

DIE SCHWÄRZE DER PUPILLE UND DIE ERFINDUNG DES AUGENSPIEGELS

Giuseppe Colicchia

Didaktik der Physik, Ludwig Maximilians Universität – München
pino@lrz.uni-muenchen.de

(Eingegangen: 09.09.2004; Angenommen: 19.01.2005)

Kurzfassung

Mit Hilfe eines Augenmodells wird anhand einer historischen Rekonstruktion veranschaulicht, wie das Rätsel, dass bei Menschenaugen die Pupille schwarz ist, bei Nachttieren aber leuchtet, gelöst wurde und wie es zur Beobachtung des Augenhintergrunds von lebenden Menschen kam.

1. Einführung

Warum ist die Pupille auch bei hellem Licht schwarz? Weil das gesamte in die Pupille einfallende Licht absorbiert wird und kein Lichtstrahl durch die Pupille herauskommt, würden gute Schüler sagen. Eine präzisere Antwort wäre aber: Weil kein Lichtstrahl vom beobachteten Auge empfangen wird. Es ist ja keineswegs so, dass kein Licht durch die Pupille herauskommt. Es geht sogar Licht durch jeden Punkt der Pupille. Es gelangt unter normalen Bedingungen aber nicht bis ins Beobachteraue und lässt dadurch das Augeninnere von außen unsichtbar erscheinen.

Der vorliegende Artikel soll anhand einer historischen Rekonstruktion zeigen, wie das Dilemma der schwarzen Pupille bei Menschen aber aufleuchtender Pupille bei Nachttieren gelöst wurde und wie es zur Beobachtung des Augenhintergrunds kam. Ein wichtiges Lernziel aus der Optik wird bei den hier geschilderten Verfahren besonders deutlich: Um den Sehvorgang zu begreifen, muss man erst einmal fragen, welches Licht überhaupt ins Beobachteraue gelangt.

Der historische Hintergrund kann zusammengefasst oder sogar weggelassen werden, da die logische Entwicklung des Stoffes davon unabhängig ist. Auch der Zusammenhang mit der Medizin kann weggelassen werden. Aber für einen interessanten und abwechslungsreichen Physikunterricht sollte man sich die Chance nicht entgehen lassen, den medizinischen und physiologischen Kontext im Unterricht zu nutzen [1].

2. Das Augenmodell

Um die optischen Erscheinungen zu veranschaulichen und den medizinischen Kontext herzustellen, verwendet man ein Augenmodell (Bild 1). Es besteht aus zwei zusammengefügt Teilen einer durchsichtigen Plastikugel von ca. 8 cm Durchmesser, die als Augenkörper dienen. Im Inneren kann man zuerst mit einem roten Filzstift Blutgefäße andeuten und danach die Wände weiß anstreichen, um dem Modell von außen ein realitätsnahes Aussehen zu geben. Dann soll das Innere mit schwarzer Farbe überstrichen werden, um Streulicht zu eliminieren. Zwei Abschnitte, einer in der Mitte der jeweiligen Halbkugel, werden frei von Farbe gelassen. Der eine durchsichtige Abschnitt von ca. 1 cm Durchmesser stellt die Hornhaut und gleichzeitig die Pupille P dar. Der andere von 3-4 cm wird mit feinem Sandpapier abgeschmirgelt, er ist halbtransparent und stellt die Netzhaut R dar. Die „Netzhaut“ wird von außen mit einer nach innen reflektierenden Decke D bedeckt. Hinter der „Pupille“ auf dem Weg zur „Netzhaut“ wird eine Plastiklinse L von etwa 24 Dioptrien geklebt, die die Augenlinse darstellt. Beide Teile der Kugel werden zusammengefügt und das Augenmodell mit Wasser gefüllt. Die Brechungsstärke des Modells, ca. 6 Dioptrien an der „Hornhaut“ und ca. 6 Dioptrien an der Linse (unter Wasser ist die Brechungsstärke einer Plastiklinse ca. 4 Mal kleiner als in Luft), führt zu einer Brennweite von ca. 8 cm, die dem Durchmesser der Plastikugel entspricht. Das Modell stellt deswegen ein normalsichtiges, auf die Ferne gestelltes, aber nicht akkommodationsfähiges Auge dar (z. B. das Auge eines alten Menschen).

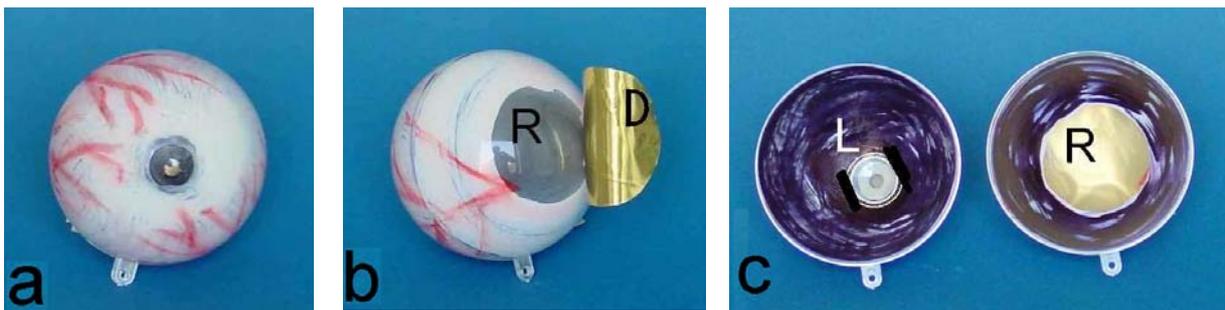


Bild 1: Vorne (a), Hinten (b) und Innen des Augenmodells (c).

3. Frühe Kenntnisse über das Auge

Die Vorstellungen über Anatomie des Auges und das Sehen wurden in der Antike von der Theorie des Galen (um 130-200), einem der bedeutendsten Ärzte und Schriftsteller der Antike, stark beeinflusst. Zwei gravierende Irrtümer der Theorie des Galen verhinderten wissenschaftliche Fortschritte in der Optik des Auges bis ins Mittelalter: die Emission von unsichtbaren Teilchen zur Abtastung der Objekte vom Auge aus und die Augenlinse als Sinnesorgan. Auch Aberglaube und Religion bremsten die Weiterentwicklung in den Naturwissenschaften [2]. Erst Ende des 10. Jahrhunderts hat Alhazen (956-1040) viele, wenn auch nur qualitative optische Experimente durchgeführt. Er hat als erster das Auge vollständig beschrieben. Allerdings erkannte er die Bedeutung der Netzhaut nicht und verlegte das Bild des Objekts in die Linse. Francesco Maurolico (1494-1575) erkannte die tatsächliche Funktion der Linse und in weiterer Folge, dass das Bild des Außenraumes hinter der Linse erzeugt wird. Leonardo da Vinci (1452-1519), Felix Platter (1536-1614) und Johannes Kepler (1571-1631) erkannten die Rolle der Netzhaut und stellten fest, dass dort ein umgekehrtes, verkleinertes Bild erzeugt wird. Die Umkehr des Bildes störte Kepler nicht. Er nahm an, dass „Erfahrung und Tätigkeit der Seele“ das Bild aufzurichten vermögen. Christoph Scheiner (1575-1650) entfernte hinter einem Schafauge die Lederhaut und konnte tatsächlich die Entstehung eines umgekehrten Bildes auf der Netzhaut zeigen [3]. Einige Jahre später gab René Descartes (1596-1650) als erster den Strahlengang im Auge korrekt an (Bild 2) und gab durch Änderung der Augenlinsengestalt die erste stichhaltige Erklärung der Akkommodation. Die Ära der modernen Forschung des Sehens hat begonnen [4, 5].

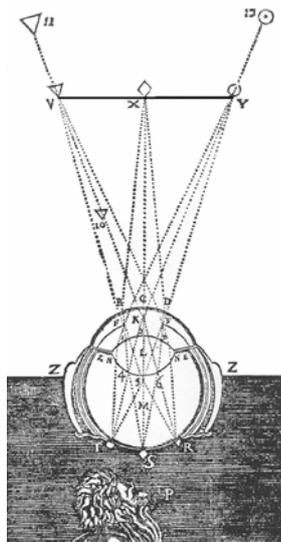


Bild 2: Strahlengang im Auge nach Descartes.

Versuch 1. Den Versuch von Scheiner können die Schüler mit dem selbst gebauten Augenmodell nachvollziehen, indem sie das Modell mit der „Pupille“ auf beleuchtete Objekte richten, die „Netzhautdeckung“ des Augenmodells abziehen und auf den hinteren halbdurchsichtigen Teil des Modells schauen.

4. Die Schwärze der Pupille

An Theorien über die Schwärze der Pupille hat es nicht gefehlt. Einmal nahm man an, dass das Auge mit einer schwarzen Flüssigkeit gefüllt sei, zum anderen meinte man die Pupillenschwärze durch die Tiefe der Augenhöhle erklären zu können. Eine weitere Auslegung ging dahin, dass das Pigment der Aderhaut das Licht vollständig absorbiere.

Versuch 2. Die Schüler beleuchten die „Pupille“ des Augenmodells mit einer Lichtquelle. Sie werden so feststellen, dass die „Pupille“ des Augenmodells immer schwarz erscheint. Ihre physikalischen Kenntnisse sagen ihnen, dass ein Objekt schwarz ist, wenn es alle einfallenden Strahlen absorbiert. Daher werden sie, wie die Wissenschaftler in früheren Zeiten, wegen der schwarzen Farbe der Pupille des Menschen fälschlicherweise schließen, dass kein Lichtstrahl aus dem Augenmodell herauskommt und ein Einblick in das Augenmodell nicht möglich sei.

5. Das Leuchten von Augentieren

Das Aufleuchten der Pupille bei vielen Tieren war bereits in der Antike bekannt. Schon Plinius der Ältere (23-79) schrieb, dass die Augen von nachtaktiven Tieren (Katzen, Wölfen u.a.) in der Dunkelheit blitzen und strahlen. Die damaligen Theorien über das Auge und das Sehen konnten aber das Aufleuchten der Pupille nicht erklären.

Edme Mariotte (1620-1684) bemerkte, dass bei Hunden die Aderhaut des Auges weiß ist, während sie bei Menschen schwarz ist. Tatsächlich befindet sich hinter der Netzhaut von vielen nachtaktiven Tieren eine reflektierende Schicht. Das Licht, welches die Netzhaut passiert hat, wird reflektiert und hat nochmals die Chance, auf eines der Sehstäbchen in der Netzhaut zu treffen. Dabei gelangt ein Teil des Lichtes durch die Linse wieder nach außen. So kommt das Augenleuchten auch zustande, wenn nachts das Licht einer Taschenlampe oder von Autoscheinwerfern reflektiert wird.

Erst 1668 beschreibt Mariotte die Bedingungen, um das Augenleuchten zu erzeugen. Bild 3 zeigt eine im Jahre 1674 entstandene Abbildung über das Augenleuchten der Tiere, auf der die richtige Anordnung mit dem Kopf des Beobachters, der Lichtquelle und den leuchtenden Tieraugen auf einer Geraden abgebildet ist [6].

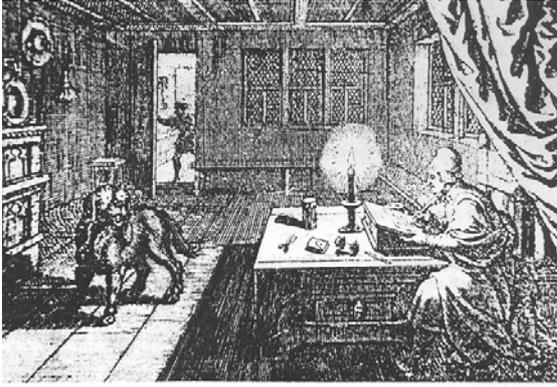


Bild 3: Leuchten von Tieraugen im Dunkelen,
Kupferstich von 1674

Versuch 3. Die Schüler können erfahren, dass das Leuchten des Augenmodells von der Richtung der Beleuchtung abhängt, indem sie das Licht einer Taschenlampe von verschiedenen Richtungen auf die „Pupille“ des Modells werfen: Nur wenn die Lichtquelle ganz in die Nähe des Beobachterauges gebracht wird, ist das Leuchten zu sehen. Der Versuch soll bei abgedunkeltem Raum stattfinden. Der Beleuchtungsabstand Lichtquelle-Augenmodell soll mindestens 2 Meter sein.

Der Versuch steht in Widerspruch zur Meinung der Schüler, dass die Pupille schwarz erscheint, weil alle einfallenden Strahlen absorbiert werden.

6. Das Leuchten unter Wasser

Die ersten Versuche, das Augenleuchten künstlich herzustellen, machte Jean Mery im Jahre 1704. Er hielt ein Katzenauge unter Wasser und sah dessen Netzhaut aufleuchten. Seine Erklärung war, dass die Pupille sich erweitert hat (richtig) und außerdem das Wasser die Unebenheiten der Hornhaut ausgefüllt hat (falsch). 1709 gab Philippe De la Hire die richtige Erklärung: Unter Wasser wird die Brechung beim Übergang zwischen Hornhaut und Außenraum reduziert, die aus den Augen austretenden Strahlen sind divergent und können zum Teil vom Betrachter wahrgenommen werden.

Versuch 4. Das Augenmodell wird in einen durchsichtigen, rechteckigen Behälter getaucht oder eine Zerstreuungslinse von ca. -6 Dioptrien wird vor die „Pupille“ des Augenmodells gestellt. So können die Schüler feststellen, dass bei Beleuchtung der Pupille der Hintergrund des Modells aufleuchtet. Der Versuch soll in einem abgedunkelten Raum stattfinden.

7. Das Aufleuchten als optisches Problem

1715 bemerkte Govard Bidloo, dass das Aufleuchten der Pupille einer Katze in völliger Dunkelheit verschwindet. Später stellte Benedict Prevost (1810) durch detaillierte Versuche bei verschiedenen Tieren fest, dass das Aufleuchten im Dunkeln nicht existiert [7]. Es folgt daraus, dass das Leuchten vom reflektierten Licht stammen muss, wenn es kein

Resultat von innerer Aktivität, z. B. eine Art von Phosphoreszenz, ist. 1821 zeigte Karl Rudolphi, dass das Leuchten der Augen stark von der Richtung der einfallenden Strahlen abhängt und das Auge einer geköpften Katze genau so effektiv leuchtete wie jenes eines lebenden Tieres. Er stellte so fest, dass das Aufleuchten der Pupille ein rein optisches ist.

8. Die Farbe der leuchtenden Augen

Anfang des 19. Jahrhunderts haben sich manche Forscher intensiv mit Fragen um die Farbe der leuchtenden Pupillen beschäftigt. Darunter Johannes Esser und Ernst Brücke. Die Worte von Brücke drücken gut die damalige Lage aus: „Es ist nämlich klar, dafs das Licht, welches vom Tapetum zurückkommt, in jedem einzelnen stabförmigen Körper nicht mehr dieselbe Farbe, wie es als einfallendes Licht hatte, sondern die Farbe der entsprechenden Stelle des Tapetums mit sich trägt...Es ist aber bekannt, dafs die Augen mancher Thiere, namentlich die der Hunde, abwechselnd mit roter und grüner Farbe leuchten. Es muss deshalb entschieden werden, ob dieser Farbwechsel von einer Farbveränderung des Tapetums herrühre oder nicht“ [8]. Brücke hat systematische Untersuchungen bei Hunden durchgeführt, und festgestellt, dass die zu beobachteten Farben den verschiedenen Farben des Augenhintergrundes entsprechen. Wobei die vorherrschend rote Farbe hauptsächlich vom Blut und den Gefäßen herrühre.

Auch die Schüler können durch kleine Änderungen im Sichtwinkel einen Farbwechsel auf der „Pupille“ des Augenmodells feststellen, wenn die nach innen reflektierende Decke D (siehe Bild 1) mit Linien verschiedene Farbe durchschritten wird.

Wenn die Schüler, beim Versuch 6, statt eines weißen Lichtes ein farbiges Beleuchtungslicht benutzen, können sie eine Verstärkerung für einige Farben der Kontrastfähigkeit feststellen. Das ist der Grund für z. B. eine Anwendung von Gelb-Grünem-Licht zur Untersuchung der Gefäße, welche vom Blut gut absorbiert werden und gleichzeitig von der Netzhaut intensiv reflektiert werden. Im Ergebnis erscheinen Blutflecken und Gefäße schwarz auf einem hellen Hintergrund und deswegen sind sie für den Beobachter besser erkennbar.

9. Aufleuchten beim menschlichen Auge

1846 entdeckten William Cumming und 1847 Brücke unabhängig voneinander, dass mit der richtigen Stellung des Beobachters und der Lichtquelle auch das menschliche Auge zum Leuchten gebracht werden kann [7] (Ähnliche Beobachtungen hat Johannes Evangelista Purkinje um 1823 gemacht, aber sie blieben unbekannt). Es wurde schließlich erkannt, dass der Beobachter möglichst nah am Beleuchtungsstrahlengang stehen muss.

Brücke hat tatsächlich fast das Ophthalmoskop erfunden, als er durch eine Röhre, die in der beleuchtenden Flamme einer Kerze gestellt wurde, schaute und so einige Strahlen aus dem Inneren des Auges einfing.

Versuch 5. Die Schüler können, wie Brücke es gemacht hat, das Leuchten der Pupille des Augenmodells betrachten, indem sie durch eine Röhre die in eine Kerzenflamme gehalten wird, schauen (Bild 4). Anstatt des Feuers einer Kerze können mehrere um die Röhre angeordnete Lämpchen benutzt werden. Der Abstand des Augenmodells vom Beobachter bzw. der Lichtquelle soll möglichst groß sein. Das störende Licht, das direkt von der Lichtquelle zum Beobachteraue fällt, soll unbedingt abgeschirmt werden. Der Versuch soll bei abgedunkeltem Raum stattfinden.

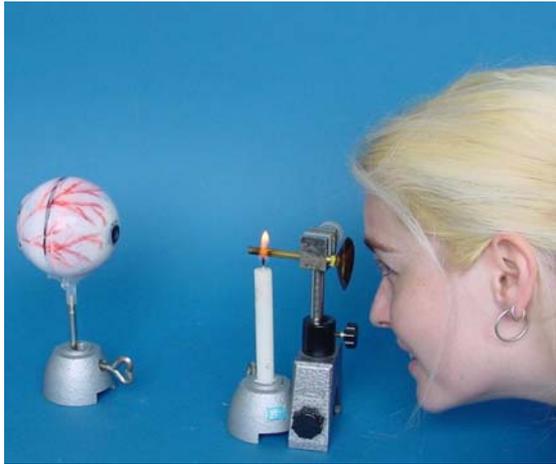


Bild 4: Beobachtung durch eine Röhre, die im Feuer einer Kerze steht

10. Die Erfindung des Augenspiegels

Hermann von Helmholtz (1821-1894) war der erste, der die physikalischen Bedingungen für das Aufleuchten theoretisch richtig erkannt hatte. Helmholtz erkannte, dass das in das akkommodierte Auge einfallende Licht auf die Hornhaut konzentriert wird. Die größere Lichtmenge wird vom Augenhintergrund absorbiert, der übrige Teil wird reflektiert und verlässt das Auge in Richtung der Lichtquelle auf dem gleichen Wege, wie es in das Auge gelangt ist. Dadurch entsteht das folgende Problem: Um das am Augenhintergrund gestreute und das Auge verlassende Licht auffangen zu können, muss der Beobachter sein Auge in den Strahlengang bringen, ohne die in das zu untersuchende Auge einfallenden Strahlen zu verdecken. Ohne geeignete Hilfsmittel befindet sich der Beobachter zwischen Lichtquelle und zu untersuchendem Auge, oder die Lichtquelle befindet sich zwischen Beobachter und zu untersuchendem Auge. 1850 machte Helmholtz die Erfindung seines Augenspiegels bekannt [9,10]. In Bild 5 ist ein Augenspiegelmodell nach Helmholtz dargestellt, wobei 3-4 schräggestellte, planparallele Glasplatten als halbdurchlässiges Medium bzw. Reflektoren wirken. Für Helmholtz hat sich bei dem damals verwendeten Licht und unter Berücksichtigung der störenden Reflexionen, ungefähr ein Winkel von 60° zur Normalen als optimal erwiesen.

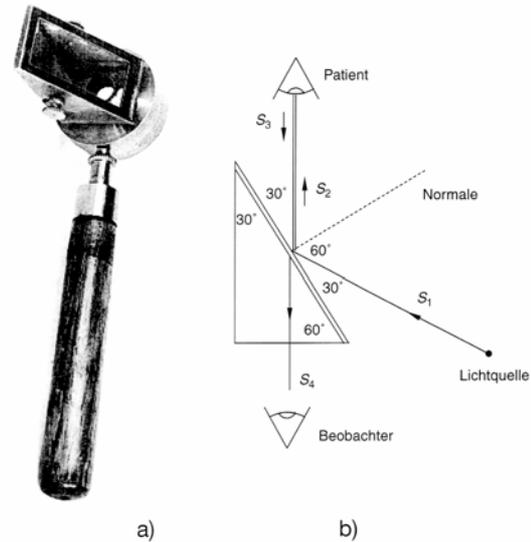


Bild 5: Augenspiegel nach Helmholtz (a), Strahlengang (b) [aus 11].

Die planparallelen Glasplatten waren eine erste geniale Idee, aber noch nicht die optimale Lösung, denn das am Augenhintergrund gestreute Licht wird an dem Spiegel geteilt und nur ein Teil erreicht das beobachtende Auge. So fand Theodor Ruete (1810-1867) ein Jahr später einen durchbohrten Hohlspiegel (Bild 6) [12].

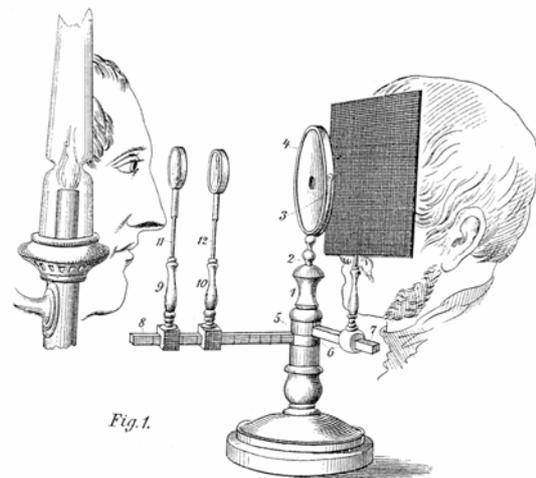


Bild 6: Hohlspiegel von Ruete [aus 12].

Dabei tritt das zentrale Strahlenbündel ohne Verlust durch das Loch und fällt auf die Beobachterpupille. Dieser Hohlspiegel war ein Stativinstrument, mehr für die Klinik als für den praktisch tätigen Arzt geeignet. In Bild 7 ist ein Hohlspiegel mit Handgriff nach Andreas Anagnostakis (1826-1897) dargestellt. Dieser einfache Hohlspiegel, der die Hornhautreflexe durch die Trennung von Beobachtungs- und Beleuchtungsstrahl vermeiden kann, wird für ein Jahrhundert zum Standardgerät und Statussymbol für viele Ärztegenerationen.



Bild 7: Augenspiegel (Hohlspiegel) nach Anagnostakis.

Die nächste große Stufe in der Entwicklung der Augenspiegel kommt im Jahr 1885 mit der Verwendung durch William Dennett einer Glühbirne als Lichtquelle. Bild 8 zeigt eine Schema des heutigen elektrischen Handaugenspiegel (Ophthalmoskop). Er ermöglicht eine gute Ausleuchtung, ist reflexfrei, besitzt eine Zuschaltung von Linsen zur Korrektur von Fehlsichtigkeiten, eine Zuschaltung von Farbfiltern zur Verbesserung des Kontrastes ecc. [13, 14].

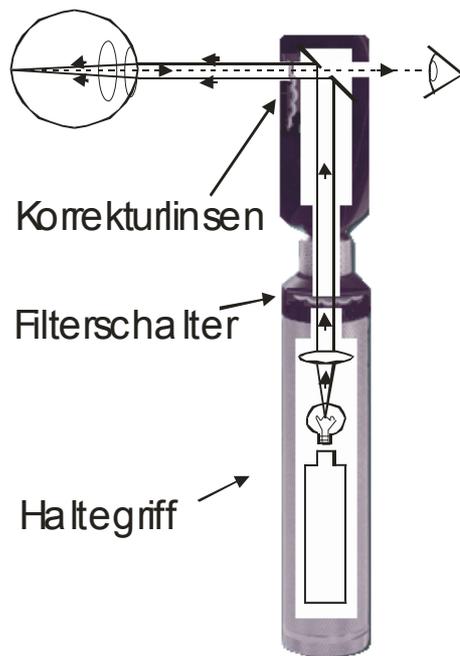


Bild 8: Vereinfachtes Schema eines moderneren Augenspiegels.

Selbstverständlich stellt die moderne Technik auch kompliziertere Geräte und Methoden zur Untersuchung der Augen zur Verfügung, die sich nur zum Teil auf dasselbe Prinzip des beschriebenen Augenspiegels zurückzuführen lassen (z.B. Laser Ophthalmoskop) [15, 16].

11. Untersuchungen mit dem Augenspiegel

Mit der Einführung des Augenspiegels haben sich zwei einfache Untersuchungsmethoden ergeben, welche den Augenhintergrund in ausreichender Vergrößerung direkt beobachten lassen [17].

In der *direkten Methode* (Bild 9) beleuchtet das von dem Hohlspiegel reflektierte Licht den zu untersuchenden Augenhintergrund. Der im Augenhintergrund gestreute Lichtanteil kommt durch das zentrale Loch im Hohlspiegel zum Beobachteraue, das ein aufrechtes Bild des Augenhintergrundes sieht. Der Abstand zwischen Beobachter- und Patientenaue beträgt nur wenige Zentimeter.

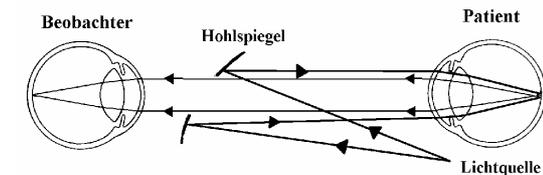


Bild 9: Illustration einer direkten Ophthalmoskopie (aus [18]), unten Strahlengang.

In der von Ruete 1852 eingeführten *indirekten Methode* [12] wird eine Sammellinse vor das zu untersuchende Auge gehalten (Bild 10).

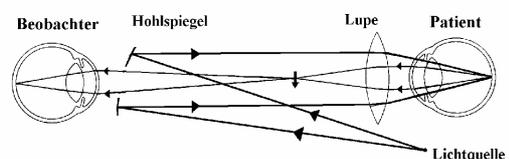


Bild 10: Illustration einer indirekten Ophthalmoskopie (nach [18]), unten Lichtweg.

Man erhält auf diese Weise ein umgekehrtes Bild. Der Hintergrundüberblick ist größer als bei der direkten Methode, die Vergrößerung jedoch geringer.

Bild 11 zeigt den Augenhintergrund eines rechten Auges durch einen modernen Augenspiegel hindurch beobachtet. A bezeichnet Arterien, V Venen, P Papille und F Fovea centralis (gelber Fleck, empfindlichster Teil des Auges).

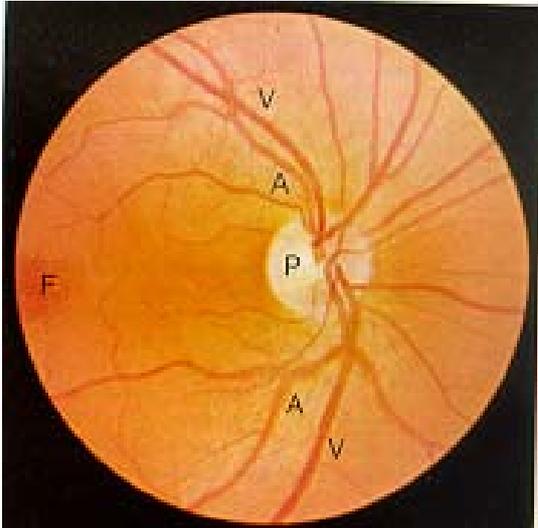


Bild 11: Augenhintergrund durch einen Augenspiegel gesehen.

Versuch 6. Die Schüler können mit Hilfe einer Lichtquelle und eines Augenspiegels den Hintergrund des Modells durch die „Pupille“ beleuchten und ihn gleichzeitig beobachten, so wie die Augenärzte ein lebendes Auge untersuchen würden (Bild 12). Als Augenspiegel kann ein Spiegelstück aus Plastik, in dessen Mitte ein Loch von ca. 0,5 cm gebohrt wurde, benutzt werden. Um auch Details des Hintergrunds erkennen zu können, soll der am besten passende Abstand Beobachterauge-Augenmodell und der optimale Winkel der Beleuchtung gefunden werden.



Bild 12: Einblick ins Innere des Augenmodells

Die Untersuchung nach der indirekten Methode braucht wegen der zusätzlichen Linse mehr Übung. Von einer Beobachtung an lebenden Augen der Schüler ist abzuraten, weil ohne Erfahrung eine sehr große Geduld erforderlich ist und kein intensives Licht verwendet werden darf.

Physikalische und didaktische Ergänzungen zum Einsatz des Augenspiegels im Physikunterricht findet man in [11].

12. Überlegungen

Warum ist der Augenspiegel erst 1850 und nicht früher erfunden worden, da es technisch nur der Parallelisierung von Beleuchtungs- und Beobachtungsstrahlengang bedarf?

Wegen Mangels an physikalischen oder physiologischen Kenntnissen? Sicher nicht. Im 17. Jahrhundert waren die Grundlagen sowohl der geometrischen Optik als auch des anatomischen Baus des Auges bekannt. Selbst Helmholtz schrieb in einem Brief an seinen Vater: „Sie (die Erfindung) lag eigentlich so auf der Hand, erforderte weiter keine Kenntnisse, als ich auf dem Gymnasium von Optik gelernt hatte, dass es mir jetzt lächerlich vorkommt, wie andere Leute und ich selbst so vernagelt sein konnten, sie nicht zu finden“ [19].

Wegen Mangel an Wissenschaftlern in diesem Fach? Vielleicht. Schon im 16. Jahrhundert gingen die medizinischen Behandlungen in die Hände ausgebildeter Ärzte über. Zu Beginn des 18. Jahrhunderts war die Ophthalmologie als gesondertes Unterrichtsfach in Europa sehr verbreitet. Viele Augenärzte waren in dieser Zeit oft auch an Astronomie interessiert. D. h. es gab viele Ärzte mit breiten optischen Kompetenzen. Trotzdem bleibt die Frage, ob diese Ärzte wirklich Wissenschaftler in diesem Fach waren und ob sie in physikalischen Bereichen mit Kreativität experimentieren konnten. Diese Frage trifft auf Helmholtz sicher nicht zu. Er war Arzt und Physiker, sogar mehr Physiker als Arzt. Er beherrschte mehr als andere Ärzte sowohl physiologische als auch optisch theoretische Grundlagen. Er hat sicher einige Augenhintergründe beobachtet. Er wusste, dass auf dem Hintergrund verschiedene Gewebe (z.B. Adern) liegen, die nicht schwarz sind. Er war deshalb überzeugt, dass die Netzhaut nicht das ganze Licht absorbiert und dass das ausgestrahlte Licht wahrgenommen werden kann.

Hat Helmholtz die Erfindung des Augenspiegels dem Zufall zu verdanken?

Der Zufall hat sicherlich auch eine Rolle gespielt, wie die zwei folgenden Episoden zeigen:

- „Einem Mädchen war etwas ins Auge geflogen, und bei dem Bemühen, diesen kleinen Fremdkörper zu entfernen, benutzte von Helmholtz eine Lupe. Bei einer bestimmten Stellung derselben erblickte er nun zu seinem größten Erstaunen plötzlich den Augenhintergrund hell beleuchtet. Es war durch die eigenartige Stellung der Lupe ein Lichtbündel durch die Pupille hindurch auf den Augenhintergrund geworfen worden, der – durch die Lupe betrachtet – dem Auge des Beobachters vergrößert erschien“ (aus [5]).
- „Erlach, der eine Brille trug, sah nämlich die Augen eines Bekannten leuchten, wenn letzterer in den Gläsern der Brille das im Zimmer befindliche Licht gespiegelt sah“ (aus [9]).

Literatur

- [1] Labudde P.: Fächer übergreifender Unterricht in und mit Physik: Eine zu wenig genutzte Chance, *PhyDid* 1/2 (2003), S. 48-66
- [2] Albert D.; Edwards D.: *The History of Ophthalmology*, U.S.A., Blackwell Science 1996
- [3] Goring G.: *History of ophthalmology*, Public or Perish inc., Wilmington, Delaware 1982 (U.S.A.)
- [4] Wade N. J.; Finger S.: The eye as an optical instrument: from camera obscura to Helmholtz perspective, *Perception* 30 (2001), S. 1157-1177
- [5] Schmitz E. H.: *Handbuch zur Geschichte der Optik*, Band 3, Teil A, Bonn, Wayenborgh 1983
- [6] Lindberg D.: *Studies in the history of medieval optics*, London, Variorum Reprints 1983
- [7] Cumming W.: Über das Augenleuchten beim Menschen, in: Brücke E.; Cumming W.; Helmholtz H.; Ruete T.: *Das Augenleuchten und die Erfindung des Augenspiegels*, Voss Verlag, Hamburg 1893
- [8] Brücke E.: Anatomische Untersuchungen über die so genannten leuchtenden Augen bei den Wirbelthieren. In: Brücke E., Cumming W., Helmholtz H., Ruete T.: *Das Augenleuchten und die Erfindung des Augenspiegels*, Hamburg, Leopold Voss 1893
- [9] Helmholtz H.: *Beschreibung eines Augenspiegels zur Untersuchung der Netzhaut im lebenden Auge*, Berlin, A. Förstner'sche Verlagsbuchhandlung 1851
- [10] Bechrakis N.; Foerester M.: Ophthalmoscope or Augenspiegel?, *Archives of Ophthalmology* 121 (2003), S. 1208
- [11] Colicchia G.; Wiesner H.: Der Augenspiegel im Physikunterricht, *PdN-Ph* 7/49 (2000), S. 7-12
- [12] Ruete H.: Der Augenspiegel (und das Optometer) für praktische Ärzte, in: Brücke E., Cumming W., Helmholtz H., Ruete T.: *Das Augenleuchten und die Erfindung des Augenspiegels*, Hamburg, Leopold Voss 1893
- [13] Münchow W.: *Geschichte der Augenheilkunde*, Stuttgart, Enke 1984
- [14] Haugwitz T.: *Ophthalmoskopisch-optische Untersuchungsgeräte: Entwicklung und gegenwärtiger Stand*, Stuttgart, Enke Verlag 1981
- [15] Berendschot T. et al.: Fundus reflectance – historical and present ideas, *Progress in Retinal and Eye Research* 22 (2003), S. 171-200
- [16] Sharp P., Manivannan A.: The scanning laser ophthalmoscope, *Phys. Med. Biol.* 42 (1997), S. 951-966
- [17] Straub W. et al (Hrsg.): *Augenärztliche Untersuchungsmethoden*, 2. Auflage, Stuttgart, Enke 1995
- [18] Schett A.: *The Ophthalmoscope (Der Augenspiegel)*, Oostende, Wayenborgh Verlag 1996
- [19] Rechenberg H.: *Hermann von Helmholtz: Bilder seines Lebens und Wirkens*, Weinheim, VCH 1994