

8.2.4 Abbildung im Auge

Viele optische Instrumente, Brille, Lupe, Mikroskop und Fernrohr, dienen der Verbesserung der Abbildung durch das Auge. Das Auge ist selbst ein optisches System.

Zunächst fragen wir uns, welche Intensitätsverteilung *vor* unserer Linse ansteht. Um den Überblick zu wahren, ersetzt man die Sicht auf irgendeine belebte Szene oder Landschaft durch den Blick auf einen beleuchteten Spalt in sonst dunkler Umgebung. Zur weiteren Vereinfachung beleuchtet man statt mit weißem, in unregelmäßig langen Wellenzügen unterschiedlicher Frequenz ausgesendetem Sonnenlicht mit einer monochromatischen, harmonischen Welle eines Lasers. An Stelle des Auges stellt man schließlich einen Schirm und beobachtet die Intensitätsverteilung darauf.

Wird der beleuchtete Spalt mit dem Auge beobachtet, dann steht an Stelle des Schirms die Linse, die Pupille blendet die Randstrahlen aus. Auf der Vorderseite der Linse steht das Beugungsbild des Spalts, das durch die Linse in das reale Bild des Spalts auf der Netzhaut verwandelt wird. Es ist offensichtlich, daß sowohl die Entstehung des Beugungsbilds als auch die Bildentstehung des Spalts auf der Netzhaut nicht mit Strahlenoptik zu verstehen ist. Auch hier hilft das Wellenbild des Huygens-Fresnelschen Prinzips: Die an der Linse anliegende Intensitätsverteilung regt elektrische Dipole im Auge zur Schwingung an. Die von ihnen ausgesendeten Kugelwellen überlagern sich so, daß bei geeigneter geometrischer Anordnung der Dipole in Hornhaut, Linse und Glaskörpers und geeigneter Positionierung der Netzhaut auf letzterer ein scharfes Bild des Gegenstands erscheint.

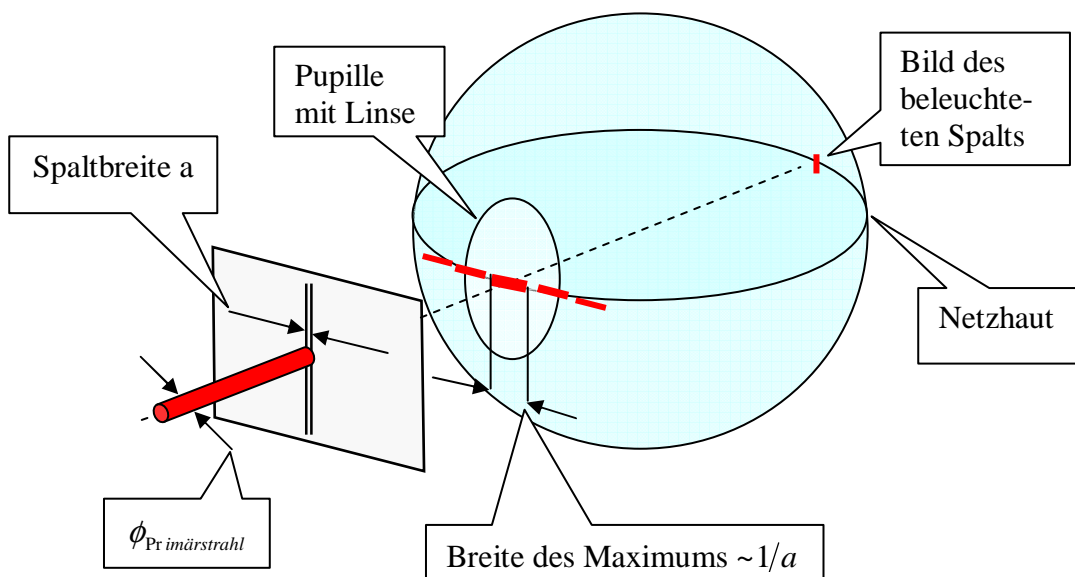


Abbildung 1 Beugungsbild vor der Linse und Bild auf der Netzhaut: Das Auge erzeugt aus dem Beugungsbild vor der Linse das Bild des Spalts auf der Netzhaut.

Es wird bei dieser Betrachtung klar, daß zum Sehen zwei unterschiedliche Effekte beitragen: Der erste ist die Interferenz der von den Objekten ausgehenden Wellen. Die Interferenz ist robust und von geometrischen Gegebenheiten, wie Abständen zum Objekt, weitgehend unab-

hängig: Immer dann, wenn ein Objekt beleuchtet wird, entsteht ein Beugungsbild. Der zweite Effekt verwandelt das Beugungsbild vor der Linse in ein Abbild des Objekts auf der Netzhaut. Dieser Vorgang ist subtiler, es müssen im Auge Formen und Abstände der optischen Komponenten aufeinander abgestimmt sein, um ein scharfes Bild zu erhalten.

Wenn ein Objekt über die ganze Öffnung der Linse eine konstante Intensität erzeugt, dann sieht man nur einen hellen Punkt. Das Objekt ist zu klein, um aufgelöst zu werden. Zu klein heißt, daß die Winkel, unter denen die vom Objekt ausgehenden Wellenfelder auf die Öffnung des Auges treffen, um weniger als $1/120^\circ$, der Auflösungsgrenze des Auges, gegeneinander geneigt sind. Diese Begrenzung tritt in Erscheinung, wenn zwei leuchtende Punkte beobachtet werden, die jeweils eine Kugelwelle aussenden, z. B. zwei Sterne am nächtlichen Himmel. Beide Kugelwellen erscheinen vor der Linse als ebene Welle. Die Sterne werden nur dann getrennt wahrgenommen, wenn die Einfallswinkel ihrer Wellenfelder mehr als $1/120^\circ$ getrennt liegen. Der Winkel zwischen den Sternen muß also, mit bloßem Auge beobachtet, mindestens $1/120^\circ$ betragen. Ein Wellenfeld mit nur einer Richtung wird aber auch bei der Beugung beobachtet, wenn die einzelnen Ordnungen so ausgedehnt sind, daß nur eine von ihnen auf die Pupille trifft. Man betrachte z. B. die Abbildung oben mit dem Spalt und dem Auge. Wird der Spalt kleiner, dann fällt nur noch das zentrale Maximum mit nahezu konstanter Intensität in die Linse. Auch dann wird das Objekt nur als Lichtquelle gesehen, es ist zu klein, um Genaueres zu erkennen.

Der von einer einzigen Welle erzeugte Punkt auf der Netzhaut zeigt zwar keine Information über das Objekt, er ist aber das Beugungsbild der Pupille. Man versteht das, wenn man die Pupille als Blende sieht, die im Licht der einfallenden ebenen Welle steht. Ihr Beugungsbild wird auf der Netzhaut abgebildet. Der kleinste Lichtpunkt auf der Netzhaut wird von einer einzigen ebenen Welle erzeugt, er ist das zentrale Maximum des Beugungsbilds der Pupille. Die Evolution hat die Größe der Zäpfchen gerade dem Durchmesser dieses zentralen Maximums angepaßt. Eine feinere Unterteilung der Netzhaut würde nur bei gleichzeitiger Vergrößerung der Pupille die Auflösung des Systems verbessern. In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten optischen Eigenschaften des menschlichen Auges zusammengefaßt.

Optische Daten zum menschlichen Auge:	
Verhältnis der Leuchtdichte an der unteren Grenze des Erkennens zur höchsten Leuchtdichte vor der Blendung:	etwa $1 : 10^{12}$
Auflösungsvermögen: Kleinster Winkel, unter dem zwei Punkte noch getrennt wahrnehmbar sind:	$\sim \frac{1}{120}^\circ$
Anzahl der Sehzellen	$125 \cdot 10^6$
Höchste Dichte der Sehzellen	$166000 \frac{1}{\text{mm}^2}$
Radius der Sehzellen	$1,2 \mu\text{m}$
Horizontaler Sehwinkel	Etwa 110° bis 120°
Pupillendurchmesser, regelbar	1-8 mm
Gesamte Brechkraft des Auges	58 Dioptrien
Verteilt sich auf:	
Linse	13 Dioptrien
Hornhaut, Kammerwasser und Glaskörper	45 Dioptrien

Tabelle 1 Optische Eigenschaften des menschlichen Auges

Herausragend ist der weite Bereich der Leuchtdichte, das ist der Bereich der zwischen der Empfindung völliger Dunkelheit und blendender Helligkeit, in dem das Auge Abbildungen liefert. Neben den physikalischen Daten ist das Nervensystem in der Retina erwähnenswert, das durch spezielle Verknüpfungen einige Gehirnfunktionen zur Informationsaufbereitung schon im Auge ausführt.

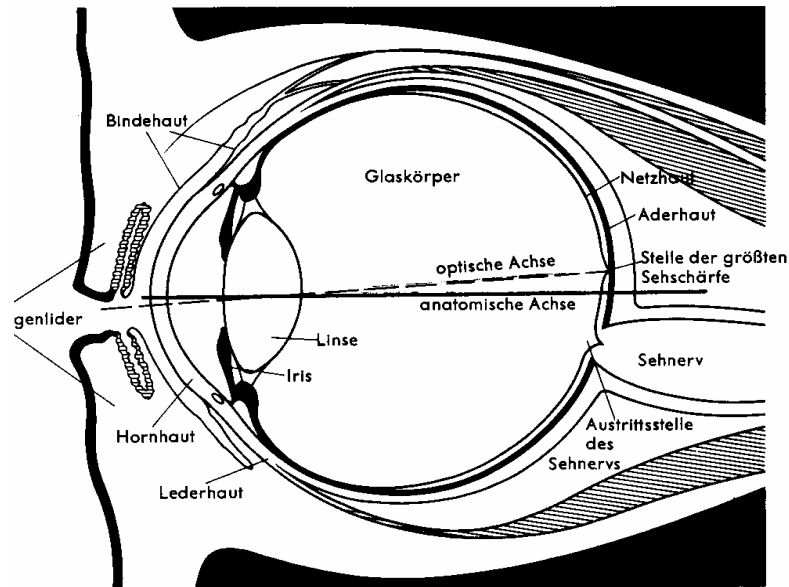


Abb. 13 Querschnitt durch den Augapfel beim Menschen

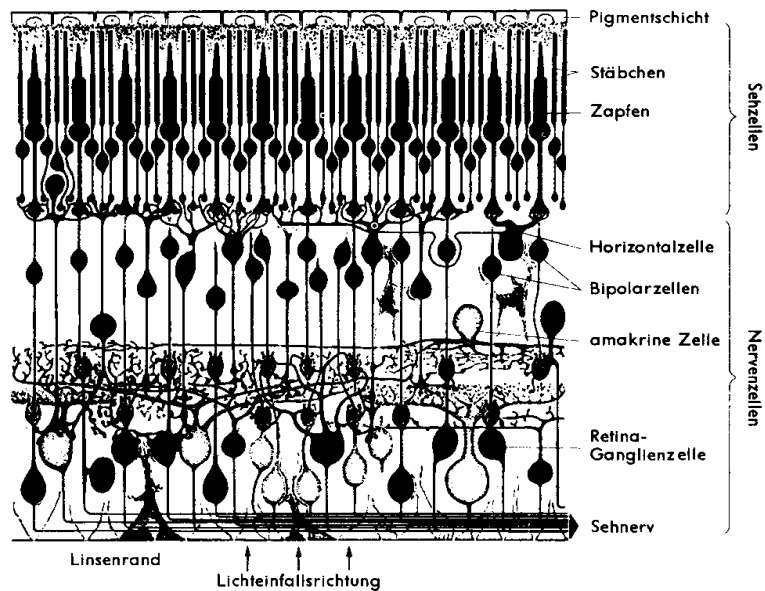


Abbildung 2 Schema des Auges. Der mittlere Abstand der Zäpfchen ist dem Beugungsscheibchen der Pupille angepaßt (Quelle: Meyers Enzyklopädisches Lexikon)