

1 Bildentstehung im Auge

Materialien zu Kapitel 1.1

► M1 Lernaufgabe: Modelle über Modelle: Licht, Sehvorgang und Auge

Arbeitsauftrag Seite 14

- a) Sehstrahl-Modell: Das Auge sendet aktiv einen Sehstrahl aus. Man sieht nur Gegenstände, die vom Sehstrahl erfasst werden (Sendemodell).

Empfangsmodell von Alhazen: Alhazen erkannte als einer der ersten, dass das Licht, das von einem Gegenstand ins Auge gelangt, gesehen wird (Empfangsmodell) und der Sehvorgang nicht durch Aussenden eines Sehstrahls aktiv erfolgt (Sendemodell).

Keplers Theorie des Netzhautbildes: Lichtstrahlen, die von Gegenständen reflektiert werden oder von Lichtquellen ausgesendet werden, gelangen über Cornea und Linse ins Auge. Auf der Netzhaut entsteht ein reelles Bild des Gegenstandes.

- b) Individuelle Lösungen. Beispiele:

- Strahlenmodell: Versuche zur Sichtbarmachung geradliniger Lichtausbreitung oder Schattenentstehung
- Photonenmodell: Photoeffekt
- Wellenmodell: Doppelspaltexperiment von Thomas Young

- c) **Strahlenmodell:**

Licht wird in diesem Modell als Lichtstrahl beschrieben. Lichtstrahlen breiten sich normalerweise geradlinig aus. Nur bei einem Medienwechsel oder an Spiegeln kann der Lichtstrahl die Richtung wechseln. Den Richtungswechsel bei einem Medienwechsel nennt man Brechung. Der Richtungswechsel an einem Spiegel wird durch das Reflexionsgesetz beschrieben.

Teilchenmodell:

Licht wird in diesem Modell als Photon beschrieben. Photonen sind dabei Energiepakete. Die Energie der Photonen ist für den Sinneseindruck Farbe verantwortlich. Dabei sind die Photonen von violetterem Licht energiereicher als die Photonen von rotem Licht. Alle Photonen bewegen sich mit der gleichen Geschwindigkeit: der Lichtgeschwindigkeit. Photonen sind punktförmig und unteilbar. Die Anzahl der Photonen ist für den Sinneseindruck Helligkeit (Lichtintensität) verantwortlich. Photonen können von Atomen absorbiert oder emittiert werden. Dies kann man mit dem Energiestufenmodell beschreiben.

Wellenmodell:

Licht wird als elektromagnetische Welle beschrieben. Jeder Punkt der Wellenfront kann als Ausgangspunkt einer kreisförmigen Elementarwelle angesehen werden. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist die Lichtgeschwindigkeit. Wie alle Wellen wird Licht durch eine Amplitude und eine Frequenz beschrieben. Über die Wellengleichung $c = \lambda \cdot f$ sind die Wellenlänge und die Frequenz miteinander verknüpft (dies ist aus Jahrgangsstufe 11 bekannt). Die Wellenlänge (bzw. Frequenz) des Lichts ist für den Sinneseindruck Farbe entscheidend, die Amplitude für den Sinneseindruck Helligkeit (Lichtintensität). Wie bei allen Wellen treten bei Licht die Phänomene Beugung und Interferenz auf.

- d) Zur Beschreibung der Bildentstehung im Auge ist das Strahlenmodell des Lichts am besten geeignet. Es ist am stärksten vereinfacht, ermöglicht Vorhersagen zum Ergebnis von Experimenten und erklärt trotzdem alle Phänomene im Zusammenhang mit der Abbildung durch Linsen.
- e) Das Strahlenmodell macht keinerlei Aussagen zu Farben. Es sind daher keine Vorhersagen zu Farben möglich, die verifiziert oder falsifiziert werden können. Sowohl das Teilchenmodell des Lichtes (unterschiedliche Farben entsprechen unterschiedlichen Energien der Photonen) als auch das Wellenmodell des Lichtes (unterschiedliche Farben entsprechen unterschiedlichen Wellenlängen der elektromagnetischen Strahlung) können Farben erklären. Ausschließlich das Wellenmodell des Lichtes kann über die Phänomene Beugung und Interferenz erklären, warum das Auflösungsvermögen des Auges grundsätzlich limitiert ist. Das Strahlenmodell macht hierzu keinerlei Aussagen.

Materialien zu Kapitel 1.3

► M2 Lernaufgabe: Verschiedene Augen im Tierreich

Arbeitsauftrag Seite 15

a)

gemeinsame Strukturen der Wirbeltieraugen	ggf. Entsprechung im Linse-Schirm-Modell
Cornea und Linse	Linse
Netzhaut	Sichtschirm
Iris und Pupille	Lochblende im erweiterten Linse-Schirm-Modell
Aderhaut, Lederhaut, Sehnerv	im Linse-Schirm-Modell nicht erfasst
Pecten oculi	kammartige Struktur im Auge von Vögeln, die das Auge mit Nährstoffen versorgt; im Linse-Schirm-Modell nicht erfasst
Tapetum lucidum	lichtreflektierende Schicht im Auge von nacht-aktiven Tieren, soll die Lichtausbeute erhöhen; im Linse-Schirm-Modell nicht erfasst
Ligament	Teil des Halteapparats des Augapfels; im Linse-Schirm-Modell nicht erfasst

b) Linsengleichung: $\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$

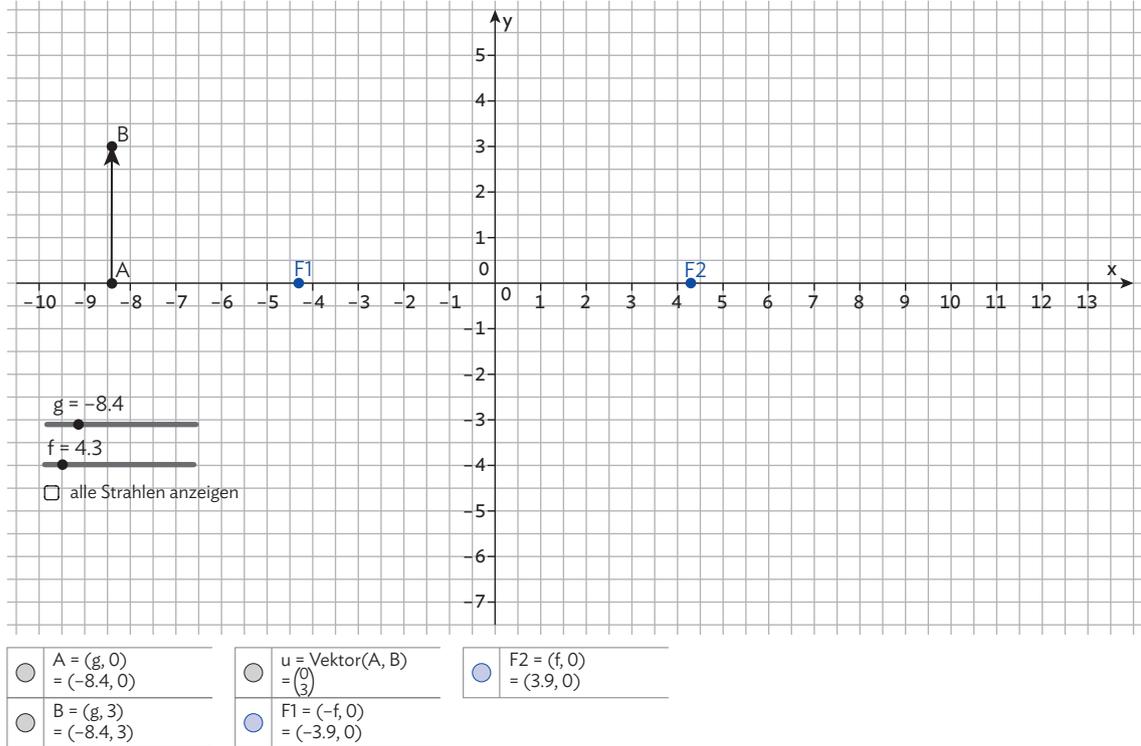
Es entsteht nur dann eine scharfe Abbildung, wenn die Linsengleichung erfüllt ist. Verändert sich g , so muss entweder f oder b angepasst werden, damit die Gleichung wieder erfüllt ist.

- c) Tintenfische und Menschen können die Bildweite im Auge bzw. die Brennweite der Linse durch entsprechende Muskeln anpassen. Weinbergschnecken verfügen nicht über derartige Möglichkeiten.

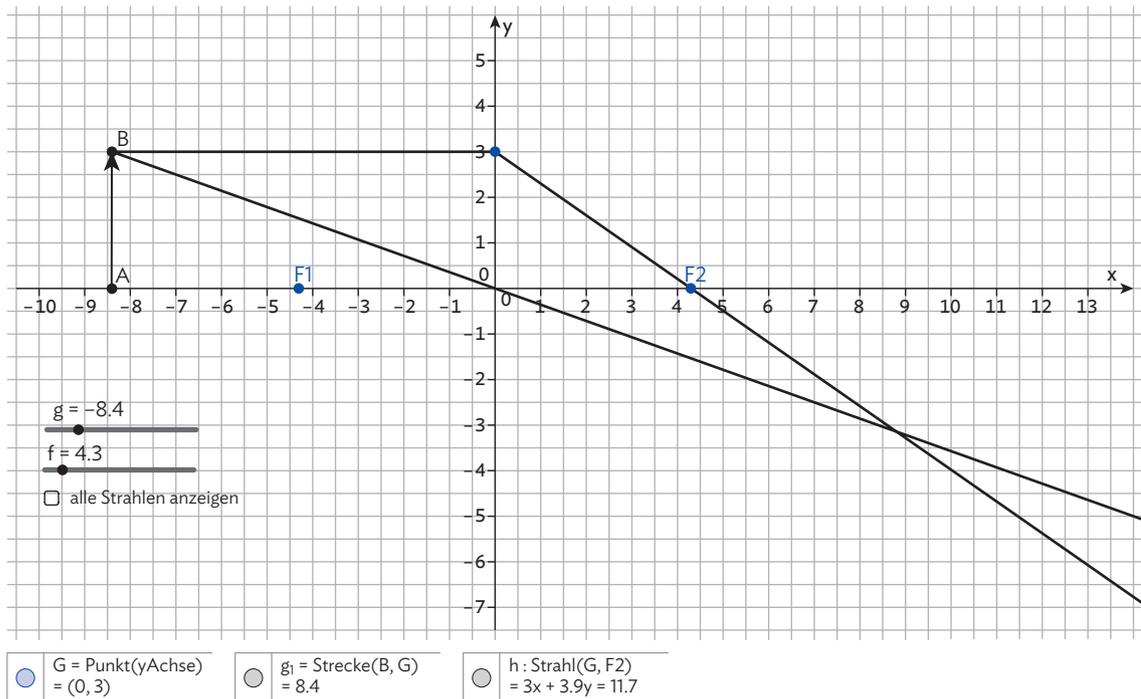
► M3 Lernaufgabe: Optische Abbildungen im Auge mithilfe einer dynamischen Geometriesoftware verstehen

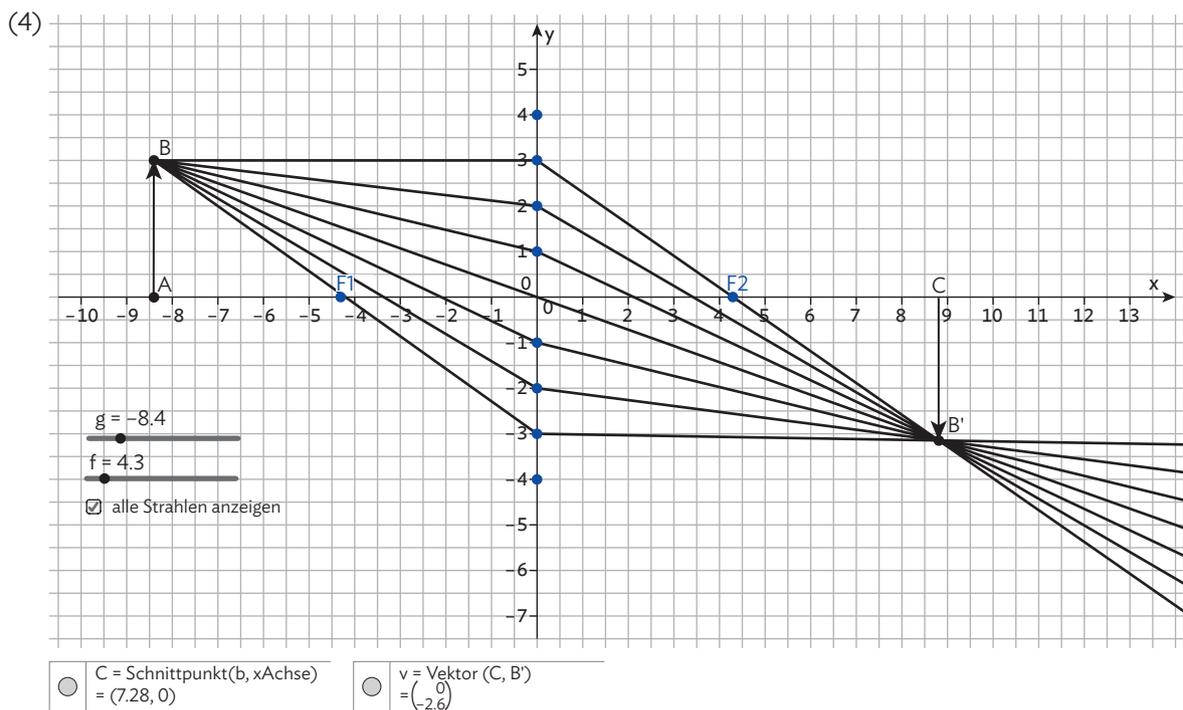
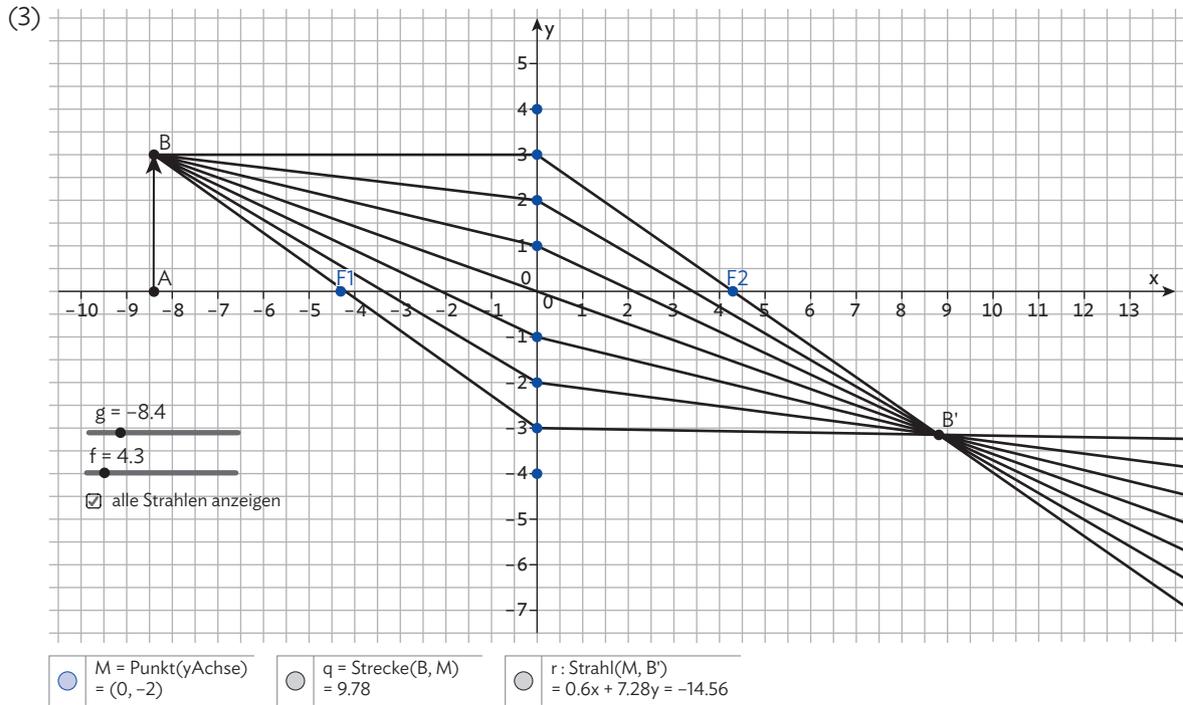
Arbeitsauftrag Seite 16

a) (1)

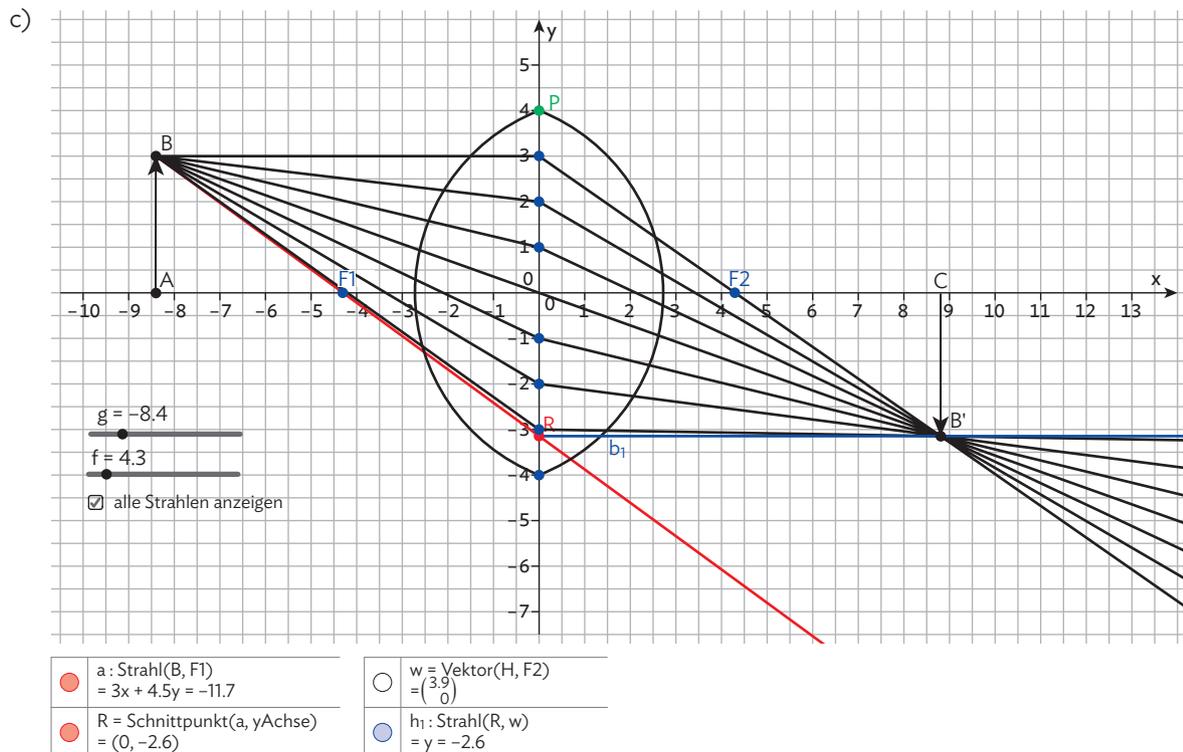
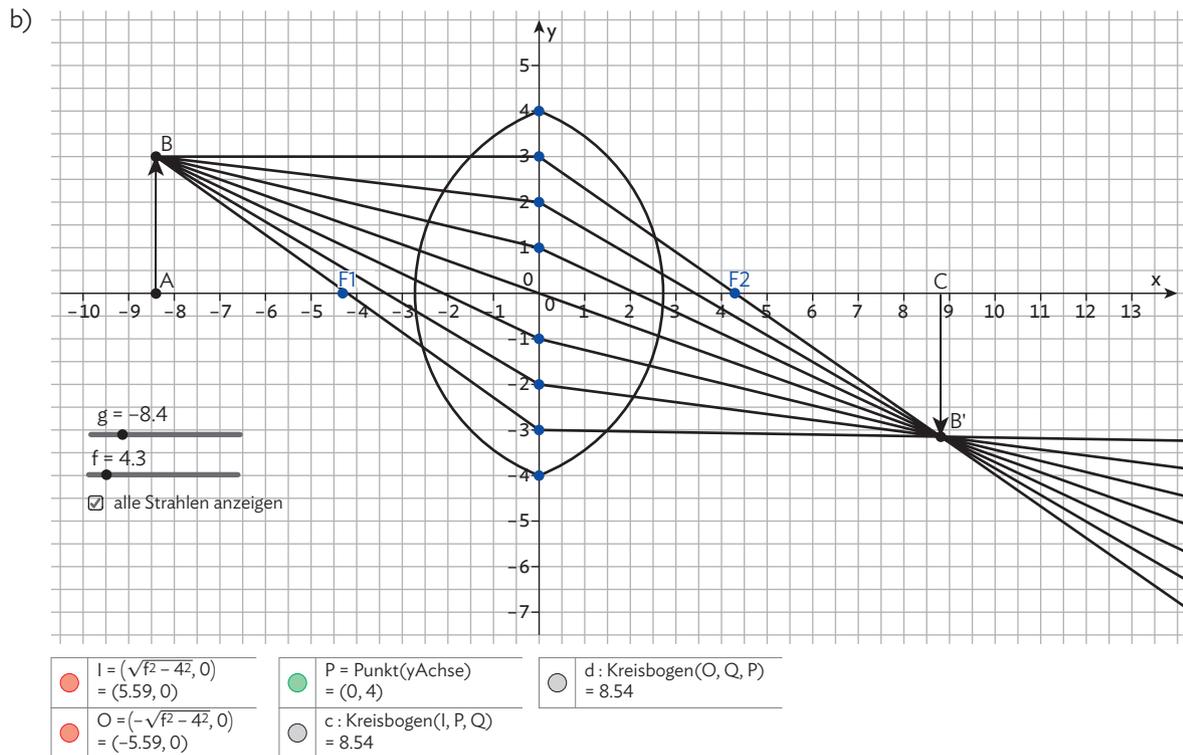


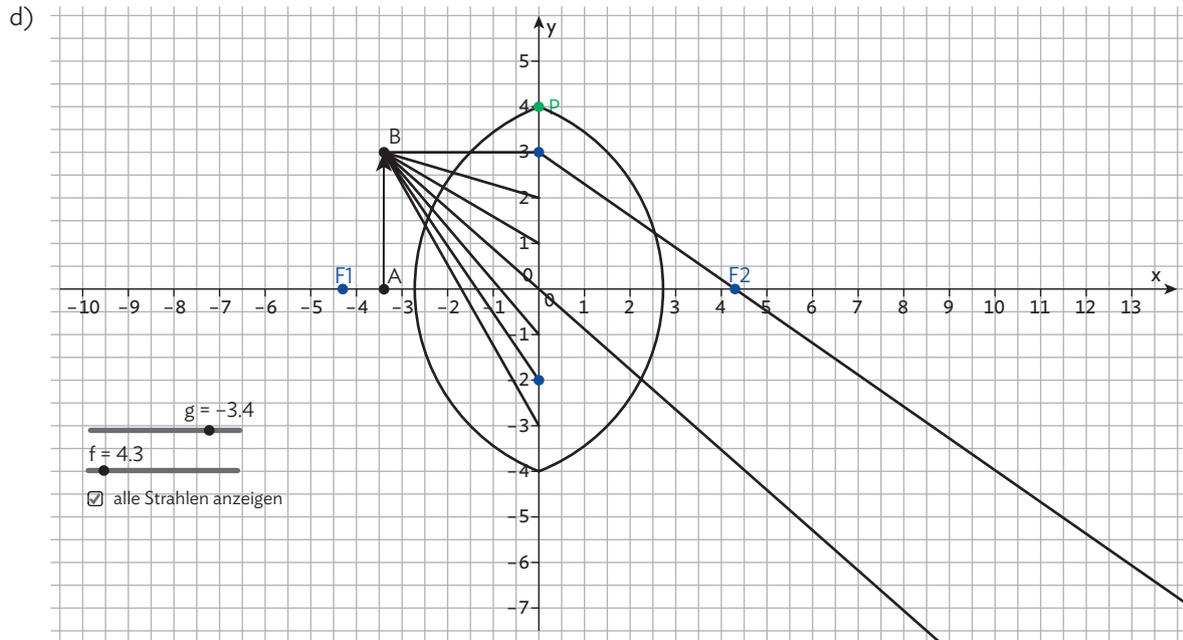
(2)



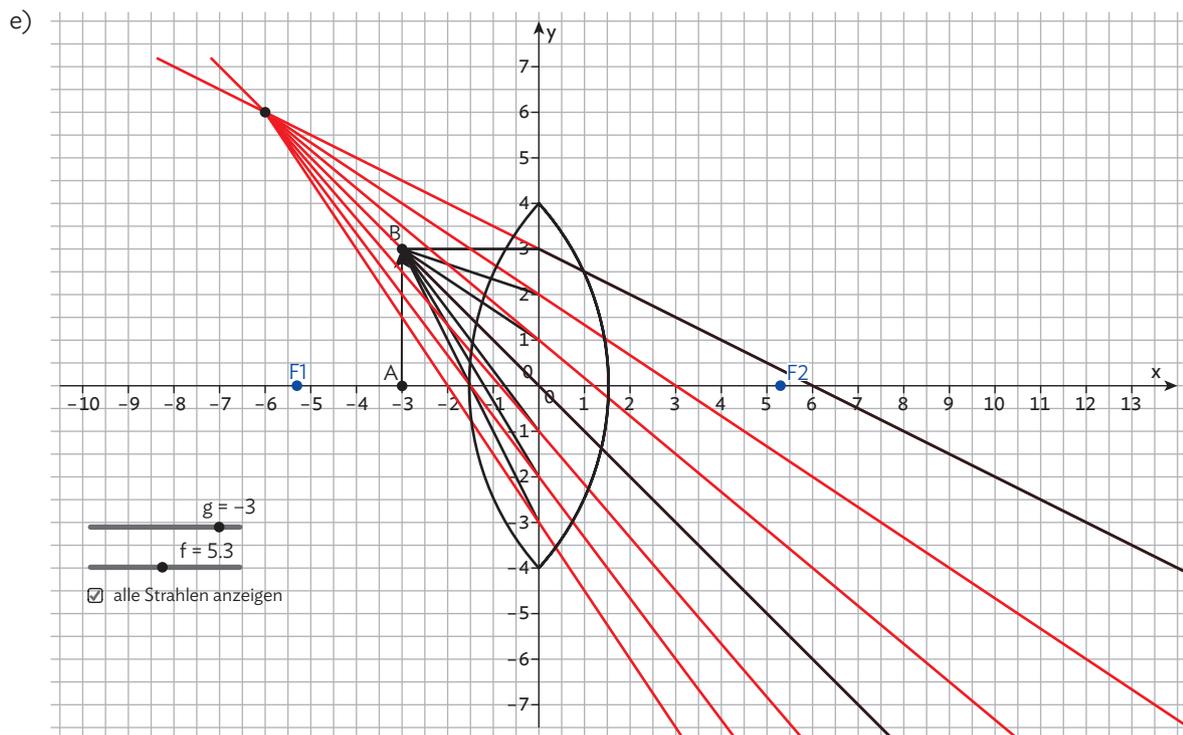


Arbeitsauftrag Seite 17, Optimierungen der Simulation



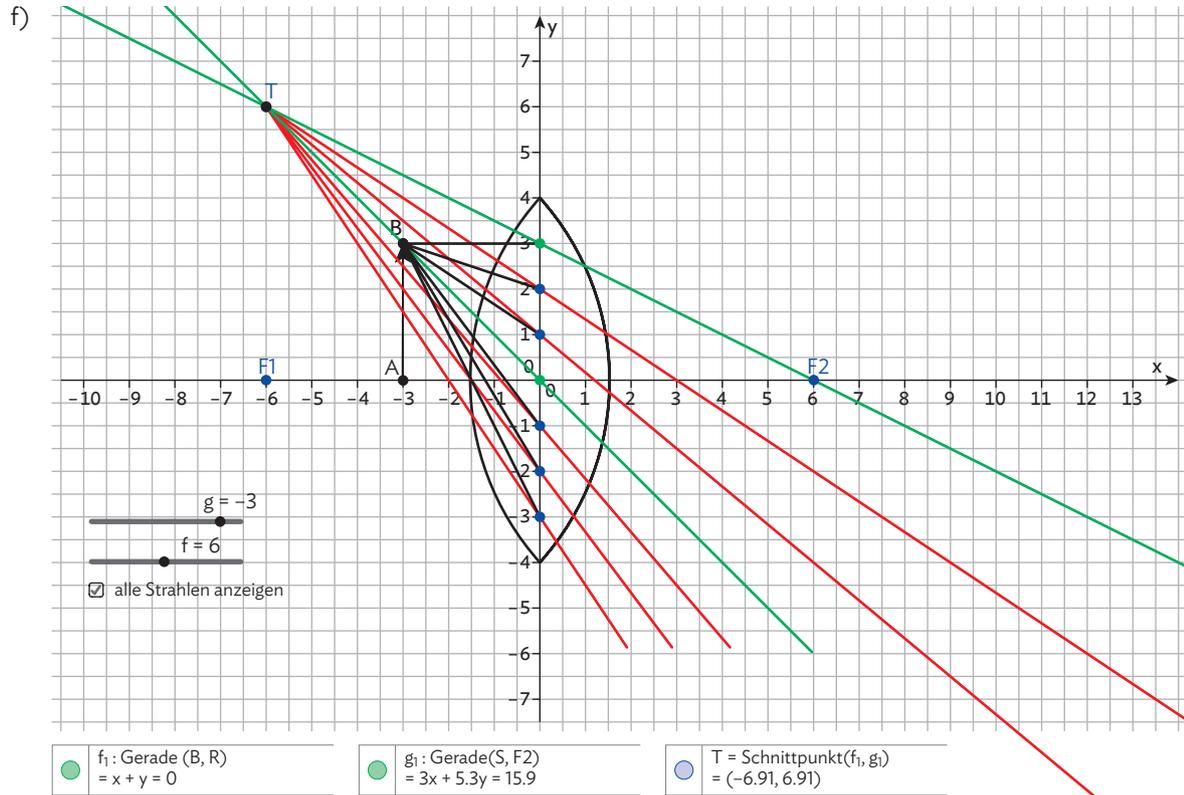


Die Lichtstrahlen schneiden sich nicht mehr. Grenze der Simulation: $g < f$.
In der Realität entsteht hier eine virtuelle Abbildung.



Bedingte Anzeige der roten Geraden:

Bedingung, um Objekt anzuzeigen
$\text{abs}(g) < f$



1.1 Das Linsenauge

Arbeitsaufträge Seite 19

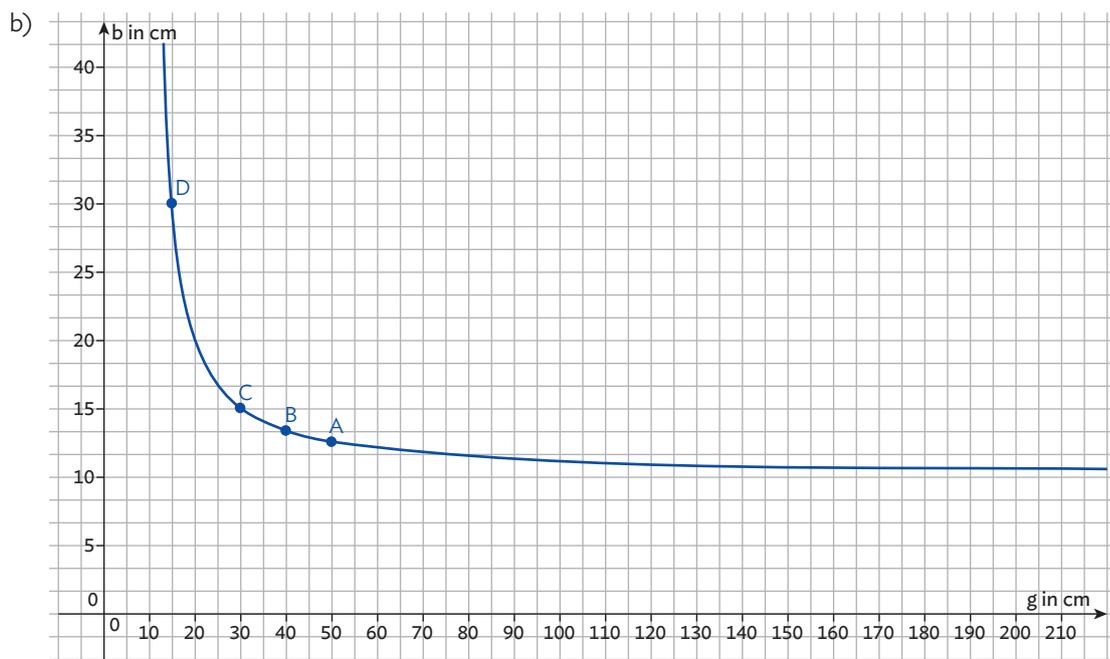
- 1\ Diese Strukturen dienen der Lichtdetektion in der Netzhaut (Sehgrube) bzw. der Durchblutung und mechanischen Stabilisierung der Netzhaut (Aderhaut, Lederhaut) und dem Anschluss an den Sehnerv (blinder Fleck). In einem Linse-Schirm-Modell haben Sie keine Entsprechung, da diese Funktionen nicht modelliert werden.
Der Glaskörper ist ein Bestandteil der Augen von Wirbeltieren und enthält zu ca. 98 % Wasser. Er dient der Stabilisierung der Form des Auges. Der Glaskörper liegt zwischen Linse und Netzhaut. Das von der Linse gesammelte Licht durchquert auf seinem Weg zur Netzhaut den Glaskörper. Dies könnte man in einem erweiterten Linse-Schirm-Modell durch einen Medienwechsel zwischen Linse und Sichtschirm von Luft auf Wasser berücksichtigen. Dies wirkt sich auf die Brennweite hinter der Linse aus.
- 2\ Everses und inverses Linsenauge sind bei wirbellosen Tieren bzw. Wirbeltieren zu finden. Schaut man sich die Entwicklung an, erfolgt zuerst die Ausbildung einer lichtempfindlichen Schicht (Netzhaut), danach haben sich in der Evolution abbildende Strukturen entwickelt. Zum Schluss entwickelte sich daraus ein Linsenauge. Daher lässt sich dies als analoge evolutionäre Entwicklung aufgrund ähnlicher Selektionsdrücke (Notwendigkeit, über eine gute Sicht zu verfügen) verstehen.

1.2 Abbildung auf der Netzhaut

Arbeitsaufträge Seite 22

- 1) a) Zur Berechnung wird die Linsengleichung $\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$ genutzt.

g	f	b
50 cm	10 cm	12,5 cm \approx 13 cm
40 cm	10 cm	13 cm
30 cm	10 cm	15 cm
15 cm	10 cm	30 cm

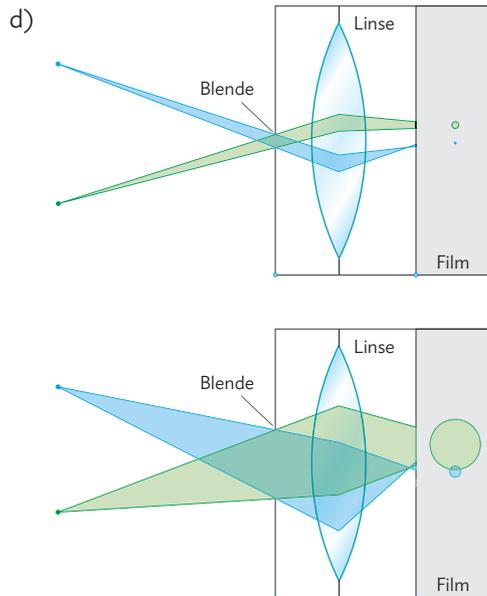


- c) siehe Simulation

- 2) a) Die Schärfentiefe gibt Auskunft darüber, wie gut man Gegenstände, die von der Linse unterschiedlich weit entfernt sind, gleichzeitig scharf abbilden kann. Bei großer Schärfentiefe (Abb. in 2a) auf S. 22 unten) können unterschiedlich weit entfernte Gegenstände gleichzeitig scharf abgebildet werden. Bei kleiner Schärfentiefe (Abb. in 2a) auf S. 22 oben) können nur gleich weit entfernte Gegenstände gleichzeitig scharf abgebildet werden, die anderen Gegenstände erscheinen unscharf.
- b) (i) Die begrenzte Schärfentiefe ist eine Konsequenz der Linsengleichung $\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$. Gegenstände, die sich nahe an der Linse befinden (g klein), werden weit entfernt von der Linse scharf abgebildet (b groß). Umgekehrt werden Gegenstände, die sich weit weg von der Linse befinden (g groß), nahe an der Linse scharf abgebildet (b klein).
- (ii) Bei Fotos von Dokumenten (und dem Auge) sollen alle Gegenstände gleichzeitig möglichst scharf auf einem planen Film oder Bildsensor (auf der Netzhaut) abgebildet werden. Indem man die Blende möglichst klein einstellt, werden die weit von der optischen Achse entfernten Randstrahlen, die für den unscharfen Seheindruck sorgen, ausgeblendet.

Bei künstlerischen Fotos nutzt man eine kleine Schärfentiefe oft aus: Die Objekte, die nicht betont werden sollen, werden unscharf abgebildet.

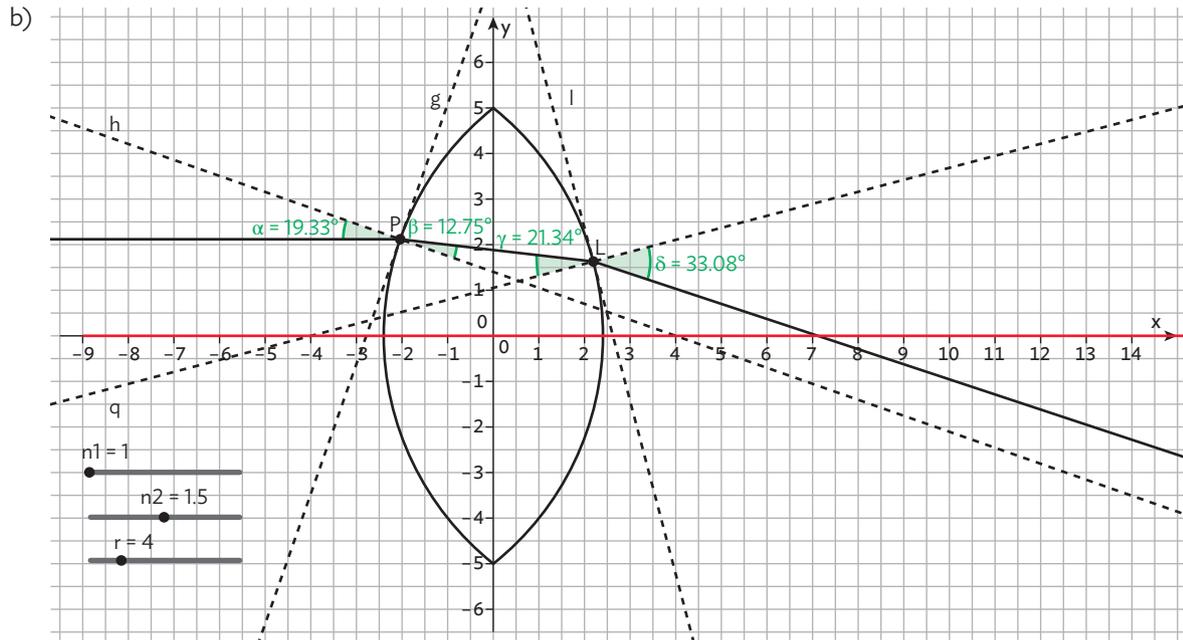
- c) Dicht vor dem Auge liegende Gegenstandspunkte können wegen der nicht ausreichenden Akkommodationsfähigkeit nicht als Bildpunkte auf der Netzhaut abgebildet werden. Es entstehen ausgedehnte Bildflecken, die nicht mehr räumlich getrennt sind und sich gegenseitig überlappen. Bei einer kleinen Blende vor dem Auge werden die Bildflecken kleiner und die räumliche Überlappung wird teilweise aufgehoben, sodass das Bild schärfer wird.



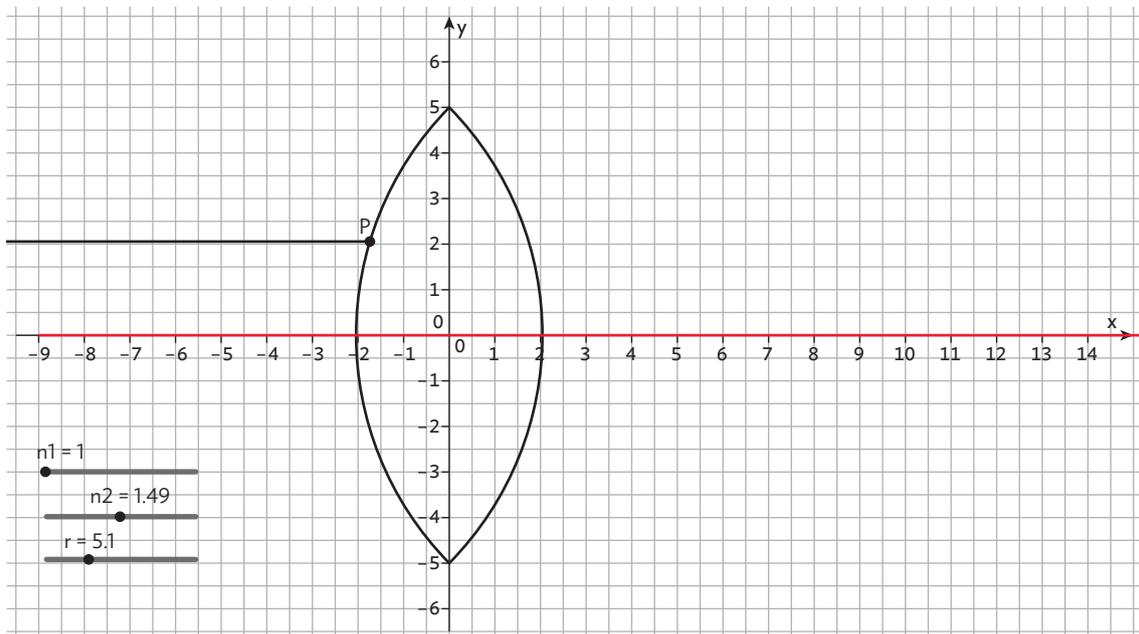
Bei der kleinen Blendenöffnung (obere Teilabbildung) werden die Randstrahlen ausgeblendet. In der Frontalansicht (grau hinterlegt) sieht man, dass die Bildpunkte zwar unscharf sind, aber nur geringfügig. Die untere Teilabbildung zeigt die gleiche Situation mit den identischen Objekten. Aber hier werden durch die große Blendenöffnung die Randstrahlen nicht ausgeblendet und verursachen eine große Unschärfe, wie man in der Frontalansicht sehen kann.

Arbeitsaufträge Seite 23

- 3) a) • Übergang vom optisch dünneren zum optisch dichteren Medium: $n_1 < n_2$; Licht wird zum Einfallslot hin gebrochen, $\alpha > \beta$.
- Die Brechung wird stärker bedeutet, dass der Unterschied zwischen α und β zunimmt, also die Differenz $\alpha - \beta$ ansteigt.
 - Der Verlauf der Sinusfunktion zwischen 0° und 90° ist streng monoton steigend.
 - $\sin \alpha = \frac{n_2}{n_1} \cdot \sin \beta$: Wenn das Verhältnis $\frac{n_2}{n_1}$ steigt, muss bei gleichbleibendem Einfallswinkel α der Wert von $\sin \beta$ sinken. Da die Sinusfunktion hier monoton steigt, muss der Wert des Winkels β sinken. Das bedeutet, dass der Wert der Differenz $\alpha - \beta$ steigt.

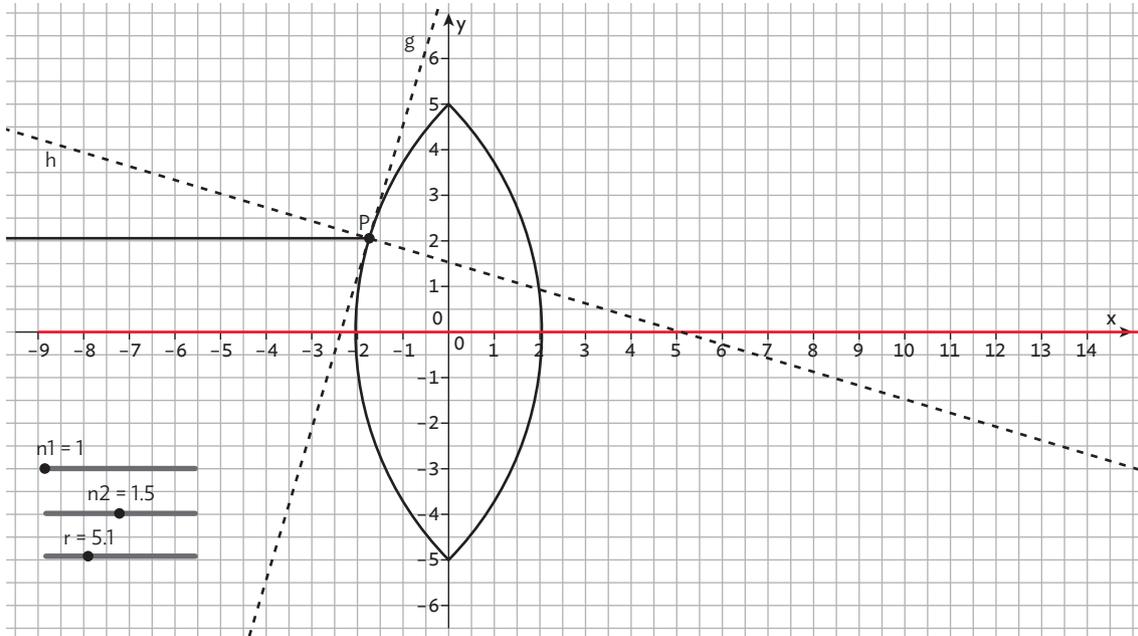


c) fakultativ



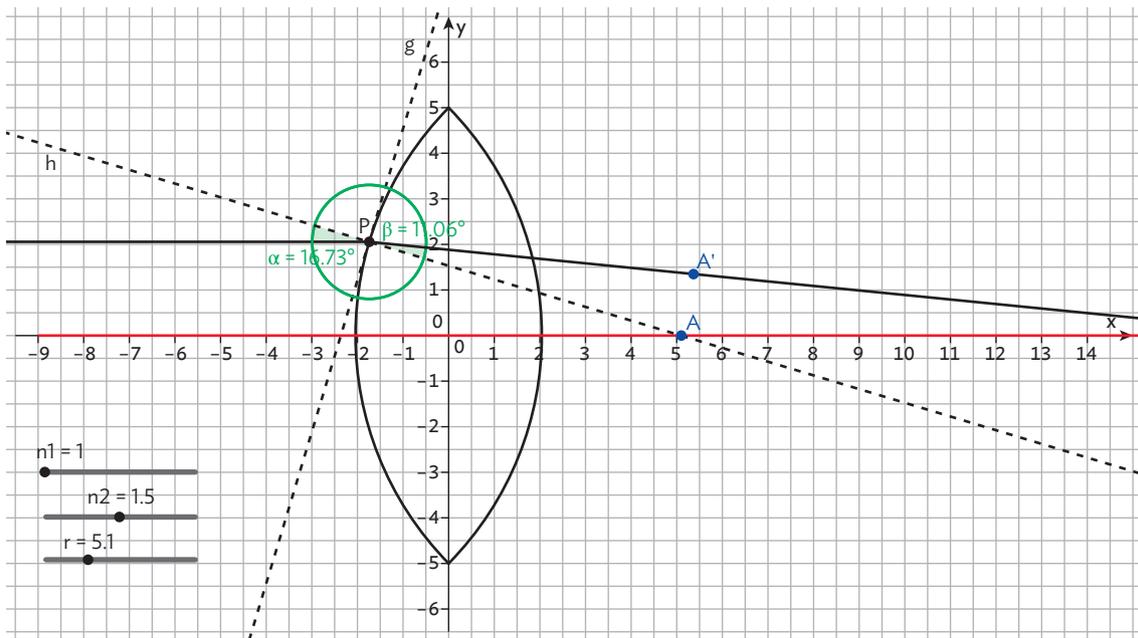
<input type="radio"/>	$n_2 = 1.49$	<input type="checkbox"/>	$C = \text{Punkt}(y\text{Achse}) = (0, -5)$
<input type="radio"/>	$n_1 = 1$	<input type="checkbox"/>	$r = 5.1$
<input type="radio"/>	$B = \text{Punkt}(y\text{Achse}) = (0, 5)$	<input type="checkbox"/>	$A = (r, 0) = (5.1, 0)$

<input type="radio"/>	$c : \text{Kreisbogen}(A, B, C) = 11.08$
<input type="radio"/>	$P = \text{Punkt}(c) = (-1.74, 2.06)$
<input type="radio"/>	$d : \text{Kreisbogen}(D, C, B) = 11.08$



○ Tangente (P, c)
= g: $-6.84x + 2.06y = 16.13$

○ h : Senkrechte(P, g)
= $-2.06x - 6.84y = -10.49$

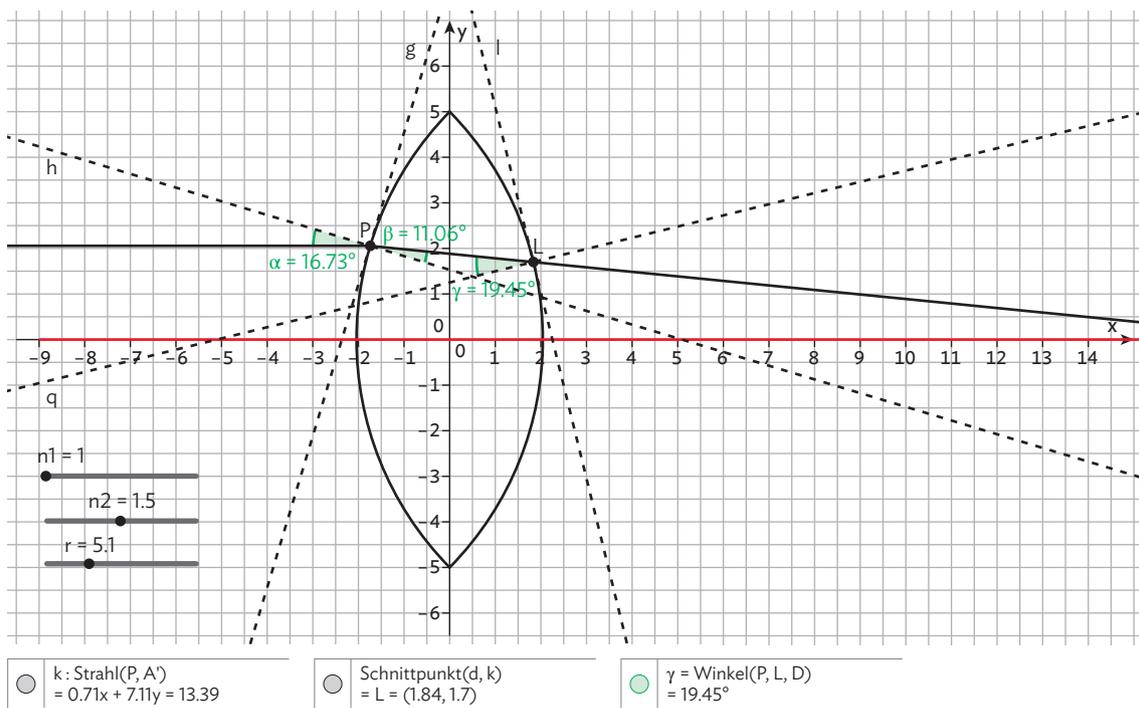
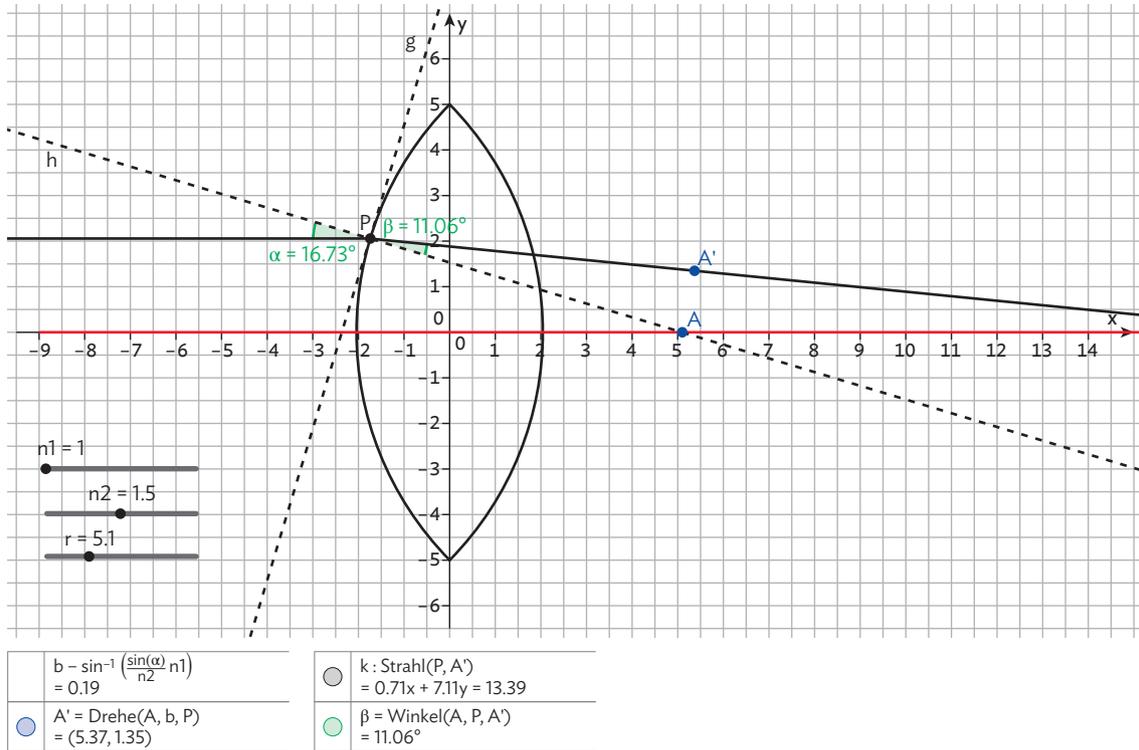


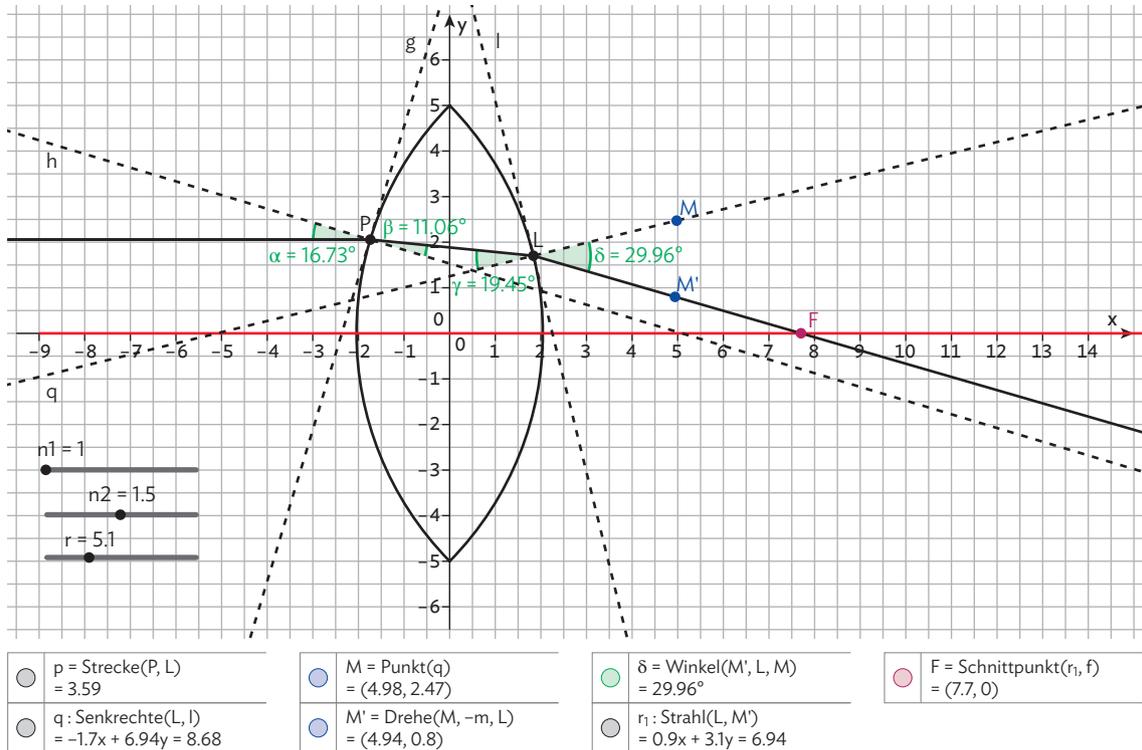
$b = \sin^{-1} \left(\frac{\sin(\alpha)}{n_2} n_1 \right)$
= 0.19

○ A' = Drehe(A, b, P)
= (5.37, 1.35)

○ k : Strahl(P, A')
= $0.71x + 7.11y = 13.39$

○ β = Winkel(A, P, A')
= 11.06°



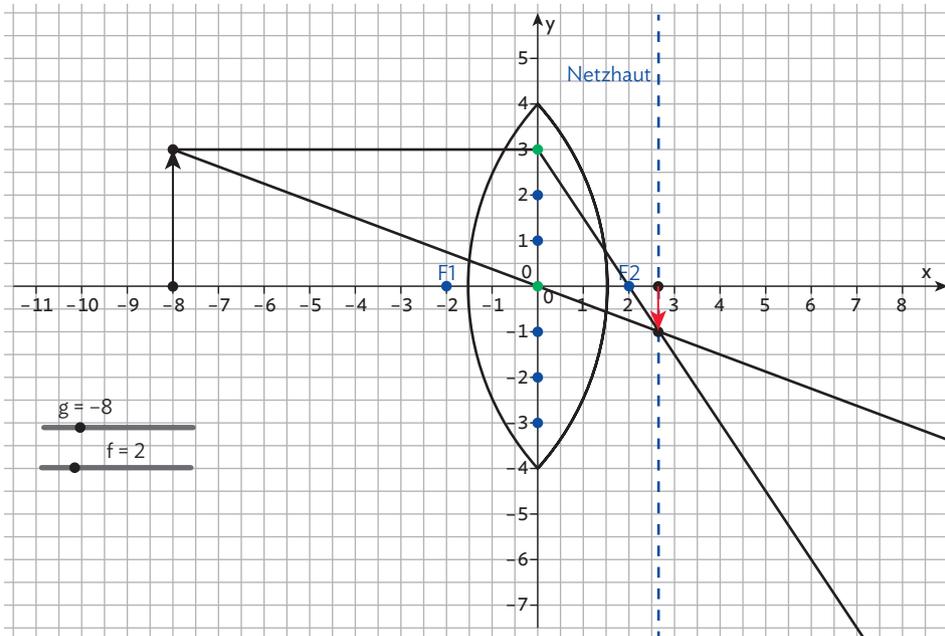
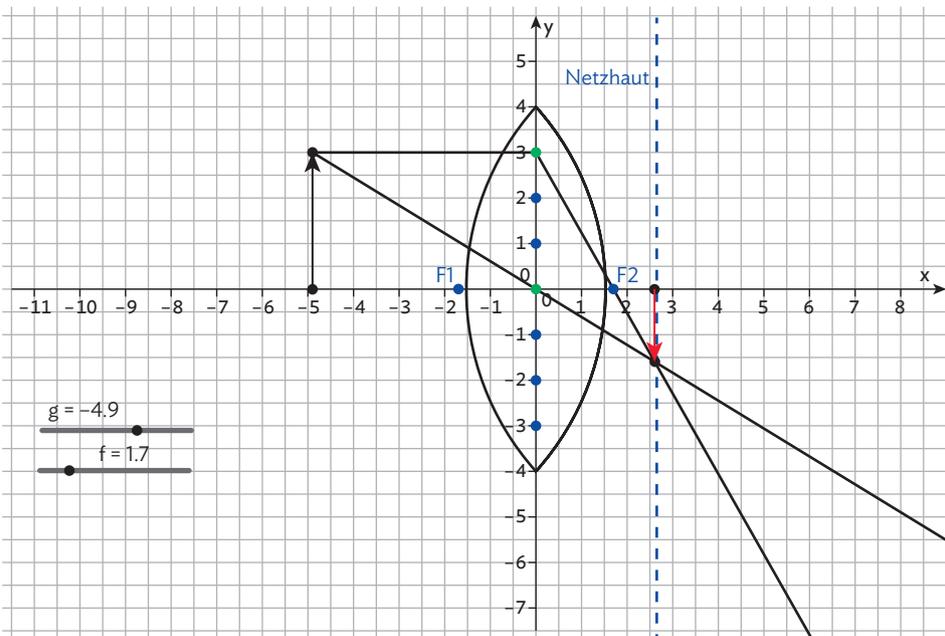


- d) In der Simulation sollten zur besseren Übersicht alle Hilfslinien unsichtbar gestellt werden.
Es zeigt sich:
- Wird der Krümmungsradius erhöht (die Linse wird flacher), so erhöht sich die Brennweite.
 - Für $n_1 > n_2$ gilt: Der Strahl wird nach oben gebogen. Dies entspricht einer Zerstreuungslinse. Je größer der Unterschied der Brechungsindizes, desto stärker ist die Richtungsänderung.
 - Für $n_1 < n_2$ gilt: Der Strahl wird nach unten gebogen. Dies entspricht einer Sammellinse. Je größer der Unterschied der Brechungsindizes, desto stärker ist die Richtungsänderung.
- e) Das trifft hier nicht immer zu. Je weiter sich P von der optischen Achse wegbewegt, desto stärker verschiebt sich der Brennpunkt.
- f) Die Simulation arbeitet exakt, das Hauptstrahlenmodell ist eine Näherung für dünne Linsen und Strahlen in der Nähe der optischen Achse. In der Realität tritt dieser Effekt als Linsenbildungsfehler „sphärische Aberration“ auf. Er ist besonders ausgeprägt bei eher kugelförmigen Linsen und führt zu unscharfen Abbildungen.
- g) Am Rand muss der Brechungsindex der Linse kleiner als in der Mitte sein, um die sphärische Aberration auszugleichen.

1.3 Akkomodation und Fehlsichtigkeiten

Arbeitsaufträge Seite 28

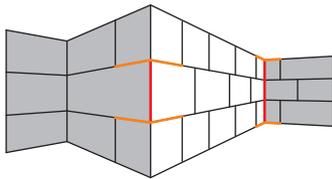
- 1) a) entferntes Objekt:
- $B \approx 1,0$
- cm

nahes Objekt: $B \approx 1,6$ cm

Eigentlich müsste das Auge auf $f = 1,73$ cm akkomodieren, dann liegt das Bild exakt auf der Netzhaut. In einer handschriftlichen Skizze übersteigt dies die Zeichengenauigkeit. In GeoGebra sieht man, dass der Pfeil minimal vor der Netzhaut liegt.

- b) Das Gehirn sieht eine perspektivische Zeichnung und interpretiert die rechte rote Linie als weiter hinten liegend. Da beide Netzhautbilder gleich groß sind und die rechte Linie scheinbar weiter hinten liegt, muss sie ursprünglich größer gewesen sein. Wenn beide Linien gleich lang wären und sich in unterschiedlicher Entfernung befinden würden, müsste die weiter entfernte Linie auf der Netzhaut kleiner erscheinen.

Die Täuschung kommt zustande, weil das Gehirn Erfahrungen aus der dreidimensionalen Welt auf die zweidimensionale Zeichnung überträgt. Ergänzt man die orangenen Linien, sieht man, dass sich darin die Müller-Lyer-Täuschung verbirgt.



Variante der Müller-Lyer-Täuschung

Arbeitsaufträge Seite 29

- 2) a) kurzsichtiges Auge bei Fernakkommodation:

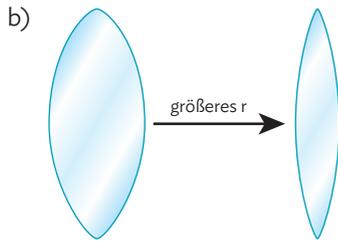


- weitsichtiges Auge bei Fernakkommodation:



- b) Bei weit entfernten Gegenständen reicht eine geringe Krümmung der Augenlinse aus, um eine scharfe Abbildung auf der Netzhaut zu erreichen. Bei nahen Gegenständen müsste die Krümmung stärker sein; bei Weitsichtigkeit ist aber die maximale Krümmung schon vorher erreicht.
- c) Bei geringerer Krümmung (größerem Krümmungsradius) vergrößert sich die Brennweite der Hornhaut. Entsprechend verringert sich ihre Brennweite bei stärkerer Krümmung (kleinerem Krümmungsradius).
- d) (i) Kurzsichtigkeit: Die Brechkraft des optischen Apparates ist zu groß. Wird die Hornhaut in der Mitte abgetragen, wird die Hornhautkrümmung reduziert und somit die Brechkraft reduziert.
- (ii) Weitsichtigkeit: Die Brechkraft des optischen Apparates ist zu klein. Wird die Hornhaut am Rand abgetragen, wird die Hornhautkrümmung erhöht und somit die Brechkraft vergrößert.

- 3) a) Die positive Brechkraft zeigt an, dass es sich bei dem Brillenglas um eine Sammellinse handelt. Der Brillenträger ist also weitsichtig, da eine Sammellinse die Brechkraft des Auges erhöht.



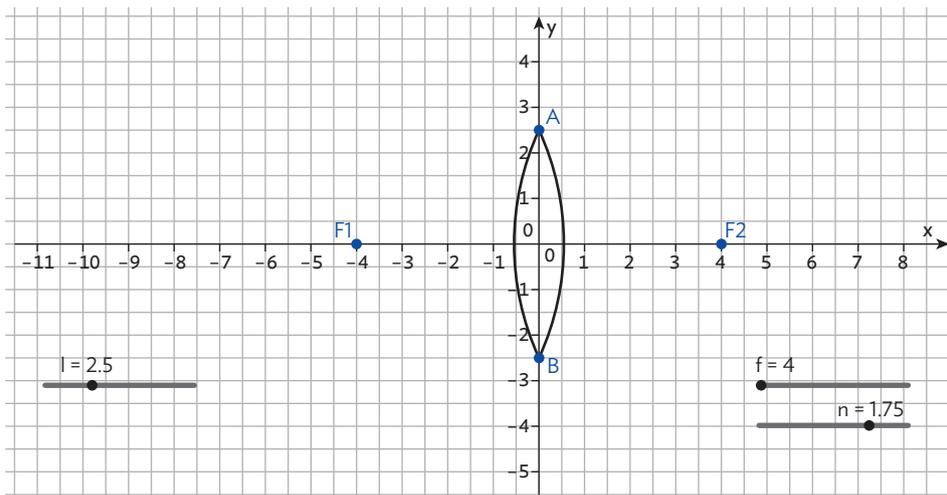
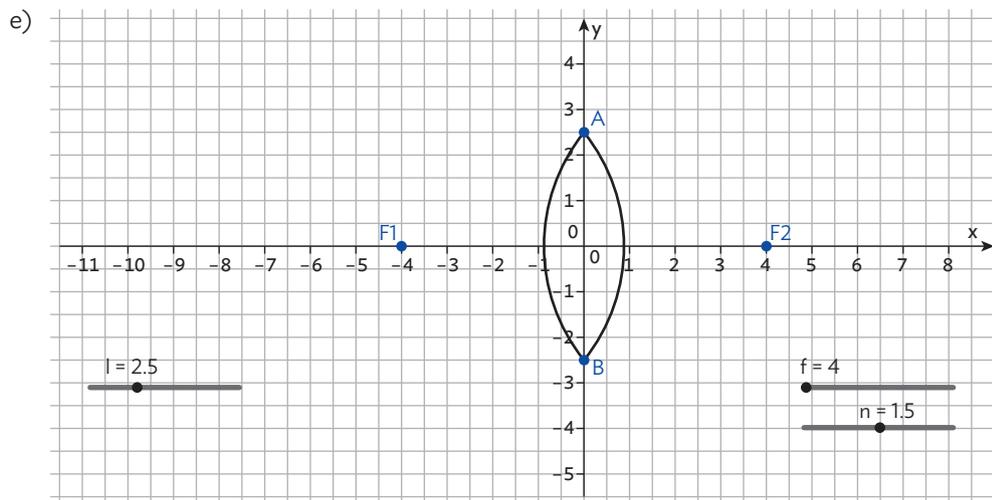
c) $D = (n - 1) \cdot \frac{2}{r}$

Umstellen nach r und Einsetzen der Werte für n :

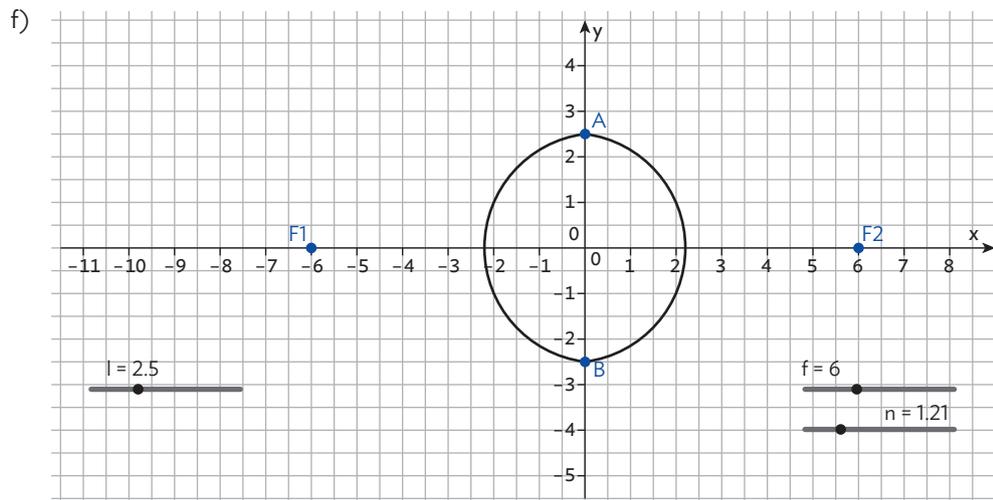
$$n = 1,5: \quad r = \frac{2 \cdot (n - 1)}{D} = \frac{2 \cdot (1,5 - 1)}{6 \text{ dpt}} \approx 0,2 \text{ m}$$

$$n = 1,75: \quad r = \frac{2 \cdot (n - 1)}{D} = \frac{2 \cdot (1,75 - 1)}{6 \text{ dpt}} \approx 0,3 \text{ m}$$

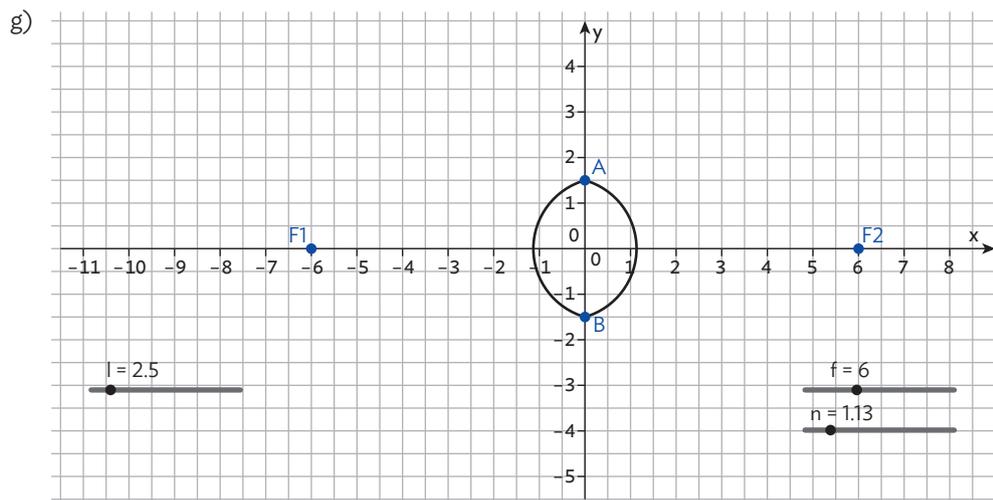
- d) Der ultrahochbrechende Kunststoff ermöglicht einen größeren Krümmungsradius, also ein flacheres (und damit dünneres) Brillenglas.



Die Linse wird flacher.



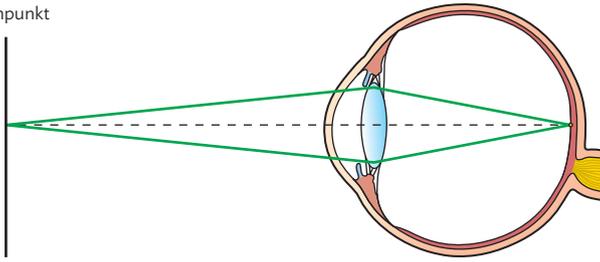
Wird bei den hier gewählten Werten $n = 1,21$ unterschritten, so ergibt sich keine Linse mehr in der Simulation. Dies liegt daran, dass eine Kugel den kleinsten Krümmungsradius hat. Ist diese Form erreicht, kann ohne Größenänderung der Kugel keine Erhöhung der Brechung mehr erreicht werden. Für Brillen würde das bedeuten, dass es eine Untergrenze für den Brechungsindex für das Brillenmaterial gibt, d. h. nicht alle durchsichtigen Materialien sind für Brillengläser geeignet.



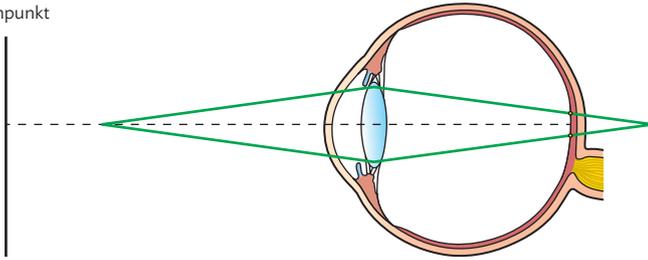
Durch eine Verkleinerung der Linsengröße lässt sich der zugängliche Bereich für den Brechungsindex erhöhen. Das bedeutet für Brillen, dass man beim Brillenmaterial mehr Spielraum hat. Insgesamt führen ultrahochbrechende Kunststoffe im Vergleich zu normalem Kunststoff zu dünneren und damit leichteren und angenehmer zu tragenden Brillen.

4) a) Für diejenigen, die keine Brille benötigen, sollte der Nahpunkt bei etwa 7–10 cm liegen.

b) (1) Nahpunkt



(2) Nahpunkt

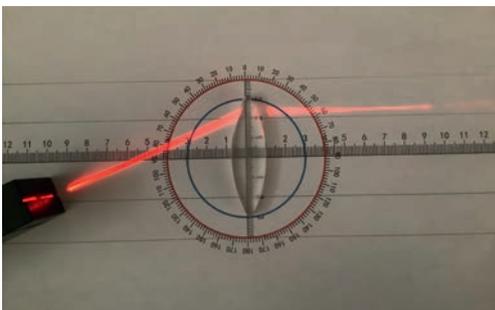
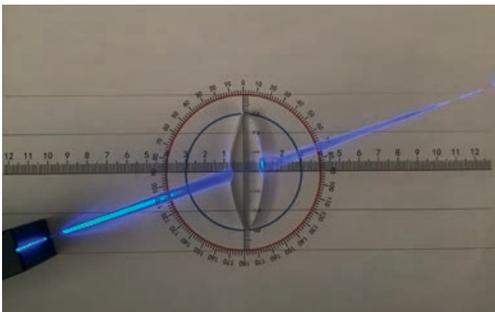
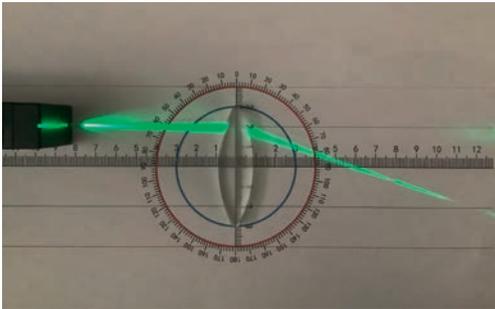


1.4 Schülerexperimente: Abbildungen im Auge

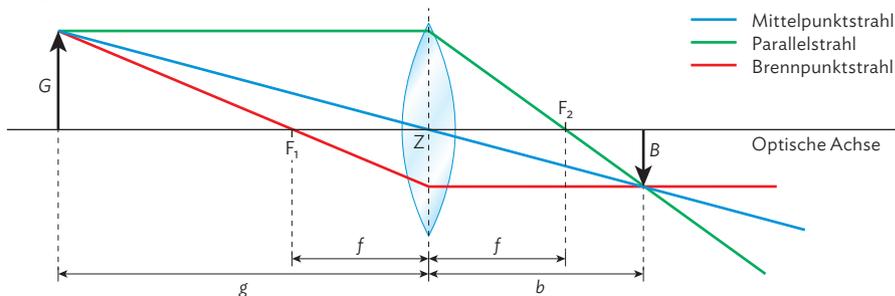
V1 Das Linse-Schirm-Modell des Auges

Arbeitsauftrag Seite 30

a) Individuelle Lösungen. Beispiele:



Vergleich mit Theorie:



Konstruktion des Bildes über die Hauptstrahlen. Bezeichnungen: G : Gegenstandsgröße, B : Bildgröße, F_1, F_2 : Brennpunkte, f : Brennweite, g : Gegenstandsweite, b : Bildweite

b) und c) Individuelle Lösungen für die Messungen, je nach zur Verfügung stehenden Linsen.

Vergleich der individuellen Messergebnisse mit den Linsengleichungen (beispielhafte Lösung für $f = 100$ mm):

g in mm	b in mm	Bild
50 mm	b negativ	virtuelles Bild, aufrecht, nicht seitenverkehrt
100 mm	–	–
150 mm	300 mm	Bild vergrößert, $B = 2G$, seitenverkehrt, auf dem Kopf stehend
200 mm	200 mm	$B = G$, seitenverkehrt, auf dem Kopf stehend
250 mm	167 mm	Bild verkleinert, $B = 0,7G$, seitenverkehrt, auf dem Kopf stehend
300 mm	150 mm	Bild verkleinert, $B = 0,5G$ seitenverkehrt, auf dem Kopf stehend
350 mm	140 mm	Bild verkleinert, $B = 0,4G$, seitenverkehrt, auf dem Kopf stehend
400 mm	133 mm	Bild verkleinert, $B = 0,33G$, seitenverkehrt, auf dem Kopf stehend

d) **Verschieben der Linse:** Es ist nicht möglich, für alle Gegenstandsweiten eine scharfe Abbildung zu erzielen. Es ist prinzipiell aufgrund der Linsengleichung nicht möglich für $g < f$ ein reelles Bild auf dem Sichtschirm (der Netzhaut) zu erzielen. Für Gegenstandsweiten g , die geringfügig größer als f sind, kann man zwar im Experiment eine Abbildung erzielen, in einem realen Auge wäre das aber nicht möglich, da b dann zu groß für die Abmessungen des Auges werden würde.

Auswechseln der Linse: Hier kann man nur dann scharf stellen, wenn die Linse die passende Brechkraft aufweist. Im Experiment wäre das aufgrund der begrenzten Linsenauswahl nur in wenigen Fällen möglich. In einem realen Auge kann die Brechkraft der Linse nur in bestimmtem Umfang angepasst werden, also kann nicht bei allen Gegenstandsweiten eine scharfe Abbildung erzielt werden.

e) Die Gegenstandsweite wird systematisch verkleinert, beginnend z. B. bei $g = 4f$. Die Position des Sichtschirms wird nicht verändert. Es zeigt sich, dass sich die Bildgröße vergrößert, je näher der Gegenstand an die Linse rückt; vgl. auch Aufgabe 1a) auf S. 28 im Schulbuch.

V2 Fehlsichtigkeiten und ihre Korrektur

Arbeitsauftrag Seite 31

Bei diesem Versuch ist nicht von vornherein vorgegeben, welche Hypothesen mit welchen Mitteln untersucht werden sollen. Die Schülerinnen und Schüler sollen sich selbstständig eine oder mehrere Hypothese(n) überlegen und diese dann systematisch mit Experimenten untersuchen und gegebenenfalls abändern. In Zusammenhang mit der Linsengleichung ist aufgrund ihrer mathematischen Struktur kaum mit direkt/indirekt proportionalen Zusammenhängen zu rechnen, daher werden die meisten Hypothesen, die je-desto-Aussagen beinhalten, abgeändert werden müssen.

a) bis g) Individuelle Lösungen, je nach gewählter Hypothese. Im Folgenden beispielhafte Bearbeitung für die Hypothese „Je größer der Abstand zweier Linsen, desto größer ist die Brechkraft des Linsensystems“.

Im Folgenden beispielhafte Bearbeitung für die Hypothese „Je größer der Abstand zweier Linsen, desto größer ist die Brechkraft des Linsensystems“.

Theoretischer Hintergrund: Für die Brechkraft eines Linsensystems an Luft gilt:

$$D_{\text{gesamt}} = D_1 + D_2 - D_1 \cdot D_2 \cdot d \quad (\text{vgl. Aufgabe 3 auf S. 58 im Schulbuch})$$

Möglicher Versuchsaufbau: Bestimmung der Brechkraft/Brennweite des Linsensystems in Abhängigkeit vom Linsenabstand d mit parallelen Lichtstrahlen. Dabei entfällt die Messung der Gegenstandsweite und es gilt $b \approx f$. Wie bei Versuch 1 können flache Acryllinsen und LED-Strahler verwendet werden. Damit sieht man auch gleich den Strahlengang und kann dies als Vorlage für die Skizzen von Teilaufgabe f) verwenden.

Je nach Wahl der beiden Linsen können unterschiedliche Ergebnisse entstehen:

Kombination zweier Sammellinsen:

- Ab ca. $d = 2f$ (bei zwei identischen Linsen) wird die Brechkraft negativ, es kann also auf dem Sichtschirm kein reelles Bild mehr erzeugt werden bzw. die Lichtstrahlen schneiden sich nicht.
- Die Brechkraft nimmt mit dem Abstand d ab, der Schnittpunkt der Strahlen wandert von den Linsen weg.

Kombination einer Sammellinse und einer Zerstreuungslinse:

- Die Brechkraft nimmt mit dem Abstand zu. Der Schnittpunkt der Strahlen wandert zu den Linsen hin.
- Die Brechkraft der Sammellinse sollte größer sein als der Betrag der Brechkraft der Zerstreuungslinse (oder zumindest gleich groß), sonst gibt es auch hier Abstände, die kein reelles Bild liefern.

Mögliche Versuchsbeobachtung der Schülerinnen und Schüler:

- Mit steigendem Abstand der Linsen nimmt die Brechkraft ab (zwei Sammellinsen).
- Mit steigendem Abstand der Linsen nimmt die Brechkraft zu (Sammel- und Zerstreuungslinse).
- Es liegt aber keine direkte/indirekte Proportionalität vor.

Der Versuch kann qualitativ durchgeführt werden oder quantitativ. Dazu muss aber festgelegt werden, von welchem Punkt aus man die Bildweite b messen muss. Die intuitive Wahl ist der Mittelpunkt des Linsensystems. Dies ist aber eine grobe Näherung, die zu entsprechenden Messunsicherheiten führt.

Da der Zusammenhang nicht direkt/indirekt proportional, sondern linear ist (siehe Formel), muss die Hypothese folgendermaßen abgeändert werden:

- „Je größer der Abstand zweier Linsen, desto größer ist die Zunahme der Brechkraft des Linsensystems (Sammel- und Zerstreuungslinse).“
- „Je größer der Abstand zweier Linsen, desto größer ist die Abnahme der Brechkraft des Linsensystems (zwei Sammellinsen).“

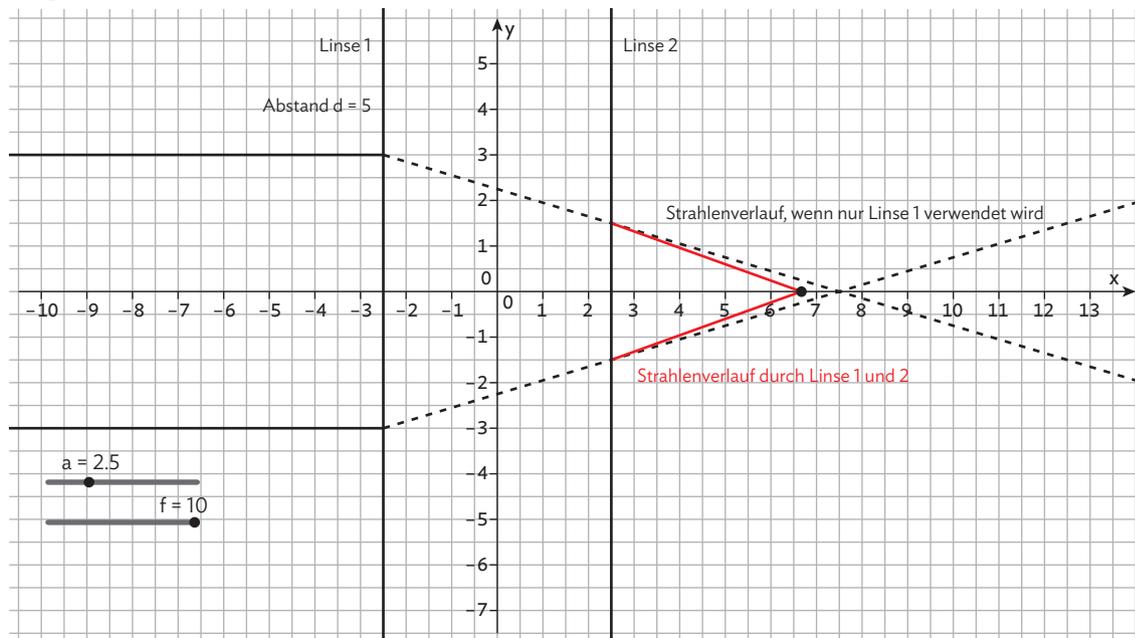
Oder bei qualitativer Untersuchung:

- „Mit steigendem Abstand zweier Sammellinsen nimmt die Brechkraft des Linsensystems ab.“
- „Mit steigendem Abstand einer Sammel- und einer Zerstreuungslinse nimmt die Brechkraft des Linsensystems zu.“

Auswirkungen auf Brillen: Der Abstand zwischen den Augen und den Brillengläsern muss fest sein, sonst ändert sich die Gesamtbrechkraft. Kontaktlinsen haben einen anderen Abstand als Brillengläser vom Auge, ihre Brechkraft muss daher anders bemessen werden.

Die Ergebnisse zu dieser Hypothese lassen sich nicht direkt mit der Linsengleichung begründen.

Mögliche Skizze:



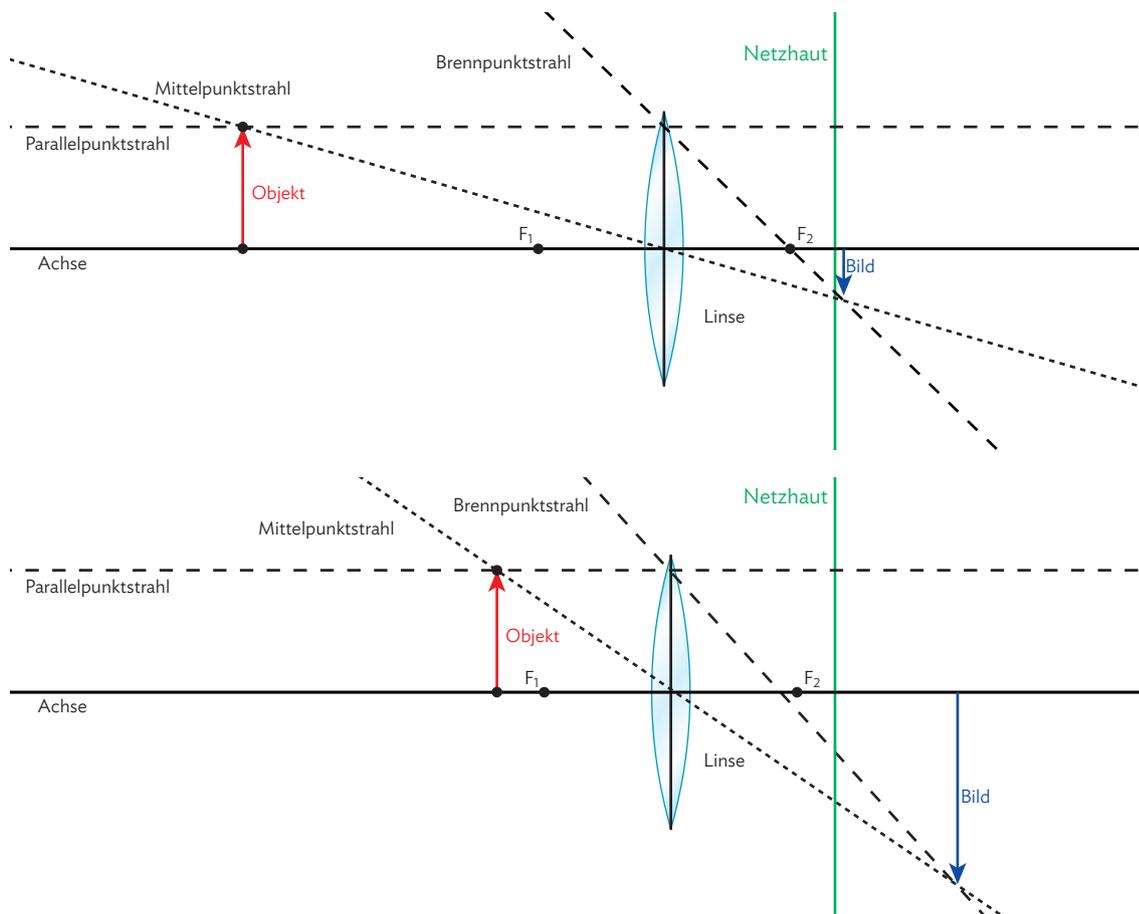
Im Folgenden beispielhafte Bearbeitung für die Hypothese „Je näher sich ein Objekt am Auge befindet, desto ausgeprägter ist die Unschärfe, die bei Weitsichtigkeit entsteht“.

Möglicher Versuchsaufbau: Auf einer optischen Bank wird ein Objekt durch eine Sammellinse scharf auf einem Sichtschirm abgebildet. Nun wird der Sichtschirm ein Stück an die Sammellinse angenähert (Weitsichtigkeit, das scharfe Bild würde hinter der Netzhaut entstehen). Das Objekt wird nun schrittweise der Linse angenähert.

Beobachtung: Das Bild wird bei Annäherung des Objekts an die Linse unschärfer. Wird das Objekt von der Linse entfernt, wird das Bild schärfer.

Vergleich mit Hypothese: Die Hypothese wurde mit einer je-desto-Aussage formuliert, was im streng mathematischen Sinn eine direkte/indirekte Proportionalität bedeutet. Da aber die Unschärfe in diesem Versuch nicht quantifiziert wird, kann eine Proportionalität nicht überprüft werden. Die Hypothese müsste also abgeändert werden zu „Mit einer Reduzierung der Gegenstandsweite steigt die Unschärfe.“

Skizzen zur Erklärung:



Die Linsengleichung besagt: Wird die Gegenstandsweite g verringert, muss bei konstanter Brennweite f die Bildweite b erhöht werden. Im Falle eines weitsichtigen Auges ist die Bildweite b bereits zu groß für eine scharfe Abbildung auf der Netzhaut (das scharfe Bild wäre hinter der Netzhaut). Eine weitere Erhöhung der Bildweite verstärkt also die Unschärfe, da das scharfe Bild nun noch weiter hinter der Netzhaut liegt.

Man könnte versuchen, die Unschärfe zu quantifizieren, etwa durch den Abstand d von Netzhaut und scharfem Bild: $d = b - n$.

Die Linsengleichung liefert in diesem Fall $d = \frac{1}{\frac{1}{f} - \frac{1}{g}} - n$, was weder auf eine direkte noch auf eine indirekte Proportionalität führt. Auch in diesem Fall kann keine je-desto-Aussage aufgestellt werden.

h) und i) siehe Simulation

2 Lichtwahrnehmung in der Netzhaut

Materialien zu Kapitel 2.2

► M1 Lernaufgabe: Nachbilder und Farbsehschwäche

Arbeitsauftrag Seite 32 und 33

- a) Die Frau erscheint als Schwarz-Weiß-Bild. Das Nachbild ist umso deutlicher, je schärfer die Kontraste sind, je größer die einzelnen Flächen des Objekts sind und je länger das Objekt fixiert worden ist.
- b) Das negative Nachbild erscheint in anderen Farben als das Originalbild, nämlich in den Komplementärfarben: Bei Blau ergibt sich ein gelbes Nachbild, bei Rot ein grünes Nachbild, bei Grün ein rotes Nachbild und bei Gelb ein blaues Nachbild.
- c) Individuelle Lösungen. Beispiele: siehe Mediacode im Schulbuch.
- d) Das Nachbild der Flagge erscheint in den Farben der italienischen Flagge (Grün-Weiß-Rot). In der magentafarbenen Fläche werden die Sehfärbstoffe in den rot- und den blauempfindlichen Zapfen erschöpft, wird eine weiße Fläche fixiert erscheint die Farbe Grün, da nur noch die grünen Zapfen Licht wahrnehmen können. Mit einer ähnlichen Argumentation ergibt sich auf der schwarzen Fläche ein weißes Nachbild und auf der cyanfarbenen Fläche ein rotes Nachbild.
- e) Da die Komplementärfarbe von Rot (Farbe der Wunde) Grün ist, kann der Nachbild-Effekt mit grünen Laken und grüner Operationskleidung unterdrückt werden. Ist der Blick lange auf die rote Wunde gerichtet, würde beim Blick auf eine weiße Fläche das vorherige Bild in der Komplementärfarbe erscheinen. Erfahrungen haben gezeigt, dass das aber Übelkeit hervorruft. Bei Blick auf eine grüne Fläche ist dieser Effekt quasi aufgehoben.
- f) Der Rhodopsinzyklus ist ein Prozess in den Stäbchen, der es uns ermöglicht, Licht wahrzunehmen. Rhodopsin ist ein Protein, das aus zwei Hauptkomponenten besteht: dem lichtempfindlichen Molekül Retinal und dem Protein Opsin. Wenn Licht auf die Retina trifft, absorbiert das Retinal die Lichtenergie und wird dabei von der cis- in die trans-Form umgewandelt. Dies führt zu einer strukturellen Veränderung von Rhodopsin, das dadurch aktiviert wird. Das aktive Rhodopsin löst daraufhin eine Kaskade von Reaktionen aus, was dazu führt, dass ein Signal an das Gehirn übertragen wird.
- g) In den Zapfen befinden sich ähnliche Farbstoffe, die Iodopsine. Sie reagieren auf Licht unterschiedlicher Wellenlänge. Die Verrechnung der Signale der drei verschiedenen Zapfenarten (rot-, grün- und blauempfindlich) ermöglicht eine genaue Farbzuordnung. Weiß ist eine Mischung aus Licht mit verschiedenen Wellenlängen, das alle drei Zapfenarten gleich stark erregt. Es gibt keine einzelne Wellenlänge, die dies bewerkstelligen kann. Ähnliches gilt für die Farbe Magenta. Dabei handelt es sich um eine Mischung von Wellenlängen, die die blau- und rotempfindlichen Zapfen gleich stark erregt, die grünempfindlichen Zapfen jedoch überhaupt nicht. Auch hier gibt es keine einzelne Wellenlänge, die dies bewirken kann.
- h) Funktionieren die rotempfindlichen Zapfen nicht mehr optimal, wird die Farbe Rot schwächer wahrgenommen als Grün oder Blau.

- i) Die Erklärungen sind entsprechend den Abbildungen der Farbsehtesttafeln auf Seite 33 im Schulbuch angeordnet.

Dieses Bild kann jeder Mensch erkennen, selbst wenn eine Farbenblindheit besteht. Hier sind die Kontraste entscheidend. Dieses Bild dient hauptsächlich der Erklärung des Testablaufs für die Person.	Die durchschnittliche Person sieht „8“, Personen mit Rot-Grün-Schwäche sehen „3“.	Die durchschnittliche Person sieht „6“, Personen mit Rot-Grün-Schwäche können die Zahl nicht erkennen.	Die durchschnittliche Person sieht „29“, Personen mit Rot-Grün-Schwäche sehen „70“.
Die durchschnittliche Person sieht „5“, Personen mit Rot-Grün-Schwäche sehen „2“.	Die durchschnittliche Person sieht „3“, Personen mit Rot-Grün-Schwäche sehen „5“.	Die durchschnittliche Person sieht „15“, Personen mit Rot-Grün-Schwäche sehen „17“.	Die durchschnittliche Person sieht „74“, Personen mit Rot-Grün-Schwäche sehen „21“.
Bei einem intakten Farbsehvermögen sieht man „6“. Die Mehrheit der farbenblinden Menschen kann die Zahl nicht deutlich erkennen.	Bei einem intakten Farbsehvermögen sieht man „57“, bei Rot-Farbenblindheit kann die Zahl nicht erkannt werden.	Bei einem intakten Farbsehvermögen sieht man „5“, bei Blau-Farbenblindheit kann die Zahl nicht erkannt werden.	Bei einem intakten Farbsehvermögen sieht man „42“, bei Rot-Farbenblindheit nur „2“, bei Grün-Farbenblindheit nur „4“.

- j) Von links nach rechts:
 Tulpen, Hyazinthen bei Protanopie (Schwächung der Rot wahrnehmenden Zapfen)
 Tulpen, Hyazinthen bei Tritanopie (Schwächung der Blau wahrnehmenden Zapfen)
 Tulpen, Hyazinthen ohne Farbfehlsichtigkeit
 Tulpen, Hyazinthen bei Deutanopie (Schwächung der Grün wahrnehmenden Zapfen)

2.1 Aufbau der Retina

Arbeitsaufträge Seite 35

- 1) Als gelben Fleck bezeichnet man den Bereich der menschlichen Netzhaut mit der größten Dichte von Sehzellen. Er befindet sich in der Mitte der Netzhaut (Retina) und hat einen Durchmesser von etwa 5 mm.
Der Abstand zweier Lichtpunkte muss mindestens $2\ \mu\text{m}$ sein, damit die Bildinformation von zwei Zapfen erkannt wird und unterschieden werden kann.

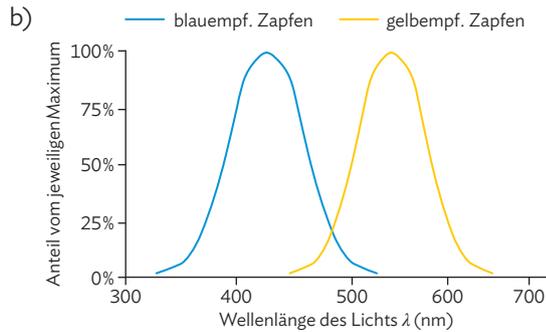
- 2) a) Das Licht durchläuft verschiedene Bereiche des Auges, bevor es auf die Netzhaut trifft, wo die Lichtreize in elektrische Signale umgewandelt werden.
Das Licht tritt zuerst in das Auge durch die transparente Hornhaut, die die äußere Oberfläche des Auges bildet. Nachdem das Licht die Hornhaut passiert hat, gelangt es in die vordere Augenkammer, die mit einer klaren, wässrigen Flüssigkeit, dem Kammerwasser, gefüllt ist.
Das Licht passiert dann die Linse, die sich hinter der Iris befindet. Die Linse ändert ihre Form, um das Licht zu fokussieren und es auf die Netzhaut zu projizieren. Hinter der Linse befindet sich der Glaskörper, eine gelartige Substanz, die das Auge ausfüllt und das Licht passieren lässt, bevor es auf die Netzhaut trifft.
Schließlich erreicht das Licht die Netzhaut, wo sich die lichtempfindlichen Zellen, die Photorezeptoren, befinden. Diese Photorezeptoren wandeln Lichtreize in elektrische Signale um, die dann durch den Sehnerv an das Gehirn weitergeleitet werden, um dort als visuelle Informationen interpretiert zu werden. Davor liegt die mittlere Schicht, die Schicht der Querverbindungen und Informationsbündelung und -verknüpfung. Die vorderste Schicht besteht aus Ganglienzellen, an der die vorverarbeiteten Informationen aus den Sehzellen zusammenlaufen und denen ein bestimmtes Sehfeld zugeordnet wird.

- b) Der Rote-Augen-Effekt tritt auf, wenn Fotografien mit Blitzlicht aufgenommen werden, insbesondere in Umgebungen mit wenig Umgebungslicht. Dieser Effekt entsteht durch die Reflexion des Blitzlichts an den Blutgefäßen im Inneren des Auges.
Die rote Farbe entsteht, weil das Blitzlicht durch die Pupille ins Auge gelangt und dann an der gut durchbluteten Netzhaut des Auges als rotes Licht reflektiert wird.
Andere Teile des Auges, wie die weiße Augenhaut oder die Iris, erscheinen nicht rot, da sie nicht so stark mit Blutgefäßen durchzogen sind und daher weniger Licht reflektieren.

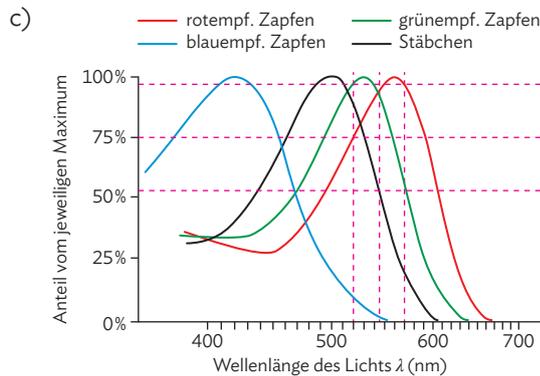
2.2 Farbsehen und additive Farbmischung

Arbeitsaufträge Seite 39

- 1) a) Die Seheindrücke bei 400 nm und 500 nm unterscheiden sich bezüglich ihrer Helligkeit, da Stäbchen bei 500 nm ihre maximale Absorption aufweisen, bei 400 nm hingegen kaum noch Licht absorbieren. Bei 470 nm und 520 nm ist die Helligkeit identisch, da Stäbchen bei diesen Wellenlängen eine gleich starke Absorption aufweisen.



Die beiden Möglichkeiten unterscheiden sich in ihrer Helligkeit, aber nicht in ihrer Farbwahrnehmung. Bei 490 nm absorbieren beide Zapfen gleich stark aber insgesamt nur wenig. Bei 420 nm absorbieren der blauempfindliche und bei 530 nm der gelbempfindliche Zapfen ebenfalls gleich stark und insgesamt deutlich mehr.



520 nm erregen die grünen Zapfen genauso stark wie 570 nm die roten Zapfen. Daher könnte man zunächst vermuten, dass hier der gleiche Farbeindruck erzeugt wird. Allerdings erregen 520 nm auch die rotempfindlichen Zapfen und 570 nm auch die grünempfindlichen Zapfen. Bei 545 nm werden beide Zapfen exakt gleich stark erregt, bei der Kombination aus 520 nm und 570 nm wird der rotempfindliche Zapfen geringfügig stärker erregt als der grünempfindliche, da bei 520 nm die Absorption der rotempfindlichen Zapfen bei ca. 75 % liegt, bei 570 nm die Absorption der grünempfindlichen Zapfen jedoch nur bei ca. 55 %.

- d) Vögel besitzen vier verschiedene Zapfenarten, verfügen also über ein tetrachromatisches Sehsystem. Sie können zusätzlich zu den Farben, die wir wahrnehmen können, auch noch Mischfarben unterscheiden, die durch die gleichzeitige Erregung von UV- und blauempfindlichen, UV- und grünempfindlichen und UV- und rotempfindlichen Zapfen entstehen.

- 2\ Die Grafik zeigt, dass Wasser Licht verschiedener Wellenlängen unterschiedlich stark absorbiert. Je größer die Wellenlänge, desto stärker wird das Licht absorbiert. Wenn man unter Wasser tiefer steigt, verschwinden langsam die Farben Rot, Orange, Gelb usw. Blaues bzw. ultraviolette Licht dringt am tiefsten vor. Für Pinguine sind Sinneszellen für rotes Licht nicht sehr sinnvoll, da unterhalb von 20 m Tiefe kaum noch rotes Licht vorhanden ist. Dort kommt praktisch nur noch grünes, blaues und ultraviolettes Licht vor. Durch die Erweiterung der Farbwahrnehmung auf den ultravioletten Bereich können die Farbnuancen in dem Bereich besser unterschieden und mögliche Beute besser wahrgenommen werden.

2.3 Das elektromagnetische Spektrum

Arbeitsaufträge Seite 41

- 1\ Der Lichtschutzfaktor (LSF) ist eine Maßeinheit für die Fähigkeit eines Sonnenschutzmittels, die Haut vor schädlicher UV-Strahlung zu schützen. Der LSF gibt an, um welchen Faktor die Zeit verlängert wird, die jemand in der Sonne verbringen kann, ohne dass es zu einem Sonnenbrand kommt, verglichen mit der Zeit ohne Sonnenschutz. So z. B. bedeutet ein LSF 30, dass eine Person, die das Sonnenschutzmittel verwendet, etwa 30-mal länger in der Sonne bleiben kann, ohne einen Sonnenbrand zu bekommen, als wenn sie kein Sonnenschutzmittel verwenden würde. Es ist wichtig zu beachten, dass der LSF hauptsächlich den Schutz vor UVB-Strahlen angibt, die für Sonnenbrand verantwortlich sind, während UVA-Strahlen für langfristige Hautschäden verantwortlich sind. Moderne Sonnenschutzmittel bieten jedoch oft einen Breitband-Schutz gegen sowohl UVB- als auch UVA-Strahlen. Die Auswahl des richtigen Lichtschutzfaktors hängt von verschiedenen Faktoren ab, einschließlich des Hauttyps, der geografischen Lage und der Dauer des Sonnenaufenthalts. Es wird empfohlen, Sonnenschutzmittel regelmäßig und großzügig aufzutragen, um eine wirksame Abschirmung vor den schädlichen Auswirkungen der UV-Strahlung zu gewährleisten.
- 2\ Der menschliche Körper kann durch verschiedene Spektralbereiche von elektromagnetischer Strahlung gefährdet werden.
1. **Kosmische Strahlung aus dem Weltraum:** Sie besteht aus hochenergetischen Teilchen, die aus dem Weltraum auf die Erde treffen. Die Erdatmosphäre schirmt einen Großteil dieser Strahlung ab, aber Menschen, die in höheren Lagen oder auf Flugreisen sind, können einer erhöhten Exposition ausgesetzt sein. Langfristige Exposition kann das Krebsrisiko erhöhen und das Risiko genetischer Mutationen beeinflussen.
 2. **Röntgenstrahlung:**
 - Medizinische Röntgenstrahlung: In der Medizin werden Röntgenstrahlen für diagnostische Zwecke eingesetzt. Übermäßige Exposition kann das Krebsrisiko erhöhen, daher werden Schutzmaßnahmen wie Bleischürzen während Röntgenuntersuchungen angewendet.
 - Industrielle und Forschungsanwendungen: In bestimmten Industrie- und Forschungsbereichen können Menschen Röntgenstrahlung ausgesetzt sein. Auch hier ist es wichtig, angemessene Schutzvorkehrungen zu treffen.

3. Ultraviolette Strahlung (UV):

- **UVA:** Kann vorzeitige Hautalterung und Pigmentierung verursachen und trägt ebenfalls zu Hautkrebs bei.
- **UVB:** Übermäßige Exposition kann Sonnenbrand verursachen und das Risiko von Hautkrebs und anderen Hautschäden erhöhen.
- **UVC:** Diese Strahlung wird normalerweise von der Erdatmosphäre absorbiert und stellt für den Menschen auf der Erdoberfläche keine unmittelbare Gefahr dar.

4. Infrarote Strahlung (IR): Intensive Einwirkung kann Verbrennungen, Haut- und Gewebeschäden verursachen, insbesondere wenn es sich um Infrarotstrahlung handelt, die von starken Wärmequellen emittiert wird, wie etwa von Schweißlichtbögen oder bestimmten industriellen Anwendungen.

3 Grenzen unserer Sehleistung

Materialien zu Kapitel 3.1

► M1 Lernaufgabe: Interferenz an dünnen Schichten

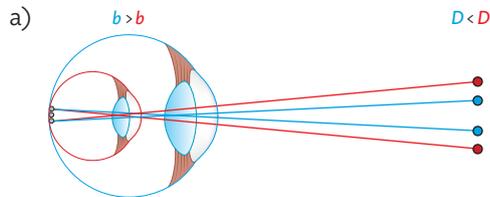
Arbeitsauftrag Seite 42

- a) Betrachtet man die Gleichung $2d = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2n}$, so gilt:
linke Seite $2d$: Lichtweg durch die Schicht (Licht läuft durch die Schicht der Dicke d , wird reflektiert und läuft wieder zurück)
rechte Seite $(2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$: destruktive Interferenz, es kommt zur Auslöschung.
Der Gangunterschied zwischen Vorder- und Rückseite beträgt ein ungeradzahliges Vielfaches von $\frac{\lambda}{2}$.
 $\frac{\lambda}{n}$: Wellenlänge λ des Lichts verringert sich in einem Stoff mit Brechzahl n auf $\frac{\lambda}{n}$.
- b) Die Entspiegelung von Brillen bezieht sich auf spezielle Beschichtungen, die auf die Oberfläche von Brillen aufgedampft werden, um störende Reflexionen zu vermeiden. Diese Beschichtung besteht oft aus mehreren Schichten mit unterschiedlichen Brechungsindizes, die das Auftreten von Lichtreflexionen verschiedener Lichtfarben und Lichtrichtungen minimieren.
Das Licht einer bestimmten Farbe interferiert an einer der bestimmten Schichten destruktiv; das Gegenüber des Brillenträgers sieht keine Lichtreflexe in der Brille. Aber auch der Brillenträger selbst sieht keine störenden Reflexionen.
Vorteile: Die Entspiegelungsbrille sorgt dafür, dass Lichtreflexe vermieden werden und dadurch das Sehen klarer und schärfer wird. Künstliche Lichtquellen blenden weniger und auch bei schwachen Lichtverhältnissen ist gutes Sehen möglich.
Nachteil: Entspiegelte Brillen sind teurer als solche ohne Beschichtung. Daneben sind die aufgedampften Schichten sehr viel kratzanfälliger und reinigungsmittlempfindlicher als die Grundschicht der Brillengläser. Auch ist die Entspiegelungsschicht sehr empfindlich gegenüber Fingerabdrücken und Schmutz, was zu einem häufigeren, aber sanfteren Reinigungsaufwand führen kann.

Materialien zu Kapitel 3.4

► M2 Lernaufgabe: Auflösungsvermögen beim Linsenauge

Arbeitsauftrag Seite 43



b) $R = 1,22 \cdot \lambda \cdot \frac{b}{d}$

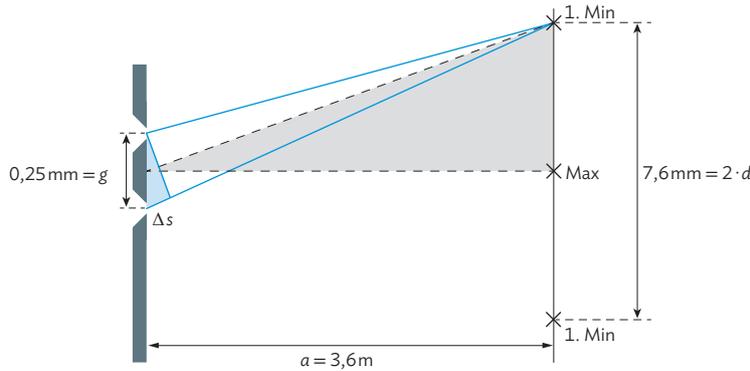
Der Radius R eines Beugungsscheibchens hängt nicht nur von der Bildweite b (Augen-größe), sondern auch vom Pupillendurchmesser d ab. Wird nur b erhöht, vergrößert sich der Abstand d_{Netzhaut} der Bildpunkte auf der Netzhaut, aber auch der Radius R . Da $R \leq d_{\text{Netzhaut}}$ gelten muss, um zwei Punkte noch getrennt wahrnehmen zu können, muss sich der Pupillendurchmesser d mindestens um den gleichen Faktor vergrößern wie das Auge.

- c) Gemäß dem Rayleigh-Kriterium gilt $R < d$, also müsste man die Punkte getrennt wahrnehmen können. Da aber zwischen die zwei Bildpunkte auf der Netzhaut drei Photorezeptoren passen müssen, muss außerdem gelten: $R < d$ und $d \geq 2 \cdot d_{\text{Photorezeptor}}$. Der theoretisch kleinstmögliche Zapfendurchmesser wäre $1 \mu\text{m}$, also muss $d \geq 2 \mu\text{m}$ sein. Daher können die beiden Bildpunkte nicht getrennt wahrgenommen werden.
- d) Betrachtet man die Werte zur Sehschärfe in der Tabelle und in Teilabbildung (b) fällt auf, dass nachtaktive Tiere offenbar ein schlechteres Auflösungsvermögen als tagaktive Tiere haben. Das Zusammenschalten der Signale von mehreren Photorezeptoren auf eine Nervenzelle erhöht die Empfindlichkeit, sorgt aber auch dafür, dass nicht mehr genau zugeordnet werden kann, in welchem Photorezeptor das Signal ursprünglich ausgelöst wurde. Das Auflösungsvermögen wird also geringer. Beim Tapetum lucidum kann das Photon auf dem Hinweg durch den Photorezeptor oder auf dem Rückweg nach der Reflexion ein Signal auslösen. Dies muss aufgrund des Reflexionsgesetzes nicht zwingend im gleichen Photorezeptor stattfinden. Damit kann auch nicht mehr genau zugeordnet werden, woher das Photon kam.

3.1 Beugung und Interferenz am Doppel- und Einfachspalt

Arbeitsaufträge Seite 47

- 1) a) Die zwei ersten Minima sind genauer zu messen, da diese schmaler sind als die beiden Maxima erster Ordnung.
 b) Es gilt $\sin \alpha = \frac{\Delta s}{g}$.



Für ein Minimum beträgt der Gangunterschied ein ungeradzahliges Vielfaches von

$$(2k - 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \text{ für } k = 1, 2, 3, \dots$$

Daher gilt für das Minimum erster Ordnung: $\sin \alpha = \frac{\Delta s}{g} = \frac{(2 \cdot 1 - 1) \cdot \lambda}{2g}$.

Aus dem gestrichelten Dreieck ergibt sich: $\tan \alpha = \frac{d}{a}$.

Weil α für gewöhnlich sehr klein ist, lässt sich die Näherung $\tan \alpha \approx \sin \alpha$ anwenden.

Anwenden der Kleinwinkelnäherung und gleichsetzen:

$$\frac{(2 \cdot 1 - 1) \cdot \lambda}{2g} = \frac{d}{a} \Rightarrow \lambda = \frac{2gd}{a} = \frac{2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{3,6 \text{ m}} = 5,28 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 528 \text{ nm} \approx 0,53 \mu\text{m}$$

- c) Bei den Maxima erster Ordnung beträgt der Gangunterschied $1 \cdot \lambda$.

Entsprechend gilt dann analog zu b): $\frac{\Delta s}{g} = \frac{1 \cdot \lambda}{g} = \frac{d}{a}$.

Einsetzen der in a) bestimmten Wellenlänge und Umstellen nach d liefert:

$$d = \frac{1 \cdot \lambda \cdot a}{g} = \frac{1 \cdot 528 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot 3,6 \text{ m}}{2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}} = 7,6 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 7,6 \text{ mm}$$

Dies entspricht dem Abstand des Maximums erster Ordnung zum Maximum nullter Ordnung. Entsprechend beträgt der Abstand zwischen den beiden Maxima erster Ordnung 15,2 mm.

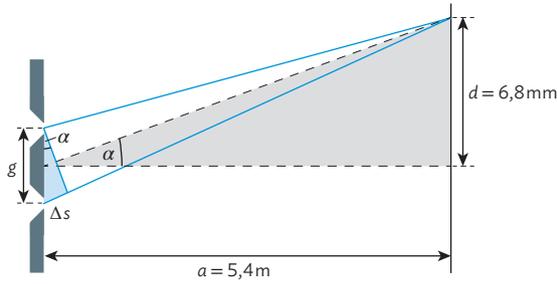
Für die Minima zweiter Ordnung beträgt der Gangunterschied $\frac{3}{2} \cdot \lambda$.

Entsprechend erhält man:

$$d = \frac{3 \cdot \lambda \cdot a}{2 \cdot g} = \frac{3 \cdot 528 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot 3,6 \text{ m}}{2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}} = 11,4 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 11,4 \text{ mm}$$

Der Abstand der beiden Minima zweiter Ordnung beträgt dann 22,8 mm.

2) a)



Aus dem gestrichelten Dreieck ergibt sich $\tan \alpha = \frac{d}{a}$.

Weil α für gewöhnlich sehr klein ist, lässt sich die Näherung $\tan \alpha \approx \sin \alpha$ anwenden.

Für den Sinus gilt (siehe Abbildung): $\sin \alpha = \frac{\Delta s}{g} = \frac{k \cdot \lambda}{g}$.

Da d in diesem Fall der Abstand zwischen dem Maximum 0. und 1. Ordnung ist, ist $k = 1$.

Setzt man nun den Sinus in die obige Formel ein und stellt nach b um, erhält man:

$$b = \frac{1 \cdot \lambda \cdot a}{g} = \frac{1 \cdot 590 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot 5,4 \text{ m}}{6,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 4,7 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0,47 \text{ mm}$$

b) Analog zu a) gilt: $\sin \alpha = \frac{\Delta s}{g} = \frac{k \cdot \lambda}{g}$.

Da $\alpha < 90^\circ$ sein muss, muss auch $\sin \alpha < 1$ sein.

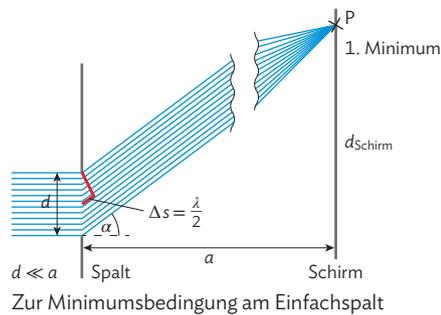
Einsetzen und Umstellen nach k liefert:

$$\frac{k \cdot \lambda}{g} < 1 \Rightarrow k < \frac{g}{\lambda} = \frac{4,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}}{590 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 797$$

Das Maximum höchster Ordnung hat also die Ordnungszahl 796. Betrachtet man beide Richtungen, kann es somit insgesamt höchstens 1592 Maxima geben. Weil die Intensität aber mit jedem Maximum kleiner wird, sind in den meisten Fällen nur wenige Ordnungen relevant.

3) a) Das Laserlicht lässt sich als eine große Anzahl von Elementarwellen betrachten. Wenn diese auf den Spalt der Breite d treffen, kommt es zur Beugung. Dadurch legen die einzelnen Elementarwellen unterschiedlich weite Wege bis zum Schirm im Abstand a zurück, sie haben einen Gangunterschied Δs .

Beträgt der Gangunterschied am Schirm gerade ein ungeradzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge, dann löschen die Wellen sich gegenseitig aus, es entsteht ein Minimum. Beim Minimum erster Ordnung beträgt der Gangunterschied entsprechend $\frac{\lambda}{2}$.



b) Beträgt die Breite des Hauptmaximums 50 mm, liegt das Minimum erster Ordnung im Abstand von 25 mm.

Es gelten die Bedingungen: $\tan \alpha = \frac{d_{\text{Schirm}}}{a}$ und für die Minima $\sin \alpha = \frac{\Delta s}{d} = \frac{k \cdot \lambda}{d}$ mit $k = 1, 2, 3, \dots$

Die Kleinwinkelnäherung liefert:

$$\frac{d_{\text{Schirm}}}{a} = \frac{k \cdot \lambda}{d} \Rightarrow d = \frac{1 \cdot 670 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot 4 \text{ m}}{25 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 1,07 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0,11 \text{ mm}$$

Die Kleinwinkelnäherung war also gültig, weil $0,11 \text{ mm} \ll 4 \text{ m}$ ist.

c) Aus Aufgabenteil b): $\frac{d_{\text{Schirm}}}{a} = \frac{k \cdot \lambda}{d}$

Da λ kurzwelliger, also kleiner, wird und d_{Schirm} die gleiche Größe haben soll, muss d um denselben Faktor kleiner werden, da es im Nenner steht.

3.2 Auflösungsvermögen des menschlichen Auges

Arbeitsaufträge Seite 51

$$1) \ a) \left(\text{Pixeldichte in ppi} = \frac{\sqrt{(\text{Pixelanzahl längs})^2 + (\text{Pixelanzahl hoch})^2}}{\text{Bildschirmdiagonale in Zoll}} \right)$$

$$\text{Länge eines Pixelquadrats: } \frac{2,54 \cdot 10^{-2} \text{ m}}{264} = 9,62 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 96,2 \mu\text{m}$$

Wenn x der Abstand zweier Punkte ist, die ein normalsichtiges Auge (Visus 1) im Abstand von 30 cm noch auflösen kann, so gilt:

$$\tan\left(\frac{1}{60^\circ}\right) = \frac{x}{0,3 \text{ m}} \quad x = 8,73 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 87,3 \mu\text{m}$$

Ja, ein normalsichtiges Auge kann (bei guten Lichtverhältnissen) sogar $87,3 \mu\text{m}$ große Objekte vollständig erkennen, weshalb die Länge eines Pixelquadrats von $96,2 \mu\text{m}$ wahrgenommen werden kann und zwei Pixel voneinander unterscheidbar sind.

$$b) \left(\frac{\sqrt{(1920)^2 + (1080)^2}}{40 \text{ Zoll}} = 55 \text{ ppi} \right)$$

$$\text{Länge eines Pixelquadrats: } \frac{2,54 \cdot 10^{-2} \text{ m}}{55} = 4,62 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 462 \mu\text{m}$$

Der Abstand x vom Fernseher, bei dem ein normalsichtiges Auge (Visus 1) gerade noch einzelne Pixel ausmachen kann, berechnet sich über:

$$\tan\left(\frac{1}{60^\circ}\right) = \frac{4,62 \cdot 10^{-4} \text{ m}}{x} \Rightarrow x = 1,59 \text{ m}$$

Der Abstand des Fernsehbildes sollte mindestens 1,59 m betragen.

In der Praxis hat sich bewährt, dass der Abstand bei einem HDTV-Bild etwa das Drei- bis Vierfache der Bildhöhe betragen sollte.

- c) Die Sinnhaftigkeit einer kontinuierlichen Erhöhung der Bildschirmauflösung hängt von verschiedenen Faktoren ab. Für bestimmte Anwendungen, wie professionelle Bildbearbeitung, Videobearbeitung oder 3D-Modellierung, kann eine höhere Auflösung mehr Details und Genauigkeit bringen. In der Gaming-Welt kann eine höhere Auflösung schärfere Bilder und mehr Details liefern. Zu beachten ist dabei, dass höhere Bildschirmauflösungen auch leistungsfähigere Hardware und Graphikkarten benötigt, um einen reibungslosen Ablauf zu gewähren.

Für den durchschnittlichen Benutzer bietet meist eine höhere Bildschirmauflösung keinen nennenswerten Vorteil, da die Unterschiede nicht wahrgenommen werden. Bei sehr kleinen Texten oder Symbolen kann es bei einem hochauflösenden Bildschirm zu Augenbelastung kommen.

$$2) \ a) \ \sin \alpha = \frac{1,22 \cdot \lambda}{d} = \frac{1,22 \cdot 750 \text{ nm}}{7,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 1,3 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \alpha = 0,45'$$

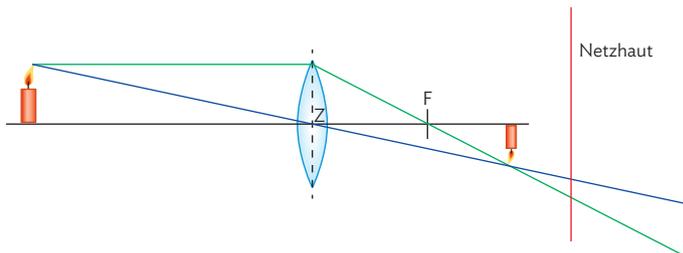
$$\text{Visus} = \frac{1'}{\alpha} = 2,2$$

Anmerkung: Hier wird nicht berücksichtigt, dass der Abstand der Bildpunkte größer als der doppelte Durchmesser der Zapfen sein muss. R ist hier $2,5 \mu\text{m}$, also wird der Winkel mit dieser einfachen Abschätzung zu klein bzw. der Visus zu groß ermittelt, da der doppelte Zapfenabstand bei ca. $3 \mu\text{m}$ liegt. Der Zapfenabstand wäre bei diesem Pupillendurchmesser der schwächste Faktor, der den Visus nach oben auf 2 begrenzt.

$$b) \ \text{Visus } 0,6 \Rightarrow \alpha = 1,7'$$

$$d = \frac{1,22 \cdot 750 \text{ nm}}{\sin \alpha} = 1,9 \text{ mm}$$

- c) Der Visus ist altersabhängig, da der maximal mögliche Pupillenradius mit dem Alter zunimmt. Dies wirkt sich auf den Radius des Beugungsscheibchens aus. Im Alter nimmt der Radius der Beugungsscheibchen daher zu. Gemäß dem Rayleigh-Kriterium muss aber $R \leq d_{\text{Netzhaut}}$ gelten, also nimmt auch d_{Netzhaut} zu. Die Punkte müssen somit auf der Netzhaut weiter auseinander liegen. Daher nimmt die Winkelsehschärfe zu und damit der Visus ab.
- d) Beim kurzsichtigen Auge kommt zum Effekt der Beugungsunschärfe durch die Beugung an der Pupille noch die Unschärfe durch die zu kurze Brennweite.



Daher erscheint ein Bildpunkt nicht als Punkt, sondern als unscharfer Fleck. Insgesamt führt dies zu einer Erniedrigung des Visus.

3.3 Schülerexperiment: Auflösungsvermögen des menschlichen Auges

Arbeitsauftrag Seite 52

- a) Die Schülerinnen und Schüler positionieren das Schulbuch so, dass die Entfernung e von sich selbst zum Schulbuch, bei der sie die beiden Linien nicht mehr getrennt voneinander wahrnehmen können, z. B. am Boden gemessen werden kann.
- b) Einsetzen der gemessenen Entfernung und Umstellen der Gleichung liefert:

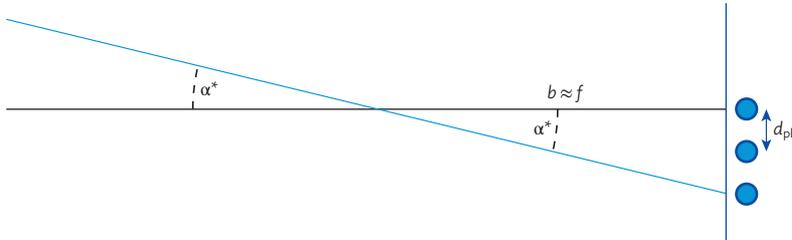
$$d = \frac{1 \text{ mm} \cdot 1,9 \text{ cm}}{e} = \dots$$
- c) Misst man in b) z. B. einem Abstand von $e = 5 \text{ m}$, so berechnet sich der Abstand zweier Sehzellen mit $d = 5 \text{ }\mu\text{m}$ und es befinden sich auf einer von Länge von 1 mm ca. $\frac{1 \text{ mm}}{5 \text{ }\mu\text{m}} = 200$ Sehzellen.
- d) Befinden sich z. B. 200 Sehzellen auf 1 mm , findet man auf 1 mm^2 Netzhaut ca. 40 000 Sehzellen.
- e) Messunsicherheiten können auftreten beim Messen des Spaltabstands und des Abstands zum Gegenstand e . Außerdem beruht das Messverfahren auf einer subjektiven Abschätzung, ob die beiden Striche noch getrennt wahrgenommen werden. Zur Berechnung wird der Wert $b = 1,9 \text{ cm}$ verwendet. Nicht jedes Auge hat exakt diese Größe. Der Pupillendurchmesser ist entscheidend für das Auflösungsvermögen und wird hier nicht erfasst. Er ist stark beleuchtungsabhängig. Um die Sehzellendichte zu erfassen, muss die Sehzellendichte und nicht die Beugungsunschärfe der limitierende Faktor sein. Der Pupillendurchmesser darf also nicht zu klein werden, d. h. die Beleuchtung darf nicht zu grell sein.
- f) Individuelle Einzelergebnisse.
 Es werden die Formeln $\sigma = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \cdot \sqrt{(x_1 - \mu)^2 + \dots + (x_n - \mu)^2}$ und $\mu = \frac{1}{n} \cdot (x_1 + \dots + x_n)$ von Seite 53 des Schulbuches verwendet.
- g) Je mehr Personen an dem Versuch teilnehmen, desto kleiner wird die Messunsicherheit $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ rechnerisch. Da es nur zwei gültige Ziffern gibt, gibt es eine Anzahl an Probanden, ab der die rechnerische Messunsicherheit kleiner wird, als die Spannweite an möglichen Werten, die sich aus den gültigen Ziffern ergibt. Es ist daher nicht sinnvoll, eine höhere Zahl an Messungen vorzunehmen.
- h) Man würde Daten verschiedener Probanden miteinander vergleichen. Nicht alle besitzen die exakt gleiche Augengröße. Möglicherweise wurden nicht alle Experimente unter identischen Beleuchtungsbedingungen (z. B. am Gang statt im Physikraum, unterschiedliche Entfernungen zum Fenster) vorgenommen. Auch können Sehfehler wie Kurzsichtigkeit oder Weitsichtigkeit eine Rolle spielen. Daher wird sich vermutlich eine sehr große Streuung bei den Werten zeigen.
- i) Individuelle Einzelergebnisse.
 Für den Visus gilt: $\text{Visus} = \frac{1'}{\alpha}$.

$$\tan \alpha = \frac{1,0 \text{ mm}}{e}$$

3.4 Optimierung des Auflösungsvermögens im Tierreich

Arbeitsaufträge Seite 57

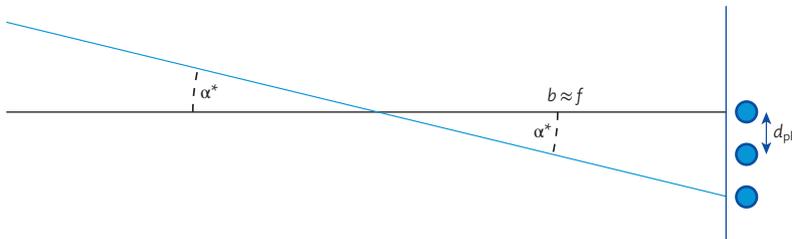
1) a) Skizze für Ansatz:



$$\alpha^* \approx \tan \alpha^* = \frac{2 \cdot d_{ph}}{b}, \alpha^* \text{ im Bogenmaß}$$

b) Umrechnung in Winkelminuten: $\alpha_{\text{Winkelminuten}} = \alpha^* \cdot \frac{360 \cdot 60'}{2\pi} = \frac{2 \cdot d_{ph}}{b} \cdot \frac{360 \cdot 60'}{2\pi}$

2) a) Skizze für Ansatz:



$$\tan \alpha^* = \frac{2 \cdot d_{ph}}{b} \Rightarrow d_{ph} = 0,5 \cdot b \cdot \tan \alpha^* = \frac{2 \cdot d_{ph}}{b} \approx 0,5 \cdot b \cdot \alpha^*$$

$$= 0,5 \cdot b \cdot \alpha_{\text{Winkelminuten}} \cdot \frac{2\pi}{360 \cdot 60'}$$

$$\text{Sehzellendichte} = \frac{1}{(d_{ph})^2}$$

	Augengröße	Abstand der Sehzellen	Sehzellendichte in mm ⁻²
Mensch 0,4'	b = 1,9 cm	1,105 · 10 ⁻³ mm	818 428
Bussard 0,1'	b = 2 cm	2,909 · 10 ⁻⁴ mm	11 817 145
Hauskatze 5'	b = 1,65 cm	0,0120 mm	6945
Ratte 40'	b = 6,3 mm	0,0367 mm	744

- b) Eine Fovea vergrößert das Netzhautbild, es passen also mehr Sehzellen zwischen die beiden Bildpunkte, die aufgelöst werden sollen. Daher berechnet man einen kleineren Abstand bzw. eine höhere Sehzellendichte.
- c) Bei Mensch und Mäusebussard fällt die Abschätzung aus a) deutlich zu hoch aus. Dies liegt daran, dass Greifvögel und Menschen eine trichterförmige Fovea besitzen. Bei Katzen fällt die Abschätzung aus a) deutlich zu niedrig aus. Hier muss eine andere Erklärung für die Abweichung vorliegen.
- d) Individuelle Lösungen. Im Prinzip sieht die Fovea wie beim Adlerauge aus (siehe B5 auf S. 54 im Schulbuch).
- e) Der Schätzwert aus a) liegt bei Katzen etwa um den Faktor 4 zu niedrig. Dies entspricht genau dem Verhältnis von Photorezeptoren zu ableitenden Nervenzellen in der Area centralis.

- 3) a) Je nach Hunderasse kann die Körpergröße und damit die Augengröße bzw. Pupillengröße sehr unterschiedlich ausfallen. Basierend auf den Daten von S. 43 im Schulbuch liegt die Hypothese nahe, dass auch die Winkelsehschärfe je nach Hunderasse unterschiedlich ausfällt. Ohne Angabe der untersuchten Hunderasse ist eine starke Streuung der Messergebnisse unvermeidlich.
- b) Es ergibt sich eine zusätzliche Streuung aufgrund der Tagesform bzw. der grundsätzlichen Zuverlässigkeit des jeweiligen Individuums. Insgesamt erhöht sich vermutlich die Messunsicherheit.
- c) Je höher die Umgebungshelligkeit, desto kleiner ist der Pupillendurchmesser. Aufgrund des Rayleigh-Kriteriums vergrößert sich damit der Radius des Beugungsscheibchens und somit die Beugungsschärfe. Die Winkelsehschärfe nimmt also ab.
- d) Ein Zusammenführen der Ergebnisse verschiedener Arbeitsgruppen wäre nur dann sinnvoll, wenn jeweils absolut identische Versuchsbedingungen vorliegen. Das bedeutet, es wird die gleiche Hunderasse bei absolut vergleichbaren Beleuchtungsbedingungen untersucht. Aber selbst innerhalb einer Hunderassen besitzen nicht alle Individuen absolut identische Augengrößen. Daher müsste im Grunde für jeden Probanden die exakte Augengröße ermittelt werden. Außerdem sollten das vorgeschaltete Training der Individuen, die Zuverlässigkeit der ausgewählten Individuen und der Tageszeitpunkt des Experiments vergleichbar sein. Diese Faktoren bestimmen maßgeblich die Messunsicherheit. Eine höhere Anzahl der Messungen reduziert bei Verwendung der Standardabweichung die Messunsicherheit. Sind die Versuchsbedingungen aber nicht identisch, suggeriert die Verwendung der Standardabweichung möglicherweise eine Genauigkeit, die tatsächlich nicht vorliegt.

Vermischte Aufgaben Teil A

Basisaufgaben Seiten 58 und 59

1\ Das Sandhöhlenfisch-Auge

- a) Für eine scharfe Abbildung muss die Linsengleichung erfüllt sein: $\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$.
 $b = 2,0 \text{ mm}, g = 25 \text{ cm}$

$$D = \frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{25 \text{ cm}} + \frac{1}{2,0 \text{ mm}} = \frac{1}{0,25 \text{ m}} + \frac{1}{0,0020 \text{ m}} = 505 \text{ dpt} \approx 5,0 \cdot 10^2 \text{ dpt}$$

b) $D = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$

$$\frac{1}{g} = D - \frac{1}{b}$$

$$g = \frac{1}{D - \frac{1}{b}} = \frac{1}{690 \text{ dpt} - \frac{1}{0,0020 \text{ m}}} \approx 5,3 \text{ mm}$$

- c) Die Bildweite des Sandhöhlenfischauges ist ca. 10-mal so klein wie die Bildweite des menschlichen Auges. Daher müssen die Lichtstrahlen deutlich stärker gebrochen werden als im menschlichen Auge.

- d) Die Brechkraft einer Linse hängt vom Krümmungsradius und der Differenz der Brechungsindizes von Linse und Medium ab. Ein wesentlich kleinerer Krümmungsradius kann durch eine Verkleinerung der Linse erzielt werden. Die Differenz der Brechungsindizes kann durch Verwendung eines anderen Linsenmaterials mit höherem Brechungsindex vergrößert werden.

Der Sandhöhlenfisch hat eine ca. 10-mal so große Brechkraft wie das menschliche Auge und ein ca. 10-mal so kleines Auge. Daher gilt für den Krümmungsradius R :

$$R_{\text{Sandhöhlenfisch}} \approx \frac{1}{10} R_{\text{Mensch}}. \text{ Da } D \sim \frac{1}{R}, \text{ könnte dies die höhere Brechkraft erklären. Um bei}$$

$D \sim n_{\text{Linse}} - n_{\text{Medium}}$ einen Faktor 10 zu erzeugen, müsste $n_{\text{Linse}} \approx 1,8$ betragen. Vergleicht man dies mit den Brechungsindizes verschiedener organischer Strukturen im menschlichen Auge, die alle zwischen 1,3 und 1,4 liegen, und z. B. dem Brechungsindex verschiedener Glassorten mit $n = 1,5$ bis $n = 1,9$, ultrahochbrechendem Kunststoff mit bis zu $n = 1,76$ oder Rubin mit $n = 1,76$, erscheint es unwahrscheinlich, dass alleine dieser Effekt für die deutliche Erhöhung der Brechkraft verantwortlich ist. Das Material der Linse wäre dann wohl nicht mehr elastisch. Allerdings kann dieser Effekt zu einer Erhöhung beitragen.

2\ Linsengleichung im Auge

a) $D = \frac{1}{f} = \frac{1}{b} = \frac{1}{19 \text{ mm}} = \frac{1}{0,019 \text{ m}} \approx 53 \text{ dpt}$

- b) Das Ergebnis von Teilaufgabe a) liegt deutlich näher an $D_{\text{Fernsicht}}$, während sich zu D_{Nahsicht} eine wesentlich höhere Abweichung ergibt. Daher ist die Näherung eher für die Fernsicht geeignet.

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

Für $f = b$ würde sich $\frac{1}{g} = 0 \frac{1}{\text{m}}$ ergeben. Der Gegenstand müsste also unendlich weit entfernt sein. Dies stützt das Ergebnis von Teilaufgabe b). Die Näherung ist eher für die Fernsicht geeignet.

$$d) D = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

$$\frac{1}{b} = D - \frac{1}{g}$$

$$b = \frac{1}{D - \frac{1}{g}} = \frac{1}{60 \text{ dpt} - \frac{1}{1,5 \text{ m}}} \approx 16,9 \text{ mm}$$

$$\frac{1}{f} = D \Rightarrow f = \frac{1}{D} = \frac{1}{60 \text{ dpt}} \approx 16,7 \text{ mm}$$

Unter Berücksichtigung der zwei gültigen Ziffern würde sich keinerlei Abweichung ergeben.

3\ Das Gullstrand-Auge

$$a) D_{\text{Cornea}} = \frac{n_{\text{Kammerwasser}} - n_{\text{Luft}}}{r} = \frac{1,336 - 1}{0,0078 \text{ m}} \approx 43,1 \text{ m}^{-1} = 43,1 \text{ dpt}$$

Es ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Literaturwert.

$$b) D_{\text{Auge}} = D_{\text{Cornea}} + D_{\text{Linse}} - \frac{d}{n_{\text{Kammerwasser}}} \cdot D_{\text{Cornea}} \cdot D_{\text{Linse}}$$

$$= 43,1 \text{ m}^{-1} + 19 \text{ m}^{-1} - \frac{0,00573 \text{ m}}{1,336} \cdot 43,1 \text{ m}^{-1} \cdot 19 \text{ m}^{-1} \approx 59 \text{ dpt}$$

c) An Luft gilt:

$$D_{\text{gesamt}} = D_1 + D_2 - \frac{d}{n_{\text{Luft}}} \cdot D_1 \cdot D_2 = D_1 + D_2 - d \cdot D_1 \cdot D_2$$

Für eine gute Näherung muss $d \cdot D_1 \cdot D_2$ sehr klein sein gegen D_1 und D_2 . Dies ist bei kleinen Abständen d der Fall.

d) Erhöhung der Brechkraft der Cornea: Die Brechkraft der Cornea kann durch einen kleineren Krümmungsradius erhöht werden oder durch eine Erhöhung des Brechungsindex des Kammerwassers. Dies kann jedoch im menschlichen Auge nur sehr bedingt umgesetzt werden, da die Augengröße nicht sehr variabel ist und der Brechungsindex von Kammerwasser im Wesentlichen durch den Brechungsindex des Wassers festgelegt ist. Der Brechungsindex von Wasser mit gelösten Stoffen, z. B. Salzwasser, liegt mit $n_{\text{Salzwasser}} = 1,36$ nur geringfügig höher als der Brechungsindex von Kammerwasser. Erhöhung der Brechkraft des Auges: Hier spielt vor allem der Abstand d von Cornea und Augenlinse eine Rolle. Je kleiner dieser Abstand ist, desto größer ist die Gesamtbrechkraft. Allerdings gibt es auch hier Grenzen. Bei der Akkommodation ändert die Linse ihre Form, zwischen Cornea und Linse muss genügend Platz sein, damit dies erfolgen kann.

4\ James Bond und die Taucherbrille

- a) Ohne Taucherbrille ist die Brechkraft des Auges unter Wasser viel geringer als gewohnt. Bond ist daher unter Wasser weitsichtig.
- b) Die Brechkraft des menschlichen Auges ist unter Wasser viel kleiner, da an der Grenzfläche Wasser/Cornea die Brechung viel geringer ist als an der Grenzfläche Luft/Cornea ($n_{\text{Wasser}} = 1,333$, $n_{\text{Cornea}} = 1,336$, $n_{\text{Luft}} = 1,003$). Wird eine Taucherbrille aufgesetzt, findet an dem nicht gekrümmten Glas der Taucherbrille kaum Brechung statt, dafür befindet sich nun vor der Cornea wieder Luft. Die Brechkraft des Auges ist damit wieder so groß wie an Land.

5\ Doppelspalt

a) Am Doppelspalt gilt für Interferenzmaxima k -ter Ordnung:

$$\sin \alpha_k = \frac{k \cdot \lambda}{g} = \frac{d_k}{a} \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

Das 1. Nebenmaximum liegt bei $d_1 = 0,5 \text{ cm}$.

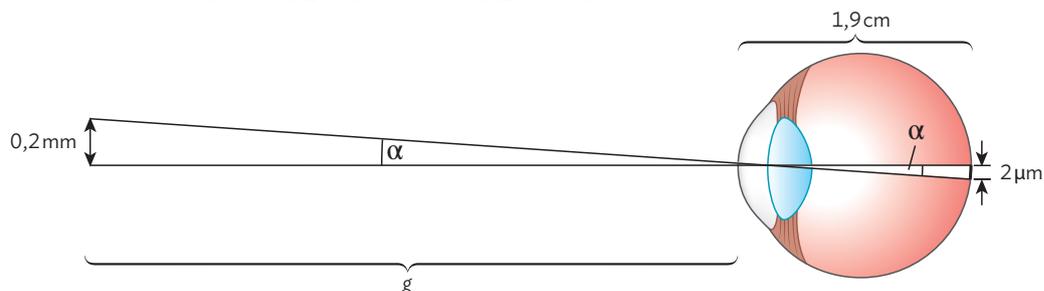
$$\text{Umstellen der Formel nach } g \text{ bei } k = 1 \text{ ergibt: } g = \frac{\lambda \cdot a}{d_1} = \frac{400 \text{ nm} \cdot 2,4 \text{ m}}{0,5 \text{ cm}} = 0,2 \text{ mm}$$

b) Am Doppelspalt tritt ein Interferenzmuster auf. Durch Bestimmung des Abstandes a zum Sichtschirm, des Abstandes d_1 der Interferenzmaxima 1. Ordnung zum Hauptmaximum bei $d = 0 \text{ m}$ und des Spaltmittenabstandes des Doppelspaltess kann über die Formel $\frac{\lambda}{g} = \frac{d_1}{a}$ die Wellenlänge des Lichtes ermittelt werden.

6\ Auflösungsvermögen

a) Der Begriff „Auflösungsvermögen“ bezeichnet die Unterscheidbarkeit feiner Strukturen, also z. B. den kleinsten noch wahrnehmbaren Abstand zweier punktförmiger Objekte. Das Auflösungsvermögen wird durch die Größe der Pupille (Beugungseffekte) und durch den Abstand der Sehzellen auf der Netzhaut beschränkt.

b)



Gemäß dem Strahlensatz gilt:

$$\frac{g}{0,2 \text{ mm}} = \frac{1,9 \text{ cm}}{2 \mu\text{m}} \Rightarrow g = \frac{1,9 \text{ cm}}{2 \mu\text{m}} \cdot 0,2 \text{ mm} = 1,9 \text{ m} \approx 2 \text{ m}$$

7\ Das Auflösungsvermögen des Eulenauges

- a) Aufgrund des Rayleigh-Kriteriums müssten Eulen ein höheres Auflösungsvermögen aufweisen, da sie über ein kleineres Verhältnis von Bildweite (Augengröße) zu Pupillengröße verfügen, die Beugungsscheibchen also einen geringeren Radius aufweisen. Daher können Bildpunkte näher beieinanderliegen und trotzdem noch getrennt wahrgenommen werden.
- b) Eulen verfügen über eine deutlich geringere Sehzellendichte. Davon sind überhaupt nur 50 % Zapfen. Außerdem verfügen sie über eine flache Fovea; die Vergrößerung des Netzhautbildes durch eine trichterförmige Fovea entfällt. Daher kann bei Eulen das Netzhautbild nicht so fein abgerastert werden wie bei Mäusebussarden. Die kleineren Beugungsscheibchen nützen dann nichts.
- c) Schleiereulen haben nur eine relativ kleine Winkelsehschärfe, weil sie zwar über eine hervorragende Schärfe beim Netzhautbild verfügen, aufgrund der kleinen Zapfendichte beim Tagsehen das sehr scharfe Bild aber nur sehr grob durch die Zapfen erfasst wird. Die Zapfendichte ist hierbei der schwächste Faktor, der das Auflösungsvermögen limitiert.

Zusammenfassende Aufgaben Seiten 60 und 61

8\ Das Chamäleonaugenauge

- a) Akkommodation durch Anpassung der Linsenkrümmung und Akkommodation durch Anpassung der Linsenposition.
Die Akkommodation ist aufgrund der Linsengleichung nötig. Nur wenn der Zusammenhang $\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$ erfüllt ist, ergibt sich auf der Netzhaut eine scharfe Abbildung. Im Auge ist die Netzhaut an einer festen Position. Um eine variable Gegenstandsweite auszugleichen, kann entweder über die Linsenkrümmung die Brennweite oder über eine Verschiebung der Linse die Bildweite angepasst werden. Die Brennweite einer Linse hängt vom Krümmungsradius der Linse und vom Brechungsindex des Linsenmaterials ab.
- b) $b = 1,0 \text{ cm}$
 $g_1 = 3,0 \text{ cm} \Rightarrow f_1 = 0,75 \text{ cm}$
 $g_2 = 25 \text{ cm} \Rightarrow f_2 = 0,96 \text{ cm}$
 $\Delta f = f_2 - f_1 = 0,21 \text{ cm}$ bzw. $\Delta D = D_1 - D_2 = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} = 29 \text{ dpt}$
- c) Die Auflösungsgrenze ist erreicht, wenn zwei Bildpunkte auf der Netzhaut so nahe beieinanderliegen, dass zwischen sie kein Photorezeptor mehr passt. Wird das Netzhautbild vergrößert, vergrößert sich der Abstand der beiden Bildpunkte. Daher passen nun mehr Photorezeptoren zwischen die beiden Bildpunkte. Sie können getrennt wahrgenommen werden.
- d) Man zerlegt den Vorgang in Teilschritte (siehe Mediencode auf S. 60 im Schulbuch).
Chamäleonaugenauge: Zuerst wird nur die Brechung an der Cornea betrachtet. Sie ist beim Chamäleonaugenauge stark ausgeprägt, die Strahlen würden sich weit vor der Netzhaut treffen (blau). Durch die Zerstreuungslinse treffen sich nun die realen Lichtstrahlen auf der Netzhaut (gelb). Der gelbe Strahlenverlauf weist an der Cornea und an der Linse jeweils einen Knick auf. Dort findet Brechung statt. Zwischen Cornea und Linse verlaufen der blaue und der gelbe Strahl parallel. Durch eine knickfreie Rückverlängerung der gelben Strahlen (gestrichelte Linie) kann die Position der fiktiven Sammellinse bestimmt werden, die das Linsensystem ersetzen kann. Sie liegt dort, wo sich die gestrichelten Strahlen mit der ursprünglichen Richtung der Lichtstrahlen (gepunktete Linie) schneiden.
Hühnerauge: Zuerst wird nur die Brechung an der Cornea betrachtet. Sie ist beim Hühnerauge nicht so stark ausgeprägt, die Strahlen würden sich weit hinter der Netzhaut treffen (blau). Durch die Sammellinse treffen sich nun die realen Lichtstrahlen auf der Netzhaut (gelb). Der gelbe Strahlenverlauf weist an der Cornea und an der Linse jeweils einen Knick auf. Dort findet Brechung statt. Zwischen Cornea und Linse verlaufen der blaue und der gelbe Strahl parallel. Durch eine knickfreie Rückverlängerung der gelben Strahlen (gestrichelte Linie) kann die Position der fiktiven Sammellinse bestimmt werden, die das Linsensystem ersetzen kann. Sie liegt dort, wo sich die gestrichelten Strahlen mit der ursprünglichen Richtung der Lichtstrahlen (gepunktete Linie) schneiden.
- e) Es gilt $f_{\text{ges,H}} < f_{\text{ges,C}}$ und damit $b_{\text{ges,H}} < b_{\text{ges,C}}$
Mit $B = G \cdot \frac{b}{g}$ folgt, dass dadurch das Bild im Chamäleonaugenauge größer wird, da G konstant bleibt und g geringfügig abnimmt, b jedoch zunimmt. Weder im Hühner- noch im Chamäleonaugenauge entspricht b_{ges} der Größe des realen Auges. Es gilt vielmehr:
 $b_{\text{ges,H}} < \text{Größe des realen Auges} < b_{\text{ges,C}}$

9\ Nachtaktive Tiere

- a) Das Tapetum lucidum ist eine reflektierende Schicht hinter der Retina, die einen Teil des Lichts zurück in das Auge reflektiert. Dies erhöht die Lichtempfindlichkeit der Augen und ermöglicht es Tieren, auch bei schwachem Licht besser zu sehen. Lichtquanten, welche beim Durchqueren der Photorezeptoren nicht absorbiert wurden, durchqueren so erneut die Photorezeptoren und erhalten eine zweite Chance, detektiert zu werden.
- b) Anpassungen, die zu einer erhöhten Lichtempfindlichkeit führen (Tapetum lucidum, erhöhte Stäbchenanzahl, Zusammenschalten mehrerer Photorezeptoren), erhöhen alle die Winkelsehschärfe, führen also zu einem geringeren Auflösungsvermögen.
Tapetum lucidum: siehe Musteraufgabe 2a) auf S. 56 im Schulbuch.
Erhöhte Stäbchenanzahl: Beim Tagsehen tragen die Stäbchen keine Signale zum Seheindruck bei, an diesen Stellen können dann aber auch keine Zapfen vorhanden sein. Die Zapfendichte ist also geringer, und dies erhöht die Winkelsehschärfe.
Zusammenschalten von Photorezeptoren: Wenn die Signale verschiedener Photorezeptoren zusammengeschaltet werden, kann nicht mehr nachvollzogen werden, von welchem dieser Photorezeptoren das Signal ursprünglich stammt.
- c) Die Mehrschichtnetzhaut von Tiefseefischen ist eine spezielle Anpassung, die diesen Organismen hilft, bei stark reduziertem Umgebungslicht zu sehen. Tiefseefische haben eine höhere Dichte von Photorezeptoren in ihrer Netzhaut im Vergleich zu Fischen in gut beleuchteten Gewässern. Dies wird ermöglicht, indem die Photorezeptoren hintereinander und auf Lücke angeordnet sind, um damit jedes verfügbare Photon zu detektieren.

10\ Pinguinauge

- a) Tiere, die sowohl auf Land wie im Wasser leben, müssen die Brechkraft ihrer Linse sehr stark variieren, um in beiden Medien scharf sehen zu können. Wasservögel besitzen daher oft eine stark verformbare Linse. Durch einen Ringmuskel wird das Auge so stark gequetscht, dass sowohl Linse als auch Cornea ihre Form verändern. So lassen sich sehr kleine Krümmungsradien erzielen.
- b) An einer ebenen Grenzfläche ($r \rightarrow \infty$) findet praktisch keine Brechung statt. Somit trägt nur die Grenzfläche zwischen vorderem Kammerwasser und Augenlinse zur Brechkraft des Auges bei. Daher ist die Brechkraft an Land und unter Wasser gleich groß.
- c) Humboldtpinguine sehen unter Wasser optimal. Kommen sie an Land, erhöht nun die Brechung an der Cornea die Brechkraft des Auges (aufgrund des Unterschieds in den Brechungsindizes zwischen Luft und Cornea). Sie sind an Land dann kurzsichtig. Felsenpinguine sehen an Land optimal. Im Wasser entfällt die Brechung an der Cornea weitgehend, da die Brechungsindizes von Wasser und Cornea sehr ähnlich sind. Dies reduziert die Brechkraft des Auges. Sie sind unter Wasser dann weitsichtig wie wir Menschen.
- d) Bei geringer Beleuchtungsstärke ist die Pupille stark vergrößert. Dies reduziert die Schärfentiefe. Punkte, die vom Auge unterschiedlich weit entfernt sind, werden in unterschiedlicher Entfernung von der Linse scharf abgebildet. Sie können daher nicht gleichzeitig scharf abgebildet werden. Je größer die Blende, desto stärker ist der Effekt.