

Aus physikalischer Sicht stellt die Entwicklung der Sehorgane einen der faszinierendsten Zweige im Bereich der Evolution dar.

Betrachte die vier Bilder der „Sehorgane“ des Regenwurms (Flachauge), der Napfschnecke (Grubenaug), des Nautilus-Tintenfischs (Lochkameraauge) und der Weinbergschnecke (einfaches Linsenauge). Überlege, was die Tiere damit wahrnehmen können.

1. Das Auge

1.1 Evolution des Auges

Flachauge



Die Lichtsinneszellen in der Haut des Regenwurms nehmen hell/dunkel wahr (an der Oberfläche ↔ im Boden)

Grubenaug



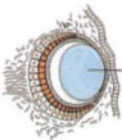
Durch die Grubenform erkennt die Napfschnecke, woher das Licht kommt

Loch(kamera)auge



Beim Nautilus entsteht nach dem Lochkamera-Prinzip ein Bild der Außenwelt
kleine Öffnung → scharf, aber dunkel
große Öffnung → hell, aber unscharf

Einfaches Linsenauge



Die Weinbergschnecke kann in bestimmter Entfernung Hell- und Scharfsehen.
Scharfstellen auf verschiedene Entfernungen ist nicht möglich.

1.1 Evolution des Auges

1

Damit Lebewesen überleben können, müssen sie Informationen aus der Umwelt möglichst gut verarbeiten. Das Auge hat sich dabei an unterschiedlichste Lebensräume angepasst.

Nenne für die angegebenen Tierarten jeweils eine Anpassung des Auges, die der Mensch nicht besitzt.

Komplexes Linsenauge

Viele Lebewesen haben hochspezialisierte Anpassungen des Linsenauges an ihren jeweiligen Lebensraum:

- Katze: Sehen bei Nacht
- Adler: „Adlerauge“
- Fisch: Sehen unter Wasser
- Pinguin: Sehen an Land und unter Wasser
- Papagei: UV-Wahrnehmung

Die Anpassungen werden in späteren Kapiteln ausführlicher thematisiert.

Facettenauge

Da Linsenaugen viel Platz benötigen, haben sich vor allem bei Insekten Facettenaugen entwickelt. Diese bestehen aus „Einzeläugen“, die jeweils einen Bildpunkt wahrnehmen (Ameise ca. 1200, Libelle bis 30 000).

- Vorteil: gute zeitliche Auflösung (bis zu 300 Bilder pro Sekunde; Mensch: 16 Bilder pro Sekunde)
- Nachteil: schlechte räumliche Auflösung (1200 ± ca. 35 x 35 Pixel, 30 000 ± ca. 170 x 170 Pixel)

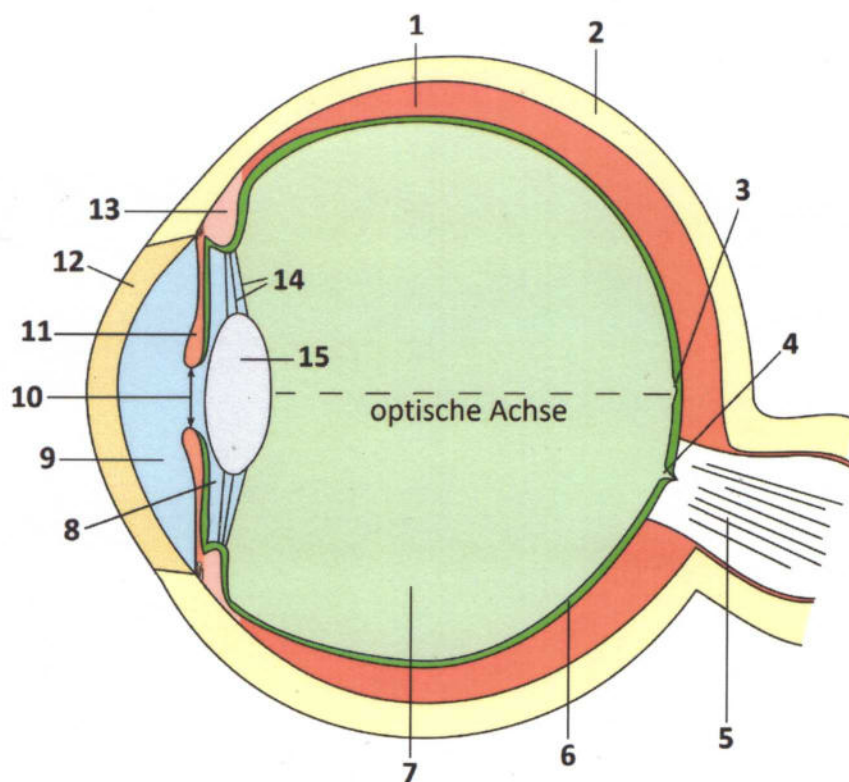
Vor allem bei Insekten, Krebstieren und Spinnentieren haben sich keine Linsenaugen, sondern Facettenaugen (=Komplexaugen) gebildet.

1.1 Evolution des Auges

2

Eine zentrale Rolle spielt für uns natürlich das menschliche Auge. Daher werden wir dies auch sehr ausführlich betrachten.

Das menschliche Auge



[Talos, colored by Jakov https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eye_scheme_multilingual.svg; Nummern geändert]

In einem Experiment kannst du herausfinden, dass dein Auge einen blinden Fleck besitzt. Im Internet findest du zahlreiche Bilder und Anleitungen dazu.

1.1 Evolution des Auges

3

Beschrifte die einzelnen Teile des menschlichen Auges und gib jeweils seine (physikalische) Funktion an.

Nr.	Bezeichnung	(physikalische) Funktion
1	Aderhaut	Versorgung des Auges mit Nährstoffen
2	Lederhaut	Stabilisierung des Augapfels
3	gelber Fleck = Fovea	Stelle schärfsten Sehens
4	blinder Fleck	Stelle ohne Fotorezeptoren
5	Sehnerv	Signalweiterleitung ans Gehirn
6	Netzhaut = Retina	Schirm, Fotorezeptoren → Umwandlung optischer in elektrische Signale
7	Glaskörper	Regulierung des Augeninnendrucks
8	hintere Augenkammer	
9	vordere Augenkammer	
10	Pupille	Regulierung des Lichteinfalls
11	Iris	
12	Hornhaut = Cornea	Lichtbrechung
13	Ziliarmuskel	Regulierung der Linsenkrümmung
14	Zonulafasern	
15	Linse	Lichtbrechung

Experiment: Halte einen Finger ca. 20 cm vors Auge, sodass du ihn deutlich sehen kannst. Eine Wand im Hintergrund erscheint jetzt unscharf. Versuche nun, Wand und Finger gleichzeitig scharfzustellen. Das geht nicht! Wechsle nun mehrfach zwischen Wand und Finger hin und her. Du spürst dabei, dass das Scharfstellen aktiv mithilfe von Muskeln funktioniert.

1.1 Evolution des Auges

4

Das menschliche Auge ist zu komplex, um es physikalisch exakt zu beschreiben. Das reduzierte Auge ist das einfachste physikalische Modell des menschlichen Auges, liefert aber erstaunlich genaue Ergebnisse.

In der 8. Klasse hast du bereits die Linsenabbildung kennengelernt.

Beschrifte die drei Konstruktionsstrahlen und vervollständige den Text.

Konstruiere jeweils das Bild für die drei Gegenstandsweiten. Was lässt sich über das Verhältnis von G zu B bzw. g zu b sagen?

(Da der Fall $g \leq f$ für das Auge nicht relevant ist, wird auf die Betrachtung dieser Fälle verzichtet.)

- $g > 2f \Rightarrow G < B ; g > b$
- $g = 2f \Rightarrow G = B ; g = b$
- $2f > g > f \Rightarrow G > B ; g < b$

Bestimme durch Konstruktion die Bildgröße B und die Bildweite b für: $G = 7,5 \text{ cm}$, $g = 37,5 \text{ cm}$ und $f = 15 \text{ cm}$. Verwende den Maßstab 1:7,5.

$$G = 7,5 \text{ cm} \hat{=} 1 \text{ cm}$$

$$g = 37,5 \text{ cm} \hat{=} 5 \text{ cm}$$

$$f = 15 \text{ cm} \hat{=} 2 \text{ cm}$$

Die auftretenden Größen bei einer Linsenabbildung lassen sich nicht nur zeichnerisch, sondern auch rechnerisch bestimmen. Die Herleitung der Linsengleichungen erfolgt über den Strahlensatz.

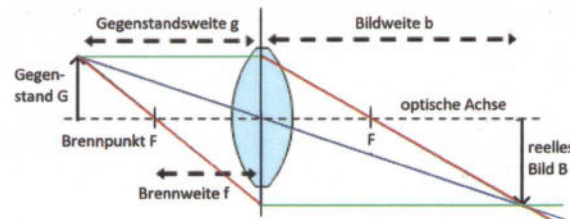
Gib zu den farbigen Figuren die entsprechenden Strahlensätze an. Durch Gleichsetzen der Formeln erhält man die zweite Linsengleichung.

1.2 Abbildung durch Linsen

Das reduzierte Auge

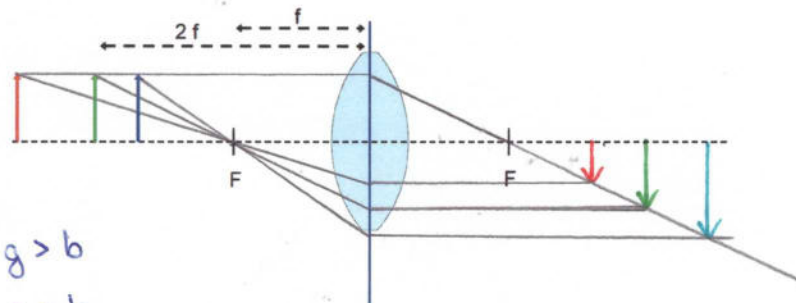
- Hornhaut, Linse $\rightarrow$ eine Sammellinse
- Netzhaut $\rightarrow$ ebener Schirm

Abbildung mit einer Sammellinse



Parallelstrahl
Mittelpunktstrahl
Brennstrahl

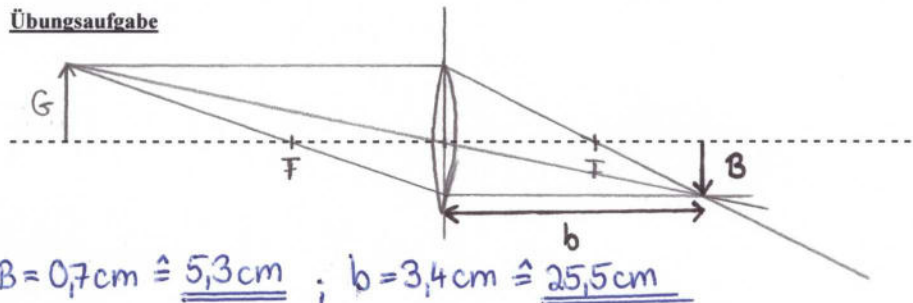
Am gemeinsamen Schnittpunkt liegt die Spitze des Bildes. Nur in dieser Entfernung wird das Bild scharf auf einem Schirm abgebildet.



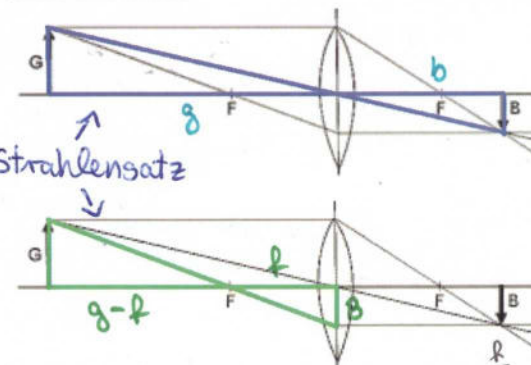
1.2 Abbildung durch Linsen

1

Übungsaufgabe



Linsengleichungen



Strahlensatz

$$\frac{G}{B} = \frac{g}{b} \quad (I)$$

(1. Linsengleichung)

$$\frac{G}{B} = \frac{g-f}{f} \quad (II)$$

$$(I) \text{ in } (II): \frac{g}{b} = \frac{g-f}{f} \Rightarrow \frac{g}{b} = \frac{g}{f} - 1 \Rightarrow \frac{1}{b} = \frac{1}{f} - \frac{1}{g}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \quad (2. \text{ Linsengleichung})$$

1.2 Abbildung durch Linsen

2

Berechne die Bildgröße B und die Bildweite b für das Beispiel auf der Vorderseite: $G = 7,5 \text{ cm}$, $g = 37,5 \text{ cm}$ und $f = 15 \text{ cm}$.

Übungsaufgabe

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \Rightarrow \frac{1}{b} = \frac{1}{f} - \frac{1}{g} = \frac{1}{15 \text{ cm}} - \frac{1}{37,5 \text{ cm}} = \frac{1}{25 \text{ cm}}$$

$$\Rightarrow b = \underline{\underline{25 \text{ cm}}}$$

$$\frac{B}{G} = \frac{b}{g} \Rightarrow B = \frac{b}{g} \cdot G = \frac{25 \text{ cm}}{37,5 \text{ cm}} \cdot 7,5 \text{ cm} = \underline{\underline{5,0 \text{ cm}}}$$

Statt der Brennweite einer Linse kann man auch mit ihrer Brechkraft rechnen. Dies kennst du zum Beispiel von Brillen, deren Brechkraft in Dioptrie angegeben werden.

Brechkraft

Zum einfacheren Rechnen kann man statt der Brennweite f auch die **Brechkraft D** einer Linse verwenden. Dabei ist die Brechkraft der Kehrwert der Brennweite.

$$D = \frac{1}{f} ; [D] = \frac{1}{\text{m}} = 1 \text{ dpt} = 1 \text{ Dioptrie}$$

Beispiel: Brennweite von Brillengläsern mit der Brechkraft 5 dpt:

$$f = \frac{1}{D} = \frac{1}{5 \frac{1}{\text{m}}} = 0,2 \text{ m} = \underline{\underline{20 \text{ cm}}}$$

Optimal hat man nicht eine, sondern zwei nah beieinanderliegende Linsen, zum Beispiel Brille – Auge, Hornhaut – Augenlinse

Linsensysteme

Bei Linsensystemen aus zwei nah beieinanderstehenden Linsen addieren sich ihre Brechkraft.

$$D_{\text{ges}} = D_1 + D_2$$

Achtung: Brennweiten lassen sich nicht addieren!

1.2 Abbildung durch Linsen

3

Berechne die Gesamtbrennweite f_{ges} eines Linsensystems zweier dicht beieinanderstehender Linsen mit den Brennweiten $f_1 = 10 \text{ cm}$ und $f_2 = 15 \text{ cm}$.

Übungsaufgabe

$$D_1 = \frac{1}{f_1} = \frac{1}{0,1 \text{ m}} = 10 \text{ dpt} ; D_2 = \frac{1}{f_2} = \frac{1}{0,15 \text{ m}} = 6,67 \text{ dpt}$$

$$D_{\text{ges}} = D_1 + D_2 = 16,67 \text{ dpt}$$

$$f_{\text{ges}} = \frac{1}{D_{\text{ges}}} = \frac{1}{16,67 \frac{1}{\text{m}}} = 0,06 \text{ m} = \underline{\underline{6,0 \text{ cm}}}$$

Herleitung einer Formel für die Gesamtbrennweite

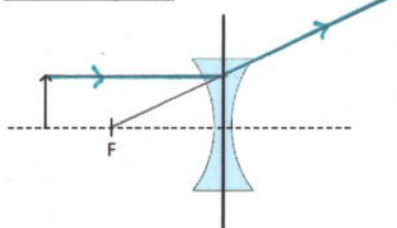
$$D_{\text{ges}} = D_1 + D_2 \Rightarrow \frac{1}{f_{\text{ges}}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{f_2}{f_1 \cdot f_2} + \frac{f_1}{f_1 \cdot f_2}$$

$$= \frac{f_1 + f_2}{f_1 \cdot f_2} \quad \times^{-1} \Rightarrow f_{\text{ges}} = \frac{f_1 \cdot f_2}{f_1 + f_2}$$

Möchte man lieber mit der Gesamtbrennweite rechnen, so gilt die Formel $f_{\text{ges}} = \frac{f_1 \cdot f_2}{f_1 + f_2}$. Diese Formel erhält man, indem man in der Formel für die Gesamtbrechkraft die Brechkraft durch Brennweiten ersetzt und nach f_{ges} auflöst.

Neben Sammellinsen werden für Brillen auch Zerstreuungslinsen benötigt. Damit lässt sich genauso rechnen, allerdings sind ihre Brennweiten und Brechkraft negativ.

Zerstreuungslinse



- weitet Lichtbündel auf
- Brennweite f und Brechkraft D sind negativ

$$\text{z.B.: } f = -0,5 \text{ m} \Rightarrow D = -2 \text{ dpt}$$

Es lassen sich auch schwierige Aufgaben mit den Linsengleichungen lösen. Bearbeite diese Aufgabe auf einem Extrablatt.

Eine harte Nuss

Ein Gegenstand ist 64 cm vom Schirm entfernt. Für eine Abbildung mit einer Sammellinse (Brennweite $f = 12 \text{ cm}$) gibt es zwei Stellen zwischen Gegenstand und Schirm, an denen man die Linse aufstellen kann, damit auf dem Schirm ein scharfes Bild entsteht. Berechne diese Positionen.

1.2 Abbildung durch Linsen

4

Eine harte Nuss:

Abstand Gegenstand - Schirm: $g + b = 64 \text{ cm}$

$$\Rightarrow b = 64 \text{ cm} - g$$

Einsetzen in die Linsengleichung:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

$$\frac{1}{12} = \frac{1}{g} + \frac{1}{64-g} \quad (\text{alle Einheiten in cm})$$

$$\frac{1}{12} = \frac{64-g}{(64-g) \cdot g} + \frac{g}{(64-g) \cdot g}$$

$$\frac{1}{12} = \frac{64}{64g - g^2} \quad | \cdot x$$

$$64g - g^2 = 768$$

$$0 = g^2 - 64g + 768$$

$$g_{1/2} = \frac{64 \pm \sqrt{64^2 - 4 \cdot 1 \cdot 768}}{2} = \frac{64 \pm \sqrt{1024}}{2} = \frac{64 \pm 32}{2} = 32 \pm 16$$

$$\Rightarrow g_1 = \underline{\underline{48 \text{ cm}}} \quad ; \quad g_2 = \underline{\underline{16 \text{ cm}}}$$

Wir wenden nun die 2. Linsengleichung auf das menschliche Auge an.

Berechne für das menschliche Auge den konstanten Wert $\frac{1}{b}$ sowie die nötige Brechkraft des Auges für die Gegenstandsweiten 5 m, ∞ und 20 cm. Für welche Entfernungen ist das entspannte Auge eingestellt? Beschreibe, wie das Auge seine Brechkraft erhöhen kann.

1.3 Akkommodation

Linsengleichung am menschlichen Auge

Auf der Netzhaut entsteht nur dann ein scharfes Bild, wenn die 2. Linsengleichung erfüllt ist. Da die Bildweite (= Abstand Linse – Netzhaut) beim Menschen 1,7 cm beträgt und nicht veränderbar ist, muss das Scharfstellen über eine Veränderung der Brennweite der Linse erfolgen. Das entspannte Auge hat eine Brechkraft von 59 dpt (Hornhaut: 43 dpt, vordere Augenkammer: -3 dpt, Linse: 19 dpt).

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{1,7\text{cm}} = \frac{1}{0,017\text{m}} = 58,8\text{ dpt} = \text{const.}$$

$$g = 5\text{ m}: D = \frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{5\text{m}} + 58,8\text{ dpt} = 0,2\text{ dpt} + 58,8\text{ dpt} = 59\text{ dpt}$$

$$g = \infty: D = \frac{1}{\infty} + 58,8\text{ dpt} = 0 + 58,8\text{ dpt} \approx 59\text{ dpt}$$

$$g = 20\text{ cm}: D = \frac{1}{0,2\text{m}} + 58,8\text{ dpt} = 5\text{ dpt} + 58,8\text{ dpt} \approx 64\text{ dpt}$$

- das entspannte Auge ist auf Fernsicht ($g > 5\text{m}$) eingestellt
- Nahsicht: Kontraktion des Ziliarmuskels $\Rightarrow$ stärkere Krümmung $\Rightarrow$ größere Brechkraft

Die Anpassung des Auges an verschiedene Gegenstandsweiten (Scharfstellen) nennt man

Akkommodation, die maximale Brechkraftänderung

Akkommodationsbreite

Diese beträgt bei einem Kind etwa

15 dpt und nimmt im hohen Alter auf etwa 1 dpt ab (vgl. Altersweitsichtigkeit).

Aus der 8. Klasse kennst du bereits Kurz- und Weitsichtigkeit. Nun kommen noch die Altersweitsichtigkeit und die Hornhautverkrümmung hinzu.

Falls du eine Brille benötigst, bist du mit großer Wahrscheinlichkeit kurzsichtig, kannst also weit entfernte Gegenstände nur verschwommen sehen. Dies beruht häufig auf einem verlängerten Augapfel.

Fehlsichtigkeiten

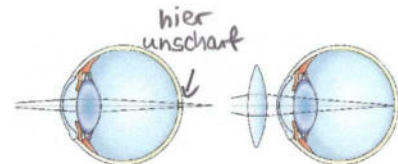
• Weitsichtigkeit:

Auge zu kurz

$\rightarrow$ Bei nahen Gegenständen scharfes Bild hinter der Netzhaut.

(maximales D zu klein)

Korrektur: Sammellinse



[Gumenyuk I.S.; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hypermetropia_color.svg; File: Myopia_and_lens_correction.svg]

• Altersweitsichtigkeit:

Im Alter nimmt die Elastizität der Linse ab. $\rightarrow$ Sie lässt sich nicht mehr so stark

krümmen $\rightarrow$ Die maximale Brechkraft nimmt ab

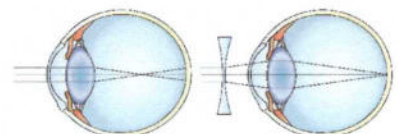
• Kurzsichtigkeit:

Auge zu lang

$\rightarrow$ Bei fernen Gegenständen scharfes Bild vor der Netzhaut.

(minimales D zu groß)

Korrektur: Zerstreuungslinse

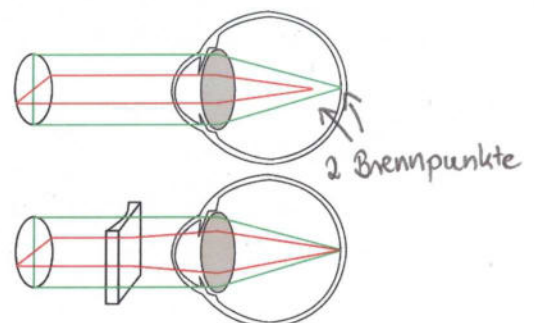


• Astigmatismus (=Stabsichtigkeit, Hornhautverkrümmung):

Die Hornhaut ist horizontal anders gekrümmt als vertikal

$\rightarrow$ 2 Brennpunkte $\rightarrow$ unscharfes Bild

Korrektur: Zylinderlinse



Eine Zylinderlinse ist nur in eine Richtung (hier horizontal) gekrümmt, in die andere Richtung (hier vertikal) nicht. Hier wird also das Licht nur in einer horizontalen Richtung gebrochen, in vertikaler Richtung nicht.

Ob bei dir Astigmatismus vorliegt, kannst du mit dem „Astigmatismus-Rad“ ($\rightarrow$ wikipedia) leicht herausfinden.

Statt einer Brille entscheiden sich immer mehr Menschen dazu, sich die Augen lasern zu lassen. Dabei wird ein Teil der Hornhaut abgetragen, um deren Krümmung zu verändern.

Erkläre, an welchen Stellen die Hornhaut abgetragen werden muss, um Kurz- bzw. Weitsichtigkeit zu beheben.

Übungsaufgabe: Augen lasern ••

Hornhautprofil



- Rand abtragen $\Rightarrow$ größere Krümmung $\Rightarrow$ größere Brechkraft $\Rightarrow$ bei Weitsichtigkeit
- Mitte abtragen $\Rightarrow$ kleinere Krümmung $\Rightarrow$ kleinere Brechkraft $\Rightarrow$ bei Kurzsichtigkeit

Übungsaufgabe: Brillenstärken ••

a) Betrachte ein Auge mit der Brechkraft 59 dpt, aber 1,5 mm zu langem Augapfel. Berechne die nötige Brechkraft für Fernsicht sowie die Brillenstärke der benötigten Brille.

b) Eine altersweitsichtige Person kann ohne Brille nur noch Objekte bis zu einer Entfernung von 45 cm scharf sehen. Berechne die minimale Entfernung, bei der sie noch scharf sehen kann, wenn Sie eine Brille mit +4 dpt aufsetzt.

a) Sehen in die Ferne $\Rightarrow g = \infty$; $b = 17 \text{ mm} + 1,5 \text{ mm} = 18,5 \text{ mm}$

$$D = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{0,0185 \text{ m}} = 54 \text{ dpt}$$

$\Rightarrow$ Brille: Zerstreuungslinse mit $D = -5 \text{ dpt}$

$$b) D_{\text{max}} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{0,45 \text{ m}} + \frac{1}{0,017 \text{ m}} = 2,2 \text{ dpt} + 58,8 \text{ dpt} = 61 \text{ dpt}$$

$$\text{mit Brille: } D_{\text{max}} = 61 \text{ dpt} + 4 \text{ dpt} = 65 \text{ dpt}$$

$$\Rightarrow 65 \text{ dpt} = \frac{1}{g} + 58,8 \text{ dpt}$$

$$6,2 \text{ dpt} = \frac{1}{g} \Rightarrow g = \frac{1}{6,2 \frac{1}{\text{m}}} = 0,16 \text{ m} = \underline{\underline{16 \text{ cm}}}$$

1.3 Akkommodation

3

Die Linsengleichungen sind nur bei unendlich dünnen Linsen exakt. Bei realen Linsen kommt es zu Abweichungen, den sogenannten Linsenfehlern.

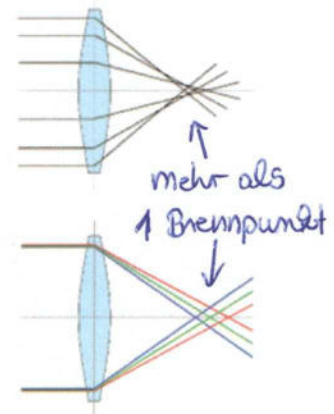
Linsenfehler

• Sphärische Aberration

Randstrahlen werden stärker gebrochen als achsennahe Strahlen. Dieser Effekt ist umso größer, je stärker die Linse gekrümmt ist.

• Chromatische Aberration

Verschiedene Farben werden unterschiedlich stark gebrochen; blau stärker als rot



$\rightarrow$ Linsenfehler sind ein Grund dafür, dass das Auflösungsvermögen des Auges begrenzt ist.

Funktion der Pupille

- Blende $\rightarrow$ Regulation des Lichteinfalls
- Je kleiner die Blende, umso mehr werden achsenferne Strahlen ausgeblendet. Dadurch werden die Aberrationen verringert. Und das Bild wird scharfer; allerdings auf Kosten der Helligkeit

Hierzu kannst du ein einfaches Experiment durchführen: Nähere dich einem Text so nahe, dass du ihn nicht mehr scharf sehen kannst. Halte nun ein Stück Papier mit einem winzigen Loch (z.B. von einer Zirkelspitze) vor dein Auge und betrachte den Text erneut.

Im Sehvorgang bei Mensch und Tier spielt die Lichtbrechung eine entscheidende Rolle. In diesem Kapitel wollen wir die physikalische Gesetzmäßigkeiten dahinter erkunden.

Die Lichtgeschwindigkeit in Wasser lässt sich mit einem Laserentfernungsmesser bestimmen. Da dieses auf Luft „geeicht“ ist, zeigt es beim Durchgang durch ein mit Wasser gefülltes Gefäß eine größere Entfernung an.
Bestimme auf diese Weise experimentell die Lichtgeschwindigkeit in Wasser.

$$s_{\text{real}} = 0,30 \text{ m}$$

$$s_{\text{Messung}} = 0,40 \text{ m}$$

Aus der 8. Klasse kennst du noch die Grundlagen zur Lichtbrechung. Diese werden hier noch einmal wiederholt.

Denke daran, dass der Winkel immer zwischen Lichtstrahl und Einfallslot gemessen wird.

Beschreibe die Ergebnisse aus dem Experiment.

Für den Übergang vom dünneren zum dichteren Medien schauen wir uns die auftretenden Winkel genauer an.

Notiere die Winkel. Welche Regeln findest du?

Beim Übergang vom dichteren zum dünneren Medium treten die gleichen Winkel auf, aber in umgekehrter Richtung.

1.4 Lichtbrechung

Optische Dichte

Licht breitet sich im Vakuum mit der Lichtgeschwindigkeit $c_{\text{Vakuum}} = 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ aus. In Medien (z. B. Wasser, Glas) ist diese Geschwindigkeit c_{Medium} geringer. Je geringer diese Geschwindigkeit ist, umso größer ist die optische Dichte des Mediums. Die optische Dichte wird durch die Brechzahl n beschrieben, wobei gilt:

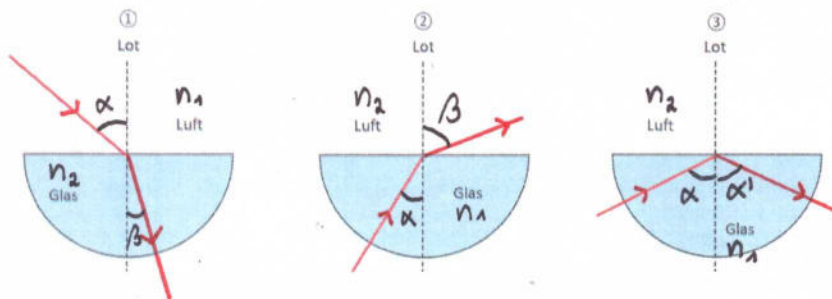
$$n = \frac{c_{\text{Vakuum}}}{c_{\text{Medium}}}$$

Material	n	Material	n
Luft	1,00	Hornhaut	1,38
Wasser	1,33	Linse (Mensch)	1,42
Glas (je nach Art)	1,45 – 2,14	Linse (Fisch)	1,50

$$t_{\text{Wasser}} = \frac{s_{\text{Messung}}}{c_{\text{Luft}}} = \frac{0,40 \text{ m}}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1,33 \cdot 10^{-9} \text{ s}$$

$$c_{\text{Wasser}} = \frac{s_{\text{real}}}{t_{\text{Wasser}}} = \frac{0,30 \text{ m}}{1,33 \cdot 10^{-9} \text{ s}} = \underline{\underline{2,26 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}}$$

Lichtbrechung



1.4 Lichtbrechung

- ① Beim Übergang vom optisch dünneren zum optisch dichteren Medium wird der Lichtstrahl zum Lot hin gebrochen ($\alpha > \beta$).
- ② Beim Übergang vom optisch dichteren zum optisch dünneren Medium wird der Lichtstrahl vom Lot weg gebrochen ($\alpha < \beta$).
- ③ Beim Übergang von dicht nach dünn findet ab einem bestimmten Winkel (=Grenzwinkel) Totalreflexion statt ($\alpha = \alpha'$).

Experiment: Systematische Untersuchung der Winkel

α	30°	40°	50°	60°	70°	80°
β	20°	25°	30°	35°	38°	40°
$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$	1,46	1,52	1,53	1,51	1,53	1,53

$$\leftarrow \frac{n_2}{n_1} = \frac{1,5}{1}$$

Der Quotient der Sinuswerte der Winkel ist konstant. Dieser ist gleich dem Verhältnis der Brechzahlen.

$$\Rightarrow \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{Brechungsgesetz von Snellius}$$

- Die Brechung ist umso stärker, je größer der Unterschied von n_1 und n_2 ist.
- $\alpha = 0^\circ \Rightarrow \beta = 0^\circ$ (unabhängig von n_1 und n_2)
 $\Rightarrow$ Bei senkrechtem Lichteinfall keine Brechung

Ersetzt man die Brechzahlen durch Lichtgeschwindigkeiten im Medium, so erhält man Snellius in einer anderen Form. Diese Form ist vor allem in der Akustik (Kapitel II) sehr praktisch.

Snellius mit Lichtgeschwindigkeiten

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\frac{c_{\text{Vakuum}}}{c_2}}{\frac{c_{\text{Vakuum}}}{c_1}} = \frac{c_1}{c_2} \Rightarrow \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$$

Dass Totalreflexion auftritt, kennst du bereits seit der 8. Klasse. Nun wollen wir den Grenzwinkel α_{grenz} aber mathematisch herleiten.

Totalreflexion

$$\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{n_1}{n_2} \Rightarrow \underbrace{\sin \beta}_{\leq 1} = \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \alpha$$

Das Brechungsgesetz von Snellius liefert kein Ergebnis, wenn $\frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \alpha > 1$ ist, es tritt Totalreflexion auf. Dies ist nur möglich, wenn $n_1 > n_2$ ist, also beim Übergang in ein optisch dünneres Medium. Den Grenzwinkel erhält man, indem man $\sin \beta = 1$ setzt.

$$\text{Grenzwinkel } \alpha_{\text{grenz}} \text{ bei: } \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \alpha_{\text{grenz}} = 1 \Rightarrow \sin \alpha_{\text{grenz}} = \frac{n_2}{n_1}$$

Beispiel: Grenzwinkel für den Übergang „Wasser – Luft“

$$\alpha_{\text{grenz}} = \sin^{-1}\left(\frac{1,0}{1,33}\right) = \underline{\underline{49^\circ}}$$

In einem Medium ist die Lichtgeschwindigkeit 58,7 % geringer als in Vakuum. Bestimme ein mögliches Medium ($\rightarrow$ FS).

Übungsaufgabe: Materialbestimmung •

$$c_{\text{Medium}} = 41,3\% \text{ von } c_{\text{Vakuum}} = 0,413c$$

$$n = \frac{c}{c_{\text{Medium}}} = \frac{c}{0,413c} = 2,42 \Rightarrow \text{Diamant}$$

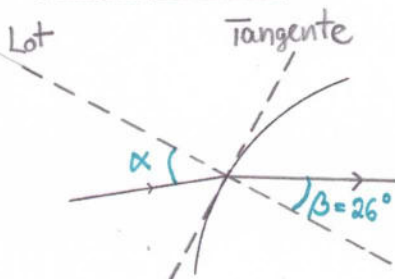
1.4 Lichtbrechung

a) Ein Lichtstrahl trifft aus Luft kommend auf die gekrümmte Hornhaut ($n = 1,38$). Ermittle den weiteren Strahlenverlauf und zeichne diesen ein.

b) Wiederhole die Rechnung aus Aufgabenteil a) für den Fall, dass der Lichtstrahl aus dem Wasser kommend auf die Hornhaut trifft.

c) Erkläre, weshalb ein Mensch unter Wasser nur unscharf, mit Taucherbrille hingegen scharf sehen kann.

Übungsaufgabe: Taucher ••



$$\text{a) } n_1 = 1,00 ; n_2 = 1,38 \\ \alpha = 37^\circ ; \beta = ?$$

$$\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{n_1}{n_2} \quad | \cdot \sin \alpha$$

$$\sin \beta = \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \alpha = \frac{1}{1,38} \cdot \sin 37^\circ \\ = 0,436 \xrightarrow{\sin^{-1}} \Rightarrow \beta = \underline{\underline{26^\circ}}$$

$$\text{b) } n_1 = 1,33 ; n_2 = 1,38 ; \alpha = 37^\circ ; \beta = ?$$

$$\sin \beta = \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \alpha = \frac{1,33}{1,38} \cdot \sin 37^\circ = 0,584 \Rightarrow \beta = \underline{\underline{36^\circ}}$$

$\Rightarrow$ fast keine Brechung

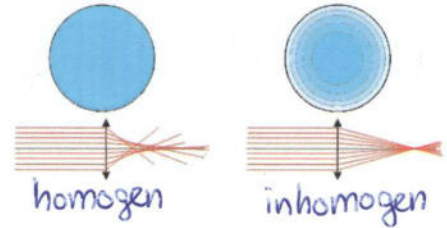
c) Unter Wasser kaum Brechung an der Hornhaut $\rightarrow$ Brechkraft des Auges viel geringer $\rightarrow$ Scharfstellen nicht mehr möglich. Mit Taucherbrille trifft Licht auf Grenzfläche Luft-Hornhaut $\rightarrow$ Taucher sieht wie an Land (An der Taucherbrille selbst darf keine Brechung auftreten.)

Menschen können unter Wasser nicht scharf sehen. Die Brechkraft des Auges ist unter Wasser geringer als an Land und reicht daher nicht aus.

1.5 Sehen unter Wasser

Das Fischeuge

$n_{\text{Wasser}} \approx n_{\text{Hornhaut}}$ → kaum Brechung an der Hornhaut
 → Linse ist fast alleine für die Lichtbrechung zuständig → Die Fischlinse ist optisch dichter ($n = 1,50$) und kugelförmig (maximale Krümmung → maximale Brechkraft)
 → Die Kugellinse hat eine sehr starke sphärische Aberration
 → Um dies auszugleichen ist die Linse inhomogen (außen optisch dünner als innen)



a) Wieso müssen Fische anders akkommodieren als Menschen?

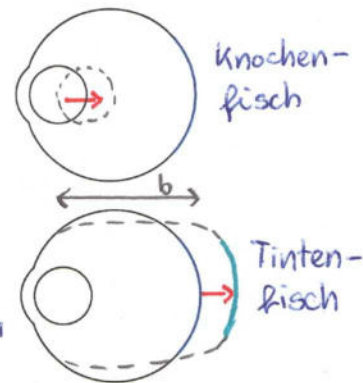
Der Knochenfisch hat einen Muskel, der bei Kontraktion die Linse in Richtung Netzhaut verschiebt. Der Tintenfisch hat einen Muskel um den Augapfel, der bei Kontraktion den Augapfel in die Länge „drückt“ und sich dadurch die Netzhaut von der Linse entfernt.

b) Erkläre, wie die Akkommodation hier funktioniert.

Akkommodation bei Fischen

a) Linse ist bereits kugelförmig
 ⇒ lässt sich nicht noch stärker krümmen

b) Akkommodation durch Veränderung der Bildweite b .
 Knochenfisch kann b aktiv verkleinern, Tintenfisch vergrößern.



1.5 Sehen unter Wasser

c) Sind die Augen im entspannten Zustand auf Nah- oder Fernsicht eingestellt?

c) $\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$ wird g größer, muss b kleiner werden und umgekehrt.
 konstant

entspanntes Auge:

Knochenfisch: b groß → g klein → Nahsicht
 Tintenfisch: b klein → g groß → Fernsicht

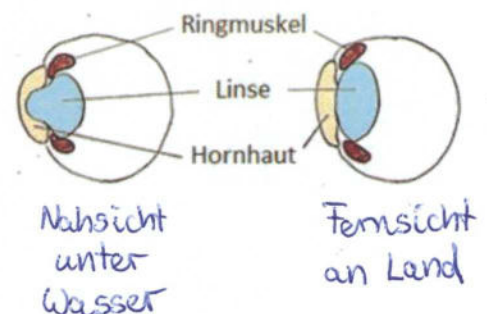
Zahlreiche Tiere leben sowohl im Wasser als auch an Land (z.B. Reptilien, Tauchvögel). Bei diesen Tieren haben sich verschiedene Mechanismen entwickelt, um in beiden Medien scharf sehen zu können.

Der Kormoran (Tauchvogel) hat eine Akkommodationsbreite von 80 dpt. Er kann sowohl an Land als auch unter Wasser scharf sehen (vgl. Abbildung). Beschreibe, wie dies möglich ist und ordne die Abbildungen dem jeweiligen Medium zu.

Sehen an Land und unter Wasser

- Kormoran (Tauchvogel):

Ringmuskel kann vorderen Teil der Linse extrem quetschen (sehr starke Krümmung). Auch die Hornhaut wird stark gekrümmt.



Das Krokodil besitzt eine sogenannte Nickhaut, die vor dem Gang ins Wasser wie ein durchsichtiges Augenlid vor das Auge geschoben wird. Erkläre dieses Prinzip physikalisch. (Die Abb. zeigt die Nickhaut bei einem Maskenkiebitz.)

• Krokodil:

Die Nickhaut ist eine "Taucherbrille", die die Grenzfläche Wasser - Hornhaut verhindert
→ Sehen wie an Land



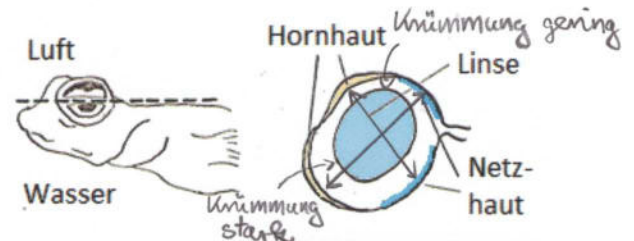
[Toby Hudson; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bird_blink.jpg]

Der Vieraugenfisch ist ein Oberflächenfisch, der zwei große, in zwei Hälften geteilte Augen besitzt. Die eine Hälfte dient zum Sehen über Wasser, die andere zum Sehen unter Wasser (vgl. Abb.). Erkläre, wie der Vieraugenfisch gleichzeitig zwei Bilder fokussieren kann.

• Vieraugenfisch:

"Luftauge" ist normal.
"Wasserauge" hat größere Bildweite b
⇒ geringere Brechkraft nötig

Linse ist stärker gekrümmt
⇒ größere Brechkraft der Linse



[anonym; <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vierauge.jpg>]

Beides zusammen gleicht Brechkraftverlust der Hornhaut unter Wasser aus.

1.5 Sehen unter Wasser

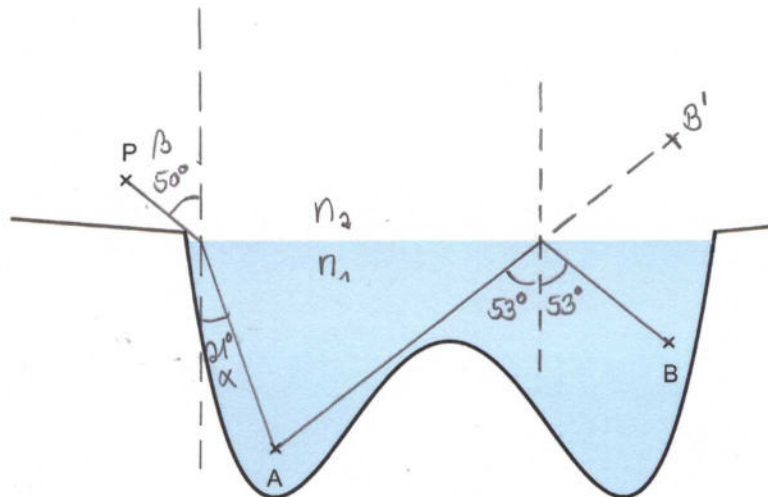
3

Fische haben einen sehr interessanten Blick von ihrer Umgebung.

a) Überprüfe, ob Fisch A den Kopf der Person P sehen kann.

b) Überprüfe, ob sich die beiden Fische A und B sehen können. Beschreibe dein Vorgehen.

Übungsaufgabe: Fischtisch ••



$$a) \sin \beta = \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \alpha = \frac{1.33}{1} \cdot \sin 21^\circ = 0.4766$$

⇒ $\beta = 28^\circ < 50^\circ$ ⇒ A und P können sich nicht sehen

b) Spiegle B an der Wasseroberfläche
Strecke AB' schneidet Wasseroberfläche am Reflexionspunkt

$$\sin \beta = \frac{1.33}{1} \cdot \sin 53^\circ = 1.06 > 1 \Rightarrow \text{Totalreflexion}$$

⇒ A und B können sich sehen.

1.5 Sehen unter Wasser

4

Die Netzhaut spielt eine zentrale Rolle beim Sehvorgang.

1.6 Netzhaut

Grundprinzip

In der Netzhaut werden optische in elektrische Signale umgewandelt. Trifft Licht auf Fotorezeptoren (Stäbchen, Zapfen), so zerfallen Sehfärbstoffmoleküle und setzen einen komplizierten chemischen Prozess in Gang, der ein elektrisches Nervensignal erzeugt. Die Sehfärbstoffmoleküle regenerieren laufend.

Aus der 7. Klasse kennst du bereits die additive Farbmischung, also die Mischung von verschiedenen Lichtfarben.

Auf leifiphysik gibt es hierzu eine passende Simulation: „Additive Farbmischung durch Projektion von Licht der Spektralfarben rot, grün und blau“

Additive Farbmischung

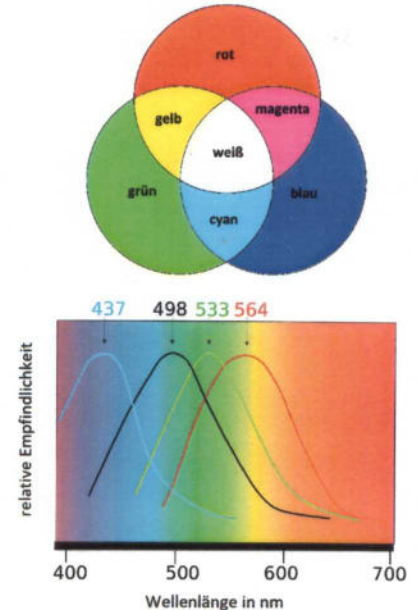
rot + grün → gelb
grün + blau → cyan
rot + blau → magenta
rot + grün + blau → weiß

Alle anderen Farbtöne erhält man, indem man die Lichtstärken der einzelnen Farben variiert.

0 % blau + 50 % grün + 100 % rot → orange

Spektrale Empfindlichkeit der Fotorezeptoren

Die Zapfen (blau, grün, rot) und Stäbchen (schwarz) wandeln Licht abhängig von der Wellenlänge in unterschiedlich starke Nervenimpulse um (vgl. Abb.).



[Pancrat; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Specire_absorption_des_cones.svg, Achsenbeschriftung neu]

1.6 Netzhaut

1

Experiment: Betrachte bei Dunkelheit Kleidungsstücke verschiedener Farben. Was kannst du dabei beobachten?

Stäbchen

- 120 Mio Stück, aber keine am gelben Fleck
- extrem lichtempfindlich → Sehen in der Nacht
- tagsüber Reizüberflutung, da alle Sehfärbstoffmoleküle dauerhaft zerfallen sind
- nur ein Stäbchentyp → nur Hell-Dunkel-Wahrnehmung (keine Farben)
Größte Empfindlichkeit für grünes Licht → In der Nacht werden grüne Farben hellgrau, rote und blaue Farben dunkelgrau wahrgenommen.

Zapfen

- 6 Mio Stück, die meisten am gelben Fleck
- 3 Sorten, die für Licht bestimmten Wellenlängen (Farben: blau, grün, rot) empfindlich sind (vgl. Abb. spektraler Absorptionskurven).
- Der Farbeindruck entsteht dadurch, dass die Zapfentypen unterschiedlich stark aktiviert werden (vgl. additive Farbmischung). Zum Beispiel aktiviert gelbes Licht hauptsächlich rote und grüne Zapfen.
- Sehfärbstoffmoleküle zerfallen nur bei hoher Lichtintensität → Zapfen funktionieren bei Dunkelheit nicht.

Bipolarzellen

- Leiten die elektrischen Signale der Zapfen und Stäbchen an Nervenzellen weiter.
- gelber Fleck: Bipolarzelle leitet die Informationen eines Zapfens an eine Nervenzelle weiter.
- Außerhalb: Bipolarzelle leitet die Informationen mehrerer Zapfen/Stäbchen an eine Nervenzelle weiter (→ erhöhtes Helligkeitsempfinden aber geringere räumliche Auflösung)

Die Verschaltung von Stäbchen und Zapfen ist recht komplex und erfolgt über Horizontalzellen, Bipolarzellen, Amakrine und Ganglienzellen. In der Biophysik werden wir uns ausschließlich auf die Funktion der Bipolarzellen beschränken.

1.6 Netzhaut

2

Die Abbildung zeigt, wie Menschen mit und ohne Farbfehlsichtigkeit die verschiedenen Farben wahrnehmen.

Erkläre, weshalb das Farbempfinden bei Rot- bzw. Grünblindheit sehr ähnlich ist.

Experiment: Mithilfe von Ishihara-Farbtafeln kannst du leicht selbst überprüfen, ob bei dir eine Farbfehlsichtigkeit vorliegt.

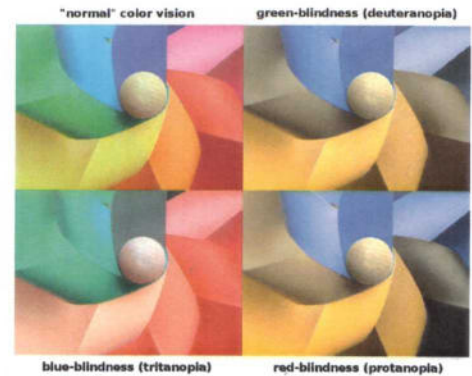
Sehr selten tritt auch eine Stäbchenmonochromasie oder eine Blauzapfenmonochromasie auf. Dabei funktionieren gar keine bzw. nur die blauen Zapfen, Stäbchen sind nicht beeinträchtigt. Beschreibe die Auswirkungen in beiden Fällen die Auswirkungen auf das Sehen bei Tag.

Im Tierreich findet man eine Reihe an Unterschieden zur menschlichen Netzhaut. Einige werden hier erläutert.

Farbfehlsichtigkeit

- Bei der Rot-, Grün- bzw. Blaublindheit fehlt jeweils das entsprechende Zapfenpigment, bei einer Rot-, Grün- bzw. Blauschwäche ist eines der Farbpigmentsysteme schwächer ausgeprägt.
- Häufigkeit der Rot-/Grün-Blindheit/schwäche: Männer 9 %, Frauen 0,5 % (defektes Gen sitzt rezessiv auf dem X-Chromosom. Häufigkeit der Blaublindheit/schwäche: 1:100 000

spektrale Empfindlichkeit von roten und grünen Zapfen ähnlich → ein Ausfall führt zu ähnlichem Farbempfinden → man spricht allgemein von Rot-Grün-Schwäche



[Johannes Ahlmann; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Red_to_Green_Color_Blindness.png]

Übungsaufgabe: Monochromasie ●●

Stäbchenmonochromasie: nur Stäbchen → tagsüber Reizüberflutung → extrem dunkle Brille nötig; nur Hell-Dunkel-Wahrnehmung; sehr unscharf, da keine Stäbchen am gelben Fleck

Blauzapfenmonochromasie: tagsüber sehen mit blauen Zapfen → nur Hell-Dunkel-Wahrnehmung (da nur ein Zapfentyp); rotes Licht aktiviert blauen Zapfen gar nicht, also rot = dunkel

Anpassungen im Tierreich

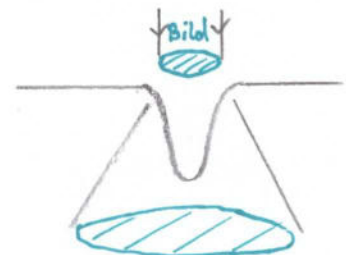
Katzenaugen:

Nachaktive Tiere haben fast nur Stäbchen, von denen bis zu 2500 Stück an eine Bipolarzelle geschaltet sind → extrem helligkeitsempfindlich.
Tapetum lucidum: Lichtreflektierende Schicht hinter der Netzhaut erhöht die Lichtausbeute (daher „leuchten“ Katzenaugen, vgl. Abb.).



Adlerauge:

trichterförmiger gelber Fleck
⇒ Vergrößerung des Bildes, Verbesserung der Auflösung durch mehr Fotorezeptoren

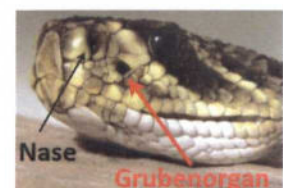


UV- und IR-Wahrnehmung:

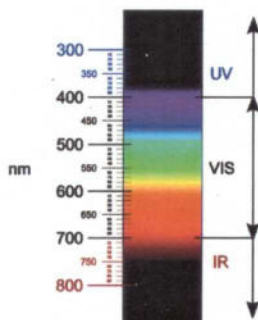
Im elektromagnetischen Spektrum grenzt an das sichtbare Licht ultraviolettes Licht (UV) und infrarotes Licht (IR).

Viele Vögel können UV-Licht wahrnehmen. Dies geschieht über einen weiteren Zapfentyp mit Absorptionsmaximum ca. 370 nm.

Schlangen können IR-Licht (=Wärmestrahlung) wahrnehmen. Dies erfolgt aber nicht durch das Auge, sondern ein Grubenorgan (vgl. Abb.). Dies funktioniert wie ein Grubenauge, nur dass in der Grube eine thermosensible Membran ist, die Temperaturänderungen von ca. 0,003 °C wahrnehmen kann.



[Serpent nirvana; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Pit_Organs_of_Two_Different_Snakes.jpg; Ausschnitt]



[Fulvio314; [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Light_spectrum_\(precise_colors\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Light_spectrum_(precise_colors).svg)]

Die Bestimmung der Sehschärfe ist eine wichtige Kontrolle der Funktion des Auges. Es sind bestimmte Werte erforderlich, um ohne Brille Autofahren zu dürfen oder um Polizist oder Pilot zu werden.

1.7 Sehschärfe

Schwinkel

Der Schwinkel ist der Winkel (ausgehend von der Augenlinsenmitte), unter dem ein Gegenstand betrachtet wird (hier die Öffnung eines Landolt-Rings einer Sehschärftafel).



Neben den Sehschärftafeln mit Landolt-Ringen gibt es auch Tafeln mit Buchstaben oder Zahlen. Das Prinzip ist aber immer das gleiche.

Sehr kleine Winkel werden in Winkelminuten ($1'$) und Winkelsekunden ($1''$) angegeben. Dabei gilt: $1^\circ = 60'$; $1' = 60''$

Berechne die Sehschärfen für $\alpha = 1'$ und $\alpha < 1'$.

Sehschärfe (=Visus)

Unter der Sehschärfe versteht man das **Auflösungsvermögen** des Auges. Diese kann beispielsweise bei einem Sehtest mit Landolt-Ringen untersucht werden. Dabei ist die Öffnung zu erkennen, wenn die beiden Endpunkte des Rings getrennt voneinander wahrgenommen werden können.

Die Sehschärfe berechnet sich dann über den **kleinstmöglichen Schwinkel** α , unter dem diese zwei Endpunkte gerade noch getrennt voneinander wahrgenommen werden können. Es gilt:

$$\text{Sehschärfe} = \frac{1'}{\alpha}$$

$$1' = 1 \text{ Minute} = \left(\frac{1}{60}\right)^\circ$$

$$\alpha = 1' \Rightarrow \text{Sehschärfe} = 1 = 100\% \quad (\text{normales Auge})$$

$$\alpha < 1' \Rightarrow \text{Sehschärfe} > 100\% \quad (\text{gutes Auge})$$

Jugendliche erreichen oft Werte zwischen 120% und 160%.

1.7 Sehschärfe

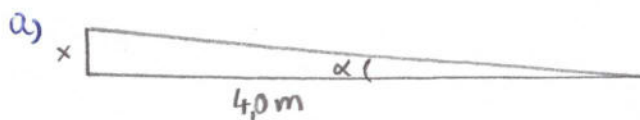
1

a) Berechne die Breite einer Landolt-Ring-Öffnung, mit der in 4,0 m Entfernung eine Sehschärfe von 60 % überprüft werden kann.

b) Angeblich kann man die chinesische Mauer von der ISS aus sehen (Mauerbreite: 10 m, Flughöhe ISS: 370 km). Berechne die dafür nötige Sehschärfe. Interpretiere das Ergebnis.

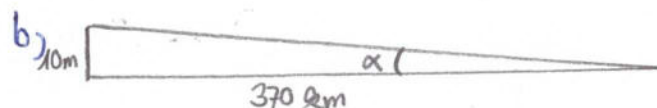
c) Berechne, ab welcher Entfernung eine Person mit Sehschärfe 125 % auf einem Notebook-Bildschirm mit 226 ppi (pixel per inch; 1 inch = 2,54 cm) einzelne Pixel voneinander unterscheiden kann.

Übungsaufgaben: Sehschärftafel, Chinesische Mauer, Bildschirmauflösung ••



$$\text{Sehschärfe} = 0,6 = \frac{1'}{\alpha} \Rightarrow \alpha = \frac{1'}{0,6} = 1,67'$$

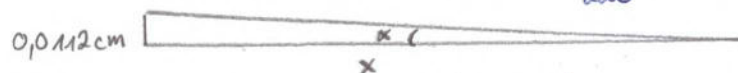
$$\tan \alpha = \frac{x}{4,0 \text{ m}} \Rightarrow x = 4,0 \text{ m} \cdot \tan 1,67' = 0,0019 \text{ m} = \underline{\underline{1,9 \text{ mm}}}$$



$$\tan \alpha = \frac{10 \text{ m}}{370 \text{ 000 m}} = 2,7 \cdot 10^{-5} \Rightarrow \alpha = (1,55 \cdot 10^{-3})^\circ = 0,093'$$

$$\text{Sehschärfe} = \frac{1'}{0,093'} = 10,8 = \underline{\underline{1080\%}} \rightarrow \text{unmöglich!}$$

c) Abstand zweier Pixel: $\frac{2,54 \text{ cm}}{226} = 0,0112 \text{ cm}$



$$\text{Sehschärfe} = 125\% = 1,25 = \frac{1'}{\alpha} \Rightarrow \alpha = \frac{1'}{1,25} = 0,8'$$

$$\tan \alpha = \frac{0,0112 \text{ cm}}{x} \Rightarrow x = \frac{0,0112 \text{ cm}}{\tan 0,8'} = \underline{\underline{48 \text{ cm}}}$$

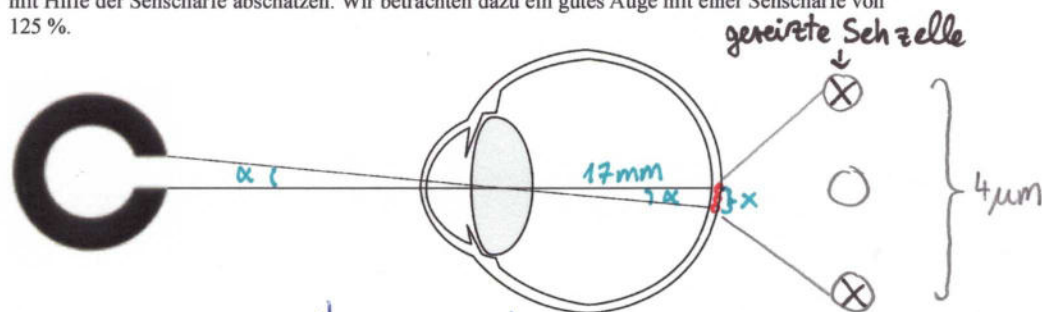
1.7 Sehschärfe

2

Bestimme zunächst den Sehwinkel und damit die Bildgröße auf der Netzhaut. Schätze damit den Abstand zweier Sehzellen ab.

Sehzellendichte des Menschen

Die Sehzellendichte ist ein Faktor, der das Auflösungsvermögen des Auges begrenzt. Diese lässt sich mit Hilfe der Sehschärfe abschätzen. Wir betrachten dazu ein gutes Auge mit einer Sehschärfe von 125 %.



$$\text{Sehschärfe} = 1,25 = \frac{1'}{\alpha} \Rightarrow \alpha = \frac{1'}{1,25} = 0,8'$$

$$\tan 0,8' = \frac{x}{17 \text{ mm}} \Rightarrow x = 17 \text{ mm} \cdot \tan 0,8' = 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ mm} = 4,0 \mu\text{m}$$

Zwei Punkte können gerade noch unterschieden werden, wenn sich zwischen zwei gereizten Sehzellen eine nicht gereizte Sehzelle befindet.

$$\Rightarrow \text{Abstand zweier Sehzellen: } 4 \mu\text{m} : 2 = \underline{2 \mu\text{m}}$$

Dies entspricht auch etwa der tatsächlichen Zapfendichte am gelben Fleck. Da ein Zapfen aber nur eine Breite von 1 µm besitzt, wäre sogar eine größere Zapfendichte möglich. Dadurch würde sich aber das Auflösungsvermögen des Auges nicht verbessern, da es noch einen weiteren Faktor gibt, der das Auflösungsvermögen begrenzt (vgl. folgende Kapitel).

Das Auflösungsvermögen bei Tieren unterscheidet sich teils erheblich von dem des Menschen. Exemplarisch ist hier von einigen Tieren der minimale Sehwinkel angegeben.

Sehwinkel im Tierreich

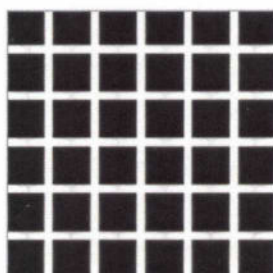
Linsenauge		Facettenauge	
Mäusebussard	0,1'	Biene	60' = 1°
Falke	0,4'	Einsiedlerkrebs	270' = 4,5°
Katze	5'	Taufliege	540' = 9°
Elefant	10'		

Optische Täuschungen

Die Nervenzellen im Auge sorgen für eine Kontrastverstärkung. Dies ist auch sinnvoll, da damit Kanten besser erkannt werden. Allerdings führt dies in manchen Situationen auch zu optischen Täuschungen.

Ist eine Stelle hell, dann sendet die Nervenzelle dort ein großes Signal. Gleichzeitig wird aber auch das Signal der umliegenden Nervenzellen etwas gehemmt. An der Stelle, die fixiert wird, ist das aber nicht der Fall. (Mehr dazu erfährst du im letzten Kapitel bei der neuronalen Signalleitung.)

• Hermann-Gitter:

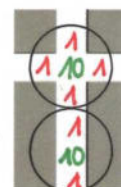


Helligkeit „Kreuzung“:

$$10 - 4 = 6$$

Helligkeit „Straße“:

$$10 - 2 = 8$$



$\Rightarrow$ Kreuzungspunkte erscheinen dunkler.

Im Internet findest du unzählige optische Täuschungen. Viele davon können wissenschaftlich erklärt werden, bei einigen ist dies aber bis heute nicht möglich.

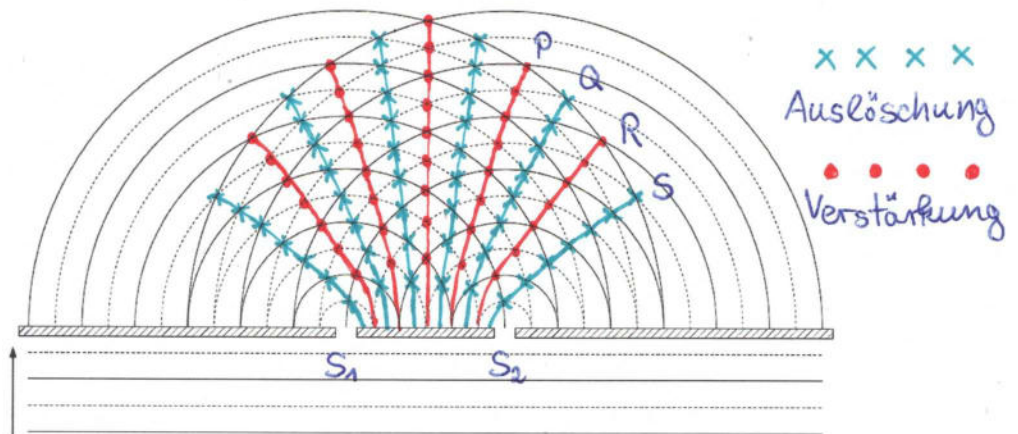
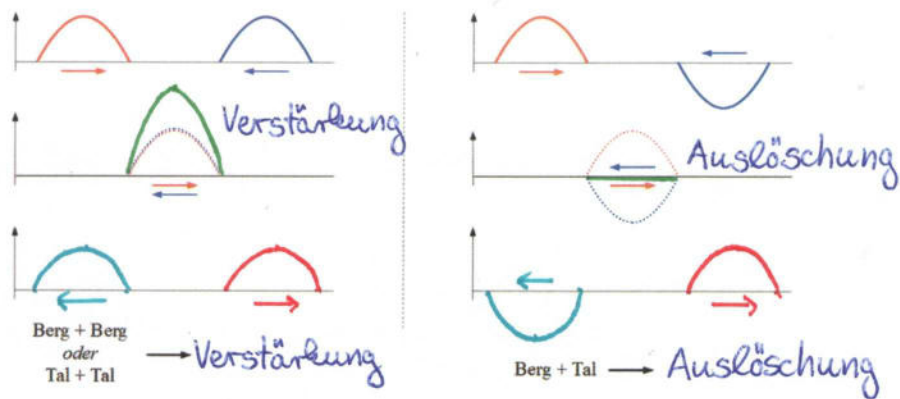
Links begegnen sich zwei Wellenberge, rechts ein Berg und ein Tal. Zeichne jeweils die Gesamtwellen während der Begegnung (Bild 2) sowie die Wellen nach ihrer Begegnung (Bild 3). Ergänze die Beobachtung darunter.

Wenn sich Wellen begegnen, durchlaufen sie sich ohne Störung. Dabei addieren sich an jedem Ort zu jeder Zeit ihre Auslenkungen. Diese Überlagerung nennt man Interferenz.

An einem Doppelspalt laufen die Wellen wie dargestellt nach oben weiter.
Ermittle das Interferenzmuster oberhalb des Doppelspaltes.

1.8 Interferenz am Doppelspalt

Auslöschung, Verstärkung, Interferenz



1.8 Interferenz am Doppelspalt

1

a) Miss den Abstand zweier durchgezogener Linien. Welche Bedeutung hat dieses Maß für die Welle?

b) Bestimme die Abstände der bezeichneten Punkte zu den Spalten S_1 bzw. S_2 und erfasse sie in der Tabelle.

c) Suche eine quantitative Bedingung für Verstärkung bzw. Auslöschung.

Auswertung des Musters – Interferenzbedingungen

Abstand zweier Wellenberge = $\lambda = 0,7 \text{ cm}$

Punkt	Auslö.	Verst.	Abstand zu S_1	Abstand zu S_2	Gangunterschied Δs
P		X	4,2 cm	3,5 cm	0,7 cm = $1 \cdot \lambda$
Q	X		4,2 cm	3,15 cm	1,05 cm = $1,5 \cdot \lambda$
R		X	4,2 cm	2,8 cm	1,4 cm = $2 \cdot \lambda$
S	X		4,2 cm	2,45 cm	1,75 cm = $2,5 \cdot \lambda$

Interferenzbedingungen:

- Verstärkung: $\Delta s = q \cdot \lambda$
- Auslöschung: $\Delta s = (2q-1) \cdot \frac{\lambda}{2} = q \cdot \lambda - \frac{\lambda}{2}$

Vielfache von λ

"komma 5" $\cdot \lambda$

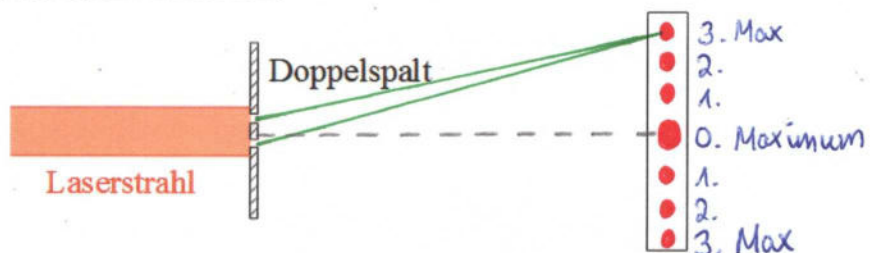
2EN

Auch dieses Experiment liefert ein Ergebnis, das wir von Wasserwellen bereits kennen.

a) Zeichne das Schirmbild und erkläre seine Entstehung.

b) Beschreibe die Änderung des Interferenzmusters, wenn man den Abstand der 2 Spalte verkleinert.

Doppelspaltversuch mit Licht



An beiden Spalten entstehen Wellen, die miteinander interferieren (abhängig vom Gangunterschied Δs)

Verkleinert man den Spaltabstand, so rücken Maxima und Minima weiter auseinander.

1.8 Interferenz am Doppelspalt

2

Quantitative Analyse des Doppelspaltexperiments

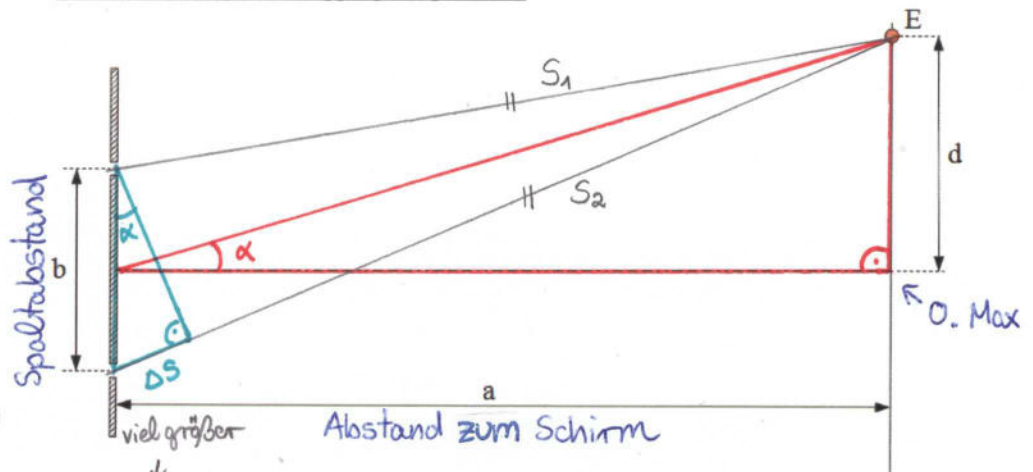
a) Zeichne die Wegstrecken ein, die das Licht von den Spalten bis zur Position E auf dem Schirm zurücklegt.

b) Ermittle graphisch den Unterschied Δs der beiden Wegstrecken durch Einzeichnen eines geeigneten Dreiecks.

c) Stelle eine Formel zur Berechnung des Wegunterschieds auf.

d) Der Winkel taucht ein weiteres Mal innerhalb des Versuchsaufbaus auf. Ermittle auch dafür eine Formel.

e) Wir führen die beiden Formeln gemeinsam zusammen.



Da $a \gg d$, verlaufen s_1 und s_2 nahezu parallel
 $\Rightarrow \alpha = \alpha$

blaues Dreieck: $\sin \alpha = \frac{\Delta s}{b} \Rightarrow \Delta s = b \cdot \sin \alpha \quad (I)$

rotes Dreieck: $\tan \alpha = \frac{d}{a} \quad (II)$

Für Winkel kleiner als 10° gilt die Kleinwinkelnäherung:

$$\sin \alpha \approx \tan \alpha$$

Die Winkel α in diesem Experiment sind ausgesprochen klein. Damit gilt die Kleinwinkelnäherung.

(II) in (I): $\Delta s = b \cdot \frac{d}{a}$

1.8 Interferenz am Doppelspalt

3

f) Notiere die Messwerte für a , b und d_4 des 4. Maximums. Damit können wir nun die Wellenlänge des Lasers ermitteln.

Messwerte:

4. Maximum: $d_4 = 20 \text{ mm}$

$a = 4,0 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ mm}$

g) Berechne, unter welchem Winkel das 4. Maximum auftritt.

h) Wie verändern sich die Abstände bei Verwendung eines grünen Lasers?

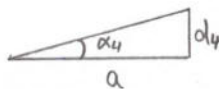
Ersetzt man Δs durch die Bedingungen für Maxima/Minima, so gilt:

Für den Abstand d_k des k -ten zum 0. Maximum gilt: $k \cdot \lambda = b \cdot \frac{d_k}{a}$

Für den Abstand d_k des k -ten Minimums zum 0. Maximum gilt: $(2k-1) \frac{\lambda}{2} = b \cdot \frac{d_k}{a}$

f) $k \cdot \lambda = b \cdot \frac{d}{a} \Rightarrow \lambda = \frac{b \cdot d}{k \cdot a} \stackrel{k=4}{=} \frac{0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 20 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{4 \cdot 4 \text{ m}}$
 $= 6,25 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 625 \cdot 10^{-9} \text{ m} = \underline{\underline{625 \text{ nm}}}$

g)



$\tan \alpha_4 = \frac{d_4}{a} = \frac{0,02 \text{ m}}{4 \text{ m}} = 0,005 \quad | \tan^{-1}$

$\Rightarrow \alpha_4 = \underline{\underline{0,29^\circ}}$

h)

$\lambda \sim d$
 grünes Licht hat kleinere Wellenlänge λ
 $\Rightarrow$ Abstände d werden kleiner

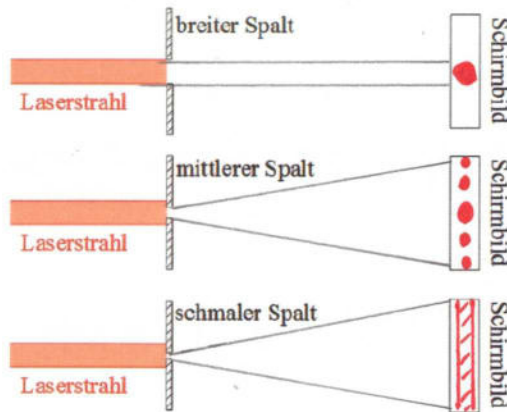
1.8 Interferenz am Doppelspalt

4

Wir führen nun denselben Versuch am Einfachspalt durch. Notiere deine Beobachtungen an einem breiten, mittleren und schmalen Spalt.

1.9 Interferenz am Einfachspalt

Beugung am Einfachspalt



Licht geht unverändert durch

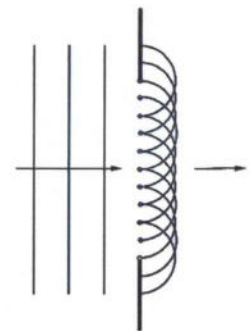
Es entsteht ein Interferenzmuster

Der Laserpunkt „zerfließt“

Das Konzept wurde bereits 1678 vom Niederländer Christiaan Huygens vorgeschlagen. Damit lassen sich sämtliche Ausbreitungsphänomene von Wellen erklären.

Huygens'sches Prinzip

Jeder Punkt einer Wellenfront kann als Ausgangspunkt von Elementarwellen (Kreiselwellen) angesehen werden.



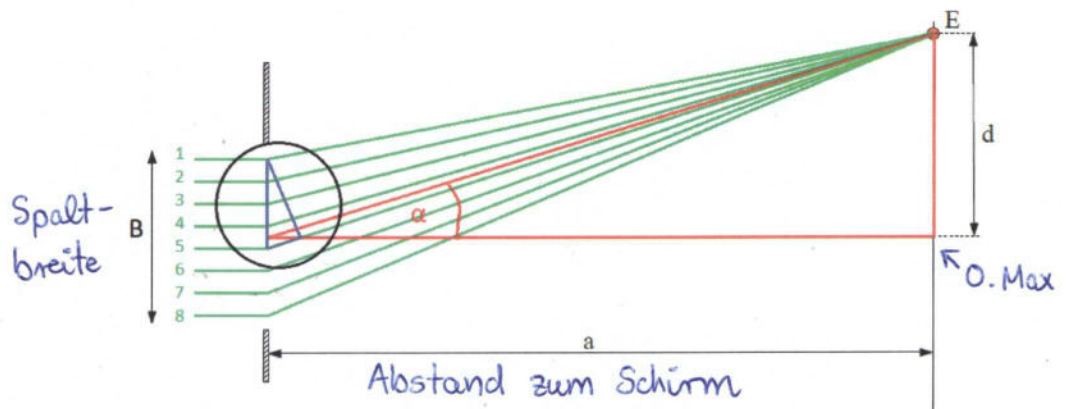
1.9 Interferenz am Einfachspalt

1

Wir wollen nun den Einfachspalt quantitativ beschreiben. Die Geometrie ist ähnlich zu der beim Doppelspalt, allerdings sind die Interferenzbedingungen hier schwieriger zu finden.

Quantitative Analyse des Einfachspalts:

Wir betrachten am Einfachspalt nun exemplarisch acht Elementarwellen (nach dem Huygens'schen Prinzip).



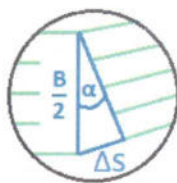
Für ein Interferenzmaximum lässt sich kein einfaches Kriterium finden, dafür aber für das Interferenzminimum 1. Ordnung:

Ist der Gangunterschied Δs zwischen dem 1. und 5. Strahl gleich $\frac{\lambda}{2}$, dann löschen sie sich aus. Dies gilt dann auch für die Strahlen 2 und 6, 3 und 7 sowie 4 und 8. Es löschen sich also alle Strahlen aus.

1.9 Interferenz am Einfachspalt

2

Fortsetzung ...



blaues Dreieck: $\sin \alpha = \frac{\Delta s}{\frac{B}{2}} \Rightarrow \Delta s = \frac{B}{2} \cdot \sin \alpha$

rotes Dreieck: $\tan \alpha = \frac{d}{a}$

$\sin \alpha \approx \tan \alpha$

Mit der Kleinwinkelnäherung folgt:

$$\Rightarrow \Delta s = \frac{B}{2} \cdot \frac{d}{a}$$

Ersetzt man Δs durch die Bedingung für das Minimum 1. Ordnung, so gilt:

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{B}{2} \cdot \frac{d_1}{a} \quad | \cdot 2$$

Minimum 1. Ordnung:

$$\lambda = B \cdot \frac{d_1}{a}$$

(In der Formelsammlung finden sich auch die allgemeinen Formeln für die Minima k-ter Ordnung sowie die Maxima k-ter Ordnung. Für die Betrachtung am Auge (Kap. 1.10.) ist aber nur das Minimum 1. Ordnung relevant.)

1.9 Interferenz am Einfachspalt

Menschliches Kopfhair hat meist eine Dicke von 60-100 μm . Um die Dicke eines Haares zu bestimmen, wird dieses in einen Rahmen gespannt und mit einem Laser beleuchtet. Nach dem Babinet'schen Prinzip erzeugen komplementäre Blenden (z.B. Haar der Breite B und Spalt der Breite B) dasselbe Interferenzmuster.

Wir messen die Breite des Hauptmaximums und berechnen damit die Dicke eines Schülerhaars.

(Die Breite des Hauptmaximums entspricht dem Abstand der beiden Minima 1. Ordnung.)

Experiment: Bestimmung der Haardicke ••



Schirmabstand: $a = 4,0 \text{ m}$

Wellenlänge Laser: $\lambda = 633 \cdot 10^{-9} \text{ m}$

Breite Hauptmaximum: $7,2 \text{ cm} \Rightarrow d_1 = 7,2 \text{ cm} : 2 = 3,6 \text{ cm}$

$$\lambda = B \cdot \frac{d_1}{a} \quad | \cdot \frac{a}{d_1}$$

$$B = \lambda \cdot \frac{a}{d_1} = 633 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \frac{4,0 \text{ m}}{0,036 \text{ m}} = 7,03 \cdot 10^{-5} \text{ m} = \underline{\underline{70 \mu\text{m}}}$$

Im Experiment ist zu erkennen, dass das Hauptmaximum immer breiter wird, wenn man die Spaltbreite verkleinert. Ab einer bestimmten Spaltbreite gibt es gar kein Interferenzmuster mehr. Zeige, dass dies für $B < \lambda$ der Fall ist.

Übungsaufgabe: zerfließender Laserpunkt •••

kein Interferenzmuster $\Rightarrow$ Das 1. Minimum bei $\Delta s = \frac{\lambda}{2}$ existiert nicht

$$\sin \alpha = \frac{\Delta s}{\frac{B}{2}} \Rightarrow \sin \alpha = \frac{2\Delta s}{B} \Rightarrow \sin \alpha = \frac{\lambda}{B}$$

$\underbrace{\leq 1} \quad \underbrace{> 1}_{\text{für } B < \lambda}$

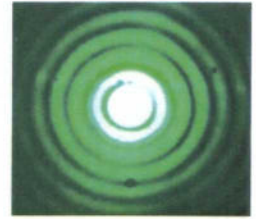
$\Rightarrow$ Ist $B < \lambda$, so verschwindet das Interferenzmuster.

Nun wird der Spalt durch eine Lochblende ersetzt.
Notiere deine Beobachtungen.

1.10 Interferenz am Auge

Interferenz an der Lochblende

Es entsteht ein kreisförmiges Hauptmaximum sowie kreisförmige Nebenmaxima und -minima, sogenannte Beugungsscheibchen.



Das Interferenzmuster entsteht ähnlich wie beim Einfachspalt, allerdings mit einem Korrekturfaktor. Da die Herleitung davon allerdings extrem kompliziert ist, wird dieser hier nur angegeben.

Minimum 1. Ordnung:

$$1,22 \lambda = B \cdot \frac{d_1}{a}$$

Neben dem Auge treten Interferenzerscheinungen auch bei optischen Instrumenten wie Mikroskopen auf. Daher ist bei Mikroskopen eine beliebig starke Vergrößerung nicht möglich.

Interferenz am Auge

Die Pupille ist physikalisch gesehen nichts anderes als eine Lochblende. Daher treten Interferenzerscheinungen auch im Auge auf. Gegenstandspunkte werden also auf der Netzhaut nicht auf Bildpunkte, sondern auf Beugungsscheibchen abgebildet. Dies begrenzt das Auflösungsvermögen des Auges.

Es braucht ein Entscheidungskriterium, wann zwei Beugungsscheibchen noch getrennt voneinander wahrgenommen werden können. Rayleigh hat dafür ein sehr einfaches und praktikables Kriterium aufgestellt, das auch in der Realität sehr gute Ergebnisse liefert.

Auflösungsgrenze nach Rayleigh

Das Rayleigh-Kriterium liefert eine praktikable Bedingung dafür, dass zwei Punkte, die auf Beugungsscheibchen abgebildet werden, noch getrennt voneinander wahrgenommen werden können.

Die Abbildung zeigt jeweils die Beugungsscheibchen zweier Bildpunkte auf der Netzhaut:



deutlich unterscheidbar; Abstand $> d_1$
(Abstand der Mittelpunkte größer als der Abstand des 1. Minimums d_1)



gerade noch unterscheidbar;
Abstand $= d_1$



nicht mehr unterscheidbar;
Abstand $< d_1$

Rayleigh-Kriterium: Zwei Punkte sind gerade noch getrennt voneinander wahrnehmbar, wenn das Hauptmaximum des einen Beugungsscheibchens in das 1. Minimum des anderen Beugungsscheibchens fällt. In diesem Fall gilt:

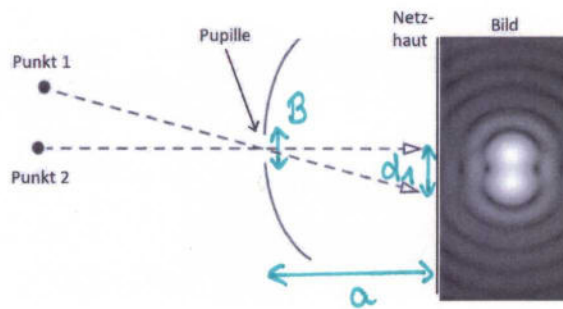
$$1,22 \lambda = B \cdot \frac{d_1}{a}$$

Das Auflösungsvermögen des Auges wird nicht nur von der Sehzellendichte, sondern auch von der Größe der Beugungsscheibchen auf der Netzhaut begrenzt.

Trage die entsprechenden Größen des menschlichen Auges ein. Berechne mithilfe von Rayleigh, in welchem Abstand zwei Beugungsscheibchen auf der Netzhaut gerade noch getrennt voneinander wahrgenommen werden können. Vergleiche dies mit der Sehzellendichte aus Kapitel 1.7

Auflösungsvermögen des Auges

Um die Begrenzung des Auflösungsvermögens des Auges durch Beugungserscheinungen zu bestimmen, betrachten wir zwei Punkte, die gerade noch getrennt voneinander wahrgenommen werden können.



Abstand Pupille – Netzhaut:

$$a = 25 \text{ mm}$$

Pupillendurchmesser Tageslicht:

$$B = 4 \text{ mm}$$

Licht mittlerer Wellenlänge:

$$\lambda = 550 \text{ nm}$$

$$\text{Rayleigh: } 1,22 \lambda = B \cdot \frac{d_1}{a}$$

$$\Rightarrow d_1 = 1,22 \lambda \cdot \frac{a}{B} = 1,22 \cdot 550 \text{ nm} \cdot \frac{25 \text{ mm}}{4 \text{ mm}} = 4194 \text{ nm} = \underline{\underline{4,2 \mu\text{m}}}$$

Stimmt genau mit der Sehzellendichte des Auges überein. Eine Erhöhung der Sehzellendichte würde also nicht mehr zu einer besseren Auflösung führen.

Reicht das Auflösungsvermögen des Auges nicht aus, kann man zu optischen Geräten greifen. In der 8. Klasse hast du bereits die Lupe und das (Licht-)Mikroskop kennengelernt. Doch auch bei einem Mikroskop sind keine beliebig starken Vergrößerungen möglich. Hierbei spielt wieder das Rayleigh'sche Auflösungskriterium eine Rolle.

LOUIS DE BROGLIE stellte 1924 die Theorie auf, dass Elektronen neben Teilcheneigenschaften auch Welleneigenschaften besitzen. Dies wurde 1927 von THOMSON und DAVISSON unabhängig voneinander experimentell bestätigt. De Broglie, Thomson und Davison erhielten den Nobelpreis für Physik.

1931 bauten ERNST RUSKA und MAX KNOLL das erste TEM. Ruska erhielt dafür 1986 den Nobelpreis für Physik.

Mit dem Rasterkraftmikroskop lassen sich Bilder mit atomarer Auflösung anfertigen. Es wurde 1985 unter anderem vom deutschen Physik GERD BINNIG entwickelt. 1986 erhielt er den Nobelpreis für Physik, allerdings für die Entwicklung des Rastertunnelmikroskops.

*Ausblick: Auflösungsvermögen von Mikroskopen

• Lichtmikroskop:

Ein Lichtmikroskop besteht aus zwei Linsen. Da die Linsen gleichzeitig Lochblenden sind, entstehen Beugungsscheibchen, die das Auflösungsvermögen begrenzen. Weil das Rayleigh'sche Auflösungskriterium von der Wellenlänge λ des verwendeten Lichts abhängt und das Lichtmikroskop nur mit sichtbarem Licht funktioniert, lassen sich nur Punkte getrennt voneinander betrachten, die einen Abstand von mindestens 200 nm haben. Damit ist es beispielsweise möglich, Zellen zu untersuchen. Einzelne Atome oder Moleküle hingegen können nicht sichtbar gemacht werden.

• Materiewellen:

Eine Verbesserung der Auflösung kann nur erreicht werden, wenn die verwendete Wellenlänge kleiner ist als die des sichtbaren Lichts. Hier kommt die Quantenphysik ins Spiel. Quantenobjekte (z.B. Elektronen) verhalten sich bei ihrer Ausbreitung wie Wellen und bei der Wechselwirkung mit Materie wie Teilchen. Damit besitzt auch jedes Elektron, das sich bewegt, eine Wellenlänge. Diese ist umso kleiner, je größer die Geschwindigkeit des Elektrons ist. Dabei werden Wellenlängen erreicht, die mehrere Größenordnungen kleiner sind als die des sichtbaren Lichts.

• Elektronenmikroskop (TEM):

Der prinzipielle Aufbau eines Transmissionselektronenmikroskops (TEM) ist identisch mit dem Aufbau eines Lichtmikroskops. Die Glaslinsen sind durch magnetische Linsen ersetzt (stromdurchflossene Spulen erzeugen ein inhomogenes Magnetfeld, am Rand stärker als in der Mitte), im Mikroskop ist Vakuum und das Objekt ist in eine ultradünne Scheibe geschnitten (10-100 nm). Da die Abbildungsqualität von magnetischen Linsen schlechter ist als von Glaslinsen, begrenzt dies aktuell das Auflösungsvermögen. Derzeit liegt die Grenze bei 0,1 nm, was etwa einem Atomdurchmesser entspricht.

• Rasterkraftmikroskop:

Mit einer sehr scharfen Spitze (im Idealfall ein Atom) wird die Probenoberfläche abgetastet. Zwischen Spitze und Probe wirken Kräfte (z.B. Van-der-Waals-Kräfte), die umso kleiner sind, je größer der Abstand zwischen Spitze und Probe ist. Die Kräfte sorgen für eine Auslenkung der Spitze, welche z.B. über einen Laser detektiert werden kann. Ein Computer setzt diese Informationen zu einem Abbild der Oberfläche zusammen.

