

Konzeption eines Schülerlabors, Thema: Physikalisch-Medizinische Optik

Eric Goldbrunner*, Jana Traupel*, Hartmut Wiesner*

*Fakultät für Physik, Ludwig-Maximilians-Universität München, eric.goldbrunner@physik.uni-muenchen.de, jana.traupel@physik.uni-muenchen.de, hartmut.wiesner@physik.uni-muenchen.de

Kurzfassung

Die Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität bietet Veranstaltungen für Schülerinnen und Schüler an. Im Rahmen einer Zulassungsarbeit [1] wurde ein erstes Thema für eine Veranstaltung im Sinne eines Schülerlabors konzipiert: die „Physikalisch-Medizinische Optik“ mit Experimenten, einer eigenen Anleitung für den Betreuer, einer ansprechenden Lernumgebung und einem Forscherbuch für Schülerinnen und Schüler der siebten und achten Jahrgangsstufe. Das Konzept enthält vier Stationen:

Station 1: „Lichtstrahlen“ (Ausbreitung, Brechung, Reflexion, Optische Grundlagen),

Station 2: „Optische Linsen (Abbildung durch Sammellinse inklusive Strahlengänge) und optische Instrumente (Fotoapparat und Kameraauge)“,

Station 3: „Augenwelten“,

Station 4: „Simulation von Fehlsichtigkeiten“.

Die ausführliche Handreichung für den Betreuer enthält für jede Station detaillierte organisatorische Hinweise, eine Übersicht der verwendeten Objekte und Materialien. Das Forscherbuch für die Schülerinnen und Schüler ist sehr ausführlich und mit zahlreichen Illustrationen und Arbeitsaufträgen versehen.

1. Veranstaltungen für Schülerinnen und Schüler an der Fakultät für Physik

In dem Rahmen des jährlich angebotenen Probestudiums für Schülerinnen und Schüler wurde eine Befragung bezüglich des Interesses für physikalisch-medizinische Themen durchgeführt. Aufgrund der gewonnenen Daten lässt sich feststellen, dass Fragestellungen wie

- „Wie funktioniert das Sehen?“
- „Wie werden Sehschwächen mit Hilfe von Brillen und Kontaktlinsen korrigiert?“
- „Wie werden Sehschwächen mit Hilfe von medizinischen Eingriffen korrigiert?“

von großem Interesse sind, besonders für die Schülerinnen [2].

Das derzeitige Angebot der Fakultät richtet sich in verstärktem Maße an Schülerinnen und Schüler der gymnasialen Oberstufe:

- Probestudium [3]
- Schülertag
- Weihnachtsvorlesung
- Angebote der Exzellenzcluster
- Facharbeitspreis
- Vorlesungen „Physik Modern“.

Vermeehrt wurde ein Angebot aufgebaut, das jüngere Schülerinnen und Schüler anspricht:

- Girls' Day (für Schülerinnen der achten Jahrgangsstufe) [4]
- Expeko (für 10-14 Jahre alte Schülerinnen und Schüler, Veranstaltungen des Lehrstuhls für Didaktik der Physik) [5]

- Exkursionen an die Sternwarte (unter anderem für Schülerinnen und Schüler der fünften und sechsten Klasse des Hochbegabtenprogramms) [6].

2. Konzeption des Schülerlabors

Die Zielgruppe für den Besuch im Schülerlabor mit dem Themengebiet der physikalisch-medizinischen Optik sind Schülerinnen und Schüler der 7. und 8. Jahrgangsstufe. Die Motivation für die Auswahl der Experimente für das Schülerlabor begründet sich in dem bereits erfolgreichen Einsatz für höhere Jahrgangsstufen („Grundlagen der Optik“ [7] mit der optischen Scheibe in Station 1 (Abb. 7)).

Die Betreuung der Praktika im Probestudium und an Schülertagen wird von Studierenden übernommen, die bereits Erfahrung in der Betreuung in den Anfängerpraktika aufweisen können.

Aus den Erfahrungen zeigt sich, wie wichtig die gute Einführung in die Versuche und eine gute Betreuung für das Gelingen der Schülerveranstaltung ist. Im Rahmen des Schülerlabors leitet der Betreuer als Tutor die Schülerinnen und Schüler mit Hilfe von Erklärungen und Visualisierungen auf Postern und mit Demonstrationen an. Die für den Tutor notwendigen Hintergrundinformationen und der Leitfaden, wie er die Schülerinnen und Schüler durch den Versuch führt, sowie Hinweise zum Anschauungsmaterial sind in den Anleitungen für den Betreuer und im Forscherbuch enthalten.

Das speziell für das Schülerlabor entwickelte Forscherbuch, einer speziell auf die schulischen Kenntnisse der Schülerinnen und Schüler zugeschnittenen und die Zielgruppe ansprechenden Versuchsanleitung

tung, erhalten die Schülerinnen und Schüler als farbiges und gebundenes Handout.

Das Forscherbuch für die Schülerinnen und Schüler ist in drei verschiedene Arten von Passagen untergliedert:

- Besonders wichtige Inhalte werden vom Betreuer ausführlich an Postern vorgestellt. Vertieft werden diese behandelten Inhalte durch Lesen eventuell vor Ort oder als Nachbereitung des Besuchs.
- Detaillierte Arbeitsaufträge für die Schülerinnen und Schüler, die sich zum Beispiel auf den jeweiligen Versuch oder ein Arbeitsblatt beziehen. Hinweise und Tipps werden durch den Betreuer angeboten.
- Die schon aus dem Physikunterricht bekannten Inhalte zur Wiederholung und Vertiefung je nach gewähltem Zeitrahmen können vor Ort durchgearbeitet werden oder auch, je nach Gestaltung des Besuchs, als Vorbereitung.

Für jede Station stehen das entsprechende Forscherbuch, Experimente zum Durchführen und großformatige Poster für die Erklärungen des Betreuers zur Verfügung. Die Konzeption des Schülerlabors sieht vier Stationen vor:

- Station 1: „Lichtstrahlen“ (Abb. 1),
- Station 2: „Optische Linsen und optische Instrumente“ (Abb. 2),
- Station 3: „Augenwelten“ (Abb. 3),
- Station 4: „Simulation von Fehlsichtigkeiten“ (Abb. 4).

Sowohl in den Anleitungen für den Tutor als auch im Forscherbuch wurde der didaktische Hintergrund berücksichtigt, speziell der im Bereich der Optik betriebenen Lehr-Lern-Forschung mit Schülervorstellungen [8] des Lehrstuhls Didaktik der Physik der Ludwig-Maximilians-Universität, selbiges gilt auch für die Entwicklung der weiteren Stationen.

Es muss auf einen der Zielgruppe angemessenen Schwierigkeitsgrad Wert gelegt werden, eine übersichtliche Strukturierung, Anschaulichkeit und die Berücksichtigung von Lernschwierigkeiten. Um die Schülerinnen und Schüler zu motivieren, soll der Bezug zu ihrer Lebenswelt klar sein, und es muss ein Interesse von Seiten des Betreuers spürbar sein [9].

Neben dem Bezug zu alltäglichen Erfahrungen steigern der Anwendungsbezug zur Medizin und der Bezug zum eigenen Körper das Interesse der Schülerinnen und Schüler [10]. In ausgearbeiteten Unterrichtsvorschlägen [11] wird zum Beispiel auf das Sehen im Nahen und in der Ferne eingegangen, den Aufbau und die Funktion des Auges, den Akkomodationsbereich. Als Modellauge kann zum Beispiel eine optische Bank oder eine Styroporkugel mit einer eingesetzten Linse und gegenüberliegendem Transparentpapier verwendet werden, so dass man

erkunden kann, wie ein scharfes Bild erzeugt werden kann. Variiert wird der Abstand Linse - „Netzhaut“, bis sich letztere in der Bildweite befindet. Auf die Augenfehler wird eingegangen und ebenso darauf, welcher Fehler bei Kurz- oder bei Weitsichtigkeit vorliegt [12] und wie man ihn beheben kann [13].

Mit einem Modell eines Auges in Station 4, das im physikalischen Praktikum für Lehramtstudierende erfolgreich eingesetzt wird, können die Funktionsweise des Auges, die Fehlsichtigkeiten und ihre Korrekturen sowie eine „Graue-Star-Operation“ durchgeführt werden.

Als Motivation und Anwendungsbezug dient die Station 1 mit der „Mumie“ (Abb. 8 und Abb. 9). Hier wird mit Hilfe eines technischen Endoskops das Innere einer Mumienpuppe untersucht. Die prinzipielle Funktionsweise des Geräts und die Lichtleitung werden erörtert.

Im Folgenden sollen die Stationen kurz vorgestellt werden.



Abb. 1: Station 1



Abb. 2: Station 2



Abb. 3: Station 3

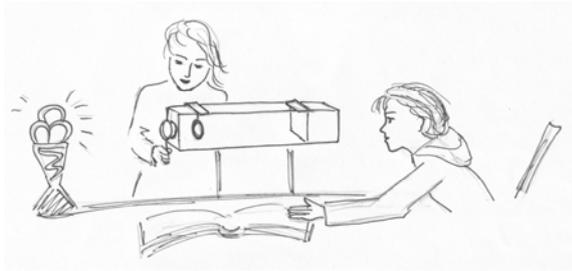


Abb. 4: Station 4

3. „Lichtstrahlen“ - Ausbreitung, Brechung und Reflexion des Lichts (Station 1)

Der Inhalt des Forscherbuchs der ersten Station lautet:

- A. Willkommen an der Station 1: „Lichtstrahlen“
- B. Die Ausbreitung des Lichts
 - B.1. Lichtquellen und Lichtempfänger
 - B.2. Lichtstrahl und Lichtbündel
 - B.3. Geschichte zur Lichtgeschwindigkeit
- C. Die Reflexion und Brechung des Lichts
 - C.1. Reflexion und Streuung
 - C.2. Das Reflexionsgesetz
 - C.3. Die Brechung des Lichts an verschiedenen Grenzflächen
 - C.4. Der Zusammenhang zwischen Einfallswinkel α und Brechungswinkel β für das Medienpaar Luft - Glas
 - C.5. Die Totalreflexion an der Grenzfläche zweier optischer Medien
 - C.6. Anwendungsbeispiele zur Totalreflexion
 - C.7. Totalreflexion und Naturerscheinungen
 - C.8. Welchen Weg nimmt das Licht eigentlich?
 - C.9. Exkurs: Dispersion des Lichts

Die Einführung dieser Station behandelt die Ausbreitung des Lichts. Lichtquellen und Lichtempfänger werden vorgestellt, der Unterschied zwischen kalten und warmen Lichtquellen erklärt und auf nicht selbst leuchtende Körper wird eingegangen. Besondere Betonung liegt darauf, dass das Licht von einem selbst leuchtenden Objekt direkt in unser Auge fällt, während ein nicht selbst leuchtendes Objekt das Licht, das auf seine Oberfläche fällt, streut. Der Teil des gestreuten Lichts, der in unser Auge gelangt, macht das Objekt für uns sichtbar (Abb. 5).

Der Unterschied zwischen Lichtstrahl und Lichtbündel wird klar gemacht. Mit Hilfe eines Experiments untersuchen die Schülerinnen und Schüler die Ausbreitung des Lichts mit Hilfe von Sammell- und Zerstreuungslinse und unterscheiden zwischen konvergenten und divergenten Lichtbündeln (Abb. 6).

In einem Abschnitt zur Geschichte der Berechnung der Lichtgeschwindigkeit erläutert der Betreuer die Beobachtung des Eintritts eines Jupitermondes in den Kernschatten des Planeten und die entsprechende Berechnung durch Römer.

Reflexion und Brechung des Lichts werden untersucht. Zunächst wird der Unterschied zwischen Reflexion und Streuung anhand eines glatten Wasserfilms beziehungsweise einer rauen Oberfläche diskutiert. Das Reflexionsgesetz wird anhand von Graphiken erläutert.

Als selbst durchzuführendes Experiment dient die optische Scheibe (Abb. 7). Hier untersuchen die Schülerinnen und Schüler mit Hilfe der Arbeitsaufträge die Brechung des Lichts an der Grenzfläche Luft-Glas. In der Mitte der Scheibe sitzt ein halb-kreisförmiger Glaszylinder. Diesen Glaszylinder auf der optischen Scheibe kann man nun so drehen, dass der Lichtstrahl des Lasers entweder zuerst auf den Glaszylinder fällt und danach in das optische Medium Luft (Grenzfläche Glas-Luft), oder umgekehrt (Grenzfläche Luft-Glas).

Das Reflexionsgesetz, die Brechung des Lichts an verschiedenen Grenzflächen sowie der Zusammenhang zwischen Einfallswinkel α und Brechungswinkel β für das Medienpaar Luft-Glas wird mittels eines auf den Versuch abgestimmten Arbeitsblatts erarbeitet.

Das Thema „Totalreflexion“ leitet die Untersuchung einer menschengroßen, für das Schülerlabor selbst-gestapelten Mumienpuppe mit Hilfe eines Endoskops ein. Im Inneren der „Mumie“ sind „Schätze“ zu entdecken (Abb. 10). Im Forscherbuch wird die Totalreflexion an der Grenzfläche zweier optischer Medien erklärt, Lichtleiter zeigen, wie eingekoppeltes Licht über Totalreflexion weitergeleitet wird (Abb. 11 bis Abb. 13), Beispiele der Anwendung und Naturerscheinungen werden diskutiert.

Die Frage „Welchen Weg nimmt das Licht eigentlich?“ (Abb. 14) und ein Exkurs zur Dispersion des Lichts runden die erste Station ab.

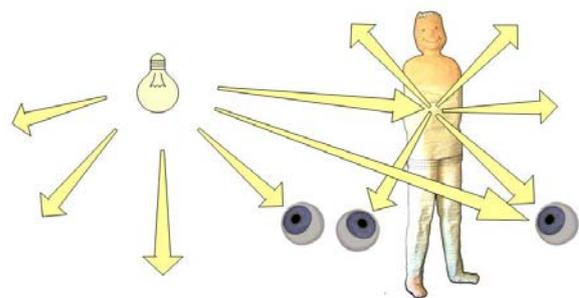


Abb. 5: Illustration zu der Erklärung, warum wir nicht selbst leuchtende Objekte sehen. Die Oberfläche der Mumienpuppe strahlt Licht ab, das so ins Auge fällt.

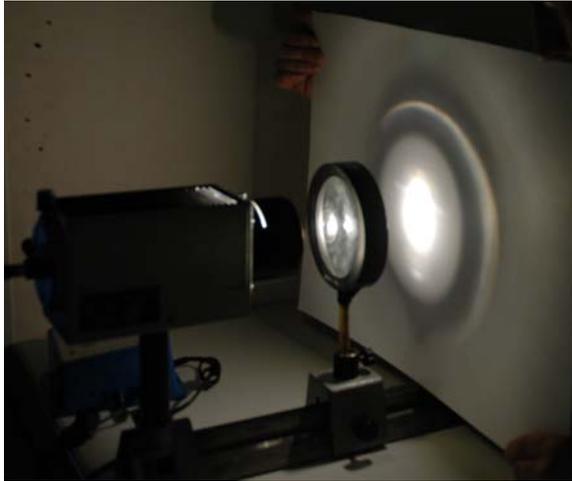


Abb. 6: Versuchsaufbau zum Thema Lichtbündel und Lichtstrahl



Abb. 9: Zu untersuchende Mumienpuppe



Abb. 10: Aufnahme mit dem Endoskop im Inneren der Mumienpuppe

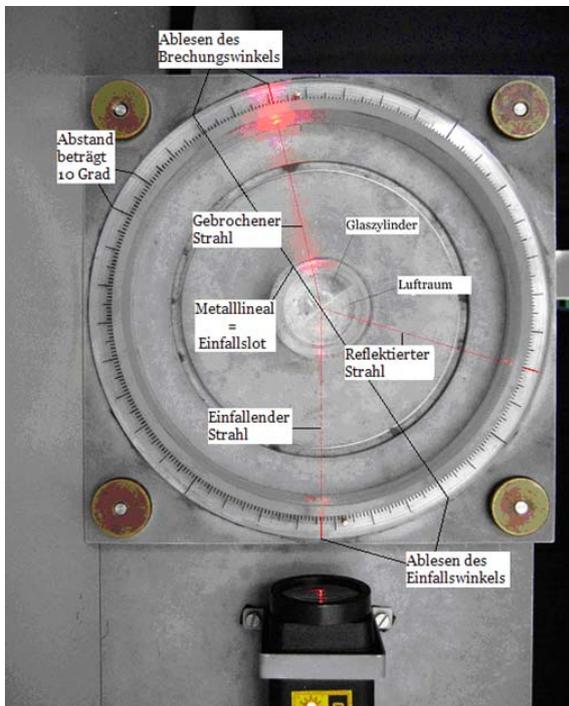


Abb. 7: Optische Scheibe zur Untersuchung von Reflexion und Brechung an der Grenzfläche zweier Medien

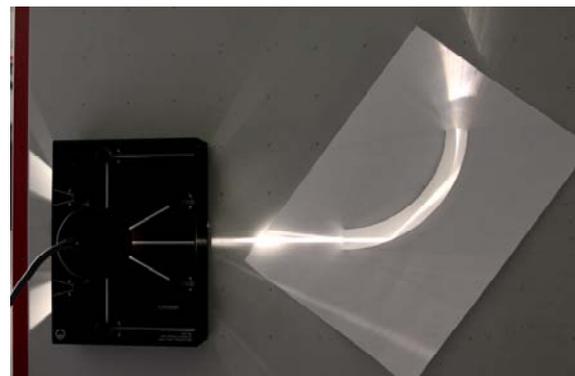


Abb. 11: Totalreflexion in einem Plexiglasbogen



Abb. 8: Herstellungsphase der Mumienpuppe

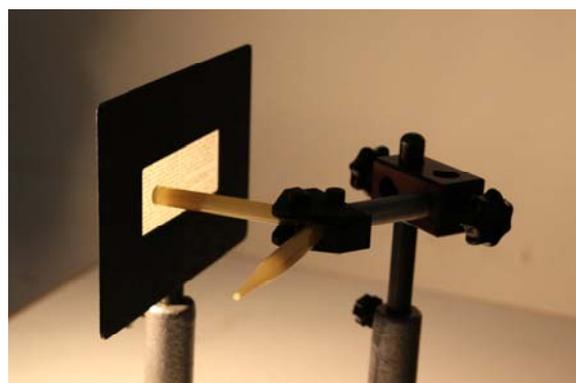


Abb. 12: Ein Zeitungstext wird belichtet, der Ausschnitt ist verkleinert am sich verjüngenden anderen Glasfaserbündelende zu sehen.

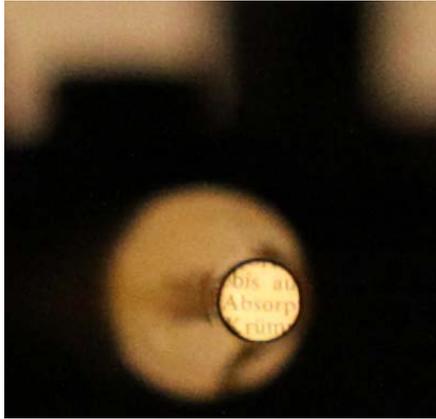


Abb. 13: Das sich verjüngende Ende stark vergrößert dargestellt

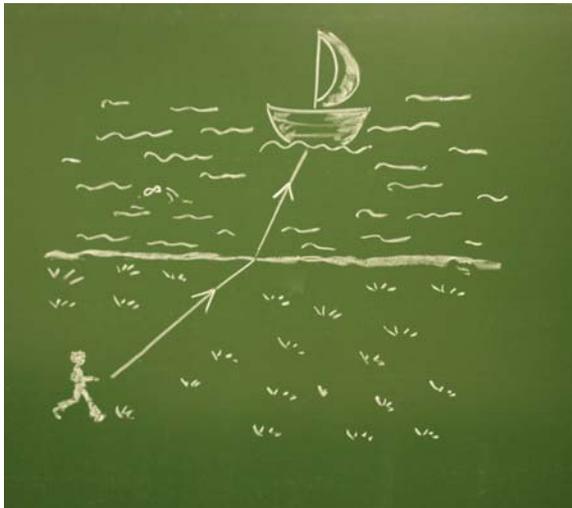


Abb. 14: Illustration an der Tafel zu der Frage: „Welchen Weg nimmt das Licht eigentlich?“

4. „Optische Linsen und optische Instrumente“ (Station 2)

Der Inhalt des Forscherbuchs der zweiten Station lautet:

- A. Willkommen an der Station 2: „Optische Linsen und optische Instrumente“
- B. Dünne optische Linsen
 - B. 1. Die dünne Sammell- oder Konvexlinse
 - B. 2. Die dünne Zerstreuungs- oder Konkavlinse
- C. Optische Abbildungen durch Sammell- oder Konkavlinen
 - C. 1. Die Bilder eines Gegenstands G in verschiedenen Abständen g zur Sammellinse
 - C. 2. Konstruktion des Bildes einer optischen Abbildung durch eine Sammellinse
 - C. 3. Abbildungsgleichungen einer Sammellinse
- D. Optische Instrumente
 - D. 1. Der Fotoapparat
 - D. 2. Das Kepler'sche oder astronomische Fernrohr
 - D. 3. Das Galileische oder holländische Fernrohr

Die zweite Station thematisiert dünne optische Linsen. Ein Experiment (Abb. 15 und Abb. 16) unter-

sucht optische Abbildungen durch dünne Sammell- und dünne Zerstreuungslinsen: Die Bilder eines Gegenstands in verschiedenen Abständen zur Sammellinse, Konstruktion des Bildes einer optischen Abbildung durch eine Sammellinse. Ein Arbeitsauftrag widmet sich der Frage, inwiefern sich das Bild auf dem Schirm verändert, wenn die Linse zur Hälfte abgedeckt wird.

Die Abbildungsgleichungen einer Sammellinse mit bestimmter Brennweite werden mit Hilfe von Arbeitsaufträgen, Arbeitsblättern und eines „b-g-Gerätes“ hergeleitet (Abb. 17), mit dessen Hilfe bei Kenntnis der Gegenstandsweite die Bildweite abgelesen werden kann und umgekehrt.

Ein Kapitel über optische Instrumente, in welchem der Betreuer eingangs gemeinsam mit den Schülerinnen und Schülern den Aufbau und die Funktionsweise einer einfachen Lochkamera in Augenform (Abb. 18) erarbeitet, schließt die zweite Station ab. Die Funktionsweisen des Fotoapparats, des Kepler'schen Fernrohrs und des Galileischen Fernrohrs werden im Forscherbuch erläutert. Eine Bastelanleitung für ein einfaches astronomisches Fernrohr ist im Forscherbuch enthalten.



Abb. 15: Experiment zur Untersuchung der Größen von Gegenstand und Bild sowie Gegenstandsweite und Bildweite

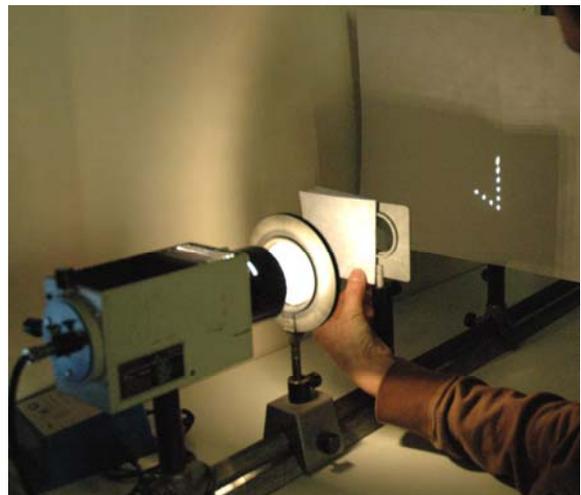


Abb. 16: Optische Abbildung, hier Untersuchung, inwiefern sich das Bild bei halber Abdeckung der Linse verändert

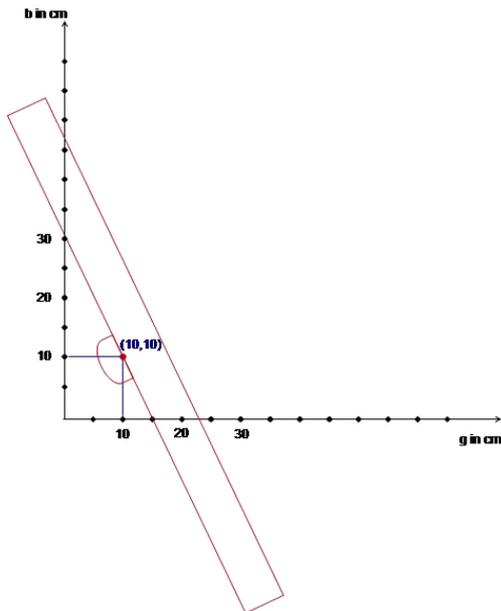


Abb. 17: Mit Hilfe des Lineals lassen sich die Werte für die Bildweite b und die Gegenstandsweite g ablesen.



Abb. 18: Mit Hilfe des Lochkameramodells wird das Bild der Kohlefadenlampe auf dem transparenten Schirm an der Hinterseite des Modells dargestellt.

5. „Augenwelten“ (Station 3)

Der Inhalt des Forscherbuchs der dritten Station lautet:

- A. Willkommen an der Station 3: „Augenwelten“
- B. Der Aufbau des menschlichen Auges
- C. Die wichtigsten Bestandteile des menschlichen Auges
 - C.1. Das dioptrische System. Die Hornhaut, Die Augenlinse, der Glaskörper
 - C.2. Die Lederhaut
 - C.3. Die Netzhaut
 - C.4. Die vordere Augenkammer
 - C.5. Die Regenbogenhaut
- D. Der Strahlengang an unserem Auge
- E. Wie funktioniert nun das scharfe Sehen bei uns?
- F. Exkurs: Wie werden nun die entstandenen Bilder auf der Netzhaut von unserem Gehirn weiterverarbeitet?
- G. Wie sehen eigentlich Tiere, wie zum Beispiel Insekten?

G. 1. Der Aufbau und die Funktion eines Facettenauges bei Insekten

G. 2. Leistungsvergleich des menschlichen Auges mit dem Facettenauge, das räumliche und das zeitliche Auflösungsvermögen, das Gesichtsfeld

Die dritte Station befasst sich mit dem Aufbau des menschlichen Auges. Die wichtigsten Bestandteile des menschlichen Auges werden vorgestellt: Das dioptrische System bestehend aus Hornhaut, Augenlinse und Glaskörper, die Lederhaut, die Netzhaut, die vordere Augenkammer und die Regenbogenhaut. Hierfür steht ein Augenmodell zur Verfügung, das man auseinander bauen kann.

Der Strahlengang an unserem Auge wird besprochen, und um auf die Umkehrung des Bildes durch unser Gehirn einzugehen, steht eine Umkehrbrille zur Verfügung, die mit Hilfe von Spiegeln dem Träger das tatsächlich auf dem Kopf stehende Bild seiner Umgebung zeigt.

Bei der Frage „Wie funktioniert nun das scharfe Sehen bei uns?“ experimentieren die Schülerinnen und Schüler mit einem Augenmodell mit einer akkommodationsfähigen Linse [12] (Abb. 19 und Abb. 20).

Ein Exkurs stellt vor: „Wie werden nun die entstandenen Bilder auf der Netzhaut von unserem Gehirn weiterverarbeitet?“

„Wie sehen eigentlich Tiere, zum Beispiel Insekten?“ Der Aufbau und die Funktion eines Facettenauges bei Insekten werden mit Hilfe eines Modells untersucht, außerdem steht eine Facettenaugenbrille zur Verfügung, durch die die Schülerinnen und Schüler ihre Umgebung betrachten können. Ein Leistungsvergleich zwischen menschlichem Auge und Facettenauge wird gezogen, das räumliche und das zeitliche Auflösungsvermögen sowie das Gesichtsfeld werden mit Hilfe von einfachen Versuchen diskutiert.



Abb. 19: Halb geöffnetes Augenmodell. Die akkommodationsfähige Augenlinse ist mit Wasser gefüllt.



Abb. 20: Durch Druck auf die Spritze wölbt sich die Augenlinse stärker, das Bild erscheint scharf.

6. „Simulation von Fehlsichtigkeiten“ (Station 4)

Der Inhalt des Forscherbuchs der dritten Station lautet:

- A. Willkommen an der Station 4: „Simulation von Fehlsichtigkeiten“
- B. Der dioptrische Apparat als dünne Sammellinse
- C. Die Kurzsichtigkeit
- D. Die Weitsichtigkeit
- E. Die getrübbte Augenlinse

In der vierten Station werden die Fehlsichtigkeiten mit einem Augenmodell (Abb. 21) untersucht. Die Linse und der Schirm in diesem Modell lassen sich verschieben, so dass die Kurzsichtigkeit und die Weitsichtigkeit eingestellt und mit Hilfe von geeigneten Linsen korrigiert werden können (Abb. 22 bis Abb. 24). Auch wird diskutiert, welcher Eingriff bei einer getrübbten Augenlinse möglich ist, leicht kann man in dem Modell eine „Graue-Star-Operation“ durchführen.



Abb. 21: Das Augenmodell für die Simulation von Fehlsichtigkeiten. Linse und Schirm sind beweglich.

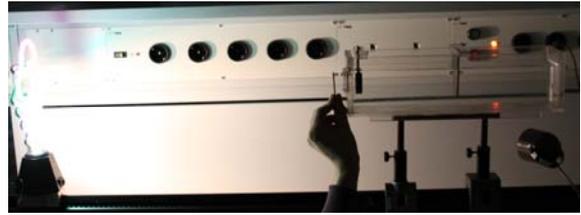


Abb.22: Eine Simulation von Kurzsichtigkeit und Korrektur

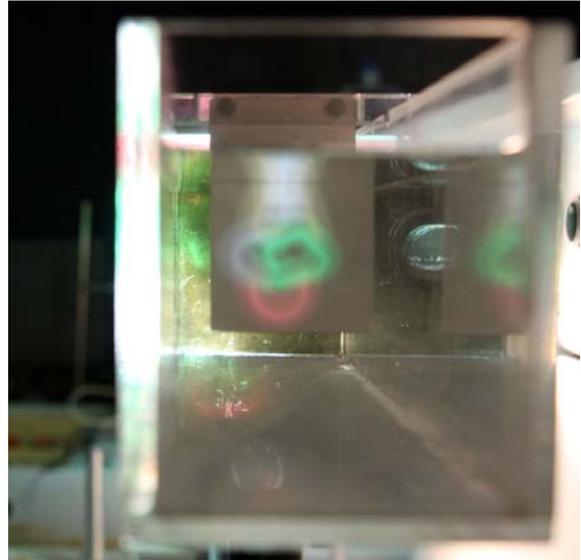


Abb. 23: Abbildung auf der „Netzhaut“ bei Fehlsichtigkeit ohne Korrektur

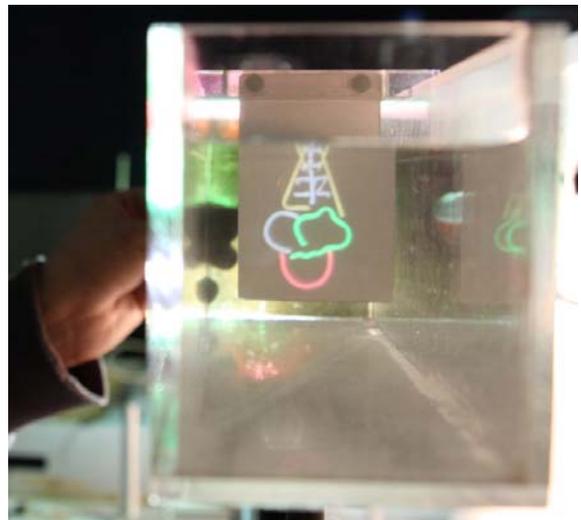


Abb. 24: Abbildung auf der „Netzhaut“ bei Fehlsichtigkeit mit Korrektur durch eine vorgehaltene Linse als Ersatz für eine Brille

7. Zusammenfassung

Dieses vorgestellte Projekt beinhaltet die Materialien und die Konzeption einer Veranstaltung, die inhaltlich den mittleren Jahrgangsstufen gewidmet ist. Es bezieht Erkenntnisse der didaktischen Forschung ein und berücksichtigt die Erfahrungen mit den Veran-

staltungen für Schülerinnen und Schüler an der Fakultät.

Mit den sorgfältig ausgearbeiteten Materialien wie Forscherbuch und Anleitungen soll eine möglichst einfache Einarbeitung für die Betreuer möglich sein. Teile des Konzeptes mit den entsprechenden Experimenten und Materialien wurden inzwischen in einer Veranstaltung eingesetzt, erprobt und evaluiert. Die Resonanz war sehr positiv.

8. Literatur

- [1] Goldbrunner, Eric: Entwicklung und Aufbau eines Schülerlabors an der Fakultät für Physik geeignet für die Mittelstufe (Sek. I) mit dem thematischen Schwerpunkt der physikalisch-medizinischen Optik, Zulassungsarbeit, Fakultät für Physik, Ludwig-Maximilians-Universität München, 2009
- [2] Weber, Kathrin: Konzeption der Schülerexkursion "Medizinphysik" an der Fakultät für Physik der LMU, Zulassungsarbeit, Fakultät für Physik, Ludwig-Maximilians-Universität München, 2008
- [3] Traupel J., Emmer B. (2008): Das Physik-Probestudium. In: Nordmeier, V. (Redaktion): Didaktik der Physik. Beiträge zur Frühjahrstagung der DPG. Berlin 2008
- [4] Physikmagazin der Fakultät für Physik, Ausgabe 1, <http://www.physik.uni-muenchen.de/physikmagazin>
- [5] Waltner, C., Wiesner, H., Giersch, J. (2008): Expeko – Physik am Samstagvormittag. In: Nordmeier, V., Oberländer, A. (Hrsg.): Didaktik der Physik – Berlin 2008. Berlin: Lehmanns Media.
- [6] Traupel J., Langwieder N., Schmidt C., Weber K. (2008): Schülerexkursionen an die Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität. In: Pitton, A. (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie. Schwäbisch Gmünd 2008
- [7] <http://www.physik.uni-muenchen.de/praktikum>
- [8] Wiesner, H. (2009): Physikunterricht – an Schülervorstellungen orientiert II. Praxis der Naturwissenschaften, Aulis Verlag Deubner, Heft 3/58, April 2009
- [9] Prenzel, M. (1995): Zum Lernen bewegen. Blick in die Wissenschaft, S. 58-66
- [10] Colicchia, G. (2002): Physikunterricht im Kontext von Medizin und Biologie. Entwicklung und Erprobung von Unterrichtseinheiten zur Steigerung des Interesses für den fachübergreifenden Physikunterricht. Dissertation Universität München
- [11] http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/materialien/inhalt_materialien/phy_med_opt/unterrichtse_optik.pdf
- [12] Colicchia G.; Wiesner H. (2004): Simulation von Fehlsichtigkeiten, Unterricht Physik 15/82, S. 15-17
- [13] http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/materialien/inhalt_materialien/phy_med_opt/simulation_fehlsicht.pdf