

Auge

Um sehen zu können ist ein System nötig, das Bilder erzeugen und diese auch auswerten kann. Im Laufe der Evolution wurden verschiedene Formen verwirklicht, wichtige Grundlagen sollen in diesen Einheiten angedeutet werden.

"Sehen" ist wesentlich mehr als "Bildentstehung" !!

1.) „Lochkamera“

T Die ersten Überlegungen und Experimente zur Entstehung von Bildern durch feine Löcher auf einem dahinterliegenden Bildschirm stammen bereits aus der Zeit etwa 400 vor Christus aus China und wurden in Europa seit Aristoteles vielfach weitergeführt. ("Camera obscura"). Ein Beispiel für diese Art der Bildentstehung stellt das Lochauge des Nautilus dar.

F/E Blicke durch das vorliegende Lochkammermodell und beantworte folgende Fragen: Welche Lage hat das Bild im Vergleich zum Gegenstand; wie beeinflusst die Öffnungsgröße die Güte der Abbildung und die Helligkeit des Bildes ?

.....

2.) Abbildung mit Linsen

T Eine wesentliche Verbesserung der Bilder ergibt sich durch die Verwendung von Sammellinsen. Die Theorie liefert folgende Zusammenhänge:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (\text{Abbildungsgleichung}); \quad \text{und} \quad \frac{G}{g} = \frac{B}{b}$$

g Abstand des Gegenstandes vor der Linse (Gegenstandsweite)

f Brennweite und b Abstand des scharfen Bildes hinter der Linse (Bildweite),

G ... Gegenstandsgröße, B ... Bildgröße

F/R Konstruiere auf der Rückseite mit Hilfe der sogenannten Hauptstrahlen laut Anleitung das Bild eines aufrechten Pfeiles für folgende Daten :

f = 5 cm, g = 9 cm , G = 2 cm.

Überprüfe das Ergebnis für Bildweite b und Bildgröße B mit Hilfe der Theorie und vergleiche mit deiner Zeichnung !



E/P Bilde das vorliegende Dia (auf Diahalter, $g = 35 \text{ cm}$) mit Hilfe der Schülerübungsgeräte und der Linse $f = +100 \text{ mm}$ auf einem Schirm möglichst scharf ab.

Miss die Bildweite b und vergleiche mit der nach obiger Formel berechneten theoretischen Bildweite.

Berechnete $b = \dots\dots \text{ cm}$ gemessene $b = \dots\dots\dots \text{ cm}$

3.) Bau und Funktion des menschlichen Auges

T Das Abbildungssystem des menschlichen Auges besteht im Wesentlichen aus der Hornhaut, der vorderen wassergefüllten Augenkammer, der Linse und dem Glaskörper mit der Netzhaut als Bildschirm. Der Beitrag von Hornhaut und Augenkammer zur Lichtbrechung ist mit etwa 70 % wesentlich größer als der Anteil der Linse, deren Krümmung (und damit Brennweite) allerdings im Gegensatz zur Hornhaut verändert werden kann.

Dadurch können bei gleichbleibender Bildweite (Abstand Linse - Netzhaut) verschieden weit entfernte Gegenstände scharf abgebildet werden (**Akkommodation**).

Die Brechkraft **D** eines Systems wird angegeben in **Dioptrien**

Es gilt der Zusammenhang: $D = 1 / f$ (Angabe von f in Meter !)

F Benenne nach Studium des zur Verfügung stehenden Modellauges mit Hilfe einer **Zeichnung auf der Rückseite** mindestens 5 wesentliche Bestandteile des menschlichen Auges.

Beantworte auch folgende Fragen :

Wie wird die Linsenkrümmung verändert (Druck oder Zugspannungen) ?

.....

Ist die Linse bei Ferneinstellung flach oder stark gekrümmt und sind die dazu nötigen Muskel entspannt oder angespannt ?

.....

Wie erfolgt die **Adaption** d. h. die Anpassung an verschiedene Helligkeiten ?

.....



- E** Bestimme die Brennweite der aus dem Kuhauge herauspräparierten Linse:
 Lege sie auf ein Uhrglas, bilde damit die Glühwendel der senkrecht gehaltenen Lampe scharf auf den Tisch ab und berechne aus den gemessenen Größen g und b die Brennweite f .

$$f = \dots\dots\dots \text{ mm}$$

- T** Die häufigsten Probleme sind Kurz- oder Weitsichtigkeit durch "Baufehler" des Augapfels und altersbedingte Weitsichtigkeit durch nachlassende Elastizität der Linse. Korrigiert werden diese Fehler durch Sammellinsen (bei Weitsichtigkeit) oder Zerstreuungslinsen (bei Kurzsichtigkeit).

Weitsichtigkeit wird korrigiert mittels einer

Kurzsichtigkeit wird korrigiert mit Hilfe von

4.) Bildverarbeitung

- T** Die Weiterverarbeitung des auf der Netzhaut entstehenden Bildes innerhalb der Netzhautschichten und im Gehirn bewirkt erst den Eindruck, den wir von unserer Umwelt haben. Wichtige Leistungen sind unter anderem Akkomodation und Adaption, Farbsehen, räumliches Sehen, zeitliches und räumliches Auflösungsvermögen, Dämmerungssehen, die ständige unbewußte Bewertung und Vervollständigung des Bildes u.v.a.m.

Dabei spielen neben den rein physikalischen Phänomenen viele weitere Faktoren und die phantastische "Rechnerleistung" unseres Gehirnes eine wesentliche Rolle.

- E** **Einige Demonstrationsexperimente sollen das verdeutlichen:**

Rotierende Farbscheibe mit Stroboskop
 Additive Farbmischung mit 3 Lampen, farbige Schatten
 Folien zu Farbenblindheit
 Blinder Fleck - kopfloser Lehrer
 [ev. Vorführungen zum Thema „Optische Täuschungen“ - ppt-Datei]

- F** Nenne mindestens 3 Gründe für räumliches Sehen :

.....



E/P Einige Versuche im **Stationsbetrieb** :

Führe möglichst viele der angegebenen Versuche aus dem vorbereiteten Stationsbetrieb selbständig durch und beschreibe mindestens drei davon in einem **ordentlichen** Sammel-Versuchsprotokoll !

- Bilde eine brennende Kerze mit Hilfe der Wasserlinse ab und verändere die Brennweite Betrachte auch das zerlegbare Augenmodell
- "Zauberspiegel" liefert reelle Bilder, beleuchte das Bild mit dem Laser
- Zeichne mit aufgesetzter Umkehrbrille ein Quadrat auf die Tafel und schütte Wasser aus einem Gefäß in ein nebenstehendes leeres Glas ohne dieses zu berühren!
- Versuche zu "Blinder Fleck" (z. B. 2 kleine Münzen am Tisch im Abstand 8 cm, Kopf etwa 25 cm über dem Tisch)
- Versuche den Umriss vom "Blinden Fleck" auf ein Blatt Papier zu zeichnen !
- Einäugig Glasperlen in eine Flasche werfen bzw. mit Bleistift in Flaschenhals treffen
- Betrachten von 3D - Bildern durch Farbbrillen
- 3D-Bilder durch Entkoppeln von Konvergenzstellung und Akkomodation.
- Auflösungsvermögen und Sinneszellendichte der Netzhaut bestimmen:
Dazu ein Blatt mit waagrechten Strichen (1 mm breit, 1 mm Abstand) an der Wand befestigen und messen der maximalen Entfernung, aus der man noch Einzelstriche erkennt.
Berechnungen laut Beilage (aus: NWiU - PH Nr. 56, S. 16)

Variante: Sehtest von „Licht in die Welt“

Hinweis: Viele weitere Experimente zum Thema "Farbsehen" folgen im NWL7 !



Auflösungsvermögen des Auges

Wir heften eine Kopie der Abb. 3 an eine Wand und entfernen uns so weit von der Wand, dass wir die Striche nicht mehr getrennt sehen, sondern nur noch eine gleichmäßig graue Fläche erkennen können.

Sei z. B. die Entfernung, in der wir die Striche gerade noch unterscheiden können, 6,5 m, so kann das Auflösungsvermögen entweder als "2 mm in 6,5 m Entfernung" bzw. "3,1 mm in 10 m Entfernung" oder als Winkel β angegeben werden.

Im vorliegenden Beispiel ist $\sin \beta = 2/6500 = 0,000308$ und $\beta = 0,0176^\circ$ oder $1,06'$.

Hieraus lässt sich auch der Abstand der Sehzellen in der Netzhautgrube abschätzen, er beträgt rund $2,5 \mu\text{m}$:

Die Rechnung $\sin \beta \cdot b = B$ oder mit der Vergrößerungsgleichung $G/g = B/b$ liefert im obigen Beispiel - $G = 2 \text{ mm}$, $g = 6,5 \text{ m}$, $b = 23 \text{ mm}$ - für die Bildgröße B (Abstand zweier Striche auf der Netzhaut) den Wert $B = 7,08 \mu\text{m}$.

Da wir im Auge aber ein wässriges Medium mit dem Brechungsindex $n = 1,3365$ haben, muss der Strahlensatz, auf dem die Vergrößerungsgleichung beruht, korrigiert werden, indem das Ergebnis durch n geteilt wird. Wir erhalten dann $B' = B/n = 5,3 \mu\text{m}$. An der Auflösungsgrenze muss zwischen zwei benachbarten Sehzellen, auf die die Bilder der Striche fallen, wenigstens eine weitere Sehzelle liegen (Bild des Zwischenraums), so dass der Abstand der Sehzellen im vorliegenden Beispiel ca. $2,6 \mu\text{m}$ beträgt.



Abb. 3: Testfigur zur Sehschärfe: Die Striche haben eine Breite von 1 mm und einen Zwischenraum von ebenfalls 1 mm, der Abstand der Striche beträgt also 2 mm

NaWi i U 56, S. 16

Anmerkung: Menschliches Auge sieht eine brennende Kerze im Abstand von 3 km
 Mit Fernglas sieht man sie in 10 km Entfernung
 Hubble HST sieht sie auf dem Mond
 LBT (Large binocular Telescope, Mount Graham, Arizona, 2007) wird sie in der sechsfachen Mondentfernung sehen : 2,5 Mio km !



Datenblatt zum menschlichen Auge

Das Abbildungssystem des Auges besteht aus Hornhaut, vorderer (wassergefüllter) Augenkammer und Linse und hat zwei verschiedene Brennweiten, da es vorne an Luft (Brechzahl $n = 1$), innen an den Glaskörper (Brechzahl $n' = 1,336$) grenzt.

Durchmesser der Linse : ca 10 mm

Dicke der Linse : zwischen 3,6 und 4,4 mm (je nach Akkomodation)

Krümmungsradius der Linse :

Bei Einstellung auf unendlich vorne 10 mm, hinten 6 mm; bei Naheinstellung nehmen beide bis auf 5,3 mm ab (deutlich stärkere Krümmungszunahme vorne !)

Krümmungsradius der Hornhaut : 8 mm

Bildweite b (Abstand Systemmittelpunkt - Netzhaut) : $b = 23$ mm

Brennweiten f :

Gesamtsystem	vordere BW f	hintere BW f'	nur Linse in Luft
Nahakkommodation (0,1 m)	14,7 mm	19,7 mm	37 mm
Fernakkommodation	17,1 mm	22,8 mm	59 mm

Es gilt: $f/g + f'/b = 1$; $f'/f = n'/n$; $1/g + n'/b = 1/f$

Brechwert (Brechkraft) D :

Ferneinstellung: 58 dpt (Hornhaut + Kammer 41 dpt, Linse 17 dpt, also nur 29 %)

Naheinstellung auf 0,1 m: 68 dpt (H + K 41 dpt, Linse 27 dpt)

Das junge Auge schafft also ein ΔD von 10 dpt, im Alter nimmt die Fähigkeit ab.

Es gilt : $\Delta D = 1 / g_N$ (g_N Entfernung des Nahpunktes in Metern)

Bsp.: Bei $g_N = 80$ cm beträgt ΔD nur mehr 1,25 dpt.

Korrigiert man durch eine Brille mit 1,5 dpt, liegt der Nahpunkt wieder bei 35 cm.



ANHANG

Siehe auch NWiU - PH Nr. 56 bzw. Beilagen !

Komplexität des Sehannes :

Amöben reagieren auf Licht ohne spezielle Lichtsinneszellen
Geißeltierchen haben einen Augenfleck (Ansammlung von rotem Pigment neben Lichtsensor schirmt Licht von einer Seite her ab - Phototaxis dadurch möglich)
Regenwürmer haben unregelmäßig verteilte Lichtsinneszellen und merken nur, ob es in ihrer Umgebung hell oder dunkel ist und grob die Richtung des Lichteinfalles bestimmen (entspricht etwa der Fähigkeit des Wärmesinnes des Menschen)
Meeresschnecken und -würmer entwickelten Grubenaugen (damit war die Richtung des Lichteinfalles bereits besser feststellbar
Nautilus : Verbesserung des Grubenauges zu einem Lochauge - Lochkamera muss Kompromiss zwischen Hell und Scharf eingehen
Quallen, Muscheln und Schnecken entwickeln Linse aber erst Tintenfische und Wirbeltiere haben noch weiter perfektionierte Augen mit Akkomodations- und Adaptionmöglichkeiten sowie räumlichem Sehen.
Insekten haben mit Facettenaugen eine völlig andere Lösung entwickelt. Etwa 28000 Ommatidien bilden einen komplexen Apparat aus Linsen und Lichtleitern, die durch Pigmente voneinander getrennt sind.

Akkomodationslösungen :

Dieses Problem wird in Natur (und Technik) auf verschiedenste Arten gelöst :

Die Jakobsmuschel hat 2 Netzhäute in unterschiedlicher Entfernung zur Linse !

Beim Tintenfischauge wird die Linse bei Naheinstellung stärker gekrümmt und der Augapfel verformt, so dass sich die Netzhaut weiter von der Linse entfernt.

Knochenfische verschieben die Stellung ihrer starren Linse (zur Ferneinstellung wird die Linse nach hinten gezogen d. h. b wird verringert)

Amphibien verschieben ebenfalls ihre starre Linse (zur Naheinstellung wird die Linse nach vorne geschoben, d.h. b wird vergrößert)

Der Sandaal verändert die Krümmung seiner Hornhaut bei gleichbleibender Linse

Reptilien (außer Schlangen) und Vögel ändern die Linsenkrümmung durch Druckausübung auf die Linse.



Leistungsfähigkeit :

Neben diversen Eigenschaften spielt bei der Leistungsfähigkeit von Sinnesorganen auch die Erfahrung und die Zusammenarbeit mit anderen Sinnesorganen eine wichtige Rolle !
Im Laufe der Evolution wurde die Leistungsfähigkeit des Auges auf mehreren Wegen erhöht:
Verbesserung der Sinneszellen selbst, Optimierung des physikalischen Apparates,
Vergrößerung des zugeordneten Hirnareales,

Räumliches Auflösungsvermögen

Sinneszellenabstand beim Mensch etwa $2,5 \mu\text{m}$, bei Greifvögeln Sinneszellendichte wesentlich höher

Zeitliches Auflösungsvermögen

Mensch etwa 18 Bilder pro Sekunde, Stubenfliege (Facettenauge !) mehr als 100 Bilder pro Sekunde

Sehbereich - Gesichtsfeld bzw. Überlappung der beiden Sehfelder

Pferde, Kaninchen beinahe 360° , Hühner sehen im Schnabelbereich praktisch nichts - häufig Schräghaltung des Kopfes
Abwägung großes Gesichtsfeld (frühe Flucht) - räumliches Sehen

Adaption

Dunkeladaption der Zapfen dauert etwa 7 min, bei Stäbchen etwa 30 min
(Helladaption dauert etwa 15 - 60 s)
von max. 100.000 lx (pralle Sonne) bis $0,0003 \text{ lx}$ (sternklare Nacht ohne Mond)
Nachtaktive Tiere haben teilweise "Spiegel" hinter der Netzhaut

Datenfluss in bit / s

Auge 10^7 , Ohr $1,5 \cdot 10^6$, Tastsinn $5 \cdot 10^5$,

Weitere :

Polarisationszustand des Lichtes erkennen
UV - Strahlung sehen (Bienen, ...)
Augen unabhängig voneinander bewegen können (Chamäleon)



Augenkrankheiten :

Hier sind kurz die wichtigsten Augenkrankheiten und ihre Ursachen zusammengestellt :

Grauer Star

Bei den meisten Menschen wird die Augenlinse mit zunehmendem Alter vom Rand her getrübt. Wenn diese Trübungen bis zur Linsenmitte fortschreiten, kommt es zu Sehstörungen. Relativ selten kommen angeborene oder im frühen Kindesalter auftretende Starerkrankungen vor. Der graue Star kann auch infolge übermäßiger Strahlenbelastung, z. B. durch Röntgen- oder Infrarotstrahlung auftreten; hier sind besonders die Glasbläser gefährdet.

In der Regel wird der graue Star heute durch operatives Entfernen der Augenlinsen behoben, die man durch Kunststoff-Linsen im Auge ersetzt. Wegen der fehlenden Akkommodationsfähigkeit dieser Linsen ist nach der Operation immer eine Nahbrille nötig.

Grüner Star

Das Kammerwasser, das von der Bedeckung des Ziliarmuskels gebildet wird, fließt normalerweise durch einen engen Kanal am Rande der vorderen Augenkammer ab. Wird dieser Abfluss gestört, so steigt der Augeninnendruck an, was Schmerzen verursachen, darüber hinaus aber auch die Netzhaut irreversibel schädigen kann. Da der grüne Star (Glaukom) im schlimmsten Fall bis zur Blindheit führt, wird vom Augenarzt bei jedem Patienten routinemäßig der Augeninnendruck gemessen. Auch Menschen ohne offenbare Sehprobleme sollten ab etwa 40 Jahren regelmäßig zur Vorsorge-Untersuchung gehen. Die Senkung eines zu hohen Augeninnendrucks gelingt häufig mit Medikamenten (Augentropfen), in manchen Fällen muss aber auch eine operative Therapie gewählt werden.

Farbenfehlsichtigkeit

Nach der durch von Helmholtz begründeten Dreifarbenstheorie des Farbsehens kommen in unserer Netzhaut drei Zapfenarten mit unterschiedlichen Sehfärbstoffen (Sehpigmenten) vor, die jeweils für verschiedene Wellenlängenbereiche des Lichtes empfindlich sind. Die Schwerpunkte dieser drei Komponenten liegen im roten, grünen und blauen Spektralbereich. Schwächungen oder totale Ausfälle bestimmter Zapfensorten führen zu Farbsinnstörungen. 8,4 % der deutschen Bevölkerung sind farbfehlsichtig und Männer sind zwanzigmal so häufig betroffen wie Frauen. 52 % dieser Männer sind grünschwach, 9 % rotschwach, 25 % grünblind und 14 % rotblind; Blaublindheit ist vergleichsweise selten. Rot- und Grünblindheit führen dazu, dass Rot-, Gelb- und Grüntöne miteinander verwechselt werden. Die ebenfalls seltene totale Farbenblindheit liegt vor, wenn nur eine Zapfensorte arbeitet oder wenn der Betreffende nur mit den Stäbchen sehen kann ("Tagblindheit").

Die relativ häufige Rot- oder Grünblindheit sollte in der Verkehrserziehung, aber auch bei der Vorbereitung zur Berufswahl angesprochen werden.



Schielen

Die beiden Augenachsen sind beim gesunden Menschen normalerweise so gerichtet dass die von den beiden Augen gelieferten Bilder im Gehirn "Übereinander kopiert" und nicht als Doppelbilder wahrgenommen werden. Wenn die Parallelstellung der Augenachsen beim Sehen in die Ferne gestört ist, sprechen wir vom Schielen; dabei handelt es sich um "einwärts Schielen" (konvergierende Augenachsen) oder "auswärts schielen" (divergierende Augenachsen). Da nun die Bilder in den beiden Augen nicht mehr auf korrespondierende Netzhautstellen fallen, entstehen nur Doppelbilder. Diese werden allerdings nicht bewusst wahrgenommen, weil eines der beiden Bilder vom Gehirn unterdrückt wird.

Es gibt verschiedene Ursachen für das Schielen: Wenn das zweiäugige Sehen gestört ist, fehlt der Abgleichmechanismus, der sonst für die jeweils richtige Konvergenz der Augenachsen sorgt, und es kann zum "Begleitschielen" kommen. Der primäre Sehfehler muss daher möglichst frühzeitig behandelt werden, u. U. dadurch, dass man das bessere Auge zeitweise abdeckt. Häufig ist aber das Gleichgewicht zwischen den Augenmuskeln nicht in Ordnung, so dass an einem Auge der Einwärtswender oder der Auswärtswender stärker arbeitet als der jeweilige Gegenspieler. In solchen Fällen können operative Korrekturen an den Augenmuskeln helfen.

Bindehautentzündung

Reizzustände der Bindehaut machen sich durch ein Gefühl der Trockenheit bemerkbar, man glaubt Sand in den Augen zu haben und die Augen sind gerötet und geschwollen, weil sich die feinen Gefäße in der Bindehaut stärker mit Blut füllen. Außer durch mechanische Reize wie z. B. Staub, Rauch oder Wind sowie durch Tauchen in gechlortem Wasser kann eine Bindehautentzündung auch durch intensive UV-Einstrahlung entstehen. Solche Bindehautreizungen klingen im Laufe von zwei bis drei Tagen wieder ab; wenn dies nicht der Fall ist, besteht der Verdacht einer infektiösen Bindehautentzündung, die vom Arzt behandelt werden muss.

Gerstenkorn und Hagelkorn

Hier handelt es sich um Entzündungen der Augenlider. Als Gerstenkorn bezeichnet man eine bakterielle Entzündung, die mit Tränenfluss, Lichtempfindlichkeit und einer schmerzhaften Schwellung des Augenlids einhergeht. Am Entzündungsherd bildet sich Eiter, der nach wenigen Tagen auf der Außen- oder Innenseite des Lides durchbricht; anschließend heilt die betroffene Stelle ab.

An der Innenseite der Augenlider befinden sich die so genannten Meibom-Drüsen, deren Sekret die Lider einfettet. Wenn der Abfluss dieses Sekrets gestört ist, kommt es zu einer chronischen, aber nicht schmerzhaften Entzündung der Drüsen; das aufgestaute Sekret lässt ein hartes Knötchen mit einem Durchmesser bis zu 10 mm entstehen, das Hagelkorn. Sofern dieses nicht nach einiger Zeit von selbst verschwindet, muss es operativ entfernt werden.

