

Simulation von Fehlsichtigkeiten

Akkommodationsfähige Augenmodelle für den Unterricht

Von Giuseppe Colicchia und Hartmut Wiesner

Aufbau und Funktion des menschlichen Auges gehören ebenso wie Fehlsichtigkeit zu den für die Schülerinnen und Schüler besonders interessanten Themen des Optikunterrichts in der Sekundarstufe I. Dieser Beitrag gibt einen kurzen Überblick über die Physiologie des Auges und zeigt, wie man mit einfach herstellbaren, akkommodationsfähigen Augenmodellen die Abbildungen auf der Netzhaut veranschaulichen sowie Fehlsichtigkeiten und deren Korrektur simulieren kann.

Mit vorbereiteten Bauteilen können die Schülerinnen und Schüler – wenn es als sinnvoll angesehen wird – in Gruppen die Modelle auch selbst bauen und die Versuche in der Klasse durchführen. Einen Vorschlag für einen Unterricht in Form des Lernens an Stationen haben wir ausführlich in [1] beschrieben. Dieser Vorschlag enthält Bauanleitungen, Experimentierhinweise, Arbeitsblätter und fachliche Informationen. Weitere Hinweise zum Thema finden sich in [2]–[3].

Aufbau und Funktion des menschlichen Auges

Im Prinzip besteht das menschliche Auge aus einer Lochkamera und einer Linse. Eine Lochkamera erzeugt mit genügend kleinem Loch immer unabhängig vom Objekt- und Schirmabstand auf dem Schirm ein scharfes Bild (vgl. [4]).

Durch eine zusätzliche, relativ große Linse (Hornhaut) kann die Lichtausbeute des Auges erhöht werden. Das empfangene Licht muss nun aber auf die Sehzellen (Netzhaut) fokussiert werden.

Da jedoch kein festes Sehsystem sowohl nahe als auch entfernte Objekte scharf abbilden kann, sollen sich leistungsfähige Augen an verschiedene Abstände anpassen können – sie müssen akkommodationsfähig sein.

Akkommodation

Bei Menschen ist das Auge eine Kugel von ca. 24 mm Durchmesser mit Horn-

haut ($n = 1,376$), Linse ($n \approx 1,4$), Kammerwasser und Glaskörper als brechende Medien. Der Übergang von Luft zum Innenaugaplast stellt eine sphärisch brechende Fläche dar, deren Brennweite ca. 3,1 cm beträgt. Die zusätzlich erforderliche Brechkraft, um das Bild auf die Netzhaut zu bringen, wird durch eine variable Linsendicke erreicht. Bei völliger Entspannung ist die Linse flachgezogen und das Auge auf die Ferne scharf gestellt. Schaut man nähere Objekte an, kontrahiert der Ringmuskel um die Linse, der über die sog. Ciliarfäden die Linse flachzieht. Dadurch wird der Zug der Ciliarfäden auf die Linse schwächer, so dass die Linse aufgrund ihrer Eigenelastizität in der Mitte dicker wird, wodurch sich der Brechwert vergrößert.

Kinder können in einem Bereich zwischen 7 cm und ∞ scharf sehen. Das entspricht einer Akkommodationsbreite von $1/0,07 \text{ m} - 1/\infty \approx 14 \text{ dpt}$. Bei älteren Menschen geht die Akkommodationsfähigkeit weitgehend verloren, sie reduziert sich auf etwa 0,5 dpt [5].

Fehlsichtigkeiten

Bei einem normalen Auge befindet sich die Ebene, in der das betrachtete Objekt scharf abgebildet ist, auf der Netzhaut (Normalsichtigkeit).

Kurzsichtigkeit

Wenn die Augenachse anormal lang oder die Brechkraft der Medien zu stark ist, befindet sich die Ebene, in der das scharfe Bild entstehen würde, vor der Netzhaut im Glaskörperaum. Auf der Netzhaut entstehen Zerstreuungskreise und damit ein unscharfes Bild (Kurzsichtigkeit). Der Fernpunkt liegt in endlicher Entfernung vom Auge und der Nahpunkt liegt näher am Auge als bei Normalsichtigkeit. Die veränderte Lage des Nahpunktes ist ein Vorteil, der zu nahe liegende Fernpunkt ist jedoch ein Nachteil, der bei Bedarf korrigiert werden muss. Die Brillenkorrektur zur Verminderung

der Brechkraft erfolgt durch Zerstreuungslinsen, die den Fernpunkt (bzw. den Nahpunkt) weiter vom Auge entfernen.

Wenn z. B. der Nahpunkt bei 15 cm und der Fernpunkt bei 1 m liegt, ist das scharfe Sehen schon ab 15 cm Abstand ein Vorteil, aber das unscharfe Sehen ab 1 m muss unbedingt korrigiert werden. Die Brennweite der benötigten Korrekturlinse zur Verschiebung des Fernpunktes von 1 m bis ins Unendliche ergibt sich aus der Additivität der Brechkraft für dünne Linsen, deren Abstand deutlich kleiner als ihre Brennweiten ist:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{1}{\infty}\right) - \left(\frac{1}{1 \text{ m}}\right) = -1 \text{ m}^{-1} = -1 \text{ dpt},$$

d. h. eine Linse mit der Brechkraft von -1 dpt verschiebt den Fernpunkt nach unendlich. Gleichzeitig ändert sich der Nahpunkt auf 17,6 cm.

Weitsichtigkeit

Wenn die Augenachse anormal kurz oder die Brechkraft der brechenden Medien zu schwach ist, befindet sich die Ebene, auf der das scharfe Bild entstehen würde, hinter der Netzhaut. Auf der Netzhaut entsteht insbesondere bei nahen Gegenständen ein unscharfes Bild (Übersichtigkeit, Weitsichtigkeit). Bei Weitsichtigkeit werden weit entfernte Gegenstände leicht unscharf oder auch scharf wahrgenommen, allerdings durch einen ständigen und daher belastenden Einsatz der Ringmuskeln. Die Korrektur zur Erhöhung der Brechkraft erfolgt durch eine Sammellinse.

Weitere Typen von Fehlsichtigkeit

Ist die Brechkraft der vertikalen und horizontalen Hornhautmeridiane unterschiedlich, dann entsteht auf der Netzhaut ein verzerrtes Bild (Stabsichtigkeit). Die Brillenkorrektur erfolgt durch zylindrisch geschliffene Gläser, die die beiden Brechkraft ausgleichen.

Mit dem Alter nimmt durch zunehmende Verhärtung des Linsenkerns die Linsenelastizität ab und daher auch die Akkommodationsfähigkeit, so dass nahe

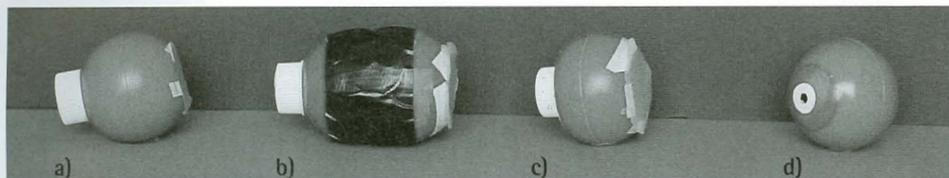


Abb. 1: Augenmodelle, in denen die Achsenlänge gleich (a), länger (b) und kürzer (c) als die Brennweite ist; (d) zeigt ein Lochkamera-Augenmodell



Abb. 2: Korrektur der Fehlsichtigkeit (Kurzichtigkeit) durch eine Linse

Gegenstände nicht mehr scharf auf der Netzhaut abgebildet werden können (Alterssichtigkeit).

Veranschaulichung des Sehvermögens und von Fehlsichtigkeiten im Unterricht

Einfache Augenmodelle

Für den Einstieg in das Thema Sehvermögen und Fehlsichtigkeiten können einfache, nicht akkommodationsfähige Augenmodelle und eine Augenmodelllochkamera verwendet werden (s. [6] und **Abb. 1**).

Wenn Schülerinnen und Schüler diese Augenmodelle auf verschieden weit entfernte Gegenstände richten, stellen sie Folgendes fest:

- Das normalsichtige Augenmodell bildet weiter entfernt liegende Objekte scharf ab und nahe Objekte etwas unscharf. Die Schülerinnen und Schüler werden sich so vorstellen können, dass bei einem normalsichtigen Auge nur wenig Akkommodation für eine scharfe Einstellung nötig ist und diese durch die Augenlinse erfolgen kann.
- Das kurzsichtige Augenmodell bildet weit entfernte Gegenstände sehr unscharf ab, während nahe Gegenstände (z. B. 40 cm Entfernung) scharf abgebildet werden.
- Das weitsichtige Augenmodell bildet weit entfernte Gegenstände leicht unscharf ab und nahe Gegenstände sehr unscharf.

- Das Lochkamera-Augenmodell bildet mit einem kleinen Loch sowohl weiter entfernt liegende Objekte als auch nahe Objekte scharf ab. Die Helligkeit ist aber so schwach, dass nur sehr stark leuchtende bzw. beleuchtete Objekte betrachtet werden können. Durch Vergrößerung des Loches steigt die Helligkeit, aber die Schärfe nimmt ab.

Fazit: Keines dieser Augenmodelle ist fähig, sowohl weiter entfernte als auch nahe Objekte scharf abzubilden.

Akkommodationsfähige Augenmodelle

In der **Bauanleitung** auf S. 17 ist die Herstellung eines Augenmodells beschrieben, mit dem sich sowohl die unterschiedlichen Fehlsichtigkeiten als auch die Akkommodation durch die Verdickung der Linse demonstrieren lassen.

Wenn die Schülerinnen und Schüler verschiedene Objekte durch das normalsichtige Augenmodell betrachten, können sie erkennen, dass bei diesem Augenmodell – wie beim realen Auge auch – das Scharfstellen auf verschiedene Entfernungen durch die Veränderung der Linsendicke erfolgt. Bei der Betrachtung von weit entfernten Dingen ist die Linse dünn, bei der Betrachtung von nahen Dingen dick. Die Schülerinnen und Schüler werden auch erkennen, dass das Augenmodell fähig ist, von Unendlich bis in die Nähe zu akkommodieren.

Beim „weitsichtigen“ Augenmodell ist die erreichbare Linsenkrümmung bei vollständig eingeschobenem Spritzenkolben nicht ausreichend, um nahe Gegenstände scharf auf der „Netzhaut“ abbilden zu können. Beim kurzsichtigen Augenmodell kann die Krümmung nicht ausreichend reduziert werden, so dass nur nähere Objekte scharf abgebildet werden können.¹⁾

Korrektur der Fehlsichtigkeiten

Den Schülerinnen und Schülern ist bekannt, dass Fehlsichtigkeit durch eine Brille, d. h. durch eine vorgesetzte Linse behoben werden kann. Ziel ist es zu erkennen, welche Linsenart Kurzsichtigkeit und welche Weitsichtigkeit korrigiert.

Die Schülerinnen und Schüler sollen mit dem kurzsichtigen Augenmodell weiter entfernte Objekte betrachten und die geeignete Linse zur Scharfstellung durch Ausprobieren finden (**Abb. 2**). Die Stärke (Dioptriezahl) der für die Korrektur geeigneten Linse gibt den Grad der Kurzsichtigkeit für das Modell an. Da die Stärke der Fehlsichtigkeit etwa -2 bis -3 dpt beträgt, können die Schülerinnen und Schüler die passenden Linsen unter den Brillen in der Klasse suchen.

Bei Weitsichtigkeit muss zur Korrektur eine Sammellinse verwendet werden. Die passende Linse soll auch dieses Mal durch Ausprobieren (z. B. mit Linsen aus der Physiksammlung, da Jugendliche selten weitsichtig sind) gefunden werden.

Anmerkung

- 1) Man kann auch Modelle ohne feste vordere Linse versehen, in denen die ganze Brechung von der akkommodierenden Linse erzeugt wird. Dabei müssen die verschiedenen Akkommodationsbereiche durch unterschiedlich eingefüllte Wassermengen vorgegeben werden. Das bedeutet aber, sich ein wenig von der Realität zu entfernen.

Als „Auge“ lässt sich auch eine Kugel aus ursprünglich durchsichtigem Plastik verwenden, in dem die „Pupille“ durchsichtig, die „Netzhaut“ halbdurchsichtig (Aufrauen mit feinem Sandpapier) und der restliche Teil der Kugel durch Anstreichen undurchsichtig ist (für den Aufbau s. [1]).

Literatur

- [1] http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/U_materialien/ph_med/phmed.html
- [2] Colicchia G.; Wiesner H.: Wie Fische sehen, Physik in der Schule 38 (2000), Heft 3, S. 157–161.
- [3] Berge, O. E. (Hrsg.): Das Auge. Unterricht Physik 11 (2000), Heft 56.
- [4] Berge, O. E. (Hrsg.): Lochkamera. Unterricht Physik 13 (2002), Heft 68.
- [5] Penzlin H.: Lehrbuch der Tierphysiologie, Stuttgart: Fischer, 1996.
- [6] Colicchia G.; Künzl A.; Wiesner H.: Einfache Augenmodelle zur Demonstration der Abbildung im Auge. In: PdN-Ph 50 (2001), Heft 8, S. 45–47.

► Prof. Dr. Dr. Hartmut Wiesner, Professor für Didaktik der Physik.

Dr. Giuseppe Colicchia, Doktorand in Grundschulpädagogik.

Lehrstuhl für Didaktik der Physik
Ludwig-Maximilians-Universität München
Schellingstr. 4
80799 München ◀

Akkommodationsfähiges Augenmodell

▼ MATERIAL

- zweiteilige Styroporhohlkugel, Durchmesser 12 cm (Fachgeschäft für Dekoration oder Bastlerbedarf)
- Styroporing, Durchmesser 12 cm, Breite 3 cm (ausgeschnitten aus einer weiteren Styroporkugel)
- 3 (Plastik-)Linsen, Brennweiten ca. 10 cm, 13 cm, 7 cm (Brennweite muss etwa dem Durchmesser der ursprünglichen Kugel entsprechen; Plastiklinsen können preiswert über www.opitec.de oder www.astromedia.de bestellt werden)
- Transparentpapier
- schwarze Farbe, Styroporkleber, Tesakrepp (weiß)
- Plastikschaale, Durchmesser 4 cm (Chemie- oder Biologiefachhandel)
- durchsichtige Gummimembran (z. B. Kondom)
- Dichtungsring, Durchmesser 3 cm (Baumarkt)
- Schlauchstück, Durchmesser 0,5 cm (Fachhandel Chemiebedarf)
- Spritze 1 cm³ (Apotheke)

▼ BAUANLEITUNG

Das Augenmodell besteht aus zwei zusammengefügteten Teilen einer Styroporhohlkugel.

In eines der Teile wird in die Mitte ein Loch von ca. 1,5 cm Durchmesser geschnitten. In dieses Loch wird die (Plastik-)Linse L eingeschoben und ggf. mit Tesakrepp am Rand festgeklebt. Ihre Wirkung entspricht der gekrümmten Hornhaut.

Von der anderen Halbkugel wird mittig ein Kugelabschnitt abgeschnitten und mit transparentem Papier N verschlossen. Auf dem Transparentpapier wird das Bild aufgefangen; es stellt die Netzhaut dar (**Abb. 3**).

Aus der Halbkugel mit der „Netzhaut“ wird nun noch ein etwa 3 cm breiter Styroporing herausgeschnitten und mit weißem Tesakrepp angeklebt.

Das Innere der Kugel und des zusätzlichen Styroporings wird mit schwarzer Farbe angestrichen, um Streulicht zu eliminieren und damit den Kontrast zu verbessern.

Hinter die Linse mit fester Brennweite wird nun eine akkommodierfähige Linse L_a eingesetzt, die der Augenlinse entspricht. Sie besteht aus der Plastikschaale, die mit einer durchsichtigen Gummimembran G mittels eines Dichtungsringes R verschlossen wird (**Abb. 4**). In den Rand der Schale wird ein Loch (Durchmesser ca. 0,4 cm) gebohrt, um ein Schlauchstück straff einschieben zu können. Die Schale wird mit Wasser gefüllt und an eine Spritze mit ca. 1 ml Wasser angeschlossen.

Mithilfe der Spritze kann zusätzliches Wasser in die Schale gedrückt werden, die Gummihaut wölbt sich dadurch nach außen. Die Akkommodation erfolgt dann wie beim menschlichen Auge durch Änderung der Brechkraft der Linse.

▼ FUNKTIONSWEISE DES AKKOMMODIERFÄHIGEN AUGENMODELLS

Die akkommodierende Linse wird mit so viel Wasser befüllt, dass bei herausgezogenem Spritzenkolben alles Wasser in der Spritze ist: Das Augenmodell ist auf Unendlich einge-

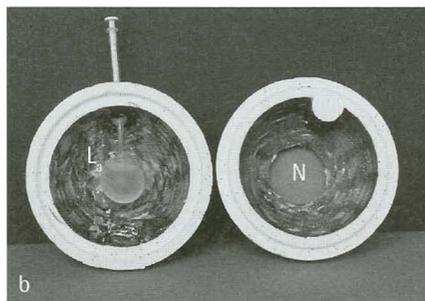
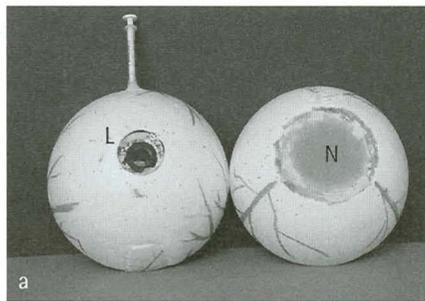


Abb. 3: Akkommodationsfähiges Augenmodell, a) Außensicht und b) Innensicht

Abb. 4: Gummilinsensystem



Abb. 5: Normalsichtiges (a), weitsichtiges (b) und kurzsichtiges (c) Augenmodell

stellt. Da die „Netzhaut“ etwa in der Brennebene der festen Linse (10 cm) liegt, wird die Gummimembran beim Beobachten entfernter Gegenstände bzw. im ruhenden Zustand entspannt sein. Die Akkommodationsfähigkeit der Linse ist entsprechend der begrenzten Wassermenge anschaulich begrenzt, weil mit eingeschobenem Kolben Objekte erst ab einem gewissen Abstand scharf abgebildet werden.

▼ FEHLSICHTIGE AUGENMODELLE

Durch Herausschneiden eines etwa 3 cm breiten Styroporringes aus dem normalsichtigen Augenmodell (**Abb. 5a**) entsteht ein Modell eines weitsichtigen Auges (**Abb. 5b**).

Durch Einfügen eines zusätzlichen ca. 3 cm breiten Ringes entsteht hingegen ein kurzsichtiges Augenmodell (**Abb. 5c**). Fehlsichtige Augenmodelle kann man auch durch Austauschen der vorderen Linse („Hornhaut“) im normalsichtigen Augenmodell erhalten. Dabei entsteht durch eine Linse mit ca. 13 cm Brennweite ein weitsichtiges, durch eine Linse mit ca. 7 cm Brennweite ein kurzsichtiges Augenmodell. Diese Modelle simulieren Augen, die eine normale Achsenlänge, aber eine anomale Brechkraft besitzen.