheint oberhalb und umgekehrt.

Die (in der Regel 2-6fache) Vergrößerung hängt von der benutzten Lupe ab. Je schwächer die Lupe ist, um so größer ist das Bild. Eine übliche Anordnung besteht aus einer Lupe mit 16 dpt, die etwa 6 cm vor das Patientenauge gehalten wird, wobei der Beobachter 60 cm vom Patienten entfernt sein soll. Das ergibt etwa eine 4,5fache Vergrößerung (Grehn, 1998).

## **4. Sehen unter Wasser**

### **Brechung am Auge unter Wasser**

Die Brechung der Lichtstrahlen ist durch den Unterschied in der optischen Dichte der Medien bestimmt. Wird die Luft vor dem Auge durch Wasser ersetzt, so nimmt die Brechung an der Hornhaut stark ab, weil die Hornhaut und das Wasser etwa denselben Brechungsindex besitzen. Zur Kompensation müssen deswegen Wassertiere bzw. tauchende Tiere eine stärker brechende Linse besitzen. Z.B. besitzen Fische zur Erhöhung der Brechkraft eine sphärische, relativ harte Linse. Die Akkommodation wird dann durch die Veränderung des Abstandes Linse-Netzhaut erreicht.

### **Akkommodationsformen**

Es gibt im Wesentlichen zwei Grundformen, mit denen eine Akkommodation auf unterschiedlich weit entfernte Gegenstände erreicht werden kann:

- (a) Durch Änderung der Krümmung der formveränderbaren Linse;
- (b) Durch Veränderung des Abstandes zwischen Linse und Netzhaut bei starrer, nicht formveränderbarer Linse.

Es gibt auch Sonderfälle (z. B. eine für Nah- bzw. Fernsehen doppelte Netzhaut), so dass keine lückenlose Weiterentwicklung der Augen im Tierreich besteht. Von den niederen Tieren über die Fische, Amphibien, Reptilien und Vögel zum Säugetier sind alle verschiedenen Akkommodationsformen anzutreffen.

Vögel, Säugetiere und die meisten Reptilien akkomodieren wie in (a), wobei bei Vögeln an der Akkommodation zusätzlich auch eine Änderung der Hornhautkrümmung beteiligt sein kann (z.B. kann bei Tauben durch zusätzliche Krümmung der Hornhaut eine Änderung der Brechkraft von bis zu 17 dpt erreicht werden).

Fische, die in der Regel eine starre, nicht formveränderbare Linse besitzen, akkommodieren wie in (b).

### Das Fischauge

Die Brechkraft an der Hornhaut in Wasser ist viel geringer als in Luft. Die Krümmung der Hornhaut ist daher für die Lichtbrechung bei Fischen ohne große Bedeutung. Deswegen besitzen Fische eine sphärische Linse mit einer hohen Brechkraft. Die Linse ist normalerweise hart und nicht elastisch wie beim Menschen. Es wird akkommodiert, indem der Abstand der Linse zur Netzhaut verändert wird.

Der Brechungsindex der Linse erhöht sich wegen der Linseninhomogenität von der Peripherie zum Zentrum, damit die sphärische Aberration verhindert wird. Die chromatische Aberration der Linse wird durch eine unterschiedlich tiefe Lage der verschiedenen Rezeptortypen in der Retina zum Teil kompensiert (Penzlin, 1996).

Die Akkommodationsform (b) kann in der Natur auf mehrere Arten realisiert werden. Bei Tintenfischen (Bild 11a) greift der Ciliarmuskel Mc direkt an der (kugelförmigen) Linse L an (Horn, 1982). Bei Kontraktion verformt sich der Glaskörper und die Netzhaut entfernt sich von der Linse (Bild 11b): das Auge akkommodiert auf eine kleinere Gegenstandsweite. Die Akkommodation wird durch die Kontraktion des äußeren Muskels eM unterstützt.

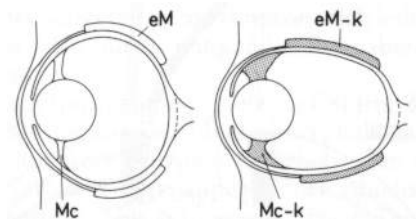


Bild 11: Tintenfischauge: (a) entspanntes Auge, auf geringe Entfernungen akkommodiert; eM extraoculärer Muskel entspannt, Mc Ciliarmuskel entspannt; (b) extraoculärer Muskel eM-k kontrahiert (Akkommodation auf kleinere Entfernungen) (aus Horn 1982)

Dasselbe wird von anderen Arten von Tieren (z.B. Borstenwürmer) erreicht, indem die Menge des Glaskörperinhalts mittels einer außerhalb des Augapfels befindlichen Drüse vergrößert und damit der Augapfel ausgedehnt und die Linse von der Netzhaut entfernt wird. Beim Neunauge greifen seitlich am Augapfel gelegene Muskeln an, bei deren Kontraktion die Linse in Richtung der Netzhaut gezogen wird. (Bild 12)

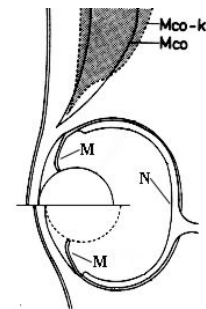


Bild 12: Auge eines Neunauges. Mco bzw. Mco-k Musculus cornealis entspannt bzw. kontrahiert, N Netzhaut (aus Horn, 1982)

Bei Knochenfischen verschiebt sich dagegen die Linse durch Muskelkontraktion in Richtung der Netzhaut (Bild 13). Die Position der Linse ist bei Knochenfischen im Ruhezustand so, dass Objekte, die unmittelbar vor den Augen sind, scharf abgebildet werden. Die Akkommodation auf die Ferne erfolgt, indem die Linse gegen die Netzhaut bewegt wird.

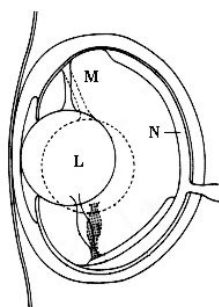


Bild 13: Auge eines Knochenfisches. L Linse, M Musculus retraktor lentis entspannt bzw. kontrahiert, N Netzhaut (aus Horn, 1982)

Bild 13 zeigt, dass die Hornhaut der Knochenfische nur geringfügig gekrümmt ist. Der wesentliche Grund für diese Augenform liegt in den vergleichbar großen Brechzahlen von Hornhautgewebe und Wasser. Dadurch ist die Brechung an dieser Grenzfläche sehr gering, auch wenn die Hornhaut stark gekrümmt ist. Die Krümmung der Hornhaut ist daher für die Lichtbrechung bei Fischen ohne große Bedeutung. Fische und insbesondere Tiere, die sowohl in der Luft als auch im Wasser leben (z. B. Pinguine), besitzen normalerweise nur eine gering gewölbte Hornhaut, sonst wäre der Unterschied zwischen der Brechung in Luft und im Wasser zu groß.

In Bild 14 ist das Auge eines Haies dargestellt, das auf unendlich (Ruhezustand) eingestellt ist. Die Scharfstellung wird durch die Kontraktion der Muskeln M bewirkt, wodurch der Abstand der Linse von der Netzhaut N vergrößert und damit auf geringere Entfernungen akkommodiert wird.

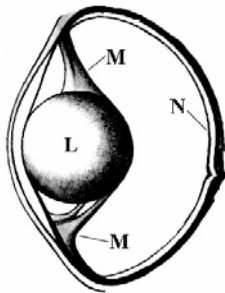


Bild 14: Auge eines Haifisches, das akkommodiert, indem durch die Kontraktion der Muskeln M der Abstand der Linse L von der Retina N verändert wird.

Besonders interessant ist der Sehapparat bei Tieren, die außerhalb und im Wasser scharf sehen müssen. In Bild 15 ist die Akkommodation beim Kormoran gezeigt. Hier wird das Auge so gequetscht, dass sich sowohl Hornhaut als auch Linse stärker wölben. Dieser Zustand ist natürlich sehr anstrengend und deshalb nur für kurze Zeit haltbar.

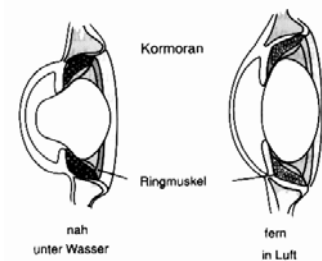


Bild 15: Akkommodation beim Kormoran (aus Müller, 1998)

Ein weiterer interessanter Vertreter ist der in Bild 16a abgebildete „Vieraugenfisch“ (*Anableps tetraphthalmus*), der zwei relativ große, in zwei Hälften geteilte Augen besitzt. Die obere Hälfte dient zum Sehen oberhalb der Wasseroberfläche bei der Jagd nach Insekten, die untere zum gleichzeitigen Sehen unter Wasser, um rechtzeitig für ihn gefährliche Raubfische zu entdecken.

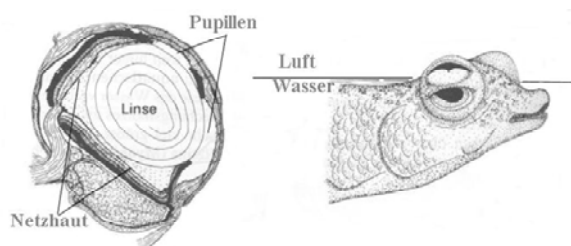


Bild 16: Vieraugenfisch, der zweigeteilte Augen besitzt. Der untere Teil dient zum Sehen im Wasser und der obere zum Sehen in der Luft.  
(b) Querschnitt durch das Auge (aus Penzlin, 1996).

Bild 16b zeigt den Aufbau des Auges des *Anableps*. Die Augenlinse ist etwa eiförmig und füllt das Augeninnere weitgehend aus. Sie kann gleichzeitig zwei Bilder fokussieren, eines vom Bereich über dem Wasser und eines vom Unterwasserbereich.

Auf Grund der großen Unterschiede der Brechzahlen von Wasser und Luft gilt im Allgemeinen: Augen, die für das Sehen in Luft optimiert sind, sind unter Wasser stark weitsichtig. Augen von im Wasser lebenden Tieren sind in Luft kurzsichtig, wenn ihre Hornhaut gekrümmt ist. Ist die Hornhaut wie bei vielen Fischen weitgehend eben, dann ist die Brechkraft an der Oberfläche der Hornhaut praktisch unabhängig davon, ob davor Luft oder Wasser ist. Bei Tieren, die sowohl in Wasser als auch an Land leben, sind die Fehlsichtigkeiten je nach Hauptlebensraum bzw. Gefahren entweder in die eine oder die andere Richtung stärker ausgeprägt. Die Pinguine sind z. B. in Luft kurzsichtig und im Wasser, wo sie ihre Nahrung finden sollen, normalsichtig.

### **Literatur:**

- BEZZEL, E.; Prinzingen R. (1990): Ornithologie. Stuttgart: Ulmer  
GREHN, F. (1998): Augenheilkunde. Berlin u.a.: Springer Verlag  
HELMHOLTZ, H. (1851): Beschreibung eines Augenspiegels zur Untersuchung der Netzhaut im lebenden Auge. Berlin: A. Förstner'sche Verlagsbuchhandlung  
MOJETTA, A. (1997): Haie. Hamburg: Jahr  
NOVER, A. (1970): Der Augenhintergrund. Stuttgart: Schattauer Verlag  
SACHSENWEGER, M. (1996): Laser contra Brille. Berlin: Gesundheit  
SCHAEFFEL, F.: Experimentelle Untersuchungen zur Entstehung von Fehlsichtigkeiten. PdN-Ph. 5/47, Jg. 1998  
STRAUB, W. (1984): Augenspiegelkurs. München: Urban Schwanzenberg Verlag  
WIESNER, H.; Engelhardt, P.; Herdt, D. (1996): Unterricht Physik, Band II: Optik. Köln: Aulis

### **Bildquellennachweis:**

- Bild 11, 12 und 13: Mit freundlicher Genehmigung des Verlages entnommen aus HORN, E.: Vergleichende Sinnesphysiologie. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart 1982 © Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin  
Bild 15: Mit freundlicher Genehmigung des Verlags und des Autors entnommen aus MÜLLER, W.A.: Tier und Humanphysiologie. Berlin: Springer (1998)  
Bild 16: Mit freundlicher Genehmigung des Verlages entnommen aus PENZLIN, H.: Lehrbuch der Tierphysiologie. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart 1996 © Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin