

#### 11.13.4 Das optische System des Auges (\*)

Das im menschlichen Auge (Abb. 47) realisierte optische Abbildungssystem hat die Aufgabe, die realen Objektelemente der Umgebung auf die Netzhaut abzubilden. Diese Aufgabe erledigt das menschliche Auge mit einem System, das man in der technischen Optik als ein verkittetes 3-Linsensystem bezeichnen würde. Es besteht aus dem sog. *Glaskörper*, der darauf fest aufliegenden bikonvexen *Augenlinse* ( $n = 1,38 - 1,42$ ) und der davor liegenden *Hornhaut* (lat. *cornea*), wobei der als *Augenkammer* bezeichnete Hohlraum zwischen Hornhaut und Augenlinse mit der *Kammerflüssigkeit* ( $n = 1,336$ ) gefüllt ist. Die rückseitige Begrenzungsfläche des Glaskörpers bildet gleichzeitig die Bildebene. Auf ihr liegt die als *Netzhaut* oder *Retina* bezeichnete Schicht mit den Photodektoren auf. Einige Fakten dieses Detektorsystems sind im nachfolgenden Abschnitt 11.13.5 skizziert. Die für die optische Abbildung relevanten

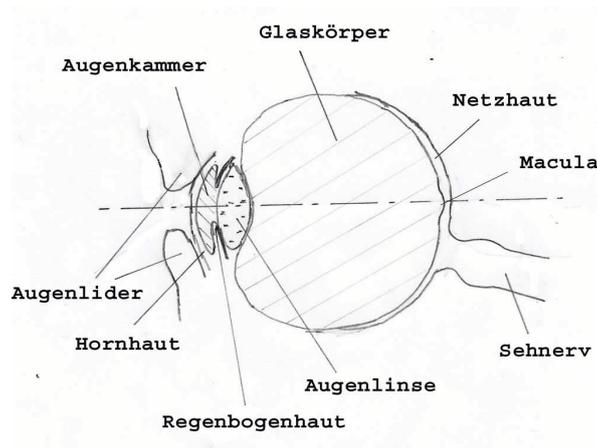


Abb. 47 Optisches Abbildungssystem des menschlichen Auges

Elemente des Auges sind die von der gekrümmten Hornhaut und der Augenkammer gebildete Linse, die eigentliche Augenlinse und der Glaskörper. Das gesamte System ist, wie alle biologischen Elemente, stark empfindlich gegen Schädigungen durch UV-Strahlung. Den UV-Schutz der übrigen Elemente übernimmt insbesondere die Augenlinse.

Wir diskutieren zunächst das Verhalten dieses optischen System im *entspannten Zustand*. Was diese Formulierung genau bedeutet, werden wir direkt im Anschluss daran erläutern. In diesem entspannten Zustand hat das System insgesamt eine Brennweite von

$$f_{rA} = 17 \cdot \text{mm} \Rightarrow D = +59 \cdot \text{m}^{-1} \quad (11.238)$$

Der Beitrag der Augenlinse zu diesem Wert beträgt dabei lediglich  $17 \cdot m^{-1}$ . Den Hauptbeitrag zur Brechkraft des optischen Gesamtsystems leistet mit ca.  $40 \cdot m^{-1}$  die Grenzfläche Luft/Hornhaut. Die Hornhaut ist beidseitig mit einer als *Epithelien* bezeichneten Schicht belegt, die als Antireflexionsschicht wirkt. Ist man lediglich an den Abbildungseigenschaften interessiert, kann man formal dieses 3-Linsen-System durch das sog. *reduzierte Auge* ersetzen, eine einfache Linse mit der in Gl. 11.238 angegebenen Brennweite. Der Durchmesser des optisch wirksamen Teils der Hornhaut beträgt ca.  $12 \cdot mm$  und der Durchmesser der Augenlinse etwa  $10,5 \cdot mm$ . Das optische System des Auges weist offensichtlich eine sehr starke Bildfeldwölbung auf, die von der Natur einfach dadurch kompensiert wurde, dass die geometrische Form der Empfängerfläche dieser Wölbung exakt (s. Aufgabe 6) angepasst wurde.

Das gesamte optische System (der Augapfel) ist mit Hilfe des Augenmuskels über einen gewissen Winkelbereich verkippbar, um das als im Moment relevant angeordnete Objekt auf die optische Achse dieses Systems zu bringen. Dann nämlich wird das Objekt auf den sog. *gelben Fleck* (med. *Macula* oder *Fovea centralis*) innerhalb der Netzhaut abgebildet. Dieser Bereich hat die höchste Winkelauflösung für das Tagesehen, s. Abschnitt 11.13.5. Der Abstand zwischen dem optischen System und der Netzhaut ist fest. Unter Verwendung des Konzeptes des reduzierten Auges ist dieser Wert nahezu identisch mit der in Gl. 11.238 angegebenen Brennweite. Daher werden in dieser Konfiguration alle ausreichend weit entfernten Objekte

$$a \ggg 17 \cdot mm \quad (11.239)$$

scharf auf die Netzhaut abgebildet. (XXX: präzisieren) Typische Zahlenwerte für die Krümmungsradien der entspannten Augenlinse sind

$$R_1 = 12 \cdot mm \quad (11.240)$$

$$R_2 = 6 \cdot mm \quad (11.241)$$

Daraus resultiert eine Brennweite von

$$f_L = 83 \cdot mm \Rightarrow D_L \approx 12 \cdot m^{-1} \quad (11.242)$$

Um nun trotz fester Bildweite  $b$  die Gl. 11.104 auch für kleinere Abstände  $a$  (Gegenstand/Linse) zu erfüllen, muss die Gesamtbrennweite  $f_S$  des optischen Systems verändert werden. Hierzu kann die Augenlinse mit dem sog. *Ziliarmuskel* gestaucht werden, wodurch die beiden Krümmungsradien etwa bis auf die Werte

$$R_1 = 5 \cdot mm \quad (11.243)$$

$$R_2 = 5,3 \cdot mm \quad (11.244)$$

reduziert werden können und sich dadurch eine Brennweite der Augenlinse einstellt von

$$f_L = 50 \cdot mm \Rightarrow D_L \approx 20 \cdot m^{-1} \quad (11.245)$$

Dieser Vorgang wird als *Akkommodation* bezeichnet. Dann werden alle ausreichend weit entfernten Objekte scharf gesehen. Bei maximaler Anspannung des Muskels gilt (für den normalsichtigen Menschen)

$$a_{\min} \approx 25 \cdot \text{cm} \quad (11.246)$$

D.h. der normalsichtige Mensch ist in der Lage, alle in einer Entfernung

$$25 \cdot \text{cm} < a < \infty \quad (11.247)$$

befindlichen Objekte scharf zu sehen. Diese typische Minimalentfernung  $a_{\min} = 25 \cdot \text{cm}$  wird als die *konventionelle Sehweite* bezeichnet. Im Laufe des Lebensalters nehmen die Leistungsfähigkeit des Augenmuskels und insbesondere die Verformbarkeit der Augenlinse ab, und es lässt sich nur noch ein zunehmend geringerer Anteil des in der Gl. 11.247 angegebenen Fokussierungsbereichs erreichen. Ab einem Alter von etwa 70 Jahren hat das Auge seine Akkomodations-Fähigkeit nahezu vollständig eingebüßt. I.a. bleibt die maximal zulässige Entfernung unverändert, da sie ja dem entspannten Muskel entspricht, während die minimale Entfernung, bis zu der das Auge noch scharfstellen kann, mit dem Alter zunimmt. Der alternde Mensch benötigt daher zur Kompensation dieser *Alterssichtigkeit* eine *Lesebrille*.

Bei einem *fehlsichtigen* Menschen liegt dagegen i.a. nicht eine eingeschränkte Funktionsfähigkeit des Akkomodations-Systems vor, sondern eine *fehlerhafte Produktion* des optischen Systems, meist ein falscher Abstand zwischen dem optischen System und der Netzhaut oder (seltener) eine falsch geformte Augenlinse oder Hornhaut. In selteneren Fällen liegt ein untypischer Brechungsindex des Augenlinsenmaterials vor. Dadurch liegt dann die Schärfenebene bei entspanntem Augenmuskel nicht mehr bei  $a = \infty$ , sondern sogar noch darüber hinaus (d.h. selbst für die Fokussierung auf  $a = \infty$  muss der Augenmuskel bereits gespannt werden), oder sie liegt bei einem endlichen Wert  $a < \infty$ . Die relative Häufigkeit dieser Fehlsichtigkeit ist regional sehr unterschiedlich und signifikant erblich bedingt. Der als *Übersichtigkeit* bezeichnete erste Fall tritt in den USA bei etwa 26 % der erwachsenen Menschen auf, der zweite Fall entspricht der in den USA bei etwa 24 % der erwachsenen Menschen auftretenden *Kurzsichtigkeit*. Übersichtige benötigen eine Brille mit positiver Brechkraft, die die zu niedrige Brechkraft des Augensystems korrigiert, die Brillen der Kurzsichtigen haben eine negative Brechkraft. Mit diesen Brillen sind beide Gruppen von Fehlsichtigen wieder ebenso wie normalsichtige Menschen in der Lage, in dem durch die Gl. 11.239 spezifizierten Bereich scharf zu sehen. Die Übersichtigkeit wird oft gar nicht oder erst in höherem Lebensalter erkannt, da sie, solange das Auge dazu in der Lage ist, durch eine entsprechend stärkere Akkomodation des Auges kompensiert werden kann. Die Folge ist dann "lediglich" eine untypisch starke Ermüdung der Augen.

Auch übersichtige und kurzsichtige Menschen werden mit zunehmendem Lebensalter alterssichtig. Auch sie können dann **mit** ihrer bisherigen Brille nur noch bis zu einer gewissen minimalen Entfernung  $a > 25 \cdot \text{cm}$  scharf sehen und benötigen

für den Nahbereich eine Brille mit einer anderen, zu positiveren Werten verschobenen Brechkraft. Kurzsichtige, deren Fehlsichtigkeit nicht zu stark ist, können jedoch auch ihre normale Brille einfach absetzen und den Schärfbereich dadurch zu kleineren Entfernungen verschieben. Die Alterssichtigkeit hebt also eine bereits vorher vorhanden gewesene Kurzsichtigkeit nicht auf, wie immer wieder behauptet wird. Das Auge des Kurzsichtigen ohne Brille entspricht lediglich in gewissem Sinne der Situation des Normalsichtigen mit einer Lesebrille, aber eben i.a. nicht mit der optimal angepassten Brechkraft.

Um einem Einspruch des Lesers zu dem eben Gesagten vorzubeugen, sei angemerkt, dass durch andere altersbedingte Veränderungen des optischen Systems, z.B. in Zusammenhang mit einer Trübung und/oder Verfärbung der Augenlinse (*Katarakt* oder *grauer Star*) sich als Nebeneffekt auch die Position der Schärfenebene bei entspanntem Augenmuskel verändern kann. Der graue Star führt meist zu einer Verschiebung der Brechkraft der Augenlinse in Richtung positiverer Werte, so dass eine vorher vorhandene Kurzsichtigkeit in der Tat partiell kompensiert wird.

Zur schnellen Adaption seiner Gesamtempfindlichkeit an die aktuell vorliegende mittlere Helligkeit der betrachteten Umgebung enthält das optische Augensystem auch eine verstellbare Blende, die *Iris*. Diese wird durch die direkt vor der Augenlinse liegende sog. *Regenbogenhaut* gebildet und ist mit Hilfe von 2 separaten Muskeln bis auf einen Durchmesser von ca.  $2 \cdot mm$  verengbar und bis auf etwa  $7 \cdot mm$  erweiterbar.

Eine weitere Eigenschaft des visuellen Systems, die sicherlich bereits für die Entwicklungsgeschichte des Menschen von besonderer Bedeutung war, ist die Fähigkeit des *räumlichen Sehens*. Hierzu ist es notwendig und hinreichend, dass 2 räumlich ausreichend weit separierte Augen **denselben** Bildausschnitt betrachten können. Dann sind diese beiden Bilder nicht völlig identisch, weil nämlich die beiden Augen jedes Objekt jeweils unter einem etwas anderen Winkel sehen und zwar um so stärker, je kürzer die Entfernung zum Objekt ist, s. Abb. 48 . In dem gezeichneten Beispiel

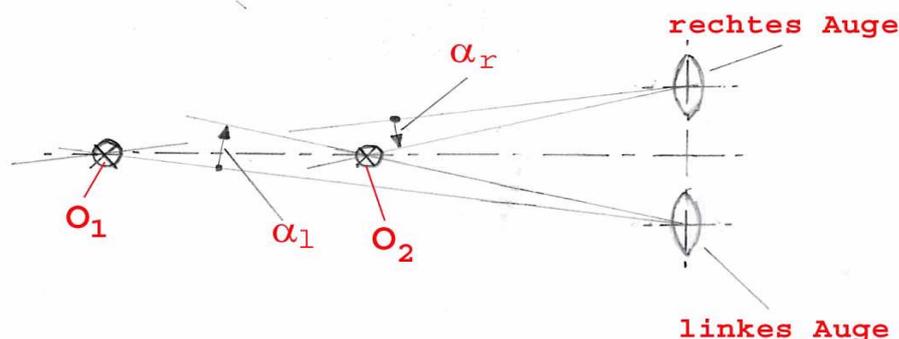


Abb. 48 Funktionsprinzip des räumlichen Sehens

liegt das entferntere Objekt  $O_1$  für das linke Auge rechts von dem näher gelegenen Objekt  $O_2$  ( $\alpha_l < 0$ ), für das rechte Auge liegt dagegen  $O_1$  links von  $O_2$  ( $\alpha_r > 0$ ).

Das in unserem Gehirn vorhandene Bildverarbeitungssystem ist nun in der Lage, diese beiden Einzelbilder durch einen geeigneten Auswerte-Algorithmus zu **einem** Gesamtbild zu vereinen und gleichzeitig jedem Bildpunkt eine Entfernungsinformation zuzuordnen. Diese Fähigkeit bezeichnen wir als *räumliches Sehen*.

Soll bei der Wiedergabe von Bildern z.B. durch Projektion eines Diapositivs auf eine Leinwand ebenfalls ein räumlicher Bildeindruck entstehen, müssen daher ebenfalls den beiden Augen zwei verschiedene, weil unter einem etwas veränderten Blickwinkel aufgenommene Bilder derselben Szene zugeführt werden. Technisch ist dies z.B. dadurch möglich, dass diese beiden Bilder mit senkrecht zueinander linear-polarisiertem Licht auf eine polarisationserhaltende Leinwand projiziert werden. Die Betrachtung erfolgt dann durch eine Brille mit 2 senkrecht zueinander orientierten Polarisationsfiltern.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass nicht alle Lebewesen, auch nicht alle höher entwickelten, diese Fähigkeit des räumlichen Sehens besitzen. Z.B. haben einige Vogelarten, z.B. die Tauben und die Hühnervögel, wohl ebenfalls 2 Augen, blicken mit diesen aber jeweils zu einer anderen Seite. Überdies sind die Augäpfel unbeweglich. Ihr Gesichtsfeld beträgt daher insgesamt bis zu  $340^\circ$ , die Bilder der beiden Augen überlappen sich aber überhaupt nicht, so dass ein räumliches Sehen nach dem soeben beschriebenen Konzept aus konstruktiven Gründen nicht möglich ist. Diese Vögel verschaffen sich dennoch einen räumlichen Eindruck ihrer Umgebung, indem sie periodisch ihren Kopf in horizontaler Richtung hin und her bewegen. Aus der damit einher gehenden Verschiebung der Perspektive der verschiedenen Objekte lassen sich dann wieder die Entfernungen dieser Objekte bestimmen. Als Erklärung für dieses uns allen bekannte Verhalten wird häufig angeführt, dass hierdurch die während der Fortbewegung des Vogels auf Grund der unbeweglichen Augen auftretende Bewegungsunschärfe ausgeglichen wird. Vermutlich spielen beide Effekte eine relevante Rolle.

Wir diskutieren nun die Ortsauflösung des menschlichen Sehsystems. Die Größe  $y'$  des auf der Netzhaut entstehenden Bildes eines Objektes ist offenbar einfach

$$y' = 17 \cdot mm \cdot \frac{y}{a} = 17 \cdot mm \cdot \tan \omega \quad (11.248)$$

$\omega$  : Sehwinkel, unter dem das Objekt erscheint

Es ist also dieser Sehwinkel  $\omega$ , der darüber entscheidet, ob das Auge die betrachtete Struktur noch auflösen kann. Wenn wir den auf der Retina vorhandenen minimalen Abstand 2-er Detektoren zugrunde legen, beträgt die (theoretische) Auflösungsgrenze des Auges, d.h. der Grenzwinkel  $\omega_{\min}$ , unter dem 2 Objekte in das Auge einfallen müssen, damit sie noch als separierte Objekte erkannt werden können,

$$\omega_{\min, \text{theor.}} = \frac{\delta}{17 \cdot mm} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{17 \cdot mm} \approx 1,18 \cdot 10^{-4} = 0,4'' \quad (11.249)$$

$\delta$  : Abstand zwischen den Photodektoren

In der Realität liegt das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges deutlich über diesem Wert, nämlich in der Größenordnung von

$$\omega_{\min} \approx 60'' \quad (11.250)$$

Ursache hierfür ist insbesondere die bereits bei der Datenübertragung an den Sehnerv stattfindende Datenkompression (s.u.). In der Augenheilkunde bestimmt man das aktuelle Auflösungsvermögen der Augen eines Patienten mit Hilfe von sehr kontrastreichen Testmotiven und bildet das Verhältnis dieses aus der Grenze der Erkennbarkeit bestimmten Winkels  $\omega_{\min}$  und des Referenzwertes  $60''$ ,

$$\gamma = \frac{60''}{\omega_{\min}} \quad (11.251)$$

und nennt dieses Auflösungsverhältnis den *Visus* oder die Sehschärfe des Patienten. In der Umgangssprache hat sich dagegen die Angabe dieses Wertes in % eingebürgert und deren Bezeichnung als *Sehfähigkeit*. Da der Bezug auf einen mit einer gewissen Willkür festgelegten Wert (als im Durchschnitt für gesunde Menschen geltend) erfolgt, sind durchaus auch Messwerte  $> 100 \cdot \%$  möglich. Die oft zitierte *Sehfähigkeit* eines Menschen, die z.B. auch das juristische Kriterium für die Beurteilung des realen Sehvermögens eines Menschen ist, ist also ausschließlich das *Auflösungsvermögen* des optischen Systems! 2 Menschen mit gem. dieser Konvention und Sprechweise gleicher Sehfähigkeit können sich daher durchaus noch deutlich in dem Vermögen unterscheiden, in bestimmten konkreten Situationen bestimmte Objekte zu erkennen oder zu unterscheiden.

Ein optisches Gerät, das bei der Betrachtung eines Objektes die insgesamt erreichte Ortsauflösung erhöhen soll, muss offenbar den Sehwinkel  $\omega$  vergrößern. Präziser formuliert bedeutet dies folgendes: Ohne das optische Gerät erscheint uns der zu beobachtende Gegenstand unter den optimalen uns möglichen Gegebenheiten unter einem Sehwinkel  $\omega_1$  und bei Verwendung des Gerätes unter einem Sehwinkel  $\omega_2$ . Die Wirkung des Gerätes charakterisiert daher die Größe

$$\gamma = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (11.252)$$

die als *Winkelvergrößerung* bezeichnet wird, in manchen Lehrbüchern unglücklicherweise auch einfach als *Vergrößerung*. Um eine Verwechslung mit dem Abbildungsmaßstab  $\Gamma$  zu vermeiden (Abschnitt 11.6.2), werde ich immer die vollständige Bezeichnung *Winkelvergrößerung* verwenden.