

## Können Fische unter Wasser besser sehen als Menschen?

G. Colicchia und H. Wiesner

Warum sieht man unter Wasser ohne Taucherbrille alles so verschwommen? Sehen Fische und andere im Wasser lebende Tiere ebenfalls unscharf? Wenn nein, besitzen sie einen anderen Aufbau des Auges? Wie ist es mit Tieren, die sowohl im Wasser als auch außerhalb scharf sehen sollten? Diese Fragen stoßen bei Schülerinnen und Schülern auf großes Interesse und ihre Beantwortung ist im Physikunterricht im Rahmen der elementaren Optik möglich. Zunächst ein Überblick über das optische Hintergrundwissen.

### Das Sehen in Luft

Bei Menschen kann das Auge im Wesentlichen als eine Kugel von ca. 2,4 cm Durchmesser aufgefasst werden. Die optische Wirkung beruht vor allem auf dem Übergang von Luft ( $n_L = 1$ ) zur Hornhaut und dem anschließenden Kammerwasser ( $n_W = 1,34$ ) und zu einem geringeren Teil von der Augenlinse.

Wenn man die Hornhaut als sphärisch mit dem Radius  $r = 0,8$  cm annimmt, ist nach der Abbildungsgleichung die Brennweite  $f_H = r \cdot n_W / (n_W - n_L) = 0,8 \cdot 1,34 / (1,34 - 1) \approx 3$  cm. Die noch erforderliche Brechkraft, um das Bild von weit entfernten Objekten auf die Netzhaut zu bringen, wird von der Augenlinse geliefert, die bei entspanntem Ziliarmuskel flachgezogen ist.

Wir betrachten ein Auge, welches auf einen weit entfernten, leuchtenden Gegenstand gerichtet ist. Die Oberfläche des Gegenstands stellen wir uns aus unendlich vielen (Leucht-)Punkten bestehend vor. Von dem Licht, das jeder einzelne Punkt der Gegenstandsfläche, z. B. der Punkte  $P_1$  oder  $P_2$ , divergent aussendet, trifft ein Bündel erst auf die gekrümmte Hornhaut und dann auf die Augenlinse, wird in ein konvergentes Bündel umgewandelt, das im reellen Bildpunkt  $P_1'$  bzw.  $P_2'$  auf die Netzhaut zusammenläuft. Alle Bündel, die von den Punkten der Oberfläche stammen und in jeweils einen Bildpunkt auf die Netzhaut zusammenlaufen, erzeugen dort die vollständige, reelle und scharfe Abbildung (Bild 1a).

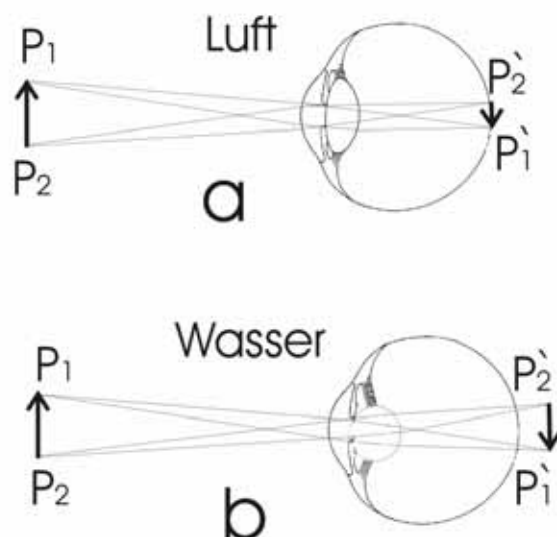


Bild 1: Abbildung beim menschlichen Auge in Luft und unter Wasser.

Werden nähere Objekte betrachtet, kontrahiert der Ziliarmuskel (Ringmuskel). Da der Durchmesser des Ziliarmuskels kleiner wird, wird der Zug der Ziliarfäden auf die Linse

schwächer. Die Linse wird aufgrund ihrer Eigenelastizität in der Mitte dicker. Dadurch ändert sich die Brechkraft und das Bild wird wieder auf die Netzhaut verschoben [1].

### Das Sehen unter Wasser

Wenn sich das Auge unter Wasser befindet, wird die an dem Übergang von Luft zum Innenaugewasser vorhandene Brechung praktisch vollständig aufgehoben (Seewasser  $n = 1,34$ ) und es bleibt nur die Brechkraft der Augenlinse übrig. Wenn man bei einer maximalen Akkommodation für beide Flächen der Augenlinse einen Radius  $r_{AL} = 0,6$  cm und einen Brechungsindex  $n_{AL} = 1,42$  annimmt und wenn zur Vereinfachung die Augenlinse als dünne Linse betrachtet wird, ergibt sich für die Augenlinse eine Brennweite von

$$f_{AL} = 1/2 n_W r_{AL} / (n_{AL} - n_W) = 4,43 \text{ cm.}$$

Scharfe Bilder von den angeschauten Objekten können deswegen trotz Akkommodation nicht auf der Netzhaut entstehen sondern nur an einem Ort außerhalb des Auges (Bild 1b). [2], [3]

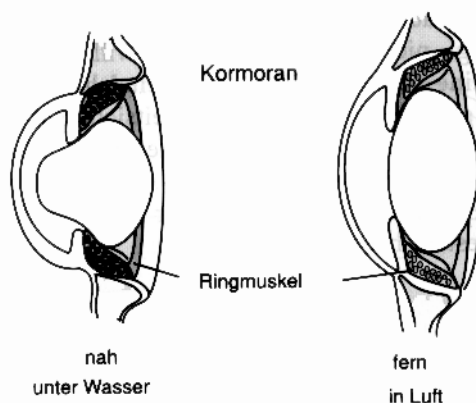
Mit Hilfe einer Taucherbrille wird dafür gesorgt, dass sich Luft vor der Hornhaut befindet und damit die normale hohe Brechkraft erhalten bleibt.

### Akkommodation im Tierreich

Ein scharfes Netzhautbild kann sowohl durch Änderung der Brechkraft der abbildenden Medien als auch durch Veränderung des Abstandes zwischen Linse und Netzhaut erreicht werden. Vögel, Säugetiere und die meisten Reptilien ändern die Bildweite durch Variation der Krümmung einer formveränderbaren Linse. Fische, deren Brechung an der Hornhaut unabhängig von der Krümmung ohne Bedeutung ist, besitzen eine sphärische, relativ harte Linse mit einer hohen Brechzahl (ca. 1,5 im Kern).

Augen, die für das Sehen in Luft optimiert sind, sind im Allgemeinen unter Wasser weitsichtig. Augen von im Wasser lebenden Tieren sind in Luft kurzsichtig, wenn ihre Hornhaut stark gekrümmt ist. Ist die Hornhaut weitgehend eben, dann ist die Brechkraft an der Oberfläche der Hornhaut praktisch unabhängig davon, ob davor Luft oder Wasser ist. So besitzen z. B. Pinguine, die eine relativ ebene Hornhaut (Kaiserpinguine, Radius 3 cm) haben eine kleine Refraktionsstärke in Luft (ca. 10 dpt). Pinguine können deswegen außerhalb und im Wasser scharf sehen.

Einige weitere Tiere können wie die Pinguine in Luft und im Wasser scharf sehen. Darunter sind recht originelle Möglichkeiten realisiert: Beim Kormoran wird das Auge so gequetscht, dass sich sowohl Hornhaut (dies ist auch beim Sandaal realisiert) als auch Linse stärker



wölben (Bild 2).

Bild 2: Akkommodation beim Kormoran.

Der „Vieraugenfisch“ (*Anableps tetraphthalmus*) besitzt zwei relative große, in zwei Hälften geteilte Augen. Die obere Hälfte dient zum Sehen oberhalb der Wasseroberfläche bei der Jagd

nach Insekten, die untere zum gleichzeitigen Sehen unter Wasser, um ins Wasser gefallene Insekten und rechtzeitig für ihn gefährliche Raubfische zu entdecken (Bild 3a).

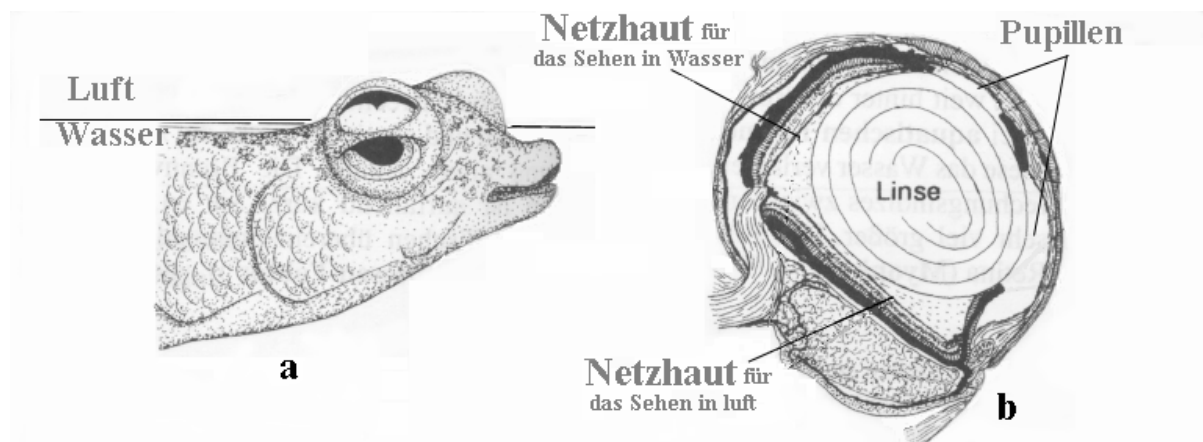


Bild 3: *Anableps tetraphthalmus* besitzt zweigeteilte Augen. Der untere Teil dient zum Sehen im Wasser und der obere zum Sehen in der Luft (ergänzte Abb. aus [5]). (b) Querschnitt durch das Auge.

Bild 3b zeigt den Aufbau des Auges des *Anableps*. Die Augenlinse ist etwa eiförmig und füllt das Augennere weitgehend aus. Sie kann gleichzeitig zwei Bilder fokussieren, eines vom Bereich über dem Wasser und eines vom Unterwasserbereich.

### **Augenmodelle zur Demonstration der Reduktion der Brechkraft und der Akkommodation unter Wasser**

Zur Vorbereitung auf den Unterricht werden zwei mit einfachen Mitteln herzustellende Augenmodelle gebaut. Das eine Modell besitzt eine Gummilinse und kann deshalb wie das menschliche Auge akkomodieren. Der Bau wurde kürzlich in dieser Zeitschrift beschrieben [4]. Für die Verwendung in Schritt 3 des nachfolgend beschriebenen Unterrichtsablaufs muss es ein wenig abgeändert werden: In die Vorderseite wird eine Öffnung geschnitten und eine Plexiglaslinse mit einer Brechkraft von 15,4 dpt wasserdicht eingeklebt. (Bezugsquellen für die plankonvexen Linsen sind am Ende des Beitrags angegeben) Diese starre Linse simuliert die Brechkraft der gekrümmten Hornhaut.

Das zweite Modell kann akkomodieren wie die meisten Fische, und zwar durch Variieren des Abstandes Linse-Netzhaut. Dieses zweite Modell (Bild 4) besteht aus zwei ineinander verschiebbaren Zylindern. Für den äußeren Zylinder ist sehr gut eine Kunststoffflasche geeignet (ist wasserfest und in den Verschluss kann sehr einfach die Plexiglaslinse befestigt und mit Dichtungsringen abgedichtet werden). An der Verschlussöffnung des äußeren Zylinders sind zwei Plexiglas-Sammellinsen mit 15,4 dpt bzw. 8,3 dpt (insgesamt eine Brennweite von 4,2 cm) eingefügt. Diese stellen das optische System eines Auges dar. Die vordere Sammellinse (15,4 dpt) zeigt mit ihrer gekrümmten Fläche nach außen und realisiert eine Brechkraft entsprechend der Hornhaut, die zweite entspricht der Augenlinse. Der innere verschiebbare Zylinder besitzt an einem Ende ein semitransparentes Papier, welches die Netzhaut darstellt und auf dem das Schirmbild aufgefangen wird. Das Innere des Modells ist mit dunkler Farbe gestrichen, um Streulicht zu reduzieren und den Kontrast zu verbessern.

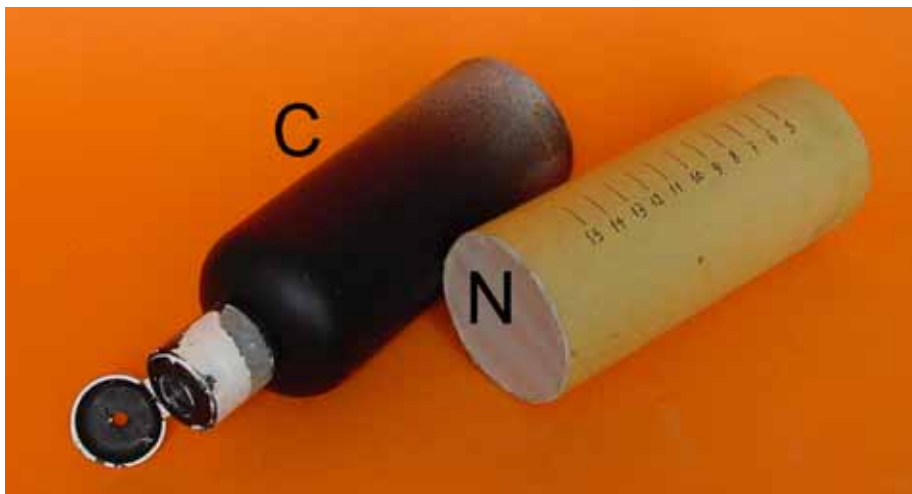


Bild 4: Augenmodell mit veränderbarem Abstand Linse-Netzhaut: Die Schirm N ist in C verschiebbar. Die Markierungen am inneren Rohr dienen zur Anzeige, wie weit das innere Rohr eingeschoben ist.

Eine Veränderung des Abstandes Linse-Netzhaut muss nicht durch Verlängerung des Augenkörpers erfolgen, sie kann grundsätzlich auch durch Verschieben der Linse erreicht werden, wie es bei den meisten Fischen der Fall ist.

### **Ablauf des Unterrichts**

Der im folgenden dargestellte Vorschlag geht davon aus, dass für etwa 5 Schülergruppen jeweils ein Augenmodell zur Verfügung steht. Die für den Bau dieser Augenmodelle erforderliche zeitliche Investition lohnt sich, wenn dieses Thema von mehreren Lehrkräften in ihren Klassen unterrichtet wird bzw. das Thema auch in mehreren aufeinander folgenden Jahren behandelt wird. Andernfalls wird das Phänomen an einem Modell mit Hilfe einer (Schwanenhals-)Videokamera für die ganze Klasse sichtbar demonstriert.

#### *1. Schritt: Wiederholung der Abbildung durch Sammellinsen*

Zur Wiederholung wird demonstriert, dass es bei vorgegebener Gegenstandsweite und Brennweite der abbildenden Linse ein scharfes Bild auf einem Schirm nur bei einer genau bestimmten Bildweite gibt. Die Fleck-zu-Fleck-Abbildung (dargestellt in Abb.1a; s. auch [6]) liefert ein ausreichendes qualitatives Verständnis für die weiteren Schritte.

#### *2. Schritt: Wiederholung des Aufbaus und der Funktion des Auges und der Akkommodation des menschlichen Auges in Luft*

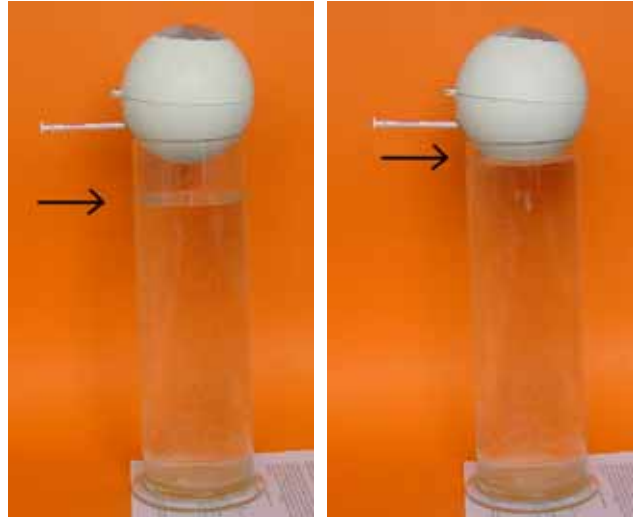
Der prinzipielle Aufbau des menschlichen Auges wird wiederholt. Im Zusammenhang mit der Diskussion der Frage, wie das menschliche Auge auf verschieden weit entfernte Gegenstände scharf stellt, wird das Augenmodell mit Gummilinse vorgeführt. Mit dessen Hilfe betrachten die Schülerinnen und Schüler mehrere Gegenstände, die sich in verschiedener Entfernung befinden. Sie stellen fest, dass man je nach Entfernung die Dicke der Linse und damit die Brechkraft verändern muss, um ein scharfes Bild auf der Netzhaut des Augenmodells zu erhalten. Sie stellen weiterhin fest, dass bei sehr nahen Gegenständen die Krümmung der Linse nicht ausreichend groß gemacht werden kann.

#### *3. Schritt: Sehen unter Wasser*

Als nächstes wird an die Erfahrung beim Tauchen erinnert, dass die unter Wasser befindlichen Gegenstände nur verschwommen gesehen werden. Eine Diskussion über mögliche Gründe

schließt sich an. Ggf. gibt die Lehrkraft einen Hinweis, was direkt vor dem Auge nun anders ist.

Die in Bild 5 dargestellte Versuchsanordnung dient zur Demonstration des Effektes. Das Augenmodell wird auf den ersten Standzylinder gelegt, der auf einem gut sichtbaren Bild steht. Durch Verändern der Wassermenge in der Gummilinse wird auf das Bild scharf gestellt.



Parallel daneben steht ein zweiter gleich hoher Standzylinder, ebenfalls auf einem Bild. Nur ist dieser Zylinder fast randvoll mit Wasser gefüllt. Das Augenmodell wird nun auf den wassergefüllten Zylinder gelegt (die Vorderseite mit der festen Plexiglaslinse muss in das Wasser eintauchen). Die Akkommodationsfähigkeit reicht nun nicht mehr aus, ein scharfes Bild zu erreichen. Dies wird im Zusammenhang mit der obigen Diskussion nochmals besprochen.

Bild 5: Versuchsanordnung zur Demonstration des verschwommenen Sehens unter Wasser. Die Pfeile zeigen die Wasseroberfläche an.

#### *4. Schritt: Akkommodation unter Wasser durch Verändern des Abstandes Linse-Netzhaut*

Nun wird die Frage aufgeworfen, welche Möglichkeiten es noch gibt, ein scharfes Bild zu erhalten. Die Einstiegswiederholung aus Schritt 1 sollte schnell zu der Lösung führen: Verändern des Abstandes Linse-Netzhaut.

Das zweite Augenmodell wird nun eingeführt. Die Schülerinnen und Schüler betrachten mehrere Gegenstände mit Hilfe dieses Augenmodells, die sich in verschiedener Entfernung befinden. Sie stellen fest, dass man je nach Entfernung den Abstand der „Netzhaut“ von der Linse verändern muss. (Bei Betrachtung weit entfernter Objekte ist der Abstand genau die Brennweite der Linsen).

Zur Demonstration, dass dieses Augenvariante auch unter Wasser akkommodieren kann, wird die gleiche Versuchsanordnung wie in Schritt 3 benutzt: mit einer Vergrößerung des Abstandes zwischen „Netzhaut“ und Linse kann auch unter Wasser wieder ein scharfes Bild auf der Netzhaut entstehen (Bild 6b). Dies zeigt, dass das Medium Wasser gegenüber dem Medium Luft eine Verminderung der Brechkraft der Linse (bzw. der Hornhaut in einem natürlichen Auge) bewirkt.

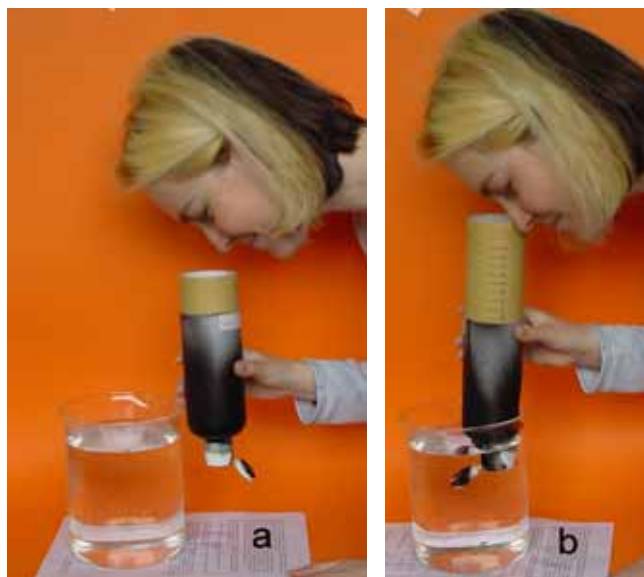


Bild 6: Ein in Luft scharfes Bild (a) kann man in Wasser (b) nur mit einer Vergrößerung des Abstandes Linse-Schirm scharf sehen.

Die beiden folgenden Fragen können zur Vertiefung mit den Schülerinnen und Schülern diskutiert werden:

- 1) Sieht man unter Wasser besser bei höherer Kurzsichtigkeit oder bei höherer Weitsichtigkeit?
- 2) Ändert sich die Brechkraft eines Auges bei der Benutzung einer Tauchermaske?

### Literatur

- [1] Themenhaft "Auge", Heft 56, Naturwissenschaften im Unterricht/Physik, 2000
- [2] G. Colicchia; H. Wiesner: Wie Fische Sehen, Physik in der Schule 38(2000) S. 157-161.
- [3] L. Steele: Vision underwater, Phys. Ed. 32(Nov. 1997) n. 6, 387-392
- [4] G. Colicchia, H. Wiesner: Simulation von Fehlsichtigkeiten. Akkommodationsfähige Augenmodelle für den Unterricht, Naturwissenschaften im Unterricht Heft 82 (2004) S. 15-17
- [5] Penzlin H.: Lehrbuch der Tierphysiologie. – Fischer. - Stuttgart 1996
- [6] H. Wiesner, P. Engelhardt, D. Herdt: Unterricht Physik, Band 2: Optik II: Brechung, Linsen, Köln 1996, Aulis

Kunststofflinsen können preiswert bezogen werden bei den Firmen Opitec und Astromedia:  
<http://www.opitec.com> bzw. <http://www.astromedia.de>