

Einführungsunterricht in die Optik

C. Haagen-Schützenhöfer

1 Ausgangspunkte

Die Optik ist aus Sicht von Schülerinnen und Schülern, im Gegensatz zur Elektrizität, ein interessantes, beliebtes und faszinierendes Thema. Optische Phänomene begegnen uns nicht nur tagtäglich, sondern sind ein Tor zur Welt, nämlich zur sichtbaren Welt. Ein Großteil der Informationen, die wir empfangen, gelangt über optische Reize, also über Licht zu uns. Der Bezug zur Lebenswelt scheint daher klar auf der Hand zu liegen, ebenso wie die Faszination, die von optischen Alltagsphänomenen ausgeht. Verwunderlich scheint, dass es trotzdem nur teilweise gelingt, Schülerinnen und Schülern basale Konzepte der Optik so nahe zu bringen, dass sie in der Lage sind, optische Alltagsphänomene gestützt auf adäquate physikalische Konzepte zu erklären.

Beobachtet man die Herangehensweisen von Schulbüchern (zumindest österreichischen vgl. [1]) an den Anfangsoptikunterricht, so kann man leicht feststellen, dass über die Jahre hindurch immer noch Schwerpunkte verfolgt werden, die sich in der Lernforschung als lerntechnisch schwierig herausstellen. Dazu zählt vor allem der rasche Einsatz von Modellen und Abstraktionen, die kaum oder nicht als solche thematisiert werden und auch nur mangelhaft an die beobachtbaren Phänomene angeknüpft sind. Als Beispiele seien hier das Modell des Lichtstrahls sowie der Einsatz von Strahlenkonstruktionen mit ausgezeichneten Strahlen und die Reduktion der Farbwahrnehmung auf Farbmischungsregeln genannt. Einige basale Konzepte wie beispielsweise Lichtstrahlen als mathematisches Modell von Lichtbündeln, der Sehvorgang – speziell bei nicht selbst leuchtenden Gegenständen – oder Lichtausbreitung als kontinuierlicher Prozess rücken im derzeitigen Physikunterricht eher in den Hintergrund. Diese Schwerpunktsetzung wird häufig damit begründet, dass die Ausbreitung von Licht ein trivialer Vorgang ist, mit dem Schülerinnen und Schüler schon aus ihrem Lebensalltag vertraut sind und/oder dass das Sehen respektive die Funktionsweise des Auges schon aus dem Sach- bzw. dem Biologieunterricht bekannt ist [2]. Die Praxis

zeigt allerdings sehr nachdrücklich, dass die Idee von Licht, das in das Auge des Betrachters gelangen muss, um einen Gegenstand wahrnehmen zu können, den meisten Lernenden fremd ist. Und bei letzterer Annahme treffen wir auf ein Problem, das Ihnen aus Ihrer eigenen Unterrichtserfahrung sicher bestens bekannt ist: Lernende schaffen den Transfer von Inhalten zwischen verschiedenen Unterrichtsgegenständen ohne entsprechende Unterstützungsstrategien oft nur schwer oder unzureichend.

Die Analyseergebnisse der Schulbuchkapitel zum Thema Optik zeigen ein ähnliches Bild: Basale Konzepte der Sender-Streuungs-Empfänger-Vorstellung oder des kontinuierlichen Strömungsvorgangs der Lichtausbreitung werden vereinzelt ausgespart oder meistens sehr knapp und punktuell abgehandelt. Viel Raum wird hingegen strahlengeometrischen Konstruktionen gewidmet, die nachweislich hauptsächlich Reproduktionsleistung von Strahlengängen anstatt konzeptuelles Verständnis fördern [4].

2 Ziele des Optik Anfangsunterrichts

Der einführende Abschnitt legt den Schluss nahe, dass für Schülerinnen und Schüler im Optikunterricht nicht immer genügend Lerngelegenheiten enthalten sind, um sich mit basalen Konzepten intensiv auseinanderzusetzen zu können. Stattdessen werden Lernende vorwiegend auf strahlengeometrische Konstruktionen hin getrimmt, ohne oft zu verstehen, wie diese modellhaften Vereinfachungen mit den wahrgenommenen Phänomenen zusammenhängen.

Ziel des Projektes ist es, Material zu den Grundideen der elementaren Optik ausgehend von Phänomen bzw. den Alltagserfahrungen der Schülerinnen und Schülern zu entwickeln und ihnen einen physikalisch angemessenen Interpretationsrahmen für derartige Phänomene zur Verfügung zu stellen. Hinter den entwickelten Unterrichtsmaterialien steckt also die Strategie, den Basiskonzepten der Sender-Streuungs-Empfänger-Vorstellung, der kontinuierlichen Strömungsvorstellung sowie der den Abbildungsprozessen zu Grunde liegenden Leuchtfleck-zu-Bildfleck-Vorstellung

genügend Raum zu geben und diese im Verlauf des Optikunterrichts immer wieder zu thematisieren bzw. mitzudenken.

3 Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten

Auch wenn es vielleicht auf den ersten Blick nicht plausibel klingt, aber gerade die Alltagserfahrungen mit optischen Phänomenen sind vielfach für Fehlvorstellungen verantwortlich. Aus Sicht konstruktivistischer Lerntheorien ist nämlich anzunehmen, dass es Schülerinnen und Schülern gerade diese enge Verknüpfung mit ihrer Alltagswelt erschwert, physikalisch adäquate Phänomene heranzuziehen. Täglich begegnen Schülerinnen und Schülern optischen Phänomenen in ihrem Lebensalltag und im Laufe der Zeit haben sie sich, gestützt auf diesen Erfahrungen, Erklärungsmuster zu Recht gelegt. Wie etwa: „der Spiegel vertauscht links und rechts“, „Licht muss da sein, damit ich etwas sehen kann“, „Licht breitet sich nur so weit aus, so weit ich es sehen kann“ oder „wenn ich weiter nach hinten gehe, dann sehe ich mehr von mir im Spiegel“.

Derartige Alltagsvorstellungen sind häufig nicht kompatibel mit physikalisch angemessenen Konzepten. Im Lebensalltag der Schülerinnen und Schüler bewähren sich diese Alltagskonzepte durchaus, indem sie zur Bewältigung von Alltagssituationen beitragen und dadurch schließlich immer wieder verstärkt und verfestigt werden. Aus Sicht der Schülerinnen und Schüler scheint es daher nicht nötig zu sein, diese Konzepte zu verändern. Auch der Physikunterricht zeigt wenig Wirksamkeit, da die dort alternativ angebotenen Konzepte sich gegen die bewährten und gut verfestigten Alltagskonzepte kaum durchsetzen können. Zudem wird im konventionellen Unterricht häufig eine kognitive Verarbeitungstiefe angeregt, die sehr oberflächlich bleibt und sich auf das Wiederholen von Merksätzen bzw. Konstruktionsvorschriften oder Berechnungsregeln beschränkt; vorhandene Vorstellungen bleiben davon unberührt. Dies führt häufig dazu, dass die vorhandenen Vorstellungen nicht in Richtung von physikalisch angemesseneren Konzepten vervollstän-

dig, ergänzt oder umgedeutet werden können. Das im Unterricht neu gelernte Wissen bleibt daher meist isoliert und mit bestehendem Alltagswissen unverbunden in der Wissensstruktur der Schülerinnen und Schüler zurück und wird in der Folge auch nicht mehr herangezogen oder gar verstärkt.

Unterrichtspraxis und Fachdidaktik zeigen, dass Unterricht, der Lernvoraussetzungen berücksichtigt, bei weitem erfolgversprechender ist als konventioneller Unterricht, der diese bekannten Lernschwierigkeiten außer Acht lässt. Die fachdidaktische Forschung der letzten Jahrzehnte liefert für viele Inhaltsbereiche der Physik einen guten Überblick über vorherrschende Schülervorstellungen und inhaltspezifische Lernschwierigkeiten. Gerade der Bereich der Optik ist gut erforscht.

Um an den Vorstellungen der Schülerinnen jedoch anknüpfen zu können, ist es wichtig, eine Idee davon zu haben, mit welchen Vorstellungen die Lernenden in den Unterricht kommen. Im folgenden Abschnitt wird daher auf die prominentesten Schülervorstellungen zur elementaren Optik eingegangen [3, 4].

Vorstellungen zum Sehen von Gegenständen

Die am weitesten verbreitete Alltagsvorstellung zum Sehen besteht darin, dass Licht hell macht und dadurch Gegenstände sichtbar werden. Eine Verbindung zwischen Lichtquelle, beleuchtetem Gegenstand und visuellem System des Beobachters wird nicht hergestellt. Vielmehr wird die Vorstellung abgelehnt, dass Licht zur Wahrnehmung eines Gegenstandes von diesem ins Auge des Betrachters gelangen muss. Dies entspricht auch völlig den Alltagserfahrungen der Lernenden, in denen so gut wie nie die Erfahrung von völliger Dunkelheit (also Abwesenheit von Licht) gemacht wird. Dadurch erscheint die Annahme, dass wir auch im Dunkeln sehen können, plausibel.

Vorstellungen zur Lichtausbreitung

Erschwerend kommen auch Vorstellungen hinzu, die Licht nicht mit einem kontinuierlichen Strömungsvorgang verbinden, sondern eher als Zustand deuten. Diese statische Konzeptualisierung von Licht trägt zur Vorstellung bei, dass das Licht auf beleuchteten Gegenständen liegen bleibt – es ist ja ein heller „Lichtfleck“ sichtbar. Dies wiederum blockiert die Vorstellung, dass auch nicht selbst leuchtende Gegenstände bei Beleuchtung Licht abstrahlen können, völlig.

Vorstellungen zum Spiegelbild

Auch bei Spiegelbildern von ebenen Spiegeln, mit denen Lernende täglich Alltagserfahrungen sammeln, gibt es eine Reihe fest verankerter Schülervorstellungen, die mit physikalischen Konzepten nicht vereinbar sind: Im Gegensatz zu „normalen“ Gegenständen bleibt das Licht aus Sicht von Schülern am Spiegel nicht liegen, sondern wird zurückgeworfen. Allerdings wird dieser „Reflexionsmechanismus“ nicht in Zusammenhang mit der Bildentstehung gebracht. Vielmehr gehen vor allem jüngere Schülerinnen und Schüler davon aus, dass der Spiegel dem Betrachter das zeigt, was „er (der Spiegel) sieht“. Auch über die Qualität des Spiegelbildes gibt es eine Reihe von Vorstellungen, die der physikalischen Betrachtungsweise widersprechen: im Spiegelbild ist, bezogen auf den abgebildeten Gegenstand, links und rechts vertauscht, oben und unten allerdings nicht (mit links, rechts, oben und unten sind Ortsangaben gemeint, die sich in einer zur Spiegelebene parallelen Ebene befinden). Hinten und vorne wird im Spiegelbild ebenfalls nicht umgekehrt (mit hinten und vorne sind Ortsangaben gemeint, die sich in einer zur Spiegelebene senkrechten Ebene im Gegenstandsraum befinden). Des Weiteren negieren Lernende, dass das Spiegelbild hinter dem Spiegel, also im Spiegelraum, entsteht. Auch diese Vorstellung ist aus Schülersicht plausibel, da sich hinter der Spiegeloberfläche ja meistens eine Wand oder dgl. befindet.

Vorstellungen zur Bildentstehung durch Linsen oder Lochblenden

Wie schon in Zusammenhang mit Spiegelbildern angedeutet, weicht das Abbildungsverständnis von Lernenden häufig vom Physikalischen ab und entspricht einer eher „holistischen“ Auffassung. Damit ist gemeint, dass das Bild als Ganzes vom abzubildenden Gegenstand zur Linse oder Blende wandert und von dort zur Projektionswand oder dgl. Selbst nach dem Unterricht bleibt diese Vorstellung meist bestehen und wird von einer Reihe weiterer Ideen gestützt. Aus Sicht der Lernenden besteht die Funktion der Linse vorwiegend darin – falls diese überhaupt für die Bildentstehung als notwendig erachtet wird –, das Bild zu drehen. Die holistische Abbildungsvorstellung führt auch dazu, dass eine Teilabdeckung der Linse nur mehr einen Bildausschnitt des Gegenstandes produziert, da ein Teil des „ganzen“ Bildes ja abgeblockt wird. Schließlich bleibt der eindeutige Zusammenhang zwischen der Entfernung des Gegenstands, der Linse und

der Position für ein scharfes Bild häufig verborgen. Auch hier gilt aus Sicht der Lernenden ganz allgemein, dass Licht nicht zur Entstehung oder zur Wahrnehmung der Abbildung erforderlich ist.

Vorstellungen zur Farbe

Gerade zum Thema Farbe scheinen Alltagsvorstellungen besonders fest verwurzelt und nur schwer veränderbar zu sein. Als eine Ursache dafür sind vor allem die Alltagserfahrungen in Zusammenhang mit Farbe ausschlaggebend: Wir nehmen unsere Umwelt fast ausschließlich unter (annähernd) weißem Licht wahr. Daraus ergeben sich ganz leicht Vorstellungen, denen zu Folge Gegenständen eine fixe Farbe (Eigenfarbe) zugeschrieben werden kann. „Weißes Licht“ wird meist als künstliches, physikalisches Konstrukt wahrgenommen, das eigentlich gelbes Licht (Licht von der Sonne oder Glühlampen) beschreibt. Daher wird oft auch die Idee, dass weißes Licht eine Zusammensetzung von Spektralfarben ist, abgelehnt. Des Weiteren scheint die wahrgenommene Farbe eines Gegenstandes auch unabhängig von der Lichtfarbe zu sein, mit der der Gegenstand beleuchtet wird; oder es wird angenommen, die Eigenfarbe des Gegenstands vermischt sich mit der beleuchtenden Lichtfarbe. Wenn es um die Mischung von Lichtfarben geht, werden hier grundsätzlich dieselben Gesetzmäßigkeiten wie bei Malfarben/Tuschfarben (also Farbpartikeln) angenommen.

4 Entwicklung des Unterrichtskonzepts

Die vorherigen Abschnitte stellen die Ausgangslage für die Entwicklung von Unterrichtsmaterialien für den Anfangsoptikunterricht dar, die im Folgenden berichtet werden. Als Grundlage für die Materialerstellung diente hauptsächlich der bereits in den 1990er Jahren entwickelte Kurs von Wiesner et al. [5-7], der als Lehrerbegleitheft in 4 Bänden veröffentlicht wurde. In unserem konkreten Fall sollte daraus Unterrichtsmaterial entwickelt werden, das auch neuere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich der Optik berücksichtigt und sich vor allem auch dem Einsatz moderner Medien öffnet. Basierend auf diesen Rahmenbedingungen wurde das Material Kapitel für Kapitel entwickelt und in zahlreichen Micro-Lehrsitzungen mit Schülerinnen und Schülern erprobt. Die Ergebnisse mehrerer solcher Micro-Lehr-Lernsitzen wurden dann zur Verbesserung des Materials eingearbeitet.

Der Lehrgang ist so aufgebaut, dass sich zwei zentrale Ansätze als roter Faden

durchziehen: das Sender-Streuungs-Empfänger-Konzept und das Nachverfolgen der Lichtwege von der Lichtquelle bis zur Beobachterin des Phänomens.

Wir wissen, dass Lernende selbst nach dem Einführungsunterricht in die Optik selten ein physikalisch adäquates Konzept vom physikalischen Sehvorgang entwickelt haben. Nur ein geringer Prozentsatz (je nach Untersuchung zwischen 20 % und 30 %, [8]) ist in der Lage, optische Phänomene mithilfe des sogenannten Sender-Streuungs-Empfänger-Konzepts zu erklären. Bei diesem Konzept wird der physikalische Teilprozess des Sehvorgangs modelliert und ein Zusammenhang zwischen Lichtsendern (in Form von selbst leuchtenden oder lichtstreuenden Gegenständen) und dem menschlichen Auge als Lichtempfänger hergestellt. Das Verständnis dieses Vorgangs ist schließlich die Basis für viele Teilbereiche der Anfangsoptik.

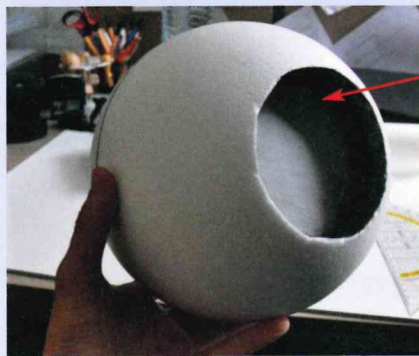
Der zweite Grundsatz, der sich durch das Material zieht, ist als Motto „von nix kommt nix“ zusammengefasst. Alle behandelten Teilthemen werden mit einem Phänomen oder einem Experiment eingeführt, das sukzessive einer physikalischen Betrachtungsweise unterzogen wird. Dazu werden die Beobachtungen der Lernenden mit der Analyse der Lichtwege (von der Lichtquelle bis zum Beobachter) abgeglichen.

Wodurch sich die Lernmaterialien von anderen unterscheiden ist, ihre Sachstruktur, d. h. die Abfolge der physikalischen Konzepte im Lernangebot. Nachdem das Sehen von selbstleuchtenden und beleuchteten Körpern sehr intensiv thematisiert wird, folgt sofort ein Kapitel zu Körperfarben. Ausschlaggebend hierfür waren die oben beschriebenen Micro-Teaching-Sequenzen. Bei der Vermittlung der Streuvorstellung, die als Absorption und selektive Remission von Licht durch Körper elementarisiert wurde, traten immer unmittelbar Fragen der Lernenden dazu auf, warum wir Gegenstände in verschiedenen Farben wahrnehmen. Dieses Interesse wurde aufgegriffen und an dieser Stelle ein Kapitel zum Thema Körperfarben eingeführt, was sich als äußerst lernwirksam herausstellte.

5 Das Unterrichtskonzept für die Sekundarstufe I

In diesem Abschnitt soll die Sachstruktur des Lehrgangs mit den wichtigsten, umgesetzten elementaren Grundideen vorgestellt werden [9]. Das Material kann auf Nachfrage gern für eigene Erprobungen zur Verfügung gestellt werden.

So kannst du das Bild, das im Inneren des Auges entsteht, auch von außen sehen (Abb. 1).



Modellauge von außen: ein Bild auf der Modell-Netzhaut ist durch das Transparentpapier auch von außen sichtbar.

Abb. 1: Augenmodell eines Kopffüblers: Styroporkugel von außen

Textkasten 1: Augenmodell als Lichtempfänger

Die Lochkamera ist ein **Lichtnachweisgerät**. Du kannst damit überprüfen, ob Licht in Richtung der Lochkameraöffnung abgestrahlt wird. Fällt Licht auf den Schirm der Lochkamera, so kannst du etwas am Schirm erkennen. *Erinnere dich: Von nix kommt nix.*



Willst du einen Gegenstand mit der Lochkamera beobachten, dann musst du die Kamera so halten, dass Licht von dem Gegenstand durch die **Blendenöffnung** kommen kann (Abb. 2).

Abb. 2: So beobachtest du einen Gegenstand mit der Lochkamera. Den Auszug kannst du herausziehen, damit vergrößerst du den Abstand zwischen Lichteinlass und Schirm.

Textkasten 2: Die Lochkamera als Lichtnachweisgerät

Ein selbstleuchtender Gegenstand strahlt Licht in alle Richtungen ab. Gelangt ein Teil dieses Lichtes in dein Auge, dann entsteht ein Abbild des Gegenstandes auf der Netzhaut (Abb. 3).

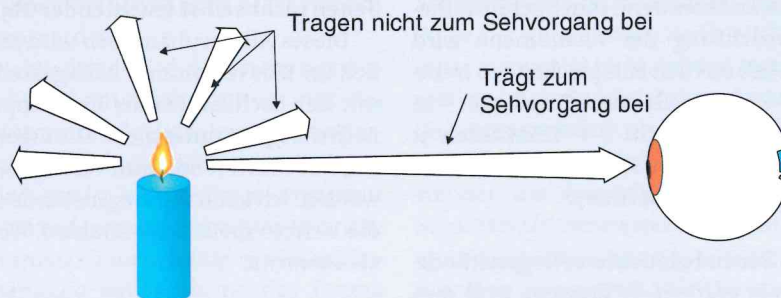


Abb. 3: Eine Kerzenflamme strahlt Licht in alle Richtungen ab. Ein Teil des Lichtes fällt in das Auge.

Textkasten 3: Sender-Empfänger-Modell für selbst leuchtende Gegenstände

Aufbau des Lehrgangs:

I. Unser Auge – ein Lichtempfänger

Als zentrale Aussage soll vermittelt werden: Damit wir einen Gegenstand sehen können, muss Licht von diesem Gegenstand in unser Auge gelangen. – *Von nix kommt nix.* – Das Auge ist also ein Lichtempfänger.

Dazu wird ein einfaches Styroporkugel Augenmodell verwendet [5] (→ **Textkasten 1: Augenmodell als Lichtempfänger**). Dieses Sender-Empfänger-Modell wird in den folgenden Abschnitten sukzessive ausgebaut. Zunächst wird der Empfänger, also unser Auge, weiter vereinfacht und als Lochkamera modelliert.



Abb. 4: Fotografie einer Berglandschaft bei Sonnenuntergang

Textkasten 4: Foto von Wolken als Einleitungsstimulus zum Sehen beleuchteter Objekte



Abb. 5: Die Wolken strahlen das Licht der Sonne weiter. Ein Teil des Lichts gelangt bis zum Fotografen.

Textkasten 5: Lichtwege beim Sehen nicht selbst leuchtender Objekte

II. Das Sehen selbstleuchtender Gegenstände

Die Lochkamera wird nun in Analogie zum Auge als Nachweisgerät für Lichtabstrahlung bzw. Lichtempfang eingeführt (→ **Textkasten 2: Die Lochkamera als Lichtnachweisgerät**).

Zunächst werden Beobachtungen an selbst leuchtenden Gegenständen, sogenannten Lichtsendern, durchgeführt. Diese Beobachtung der Phänomene wird schließlich mit den entsprechenden Lichtwegen – vom Sender zum Empfänger – in Verbindung gebracht (→ **Textkasten 3: Sender-Empfänger-Modell für selbst leuchtende Gegenstände**).

III. Das Sehen beleuchteter Gegenstände

Das zuvor erarbeitete Konzept wird nun auf Objekte übertragen, die selbst kein Licht erzeugen, die sogenannten „Zwischensender.“ Dieser Begriff wurde so gewählt, um bei der Einführung von Körperfarben einen anschlussfähigen Anknüpfungspunkt zu haben, der über eine passive Ping-Pong-Vorstellung der Reflexion hinausgeht (→ **Textkasten 4: Foto von Wolken als Einleitungsstimulus zum Sehen beleuchteter Objekte**).

Hierzu wird einleitend ein Szenario mit „leuchtenden Wolken“ beim Sonnenuntergang verwendet, um diese optische All-

tagerscheinung sukzessive in das physikalische Rahmenkonzept des Sender-Streuungs-Empfänger-Modells zu integrieren und schließlich damit erklären zu können. Dazu werden Lichtwege vom Sender über die betrachteten Objekte (Wolken) bis zum optischen Wahrnehmungssystem des Beobachters nachvollzogen und besprochen. (→ **Textkasten 5: Lichtwege beim Sehen nicht selbst leuchtender Objekte**).

Dieses Alltagsphänomen wird schließlich im Klassenzimmer nachgestellt und mit der Lochkamera als Lichtempfangsnachweisgerät untersucht. Die Erkenntnis aus Abschnitt II soll nun verallgemeinert werden: Ich kann nur Gegenstände sehen, die Licht in mein Auge strahlen. Weil: *Von nix kommt nix*.

IV. Lichtsender

Nachdem der Sehvorgang mittels Sender-Empfänger-Modell für das Sehen aller Arten von Gegenständen erarbeitet wurde, werden die beiden Fälle *Sehen von Sendern* und *Zwischensendern* noch einmal thematisiert. Als Exkurs zur Thematik *Sehen von beleuchteten Gegenständen* werden an dieser Stelle die Mondphasen thematisiert.

V. Ausbreitung des Lichts

In diesem Abschnitt wird gesondert auf einzelne Aspekte der Lichtausbreitung ein-

gegangen, die in den vorhergehenden Abschnitten vorausgesetzt, aber nicht explizit thematisiert wurden. Dabei werden folgende Grundideen erarbeitet:

- **Licht strömt:** Ein Selbstsender gibt in jedem Moment Licht ab, so wie ein aufgedrehter Wasserhahn in jedem Moment Wasser abgibt. Dieses regelmäßige Wegströmen von „Lichtblitzen“ oder „Lichtstößen“ wird mithilfe einer Stroboskop-App simuliert, um schließlich bei hoher Frequenz die nächste Eigenschaft zu illustrieren.
- **Licht strömt schnell:** Ausgehend von der Stroboskop-App wird festgestellt, dass wir den Strömungsvorgang von einzelnen „Lichtblitzen“ bzw. „Lichtstößen“ nicht wahrnehmen können, weil Licht eine derart hohe Geschwindigkeit hat. Mit einem Gedankenexperiment (Licht in „super-slow Motion“) wird dies verdeutlicht in verschiedenen Alltagssituationen (Autorennen auf Spielkonsole, Ein- bzw. Ausschalten einer Lampe, Straßenverkehr).
- **Licht strömt geradlinig:** Das Licht, das ein Sender abstrahlt, strömt geradlinig in alle Richtungen aus.
- **Licht strömt weiter und weiter und weiter ...** Hier wird erarbeitet, dass Licht sich unendlich geradlinig ausbreitet und von seinem Pfad nur abgebracht wird, wenn ein Objekt im Weg ist. Zudem wird auch thematisiert, warum ein Lichtkegel mit der Entfernung von der Lichtquelle immer dunkler wird und für uns schließlich nicht mehr sichtbar ist. **Kann man Licht überhaupt sehen:** Abschließend werden ausgehend vom Leitsatz des Unterrichtskonzepts „*Von nix kommt nix*.“ Bedingungen gesucht, unter denen Licht direkt (z. B. als Lichtkegel, oder als heller Lichtfleck) wahrnehmbar ist. Licht wird schließlich dann als sichtbar festgelegt, wenn es von einem materiellen Objekt, sei es nun ein Körper im alltäglichen Sinn oder bloß ein Nebeltropfen oder Staubpartikel, in unser visuelles System weitergestrahlt wird.

VI. Zusammensetzung von Licht

Nach den Ausbreitungseigenschaften wird an dieser Stelle bereits über die Zusammensetzung von Licht nachgedacht, um schließlich die Farbigkeit von Körpern zu besprechen. Diese Vorgehensweise, schon zu einem so frühen Zeitpunkt über Farbe (Lichtfarbe und Körperfarbe) zu sprechen, hat sich aus den Bedürfnissen und Fragestellungen der Lernenden in den Akzeptanzbefragungen ergeben. Hier wird die Synergie genützt, den Dreischritt Senden-

Streuen-Empfangen zur Sichtbarkeit von Gegenständen gleich um den Aspekt Farbe zu erweitern, also: Senden-selektiv Streuen-Empfangen. Auch hier findet der Leitsatz „Von nix kommt nix.“ wieder Anwendung. Verschiedene Lichtsorten (Lichtfarben) können in ihrer Farbigkeit nur als solche wahrgenommen werden, wenn sie ins optische System des Beobachters gelangen.

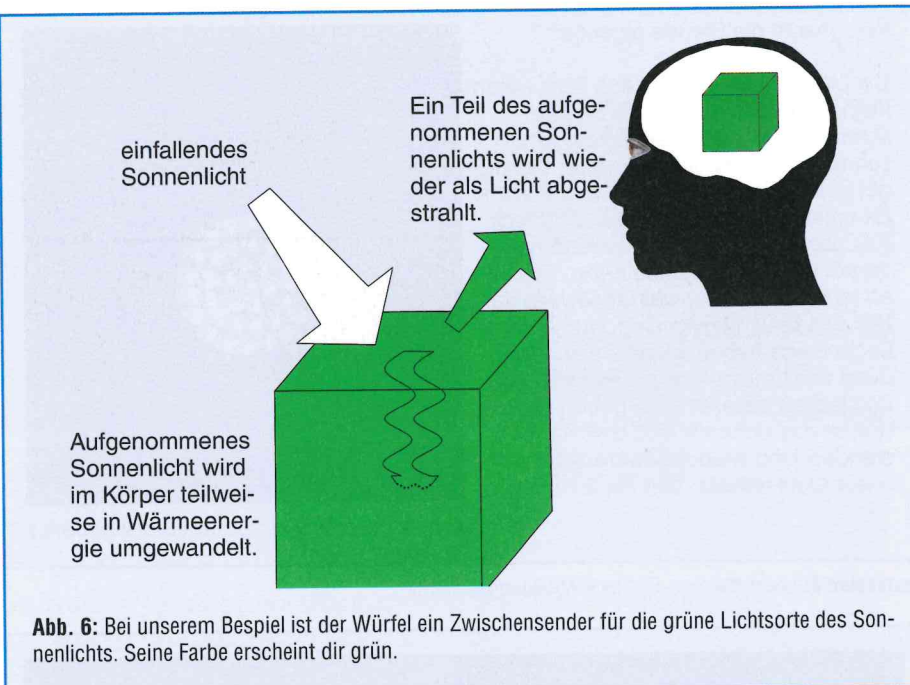
Vorbereitend werden die Fragen erarbeitet:

- Kann Licht eine Farbe haben? Hinter dieser Frage verbergen sich die folgenden elementaren Grundideen: Es gibt verschiedene Lichtsorten, also Licht, das auf weißem Papier farbige Lichtflecken hinterlässt. Verschiedene Lichtfarben kann man zu neuen Lichtfarben mischen.
- Licht ist anders?! Hier wird der Unterschied zwischen Licht und Materie herausgearbeitet: Licht ist anders als materielle Stoffe. An ein und demselben Ort kann gleichzeitig beliebig viel Licht sein.
- Woraus setzt sich Sonnenlicht und sonnenähnliches Licht eigentlich zusammen?
- Kann man einzelne Lichtsorten aus dem Sonnenlicht herausfiltern?
- Kann man weißes Licht aus verschiedenen Lichtsorten erzeugen?

VII. Farbige Körper

Der siebente Abschnitt des Lehrgangs synthetisiert nun die Grundideen der vorhergehenden Abschnitte und wendet sie auf die Thematik der farbigen Körper an.

Erst wird die Idee der Sichtbarkeit von Körpern aufgegriffen und erweitert: Die Streuung – Zwischensender verteilen einfallendes Licht. Auch der Leitsatz „Von nix kommt nix.“ wird im Kontext Sichtbarkeit von Körper wiederholt und auf Farbwahrnehmung erweitert. Hinzu kommt der Aspekt „die abgestrahlte(n) Lichtsorte(n) machen den Unterschied“. Es geht also nicht nur darum, dass Licht Informationen eines Gegenstandes (Sender) dem visuellen System des Beobachters (Empfänger) übermittelt, sondern, dass die Qualität bzw. Zusammensetzung der übermittelten Lichtsorte Unterschiede in der Wahrnehmung (Farbe, Intensität) verursacht. Damit ist der Prozess der Wechselwirkung von Licht und Materie (Streuungsprozess) ausschlaggebend für die Farbwahrnehmung und er steht im Zentrum dieses Abschnitts. In diesem Zusammenhang muss allerdings darauf verwiesen werden, dass, wie oben beschrieben, der physikalische Teil des Sehprozesses im Mittelpunkt die-



Textkasten 6: Körperfarben

Stell dir vor, dass ein leuchtender Gegenstand aus **vielen kleinen Selbstsendern** besteht. Diese kleinen Sender nennen wir **Leuchtflecke**. Das Prinzip der Leuchtflecke kennst du vielleicht schon von Handydisplays. Mit einem Vergrößerungsglas kannst du diese Leuchtflecke am Handy, die Pixel, gut erkennen.



Abb. 7: Ein LED-Spot

Textkasten 7: Modellierung von Selbstsendern durch Leuchtflecke

ses Kurses steht und physiologische Aspekte an dieser Stelle noch nicht miteinbezogen werden.

Anschließend wird der Streuungsprozess, die selektive Absorption und Re-Emission unter folgender Fragestellung erarbeitet: Zwischensender oder Energiewandler? Das ist hier die Frage! Inwieweit die Aspekte der Energieerhaltung thematisiert werden können, hängt in diesem Zusammenhang davon ab, ob das Thema Energie schon im Unterricht behandelt wurde (→ **Textkasten 6: Körperfarben**).

Die Betrachtung der charakteristischen Streueigenschaften von Körpern wird mit den Fragen abgeschlossen: *Wie ist das eigentlich mit Schwarz und Weiß? Was empfangen wir, wenn wir einen Gegenstand weiß wahrnehmen? Was empfangen wir, wenn wir einen Gegenstand schwarz wahrnehmen?*

Zuletzt wird der zweite Aspekt, der für Körperfarben verantwortlich ist, betrachtet: Die Beleuchtung macht den Unterschied – Gegenstände in farbigem Licht.

VIII. Wo Licht ist, ist auch Schatten

Schatten wird als Ort definiert, an den als Folge der geradlinigen Ausbreitung kein (oder nur wenig) Licht gelangt, weil dieses von einem undurchsichtigen Gegenstand (Schattensender) abgeblockt wird. Der Begriff Schatten wird differenzierter verwendet, um den Fehlvorstellungen von Schatten als zweidimensionalem Abbild eines Gegenstandes entgegen zu wirken. Schatten subsumiert Schattenraum und Schattenbild. Der Schattenraum ist als dreidimensionaler Bereich, in dem durch den Abschirmmechanismus eines Schattensenders kein oder weniger Licht gelangt, gekennzeichnet. Das Schattenbild wird als die Projektion des Schattenraums auf eine Ebene festgelegt. Das Zustandekommen und die Qualität (Kern- bzw. Halbschatten) von Schatten werden bei punktförmigen und flächigen Lichtquellen erarbeitet. Als ein Anwendungsbeispiel werden Mond- und Sonnenfinsternisse eingeführt.

Was macht die Blende eigentlich?

Ein Lichtsender besteht aus sehr vielen kleinen Leuchtflecken. Die Blende schneidet für jeden Leuchtfleck einen schmalen Lichtkegel aus. Jeder Lichtkegel beleuchtet einen Fleck an der Wand. Es entsteht also zu jedem Leuchtfleck EIN passender farbiger Fleck an der Wand. Wir nennen diese hellen Flecken ab jetzt Bildflecken, weil sie jeweils das Bild des Leuchtflecks sind. Durch die Lochblende haben wir also eine Abbildung von Leuchtfleck zu Bildfleck. Alle Bildflecken zusammen ergeben dann wieder das gesamte Bild des Gegenstandes. Und wieder bewahrheitet sich unser Optikleitsatz: *Von nix kommt nix*.

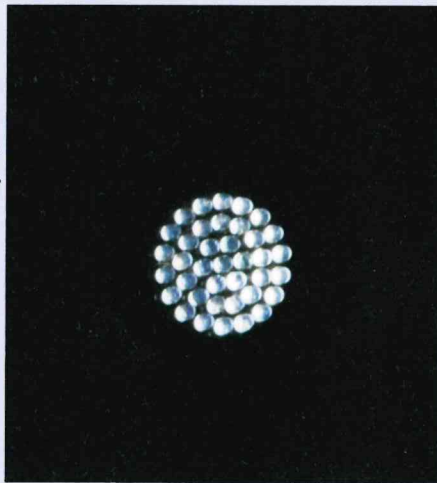


Abb. 8: Der LED-Spot leuchtet durch eine Blende.

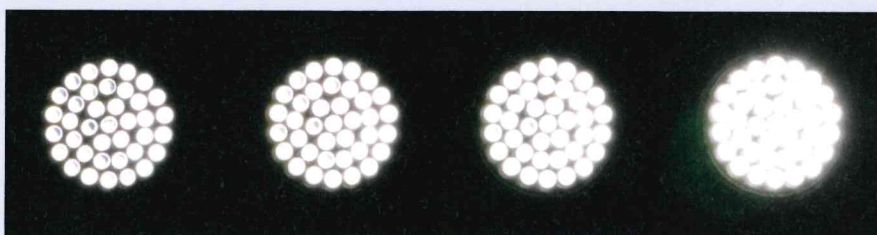
Textkasten 8: Leuchtfleck-zu-Bildfleck-Abbildungsschema

Abb. 9: Von links nach rechts wurde eine immer größere Blendenöffnung verwendet, um den LED-Spot abzubilden.

Deine Lehrkraft verwendet den LED-Spot, um dir zu zeigen, was bei **verschiedenen Blendenöffnungen** passiert (Abb. 9).

Textkasten 9: Abbildung mit Variation der Blendöffnung**IX. Abbildungen I: Das Bild der Lochkamera**

Die nächsten Abschnitte setzen sich mit Abbildungsvorgängen auseinander. Nun wird die Lochkamera aus den ersten Abschnitten wieder aufgegriffen. Ihre Funktion als Lichtempfangsnachweisgerät tritt in den Hintergrund und das Zustandekommen der Abbildung am Schirm der Lochkamera wird erarbeitet: Wie macht die Lochkamera ein Bild? Dabei wird sukzessive das Leuchtfleck-zu-Lichtfleck-Schema eingeführt (→ **Textkasten 7: Modellierung von Selbstsendern durch Leuchtflecke**).

Die Leuchtflecken eines Gegenstands werden den Lichtflecken (Bildfleck) der Abbildung des Gegenstandes gegenübergestellt. Eine eindeutige Zuordenbarkeit wird durch eine Reihe von Übungen mit einem LED-Spot (z. B. Abdecken einer oder mehrere LEDs) plausibel gemacht (s. [10]) (→ **Textkasten 8: Leuchtfleck-zu-Bildfleck-Abbildungsschema**).

Anschließend werden folgende Fragen thematisiert: **Wo ist das Bild? Wie groß ist das Bild?** Und der Abbildungsmaßstab wird erarbeitet.

X. Abbildungen II: Die Linsenkamera

Ausgehend von den lichtschwachen Abbildungen mit der Lochkamera wird die Lochkamera als Linsenkamera erweitert und als Entfernungsmesser geeicht. In ersten Ansätzen wird hier die Linsengleichung qualitativ erarbeitet.

Die Lernenden sammeln die Erfahrung, dass eine Vergrößerung der Blendenöffnung zwar die Helligkeit der Abbildung erhöht, allerdings immer größere Bildflecken entstehen, die sich überschneiden. Die eindeutige Zuordenbarkeit von einem Leuchtfleck zu einem Bildfleck ist nicht mehr gegeben und dadurch wird die Abbildung „unscharf“ (→ **Textkasten 9: Abbildung mit Variation der Blendöffnung**).

Die Sammellinse wird als Gerät eingeführt, das einen divergenten Lichtkegel, der einen großen Bildfleck am Schirm verursacht, zu einem konvergenten Lichtkegel, der einen Bildpunkt verursacht, zusammenführen kann (→ **Textkasten 10: Einführung der Sammellinse zur Erzeugung konvergenter Lichtbündel**)

Als besonders wichtig hat es sich dabei herausgestellt, auch den Fall zu besprechen, in dem sich kein Bildschirm im Abstand der Bildweite befindet. Für viele Lernenden ergibt sich vor allem aus konventionellen Abbildungen in Schulbüchern die Vorstellung, dass der konvergente Lichtkegel einfach „an der Spitze“ endet.

Bei der Kalibrierung der Lochkamera als Entfernungsmesser wird nicht von der Linsengleichung ausgegangen, sondern diese wird vorbereitet. Als elementare Grundidee, die in einem späteren Abschnitt zur Sammellinse vertieft wird, wird grundgelegt: Bei einer Sammellinse gehört zu jeder Bildweite genau eine Gegenstandsweite.

XI. Abbildungen III: Das Spiegelbild

Auch die Eigenschaften des ebenen Spiegels und dessen Abbildungen werden den zugrunde liegenden Prinzipien des Kurses folgend erarbeitet:

Im ersten Schritt werden Erscheinungen des Spiegelbildes in verschiedenen Experimenten ausgiebig untersucht und einfache Zusammenhänge erklärt. Im zweiten Schritt wird der Weg des Lichtes vom Gegenstand über den Spiegel bis zum Auge des Beobachters ermittelt. Der Leitsatz „Von nix kommt nix“ wird wieder angewendet. In diesem Abschnitt steht Ort und Lage des Spiegelbildes im Fokus (→ **Textkasten 11: Ort und Lage des Spiegelbildes**).

XII. Reflexion

Erst im nächsten Schritt werden dann strahlengeometrische Konstruktionen von ausgesuchten Bildpunkten thematisiert. Dazu wird erst auf die Reflexionseigenschaften des Spiegels näher eingegangen und diese werden als ein Sonderfall der anfangs verwendeten Streuung eingeführt. Das Reflexionsgesetz wird erarbeitet (→ **Textkasten 12: Reflexion als Sonderfall der Streuung**).

Schließlich werden ausgesuchte Bildpunkte mithilfe von Lichtkegeln konstruiert und dann erst zur Konstruktion mit ausgezeichneten Strahlen übergeleitet. Zentral ist es dabei auch, dass ein fester Zusammenhang zwischen dieser abstrakten Konstruktion und der individuellen subjektiven Wahrnehmung der Lernenden her-

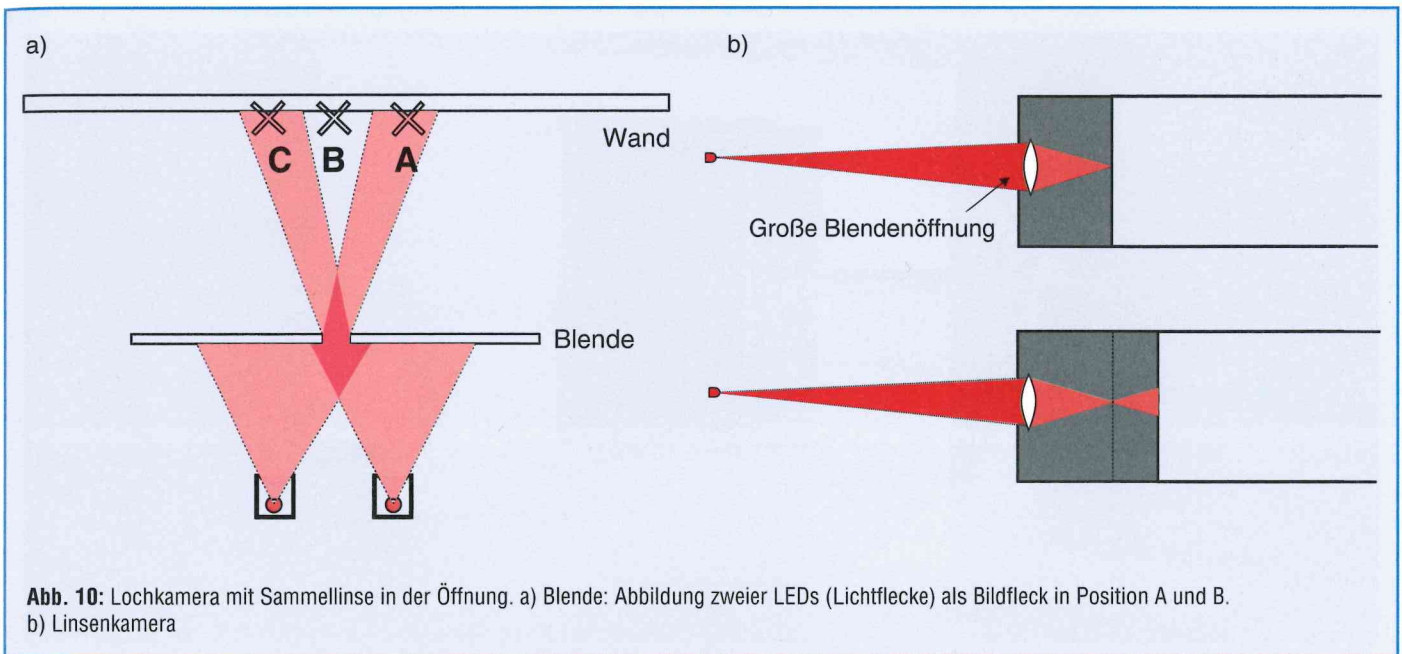


Abb. 10: Lochkamera mit Sammellinse in der Öffnung. a) Blende: Abbildung zweier LEDs (Lichtflecke) als Bildfleck in Position A und B. b) Linsenkamera

Textkasten 10: Einführung der Sammellinse zur Erzeugung konvergenter Lichtbündel

SUCHBILD:

Schau dir die Abb. 11a und Abb. 11b genau an. Die Abbildungen sind nicht völlig gleich. Wodurch unterscheiden sie sich?

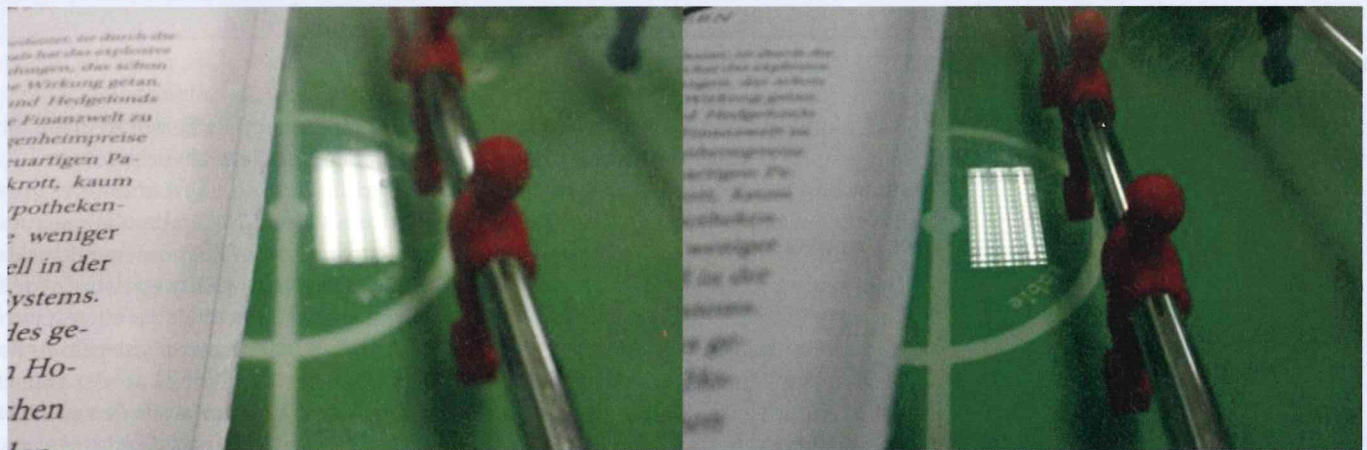


Abb. 11a

Abb. 11b

Bestimmt ist dir aufgefallen, dass durch die Glasplatte des Kickertisches die Deckenleuchte abgebildet wird (Abb. 11a und Abb. 11b). Hast du auch entdeckt, dass in Abb. 11a das Blatt, das auf der Glasplatte liegt, scharf abgebildet ist, die Deckenleuchte aber nicht? Und, dass es in Abb. 11b genau umgekehrt ist: Das Spiegelbild der Deckenleuchte ist scharf, aber das Blatt auf der Glasplatte ist unscharf.

Überlege:

Warum kann die Kamera nicht gleichzeitig das Blatt Papier, das auf der Glasplatte liegt, und die Leuchte scharf abbilden? Kannst du dir einen Grund dafür vorstellen?

Textkasten 11: Ort und Lage des Spiegelbildes

gestellt wird (→ **Textkasten 13: Konstruktion von Spiegelbildern**).

XIII. Brechung & Totalreflexion

Die Brechung wird phänomenologisch anhand einfacher Freihandversuche eingeführt. Eine Münze wird beispielsweise so in einen Topf gelegt, dass gerade noch der hintere Rand der Münze sichtbar ist. Dann wird vorsichtig Wasser in den Topf gegos-

sen, ohne dass die Beobachterin ihre Position wechselt. Anschließend an die Beobachtung erfolgt die Erklärung des Phänomens über das Nachverfolgen des Lichtweges von der Lichtquelle über die Münze bis zur Beobachterin. Basierend auf diesen Ergebnissen wird schließlich das Brechungsgesetz erarbeitet und mit einer Reihe von Experimentier- und Konstruktionsaufgaben gefestigt. Schließlich wird das Bre-

chungsgesetz beim Übergang von optisch dichteren Medien auf optisch dünnere Medien angewendet und der Sonderfall der Totalreflexion besprochen.

XIV. Abbildungen IV: Die Sammellinse

Der Dreischritt von der Beobachtung des Phänomens über das Nachvollziehen der Lichtwege bis zur Übersetzung dieser in eine formal, abstrakte Konstruktion wird

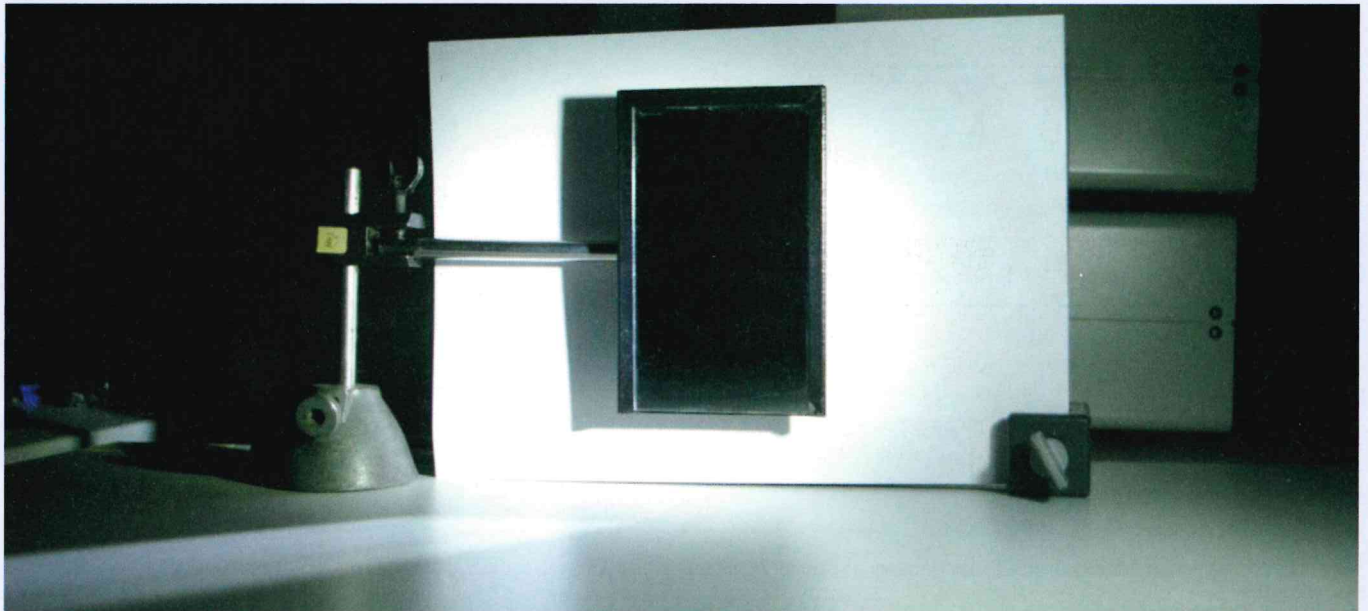


Abb. 12: Der Spiegel und der dahinter liegende Karton werden mit einem Spot beleuchtet.

Im Bild gibt es einen Hinweis darauf, auf welche Art der Spiegel das auftreffende Licht weiterstrahlt. Auf der Tischfläche kannst du erkennen, dass ein gewisser Bereich aufgehellt ist. Das ist Licht, das vom Spiegel nach schräg unten weitergestrahlt wird. Der Spiegel streut also das Licht des Spots überwiegend in eine bestimmte Richtung (=Vorzugsrichtung). Diese spezielle Form der Streuung heißt Reflexion. Reflexion tritt vor allem an glatten Oberflächen auf. Ein Spiegel kann bis zu 99% des einfallenden Lichtes reflektieren.

Textkasten 12: Reflexion als Sonderfall der Streuung

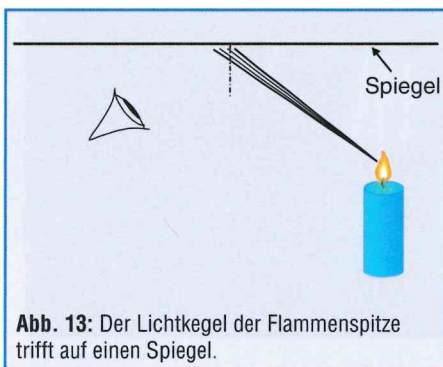


Abb. 13: Der Lichtkegel der Flammenspitze trifft auf einen Spiegel.

Textkasten 13: Konstruktion von Spiegelbildern

auch bei Abbildungen mit Sammellinsen vollzogen. Die Sammellinse, die bei der Linsenkamera schon als Bauteil eingeführt wurde, das divergente Lichtkegel zu konvergenten umlenken kann, wird in verschiedenen Experimenten untersucht (→ **Textkasten 14: Abbildungsvorgang bei Sammellinsen**).

Anschließend werden die Lichtwege für die Bildentstehung nachvollzogen und das Leuchtfleck-zu-Bildfleck-Abbildungsschema erarbeitet (→ **Textkasten 15: Leuchtfleck-zu-Bildfleck-Abbildungsschema bei Sammellinsen**).

Abschließend wird daraus dann die strahlengeometrische Konstruktion mit ausgezeichneten Strahlen abgeleitet (→ **Textkasten 16: Einführung der strahlengeometrischen Konstruktion**).

6 Evaluation des Unterrichtskonzepts

Wir haben etwa acht Monate nach den oben beschriebenen Micro-Teaching-Befragungen ein Drittel der Lernenden in Einzelinterviews zur Ausbreitung von Licht und zum physikalischen Sehprozess befragt. Selbst schwache Schüler waren nach dieser langen Zeit noch in der Lage, optische Problemstellungen mit dem Sender-Streuungs-Empfänger-Konzept fachlich angemessen zu argumentieren. In Vergleichsinterviews mit konventionell unterrichteten Post-Optik-Klassen gelang dies häufig nicht einmal Schülern mit besten Noten in Physik direkt nach dem Unterricht.

Die so entstandenen Unterrichtsmaterialien wurden bisher in sechs Pilotklassen eingesetzt. Die ersten Auswertungen unseres Testinstruments, das wir vor und nach dem Unterricht eingesetzt haben, deuten gute Ergebnisse an. Detailauswertungen sind allerdings noch nicht erfolgt. In den Abschlussdiskussionen mit den Schülerinnen und Schülern, die nach dem Optikunterricht mit diesem Lehrgang geführt wurden, war die Reaktion auf das Schülermaterial äußerst positiv. Als zentralen Punkt haben die Lernenden das Sender-Empfänger-Streuungsmodell erkannt, das sich durch den gesamten Kurs zieht. Als besonders positiv wurde von Schülerseite die gut verständliche Sprache

des Schülermaterials hervorgehoben. Ein ähnliches Bild lieferte diesbezüglich die Reflexionssitzung mit den unterrichtenden Lehrkräften. Neben dem konsequenten Zugang zu den Phänomenen über das Nachverfolgen der Lichtwege wurde vor allem auch die Einfachheit der eingesetzten Materialien bzw. Experimente gelobt. Das Resümee der Beteiligten an der Umsetzung dieses Optikurses in den sechs Pilotklassen kann also als durchwegs positiv zusammengefasst werden und die Nachfrage nach den Materialien ist inzwischen merklich angestiegen. ■

Literatur

- [1] Haagen-Schützenhöfer, C., & Holzmeier, S. (2013, September). *Wodurch unterscheiden sich Physikschulbücher und forschungsbasiert entwickelte Lernmaterialien zum Themenbereich geometrische Optik?* ÖGFD Poster Symposium, Klagenfurt.
- [2] Haagen-Schützenhöfer, C. (2014). *Theory-Practice Gap: The relevance of students' conceptions for teaching geometrical optics in practice*. In Dvorak, L.; Koudelková V. (Hg.), ICPE-EPEC Conference 2013: Active learning – in a changing world of new technologies. Prague. (S.144-152)
- [3] Wiesner, H.; Schecker, H. & Hopf, M. (Hrsg.) (2013): *Physikdidaktik kompakt*. Hallbergmoos: Aulis.
- [4] Galili, I., & Hazan, A. (2000). *Learners'*

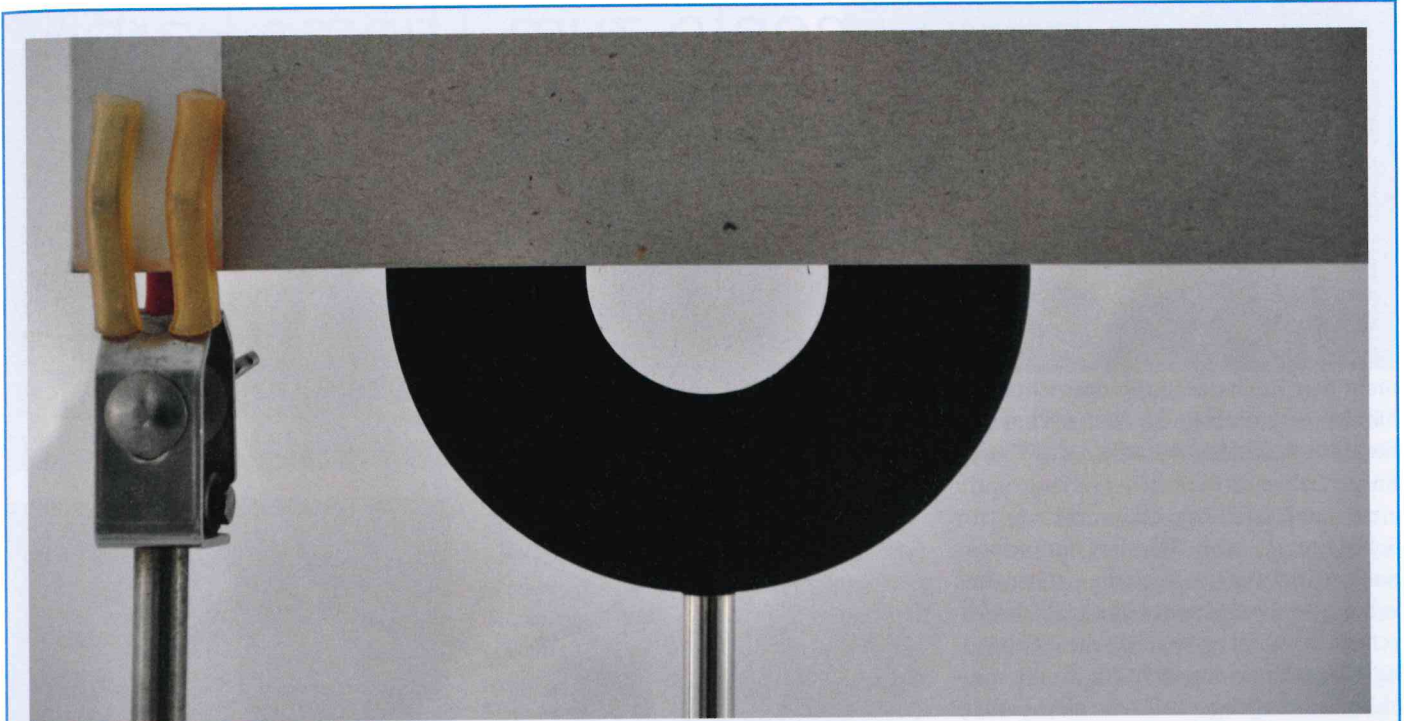


Abb. 14: Wie verändert sich das Bild, wenn ein Teil der Linse abgedeckt wird?

Textkasten 14: Abbildungsvorgang bei Sammellinsen

knowledge in optics: interpretation, structure and analysis. *International Journal of Science Education*, 22(1), 57-88.

[5] Wiesner, H., Engelhardt, P., & Herdt D. (1995). *Unterricht Physik, Optik I: Lichtquellen, Reflexion*. *Unterricht Physik: Vol. 1*. Köln: Aulis Verlag Deubner & Co.

[6] Wiesner, H. (1995). *Physikunterricht an Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten orientiert*. *Unterrichtswissenschaft*, 23(2), 127-145.

[7] Wiesner, H., Engelhardt, P., & Herdt D. (1996). *Unterricht Physik, Optik II: Brechung, Linsen*. *Unterricht Physik: Vol. 2*. Köln: Aulis Verlag Deubner & Co.

[8] Herdt, D. *Einführung in die elementare Optik. Vergleichende Untersuchung eines neuen Lehrgangs*. Essen: Westarp-Wissenschaftsverlag, 1990.

[9] Haagen-Schützenhöfer, C., Rottensteiner, J., & Fehring, I. (2013). *Unterrichtsmaterialien für den Anfangsoptikunterricht (Sekundarstufe I)*, AECCP, Universität Wien.

[10] Dvořák, L. & Haagen-Schützenhöfer, C. (2015). *Eine optische Bank zum Selbermachen und Experimente dazu*. Im aktuellen Heft der Praxis der Naturwissenschaften Physik.

Anschrift der Verfasserin
 Univ.-Ass. Prof. Dr. Claudia Haagen-Schützenhöfer, Institut für Physik,
 Fachbereich Physikdidaktik & Fachdidaktikzentrum Physik, Karl-Franzens-Universität Graz,
 Universitätsplatz 5, A8010 Graz, Österreich,
 E- Mail: claudia.haagen@uni-graz.at



Abb. 15: Ungestörte Durchdringung von Lichtkegeln verschiedener Leuchtflecken

Textkasten 15: Leuchtfleck-zu-Bildfleck-Abbildungsschema bei Sammellinsen

Textkasten 16: Einführung der strahlengemmetrischen Konstruktion

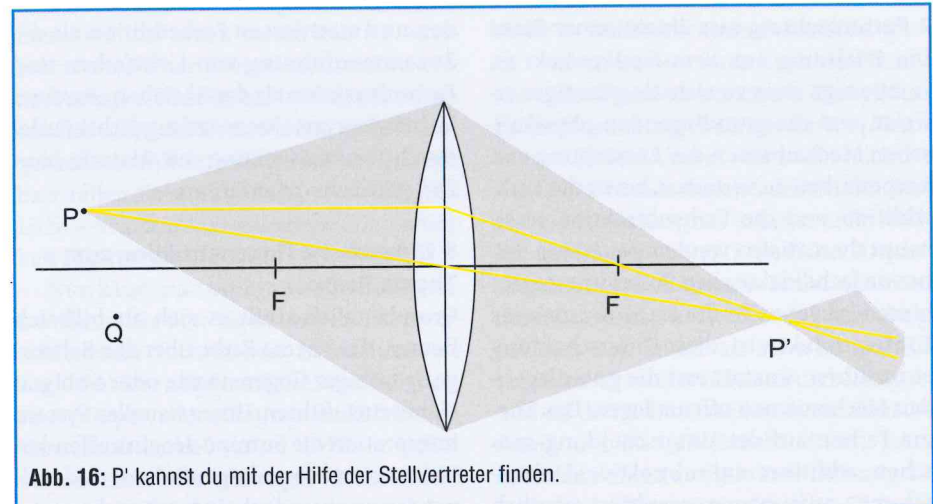


Abb. 16: P' kannst du mit der Hilfe der Stellvertreter finden.