

# Ein Blick in den Spiegel – Einblick in die Optik

Roger Erb, Lutz Schön

Universität Gesamthochschule Kassel

(aus: Hans E. Fischer (Hrsg.). *Handlungs- und kommunikationsorientierter Unterricht in der Sek. II*. Bonn : F. Dümmers Verlag, 1996)

---

## Vorbemerkung

Seit einigen Jahren arbeiten wir in Kassel an der Entwicklung eines Curriculums zur Optik, das mit dem Anfangsunterricht in Physik in der Mittelstufe beginnt und bis in die Grund- und Leistungskurse der Oberstufe reicht. Im Zentrum dieses Curriculums steht das Sehen: Während in der Mittelstufe zunächst die unmittelbar, dann die im Spiegel und im Wasser und durch Glas hindurch gesehenen Dinge Ausgangspunkt der Untersuchung von Lichtausbreitung, Reflexion und Brechung sind, wird in der Oberstufe die Betrachtung modifiziert und nun die Beziehung zwischen Sender und Empfänger untersucht und schließlich durch einen abstrakten Formalismus beschrieben.

Es ist uns bewusst, dass die *vollständige* Realisierung dieses Unterrichtsvorschlages heute noch viele schulorganisatorische Probleme aufwirft. Es sind jedoch auch einzelne Teile des Curriculums in den Physikunterricht integrierbar. Hierzu haben wir an verschiedenen Stellen Vorschläge unterbreitet [Sch84, Erb92, Sch93b, Sch94, Erb94, Erb95, ES95]. Auch in dem Schulbuch, an dem wir mitarbeiten, konnten zahlreiche Elemente verwirklicht werden [BSS94, BSS95].

Eine besondere Möglichkeit "unsere" Optik zu unterrichten, bietet sich in Grundkursen der Oberstufe. So sahen beispielsweise die Kursstrukturpläne des Landes Hessen<sup>1</sup> einen Halbjahreskurs in Klasse 11 vor, der "einerseits unterschiedliche Voraussetzungen der Schüler so weit wie möglich ausgleichen, andererseits eine den Fähigkeiten und Interessen der Schüler entsprechende Wahl von Grund- und Leistungskursen im Kurssystem zu ermöglichen [soll]. ...Empfohlen wird für das Halbjahr 11/I das Kursthema: 'Modellvorstellungen von Licht und Materie'" [Lan79]. Für diesen Lehrplan haben wir in Kassel schon 1979 Vorschläge erarbeitet, die sich allerdings grundlegend von unseren heutigen unterscheiden [Sch81a, Sch81b].

Mit dem vorliegenden Beitrag wollen wir einen Unterrichtsvorschlag für einen etwa halbjährigen Kurs in der Oberstufe zur Diskussion stellen, der Elemente der Mittelstufenoptik aufgreift und bis hin zur modernen Modellvorstellung vom Licht führt. Den roten Faden bildet dabei die Reflexion: vom sicht- und erlebbaren Spiegelbild bis hin zum Reflexionsgitter, an dem Beugung beobachtet wird und die erarbeitete Modellvorstellung überprüft wird.

---

<sup>1</sup>Leider ist in den neuen Kursstrukturplänen von 1994 des Landes Hessen die Optik nicht mehr vorgesehen.

Wenn im folgenden einzelne Unterrichtsabschnitte sehr detailliert geschildert werden, so nicht mit dem Anspruch, dass der Unterricht genau so abzulaufen habe, sondern um dem Leser neben den inhaltlichen Angaben ein anschauliches Bild vom möglichen Unterricht zu geben. Diese unterrichtsnahen und deshalb lebendig geschriebenen Abschnitte des Beitrages sind serifenlos gesetzt.

Um den Umfang des Beitrages nicht zu sehr auszudehnen, werden wir im Abschnitt vom "Sehen zur Optik" lediglich die Spiegelbilder am ebenen Spiegel ausführlich behandeln, die Bilder beim Wölb- und Hohlspiegel dagegen nur skizzieren.

## 1 Vom Sehen zur Optik – Spiegelbilder

Die Optik, so wie sie in der Schule gelehrt wird, hat das Sehen verlernt. Allzu schnell sollen wir dem Augenschein nicht mehr trauen dürfen, und allzu schnell müssen wir statt dessen Lichtstrahlen verfolgen, abknicken und sich schneiden lassen und sollen uns daraus mit Bleistift und Lineal Bilder machen. Dabei hat noch niemand einen Lichtstrahl gesehen! Dies wird auch in den Lehrbüchern der Physik betont, denn der (physikalische) Lichtstrahl ist lediglich ein Gedankenkonstrukt, ein Modell und ein Hilfsmittel.

Wir wissen, und selbstverständlich weiß dies auch der Physiker, dass wir in allen Richtungen Dinge sehen, helle und dunkle, bunte und graue; es sei denn, wir schließen die Augen. Zu den sehr hellen Dingen, die wir sehen können, gehören die Sonne und die vielen Lampen. Diese blenden uns vielleicht, aber Licht sehen wir deshalb dennoch nicht: wir lassen uns von der Sonne blenden oder sehen die Straßenlaterne.

Es sei denn, wir sagen, dass alles, was wir sehen, Licht sei: Wir sehen nicht das Buch vor uns, sondern Licht, das von dort in unsere Augen fällt. Damit haben wir allerdings unsere bunte Welt verloren, sie wird wegdefiniert, sie verliert ihre Realität. Die einzige Realität, von der wir mit dem Auge Kunde erhalten, ist dann das Licht.<sup>2</sup>

Aber was das Licht nun sei, damit hat die Physik die größten Schwierigkeiten. Gerade die moderne Physik gibt die Vorstellung von einer naiven Realität des Lichtes auf zugunsten einer Betrachtung, die nur Sender und Empfänger kennt und über die Ereignisse dazwischen lediglich Wahrscheinlichkeitsaussagen macht.

Mit unseren Vorschlägen zur Behandlung der Optik im Physikunterricht wollen wir dem Sehen der Welt da draußen seinen gebührenden Platz einräumen. Das sehende Auge und die Dinge – also Empfänger und Sender – sind die entscheidenden Größen, und um die Aufklärung der Beziehungen zwischen dem Gesehenen und den Dingen wird es uns gehen.

---

<sup>2</sup>Auf die erkenntnistheoretische Diskussion zur Problematik Wahrnehmung und Wirklichkeit soll hier nicht eingegangen werden. Eine gründliche Auseinandersetzung (aus konstruktivistischer Sicht) findet man beispielsweise bei Watzlawik [Wat81]. Ein unmittelbarer Bezug dieser Diskussion zu Fragen der Bildung wird bei Rauschenberger [RS89] hergestellt.

## 1.1 Bevor es losging

Bei der Erprobung dieser Unterrichtseinheit ergab sich unmittelbar vor Unterrichtsbeginn durch eine zufällige, aber eigentlich ganz alltägliche Erfahrung eine reizvolle Hinführung zur Optik:

Das herrliche Sonnenwetter draußen zaubert helle Flecken und schemenhafte Schatten an Wände und Decke des Physikraumes. Einige haben ihren unverrückbaren Ort, andere huschen über die Decke, von links nach rechts, von rechts nach links. Die bewegten Flecken sind deutlicher, und das Fenster mit seinem breiten Kreuz ist gut erkennbar. Der Straßenverkehr vor den beiden Fenstern ist nicht zu überhören.

Eine Schülerin schaut nach draußen und berichtet: Ein Auto fährt vorbei und blendet mich mit einer Spiegelung der Sonne. Im selben Moment sehen wir das Fensterbild mit dem Schatten der Schülerin über die Wände flitzen. In welcher Richtung fuhr das Fahrzeug? Nach links! Der Schatten machte genau die Gegenbewegung. Jetzt kommt ein weißes Auto von rechts. Tatsächlich: ein heller Schein flitzt von links nach rechts durch den Raum. Ein dunkelblauer Wagen lässt dagegen nur einen schwachen Schein über die Decke laufen.

Die spontane Beobachtung – ohne Hilfen oder Kommentare meinerseits<sup>3</sup> – durch einen Schüler erklärt, indem er auf den Zusammenhang zwischen den bewegten Lichtflecken und der Bildentstehung bei der Lochkamera hinweist.

## 1.2 Der Blick in die Spiegelwelt

Es mag etwas ungewöhnlich sein, im Physikunterricht der Oberstufe an den Beginn der Unterrichtseinheit zum Thema Spiegel die Rezitation eines Gedichts zu stellen. Wir haben diesen Weg gewählt, um die Schüler zu öffnen für Eindrücke und Erfahrungen, die sich nicht auf die Wiedergabe des in der Mittelstufe Angelernten beschränken. Im Gedicht von Christian Morgenstern wird eine nicht ganz leicht zu verstehende Situation am Spiegel geschildert, die zum Ausprobieren, also zur Handlung auffordert; in der "Anmerkung", die Morgenstern dem "Lied" beigefügt hat, wird dazu eine ausführliche "Versuchsanleitung" gegeben.

---

<sup>3</sup>Es sei hier erlaubt, die Lehraktivität in Ichform zu beschreiben. Es entspricht dies der geschilderten Unterrichtssituation besser als "der Lehrer ...". Zugleich kommt darin zum Ausdruck, dass hier eine sehr offene Lernsituation entstand, die den Lehrer zum Beteiligten und nicht zum Beherrschenden machte.

Christian Morgenstern

**Das Lied vom blonden Korke**

Ein blonder Korke spiegelt sich  
in einem Lacktablett.

Allein er sah' sich dennoch nicht,  
selbst wenn er Augen hätt'.

Das macht dieweil er senkrecht steigt  
zu seinem Spiegelbild.

Wenn man ihn freilich seitwärts neigt,  
zerfällt, was oben gilt.

Oh Mensch, gesetzt, du spiegelst dich  
im, sagen wir, im All!

Und senkrecht! – Wärest du dann nich  
ganz im demselben Fall?

**Anmerkung:** Wer dieses Lied nicht sogleich begreift, der nehme einen Kork, versehe ihn unten mit etwas erweichtem Bienenwachs, und drücke ihn gegen den nächstbesten Wandspiegel, so daß er auf dessen Fläche kleben bleibt. Hierauf rücke er sich einen Sessel davor, setze sich und "fühle" sich nun in die Sache "ein".

(aus: Galgenlieder)

Wir folgen Morgensterns Anregung, legen einen Spiegel (Lacktablett) auf den Boden und stellen einen Sektkorken darauf. Einzelne gehen zum Spiegel und überprüfen, was wohl der Korke sähe, wenn er Augen hätte. Tatsächlich: er sähe sich selbst nicht, auch das Neigen des Kopfes reicht noch nicht, erst wenn man sich beugt, kann man sich selber sehen.

Bald steht eine ganze Gruppe dicht um den Spiegel und schaut nach unten: Der Blick geht tief hinunter, und wir sehen uns kopfüber nach unten hängen. Ist der Kopf dort unten nicht viel weiter unter unseren Füßen als der wirkliche Kopf über diesen?

Das kann doch gar nicht sein, sagen die "Physiker"! Aber ich sehe es doch so, wird diesen entgegnet. Ja, wir sind es eben nur nicht gewohnt, nach unten schauend Entfernungen zu schätzen. Sofort kommt ein Vorschlag zur Überprüfung: Der Spiegel wird aufgerichtet, ein Schüler liegt am Boden mit den Füßen am Spiegel, hebt den Kopf und schaut sich im Spiegel an. Obwohl einige diese Lage probieren, sind wir nicht ganz sicher, ob tatsächlich Kopf und Spiegelkopf gleichweit vom Spiegel entfernt sind.

Die sogenannte Mondtäuschung – dicht am Horizont erscheint der Mond viel größer als hoch oben am Himmel, obwohl beide von derselben Streichholzspitze verdeckt werden können! – ist

ein eindrucksvolles Beispiel aus dem Alltag, das deutlich macht, dass die menschliche Größen- bzw. Entfernungswahrnehmung tatsächlich nicht eindeutig ist, sondern – wie in diesem Fall – von der Blickrichtung abhängt<sup>4</sup>.

Der Spiegel steht bereits vertikal am Boden. Vor ihn wird ein großes Blatt weißes Papier gelegt, das im Spiegel weiterzugehen scheint. Der Raum wird jetzt verdunkelt, und ich zünde eine Kerze an. Langsam nähere ich mich dem Spiegel und setze die Kerze vorsichtig auf das Papier. Sie wird seitlich hin und her geschoben, mal näher zum Spiegel, mal weiter weg. Schweigend schauen alle zu. Eine zylindrische, hohe Vase wird neben die Kerze gestellt. Auch sie wird langsam in verschiedene Positionen gebracht, mal nah bei der Kerze, neben, vor und dahinter (Abbildung 1).

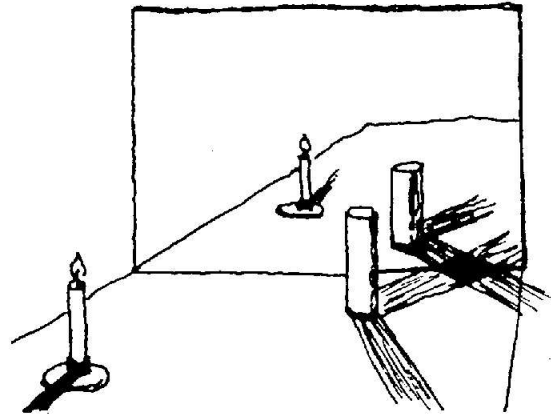


Abbildung 1: Kerze und Spiegelkerze erzeugen an der Vase verschiedene Schatten

"Am meisten hat mich überrascht, dass die gespiegelte Kerze einen Schatten von der Vase vor dem Spiegel wirft!" ist die erste Äußerung, die das Schweigen bricht. Sofort kommt ein lebhaftes Gespräch in Gang: Der Schatten der gespiegelten Vase, der von der gespiegelten Kerze gemacht wird, fällt bis in die wirklich Welt vor dem Spiegel! Umgekehrt fällt der Schatten der "echten" Vase in die "Spiegelwelt" hinein.

"Am meisten hat mich überrascht, dass die gespiegelte Kerze einen Schatten von der Vase vor dem Spiegel wirft!" ist die erste Äußerung, die das Schweigen bricht. Sofort kommt ein lebhaftes Gespräch in Gang: Der Schatten der gespiegelten Vase, der von der gespiegelten Kerze gemacht wird, fällt bis in die wirklich Welt vor dem Spiegel! Umgekehrt fällt der Schatten der "echten" Vase in die "Spiegelwelt" hinein.

Wie kommt es zu dem viereckigen, fast schwarzen Schatten nahe am Spiegel? "Da schneiden sich doch zwei Schatten: Schatten plus Schatten gleich schwarzer Schatten!" Widerspruch: "Kein Licht und kein Licht kann doch nicht noch weniger Licht geben?!" "Nein, dort scheint weder die Kerze noch die gespiegelte Kerze hin, darum ist es dort finster!"

"Ja, und darum sind einige Schatten auch heller als andere: *eine* der beiden Kerzen leuchtet eben doch noch dahin!"

Aus der Beobachtung, dass selbst die Kerze einen Schatten wirft, entsteht die Frage, ob auch die Flamme der Kerze einen Schatten wirft. Fast die ganze Gruppe ringt um eine Lösung dieser Frage, experimentell und theoretisch. Der Aufbau wird verändert, und es wird gezielt nach dem Schatten, den die gespiegelte Kerze von der wirklichen auf das Papier wirft, gesucht. Der Schatten der Flamme muss in Höhe der beiden Flammen sein, also wird dorthin ein Schirm gehalten und mit dem Auge gepeilt. Auf experimentellem Weg wird keine Lösung gefunden. Das Nachdenken

<sup>4</sup>Die Mondtäuschung beruht auf einer unterschiedlichen Entfernungswahrnehmung in horizontaler bzw. vertikaler Richtung: Je größer der Winkel zwischen Blickrichtung und Horizontale ist, desto kleiner schätzen wir den Abstand des beobachteten Objektes. Bei gegebenem Sehwinkel erscheint uns deshalb der Mond am Himmel kleiner als am Horizont [Sch93a].

lässt einen Schatten erwarten: Wenn Flamme und Spiegelflamme genau in einer Linie stehen, ist von dort aus nur eine Flamme, nämlich die "echte" zu sehen, etwas seitlich davon jedoch beide Flammen, also müsste es dort heller als in der Verlängerung der Verbindungslinie sein.

### 1.3 "Der Ebene Spiegel ist ein Fenster in die Spiegelwelt"

Mit dem Verschieben der Kerze oder der Vase seitlich über den Rand des Spiegels hinaus setze ich einen weiteren Impuls. Warum wirft die Vase noch Schatten, obwohl sie doch gar nicht mehr vor dem Spiegel steht?

"Wir sehen von hier noch die Spiegelkerze, die diesen Schatten erzeugt", ist die Antwort einiger Schülerinnen und Schüler. Sie sitzen auf der gegenüberliegenden Seite.

Die Kerze wird nun an ganz verschiedenen Stellen im Raum gebracht, und dann wird nach der "Spiegelkerze" gesucht. Auch wenn nicht alle die "Spiegelkerze" sehen können, so ist sie doch da, nämlich drüben in der "Spiegelwelt". Dazu muss sich die Kerze allerdings *vor* der Spiegelebene – das ist die Ebene, die durch allseitige Vergrößerung des Spiegels entstehen würde – befinden.

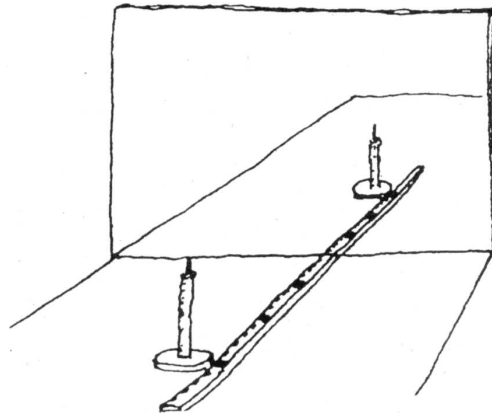
"Spiegelwelt", dieses Stichwort löst eine Diskussion über den Realitätsgehalt dieser sichtbaren Welt aus. Ist sie tatsächlich räumlich oder nicht doch ein flaches Bild auf dem Spiegel? Mit einer zweiten, gleichen Kerze und einer weiteren Vase wird die Szene hinter dem Spiegel so aufgebaut wie vor ihm. Dann wird der Spiegel langsam entfernt. Tatsächlich ist der Raumeindruck gleich, und die Schatten verlaufen ebenso wie zuvor in der Spiegelwelt. Die Spiegelwelt ist so räumlich wie die wirkliche Welt: "Der Spiegel ist ein Fenster in die Spiegelwelt!"

### 1.4 Eingriff in die Spiegelwelt

"Ist die Spiegelkerze *genau* so weit vom Spiegel entfernt wie die richtige Kerze?" Als Impuls lege ich einen Zollstock von der Kerze zum Spiegel, zugleich liegt damit ein Zollstock in der Spiegelwelt (Abbildung 2 auf der nächsten Seite). "10, 20, 30 cm steht die Kerze vor dem Spiegel und 10, 20, 30 cm steht die Spiegelkerze hinter dem Spiegel!" lese ich am Zollstock und dem gespiegelten Zollstock ab. Dieser einfache und einsehbare Messvorgang löst eine heftige, geradezu unversöhnliche Diskussion unter den Mitschülern aus, die sich in Gegner und Befürworter der Messung spalten. So darf man doch nicht messen! Woher haben wir die Sicherheit, dass der Maßstab auch in der Spiegelwelt korrekt ist<sup>5</sup>? Die Befürworter weisen auf die sichtbare und völlig normale Perspektive des Maßstabes hin: Jedes Objekt wird doch "nach hinten" schmaler! Aber, ist die Perspektive wirklich genau gleich oder nur ungefähr? Reich der visuelle Eindruck aus?

---

<sup>5</sup>Im Hohl- und im Wölbspiegel sieht das Bild des Maßstabes nicht mehr nach "normaler" Perspektive aus. Dort wird man nicht so einfach messen dürfen.



**Abbildung 2:** Der Abstand zwischen Kerze und Spiegelkerze kann mit einem Zollstock gemessen werden

Es bleiben grundsätzliche Zweifel: Das Spiegelbild ist doch nicht wirklich da, kann es dann überhaupt einen Abstand haben<sup>6</sup>? Was ist überhaupt Wirklichkeit? ...

Ich schlage eine Unterscheidung zwischen einer Wirklichkeit, die uns mit den Augen zugänglich ist, und einer Wirklichkeit, die uns mit dem Tastsinn zugänglich ist, vor:

Die Spiegelwelt ist nur eine "Sehwelt" und keine "Tastwelt".

Nach längerer Diskussion können wir uns einigen:

Die Dinge in der Spiegelwelt befinden sich soweit hinter dem Spiegel, wie die wirklichen Dinge vor dem Spiegel sind.

Als dieses Spiegelgesetz als Bild (in Draufsicht) an der Tafel entsteht, entdecken einige Schüler sofort das aus der Mittelstufe bekannte Reflexionsgesetz: Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel.

Insbesondere weil über den "Realitätsgehalt" der Spiegelwelt so heftig diskutiert wurde, bildete das Gedicht von Conrad Ferdinand Meyer einen geeigneten Abschluss dieser Unterrichtseinheit. Auf diese Weise wurde noch einmal die Brücke von der Physik hin zur alltäglichen Wahrnehmung, hier überhöht durch das Gedicht geschlagen:

---

<sup>6</sup>Man kann einen zweiten, identischen Maßstab so hinter den Spiegel legen, dass er bei etwas seitlicher Beobachtung mit dem gespiegelten teilweise zur Deckung kommt.

Conrad Ferdinand Meyer

### **Möwenflug**

Möwen sah um einen Felsen kreisen  
Ich in unermüdlich gleichen Gleisen,  
Auf gespannter Schwinge schweben bleibend,  
Eine schimmernd weiße Bahn beschreibend,  
Und zugleich im grünen Meeresspiegel  
Sah ich um die selben Felsenspitzen  
Eine helle Jagd gestreckter Flügel  
Unermüdlich durch die Tiefe blitzen.  
Und der Spiegel hat solche Klarheit,  
daß sich anders nicht die Flügel hoben  
Tief im Meer, als hoch in Lüften oben,  
Daß sich völlig glichen Trug und Wahrheit.  
Allgemach beschlich es mich wir Grauen,  
Schein und Wesen so verwandt zu schauen,  
Und ich fragte mich, am Strand verharrend,  
In gespenstisches Geflatter starrend:  
Und du selber? Bist du echt beflügelt?  
Oder nur gemalt und abgespiegelt?  
Gaukelst Du im Kreis mit Fabeldingen?  
Oder hast du Blut in deinen Schwingen?

Wir haben in dieser Unterrichtseinheit die Komplexität des Phänomens nicht durch abstrakte Vereinfachungen ersetzt, sondern diese möglichst lange bewahrt. Und trotzdem haben wir verstanden!

Die offene Situation, die durch wenige Impulse hergestellt war, und die Ruhe, mit der alle Überlegungen und Vorschläge in der Gruppe diskutiert und erprobt wurden, sind Voraussetzungen für diese Art des Verstehens.

## **1.5 Hohl- und Wölbspiegel**

Für diesen Unterrichtsabschnitt haben wir schon vor einiger Zeit einen veränderbaren Wölb- und Hohlspiegel entwickelt, über den bereits an anderer Stelle berichtet wurde [Sch84]. Wie in der vorangegangenen Unterrichtseinheit ist es auch hier unser Ziel, die Schülerinnen und Schüler mit einer Wahrnehmung zu konfrontieren, die an sich (fast) alltäglich ist, die jedoch



durch Verfremdung wieder *frag-würdig* wird. Hierzu eignet sich der genannte Folienspiegel, weil er nicht ein starrer Wölb- bzw. Hohlspiegel ist, sondern weil sein Krümmungsradius, d.h. seine Brennweite kontinuierlich verändert werden kann. Auf diese Weise werden aus den bekannten statischen Spiegelbildern dynamische Bilder.

### 1.5.1 Entstehung der Spiegelfläche

Der Spiegel besteht aus einer versilberten dünnen Folie, die über einen kreisförmigen Ring gelegt ist und gleichmäßig gespannt werden kann. Wenn zunächst der ungespannte Spiegel gezeigt wird, ist die schlaffe und faltenreiche Folie als silbrige Oberfläche zu erkennen. Wird dann die Folie gestrafft, werden deutliche Bilder sichtbar, die sofort als Spiegelbilder erkannt werden. Vermutlich muss darauf erst aufmerksam gemacht werden: Zunächst hat der Beobachter die knitterige Oberfläche im Blick, also den Blick auf den Ort des Spiegels fixiert. Wenn dann das Spiegelbild sichtbar wird, schaut er in einen Raum, fixiert also einen anderen Tiefenbereich als zuvor. Dabei wird, wenn die Spiegelfläche störungsfrei ist, diese völlig unsichtbar. Mackensen hat diese Beobachtungen auf eine fast lyrische Formel gebracht – *Greifbares wird unsichtbar, Sichtbares wird ungreifbar* –, deren Gehalt mit Oberstufenschülern durchaus diskutiert werden kann [Mac82].

### 1.5.2 Wölbspiegel

Hinter der Spiegelfolie befindet sich ein Hohlraum, in den Luft eingeblasen werden kann. Dadurch wölbt sich die Folie langsam zunehmend nach vorn. Der "Seinhalt" im Spiegel nimmt dabei zu: Der Beobachter sieht vom Rand her mehr und mehr Dinge "in den Spiegel kommen", die immer kleiner werden und sich zunehmend zu entfernen scheinen. Eine breite Messlatte vor dem Spiegel macht es besonders deutlich: In dieser Spiegelwelt laufen Parallelen – anders als beim ebenen Spiegel – schneller aufeinander zu, als in der realen Welt. Die Perspektive ändert sich: Das Unendliche rückt näher ran, es scheint einen endlichen Abstand hinter der Spiegelfläche zu haben! Wo ist das Bild? Ist es, wie der erste Eindruck uns glauben macht, wirklich weiter weg? Oder doch näher dran? Die notwendige Entscheidung löst meist eine intensive Auseinandersetzung mit dem Phänomen aus. Wenn der Beobachter sich ein wenig bewegt<sup>7</sup>, stellt fest:

In der Wölbspiegelwelt sind die Bilder dichter hinter der Spiegelfläche als beim ebenen Spiegel.

Es kann an dieser Stelle im Unterricht auf eine genaue Analyse verzichtet werden, weil darauf

<sup>7</sup>Mit der "Kopfwackeltechnik" kann der Beobachter die relative Entfernung zweier Objekte bestimmen: Der fernere der beiden Gegenstände bewegt sich in Richtung der Kopfbewegung mit. Gleichweit entfernte Dinge behalten ihre relative Position bei.

im Abschnitt "Geometrische Optik" eingegangen werden soll, nachdem die Konstruktionsvorschriften für Lichtwege erarbeitet wurden.

### 1.5.3 Hohlspiegel

Wird die Luft aus dem Hohlraum des Spiegels langsam abgesaugt, wölbt sich die Folie nach innen; der Hohlspiegel entsteht. Jetzt sieht sich der Betrachter langsam größer werdend: Rückt das Bild näher? Dann schwimmt sein Spiegelbild und ist bei noch stärkerer Wölbung nach innen bald wieder zu sehen, dann allerdings kopfstehend/seitenverkehrt und wieder kleiner werdend. Der Maßstab zeigt nun (im Nahbereich) das umgekehrte Verhalten: In der Hohlspiegelwelt laufen die Parallelen nicht zusammen, sondern auseinander! Hier scheint das Unendliche noch ferner zu sein als in der normalen Welt. Weil sich diese Parallelen sogar **hinter** (!! dem (realen) Beobachter schneiden können, scheint das Unendliche wieder im Endlichen zu liegen, aber auf der "falschen" Seite<sup>8</sup>!

Mit einem kleinen Gegenstand, der am Bildort aufgestellt wird, findet man (wieder mit der "Kopfwackelmethode"): Bei einem stark gewölbten Hohlspiegel erscheint das kopfstehend/seitenverkehrte Bild zwischen Beobachter und Spiegel. Dieses Bild kann auf einem Schirm aufgefangen werden.

Damit diese geradezu irritierenden Eigenschaften des Hohlspiegels nicht zu einer Verwirrung führen, sollten den Schülerinnen und Schülern viel Zeit für eigene Erfahrungen gelassen werden. Wenn diese Erfahrungen präzise formuliert werden, ist bereits viel gelernt worden. Die konstruktive Analyse erfolgt auch hier erst später.

## 2 Geometrische Optik

Nachdem im ersten Teil das Sehen Ausgangspunkt unserer Überlegungen war, wollen wir in diesem Teil im Sinne eines Spiralcurriculums uns ein zweites Mal dem Spiegel zuwenden, wobei nun die Ausbreitung des Lichtes genauer untersucht werden soll.

Das konstituierende Phänomen der geometrischen Optik ist die geradlinige Ausbreitung des Lichtes. Zugleich ist diese aber mit der alltäglichen Erfahrung des Sehens so eng verbunden, dass es schwierig ist, diesen wichtigen Sachverhalt Schülern gegenüber zu problematisieren. Wir wollen im Unterricht hierzu nicht – wie oft die Regel – schmale Lichtbündel oder einen Laser"strahl" verwenden, sondern versuchen, den Weg des Lichtes anhand von Schattengrenzen zu verfolgen.

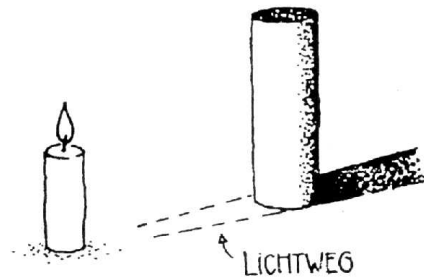
---

<sup>8</sup>Aus der Mathematik kennen die Schüler ein ähnliches Verhalten von Unstetigkeitsstellen, beispielsweise der Funktion  $f(x) = (x - 1)^{-1}$ .

## 2.1 Lichtausbreitung

Die Grenzen des Schattens, den ein zylindrischer Körper auf den ebenen Boden wirft, sind gerade, die Lichtbündelgrenzen und damit die Lichtwege sind es somit auch (Abbildung 3). Was aber bedeutet "gerade" überhaupt? Wir benötigen zur Überprüfung etwas, das vom Sehen und Leuchten unabhängig ist.

Ein gespannter Faden stellt die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten dar, sein Verlauf wird "gerade" genannt. Der Vergleich mit der Lichtausbreitung zeigt, dass nach dieser Definition auch die Schattengrenzen gerade sind:



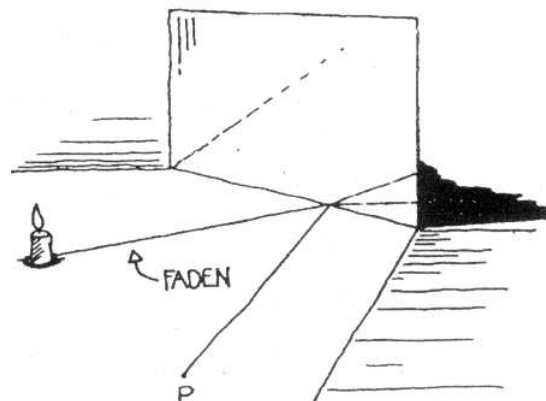
**Abbildung 3:** Lichtweg entlang und in Verlängerung der Schattengrenze

Das Licht nimmt zwischen zwei Punkten einen geraden Weg.

(Tatsächlich gibt in dieser zweidimensionalen Betrachtungsweise eine Schattengrenze nur die Projektion eines Lichtweges wieder, wahre Lichtwege enden an jeder Stelle der Schattengrenze.)

## 2.2 Reflexion und kürzeste Wege

Der Lichtweg von einer Kerze über einen ebenen Spiegel zu einem Punkt  $P$  vor dem Spiegel ist allerdings nicht gerade, sondern hat am Spiegel einen "Knick", wie der Schatten eines zwischen der Kerze und dem Spiegel stehenden Zylinders zeigt. Aber auch hier – wie schon bei der geradlinigen Ausbreitung – gibt es nur genau einen Lichtweg zwischen der Kerze und  $P$  über den Spiegel, und dieser ist der kürzeste von allen denkbaren. Dies ist unmittelbar zu sehen an einem zwischen dem Ort der Kerze und  $P$  festgehaltenen Faden, den man über den Spiegel spannt und dort hin und her bewegt (Abbildung 4).



**Abbildung 4:** Gespannter Faden bei der Suche des kürzesten Weges

Dies führt zu der Formulierung des Prinzips des kürzesten Lichtweges:

Das Licht nimmt zwischen zwei Punkten den kürzesten Weg (im Vergleich zu möglichen Nachbarwegen).

### 2.3 Gebogene Spiegel

Mit dem nächsten Schritt sollen Lichtwege am gebogenen Spiegel untersucht werden. Die Schüler betreten den Raum, in dem die Stühle in Form eines Halbkreises aufgestellt worden sind. Auf der freien Fläche steht aufrecht ein 30 x 50 cm großer ebener Spiegel, davor eine Kerze. Die Vorhänge werden vor die Fenster gezogen, um den direkten Lichteinfall zu vermeiden, und dann wird die Kerze angezündet. Wir erinnern uns daran, dass im Spiegel ein Bild der Kerze zu sehen ist, und dass diese "Spiegelkerze" genauso weit hinter der Spiegelfläche ist, wie die "richtige" Kerze davor. Dies wird an der gegebenen Situation besonders deutlich:

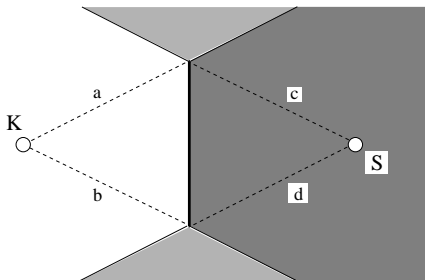


Abbildung 5: Ebener Spiegel

Die Kerze wirft einen Lichtschein auf dem Boden und der Spiegel in diesem Schein einen Schatten (Abbildung 5). Der Ort der Kerze  $K$  ist dort, wo sich die rückwärtig verlängerten Grenzen ihres Lichtbündels ( $a + b$ ) schneiden. Doch es ist noch ein zweiter Lichtschein zu erkennen, denn das Licht der Kerze wird am Spiegel reflektiert. Oder, anders gesagt, die Spiegelkerze leuchtet in den Raum vor dem Spiegel. Am Schnittpunkt der Verlängerungen dieser Bündelgrenzen ( $c + d$ ) ist der Ort der Spiegelkerze  $S$ . Das ist für die Schüler nicht überraschend, denn die Lichtbündel erscheinen aus der

Aufsicht symmetrisch, wie es nach der Lage von Kerze und Spiegelkerze auch zu erwarten war. Neu ist aber, dass ich hier einen Spiegel aus biegsamen Plexiglasmaterial verwendet habe.

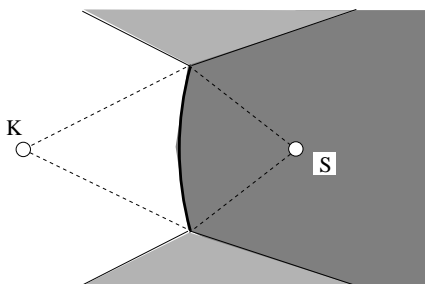


Abbildung 6: Konvex gebogener Spiegel

Ein Schüler soll nun den Spiegel zunächst nach hinten biegen, die linke und rechte Kante also von uns weg. Hierbei gibt es eine Reihe von Dingen zu beobachten. Besondere Aufmerksamkeit zieht das Bild der Kerze auf sich, denn es wird kleiner. Oder besser, wie sogleich bemerkt wird, es wird schmaler, seine Höhe verändert sich nicht. Zugleich wird der Schein der Spiegelkerze auf dem Boden weiter (Abbildung 6). Einige können ihn von ihren Platz aus kaum noch erkennen, denn er ist auch schwächer geworden. Dieser Zusammenhang erscheint vernünftig: Das Licht der Spiegelkerze ist gleich stark geblieben, hat sich aber auf eine größere Fläche verteilt.

Natürlich, wird bemerkt, die Spiegelkerze ist ja schmaler geworden. Und sie selbst müsste im Spiegel aus einem weiteren Bereich gesehen werden können. Das wird sofort durch die Beobachtung

derer, die mehr am Rand sitzen, bestätigt. Wir können es uns aber auch denken, denn nur von dort, wo ihr Schein hinfällt, ist die Flamme der Spiegelkerze auch zu sehen. Wo aber ist jetzt ihr Ort? Wir verlängern mit Messlatten die Bündelgrenzen hinter den Spiegel: Der Schnittpunkt ist nach vorne gerückt, die Spiegelkerze näher am Spiegel als zuvor.

Auch in die andere Richtung können wir den Spiegel biegen. Die Kanten rücken jetzt auf uns zu, und das Lichtbündel der Spiegelkerze wird enger als beim ebenen Spiegel (Abbildung 7). Dafür ist es nun aber besser sichtbar, also heller geworden. Der Blick in den Spiegel bestätigt, was wir vermuten: Das Bild der Kerze ist breiter geworden! Außerdem ist zu erkennen, dass die Spiegelkerze sich vom Spiegel nach hinten entfernt hat.

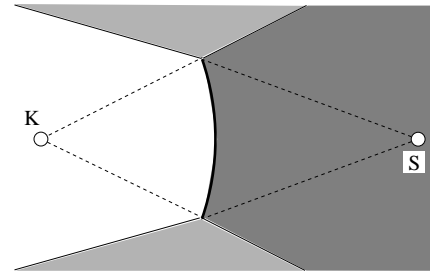


Abbildung 7: Leicht konkav gebogener Spiegel

Der Spiegel wird etwas breiter gebogen, und jetzt verlaufen die Grenzen des Lichtscheins parallel zueinander; die Spiegelkerze muss sich unendlich weit entfernt haben. Das bedeutet aber auch, dass man ebenso annehmen könnte, sie befände sich *vor* dem Spiegel.

Wir biegen den Spiegel noch ein klein wenig weiter. Jetzt schneiden sich die Grenzen des reflektierten Lichtbündels vor dem Spiegel.

Die Spiegelkerze ist also auf *unserer* Seite aus dem Unendlichen hervorgekommen (Abbildung 8).

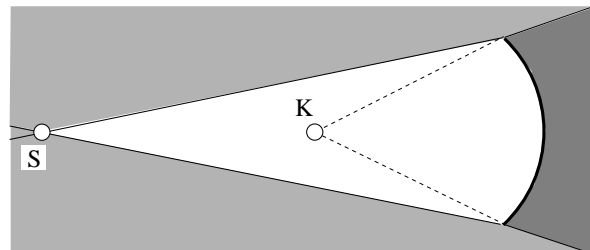


Abbildung 8: Stärker konkav gebogener Spiegel

Wir stellen einen weißen Karton an den Ort der Spiegelkerze und sehen auf ihm eine senkrechte, helle Lichtlinie. Einem Schüler, der sein Auge an diese Stelle bringt, erscheint der gesamte Spiegel lichterfüllt.

## 2.4 Lichtwege am gebogenen Spiegel und Intensität

Wir wollen nun, wie schon zuvor am ebenen Spiegel, den Weg des Lichtes verfolgen und beobachten dazu wieder die Schattengrenzen einer zwischen Kerze und Spiegel aufgestellten Papprolle. Die beiden Grenzen darf man sich rückwärtig bis zur Kerze verlängert denken und als Lichtwege interpretieren. Den Lichtweg zwischen der Kerze und einem mit einem Radiergummi markierten Punkt  $P$  über den Spiegel (und damit auch die "beteiligte" Stelle des Spiegels) finden wir, indem wir die Papprolle so verschieben, dass eine der beiden Schattengrenzen nach der Reflexion durch  $P$  verläuft. Das fällt nicht schwer, und wir finden, dass es, wie beim ebenen Spiegel, nur *einen* Lichtweg zu  $P$  gibt. Und dieser Lichtweg verläuft weiter durch die Spiegelkerze. Dass das kein

Zufall ist, wird gleich bemerkt, denn auch die zweite Schattengrenze geht genau zur Spiegelkerze. Schnell verschieben wir die Papprolle. Wo auch immer sie steht, gilt: Solange ihre Schattengrenzen über den Spiegel verlaufen, treffen sie die Spiegelkerze. Es gibt also viele, unendlich viele Lichtwege zwischen Kerze und Spiegelkerze! Sicher, deshalb ist es am Ort der Spiegelkerze auch so viel heller als überall sonst, ist dies ein Ort größerer Intensität.

Doch diese Erfahrung ist auch Anlass für kritisches Nachfragen: Wie kann das Licht so viele Wege nehmen, wenn es doch, wie wir am ebenen Spiegel festgestellt haben, immer den kürzesten wählt? Wir suchen auch hier den kürzesten Weg zwischen Kerze und Spiegelkerze, indem wir einen Faden zwischen ihnen über den Spiegel spannen. Der Schüler, der mit dem Finger den Faden am Spiegel spannt, bewegt den Fadenknick hin und her. Doch anders als beim ebenen Spiegel finden wir keine Stelle, an der der Faden kürzer gespannt werden kann, als über alle anderen Stellen des Spiegels; der Fadenknick bleibt überall am gebogenen Spiegel, hebt sich nicht ab wie beim ebenen. Alle Lichtwege sind gleich lang!

Das ist eine neue Erkenntnis, die uns über das Vermögen eines konkav gebogenen Spiegels, Licht zu sammeln, Aufschluss gibt:

Am gebogenen Spiegel gibt es zwei Punkte, zwischen denen es unendlich viele Lichtwege gibt. Stehen dem Licht mehrere gleichlange (benachbarte) Lichtwege zur Verfügung, so nimmt es all diese.

Dies ist ein Zusatz zum Prinzip des kürzesten Lichtwegs.

## 2.5 Fermat-Prinzip

Betrachtet man Lichtwege zwischen Punkten, die in unterschiedlichen Medien liegen (Luft und Wasser, Luft und Glas), stellt man fest, dass diese nicht gerade sind, das Licht also gebrochen wird. Mit einigen Überlegungen kann man vermuten, dass hierfür unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Lichtes in den Medien der Grund sein könnten. Es ist weiterhin sinnvoll, an dieser Stelle des Unterrichts eine Messung der Lichtgeschwindigkeit (möglichst in verschiedenen Medien) durchzuführen.

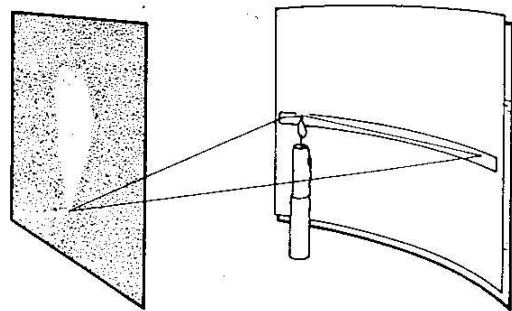
Die Erkenntnisse aus dem Prinzip des kürzesten Lichtweges und dem Brechungsphänomen werden zum Fermat-Prinzip vereinigt:

Das Licht nimmt zwischen zwei Punkten den Weg, für den es, im Vergleich zu denkbaren Nachbarwegen, die kürzeste Zeit benötigt.

## 2.6 Optische Abbildung

Aus dem Fermat-Prinzip können Folgerungen für die Form vonlichtsammelnden Linsen gezogen werden, die zur Konstruktion einer Zylindersammellinse (deren Krümmung aber nicht kreisförmig ist) führen.

Im weiteren Unterrichtsverlauf wird mit dem gebogenen Spiegel (und der Zylinderlinse) festgestellt werden, dass aus der hellen Lichtlinie auf dem am Ort der Spiegelkerze aufgestellten Schirm ein auffangbares Bild der Kerzenflamme wird, wenn man nur noch gleichlange Lichtwege zwischen einem Punkt der Kerzenflamme und einem Punkt auf dem Schirm zulässt. Dies gelingt, indem man die unterschiedlich langen Wege über verschiedene Höhen des Spiegels dadurch ausblendet, dass eine Blende mit waagrechttem Schlitz vor den Spiegel gehalten und mit diesem gebogen wird (Abbildung 9).



**Abbildung 9:** Reelles Bild der Kerzenflamme

### 3 Weiterführende Optik

#### 3.1 Partielle Reflexion

Die Physikstunde beginnt am frühen Morgen, draußen dämert es, hier im Raum haben wir die Deckenbeleuchtung eingeschaltet. Die Schüler werden gebeten, ihren Eindruck beim Blick aus dem Fenster zu schildern.

Die erste spontane Äußerung bezieht sich auf die unterschiedliche Färbung des Himmels und die Wolken, die schon zu erkennen sind. Eine Schülerin nennt die verschiedenartigen Straßenlaternen. Aber wir können auch unsere eigenen Deckenleuchten, mehrere Reihen Leuchtstoffröhren, erkennen. Das verwundert zunächst niemanden, denn wir wissen, dass deren Licht an der Fensterscheibe reflektiert wird, dass wir die Lampen wie in einem Spiegel sehen. Einen wichtigen Unterschied gibt es aber, wie angemerkt wird: Die Fensterscheibe spiegelt und ist zugleich durchlässig. Man kann die Raumbeleuchtung auch von draußen sehen.

Wir wollen dies in einem Experiment überprüfen und beleuchten eine Glasscheibe mit einer kleinen Lampe. Deutlich ist der Schein der Lampe hinter der Scheibe zu sehen. Aber auch der reflektierte Schein vor der Scheibe ist zu sehen, viel schwächer zwar, aber noch gut zu erkennen.

Interessant ist das Phänomen deshalb, weil wir so etwas in der geometrischen Optik nicht besonders beachtet hatten. Jetzt haben wir eine Situation, in der sich ein Lichtweg in zwei aufspaltet. Das Licht muss sich "entscheiden", ob es weitergeht oder umkehrt. wie umgangssprachlich formuliert wird.

Damit werden unsere Überlegungen auf Fragen nach der Natur des Lichtes gelenkt. Dies hatten wir bislang sorgfältig vermieden und lediglich vom Weg, den das Licht nimmt, gesprochen.

### 3.2 Quantenhafte Wechselwirkung

Um das geschilderte Phänomen, die partielle Reflexion, zu erfassen, müssen wir eine Abänderung oder Erweiterung der bisherigen Sichtweise zulassen. Das wird umso deutlicher, wenn wir ein anderes Phänomen betrachten, zu dem Material vorliegt.

Eine wichtige Frage, die im Unterricht immer wieder von Schülern angesprochen wurde, bezieht sich auf die Wahrnehmung des Lichtes. Damit wir sehen können, muss das Licht in unserem Auge Reize auslösen können. Auch eine Fotoschicht muss auf das Licht reagieren, ebenso eine Fernseh- und eine Videokamera.

Am leichtesten zugänglich ist für uns das belichtete Negativ eines Schwarz/Weiß-Filmes. Das bereitgestellte Negativ wurde gleichmäßig und schwach belichtet, ist also strukturlos grau.

Der Blick durch das Mikroskop offenbart uns aber, dass das Material nicht einfach mit einem Grauschleier überzogen wurde. Leider können nicht alle Schüler gleichzeitig durch das Mikroskop schauen, so dass die Diskussion schon beginnt, während andere noch nicht beobachten konnten. Für die meisten ist es unerwartet, dass der Film "körnig" belichtet wurde. Eigentlich, wird vermutet, müsste doch eine gleichmäßige Beleuchtung für ein gleichmäßiges Grau sorgen. Hier aber sind manche Stellen weiß geblieben, andere schwarz geworden.

Es sieht so aus, als wäre das Licht nur an manchen Stellen angekommen. Und bei stärkerer Belichtung? Dann müssen zunehmend Bereiche, die bislang weiß geblieben sind, schwarz werden. Tatsächlich, dadurch wird das ganze Bild dunkler, wie einige wissen, die einmal ein gerastertes Zeitungsfoto unter der Lupe betrachtet haben.

Rastert der Film also das Bild oder wirkt – "wechselwirkt" – das Licht einmal dort und einmal da?

Wir nehmen die teilchenhafte Wechselwirkung als Hypothese an (später wird sie in einem Experiment zum Photoeffekt bestätigt werden) und überlegen, was das für unsere "Sicht in Licht" bedeutet. Wenn immer dann, wenn Licht wahrgenommen wird, von einer Wechselwirkung einer "Lichtportion", eines sogenannten Photons, mit Materie gesprochen werden muss, sollten wir auch alle bekannten Phänomene in dieser Sichtweise zu beschreiben versuchen. Während wir uns leicht vorstellen können, dass die Ausbreitung des Lichtes auf geraden Wegen dem "Weg des Photons" entsprechen könnte, ist die partielle Reflexion aber viel schwieriger zu verstehen. Warum wird ein Teil der Photonen an der Glasscheibe durchgelassen, ein anderer, kleinerer Teil aber reflektiert? Vielleicht gibt es zwei Arten von Photonen! Solche, die reflektiert, und andere, die durchgelassen werden. Einige Schüler haben sofort die Idee zu einem Experiment. Man müsste die durchgelassenen Photonen durch eine zweite Glasplatte schicken. An dieser dürfte dann kein Licht reflektiert werden.

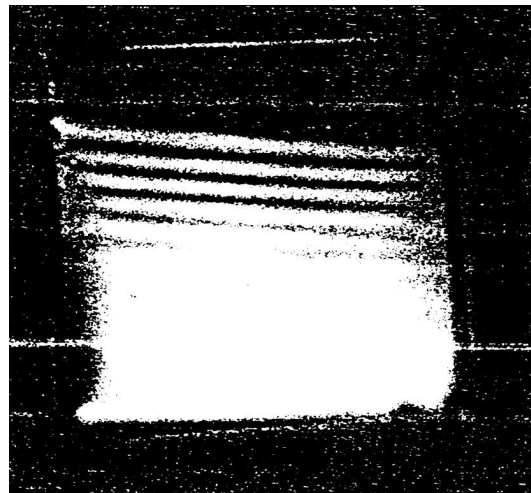
Das Experiment wird durchgeführt und zeigt, dass (bei jeweils senkrechter Koinzidenz) auch an der zweiten Glasscheibe eine gewisse Lichtmenge reflektiert wird.



Verschiedene weitere Interpretationsversuche werden unternommen, die zum Teil aber nicht in der Diskussion bestehen können. Als Ausweg bleibt, das Ergebnis so anzunehmen, wie es sich uns darstellt: Bei der partiellen Reflexion kann nicht über den Weg *eines* Photons, sondern nur über das Verhalten aller – dem Weg des Lichts – eine Aussage gemacht werden. Bei senkrechtem Einfall wird ein bestimmter Teil (4%) aller Photonen reflektiert. Wir beschränken uns also auf eine Wahrscheinlichkeitsaussage.

### 3.3 Interferenz

Ein weiteres neues Phänomen soll noch Berücksichtigung finden. Wir betrachten hierzu eine in einem vertikalen Drahtrahmen aufgespannte Seifenhaut, die ganz ähnliche Farben wie eine Seifenblase zeigt. Aber die Farberscheinung ist viel regelmäßiger, wie sofort auffällt: Die Farben sind in waagerechten Streifen angeordnet. Während wir beobachten, wird der oberste Streifen im reflektierten Licht ganz dunkel, also durchsichtig. Und breiter wird er auch, das ganze Muster läuft nach unten! Dann aber bilden sich Schlieren und schließlich platzt die Seifenhaut.



**Abbildung 10:** Interferenzstreifen an der vertikal eingespannten Seifenhaut

Wir überlegen, was das Besondere einer solche Seifenhaut ist. Das Phänomen zeigt eine sich

ändernde Struktur von unten nach oben, also scheint es sinnvoll, einen Schnitt durch die Seifenschicht zu betrachten. Zunächst wird angenommen, die Schicht müsse man sich wie eine dünne Glasscheibe vorstellen. Aber die Wirkung der Schwerkraft zieht die Seifenlösung sicher nach unten, so dass sich eine keilartige Schicht ausbilden müsste. Sogleich wird bemerkt, dass dann die Bildung der farbigen Streifen mit der Dicke der Seifenhaut zusammenhängen könnte. Aber wie könnte die Dicke eine Rolle spielen?

Offenbar gibt es an der Seifenhaut wie an der Glasscheibe partielle Reflexion. Aber wo eigentlich? Sicher an der Seite, wo das Licht auftrifft, an der "Vorderseite" also. Ein Schüler erinnert sich an ein Experiment aus der geometrischen Optik, mit dem gezeigt wurde, dass das Licht an der Grenzfläche Luft-Wasser nicht nur von außen in das Wasser eindrang und dabei gebrochen wurde, sondern zu einem Teil auch reflektiert wurde. Das entspricht unserer Aussage über die partielle Reflexion. Aber, bemerkt eine anderer Schüler, wenn man eine Lampe in das Wasser brachte, konnte man erkennen, dass auch beim Austreten des Lichtes ein Teil reflektiert wurde. Wir müssen also beide Grenzflächen der Seifenhaut berücksichtigen. Und das bedeutet auch, dass es zwischen

der Lichtquelle und einem Punkt *zwei* Lichtwege über die Seifenhaut gibt. Diese Erkenntnis soll den Schlüssel zum Verstehen der Farberscheinung darstellen? Aber doch, fällt plötzlich auf, die Farben der Seifenschicht ändern sich mit ihrer Dicke und die Länge der beiden Lichtwege ist auch jeweils um diese Dicke (oder eigentlich um das Doppelte) verschieden! Was aber hat die Farbe mit der Lichtwegdifferenz zu tun?

Wir betrachten daraufhin die Seifenhaut in einfarbigem Licht. Es erscheinen dann helle und dunkle Streifen (Abbildung 10 auf der vorherigen Seite). Wir ändern die Farbe, und der Abstand der Streifen ändert sich auch. Also muss der periodische Wechsel von Helligkeit und Dunkelheit etwas mit einer periodischen Veränderung der "Wirkung" der Lichtwegdifferenz zu tun haben.

Lässt sich das Phänomen noch mit anderen Experimenten zeigen? Vorbereitet wurde ein Michelson-Interferometer, womit zugleich die charakteristische Weglängendifferenz, die Basislänge  $\lambda$  des verwendeten roten Laserlichtes bestimmt wird. Die Interpretation dieses Experimentes ist außerdem einfacher, da mit dem aufgeweiteten Laserlichtbündel eine punktförmige Lichtquelle zur Verfügung steht und ebenso ein Punkt auf dem Schirm zur Betrachtung herangezogen werden kann.

Gemeinsam einigen wir uns auf folgende Formulierung:

Stehen dem Licht zwei (oder mehrere) Wege zwischen zwei Punkten zur Verfügung, so kommt es je nach der Differenz der Lichtwege zu Auslöschung oder Verstärkung.

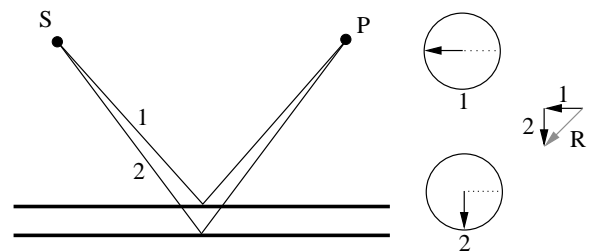
Das beschriebene Phänomen wird *Interferenz* genannt.

### 3.4 Zeigerformalismus

Da Lichtintensitäten nicht einfach addiert werden dürfen, müssen wir zu einer neuen Beschreibung kommen. Diese sollte ebenfalls die teilchenhafte Wechselwirkung berücksichtigen.

Wir erinnern uns an die Weise, in der vektorielle Größen addiert werden und versuchen auch hier eine ähnliche Beschreibung. Dazu werden Zeiger gezeichnet und graphisch addiert. Die Winkeldifferenz der Zeiger muss dabei durch die Lichtwegdifferenz bestimmt werden. Die Zeigersumme (eigentlich: deren Quadrat) könnte dann das Maß für die erhaltene Intensität, also für die Wahrscheinlichkeit des Registrierens eines Photons sein.

Deutlich wird auch hier wieder, dass nicht vom **Weg** eines Photons gesprochen werden darf. Maßgeblich für die Wechselwirkung ist das Zusammenwirken der Lichtwege.



**Abbildung 11:** Addition der Zeiger für zwei Lichtwege an zwei Grenzflächen

Die neue Sichtweise soll schließlich anhand einer vorgestellten, zusammenfassenden Beschreibung nach Feynman diskutiert werden [Fey88]:

**Zeigerformalismus** (vgl. Abbildung 11 auf der vorherigen Seite)

- (a) Bei mehreren Lichtwegen von einer Lichtquelle zum Empfänger müssen alle Wege berücksichtigt werden, um das richtige Ergebnis für die Intensität zu erhalten.
- (b) Dabei trägt jeder Lichtweg vom Betrag gleich viel zum Ergebnis bei.
- (c) Jedem Lichtweg wird ein Zeiger zugeordnet, der sich während der Lichtausbreitung dreht. Wenn der Zeiger eine vollständige Drehung gemacht hat, hat das Licht einen Weg zurückgelegt, der gleich seiner Basislänge  $\lambda$  ist.
- (d) Die Länge des Zeigers wird so gewählt, dass das Quadrat die Wahrscheinlichkeit angibt, am Empfänger ein Photon zu registrieren.
- (e) Um das Gesamtergebnis zu erhalten, müssen zunächst alle Zeiger wie Vektoren addiert werden. Anschließend wird die Resultierende quadriert.

### 3.5 Hinführung zur Beugung

Im weiteren Unterrichtsverlauf muss noch eine Reihe von Fragen, die sich im Zusammenhang mit dem Zeigerformalismus ergeben, besprochen werden. Insbesondere muss noch die Frage beantwortet werden, wieso die Seifenhaut kurz vor dem Zerplatzen oben dunkel wurde. Auch muss veranschaulicht werden, wieso das Quadrat des reflektierenden Zeigers als Maß für die Intensität interpretiert wird<sup>9</sup>. Zu den Beugungsphänomenen gelangt man, wenn man die Berechnung nicht nur auf solche Lichtwege, die nach der geometrischen Optik zulässig sind, beschränkt. Die Notwendigkeit hierzu erkennt man zum Beispiel beim Betrachten einer Kerzenflamme durch den Daumenspalt: Die dann entstehenden zusätzlichen Flämmchen lassen sich geometrisch-optisch nicht beschreiben [Wag70].

### 3.6 Reflexion

Auch bei der Reflexion am ebenen Spiegel darf der Lichtweg, der sich nach dem Fermat-Prinzip in der geometrischen Optik ergibt, also nicht einfach als richtig angenommen werden. Dieses Problem soll deshalb im folgenden kurz untersucht werden<sup>10</sup>.

Um im Fall der Reflexion die Intensität des von der punktförmigen Lichtquelle  $S$  kommenden Lichtes in  $P$  (zum Beispiel einer Stelle auf einem Schirm) zu berechnen, müssten eigentlich

<sup>9</sup>Eine ausführliche Darstellung ist zu finden in: [Erb94]

<sup>10</sup>Dieses Beispiel ist entnommen: [Erb95]

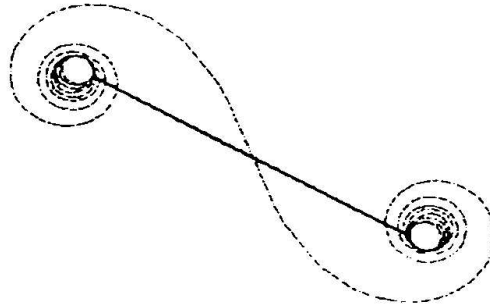


Abbildung 12: Zeigeraddition

(wie im Zeigerformalismus vorgesehen) **alle** Wege, d.h. unendlich viele Wege über verschiedene Punkte des Spiegels berücksichtigt werden. In der Praxis genügt aber eine Auswahl, deren Zeiger von einem Computerprogramm berechnet und addiert werden.

Für das in Abbildung 12 zu sehende Ergebnis wurden die Zeiger von Lichtwegen über 500 Punkte, die in gleichem Abstand auf einer Linie über einem 1 cm breiten Spiegel liegen, addiert. In diesem Beispiel liegen Lichtquelle und Empfänger dicht nebeneinander jeweils 5 m vor dem Spiegel und  $\lambda$  beträgt 633 nm.

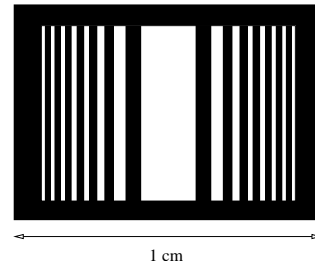


Abbildung 13: Gitter

Der resultierende Zeiger ist fett gezeichnet, der Zeiger für den Lichtweg, der sich nach der geometrischen Optik ergibt, liegt in der Spiralenmitte. Man erkennt, dass die Intensität im wesentlichen durch diesen Lichtweg und durch einige benachbarte zustände kommt, womit die Aussage des Fermat-Prinzips in der geometrischen Optik gut bestätigt ist. Die Intensität würde aber noch größer sein, wenn diejenigen Lichtwege *nicht* beitragen würden, deren Zeiger in die andere Richtung weisen.

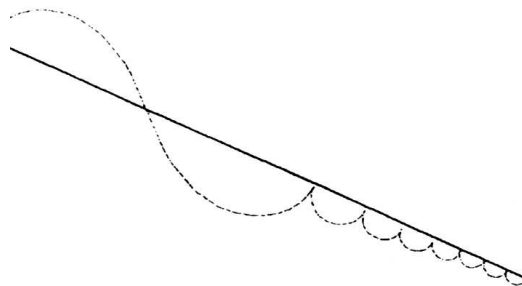
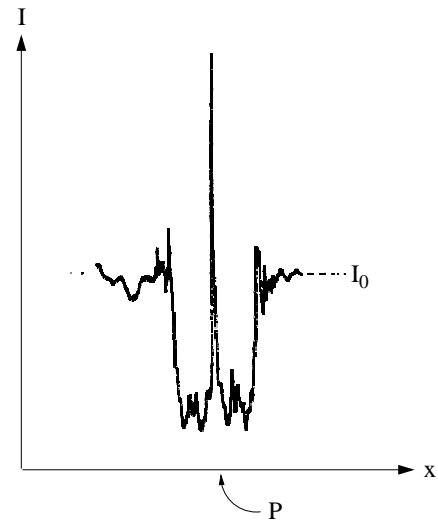


Abbildung 14: Zeigeraddition nach Einbringen eines Gitters

Wir haben ein Gitter, das nach einer Idee von Feynman solche Lichtwege ausblendet, für einen 1 cm breiten Spiegel berechnet, vergrößert gezeichnet und fotografiert, um das Dia zur Bedeckung des Spiegels zu verwenden (Abbildung 13 auf der vorherigen Seite).

Die Addition der Zeiger der verbleibenden Lichtwege führt nach der Berechnung zu einer erhöhten Intensität, wie das Ergebnis in Abbildung 14 auf der vorherigen Seite zeigt (Ausschnitt; bei gleichem Maßstab wie in Abbildung 12).

Im Experiment, bei dem zur Beleuchtung das aufgeweitete Lichtbündel eines Lasers verwendet wurde, ist auf dem Schirm an der betreffenden Stelle eine Linie zu erkennen, deren Helligkeit deutlich größer als die Ausgangshelligkeit des ohne Gitter beleuchteten Schirms  $I_0$  ist. Dies ist auch in der Abbildung 15 zu erkennen, die die gemessene Intensität auf dem Schirm wiedergibt.



**Abbildung 15:** Addition der Zeiger für zwei Lichtwege an zwei Grenzflächen

Das Beispiel veranschaulicht somit, wie auf der Basis der Betrachtung von Lichtwegen mit einem im Prinzip einfachen Formalismus und dem Computer als Rechenhilfe eine Reihe interessanter Probleme betrachtet werden kann.

### 3.7 Weitere Inhalte

Im weiteren Unterrichtsverlauf wird ein Experiment zum Photoeffekt die Interpretation der Wechselwirkung mittels Photonen bestärken. Das Phänomen der Lichtpolarisation ist bislang noch nicht berücksichtigt worden. Wir schlagen vor, es erst zu behandeln, wenn nach der Schwingungslehre auch das Wellenbild des Lichtes als klassisches Modell erwähnt wird.

### 3.8 Schluss

Ein weiter Bogen ist mit diesem Unterrichtsvorschlag geschlagen worden. Vom Sehen bis zum abstrakten Formalismus. Dieser Weg von der alltäglichen Wahrnehmung zum mathematischen Begriff ist beschwerlich, aber lobenswert, denn er stellt einen Zusammenhang zwischen ihnen her, der in vielen Unterrichtsvorschlägen verloren gegangen ist. Zugunsten dieses Vorgehens haben wir die sonst üblich Stofffülle erheblich beschnitten. Dafür konnten wir uns Schritt für Schritt ohne "eine Menge von Dingen ..., wovon weder im Himmel noch auf der Erde etwas vorkommt" dem modernen Weltbild der Physik nähern.

”Ein etwas vorschnippischer Philosoph, ich glaube, Hamlet, Prinz von Dänemark, hat gesagt, es gäbe eine Menge Dinge im Himmel und auf der Erde, wovon nichts in unseren Compendiis steht. Hat der einfältige Mensch, der bekanntlich nicht recht bei Trost war, damit auf unsere Compendia der Physik gestichelt, so kann man ihm getrost antworten: Gut, aber dafür stehen auch wieder eine Menge von Dingen in unseren Compendiis, wovon weder im Himmel noch auf der Erde etwas vorkommt.”

(Lichtenberg)

## Literatur

- [BSS94] BACKHAUS, U. ; SCHLICHTING, H.-J. ; SCHÖN, L.: *Physikbuch 5/6 – Ein Lehr- und Arbeitsbuch für die 5. und 6. Jahrgangsstufe an Real- und Gesamtschulen*. Frankfurt : Diesterweg, 1994
- [BSS95] BACKHAUS, U. ; SCHLICHTING, H.-J. ; SCHÖN, L.: *Physikbuch 7/8 – Ein Lehr- und Arbeitsbuch für die 7. und 8. Jahrgangsstufe an Real- und Gesamtschulen*. Frankfurt : Diesterweg, 1995
- [Erb92] ERB, R.: Geometrische Optik mit dem Fermat-Prinzip. In: *Physik in der Schule* 30 (1992), S. 291–295
- [Erb94] ERB, R.: *Optik mit Lichtwegen – Das Fermat-Prinzip als Grundlage für das Verstehen der Optik*. Bochum, Magdeburg : Westarp-Wissenschaften, 1994. – Dissertation
- [Erb95] ERB, R.: Optik in der Oberstufe. In: *Physik in der Schule* 33 (1995), Nr. 2, S. 51–56
- [ES95] ERB, R. ; SCHÖN, L.: Lichtwege – zentrales Element unseres Optik-Lehrganges. In: BEHRENDT, H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie – Vorträge 1994* Bd. 14. Alsbach : Leuchtturm, 1995, S. 224–246
- [Fey88] FEYNMAN, R. P.: *QED – Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*. München : Piper, 1988
- [Lan79] LAND HESSEN: Gymnasiale Oberstufe, Aufgabenfeld III Physik. In: *Kurstrukturpläne des Landes Hessen*, 1979, S. 4–5
- [Mac82] v. MACKENSEN, M.: *Klang, Helligkeit und Wärme – Phänomenologischer Physikunterricht, entwickelt aus Praxis und Theorie der Waldorfschule*. Kassel: 1982
- [RS89] ; RAUSCHENBERGER, H. (Hrsg.) ; SCHINDEHÜTTE, M. (Hrsg.) ; (Veranst.): *Wirklichkeit und Bildung – Dokumentation einer Tagung der Evangelischen Akademie Hofgeismar 4. bis 6. März 1988*. Hofgeismar, 1989

- [Sch81a] SCHÄFER, K.: "Was ist Licht?" Modellvorstellungen vom Licht. In: DER HESS. KULTUSMINISTER (Hrsg.): *Kurse für die gymnasiale Oberstufe – Arbeitshilfen für die Hand des Lehrers im Fach Physik*. Frankfurt, 1981
- [Sch81b] SCHÖN, L.: Modellvorstellungen vom Licht. In: DER HESS. KULTUSMINISTER (Hrsg.): *Kurse für die gymnasiale Oberstufe – Arbeitshilfen für die Hand des Lehrers im Fach Physik*. Frankfurt, 1981
- [Sch84] SCHÖN, L.: Bilder am großen Spiegel – Beispiele für eine Berücksichtigung affektiver Komponenten im Physikunterricht. In: *NiU-Physik* 32 (1984), S. 429–433
- [Sch93a] SCHNEIDER, T.: *Die Mondillusion*, Universität Kassel, Wissenschaftl. Hausarbeit (Examensarbeit), 1993
- [Sch93b] SCHÖN, L.: Vom Sehen zur Optik – Ein Curriculum für die Mittel- und Oberstufe. In: BEHRENDT, H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Chemie und Physik – Vorträge der GDGP-Tagung in Erfurt 1992* Bd. 13. Alsbach : Leuchtturm, 1993, S. 271–273
- [Sch94] SCHÖN, L.: Ein Blick in den Spiegel – Von der Wahrnehmung zur Physik. In: *Physik in der Schule* 32 (1994), Nr. 1, S. 2–5
- [Wag70] WAGENSTEIN, M.: *Ursprüngliches Verstehen und exaktes Denken Bd. II*. Stuttgart : Klett, 1970
- [Wat81] WATZLAWIK, P.: *Die erfundene Wirklichkeit*. Zürich : Piper, 1981