

A | Das Auge



Augenlinse Interferenz
additive
Stäbchen
Linsenauge
Farbmischung
Glaskörper Hornhaut Photorezeptoren
Linsengleichungen
Netzhautbild Dioptrie
Pupille Ziliarmuskel Zapfen
Brechkraft
Netzhaut Linse-Schirm-Modell
Zonulafasern Akkomodation Rayleigh-Kriterium
dioptrischer
Apparat
subtraktive Farbmischung

Sie können in diesem Kapitel entdecken ...

- wie im Auge ein scharfes Netzhautbild entsteht.
- wie in der Netzhaut die Photonen, aus denen das Netzhautbild besteht, detektiert werden.
- wie sich verschiedene Augenarten an unterschiedliche Gegenstandsweiten anpassen, um ein scharfes Bild zu erzeugen.
- warum das Auflösungsvermögen unseres Auges begrenzt ist.
- wie sich die Augen verschiedener Lebewesen im Laufe der Evolution an unterschiedliche Lebensbedingungen angepasst haben.
- wie in der Physik mit Modellen gearbeitet wird.
- wie in der Optik mit digitalen Simulationen gearbeitet wird.





1

Bildentstehung im Auge

Materialien zu Kapitel 1.2

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

Unser Auge ist ein Detektor für sichtbares Licht. Doch was genau wird da auf der Netzhaut detektiert? Im Laufe der Zeit gab es hierfür verschiedene Modellvorstellungen.

Auch für den Sehvorgang gab es im Laufe der Zeit mehrere Erklärungsansätze. In der Antike war die Vorstellung des „Sehstrahls“ weit verbreitet. Es folgten das „Empfangsmodell“ von Alhazen und Keplers Theorie des Netzhautbildes.

Selbst für das Auge gibt es verschiedene Modelle angefangen beim sehr einfachen Linse-Schirm-Modell (Kapitel 1.1) über das reduzierte Auge (Aufgabe 1 unter Vermischte Aufgaben) bis zum Gullstrand-Normauge (Aufgabe 2 unter Vermischte Aufgaben). Doch warum gibt es so viele verschiedene Modelle? Würde nicht ein „korrektes“ Modell genügen?

Methode

Mit Modellen arbeiten

Modelle werden in der Physik dazu verwendet, um reale Vorgänge so zu beschreiben, dass man Beobachtungen erklären und Vorhersagen machen kann. Damit dies möglich ist, muss ein gutes Modell folgende Eigenschaften besitzen:

- Ein Modell sollte eine vereinfachte Darstellung der wirklichen Welt sein. Dabei werden alle unwesentlichen Details, die für die Erklärung der Beobachtung nicht nötig sind, weggelassen.
- Ein Modell sollte Voraussagen machen, die experimentell falsifiziert oder verifiziert werden können.
- Ein Modell sollte einen hohen Erklärungswert besitzen.

Da Modelle in der Regel Vereinfachungen vornehmen, ist ihr Gültigkeitsbereich begrenzt. Es kann also sein, dass es für den gleichen Sachverhalt verschiedene Modelle gibt, je nachdem, welche Beobachtung erklärt oder welches Messergebnis in welcher Genauigkeit vorhergesagt werden soll. Einfache Modelle kann man intuitiv verstehen und mathematisch leicht beschreiben. Oft können sie aber nur einen Teilaspekt erklären. Sehr detaillierte Modelle muss man verwenden, wenn einfache Modelle nicht ausreichen, um die Beobachtung zu verstehen. Sie sind mathematisch aufwändiger.

Arbeitsauftrag

- Recherchieren Sie, welchen Beitrag ...
 - Isaac Newton
 - Christiaan Huygens
 - Thomas Young
 - James Clark Maxwell
 - Albert Einstein
 - Euklidzur Modellvorstellung von Licht geleistet haben.
- Nennen Sie jeweils ein Schlüsselexperiment, das ...
 - das Strahlenmodell
 - das Photonenmodell
 - das Wellenmodell des Lichts stützt.
- Beurteilen Sie, welches Modell zur Beschreibung der Bildentstehung im Auge am besten geeignet ist.
- Untersuchen Sie, ob das von Ihnen in Teilaufgabe c) gewählte Modell erklären kann, dass ...
 - Licht verschiedene Farben aufweisen kann.
 - das menschliche Auge sehr kleine Strukturen wie etwa Atome nicht auflösen kann.Entscheiden Sie gegebenenfalls, welche Modelle hier besser geeignet wären.

Materialien zu Kapitel 1.3

► M2 Einstieg: Besuch beim Augenarzt

Wie bestimmt der Augenarzt die Sehschärfe eines Patienten? Der Augenarzt verwendet dazu einen Phoropter, eine Art Proberbrille mit Linsen verschiedener Stärke. Der Patient blickt durch den Phoropter auf bestimmte Buchstaben, Zahlen oder Bilder und versucht, sie zu entziffern. Der Augenarzt verdeckt dann jeweils ein Auge und tauscht die Linsen so lange aus, bis die passende Linsenstärke gefunden ist. Das Vorgehen erscheint sehr umständlich. Tatsächlich ist es möglich, mit einem sogenannten Autorefraktometer die Sehschärfe deutlich schneller zu ermitteln. Allerdings ist dieses Verfahren wesentlich ungenauer.

Die brechende Wirkung einer Linse wird in der Physik über die Brennweite beschrieben. Dabei gilt: Je größer die Brennweite, desto schwächer bricht die Linse das Licht. Wer einmal bei einem Augenarzt war, weiß, dass auf dem Rezept für den Augenoptiker keine Angaben über eine Brennweite zu finden sind. Augenärzte, Optiker und Linsenschleifer verwenden in der Regel die Brechkraft der Linse als Maß für die brechende Wirkung. Sie wird in der Einheit Dioptrien (dpt) angegeben. Auf dem Rezept vom Augenarzt wird vermerkt, wie hoch die Brechkraft derjenigen Linse ist, die die Fehlsichtigkeit gerade kompensiert. Abbildung B2 zeigt ein Beispiel für ein Rezept vom Augenarzt.

Arbeitsauftrag

- Lesen Sie sich den Text zum Besuch beim Augenarzt durch.
- Recherchieren Sie, welche Arten der Fehlsichtigkeit es gibt.
- Recherchieren Sie, wie die Brechkraft definiert ist.
- Ermitteln Sie, welche Arten von Fehlsichtigkeiten bei dem Augenarzt-Rezept in der Abbildung unten vorliegen. Recherchieren Sie dazu zunächst, was die Begriffe „Sphäre“ und „Zylinder“ auf dem Augenarzt-Rezept bedeuten.
- Recherchieren Sie, welche Behandlungsmethoden der refraktiven Chirurgie für die Korrektur von Fehlsichtigkeiten eingesetzt werden.



Phoropter beim Augenarzt



Rezept vom Augenarzt

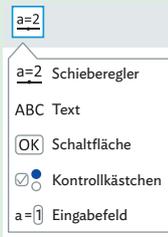
Bis vor kurzem waren Brillen und Kontaktlinsen die einzigen Möglichkeiten, um Fehlsichtigkeiten zu korrigieren. Neue Entwicklungen in der refraktiven Chirurgie ermöglichen es heutzutage, das Auge selbst so zu modifizieren, dass die Fehlsichtigkeit beseitigt wird.

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

Methode

Mit digitalen Simulationen arbeiten: DGS

Viele Sachverhalte in der geometrischen Optik lassen sich durch Konstruktionen mit den Hauptstrahlen verstehen. Oft ist dies aber mit mehreren Zeichnungen verbunden. Die physikalisch exakte Situation der Brechung eines ganzen Strahlenbündels ist zeichnerisch äußerst aufwändig. Die Verwendung einer dynamischen Geometriesoftware (DGS) kann hier Abhilfe schaffen. Einige Funktionen dieser Software sind dabei besonders hilfreich.



(1) Einfügen eines Schiebereglers oder Kontrollkästchens

Über Schieberegler (Abb. (1) und (2)) kann man Werte einfach anpassen. Um einen Punkt über einen Schieberegler a z. B. entlang der x -Achse zu verschieben, muss lediglich für die Koordinaten des Punktes $(a, 0)$ eingegeben werden. Für den Schieberegler muss man ein Intervall und eine Schrittweite angeben.

Über Kontrollkästchen (Abb. (1) und (3)) kann man steuern, ob man nur die Hauptstrahlen oder das ganze Strahlenbündel sehen möchte. Dazu muss man am Kontrollkästchen auswählen, welche Objekte angezeigt werden sollen. Schnittpunkte kann man über den Menüpunkt Schnittpunkt (Abb. (4)) und das Anklicken der entsprechenden Objekte erzeugen.

Die Eingabe Vektor(A, B) erzeugt einen Pfeil, der vom Punkt A zum Punkt B zeigt.

Gebogene Linien können über den Menüpunkt Kreisbogen erzeugt werden (Abb. (5)).



(2) Eigenschaften eines Schiebereglers einstellen

(3) Objektauswahl bei Kontrollkästchen

Arbeitsauftrag

a) Erstellen Sie mithilfe einer DGS eine einfache Simulation der Abbildung an einer symmetrischen Sammellinse.

Wählen Sie dazu die Algebra- und die Grafiksicht aus und blenden Sie die Koordinatenachsen ein. Erzeugen Sie nun einen verschiebbaren Vektor als Objekt der Abbildung. Erstellen Sie dazu einen Punkt A, der sich über einen Schieberegler g auf der x -Achse bewegen lässt und einen Punkt B, der sich parallel zum Punkt A bewegt (Abb. (7)). Beachten Sie, dass der Schieberegler nur negative Werte annehmen kann, da sich das Objekt stets vor der Linse befinden soll. Damit in der Simulation die Brennweite der Linse variiert werden kann, muss ein zweiter Schieberegler f definiert werden. Er legt die Lage der beiden Brennpunkte F_1 und F_2 mit den Koordinaten $(-f, 0)$ und $(f, 0)$ fest.

Nun werden die Lichtstrahlen hinzugefügt. Zunächst werden Parallelstrahl und Mittelpunktstrahl erzeugt. Dann werden die restlichen Lichtstrahlen ergänzt. Sie verlaufen von B zu einem beliebigen Punkt auf der y -Achse, machen dort einen Knick und gehen durch den Punkt B'. Zum Schluss wird das Bild erzeugt. Dazu wird ein Hilfspunkt C auf der x -Achse benötigt, der sich parallel zum Punkt B' bewegt. Er ergibt sich als Schnittpunkt der x -Achse und der Lotgeraden zur x -Achse durch B' (Abb. (7)). Das Bild ist der Vektor von C nach B'.



A Punkt
Schnittpunkt
Mittelpunkt



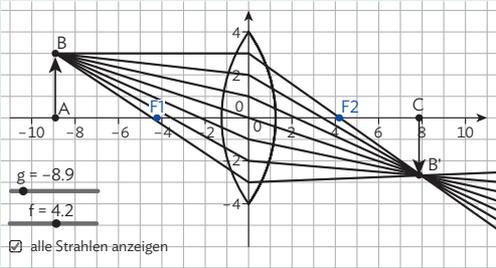
Kreis mit MP durch Punkt
Kreis mit MP und Radius
Kreisbogen



Gerade
Strecke
Strahl

(4) Schnittpunkt erstellen (5) Kreisbogen erstellen (6) Linien erstellen

Um den Verlauf der Lichtstrahlen festlegen zu können, werden zunächst die Hauptstrahlen erzeugt. Der Parallelstrahl verläuft vom Punkt B parallel zur x-Achse bis zur y-Achse. Dort knickt er ab und verläuft durch den bildseitigen Brennpunkt F_2 (Abb. (7)). Der Strahlenverlauf wird zuerst mit einer Strecke und ab dem Knick mit einem Strahl nachgebaut (Abb. (6)). Der Mittelpunktstrahl verläuft durch den Punkt B und den Ursprung. Da es hier keinen Knick gibt, wird für die Modellierung nur ein Strahl verwendet. Der Bildpunkt B' von B wird als Schnittpunkt von Parallelstrahl und Mittelpunktstrahl erzeugt. Der Brennpunktstrahl verläuft durch den objektseitigen Brennpunkt F_1 bis zur y-Achse und danach parallel zur x-Achse. Er dient der Kontrolle der Zeichengenauigkeit.



(7) Simulation mit Optimierungen

Unter dem Reiter „Erweitert“ (Abb. (8)) kann man Bedingungen für die Sichtbarkeit eines Objektes angeben.

- Zwei Objekte sollen gleich sein: $A = B$
- Zwei Objekte sollen nicht gleich sein: $A \neq B$
- Zwei Eigenschaften sollen gleichzeitig gelten: $A \& B$
- A soll kleiner als B sein: $A < B$

Erweitert

Bedingung, um Objekt anzuzeigen

Rot:

Blau:

(8) Bedingte Sichtbarkeit

Zur besseren Übersicht sollten alle überflüssigen Beschriftungen und Hilfsobjekte entfernt werden. Dazu klickt man mit der rechten Maustaste auf das entsprechende Objekt und entfernt unter Einstellungen den Haken bei Objekt/Beschriftung anzeigen.

Optimierungen der Simulation:

b) Erzeugen Sie zwei Kreisbögen, um die Linse einzufügen (Abb. (5)). Um zu zeigen, dass eine Änderung der Krümmung der Linse eine Änderung der Brennweite bewirkt, wählen Sie als Mittelpunkte der beiden Kreisbögen $(\pm \sqrt{f^2 - 4^2}, 0)$ und als weitere Punkte $(0, \pm 4)$ (Abb. (7) und Musteraufgabe 2 auf Seite 25). Verwenden Sie ein Kontrollkästchen, um alle Strahlen oder nur die Hauptstrahlen anzuzeigen.

c) Ergänzen Sie in der Simulation den Brennpunktstrahl. Überprüfen Sie, ob der Brennpunktstrahl auch durch B' verläuft.

d) Bewegen Sie das Objekt über den Schieberegler immer näher an die Linse heran. Beschreiben Sie, was Sie beobachten, wenn das Objekt den Brennpunkt F_1 passiert. Diskutieren Sie auf dieser Grundlage die Grenzen dieser Simulation. Was passiert an dieser Stelle in der Realität?

e) Passen Sie die Simulation für den Fall $|g| < f$ an. Ergänzen Sie dazu Strahlen, die durch den neuen Schnittpunkt von Parallelstrahl und Mittelpunktstrahl vor der Linse verlaufen und mittels bedingter Sichtbarkeit nur für $|g| < f$ sichtbar sind.



1.1 Das Linsenauge

Aufbau des Linsenauges

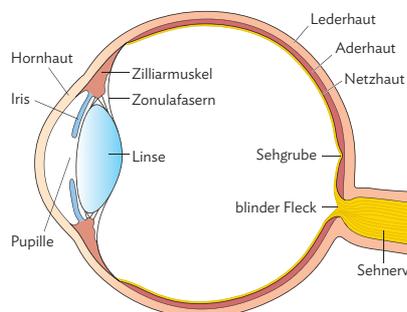
Bei den meisten Tieren organisierten sich die Photorezeptoren im Laufe der Evolution zu einer Netzhaut. Diese Photorezeptoren senkten sich zu einer Grube ein, verengten sich zu einer schmalen Öffnung und verschlossen sich schließlich mit einem Deckgewebe zu einem Linsenauge. Das Linsenauge ist so leistungsfähig, dass es in der Evolution zweimal unabhängig voneinander bei wirbellosen Tieren (z. B. bei Tintenfischen) und bei Wirbeltieren entstand. Die Netzhaut entwickelte sich bei den beiden Entwicklungssträngen aus unterschiedlichen Gewebetypen. Daher trifft bei den wirbellosen Tieren das ins Auge einfallende Licht direkt auf die Lichtsinneszellen (everses Auge). Beim Linsenauge der Wirbeltiere muss das Licht erst verschiedene Nervenzellschichten durchqueren, bevor es die Lichtsinneszellen erreicht (inverses Auge).

Im Laufe der Evolution haben sich bei den verschiedenen Tierarten jeweils hochspezialisierte Anpassungen des Linsenauges an den jeweiligen Lebensraum entwickelt. Sowohl die Kugel-Linse vieler mariner Tierarten, die plane Hornhaut bei Pinguinen, die stark verformbare Linse bei Tauchvögeln, die schlitzförmigen Pupillen bei Katzen als auch die zusätzliche Zerstreuungslinse auf der Netzhaut des Adlerauges lassen sich mit physikalischen Modellen zur optischen Abbildung verstehen und quantifizieren. Dabei müssen folgende Aspekte modelliert werden:

- scharfe Abbildung von Objekten mit unterschiedlichen Gegenstandsweiten oder in unterschiedlichen Medien (Akkommodation)
- Optimierung der Bildschärfe bei der gleichzeitigen Abbildung von Objekten mit unterschiedlichen Gegenstandsweiten (Schärfentiefe)
- Ursache und Korrektur von Fehlern bei der optischen Abbildung (Sehfehler)
- unterschiedliche Beleuchtungssituationen (Tag- und Nachtsehen)
- Abbildung feiner Details (Auflösungsvermögen).

Diese Aspekte lassen sich in drei Gruppen zusammenfassen: scharfe Abbildungen auf der Netzhaut, Wahrnehmung auf der Netzhaut und Grenzen des optischen Systems Auge. Ihre Erklärung erfordert unterschiedliche Modelle für das Linsenauge und die Natur des Lichts.

Die folgende Abbildung zeigt den Aufbau des menschlichen Linsenauges. Dieser wird bei den meisten physikalischen Augenmodellen auf die physikalisch wesentlichen Bestandteile reduziert: den dioptrischen Apparat und die Netzhaut.



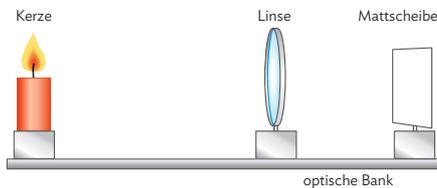
B1 Vereinfachter Aufbau des menschlichen Auges

Als dioptrischen Apparat eines Auges bezeichnet man die Strukturen, die die Außenwelt auf der Netzhaut abbilden. Er besteht bei einem Linsenauge im Wesentlichen aus ...

- den lichtbrechenden Flächen der Hornhaut (Cornea) und der Linse
- dem Glaskörper
- der Pupillenöffnung.

Im Wesentlichen lassen sich die Akkommodation, die Schärfentiefe und die Fehlsichtigkeiten physikalisch durch ein einfaches Linse-Schirm-Modell bestehend aus einem beleuchteten Gegenstand, einer Sammellinse und einem Sichtschirm verstehen (B2). Dabei wird der dioptrische Apparat durch eine Linse und die Netzhaut durch einen Schirm modelliert.

Bei Bedarf kann dieses sehr einfache Modell durch Einfügen einer Lochblende oder weiterer Linsen zu einem erweiterten Linse-Schirm-Modell ergänzt werden.



B2 \ Linse-Schirm-Modell des Auges

Musteraufgabe

Ordnen Sie die folgenden biologischen Strukturen des Auges den optischen Bestandteilen Linse, zusätzliche Linse, Lochblende und Beobachtungsschirm des (erweiterten) Linse-Schirm-Modells zu:

- Pupille
- Augenlinse
- Hornhaut
- Netzhaut
- Ziliarmuskel
- Zonulafasern
- dioptrischer Apparat.

Lösung

Einfaches Linse-Schirm-Modell:

Der dioptrische Apparat entspricht einer Linse und die Netzhaut dem Beobachtungsschirm.

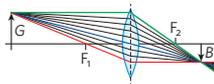
Erweitertes Modell:

Die Pupille entspricht einer Lochblende, die Augenlinse einer Linse und die Hornhaut einer zusätzlichen Linse. Die Netzhaut wird durch den Beobachtungsschirm modelliert. Der Ziliarmuskel und die Zonulafasern haben keine direkte Entsprechung. Sie bewirken im Auge eine Anpassung der Brechkraft. Dies würde im Linse-Schirm-Modell dem Austauschen der Linse entsprechen.

Arbeitsaufträge

- 1) Informieren Sie sich über die biologischen Strukturen Glaskörper, Lederhaut, Aderhaut, Iris, blinder Fleck und Sehgrube. Entscheiden Sie aufgrund der recherchierten Informationen, ob und gegebenenfalls wie diese Strukturen in einem (erweiterten) Linse-Schirm-Modell berücksichtigt werden müssen.
- 2) Viele physikalische Modelle haben einen begrenzten Gültigkeitsbereich. Überlegen Sie, wie sich dies bei der Modellierung des Linsen Auges durch das Linse-Schirm-Modell bemerkbar macht. Sind alle Situationen, die sich experimentell mit einem beleuchteten Gegenstand, einer Linse und einem Beobachtungsschirm realisieren lassen, für das Auge relevant?

1.2 Abbildung auf der Netzhaut



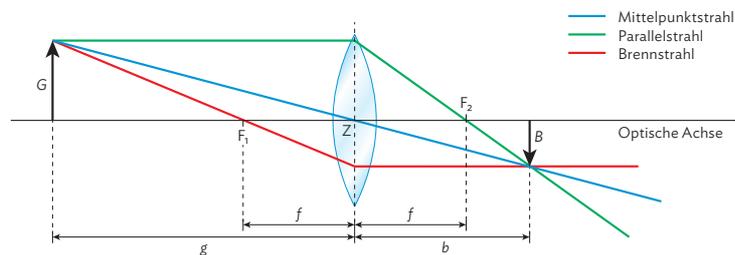
B1 Strahlengang bei der Bildentstehung an einer Sammellinse



Zur Konstruktion des Bildes verwendet man in der geometrischen Optik stellvertretend die drei Hauptstrahlen: Mittelpunktstrahl, Parallelstrahl und Brennstrahl für das gesamte Strahlenbündel.

Abbildung durch Sammellinsen

Bei dem Linse-Schirm-Modell wird der Sehvorgang nur durch einen Gegenstand, eine Sammellinse und einen Beobachtungsschirm dargestellt. Abbildung B1 zeigt den Verlauf der Lichtstrahlen in diesem Modell. Von jedem Punkt des Gegenstandes breiten sich Lichtstrahlen geradlinig in alle Richtungen aus. Die Linse bewirkt durch Brechung eine Richtungsänderung der Lichtstrahlen. Daher vereinigen sich die ursprünglich auseinanderlaufenden Lichtstrahlen auf dem Schirm wieder zu einem Bildpunkt. Die Gegenstandsweite, die Bildweite und die Brennweite können nicht beliebig gewählt werden, wenn das entstehende Bild scharf sein soll.

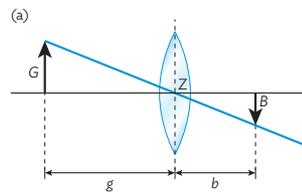


B2 Konstruktion des Bildes über die Hauptstrahlen. Bezeichnungen: G: Gegenstandsgröße, B: Bildgröße, F_1 , F_2 : Brennpunkte, f : Brennweite, g : Gegenstandsweite, b : Bildweite

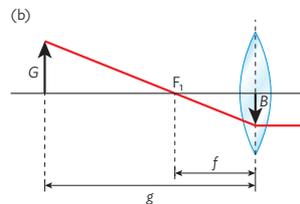
Die Linsengleichung

Zwei Strahlensatzfiguren mit Zentren in Z bzw. in F_1 (B3) ergeben:

$$\frac{B}{G} = \frac{b}{g} \quad \text{für B3a}$$



$$\frac{B}{G} = \frac{f}{g-f} \quad \text{für B3b}$$



B3 Strahlensätze mit Zentrum Z (a) und F_1 (b)

Gleichsetzen der beiden rechten Seiten liefert einen Zusammenhang zwischen Gegenstandsweite g , Bildweite b und Brennweite f der Linse.

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



Nur wenn die Linsengleichung erfüllt ist, entsteht auf dem Beobachtungsschirm ein scharfes Bild.

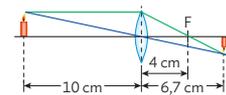
Die Gegenstandsweite hat einen entscheidenden Einfluss auf das entstehende Bild (B4). Ein reelles Bild eines Objekts kann auf einem Schirm hinter der Linse aufgefangen werden, da sich die Strahlen, die von einem Objektpunkt ausgehen, dort treffen. Reelle Bilder stehen auf dem Kopf und sind seitenverkehrt. Im Gegensatz dazu kann ein virtuelles Bild nicht auf einem Schirm aufgefangen werden, da sich hier die von einem Objektpunkt ausgehenden Strahlen nicht treffen. Virtuelle Bilder stehen aufrecht und sind seitenrichtig.

Ort des Gegenstandes	Bild und Bildkonstruktion	Eigenschaften des Bildes
außerhalb der doppelten Brennweite einer Sammellinse $g > 2f$		<ul style="list-style-type: none"> • verkleinert • umgekehrt • seitenvertauscht • reell (wirklich) $f < b < 2f$ $B < G$
in der doppelten Brennweite einer Sammellinse $g = 2f$		<ul style="list-style-type: none"> • gleich groß • umgekehrt • seitenvertauscht • reell (wirklich) $b = 2f$ $B = G$
zwischen einfacher und doppelter Brennweite einer Sammellinse $2f > g > f$		<ul style="list-style-type: none"> • vergrößert • umgekehrt • seitenvertauscht • reell (wirklich) $b > 2f$ $B > G$
in der einfachen Brennweite einer Sammellinse $g = f$		<ul style="list-style-type: none"> • kein scharfes Bild (Bild im Unendlichen) • gebrochene Strahlen verlaufen parallel $b \rightarrow \infty$
innerhalb der einfachen Brennweite einer Sammellinse $g < f$		<ul style="list-style-type: none"> • vergrößert • aufrecht • seitenrichtig • virtuell (scheinbar) $0 < b < \infty$ $B > G$

B4 \ Strahlenverlauf bei verschiedenen Gegenstandsweiten

i Beim Auge gilt in der Regel $g > f$.

i Der Mittelpunktstrahl verläuft geradlinig durch den Mittelpunkt der Linse. Der Parallelstrahl verläuft vor der Linse parallel zur optischen Achse, nach der Linse durch den Brennpunkt. Der Brennpunktstrahl verläuft vor der Linse durch den Brennpunkt, nach der Linse parallel zur optischen Achse.



B5 \ Konstruktion des Bildes mithilfe der Hauptstrahlen

Musteraufgabe

Eine Kerze ist $g = 10 \text{ cm}$ von einer Linse der Brennweite $f = 4,0 \text{ cm}$ entfernt und soll scharf abgebildet werden.

- Bestimmen Sie die Bildweite b durch eine Konstruktion mithilfe der Hauptstrahlen.
- Berechnen Sie b mithilfe der Linsengleichung.

Lösung

- Das scharfe Bild entsteht am Schnittpunkt von Mittelpunktstrahl und Parallelstrahl (B5).
- Es muss die Linsengleichung gelten:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \Leftrightarrow b = \frac{g \cdot f}{g - f} \approx 6,7 \text{ cm}$$



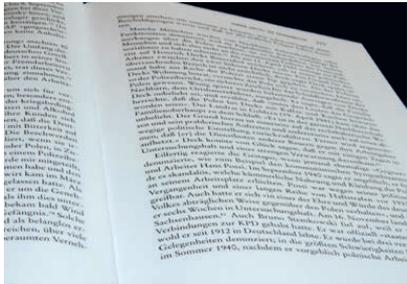
1.2 Abbildung auf der Netzhaut

Arbeitsaufträge

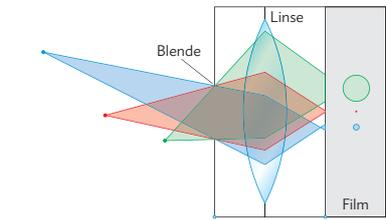
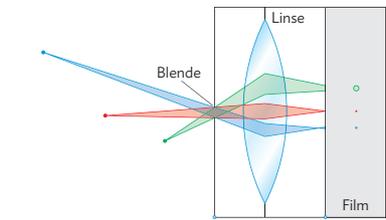
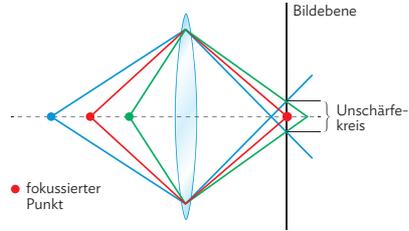
- 1) Faustregel: Bewegt sich ein Gegenstand auf eine Sammellinse zu, so bewegt sich das reelle Bild des Gegenstandes von der Linse weg. Gleichzeitig wird das Bild immer größer.
 - a) Berechnen Sie für $f=10\text{ cm}$ und vier Gegenstandsweiten zwischen 50 cm und 15 cm die zugehörigen Bildweiten.
 - b) Erstellen Sie aus den in a) berechneten Werten ein g - b -Diagramm. Ergänzen Sie in dem Diagramm eine Trendlinie, die die Faustregel stützt.
 - c) Unter dem Mediencode finden Sie eine Simulation zur geometrischen Optik. Überzeugen Sie sich mithilfe dieser Simulation davon, dass die Faustregel korrekt ist.  MC 67055-01

- b) Erklären Sie anhand der unten stehenden Skizzen, warum die Schärfentiefe begrenzt ist und wie sich die Blendengröße (Größe der Pupille) auf die Schärfentiefe auswirkt.
- c) Führen Sie ein Experiment durch: Nähern Sie einen Text so Ihrem Auge, dass Sie ihn nicht mehr scharf sehen können. Nun halten Sie einen Karton mit einer kleinen Lochblende (Stecknadelloch) vor das Auge. Beschreiben Sie, wie sich Ihr Seheindruck durch die Lochblende verändert.
- d) Erklären Sie anhand einer Skizze die Beobachtungen aus c).

- 2) a) Beschreiben Sie anhand der Abbildung unten, was man unter dem Begriff „Schärfentiefe“ versteht.



Oben: große Blendengröße, geringe Schärfentiefe. Unten: kleine Blendengröße, große Schärfentiefe



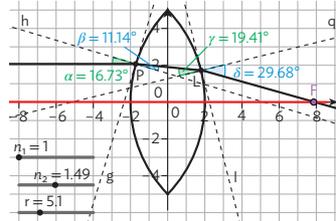
Strahlengang bei verschieden weit entfernten Objekten

- 3) An der Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichen optischen Dichten wird Licht gebrochen. Einfallswinkel α und Brechungswinkel β hängen über das Brechungsgesetz mit dem Verhältnis der Brechungsindizes zusammen:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

- a) Für den Übergang des Lichts vom optisch dünneren zum optisch dichteren Medium gilt: Wird der Winkel β kleiner, so wird die Richtungsänderung des Lichtstrahles und damit die Brechung stärker. Begründen Sie anhand der Formel, dass die Brechung stärker wird, wenn das Verhältnis $\frac{n_2}{n_1}$ steigt.
- b) An einer Sammellinse durchläuft Licht zwei Materialübergänge: Zunächst von Luft ($n_L = 1$) zu Glas ($n_G = 1,5$) und dann von Glas zu Luft. Machen Sie anhand von Skizzen plausibel, dass die Linse stärker bricht, wenn das Glas durch ultrahochbrechenden Kunststoff ($n_{Ku} = 1,75$) ersetzt wird oder wenn die Linse stärker gekrümmt ist.

- c) Erstellen Sie auf Basis des Brechungsgesetzes eine Simulation der Brechung an einer Sammellinse, die den Einfluss von Linsenmaterial und Krümmungsradius der Linse auf die Brennweite veranschaulicht.

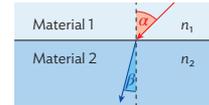


Simulation der Brechkraft einer Linse

- Erstellen Sie dazu zwei Schieberegler n_1 und n_2 (für die Brechungsindizes des Linsenmaterials und des Mediums) und r (für den Krümmungsradius der Linse). Verwenden Sie für die Begrenzung der Linse zwei Kreisbögen mit Radius r . Definieren Sie einen Punkt P auf der Linsenoberfläche, an dem ein Lichtstrahl parallel zur optischen Achse auftrifft. Die Hilfsgeraden g und l erhält man über die Funktion „Tangente“, die Hilfsgeraden h und q über die Funktion „Senkrechte Gerade“. Die Winkel α und γ müssen gemessen, die Winkel β und δ zunächst über das Brechungsgesetz berechnet (Luft hat den Brechungsindex $n_{Luft} = 1$) und dann eingezeichnet werden. Der Brennpunkt F ergibt sich als Schnittpunkt des gebrochenen Strahls mit dem Mittelpunktstrahl, der seine Richtung nicht ändert.
- d) Untersuchen Sie mithilfe Ihrer Simulation, wie sich der Brechungsindex und der Krümmungsradius auf die Brennweite auswirken.
- e) Bewegen Sie den Punkt P entlang der Linse. Parallele Lichtstrahlen sollten im Hauptstrahlenmodell immer durch den gleichen Brennpunkt verlaufen, egal wo sie auf der Linse auftreffen. Untersuchen Sie, ob das hier zutrifft.
- f) Das Hauptstrahlenmodell beruht auf einer Näherung, die nur für Strahlen nahe der Hauptachse gilt. Erklären Sie damit, warum die Simulation eine Verschiebung des Brennpunktes (sogenannte sphärische Aberration) ergibt, das Hauptstrahlenmodell aber nicht.
- g) Fische, die eine kugelförmige Linse besitzen, haben eine sogenannte Matthiessenlinse (siehe S.24) entwickelt, deren Brechungsindex lokal variiert. Untersuchen Sie mithilfe ihrer Simulation, ob der Brechungsindex in den Randbereichen größer oder kleiner als der Brechungsindex in der Mitte der Linse sein muss, um die sphärische Aberration auszugleichen.

i

Der Brechungsindex n kann als Maß für die optische Dichte eines Materials verwendet werden.



Lichtbrechung an einem Materialübergang

i

$n_1 > n_2$: Das Licht wird vom Einfallslot weg gebrochen.
 $n_2 > n_1$: Das Licht wird zum Einfallslot hin gebrochen.

i

Der Krümmungsradius ist der Radius einer Vergleichskugel, die die gleiche Krümmung hat wie die entsprechende Oberfläche.

i

Sowohl die Linsengleichung als auch die Bildkonstruktion durch die Hauptstrahlen ergeben sich aus dem Brechungsgesetz. Allerdings muss dazu an einigen Stellen eine Kleinwinkelnäherung durchgeführt werden. Die Kleinwinkelnäherung besagt, dass für kleine Winkel α im Bogenmaß gilt: $\alpha \approx \sin \alpha \approx \tan \alpha$.

1.3 Akkomodation und Fehlsichtigkeiten

Brechkraft einer Linse

Die fokussierende Wirkung einer Linse wird in der Physik über die Brennweite f beschrieben. Augenärzte und Optiker verwenden die Brechkraft D statt der Brennweite, um Linsen zu beschreiben. Dies liegt daran, dass damit Berechnungen an Linsensystemen (z. B. Auge/Brillenglas) einfacher sind. Dabei gilt:

- Je stärker die fokussierende Wirkung, desto kleiner die Brennweite.
- Je stärker die fokussierende Wirkung, desto größer die Brechkraft.

$$\text{Brechkraft} = \frac{1}{\text{Brennweite}} \Rightarrow D = \frac{1}{f} \quad \text{Einheit } [D] = 1 \text{ Dioptrie} = 1 \text{ dpt} = 1 \frac{1}{\text{m}}$$

Die fokussierende Wirkung von Sammellinsen beruht auf der Brechung an Materialübergängen (vgl. Aufgabe 3 in Kapitel 1.2). Für die Brechkraft gilt dabei:

- Je größer der Krümmungsradius der Linse, desto geringer die Brechkraft.
- Je größer das Verhältnis der Brechungsindizes von Linse und Medium, desto größer die Brechkraft.

Akkommodation

Für eine scharfe Abbildung muss die Linsengleichung erfüllt sein. Im Alltag befinden sich aber nicht alle Gegenstände in einer konstanten, einheitlichen Entfernung.

Die Anpassung des Auges an unterschiedliche Gegenstandsweiten nennt man Akkommodation.

Bei an Land lebenden Tieren ist die Hornhaut (Cornea) für den Hauptanteil der Brechkraft des Auges verantwortlich. Die Brechkraft und Position der Cornea ist aber nicht variabel. Um Gegenstände in verschiedenen Entfernungen zum Auge scharf abbilden zu können, übernimmt die Linse die Aufgabe der Akkommodation. Es gibt im Wesentlichen zwei Mechanismen, mit denen eine Akkommodation auf unterschiedlich weit entfernte Gegenstände erreicht werden kann:

- Anpassung der Brechkraft der Linse durch Änderung ihres Krümmungsradius
- Veränderung des Abstandes zwischen Linse und Netzhaut bei nicht formveränderbarer Linse.

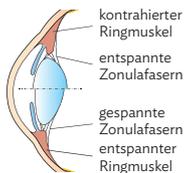
Der Nahpunkt gibt die kleinste und der Fernpunkt die größte Distanz zum Auge an, in der eine scharfe Abbildung durch Akkommodation möglich ist. Die maximal mögliche Brechkraftänderung wird als Akkommodationsbreite bezeichnet. Bei Kleinkindern beträgt sie im Mittel etwa 14 dpt. Bezogen auf die Gesamtbrechkraft des Auges von etwa 58 dpt entspricht dies einer Variation von rund 25%. Im Alter fällt die Akkommodationsbreite auf unter 0,5 dpt bzw. 1% ab. Dadurch vergrößert sich der Abstand des Nahpunktes vom Auge von 7 cm auf mehr als 90 cm. Die Abnahme der Akkommodationsbreite mit dem Alter wird Altersweitsichtigkeit genannt.

Akkommodationsmechanismus beim Menschen

Im entspannten Auge ist der Ringmuskel im Auge entspannt. Als Folge sind die Zonulafasern gespannt und ziehen die Augenlinse in die Länge. Der Krümmungsradius ist daher groß (B1) und die Brechkraft kleinstmöglich. Beim Sehen in die Ferne (B2) entsteht auf der Netzhaut ein scharfes Bild. Beim Sehen im Nahbereich (B2) kann



Der Krümmungsradius wird zur Quantifizierung einer Krümmung herangezogen. Er ist der Radius einer Vergleichskugel, die die gleiche Krümmung aufweist, wie die entsprechende Oberfläche.



B1 Akkommodation beim menschlichen Auge

durch Akkommodation die Brechkraft der Augenlinse so erhöht werden, dass ebenfalls ein scharfes Bild auf der Netzhaut entsteht. Dazu wird der Ziliarmuskel im Auge kontrahiert, die Zonulafasern entspannen sich und die Linse nimmt aufgrund ihrer Elastizität eine kugelförmigere Gestalt an (B1). Dadurch verringert sich der Krümmungsradius und die Brechkraft steigt. Die dauerhafte Akkommodation auf nahe Gegenstände (z. B. Lesen) ist wegen der Belastung des Ziliarmuskels für das Auge ermüdend.

Fehlsichtigkeiten und ihre Korrektur

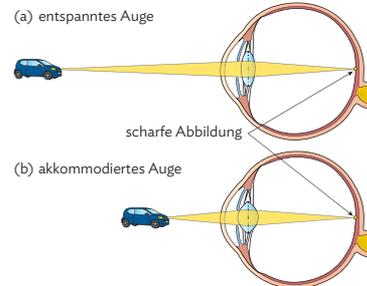
Fehlsichtigkeit ist ein Sammelbegriff für eine Reihe von Sehleistungen des Auges, die von der Norm abweichen, z. B. Kurzsichtigkeit, Weitsichtigkeit, Stabsichtigkeit, Altersweitsichtigkeit und Farbfehlsichtigkeiten (Rot-Grün-Schwäche, Farbblindheit).

Kurzsichtigkeit

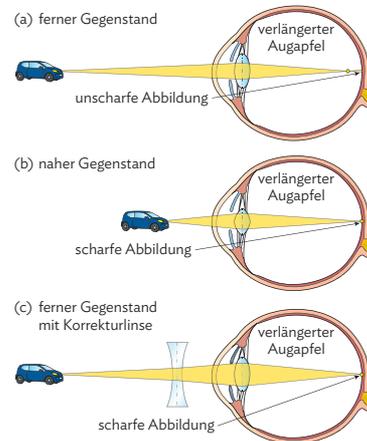
Kurzsichtige Menschen haben ein zu lang gebautes Auge. Die Brechkraft des dioptrischen Apparates ist zu hoch im Verhältnis zur Länge des Auges. Daher entsteht ein scharfes Bild vor und nicht auf der Netzhaut. Dies ist besonders ausgeprägt bei weit entfernten Gegenständen (B3). Je näher ein Gegenstand bei fester Brennweite ans Auge rückt, desto mehr entfernt sich gemäß der Linsengleichung das Bild von der Augenlinse. Dies bedeutet, dass das Bild näher an die Netzhaut rückt. Das Bild wird also ganz ohne Akkommodation schärfer (B3). Menschen mit Kurzsichtigkeit können deswegen im entspannten Zustand der Linse auf kurze Entfernung scharf sehen. Um scharf in die Ferne sehen zu können, brauchen kurzsichtige Menschen eine Korrektur, z. B. eine Brille. Da die Brechkraft des Auges zu groß ist, muss eine Brille die Brechkraft des Gesamtsystems Brille/Auge reduzieren. Dies wird mit Zerstreuungslinsen (B3) erreicht. Im Gegensatz zu Sammellinsen haben diese eine negative Brennweite.

Weitsichtigkeit

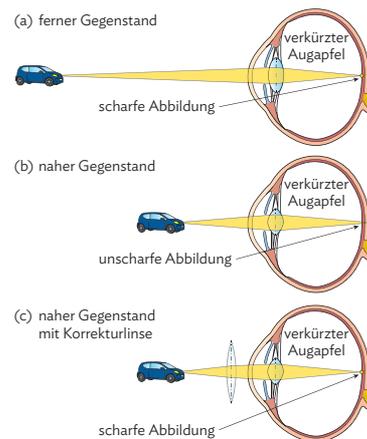
Weitsichtige Menschen haben ein zu kurz gebautes Auge. Die Brechkraft des dioptrischen Apparates ist zu schwach im Verhältnis zur Länge des Auges. Im entspannten Zustand entsteht ein scharfes Bild daher hinter der Netzhaut. Dieser Effekt ist besonders ausgeprägt bei nahen Gegenständen (B4). Je mehr sich ein Gegenstand bei konstanter Linsenkrümmung vom Auge entfernt, desto mehr nähert sich gemäß der Linsengleichung das Bild der Augenlinse. Dies bedeutet, dass es näher an die Netzhaut rückt; das Bild wird also schärfer. Durch Akkommodation kann das Bild meist völlig scharf gestellt werden. Um in der Nähe sehen zu können, brauchen weitsichtige Menschen ebenfalls eine Korrektur. Da die Brechkraft des Auges im Vergleich zur Augenlänge zu klein ist, muss eine Brille die Brechkraft des Gesamtsystems Brille/Auge erhöhen. Dies wird mit Sammellinsen (B4) erreicht.



B2 \ Normalsichtiges Auge

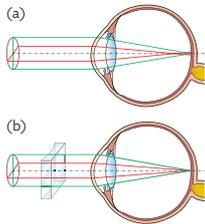


B3 \ Kurzsichtiges Auge



B4 \ Weitsichtiges Auge

1.3 Akkommodation und Fehlsichtigkeiten



B5 Stabsichtiges Auge ohne (a) und mit (b) Korrektur durch eine Zylinderlinse

Stabsichtigkeit (Astigmatismus)

Die normale Hornhaut ist horizontal etwas schwächer gekrümmt als vertikal. Daher erzeugen Lichtstrahlen, die in einer horizontalen Ebene liegen, ein scharfes Bild auf der Netzhaut. Lichtstrahlen, die in einer vertikalen Ebene liegen, konvergieren bereits vor der Netzhaut (B5a). Der aus der unterschiedlichen Krümmung der Hornhaut resultierende Unterschied der Brechkraft ist aber so klein (ca. 2%), dass man dies gewöhnlich nicht bemerkt. Größere Unterschiede in der Krümmung der Hornhaut führen dazu, dass man Dinge unscharf und verzerrt sieht: Es liegt eine Stabsichtigkeit vor. Dabei akkommodiert das Auge so, dass sich die vertikalen Strahlen hinter und die horizontalen Strahlen vor der Netzhaut schneiden. Dies führt zum schärfsten Seheindruck, der bei einer Hornhautverkrümmung möglich ist. Abhilfe schafft eine zylinderförmig geschliffene Zerstreuungslinse (B5b).

Evolutionäre Anpassungen des Akkommodationsmechanismus

Marine Lebewesen akkommodieren durch eine Veränderung der Linsenposition. An Land lebende Wirbeltiere akkommodieren in der Regel durch eine Verformung der Augenlinse. Offenbar spielt der Lebensraum für den Akkommodationsmechanismus des Auges eine Rolle. Wechselt man mit dem Auge vom Medium Luft zum Medium Wasser, ergibt sich an genau einer Stelle eine Änderung: an der Grenzfläche Medium/Hornhaut. Dies merkt man sofort selbst, wenn man unter Wasser ohne Taucherbrille die Augen öffnet. Das menschliche Auge kann unter Wasser nicht scharf sehen. Doch woran liegt das?

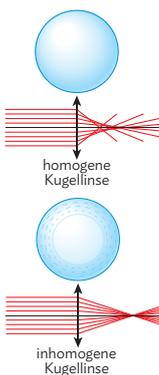
Die Stärke der Brechung hängt von den Brechungsindizes der beteiligten Materialien ab (T1). An Land wird das Licht am Übergang Luft/Hornhaut stark gebrochen, da das Verhältnis der Brechungsindizes ($n_{\text{Luft}} \approx 1$, $n_{\text{Cornea}} = 1,38$) relativ groß ist. Der Brechungsindex von Wasser ($n_{\text{Wasser}} = 1,33$) ist jedoch fast identisch mit dem Brechungsindex der Hornhaut. Daher findet an diesem Materialübergang kaum Brechung statt. Dies hat Konsequenzen für die Akkommodation.

Luft	≈ 1
Wasser	1,33
Hornhaut	1,38
Augenlinse (Mensch)	1,42
Augenlinse (Fisch)	1,5
Glas (je nach Zusammensetzung)	1,45 – 2,14

T1 Brechungsindex verschiedener Materialien

Fischaugen

Da die Hornhaut in Wasser praktisch nichts zur Brechkraft beiträgt, ist sie bei Fischen oftmals kaum gewölbt. Weil die Linse alleine für die Brechung der Lichtstrahlen zuständig ist, hat sie sich so entwickelt, dass ihre Brechkraft möglichst groß ist. Dies gelingt durch einen sehr kleinen Krümmungsradius. Ihre Form ist daher kugelförmig. Die Linse der Fische ist außerdem optisch dichter als die des Menschen. Dafür ist sie nicht elastisch und hat keine variable Brennweite. Die Kugelform der Linse würde allerdings zu starken Abbildungsfehlern führen: Während sich bei einer dünnen Linse alle parallel einfallenden Lichtstrahlen (näherungsweise) in einem Brennpunkt treffen, variiert diese Stelle bei der Kugellinse deutlich (B6 oben). Das Fischauge hat sich so angepasst, dass die Linse einen inhomogenen, nach außen hin abnehmenden Brechungsindex besitzt. Dadurch werden die Abbildungsfehler deutlich verringert; eine solche Linse nennt man Matthiessenlinse (B6 unten).

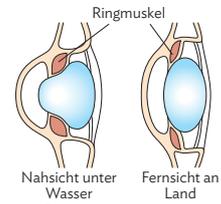


B6 Verringerung des Abbildungsfehlers bei Kugellinsen durch eine inhomogene Schichtung

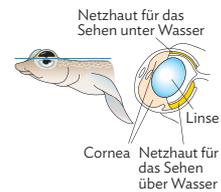
Oberflächenfische und Tauchvögel

Tiere, die sowohl an 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 weiche, stark verformbare Linse. Beim Kormoran (B7) wird

durch den Ringmuskel das Auge so stark gequetscht, dass sowohl Linse als auch Cornea ihre Form verändern. Das Vieraugenauge (ein Zahnkarpfen, der in den Küstengewässern Mittelamerikas lebt) hat eine ungewöhnliche Lösung entwickelt, um unter und über Wasser scharf sehen zu können (B8). Bei diesem Oberflächenfisch sind die Augen in zwei Hälften geteilt. Die obere dient zum Sehen über, die untere zum Sehen unter Wasser. Beim unteren (aquatischen) Auge ist die Linse deutlich stärker gekrümmt (und die Bildweite größer).



B7 Kormoranauge unter Wasser und an Land



B8 Zweigeteiltes Auge des Vierauges

Musteraufgabe 1

Im Laufe des Lebens nimmt die Elastizität der Augenlinse beim Menschen ab.

- a) Erläutern Sie, warum dies zu einer Altersweitsichtigkeit und nicht zu einer Alterskurzsichtigkeit führt.
- b) Bei 10-Jährigen liegt der Nahpunkt etwa 7,5 cm von den Augen entfernt, bei 65-jährigen Menschen im Mittel 90 cm weit. Berechnen Sie, wie sich die Brechkraft der Linse im Laufe des Lebens am Nahpunkt verändert hat, wenn man davon ausgeht, dass das Auge im Mittel etwa 2,0 cm lang ist.
- c) Ab einer Entfernung von etwa 5,0 m ist der Ziliarmuskel völlig entspannt. Hier beginnt die Fernsicht. Berechnen Sie mit dieser Information die Akkommodationsbreite ΔD bei 10-Jährigen bzw. 65-Jährigen.

Lösung

- a) Bei Fernsicht sind beim Menschen der Ziliarmuskel entspannt und die Zonulafasern gespannt. Die Linse wird also aktiv durch eine Kräfteinwirkung in eine längliche Form gezogen. Dabei ist die nachlassende Elastizität der Linse nicht so relevant. Bei Nahsicht spannt sich der Ziliarmuskel und die Zonulafasern lockern sich. Die Linse ändert aufgrund ihrer Elastizität die Form. Die nachlassende Elastizität vermindert die Formänderung; die Linse bleibt eher länglich. Daher können nahe Gegenstände nicht mehr scharf gestellt werden.
- b) $D = \frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$
 $b = 2,0 \text{ cm}, g_{10} = 7,5 \text{ cm}, g_{65} = 90 \text{ cm}$
 10-Jähriger: $D_{10} \approx 63 \text{ dpt}$
 65-Jähriger: $D_{65} \approx 51 \text{ dpt}$
- c) $D = \frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \Leftrightarrow D \approx 50 \text{ dpt}$
 $\Delta D_{10} = 63 \text{ dpt} - 50 \text{ dpt} = 13 \text{ dpt}$
 $\Delta D_{65} = 51 \text{ dpt} - 50 \text{ dpt} = 1 \text{ dpt}$

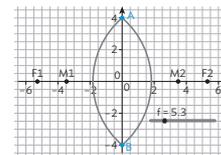
Musteraufgabe 2

Visualisieren Sie mittels einer DGS den Zusammenhang zwischen dem Krümmungsradius r einer Sammellinse aus Glas ($n = 1,5$) und ihrer Brennweite f . Benutzen Sie dabei die Linsenschleiferformel: $f = \frac{r}{(n-1) \cdot 2}$

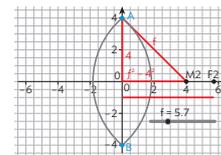
Lösung

Legen Sie einen Schieberegler f für die Brennweite an. Erstellen Sie die Linse über zwei Kreisbögen mit den Mittelpunkten $M_1/M_2 = (\pm \sqrt{f^2 - 4^2}, 0)$ und als weitere Punkte $A/B = (0, \pm 4)$. Für eine Glaslinse mit $n = 1,5$ gilt: $f = \frac{r}{(1,5-1) \cdot 2} = r$.

i Etwa ab dem 40. Lebensjahr verliert die Augenlinse an Elastizität. Das Auge kann nicht mehr auf Nahsicht akkomodieren: Es wird altersweitsichtig. Lesen wird anstrengender und kleine Schriften können im Alter nicht mehr entziffert werden.



Linse aus zwei Kreisbögen



Lage von M und F

1.3 Akkommodation und Fehlsichtigkeiten



MC 67055-02

Unter dem Link findet sich eine interaktive Simulation zum Thema „geometrische Optik“.

Alternativ zu einer DGS lassen sich viele Aufgaben auch mit dieser Simulationsanwendung bearbeiten.

Musteraufgabe 3

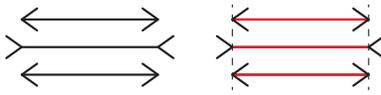
Nur wenn die Linsengleichung erfüllt ist, entsteht auf der Netzhaut ein scharfes Bild. Da es im Alltag unterschiedliche Gegenstandsweiten gibt, ist eine Akkommodation nötig. Beim menschlichen Auge erfolgt dies über eine Anpassung der Brechkraft der Linse. Die Brechkraftänderung der Linse ist aber begrenzt. Veranschaulichen Sie die Situation für eine 10-jährige Person in einer DGS. Beachten Sie dabei, dass die Brechkraft der Linse zwischen 64 dpt und 50 dpt angepasst werden kann. Eine Brechkraft von 50 dpt bedeutet eine Brennweite von etwa 2,0 cm, eine Brechkraft von 63 dpt eine Brennweite von etwa 1,6 cm.

Lösung

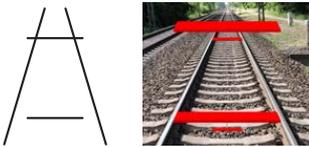
- Legen Sie die Position der Linse und die optische Achse durch zwei zueinander senkrechte Geraden fest. Fügen sie die Netzhaut 2,0 cm von der Linse entfernt als Gerade ein.
- Legen Sie einen Schieberegler f für die Brennweite an; Intervall 1,6 bis 2,0.
- Erstellen Sie die zwei Brennpunkte F_1 und F_2 mit den Koordinaten $(\pm f, 0)$.
- Definieren Sie als Gegenstand einen verschiebbaren Vektor.
- Legen Sie den Strahlenverlauf für Mittelpunktstrahl und Parallelstrahl fest.
- Definieren Sie als Bild einen Vektor, der von der optischen Achse zum Schnittpunkt der Hauptstrahlen zeigt.

Arbeitsaufträge

- 1) Die Müller-Lyer-Täuschung und die Ponzo-Illusion sind bekannte geometrische optische Täuschungen.



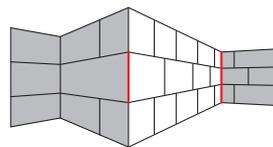
Müller-Lyer-Täuschung



Ponzo-Illusion

Diese beruhen auf einer falschen Einschätzung der Entfernung von Objekten. Normalerweise gilt: Je weiter ein Objekt von Auge entfernt ist, desto kleiner erscheint das Bild auf der Netzhaut. Gleich große Objekte, deren Entfernung unterschiedlich eingeschätzt wird, werden vom Gehirn als unterschiedlich groß eingestuft.

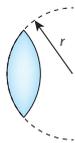
- a) Veranschaulichen Sie die Situation für eine 10-jährige Person und ein bewegliches Objekt mithilfe von Mittelpunkt- und Parallelstrahl in einer DGS (siehe Musteraufgabe 3). Berücksichtigen Sie, dass das Auge akkomodiert.
- b) Markieren Sie für einen relativ weit entfernten Gegenstand die Bildgröße (Bildgröße 1) auf der Netzhaut, nähern Sie anschließend den Gegenstand der Linse (Bildgröße 2) und akkomodieren Sie, um das Bild auf der Netzhaut scharf zu stellen (Bildgröße 3). Was können Sie über Bildgröße 1 im Vergleich zu Bildgröße 2 und 3 sagen? Wiederholen Sie den Vorgang mit unterschiedlichen Gegenstandsweiten.
- c) Erklären Sie anhand der folgenden Skizze, wie so die beiden roten Linien vom Gehirn unterschiedlich lang wahrgenommen werden.



Variante der Müller-Lyer-Täuschung

Arbeitsaufträge

- 2) Mit der LASIK-Methode (Laser-In-Situ-Keratomeileusis) können durch Laserbearbeitung der Hornhaut Kurz- und Weitsichtigkeit beseitigt oder verringert werden. Dabei wird die Hornhaut durch den Laserstrahl an manchen Stellen abgetragen.
- Zeichnen Sie den Strahlengang für ein kurzsichtiges und ein weitsichtiges Auge für den Fall der Fernakkommodation.
 - Erläutern Sie, warum ein weitsichtiges Auge einen weit entfernten Gegenstand manchmal scharf abbilden kann, einen nahen aber nicht.
 - Durch LASIK wird der Krümmungsradius der Hornhaut verändert. Erklären Sie, wie sich dies auf die optischen Eigenschaften der Hornhaut auswirkt.
 - Erläutern Sie, an welchen Stellen die Hornhaut bei LASIK abgetragen werden muss, um Kurzsichtigkeit bzw. Weitsichtigkeit zu verringern.
- 3) Brillengläser werden in verschiedensten Glas- und Kunststoffsorten angeboten. Anhand eines Brillenrezeptes ermittelt dann der Optiker den nötigen Krümmungsradius für die Brillengläser.



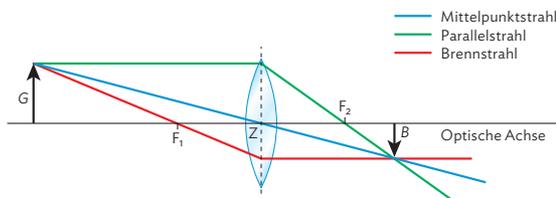
Krümmungsradius einer Linse

- Ein Brillenträger benötigt eine Brille, deren Linsen eine Brechkraft von $D = +6 \text{ dpt}$ besitzen. Entscheiden Sie, ob er kurzsichtig oder weitsichtig ist.
 - Die Linsen aus Teilaufgabe a) sollen von einem Optiker hergestellt werden. Um zu wissen, welchen Krümmungsradius r die Linsen haben müssen, verwendet er eine vereinfachte Form der Linsenschleiferformel: $D = \pm (n - 1) \cdot \frac{2}{r}$ mit n als Brechungsindex des Linsenmaterials. Für Sammellinsen gilt hierbei das positive, für Zerstreuungslinsen das negative Vorzeichen. Erläutern Sie anhand von Skizzen verschiedener Linsen mit unterschiedlichen Krümmungsradien, wie sich eine Erhöhung des Krümmungsradius r auf die Form der Linse auswirkt.
- Berechnen Sie, welchen Krümmungsradius r die Linsen bei einem Kunststoff ($n = 1,5$) bzw. bei einem ultrahochbrechenden Kunststoff ($n = 1,75$) haben müssen.
 - Erläutern Sie die Vorteile eines ultrahochbrechenden Kunststoffs für einen Brillenträger.
 - Erweitern Sie die Visualisierung aus der Musteraufgabe 2 so, dass auch unterschiedliche Linsenmaterialien berücksichtigt werden können, indem Sie den Krümmungsradius r der Linse anpassen. Wählen Sie eine feste Brennweite $f = 4 \text{ cm}$ und untersuchen Sie, welchen Effekt der Wechsel von einem herkömmlichen auf einen ultrahochbrechenden Kunststoff auf die Linsenform hat.
 - Untersuchen Sie, ob alle Kombinationen von f und n in der Visualisierung möglich sind. Diskutieren Sie, was das für Brillen bedeutet.
 - Erweitern Sie die Visualisierung, so dass die Größe der Linse angepasst werden kann, indem bei den Punkten A und B die y-Koordinate durch einen Schieberegler variiert wird. Vergessen Sie nicht, die x-Koordinaten der Mittelpunkte M_1 und M_2 ebenfalls anzupassen. Untersuchen Sie, wie sich die Größe der Linse auf die Fragestellung von Teilaufgabe f) auswirkt.
- 4) Der Nahpunkt gibt die kleinste Distanz zum Auge an, in der eine scharfe Abbildung durch maximale Akkommodation möglich ist. Zur Bestimmung des Nahpunktes nähert sich eine Testperson mit einem Auge möglichst weit einer Scheibe mit zwei kleinen Löchern (Abstand $1\text{--}2 \text{ mm} \approx$ Pupillenweite) und schaut durch die Löcher auf eine Nadel. Die Nadel wird aus der Ferne solange auf das Auge zugeschoben, bis sie gerade nicht mehr doppelt gesehen wird. Dies ist der Nahpunkt.
- Bestimmen Sie mit dieser Methode den Nahpunkt Ihrer Augen.
 - Erstellen Sie je eine Skizze des Strahlengangs beim maximal akkommodierten Auge für ...
 - einen Gegenstand, der sich genau im Nahpunkt befindet.
 - einen Gegenstand, der sich näher am Auge befindet als der Nahpunkt.

V1 Das Linse-Schirm-Modell des Auges

Den Verlauf aller Lichtstrahlen eines Lichtbündels bei einer optischen Abbildung verfolgen zu wollen, ist sehr aufwändig. Daher werden oft stellvertretend nur die Hauptstrahlen (Parallelstrahl, Mittelpunktstrahl und Brennpunktstrahl) betrachtet, da sich dort der Strahlenverlauf besonders leicht beschreiben lässt.

- Der Parallelstrahl verläuft vor der Linse parallel zur optischen Achse, hinter der Linse durch den Brennpunkt F_2 .
- Der Mittelpunktstrahl verläuft ohne Richtungsänderung durch den Mittelpunkt der Linse.
- Der Brennpunktstrahl verläuft vor der Linse durch den Brennpunkt F_1 , hinter der Linse parallel zur optischen Achse.



Verlauf der Hauptstrahlen

Aus dem Verlauf der Hauptstrahlen lässt sich die Linsengleichung

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

ableiten. Nur wenn die Linsengleichung erfüllt ist, kann eine scharfe Abbildung erzielt werden. Außerdem kann man über die Hauptstrahlen ebenfalls zeigen, dass gilt:

$$\frac{B}{G} = \frac{b}{g} \quad (2)$$

Da die Lage der Netzhaut im Auge fest ist, muss für eine scharfe Abbildung bei unterschiedlichen Gegenstandsweiten akkommodiert werden. Dafür gibt es aufgrund der Linsengleichung zwei Möglichkeiten:

- Die Brennweite f der Linse wird über die Änderung des Krümmungsradius angepasst.
- Die Position der Linse wird angepasst.

Benötigte Materialien:

- Wiederaufladbarer LED-Pointer
- Sammellinsen mit unterschiedlichen Brennweiten
- optische Bank
- Sichtschirm
- weißes Blatt Papier
- beleuchtetes Objekt

Arbeitsauftrag

- Überzeugen Sie sich mithilfe des LED-Pointers, dass die Hauptstrahlen tatsächlich den beschriebenen Weg vor bzw. nach der Linse nehmen. Machen Sie dazu die LED-Strahlen sichtbar, z. B. durch Wasserdampf, Staub oder eine Nebelmaschine.
- Untersuchen Sie für $0,5f < g < 4f$ systematisch, wie sich die Gegenstandsweite auf die Bildgröße B , die Bildweite b und die Orientierung des Bildes auswirkt.
- Vergleichen Sie ihre Ergebnisse mit den Ergebnissen aus den Gleichungen (1) und (2).
- Stellen Sie die beiden Akkommodationsmechanismen nach. Wählen Sie dazu für den Sichtschirm eine feste Position und verwenden Sie verschiedene Sammellinsen bzw. variieren Sie die Linsenposition. Kann damit für alle Gegenstandsweiten eine scharfe Abbildung erzielt werden?
- Untersuchen Sie die Änderung der Bildgröße nach erfolgter Akkommodation bei Annäherung des Objektes.

V2 Fehlsichtigkeiten und ihre Korrektur

Fehlsichtigkeiten sind Sehleistungen, die von der Norm abweichen. Die beiden häufigsten sind die Kurzsichtigkeit und die Weitsichtigkeit.

- Bei der Kurzsichtigkeit ist das Auge zu lang für die Brechkraft des Auges.
- Bei der Weitsichtigkeit ist das Auge zu kurz für die Brechkraft des Auges.

Zur Korrektur dieser Fehlsichtigkeiten werden meist Brillen verwendet. Dabei stellt das System Auge/Brille ein klassisches Linsensystem da. Das Gesamtsystem hat nun eine andere Brechkraft als das Auge. Stabsichtigkeit (Astigmatismus) tritt ebenfalls häufig auf. Hierbei ist die Cornea unregelmäßig gekrümmt. Dies führt dazu, dass Lichtstrahlen, die horizontal verlaufen, eine andere Brennweite aufweisen als Lichtstrahlen, die vertikal verlaufen.

Arbeitsauftrag

- a) Überlegen Sie sich selbständig Fragestellungen zu Kurzsichtigkeit und Weitsichtigkeit. Wenn Sie nicht weiterkommen, können Sie sich über die mit dem Mediacode verlinkten Fragen Anregungen holen.
- b) Nachdem Sie ihre Vorüberlegungen abgeschlossen und erste Vermutungen zu ihren Fragestellungen aufgestellt haben, sollten Sie geeignete Vermutungen als Je-desto-Hypothese formulieren. Notiere Sie sich für jede von Ihnen vermutete Abhängigkeit vom jeweiligen Parameter eine Hypothese der Art: „Je ..., desto höher/größer/stärker/ausgeprägter ist ...“.
- c) Planen Sie einzelne Experimente, mit denen sich die von Ihnen aufgestellten Hypothesen überprüfen lassen. Wichtig ist dabei, dass Sie die Auswirkungen verschiedener Parameter nicht vermischen, sondern sie getrennt voneinander untersuchen. Nur so kann man sicherstellen, dass sie sich nicht gegenseitig beeinflussen und dadurch die Messergebnisse verfälschen. Verändern Sie deswegen immer nur einen Parameter, während Sie die anderen unverändert lassen.
- d) Erstellen Sie ein strukturiertes Versuchsprotokoll nach der ZABMA-Methode (Ziel – Aufbau – Beschreibung – Messergebnisse – Auswertung) und führen Sie die Experimente durch.
- e) Fassen Sie geeignete Ergebnisse in Je-desto-Aussagen der Art zusammen:
„Je ..., desto höher/größer/stärker/ausgeprägter ist ...“.
- f) Erklären Sie Ihre Beobachtungen mit geeigneten Skizzen.
- g) Stellen Sie die Annäherung eines Objektes an ein kurzsichtiges bzw. weitsichtiges Auge mittels einer Simulation nach (DGS oder die mit dem Mediacode verlinkte Simulation).
- Kurzsichtigkeit: Positionieren Sie dazu in Ihrer Simulation aus der Lernaufgabe zu Kapitel 1.3 das Objekt sehr weit entfernt und fügen Sie eine Gerade ein Stück hinter dem Bild ein. Nähern Sie nun langsam Ihr Objekt der Linse.
- Weitsichtigkeit: Positionieren Sie dazu in Ihrer Simulation aus der Lernaufgabe zu Kapitel 1.3 das Objekt sehr weit entfernt und fügen Sie eine Gerade ein Stück vor dem Bild ein. Nähern Sie nun langsam ihr Objekt der Linse.
- h) Folgen Sie dem folgenden Mediacode. Probieren sie den Dioptrien-Simulator aus, um einen realistischen Eindruck des Seheindrucks bei Kurz- und Weitsichtigkeit zu erhalten.



MC 67055-03



MC 67055-04



MC 67055-05