



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Brechung und Reflexion von Licht Entwicklung einer historisch orientierten Unterrichtssequenz

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Mag. rer. nat.

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernst Bauer

(E138 Institut für Festkörperphysik)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Physik

von

Markus Obczovsky

1125603

Mühlgasse 8

3443 Elsbach

.....
Ort, Datum

.....
Markus Obczovsky



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin. Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

.....
Ort, Datum

.....
Markus Obczovsky

Danksagung

Allem voran möchte ich meinen Dank, dem mich betreuenden Ao.Univ.Prof. Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernst Bauer, aussprechen. Dieser ermöglichte mir einen reibungslosen und unkomplizierten Ablauf meiner Diplomarbeit und stand mir mit Rat und Tat zur Seite. Dank seiner Hilfe war ein effizientes Zeitmanagement möglich.

Auch danke ich der Werkstatt und den Mitarbeitern für ihre Ratschläge und Unterstützung bei der Planung und das Anfertigen des historischen Experiments von Claudius Ptolemäus.

Ich möchte mich an dieser Stelle auch bei allen Professoren und Professorinnen der TU Wien bedanken, die mich motiviert und gelehrt haben.

Zu guter Letzt geht mein Dank natürlich auch an meine Familie, allen voran den Eltern, die mich finanziell und moralisch unterstützt haben und an meine geliebte Freundin, Frau Dr. med. univ. Nitaya Lebl.

Kurzfassung

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist die Entwicklung einer Unterrichtssequenz zum Thema Reflexion und Brechung von Licht an einer ebenen Grenzfläche zweier Medien. Die acht Unterrichtseinheiten orientieren sich an ausgewählten Eckpfeilern der Wissenschaftsgeschichte und folgen stark den didaktischen Überlegungen des Konzeptes History and Philosophy in Science Education (HPS). Dabei stehen nicht nur die physikalischen Inhalte im Vordergrund, sondern auch der philosophische Aspekt der Naturwissenschaft Physik, auch unter Nature of Science (NOS) bekannt. Die Ziele der Unterrichtssequenz lassen sich in inhaltliche und NOS-Ziele unterteilen. Durch diese zusätzliche Zielsetzung müssen die herkömmlichen Methoden des Physikunterrichts um etliche Methoden ergänzt werden, wie das gezielte Reflektieren über NOS in der Reflexionsecke, das kreative Schreiben, das Versetzen in historische Forscher oder Forscherinnen (Rollenspiel) oder das Nachbilden historischer Experimente und Entdeckungswege. Aufbauend auf der Beobachtung des Spiegelbildes und der Suche nach der Lage desselben, wird Herons Beweis für das Reflexionsgesetz repliziert. Dieses wird mithilfe eines Experiments von Claudio Ptolemäus verifiziert. Anschließend wird ein einfaches qualitatives Beobachtungsexperiment zur Brechung von Licht von Euklid nachgestellt, gefolgt von einem quantitativen Experiment des Claudio Ptolemäus. Darauf aufbauend und mithilfe eines Experiments des arabischen Forschers Ibn-al-Haitam, wird das Brechungsgesetz des Willebrord Snell hergeleitet. Die Herleitung orientiert sich an seinen Originalschriften.

Abstract

The aim of this diploma thesis is the development of a sequence in school about the topic reflection and refraction of light between two media. The eight parts of the sequence are geared to certain incidents in the history of science and follow the concept of History and Philosophy in Science Education (HPS). Not only the physical contents are the primary goal, but also the philosophical aspects of physics, also called Nature of Science (NOS). The goals of the sequence are split in goals with regard of contents and with regard of NOS. Because of the additional aims, a new form of methods is necessary, like the targeted reflection of NOS in the so-called reflection corner, the creative writing, the role play or the replication of historical experiments and ways of thinking. Built up on the observation of the mirror image and the search for its position, Heron's proof for the law of reflection is replicated. The law is verified by a historical experiment of Claude Ptolemy. Afterwards, a qualitative experiment of Euklid is performed, followed by a quantitative experiment of Claude Ptolemy. Built up on this experiment and another experiment by the arabian researcher Ibn-al-Haitam, the law of refraction of Willebrord Snell is deduced. This deduction is geared to his original scripts.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	7
2. Theorieteil	9
2.1. Physikalischer Hintergrund	9
2.1.1. Elektromagnetische Wellen im Vakuum	9
2.1.2. Elektromagnetische Wellen in Materie	12
2.1.3. Reflexion und Brechung elektromagnetischer Wellen	19
2.1.4. Geometrische Optik	22
2.2. Wissenschaftshistorischer Hintergrund	26
2.2.1. Das Reflexionsgesetz nach Heron	26
2.2.2. Die Experimente von Claudius Ptolemäus	27
2.2.3. Das Brechungsgesetz nach Snellius	30
2.3. Didaktischer Hintergrund	36
2.3.1. Didaktik der geometrischen Optik	36
2.3.2. Nature of Science (NOS)	40
3. Entwicklung der Unterrichtssequenz	46
3.1. Implementierung	46
3.2. Ziele	47
3.2.1. Inhaltliche Ziele	47
3.2.2. NOS Ziele	48
3.3. Aufbau	49
3.3.1. Der Rahmen	49
3.3.2. Teil 1: Reflexion	49
3.3.3. Teil 2: Brechung	55
3.3.4. Der Abschluss	62
4. Diskussion	63
A. Arbeitsblätter	65

1. Einleitung

First we have an observation, then we have numbers that we measure, then we have a law which summarizes all the numbers. But the real *glory* of science is that *we can find a way of thinking* such that the law is *evident*. [9, S. 26-3]

schreibt Feynman in seinen berühmten *Lectures on Physics*. In der Schule wird meistens der umgekehrte Weg beschritten. Eine Theorie wird formuliert, oft als gottgegeben in den Raum gestellt und daraus werden Gesetze abgeleitet. Diese Gesetze werden mit Experimenten verifiziert und veranschaulicht. So naheliegend es scheint, diesen Weg als sinnvoll zu erachten, zumal der Unterricht dem Korsett der Zeit und des Lehrplans unterliegt, entsteht ein sehr irreführendes Bild der Physik in den Köpfen der Schüler und Schülerinnen und letztendlich in den Köpfen der Gesellschaft. Die Physik wird entweder als starr und unumstößlich dargestellt, oder als ein Aufdecken der einzig wahren Wirklichkeit. Auch haben die meisten Schüler und Schülerinnen ein sehr einseitiges Bild eines Physikers oder einer Physikerin.

Ein Ansatz, dieses Bild aus den Köpfen der Schüler und Schülerinnen zu verbannen und zu zeigen, dass die Physik eine menschliche Konstruktion ist, die keineswegs dem Enthüllen einer absoluten Wahrheit entspricht, ist der historisch-genetische Unterricht. Dieser orientiert sich am tatsächlichen Erkenntnisprozess in der Wissenschaftsgeschichte.

Ein Beispiel, das sich für so eine Unterrichtssequenz anbietet, ist die Reflexion und Brechung von Licht. Am Anfang steht die Beobachtung eines Phänomens, das Spiegelbild der gegenüberliegenden Berge in einem ruhigen See oder das eigene Spiegelbild in einer Pfütze nach einem Regentag. Aber gleichzeitig sieht man auch Steine am Grund des Sees oder der Pfütze. Von diesen Phänomenen ausgehend werden Experimente geplant, Kreativität ist gefragt, um Messwerte und Daten zu ermitteln, wie etwa aus Schriften von Claudius Ptolemäus erkenntlich ist. In diesen gemessenen Werten und Daten wird versucht, Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten zu finden. Während das Reflexionsgesetz schon in der Antike bekannt war, kann das Brechungsgesetz erst im 17. Jahrhundert

1. Einleitung

durch Willebrord Snel entdeckt werden. Aber noch ist unbekannt, was Licht eigentlich ist. Erst im 18. Jahrhundert werden konsistente Theorien aufgestellt, und zwar nicht nur eine. Es konkurriert die Lichtteilchen-Theorie von Isaac Newton mit der Wellentheorie von Christiaan Huygens. Beide Theorien erklären sowohl die Brechung als auch die Reflexion von Licht.

Anhand dieser Eckpfeiler aus der Geschichte soll der Erkenntnisprozess zwei der wichtigsten Gesetze der Optik rekonstruiert werden, um einerseits ein tieferes Verständnis für das Wesen der Physik zu bekommen und andererseits das Reflexions- und das Brechungsgesetz von einer anderen Seite kennenzulernen. Dabei sollen die kognitiven Kompetenzen der Jugendlichen gefordert, ihre Kreativität gefragt und das Interesse an der Physik angeregt werden.

Im Folgenden wird das physikalische Grundgerüst erörtert. Dabei wird der konventionelle Weg gewählt und eine Theorie des Lichts eingeführt und daraus die benötigten Gesetze abgeleitet. Anschließend werden die historischen Eckpfeiler näher betrachtet und dabei einerseits der historische Kontext kurz behandelt und andererseits der physikalische Erkenntnisprozess beschrieben. Den dritten Teil stellen die didaktischen Überlegungen dar. Dabei werden die Schülervorstellungen diskutiert und die bestehenden didaktischen Konzepte erörtert. Einen Teil wird die Didaktik rund um den Inhalt darstellen und einen Teil die Begriffe Nature of Science (NOS) und History and Philosophy in Science Education (HPS). Im darauffolgenden Kapitel wird die Unterrichtssequenz entwickelt, die Struktur und die Methoden ausgearbeitet und kommentiert, sowie die Ziele der Unterrichtseinheiten definiert. Im Anschluss werden mögliche Probleme und Schwierigkeiten in der Umsetzung und Ausführung der entwickelten Unterrichtssequenz diskutiert.

2. Theorieteil

2.1. Physikalischer Hintergrund

Im Folgenden wird der physikalische Hintergrund der Thematik näher beleuchtet. Als zentrale Phänomene werden die Reflexion und die Brechung von Licht an der ebenen Grenzfläche zweier Medien unterschiedlicher optischer Dichte behandelt. Dafür wird zu Beginn das Licht als elektromagnetische Welle eingeführt. Der Aspekt der Quantenphysik wird hier nicht näher behandelt. Anschließend wird das Licht lediglich auf das sichtbare Licht eingeschränkt und einige Besonderheiten behandelt. Da bei der Reflexion und der Brechung von sichtbarem Licht an einer ebenen Fläche die Welleneigenschaften der elektromagnetischen Welle nicht zum Tragen kommen, können sogar mit der stark eingeschränkten geometrischen Optik beide entsprechenden Gesetze ausreichend erklärt werden.

2.1.1. Elektromagnetische Wellen im Vakuum

Im 19. Jahrhundert konnte James Clerk Maxwell aus den nach ihm benannten Maxwellgleichungen die Existenz von elektromagnetischen Wellen im Vakuum ableiten. Die Maxwellgleichungen sind ein System aus vier partiellen Differentialgleichungen¹ 1. Ordnung zur Beschreibung von elektrischen und magnetischen Feldern:

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (2.1)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (2.2)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.4)$$

¹ $\vec{E}$ und $\vec{B}$ seien Vektorfelder und div und rot die Differentialoperatoren Divergenz und Rotation

2. Theorieteil

Wobei $\vec{E}$ die elektrische Feldstärke, $\vec{B}$ die magnetische Flussdichte, ρ die Ladungsdichte, ε_0 die Dielektrizitätskonstante, μ_0 die Permeabilitätskonstante und $\vec{j}$ die elektrische Stromdichte darstellen. [3, S. 127]

Die Aussage von Gleichung 2.1 ist, dass die Ladungen Quellen und Senken des elektrischen Feldes darstellen, während Gleichung 2.2 besagt, dass das magnetische Feld weder Quellen noch Senken haben kann. Die Gleichungen 2.3 und 2.4 beschreiben, dass die zeitliche Änderung eines magnetischen Feldes ein elektrisches Wirbelfeld induziert, und andersherum, die zeitliche Änderung eines elektrischen Feldes und elektrischer Strom ein magnetisches Wirbelfeld erzeugt.

Nach 2.1 erzeugt eine Ladung Q folglich ein elektrisches Feld $\vec{E}$. Wenn sich diese Ladung hin und her bewegt, ändert sich das elektrische Feld mit der Zeit t und induziert nach 2.4 ein Magnetfeld $\vec{B}$. Dieses ändert sich ebenfalls mit der Zeit und erzeugt wiederum nach 2.3 ein elektrisches Wirbelfeld. Dadurch entsteht eine elektromagnetische Welle, die sich von der Ladung „löst“ und sich im Raum fortpflanzt.

Unter der Annahme eines stromfreien ($\vec{j} = 0$) und ladungsfreien ($\rho = 0$) Vakuums lassen sich die Gleichungen 2.3 und 2.4 reduzieren zu:

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.5)$$

$$\text{rot} \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.6)$$

Durch das Anwenden des Operators rot auf Gleichung 2.5 folgt, da der Operator rot unabhängig von der Zeit t ist,

$$\text{rot} \text{rot} \vec{E} = -\text{rot} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \text{rot} \vec{B} \quad (2.7)$$

Anschließend kann 2.6 in 2.7 eingesetzt werden und man erhält

$$\text{rot} \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

Die linke Seite von Gleichung 2.8 lässt sich mithilfe eines Satzes aus der Vektoranalysis (siehe Appendix) und aufgrund der Annahme eines ladungsfreien Raumes mit $\text{div} \vec{E} = 0$ folgendermaßen darstellen:

2. Theorieteil

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{E} = \operatorname{grad} (\operatorname{div} \vec{E}) - \operatorname{div} (\operatorname{grad} \vec{E}) = \Delta \vec{E} \quad (2.9)$$

Wobei Δ den Laplace-Operator darstellt. Folglich lässt sich 2.2 darstellen in der Form:

$$\Delta \vec{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.10)$$

Diese homogene partielle Differentialgleichung 2. Ordnung wird auch Wellengleichung genannt. Die Lösungen dieser Differentialgleichung beschreiben ein zeitlich veränderliches elektrisches Feld, welches sich mit der Geschwindigkeit

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \quad (2.11)$$

gleichmäßig durch den Raum bewegt. Bereits James Clerk Maxwell erkannte, dass das Produkt $\mu_0 \varepsilon_0$ den empirischen Daten der Lichtgeschwindigkeit „sehr nahe“ kam:

This velocity is so nearly that of light, that it seems we have strong reason do conclude that light itself [...] is an electromagnetic disturbance in the form of waves propagated through electromagnetic field according to electromagnetic laws. (Maxwell 1865) [15, S. 466]

Dieses elektrische Feld breitet sich tatsächlich mit Lichtgeschwindigkeit im Vakuum aus und aus Gleichung 2.6 folgt durch die zeitliche Änderung des elektrischen Feldes die Entstehung eines magnetischen Feldes. Dieses magnetische Feld lässt sich analog zum elektrischen Feld herleiten und führt auf die Wellengleichung:

$$\Delta \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (2.12)$$

Das magnetische Feld bewegt sich folglich ebenfalls mit der Lichtgeschwindigkeit c durch den Raum.

Die Wellengleichung des elektrischen Feldes 2.10 hat unterschiedliche Lösungen. Ein möglicher einfacher Ansatz ist eine ebene periodische Funktion. Unter der Annahme, die Welle bewegt sich in x -Richtung, lässt sich das elektrische Feld $\vec{E}$ darstellen durch:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot e^{i\omega(t - \frac{x}{c})} \quad (2.13)$$

Wobei $\vec{E}_0$ die Amplitude, ω die Kreisfrequenz und t die Zeit sind. Durch Einsetzen von 2.13 in 2.10 kann die Richtigkeit dieser Lösung einfach überprüft werden. Häufig wird

2. Theorieteil

auch die etwas allgemeinere Variante mit dem Wellenvektor $\vec{k}$, der die Richtung der Ausbreitung der Welle angibt und den Betrag $|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$ besitzt, verwendet:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \quad (2.14)$$

Diese Lösung ist für viele Spezialfälle brauchbar und soll an dieser Stelle für das grundlegende Verständnis elektromagnetischer Wellen genügen.

2.1.2. Elektromagnetische Wellen in Materie

Die obigen Überlegungen sind lediglich im Vakuum sowie im ladungs- und stromfreien Raum richtig. Um elektromagnetische Wellen in Materie zu beschreiben bedarf es einiger Zusätze.

Der Brechungsindex n

Jedes Medium besteht aus einzelnen Atomen und diese wiederum bestehen aus geladenen Teilchen, den Elektronen und den Protonen. Ein elektrisches Feld in einem Medium beeinflusst diese Ladungen. Die Elektronen werden zu schwingen beginnen, was zum Aussenden weiterer elektromagnetischer Wellen führt. Folglich ist das elektrische Feld einer elektromagnetischen Welle in einem Medium nicht nur durch ihre Quelle bestimmt, sondern auch durch alle schwingenden Elektronen in dem Medium. Das elektrische Feld der elektromagnetischen Welle ist die Überlagerung all dieser einzelnen Wellen. Daraus ergibt sich eine scheinbar verlangsamte Geschwindigkeit

$$v = \frac{c}{n} \quad (2.15)$$

der elektromagnetischen Welle in einem Medium mit $n > 1$. Diesen Divisor n bezeichnet man als Brechungsindex.

Um diesen Brechungsindex herzuleiten, stelle man sich eine Quelle Q einer elektromagnetischen Welle vor, die sich weit links einer Glasplatte befindet. Auf der anderen Seite dieser Platte befindet sich in weiter Entfernung ein Punkt P . (vgl. [9, S. 31-1 - 31-5])

An der Quelle Q wird eine ebene elektromagnetische Welle erzeugt, die sich in x -Richtung ausbreitet und lediglich in y -Richtung schwingt. Dadurch kommt es vor der Platte bei $x = 0$ zur Ausbildung des elektrischen Feldes²

²Die Reflexion der elektromagnetischen Welle wird an dieser Stelle nicht beachtet.

2. Theorieteil

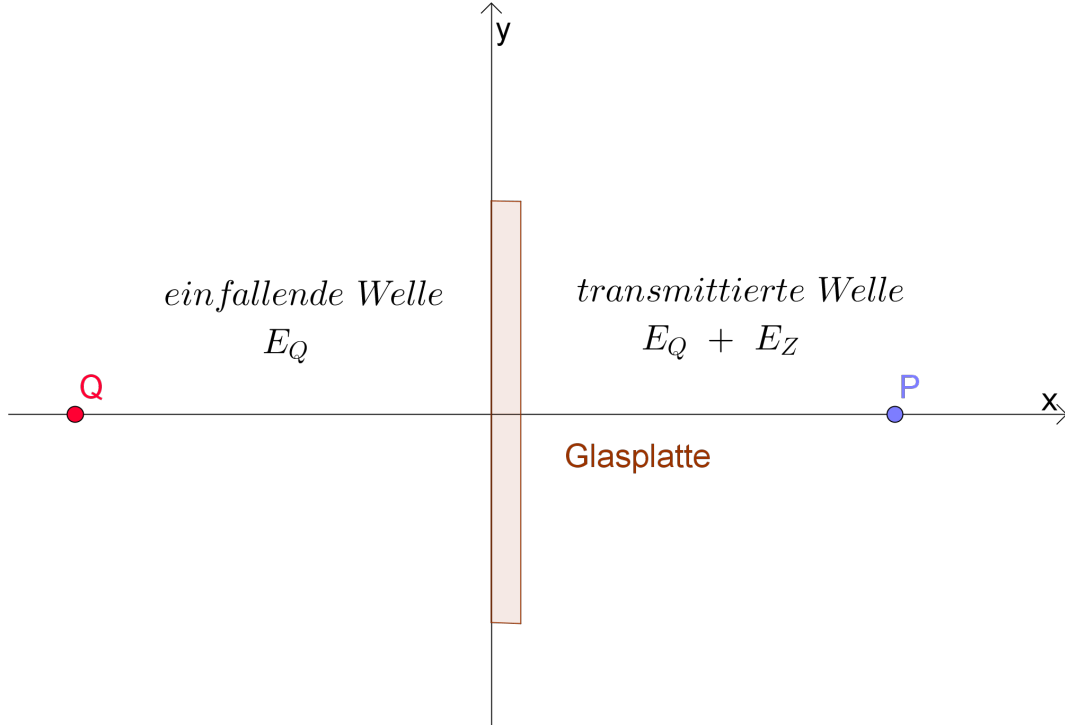


Abbildung 2.1.: Herleitung des Brechungsindex n

$$E_Q = E_0 e^{i\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)} \quad (2.16)$$

Direkt an der Glasplatte bei $z = 0$ wird das elektrische Feld zu:

$$E_Q = E_0 e^{i\omega t} \quad (2.17)$$

Angenommen die Glasplatte sei Δx dick, dann würde elektrische Welle ohne Glasplatte für die Strecke Δx die Zeit $t = \frac{\Delta x}{c}$ benötigen. Unter der Anwesenheit der Glasplatte scheint die elektromagnetische Welle die Zeit $t = n \cdot \frac{\Delta x}{c}$ zu benötigen, was zu einer zusätzlichen Zeit

$$\Delta t = (n - 1) \frac{\Delta x}{c} \quad (2.18)$$

führt. Dadurch kommt es zur Ausbildung des elektrischen Feldes $E_{P_{Gesamt}}$ nach der Glasplatte in einem Punkt P , der die Strecke x von der Glasplatte entfernt ist:

$$E_{P_{Gesamt}} = E_0 e^{i\omega\left(t - \Delta t - \frac{x}{c}\right)} = E_0 e^{i\omega\left(t - (n-1)\frac{\Delta x}{c} - \frac{x}{c}\right)} \quad (2.19)$$

Und durch Umformen gelangt man zu:

2. Theorieteil

$$E_{P_{Gesamt}} = E_0 e^{i\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)} e^{-i\omega(n-1)\frac{\Delta x}{c}} \quad (2.20)$$

In Gleichung 2.20 erkennt man, dass die ersten beiden Faktoren dem elektromagnetischen Feld ohne Glasplatte entsprechen und der dritte Faktor eine Phasenverschiebung um den Winkel $\theta = \omega(n-1)\frac{\Delta x}{c}$ darstellt, in diesem Fall eine Verzögerung aufgrund des negativen Vorzeichens. Die Exponentialfunktion kann in eine Taylorreihe entwickelt werden und unter der Annahme, der Exponent sei klein, können die höheren Potenzen der Taylorreihe vernachlässigt werden und es gilt:

$$e^{i\omega(n-1)\frac{\Delta x}{c}} \approx 1 - i\omega(n-1)\frac{\Delta x}{c} \quad (2.21)$$

Dadurch kann das gesamte elektrische Feld $E_{P_{Gesamt}}$ im Punkt P aufgrund des Superpositionsprinzips als Summe aus dem Feld E_Q vor der Platte und einem zusätzlichen Feld E_Z angeschrieben werden:

$$E_{P_{Gesamt}} = E_Q + E_Z = E_0 e^{i\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)} - i\omega(n-1)\frac{\Delta x}{c} E_0 e^{i\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)} \quad (2.22)$$

Somit ergibt sich als zusätzliches Feld

$$E_Z = -i\omega(n-1)\frac{\Delta x}{c} E_0 e^{i\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)} . \quad (2.23)$$

Die Ursache dieses zusätzlichen Feldes kann wie folgt durch die Schwingung der Elektronen in der Glasplatte erklärt werden. Diese werden durch die elektromagnetische Welle mit der elektrischen Kraft $F = q_e E_Q$ in Schwingung versetzt. Unter der Annahme, die Elektronen seien kleine Oszillatoren, die in y -Richtung mit der Masse m , der Ladung q_e und der Resonanzfrequenz ω_0 hinauf und hinunter schwingen, können diese mit der Bewegungsgleichung eines harmonischen ungedämpften getriebenen Oszillators

$$m \left(\frac{d^2 y}{dt^2} + \omega_0^2 y \right) = F_{treibend} = q_e E_Q = q_e E_0 e^{i\omega t} \quad (2.24)$$

beschrieben werden. Die Lösung dieser inhomogenen Differentialgleichung zweiter Ordnung kann als Summe aus homogener Lösung und spezieller Lösung geschrieben werden. Die homogene Lösung von Gleichung 2.24 ist die Lösung der ungedämpften harmonischen Schwingung:

$$y = y_0 e^{i\omega t} \quad (2.25)$$

2. Theorieteil

Durch Einsetzen von 2.25 in 2.24 und umformen gelangt man zu:

$$y_0 = \frac{q_e E_0}{m (\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (2.26)$$

und folglich durch Einsetzen von 2.26 in 2.25 zur Bewegung des Elektrons:

$$y = \frac{q_e E_0}{m (\omega_0^2 - \omega^2)} e^{i\omega t} \quad (2.27)$$

Das elektrische Feld $E_{P_{\text{ein Elektron}}}$ eines Elektrons bei $x = 0$ im Punkt P ist proportional zur Beschleunigung $\ddot{y}$ dieses Elektrons in der y - z -Ebene, wobei die Bewegung des Elektrons laut Annahme keine z -Komponente besitzt. Des Weiteren muss beachtet werden, dass sich das Feld mit der Lichtgeschwindigkeit c ausbreitet und somit das elektrische Feld E_P zum Zeitpunkt t bereits zum Zeitpunkt $t' = t - \frac{r}{c}$ in der Glasplatte erzeugt wurde. Dabei erhält man unter der Verwendung von Gleichung 2.25 und unter der Annahme, der Punkt P sei so weit von der Glasplatte entfernt, dass der Abstand des Elektrons von der x -Achse klein ist gegen den Abstand r zum Punkt P :

$$E_{P_{\text{ein Elektron}}} = \frac{q_e}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{\omega^2 y_0 e^{i\omega(t - \frac{r}{c})}}{r} \quad (2.28)$$

Die letzte Annahme ist deshalb relevant, da die Elektronen nur in der y - z -Ebene schwingen, aber der Beitrag zum elektrischen Feld im Punkt P nur von der auf den Abstand r lotrechten Komponente der Bewegung abhängt.

Um das elektrische Feld aller Elektronen in der y - z -Ebene an der Stelle $x = 0$ im Punkt P zu erhalten, müssen alle Beiträge der einzelnen Elektronen aufsummiert werden. Das elektrische Feld der Elektronen ist abhängig vom Abstand r zum Punkt P . Da alle Elektronen in einem Ring um die x -Achse denselben Abstand r besitzen, ist auch ihr Beitrag zum gesamten Feld in Punkt P derselbe. In einem Ring mit dem Radius ρ befinden sich $Z \cdot 2\pi\rho d\rho$ Ladungen, wenn Z die Anzahl der Elektronen pro Flächeneinheit ist (siehe Abbildung 2.2).

Somit gelangt man durch Integration über den Radius ρ bei fester Zeit t zum gesamten elektrischen Feld im Punkt P :

$$E_{P_{\text{alle Elektronen}}} = \int_{\rho=0}^{\infty} \frac{q_e}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{\omega^2 y_0 e^{i\omega(t - \frac{r}{c})}}{r} \cdot Z \cdot 2\pi\rho d\rho \quad (2.29)$$

Da der Abstand r abhängig vom Radius ρ eines Ringes ist, kann der Zusammenhang mittels Satzes des Pythagoras $r^2 = \rho^2 + x^2$ verwendet werden. Der Abstand x zwischen

2. Theorieteil

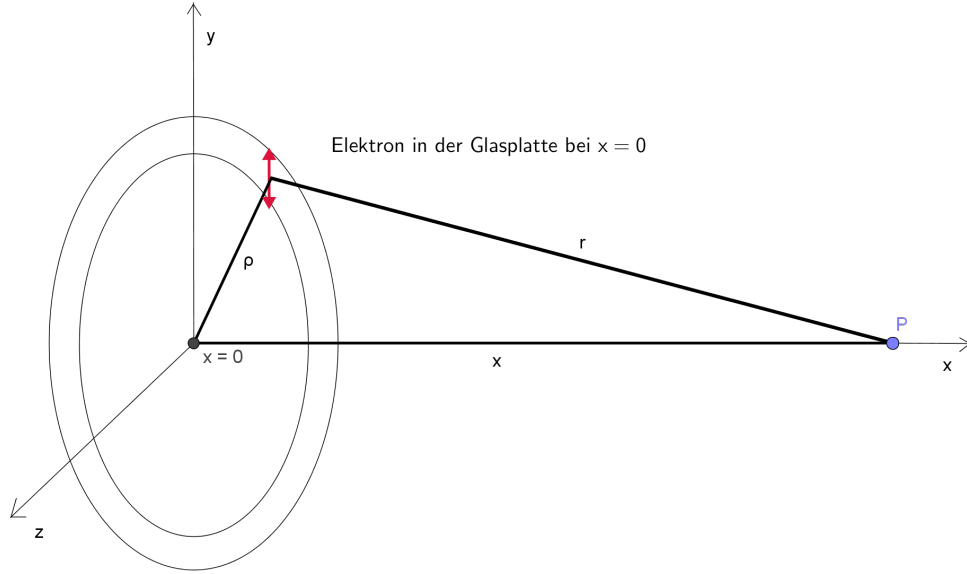


Abbildung 2.2.: Das elektrische Feld E_P einer Ebene von Oszillatoren bei $x = 0$ im Punkt P

dem Mittelpunkt der Ringe und dem Punkt P ist konstant, daher gilt für die Substitution der Variable:

$$2r \, dr = 2\rho \, d\rho \quad (2.30)$$

und man gelangt zu dem Integral (ohne Konstanten) mit den passenden Grenzen:

$$\int_{r=0}^{\infty} e^{\frac{-i\omega r}{c}} \, dr = -\frac{c}{i\omega} \left(e^{-i\infty} - e^{-\frac{i\omega}{c}x} \right) \quad (2.31)$$

Ein Problem scheint der Wert $e^{-i\infty}$ darzustellen. Die Grundannahme war, der Abstand r sei groß im Vergleich zum Radius ρ . Da hier das Integral bis unendlich läuft und der Abstand z konstant bleibt, nähern sich r und ρ immer näher an. Das bedeutet, die lotrechte Komponente der Bewegung der Elektronen nimmt immer stärker ab. Folglich nimmt der Beitrag der Elektronen zum elektrischen Feld im Punkt P mit steigendem Abstand r stetig ab. Physikalisch sinnvoll ist es folglich, diesen Term 0 zu setzen. Daraus ergibt sich mit allen Konstanten und Gleichung 2.26 für das elektrische Feld $E_{P_{\text{alle Elektronen}}}$:

$$E_{P_{\text{alle Elektronen}}} = -\frac{Zq_e}{2\varepsilon_0 c m} \frac{q_e E_0}{(\omega_0^2 - \omega^2)} i\omega e^{i\omega(t - \frac{x}{c})} \quad (2.32)$$

2. Theorieteil

Dieses elektrische Feld im Punkt P soll mit dem zusätzlichen Feld E_Z übereinstimmen. Durch Gleichsetzen von 2.23 mit 2.32 ergibt sich:

$$-\frac{Zq_e}{2\varepsilon_0 c} \frac{q_e E_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} i\omega e^{i\omega(t-\frac{x}{c})} = -i\omega(n-1) \frac{\Delta x}{c} E_0 e^{i\omega(t-\frac{x}{c})} \quad (2.33)$$

Durch Vereinfachen und Umformen gelangt man zum Brechungsindex n :

$$n = 1 + \frac{\Delta x \cdot Zq_e^2}{2\varepsilon_0 m(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (2.34)$$

In Gleichung 2.34 erkennt man, dass der Brechungsindex n sowohl vom Material als auch von Frequenz der anregenden elektromagnetischen Welle abhängt. Dieses Modell unterliegt allerdings einigen Einschränkungen. Die Annahmen waren zum Beispiel ein sehr dünnes Material, also ein kleines Δx , keine freien Elektronen oder keine Energieverluste beim Durchdringen der elektromagnetischen Welle des Materials, also einer Absorption. Auch wurde nicht berücksichtigt, dass die elektromagnetischen Wellen der einzelnen Elektronen sich gegenseitig beeinflussen und auch in die $-x$ -Richtung laufen. Man könnte zum Beispiel auch bei Gleichung 2.24 von einer gedämpften Schwingung ausgehen, wie in [3, S. 231-232] beschrieben. Dadurch gelangt man zu einem komplexen Brechungsindex n , dessen Imaginärteil die Absorption der elektromagnetischen Welle in einem Medium beschreibt. Im Folgenden werden jedoch nur transparente Medien betrachtet, bei denen die Absorption sehr gering ist und daher gilt:

$$n \approx n_{Real} \quad (2.35)$$

Für Medien sehr geringer Dichte, wie etwa Gase, ist die obige Näherung gut. Der Brechungsindex n soll ab hier als Quotient für die Veränderung der Geschwindigkeit im Medium gemäß Gleichung 2.15 behandelt werden.

Die Maxwellgleichungen in Materie

Im vorigen Abschnitt wurde das Verhalten einer elektromagnetischen Welle für eine sehr dünne Schicht eines Mediums betrachtet. Jedoch ist es von Interesse, eine elektromagnetische Welle innerhalb eines beliebigen Mediums beschreiben zu können. Analog zu den Maxwellgleichungen im Vakuum können analoge Gleichungen in Materie aufgestellt werden. Hierfür bedarf es der Definition neuer Größen, wie die dielektrische Verschiebungsdichte $\vec{D}$ und die magnetische Feldstärke $\vec{H}$:

2. Theorieteil

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E} \quad (2.36)$$

$$\vec{H} = \mu \mu_0 \vec{B} \quad (2.37)$$

Wobei ε die relative Dielektrizitätskonstante des Mediums und μ die relative Permeabilität des Mediums sind. Die dielektrische Verschiebungsdichte $\vec{D}$ berücksichtigt die Verschiebung von Ladungen im Medium durch das elektrische Feld $\vec{E}$. Die magnetische Feldstärke $\vec{H}$ berücksichtigt den Einfluss des Magnetfeldes $\vec{B}$ auf die Atome des Mediums. Mit diesen Größen lassen sich die Maxwellgleichungen im Medium folgendermaßen formulieren:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (2.38)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.39)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (2.40)$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{j} + \mu \mu_0 \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.41)$$

Analog zu Abschnitt 2.1.1 kann daraus eine Wellengleichung abgeleitet werden:

$$\Delta \vec{E} = \mu \mu_0 \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{v_{Ph}^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.42)$$

Wobei v_{Ph} die Phasengeschwindigkeit darstellt. Die Phasengeschwindigkeit v_{Ph} der Welle im Medium ist folglich unter Verwendung von Gleichung 2.11:

$$v_{Ph} = \frac{1}{\sqrt{\mu \mu_0 \varepsilon \varepsilon_0}} = \frac{c}{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}} \quad (2.43)$$

Im Folgenden werden keine ferromagnetischen Materialien verwendet, daher gilt für die relative Permeabilität μ :

$$\mu \approx 1 \quad (2.44)$$

Damit vereinfacht sich Gleichung 2.43 zu:

$$v_{Ph} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (2.45)$$

Wenn man Gleichung 2.45 mit Gleichung 2.15 vergleicht, stößt man auf folgenden Zu-

sammenhang:

$$n = \sqrt{\varepsilon} \quad (2.46)$$

Eine ebene periodische elektromagnetische Welle, die sich in x -Richtung bewegt, hat folglich die Form (vgl. Gleichung 2.13):

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot e^{i\omega(t - n \cdot \frac{x}{c})} \quad (2.47)$$

Analog zu Gleichung 2.14 kann auch hier eine Welle gefunden werden, die zwar eben und periodisch ist, sich aber nicht zwangsläufig in x -Richtung ausbreiten muss:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot e^{i(\omega t - n \vec{k} \cdot \vec{r})} \quad (2.48)$$

Für die folgenden Überlegungen ist diese Lösung der Wellengleichung in einem Medium ausreichend.

2.1.3. Reflexion und Brechung elektromagnetischer Wellen

Bis jetzt ist bekannt, wie sich eine elektromagnetische Welle im Vakuum ausbreitet und wie sie sich in einem isotropen Medium ausbreitet. Der Übergang von einem solchen Medium in ein anderes Medium wird den Kern der folgenden Überlegungen bilden.

Man nehme zwei transparente Medien mit den Brechungsindizes n_1 und n_2 , deren Grenzfläche die y - z -Ebene bei $x = 0$ darstellt, an und die Ausdehnung dieser Grenzfläche Δx sei vernachlässigbar gering. Des Weiteren sei $\vec{E}$ eine ebene periodische elektromagnetische Welle, die sich im ersten Medium in der x - z -Ebene bei $y = 0$ bewegt. Diese kann wie in Gleichung 2.48 beschrieben werden:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot e^{i(\omega t - n_1 \vec{k} \cdot \vec{r})} \quad (2.49)$$

Wenn diese Welle unter dem Winkel α auf die Grenzfläche trifft, lässt sich eine reflektierte Welle und eine gebrochene Welle beobachten. Über diese Wellen ist im Moment keine Aussage möglich. Zuerst müssen einige Randbedingungen betrachtet werden, nämlich wie sich ein elektrisches Feld beim Übertritt von einem Medium zu einem anderem Medium mit den Dielektrizitätskonstanten ε_1 und ε_2 verhält. Dabei wird zunächst ein elektrostatisches Feld betrachtet. Dort gilt $\text{rot} \vec{E} = 0$, was bedeutet, dass es sich bei $\vec{E}$ um ein konservatives Feld handelt. Entlang jedes beliebigen geschlossenen Weges ver-

2. Theorieteil

schwindet das Kurvenintegral, also auch wenn man sich entlang eines Rechtecks bewegt. Zwei gegenüberliegende Seiten des Rechtecks sollen die Grenzfläche kreuzen. Wenn diese Seiten beliebig klein gemacht werden und das Kurvenintegral entlang des gesamten Rechtecks verschwindet, folgt daraus, dass die Kurvenintegrale über die beiden längeren Rechteckseiten sich gerade kompensieren. Da die Richtungen der Kurvenintegrale entgegengesetzt und gleich groß sind, müssen die elektrischen Felder, also jene Komponenten, die parallel zur Grenzfläche sind, in beiden Medien übereinstimmen. (vgl. [3, S.236-237] [8, 33-2 - 33-4])

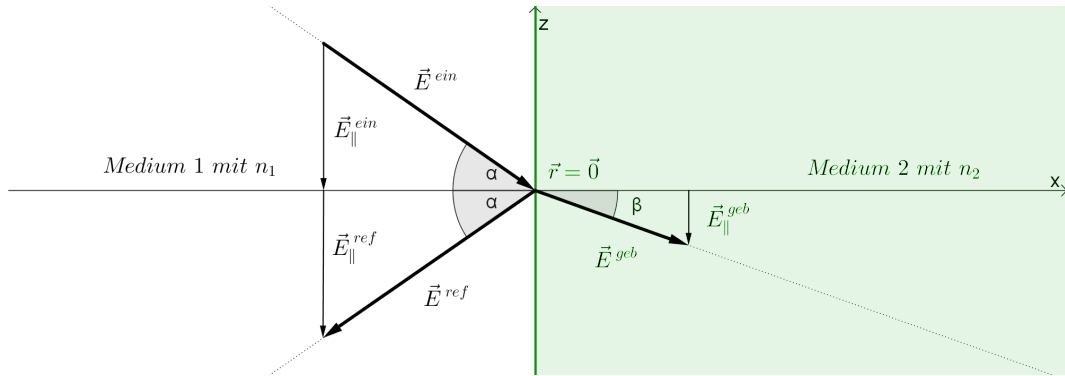


Abbildung 2.3.: Herleitung des Reflexions- und Brechungsgesetzes

Aufgrund der Stetigkeit der Parallelkomponenten $E_{\parallel}^{ein}$, $E_{\parallel}^{ref}$ und $E_{\parallel}^{geb}$ folgt:

$$\vec{E}_{\parallel}^{ein} + \vec{E}_{\parallel}^{ref} = \vec{E}_{\parallel}^{geb} . \quad (2.50)$$

Für $\vec{r} = 0$, direkt im Ursprung auf der Grenzfläche folgt:

$$\vec{E}_{0\parallel}^{ein} e^{i\omega^{ein}t} + \vec{E}_{0\parallel}^{ref} e^{i\omega^{ref}t} = \vec{E}_{0\parallel}^{geb} e^{i\omega^{geb}t} . \quad (2.51)$$

Diese Gleichung kann für alle Zeiten t nur stimmen, wenn die Exponenten übereinstimmen, also gilt folglich:

$$\omega^{ein} = \omega^{ref} = \omega^{geb} = \omega . \quad (2.52)$$

Das heißt, die Frequenz ω aller drei elektrischen Wellen ist gleich. Die Stetigkeitsbedingung 2.50 gilt nicht nur bei $r = 0$, sondern an allen Punkten der Grenzfläche. Folglich gilt:

2. Theorieteil

$$\vec{E}_{0\parallel}^{ein} e^{i(\omega t - n_1 \vec{k}^{ein} \cdot \vec{r})} + \vec{E}_{0\parallel}^{ref} e^{i(\omega t - n_1 \vec{k}^{ref} \cdot \vec{r})} = \vec{E}_{0\parallel}^{geb} e^{i(\omega t - n_1 \vec{k}^{geb} \cdot \vec{r})} . \quad (2.53)$$

Analog zu Gleichung 2.51 müssen die Exponenten übereinstimmen, um eine nichttriviale Lösung zu erhalten:

$$\vec{k}^{ein} \cdot \vec{r} = \vec{k}^{ref} \cdot \vec{r} = \vec{k}^{geb} \cdot \vec{r} . \quad (2.54)$$

Mit:

$$\vec{r} = \begin{pmatrix} 0 \\ x \\ y \end{pmatrix} ; \quad \vec{k}^{ein} = \begin{pmatrix} k_x^{ein} \\ 0 \\ k_z^{ein} \end{pmatrix} ; \quad \vec{k}^{ref} = \begin{pmatrix} k_x^{ref} \\ k_y^{ref} \\ k_z^{ref} \end{pmatrix} ; \quad \vec{k}^{geb} = \begin{pmatrix} k_x^{geb} \\ k_y^{geb} \\ k_z^{geb} \end{pmatrix} . \quad (2.55)$$

Durch Bildung der Skalarprodukte in Gleichung 2.54 gelangt man zu:

$$n_1 k_z^{ein} z = n_1 (k_y^{ref} y + k_z^{ref} z) = n_2 (k_y^{geb} y + k_z^{geb} z) . \quad (2.56)$$

Woraus folgt, dass $k_y^{ref} = 0$ und $k_y^{geb} = 0$ gelten muss und sich damit sowohl die reflektierte als auch die gebrochene Welle in derselben Ebene ausbreitet, wie die einfallende Welle. Des Weiteren folgt daraus:

$$k_z^{ein} = k_z^{ref} \quad (2.57)$$

$$k_z^{ein} = \frac{n_2}{n_1} k_z^{geb} . \quad (2.58)$$

Wenn α den Einfallswinkel, $\tilde{\alpha}$ den Reflexionswinkel und β den Brechungswinkel darstellen, gilt für den Wellenvektor $\vec{k}^{ein}$:

$$\vec{k}^{ein} = \begin{pmatrix} \frac{\omega}{c} \cos \alpha \\ 0 \\ \frac{\omega}{c} \sin \alpha \end{pmatrix} . \quad (2.59)$$

Und damit folgt aus Gleichungen 2.57 und 2.58 das Reflexionsgesetz und das Brechungsgesetz:

$$\frac{\omega}{c} \sin \alpha = \frac{\omega}{c} \sin \tilde{\alpha} \Rightarrow \alpha = \tilde{\alpha} \quad (2.60)$$

$$\frac{\omega}{c} \sin \alpha = \frac{n_2}{n_1} \frac{\omega}{c} \sin \beta \Rightarrow \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} . \quad (2.61)$$

Zusammenfassend werden kurz die Grundannahmen wiederholt, unter denen diese Gesetze gültig sind. Ausgegangen wurde von einer ladungs- und stromfreien Umgebung. Die betrachteten Medien haben keine freien Ladungsträger, sind optisch isotrop und homogen, alle gebundenen Ladungsträger verhalten sich wie ungedämpfte Oszillatoren, die alle mit der gleichen Frequenz schwingen, es gibt keine Absorption und keine Dispersion. Letztere Annahme würde das Brechungsgesetz jedoch nicht verändern, sondern nur dafür sorgen, dass der Brechungsindex n eine Funktion der Wellenlänge λ wäre. Trotz dieser gewaltigen Einschränkungen können eine Vielzahl der optischen Phänomene erklärt werden.

Eine weitere brauchbare Einschränkung ist es, nur sichtbares Licht zu betrachten. Elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge λ zwischen 380nm und 780nm werden als sichtbares Licht bezeichnet³. Das sind jene elektromagnetischen Wellen, die die Rezeptoren der menschlichen Augen wahrnehmen können.

2.1.4. Geometrische Optik

Oft reicht es in der Optik, elektromagnetische Wellen auf ihre Ausbreitungsrichtung zu reduzieren und Welleneigenschaften zu vernachlässigen. Unter der Ausbreitungsrichtung einer elektromagnetischen Welle versteht man in isotropen Medien die Richtung des Wellenvektors $\vec{k}$. Diese Ausbreitungsrichtung wird als Lichtstrahl bezeichnet. Eine Menge von Lichtstrahlen, die durch äußere Gegebenheiten eingeschränkt werden, nennt man Lichtbündel. Diese Näherung der geometrischen Optik ist dann anwendbar, wenn der Lichtbündelquerschnitt groß gegen die Wellenlänge des Lichtes ist. Der Grund dafür ist, dass Beugungserscheinungen vernachlässigbar werden. Aufgrund der – für menschliche Maßstäbe – kleinen Wellenlänge des sichtbaren Lichts ist selbst ein großer Lichtbündelquerschnitt gegen makroskopische Maßstäbe noch relativ klein. In [3] wird als praktische Faustformel für eine elektromagnetische Welle mit einer Wellenlänge von 500 nm ein Lichtbündelquerschnitt, der größer als 10 μm ist, vorgeschlagen. Folglich kann man so ein Lichtbündel aus menschlicher Perspektive als „unendlich dünn“, also als geometrischen Strahl betrachten. [3, S.268]

Diese Lichtbündel werden von Lichtquellen ausgesendet, durchwandern transparente Medien, werden von Oberflächen reflektiert und treten letztendlich durch die Pupille in

³DIN 5031 Teil 7

die Augen der Menschen, wo ihre Gesamtheit ein Bild an der Netzhaut entstehen lässt. Das wichtigste Grundprinzip der geometrischen Optik ist Fermats Prinzip der geringsten Zeit. Dieses besagt, dass das Lichtbündel immer den schnellsten Weg zwischen zwei beliebigen Punkten wählt. [9, S. 26-3] Mit diesem Prinzip lassen sich die wichtigsten Gesetze der geometrischen Optik, das Reflexions-, das Brechungsgesetz und sogar die geradlinige Ausbreitung ableiten. In der geometrischen Optik wird keinerlei Aussage über die Beschaffenheit des Lichts getroffen, und sie wird folglich mehr zu einer mathematischen als einer physikalischen Disziplin.

Reflexion in der geometrischen Optik

Aus dem Fermatschen Prinzip lässt sich durch geometrische Überlegungen und eine Extremwertaufgabe das Reflexionsgesetz ableiten. Betrachtet wird ein Lichtbündel, welches vom Punkt A zum Punkt B gelangen soll und dabei einen Punkt P auf der Spiegelfläche passieren soll. Der Einfallswinkel wird mit α bezeichnet und der Ausfallswinkel mit α' . Das Lichtbündel benötigt durch ein beliebiges homogenes optisches Medium die Zeit $t = (1/v)(AP + PB)$. Nach dem Fermatschen Prinzip nimmt das Licht jenen Weg, für den es die geringste Zeit benötigt. Folglich muss hier die Strecke $(AP + PB)$ minimal sein.

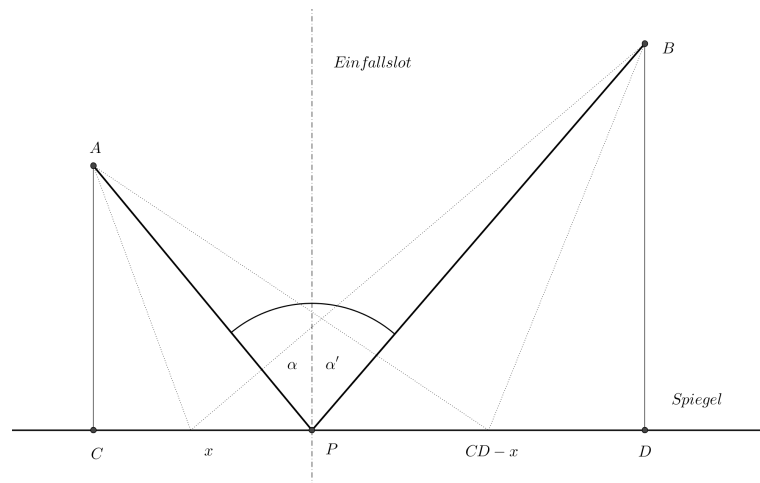


Abbildung 2.4.: Herleitung des Reflexionsgesetzes

Mithilfe des Satzes des Pythagoras lassen sich die Strecken AP und PB durch die Seiten AC und $PC = x$ beziehungsweise BD und $PD = CD - x$ ausdrücken:

$$t = \frac{1}{v}(AP + PB) = \frac{1}{v} \left(\sqrt{x^2 + AC^2} + \sqrt{(CD - x)^2 + BD^2} \right) . \quad (2.62)$$

2. Theorieteil

Die Zeit t ist dann minimal, wenn die Funktion $t(x)$ ein globales Minimum aufweist, also die erste Ableitung verschwindet und die zweite Ableitung nicht:

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{v} \left(\frac{x}{\sqrt{(x^2 + AC^2)}} - \frac{CD - x}{\sqrt{((CD - x)^2 + BD^2)}} \right) = 0 . \quad (2.63)$$

Durch Rücksubstituieren erhält man je das Verhältnis zweier Seiten der rechtwinkligen Dreiecke ACP und PBD , was der Definition des Sinus entspricht:

$$\frac{CP}{AP} - \frac{PD}{PB} = \sin \alpha - \sin \alpha' = 0 . \quad (2.64)$$

Da die Winkel α und α' Teil des Dreiecks APB sind, und somit $\alpha \in [0, \pi]$ gilt, gilt:

$$\sin \alpha = \sin \alpha' \Rightarrow \alpha = \alpha' . \quad (2.65)$$

Womit das Reflexionsgesetz hergeleitet ist.

Brechung in der geometrischen Optik

Das analoge Prinzip wird für das Brechungsgesetz verwendet (siehe Abbildung 2.5). Hier befindet sich der Punkt A im Medium 1 und der Punkt B im Medium 2. Das Lichtbündel durchtritt die Grenzfläche zwischen den Medien im Punkt P . Der Einfallswinkel ist mit α bezeichnet und der Brechungswinkel mit β .

Diesmal benötigt das Lichtbündel die Zeit $t = (1/v_1)AP + (1/v_2)PB$. Analog zu Gleichung 2.62 kann der Satz des Pythagoras angewandt werden und man gelangt zu:

$$t = \frac{1}{v_1} \sqrt{x^2 + AC^2} + \frac{1}{v_2} \sqrt{(CD - x)^2 + BD^2} . \quad (2.66)$$

Durch Ableiten der Funktion $t(x)$ nach x und Nullsetzen erhält man:

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{v_1} \frac{x}{\sqrt{(x^2 + AC^2)}} - \frac{1}{v_2} \frac{CD - x}{\sqrt{((CD - x)^2 + BD^2)}} = 0 . \quad (2.67)$$

Dabei erhält man mit $v_i = c/n_i$ bereits das Brechungsgesetz:

$$n_1 \frac{CP}{AP} = n_2 \frac{PD}{PB} \Rightarrow n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta . \quad (2.68)$$

Mit diesen beiden Gesetzen können in der geometrischen Optik komplizierte Linsensysteme und optische Geräte vergleichsweise einfach erklärt und beschrieben werden,

2. Theorieteil

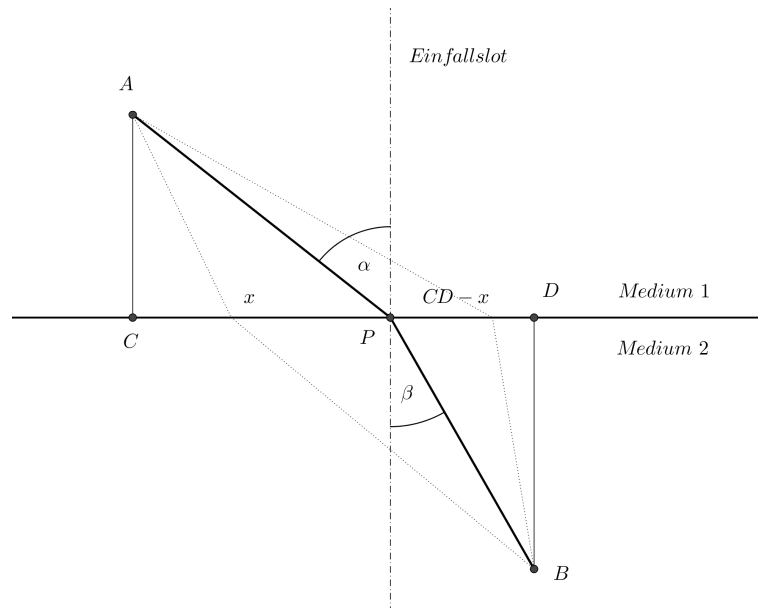


Abbildung 2.5.: Herleitung des Brechungsgesetzes

ohne mit mathematisch aufwendigen elektromagnetischen Wellen in Materie arbeiten zu müssen. Zu beachten sind die oben genannten Einschränkungen, unter denen diese Approximation der geometrischen Optik gültig ist.

2.2. Wissenschaftshistorischer Hintergrund

Die ältesten bekannten Texte über die Optik stammen aus der Zeit des griechischen Hellenismus von Euklid [17, S. 65-66]. Jedoch verstand man unter der Optik nur die Lehre des Sehens, oder genauer, die Beziehung eines Objekts, wie wir es sehen und wie es tatsächlich im Raum ist [21, S. 8]. Zu dieser Zeit unterschied man zwischen den Sehstrahlen und den Lichtstrahlen. Die Sehstrahlen werden vom Auge in kegelförmigen Sehstrahlbündel ausgesandt, dadurch können beleuchtete Objekte erkannt werden [16]. Die Optik behandelte somit nicht die Phänomene der Lichtstrahlen, wie heute, sondern man unterschied zwischen der Katoptrik, der Lehre der Reflexion, und der Dioptrik, der Lehre der Brechung. Letztere behandelte somit die Beziehung eines Objekts, wo es tatsächlich im Raum ist und wo es zu sein scheint [21, S. 8]. Ptolemäus schrieb in seinem Werk *Optik*:

There are two ways in which the visual ray is broken. One involves rebound and is caused by reflection from bodies that block the [visual ray's] passage and that are included under the heading of "mirrors." The other way, however, involves penetration and is caused by a deflection in media that do not [completely] block the [visual ray's] passage and those media are included under the single heading "transparent." [20] S. 126

Im Folgenden werden einige Eckpfeiler der Geschichte des Reflexionsgesetzes und des Brechungsgesetzes ausgewählt und eingehend vorgestellt. Den Anfang wird Herons Ansatz zur Herleitung des Reflexionsgesetzes aus seiner Schrift *Katoptrik* bilden. Anschließend werden die empirischen Versuche von Claudius Ptolemäus zur Aufstellung von Brechungstafeln erörtert. Erst im 17. Jahrhundert entdeckte Willebrord Snel das zugehörige Brechungsgesetz. Den letzten Teil stellen die Theorien von Newton und Huygens über die Natur des Lichts dar und die Ableitung der beiden wichtigsten Gesetze der geometrischen Optik.

2.2.1. Das Reflexionsgesetz nach Heron

In einer anonymen lateinischen Übersetzung, die Heron von Alexandria (1. Jahrhundert nach Christus ⁴) zugeschrieben wird, befindet sich ein interessanter Beweis für das Reflexionsgesetz von Lichtstrahlen an einem ebenen Spiegel. Die Behauptung lautet, dass

⁴Hier herrschte lange Uneinigkeit, bis Otto Neugebauer aufgrund einer in Herons Texten beschriebenen Sonnenfinsternis dessen Leben um das Jahr 62 nach Christus festlegen konnte [18]. Andererseits argumentiert Nathan Sidoli in [18] aufgrund eines Textes von Heron, dass 62 vor Christus zumindest einen Terminus post quem darstellt.

der Einfallswinkel und Ausfallswinkel eines Lichtstrahls, der vom Punkt A ausgeht, an einem ebenen Spiegel reflektiert wird und anschließend zu Punkt B gelangt, gleich groß ist. Heron geht bei seinem Beweis davon aus, dass der Lichtstrahl den kürzesten Weg zwischen A und B nimmt (man vergleiche mit dem Fermatsches Prinzip in Abschnitt 2.1.4, dort ist es die kürzeste Zeit). [17, S. 61-63]

Der Sehstrahl⁵ soll von Punkt B , dem Beobachter, über einen Punkt P auf dem ebenen Spiegel zum Punkt A , einem Objekt, gelangen (siehe Abbildung 2.6). Die Überlegung von Heron ist Folgende⁶: Wenn man den Punkt A um die Spiegelfläche spiegelt, erhält man einen Punkt A' , dessen Abstand zu Punkt P genau gleich groß wie der Abstand von Punkt A zu Punkt P . Das heißt es gilt: $AP = A'P$. Folglich ist es egal, ob man den eigentlichen Weg des Lichtes betrachtet, oder den Weg vom Spiegelbild A' . Heron ersetzte in seinen Überlegungen einfach die Sonne durch ihr Spiegelbild [17, S. 61-63]. Der Weg von A' über P nach B ist nach dem Prinzip der Dreiecksungleichung minimal, wenn alle drei Punkte auf einer Linie, also einer Geraden, liegen. Die Scheitelwinkel $\angle BPS'$ und $\angle SPA'$ zwischen der Grenzfläche und der Geraden durch B , P und A' sind gleich groß. Auch die Winkel $\angle SPA'$ und $\angle APS$ sind aufgrund der Spiegelung gleich groß und folglich gilt⁷:

$$\angle BPS' = \angle APS \quad \text{beziehungsweise} \quad \alpha = \alpha' . \quad (2.69)$$

Dieselbe Überlegung präsentiert auch Richard Feynman in [9, S. 26-3 - 26-4]. Dieser Beweis für das Reflexionsgesetz ist historisch gesehen zwar nicht der erste [17, S. 61-63], aber er ist für die Schule sehr anschaulich und elegant.

2.2.2. Die Experimente von Claudius Ptolemäus

Claudius Ptolemäus wurde vermutlich um 100 nach Christus geboren, jedoch lässt sich das nicht mit Sicherheit sagen. Auch über seinen Geburtsort ist kaum eine Aussage möglich, doch die Vermutung liegt nahe, dass er aufgrund seines Vornamens römischer Bürger war, und griechisch-ägyptischer Abstammung. Sein Leben verbrachte er vorwiegend in

⁵Vom Auge ausgehend.

⁶Die Beweisführung von Heron ist leicht anders formuliert und verwendet andere Begriffe (siehe vollständige englische Übersetzung in [20].), aber der Grundgedanke der folgenden Argumentation ist derselbe

⁷Heron maß Einfallswinkel und Ausfallswinkel von der Grenzfläche ausgehend, und nicht vom Einfallslot, wie heute üblich. Die Winkel α und α' dienen nur, um einen Vergleich mit dem bereits in Abschnitt 2.1.4 und Abschnitt 2.1.3 herzustellen.

2. Theorieteil

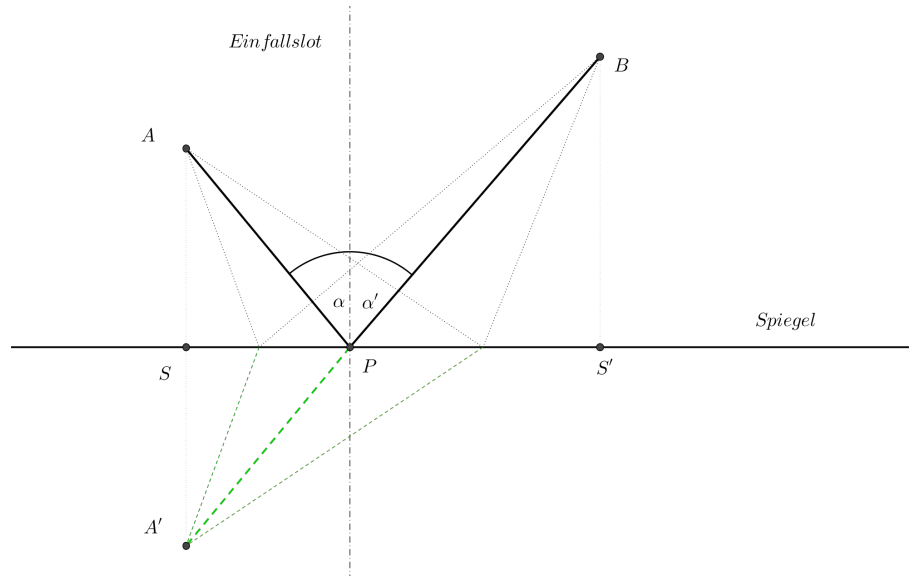


Abbildung 2.6.: Herleitung des Reflexionsgesetzes nach Heron

Alexandria. Bekannt ist Ptolemäus vor allem durch seine astronomischen Leistungen und sein Hauptwerk den *Almagest*, ursprünglich *Megiste Syntaxis* (größte Zusammenstellung), in denen er die Bewegung der Planeten beschreibt. Weitere Werke sind die *Geographika* oder das für die folgenden Betrachtungen herangezogene Werk *Optik*. Seine Arbeiten stützten sich zum Teil auf andere große Philosophen aus Alexandria, wie Euklid, Erathosthenes oder Heron. [19, S. 1-5]

In Ptolemäus Werk *Optik* finden sich die „ältesten erhaltenen systematischen Darstellungen von Brechungsphänomenen“ [17, S. 73-74]. Dabei entwickelt er Experimente und tabellarisiert unter anderem die Brechungswinkel bei verschiedenen Einfallswinkeln beim Übergang des Sehstrahls von Luft zu Wasser, Luft zu Glas und Wasser zu Glas. Mark Smith übersetzt in [20] die erhaltenen Elemente dieses Werks ins Englische. Dort beschreibt Ptolemäus auch ein Experiment zur Überprüfung des Reflexionsgesetzes⁸:

[EXPERIMENT III.1] Let a round, bronze plaque of moderate size [...] be set up, and let A be its center. Let both faces be planed down as carefully as possible, and let its edges be rounded and polished. Then let a small circle be inscribed at centerpoint A on either of its faces, and let it be $BGDE$. On this same face let two diameters, BD and GE , be inscribed to intersect at right angles; and let each quarter circle be divided into 90 degrees. [...] Now let three thin, small, square, straight sheet of iron be formed. [Let one of them remain straight, and let one

⁸Ptolemäus beschreibt das Experiment auch für konkave und konvexe Spiegel. Diese Passagen wurden hier weggelassen, folglich tritt manchmal die Mehrzahl „mirrors“ auf.

2. Theorieteil

of its sides be polished so that it appears as a clear mirror. [...] Let line BA be drawn in white and AL in some other color. Then let a small diopter be mounted upon AL , and let the aforementioned plaque be disposed in such a way that [the sight-line of] the diopter passes easily through point L and along line AL . Now let the aforementioned plaque be placed with the side upon which the mirrors are [to be mounted] facing up. Of these mirrors, let the plane one lie on GAE , [...]. Finally, in the middle of the upper edge of each of the mirrors let a pin be attached axially to the mirror so as to keep it in place on point A . Assume, then, that we view with either of our eyes through the diopter, which is placed at point L on AL , and that we direct our line of sight toward the axial pin of [each of] the mirrors. Accordingly, if we slide a small colored marker on the plaque's surface until it appears to us to lie on the same line of sight with A , then point L , point A , and the image that is seen in the three mirrors will appear [to lie] upon a single line [of sight]. If, therefore, we mark the point at which the colored marker stands on the plaque's surface - i.e., the place from which the marker's image appears in those mirrors (e.g., the place represented by point M) - and if we draw out straight line AM , we will find that arc BM is always equal to arc BL . Since that is the case, angle LAB will be equal to angle MAB , and line BD will be normal to all of those mirrors. Line AL [thus] delineates the [branch of the] visual ray incident to the mirror's surface from the eye, whereas line AM delineates the [branch of the] visual ray reflected from the mirror's surface to the visible object. [20, S. 82-83]

Das Reflexionsgesetz war schon seit langem bekannt, doch der Zusammenhang zwischen Einfallswinkel und Brechungswinkel war bis dato unbekannt. Bereits Euklid beschrieb ein Experiment, in dem eine Münze am Boden eines intransparenten Gefäßes liegt. Wenn man den Kopf so positioniert, dass die Münze gerade hinter dem Rand des Gefäßes aus dem Blickfeld verschwindet und nun Wasser in das Gefäß füllt, wird die Münze wieder sichtbar [16, S. 53-61]. Heron vermutete in der Brechung eine Sonderform der Reflexion, als würden Fugen oder Spalten in einem teilweise festem Körper einige Strahlen ablenken [20, S. 128]. Auch Ptolemäus ging von einer Ähnlichkeit zwischen der Reflexion und der Brechung aus, doch er wollte eine Gesetzmäßigkeit finden, die analog zum Reflexionsgesetz war. Um den Zusammenhang empirisch zu ermitteln beschreibt er folgendes Experiment:

[EXPERIMENT V.1] Let circle $ABGD$ [...] be described on that plaque about centerpoint E , and let the two diameters AEG and BED intersect one another at right angles. Let each of the [resulting] quadrants be divided into 90 equal increments. At the centerpoint let a small marker of some color or other be attached, and let the plaque be stood upright in the small vessel [discussed in the previous experiment]. Then let a suitable amount of water that is clear enough to be seen through be poured into that vessel, and let the marked-off plaque be placed erect at right angles to the surface of the water. Let all of semicircle BGD of the plaque, but nothing beyond that, lie under water, so that diameter AEG is normal to the

2. Theorieteil

water's surface. From point A , let a given arc AZ be marked off on either of the two quadrants that lie above the water. Furthermore, let a small, colored marker be placed at Z . Now, if we line up both markers at Z and E along a line of sight from either eye so that they appear to coincide, and if we then move a small, thin peg along the opposite arc GD under water until the end of the peg, which lies upon that opposite arc, appears to lie directly in line with the two previous markers, and if we mark off the portion of the arc GH that lies between G and the point at which the object would appear unrefracted, the resulting arc will always turn out to be smaller than AAZ . Moreover, if we join lines ZE and EH , angle $AEZ > \text{angle } GEH$, which cannot be the case unless there is refraction - that is, unless ray ZE is refracted toward H according to the excess of one of the opposite angles over the other. Furthermore, if we place our line of sight along normal AE , we will find the image directly opposite along its rectilinear continuation, which will extend to G ; and this [radial line] undergoes no refraction. [...] [20, S. 130-131]

Ptolemäus maß für Einfallswinkel von 10° bis 80° in Zehnerschritten die Brechungswinkel und tabellarisierte diese. Es gibt die Vermutung, er hätte nicht alle Werte gemessen, sondern einige Werte durch Interpolation ergänzt, oder durch Korrekturen der Messwerte angepasst [17, S. 73-74]. In Ptolemäus' Daten ist die Veränderung der Differenzen zwischen Einfalls- und Brechungswinkel konstant. Er sah darin den gesetzmäßigen Zusammenhang und traute mehr der „Schönheit“ der Gesetzmäßigkeit als den empirischen Daten [21, S. 238-240]. Neben diesem Experiment, beschreibt Ptolemäus zwei sehr ähnliche Experimente für den Übergang von Luft zu Glas und von Glas zu Wasser, die hier jedoch nicht angeführt werden.

Da Ptolemäus einer der letzten großen griechischen Gelehrten seiner Zeit war, bildete dies in der westlichen Welt den Status Quo für die nächsten 1500 Jahre des geistigen Stillstands [16, S. 63-70].

2.2.3. Das Brechungsgesetz nach Snellius

Willebrord Snel (lateinisch auch Willebrordus Snellius) entdeckte 1626 einen mathematischen Zusammenhang zwischen dem Einfallswinkel und dem Brechungswinkel eines Lichtstrahls, der von einem homogenen optischen Medium in ein anderes homogenes optisches Medium eintritt oder austritt. In der Wissenschaftsgeschichte ist der Status Quo der, dass Thomas Harriot bereits 1602 und René Descartes zu ähnlicher Zeit wie Willebrord Snel ebenfalls diesen Zusammenhang entdeckten [10]. Im Zuge des folgenden Absatzes wird jedoch nur die Arbeit von Willebrord Snel beleuchtet, der historische Kontext grob umrissen und seine mathematischen und physikalischen Überlegungen ge-

nauer behandelt.

Willebrord Snel wurde 1580 als Sohn von Rudolf Snel, des Professors für Mathematik an der Universität Leiden, geboren. Er begann zwar Jura zu studieren, interessierte sich aber mehr für Mathematik und nutzte den Einfluss seines Vaters. Entscheidend für die Entwicklung des Brechungsgesetzes war sein Aufenthalt in Prag, wo er die Techniken der astronomischen Beobachtungen und der geodätischen Messungen lernte. Willebrord Snel trat 1613 in die Fußstapfen seines Vaters und übernahm seinen Lehrstuhl für Mathematik in Leiden. Zum Lehrstuhl der Mathematik gehörte auch die Anwendung der Mathematik in der geometrischen Optik, in der Astronomie und im Vermessungswesen. [10] Zur Zeit von Snellius gab es zwar viele Ideen über die Beschaffenheit des Lichts, jedoch keine in sich konsistente Theorie. Es war auch schon seit langer Zeit bekannt, dass Licht beim Übertritt in ein anderes Medium reflektiert und gebrochen wird, jedoch musste bei der Brechung auf empirisch erhobene Tabellen zurückgegriffen werden. Die geometrische Optik war auch mehr eine mathematische Disziplin als eine physikalische.

Klaus Hentschel rekonstruiert in [10] die Entdeckung des Brechungsgesetzes (siehe Kapitel 2.1) anhand des Amsterdamer Manuskripts. Dieses Schriftstück ist eine Kurzfassung der unveröffentlichten Arbeit von Snellius über die Lichtbrechung und wurde 1935 von Cornelius de Waard gefunden und publiziert. Es liefert wichtige Hinweise auf den Textaufbau und den Argumentationsgang des Originals.

Vorweg muss noch erwähnt werden, dass Snellius den Bildort nicht so wie heute in der geometrischen Optik üblich definiert hat. In der geometrischen Optik sendet ein beliebiges Objekt aus jedem Punkt unendlich viele Lichtbündel aus. Das Bild dieser Punkte entsteht dort, wo sich die ausgesendeten Lichtbündel wieder treffen. Snellius definiert den Bildort folgendermaßen: Wenn ein Objekt O einen Lichtstrahl aussendet, wird dieser beim Übergang vom optisch dichteren in das optisch dünnere Medium im Inzidenzpunkt I vom Einfallslot weg gebrochen und gelangt zu Beobachter A . Der Bildort B ist der Schnittpunkt der Geraden durch die Punkte A und I mit dem Lot auf die Grenzfläche durch das Objekt O .

Den Ausgangspunkt der Überlegungen von Snellius stellt ein Experiment des islamischen Naturforschers Ibn-al-Haitam dar. Dieser beschreibt eine Kreisscheibe, aus deren Mittelpunkt mehrere eingeritzte Linien in gleichmäßigem Abstand radial nach außen führen. Durch Eintauchen der Kreisscheibe in ein mit Wasser gefülltes Becken bis über den Mit-

2. Theorieteil

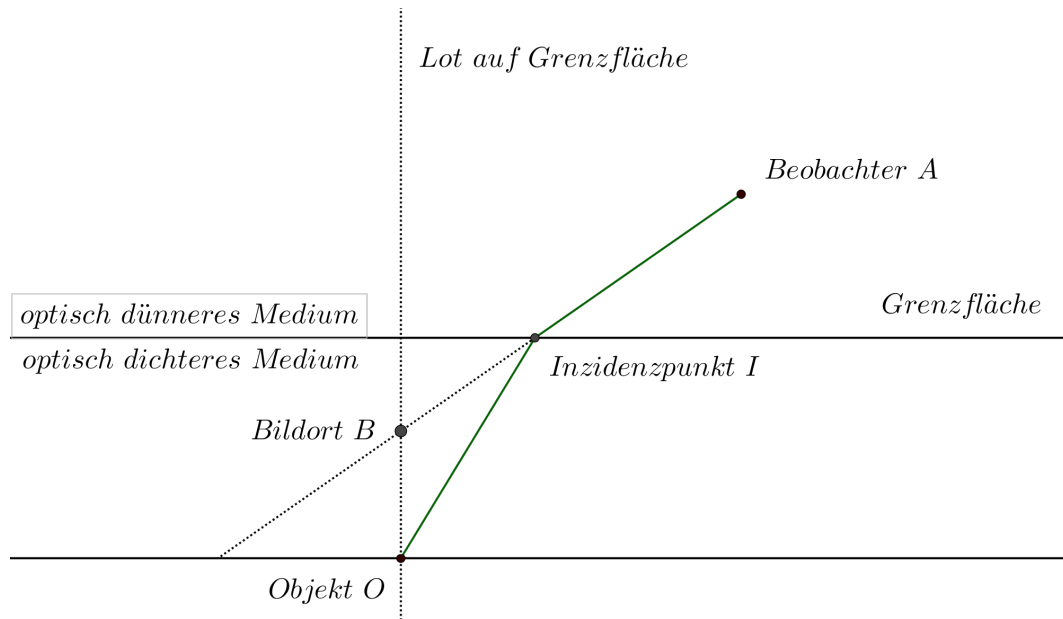


Abbildung 2.7.: Definition des Bildortes B nach Snellius

telpunkt erscheinen die Linien an der Grenzfläche zwischen Wasser und Luft abgelenkt zu sein, wenn man von schräg oben und vorne auf die Kreisscheibe blickt. Wenn man nun die Kreisscheibe so dreht, dass sich eine Linie genau lotrecht zur Wasseroberfläche befindet, ist kein Knick in der Linie zu beobachten. Dennoch wirkt die Linie verkürzt und der Mittelpunkt angehoben. Daraus zieht Snellius folgenden Schluss:

[...] ich glaube, daß die Brechung des Lichtes nicht von der Oberfläche eines durchsichtigen Gegenstandes, sondern von seiner ganzen Dichte her geschieht. [...] Dazu kommt, daß auch der senkrechte Strahl nicht von Brechung frei ist, mögen auch die Optiker anders darüber urteilen. Denn eine Münze, die auf dem Boden eines leeren Gefäßes liegt, wird vom Auge, das sie von oben her gerade betrachtet, in der wahren Entfernung wahrgenommen. Wenn nun Wasser hineingegossen wird, wird man ihr Bild näher an den Blick [das Auge] herankommen sehen; sie wird also gebrochen, aber die Brechung geschieht nicht an der Oberfläche aufgrund des veränderten Einfallswinkels in das Gebrochene, was hier keinen Platz hat: daher [geschieht sie] von der Dichte her. (Willebrordus Snellius) [10, S. 306]

Diese Schlussfolgerung untermauert er auch anhand der Brechungskurve. Diese Brechungskurve kommt zustande, wenn ein Beobachter B am Rand eines Wasserbeckens steht und seinen Blick über die Oberfläche des Wassers schweifen lässt. Wenn ϕ jener Winkel ist, den der im Auge eintreffende Lichtstrahl mit dem Lot durch das Auge einschließt, dann beginnt man bei $\phi = 0^\circ$ und steigert diesen Winkel kontinuierlich. In Abbildung 2.8 sieht man eine Folge von Lichtstrahlen mit einer Schrittweite von

2. Theorieteil

$\Delta\phi = 10^\circ$. Die Brechkungskurve entspricht der scheinbaren Anhebung des Beckenbodens. Die Konstruktion der Bildpunkte ist analog zu Abbildung 2.7.

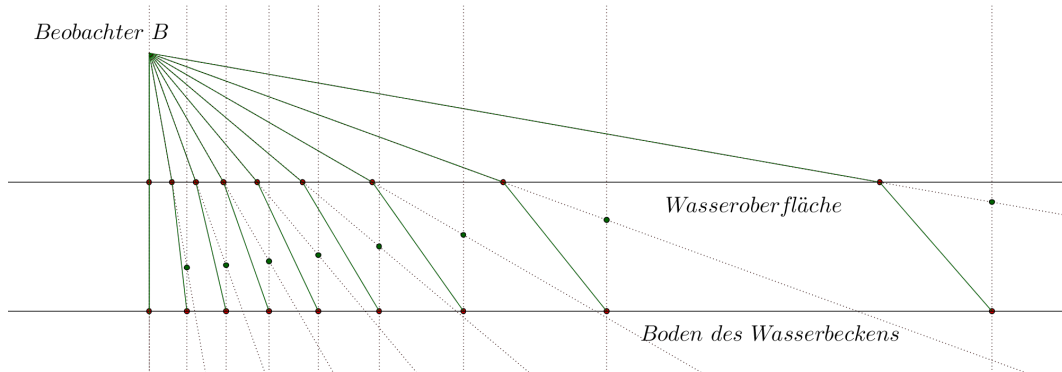


Abbildung 2.8.: Brechkungskurve mit einer Schrittweite von $\Delta\phi = 10^\circ$

In Abbildung 2.8 lässt sich erkennen, dass die Brechkungskurve direkt unterhalb des Beobachters nur der echten Tiefe des Wasserbeckens entsprechen kann, wenn sie einen abrupten Sprung macht. In Abbildung 2.9 wurde eine noch kleinere Schrittweite von $\Delta\phi = 2^\circ$ gewählt und für die Bildpunkte sogar eine Schrittweite von $\Delta\phi = 0,2^\circ$.

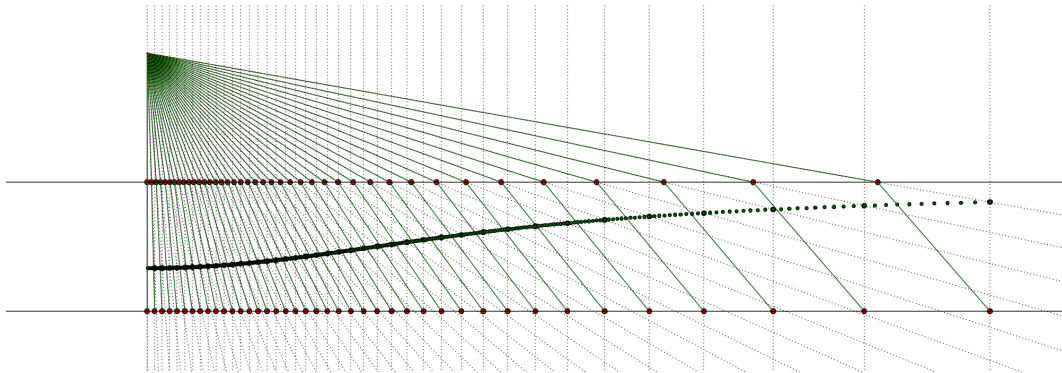


Abbildung 2.9.: Brechkungskurve mit einer Schrittweite von $\Delta\phi = 2^\circ$

Die Brechkungskurve wurde bis zu diesem Zeitpunkt aus empirischen Daten konstruiert. Snellius versuchte eine geometrische Beschreibung dieser Brechkungskurve zu finden und stieß dabei auf folgende Konstruktionsmöglichkeit:

Wenn die Basis eines stumpfwinkligen Dreiecks bis ins Unendliche vom senkrechten Scheitel, wobei das Verhältnis der Schenkel dasselbe bleibt, so nach hinten verschoben wird, daß ein Schenkel denselben Abstand von der Senkrechten bewahrt, dann beschreibt der andere [Schenkel], immer mit dem außerhalb gegebenen Punkt in

2. Theorieteil

gerader Richtung verbunden mit seiner Grenze an der Basis (ad basin) die Brechungskurve. (Willebrodus Snellius) [10, S. 307]

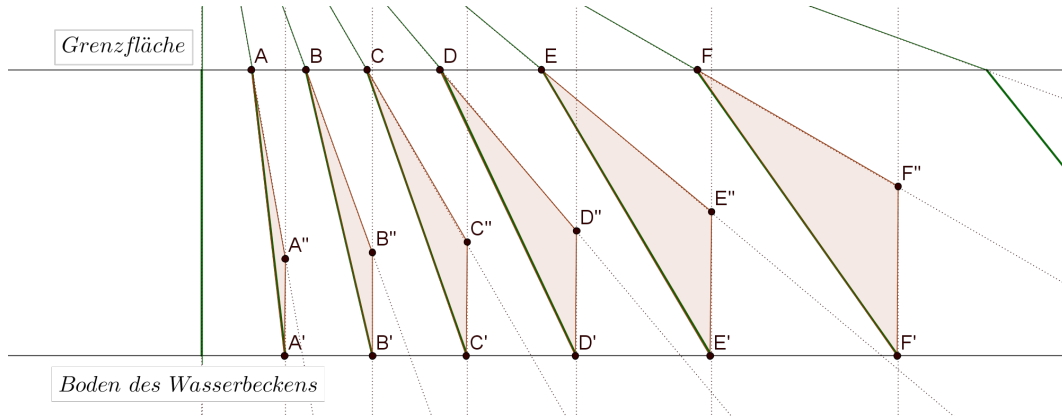


Abbildung 2.10.: Konstruktion der Brechungskurve

Das bedeutet für Abbildung 2.10, es gilt:

$$\frac{AA'}{AA''} = \frac{BB'}{BB''} = \frac{CC'}{CC''} = \frac{DD'}{DD''} = \frac{EE'}{EE''} = \frac{FF'}{FF''} . \quad (2.70)$$

Durch ein kontinuierliches Verschieben eines stumpfwinkligen Dreiecks, bei dem das Verhältnis zweier Seiten immer gleichbleibt, fährt der Punkt zwischen den beiden kürzeren Seiten die Brechungskurve entlang.

Über dieses Verhältnis gelangte Snellius zu dem nach ihm benannten Brechungsgesetz. Seine Erfahrung aus dem Bereich der Geodäsie ließen ihn zu einer Darstellung mithilfe von Winkelfunktion gelangen:

Der wirkliche Strahl hat zum scheinbaren in ein und demselben anderen Medium dasselbe Verhältnis. Wie der Sekans des Komplementärwinkels der Neigung im weniger Dichten zum Sekans des Komplementärwinkels des gebrochenen [Strahls] im Dichten, so [verhält sich] der scheinbare Strahl zum wahren oder Einfallsstrahl. (Willebrodus Snellius) [10, S. 309]

Snellius verwendet hier den Sekans. Dieser gibt das Verhältnis von Hypotenuse zu Ankathete eines rechtwinkligen Dreiecks an. Im Folgenden wird eines der stumpfwinkligen Dreiecke aus Abbildung 2.10 genommen und in Abbildung 2.11 näher betrachtet .

Das Objekt B , hier der Boden, sendet einen Lichtstrahl unter dem Winkel β zum Lot aus, der an der Grenzfläche zwischen Wasser und Luft im Punkt A unter dem Winkel α vom Lot gebrochen wird. Das Verhältnis vom scheinbaren Strahl AB zum wirklichen

2. Theorieteil

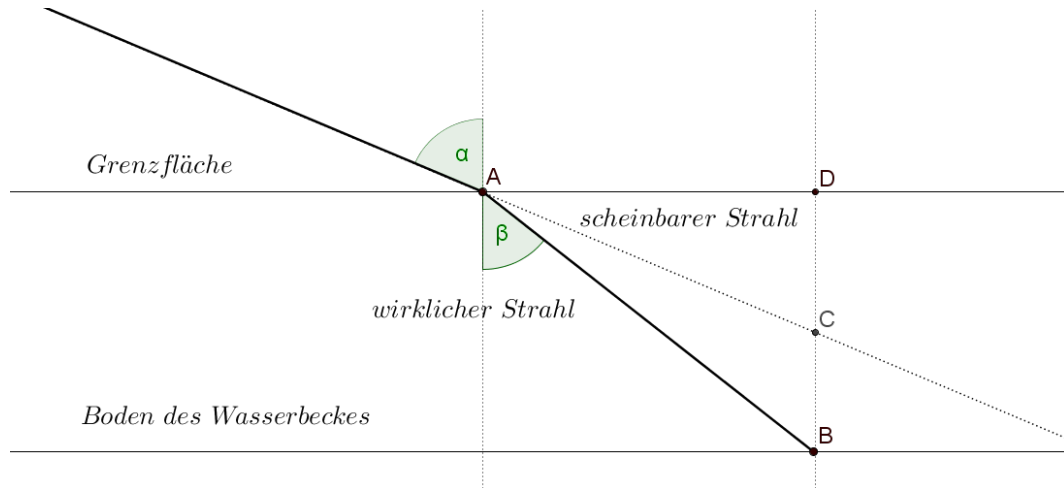


Abbildung 2.11.: Herleitung des Brechungsgesetzes

Strahl AC ist konstant in jedem der unendlich vielen stumpfwinkligen Dreiecke. Das ist dasselbe wie das Verhältnis von AC/AD zu AB/AD . Aufgrund der Kenntnisse aus der Geodäsie gab Snellius dieses Verhältnis der Seiten in den rechtwinkligen Dreiecken ACD und ABD mit dem Sekans an, während sich die meisten anderen Forscher dieser Zeit nur mit den direkten Winkeln beschäftigten, und dadurch keinen logischen Zusammenhang fanden:

$$\frac{AC}{AB} = \frac{AC}{AD} : \frac{AB}{AD} = \frac{\sec(90 - \alpha)}{\sec(90 - \beta)} = \textit{konstant} . \quad (2.71)$$

Durch einfaches Umformen seiner Formulierung gelangt man zu der heute konventionellen Form des Brechungsgesetzes:

$$\frac{\sec(90 - \alpha)}{\sec(90 - \beta)} = \frac{1}{\cos(90 - \alpha)} \cdot \frac{\cos(90 - \beta)}{1} = \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \textit{konstant} . \quad (2.72)$$

Snellius hatte weder einen Begriff für den Brechungsindex, noch hatte diese Zahl dieselbe Bedeutung wie heute. In der geometrischen Optik wird jedem Medium ein eigener Brechungsindex zugewiesen und spiegelt den Einfluss des Mediums auf die (scheinbare) Geschwindigkeit des Lichtes wider. Unter Snellius war diese Zahl lediglich das Verhältnis von wirklichem zu scheinbarem Strahl.

2.3. Didaktischer Hintergrund

Notwendig für die Entwicklung einer sinnvollen Unterrichtseinheit ist ein Blick auf den aktuellen Forschungsstand didaktischer Forschung. An dieser Stelle ist einerseits die Fachdidaktik der Optik und im Speziellen der Brechung und Reflexion von Licht relevant und andererseits die Didaktik der Naturwissenschaften mit dem Schwerpunkt Nature of Science (NOS). Dabei wird vor allem der Vorteil des historischen Forschens im Unterricht aufgezeigt.

2.3.1. Didaktik der geometrischen Optik

Schülervorstellungen zu Brechung und Reflexion

Ein Schüler oder eine Schülerin betritt nicht unwissend die Klasse und verlässt diese wieder vollgefüllt mit Wissen. Im Alltag werden Kinder von klein auf mit Neuem konfrontiert, sie sammeln Eindrücke und konstruieren sich ihr persönliches Bild von der Welt, die sie umgibt. Diese Erfahrungen manifestieren sich in ihren Köpfen in Form sogenannter Schülervorstellungen. Diese Präkonzepte zu verschiedenen physikalischen Themen können durchaus „richtig“ sein, sie können den physikalisch adäquaten Konzepten aber auch widersprechen und absolut gegensätzlich sein. So schreibt Reinders Duit in [5]:

Die Vorstellungen, mit denen unsere Schülerinnen und Schüler in den Unterricht hineinkommen, bestimmen, wie sie von uns arrangierte Experimente sehen, wie sie das von uns Vorgetragene verstehen. [5, S. 7]

Folglich lohnt es sich, die Schülervorstellungen zu dem Thema *Optik* und insbesondere jene zu den Phänomenen Reflexion und Brechung von Licht zu erörtern. Mit dem Wissen ob dieser Vorstellungen kann der Unterricht an die Schüler und Schülerinnen angepasst werden. Denn die Vorstellungen der Schüler und Schülerinnen erweisen sich als „eine zentrale Ursache für die tiefgreifenden Lernschwierigkeiten“ [6, S. 8]. Des Weiteren schreibt Duit in [6], dass sich diese Vorstellungen nicht einfach „überwinden“ lassen. Häufig wird, gerade in der Physik und Mathematik, streng nach einer logischen Reihenfolge vorgegangen, nur können weder Schüler und Schülerinnen noch Studenten und Studentinnen einfach ihr Vorwissen ausblenden. Lernen kann als konstruktiver Prozess verstanden werden, bei dem jedes Kind oder jeder Erwachsener sein Wissen selbst konstruieren muss. Diese Konstruktion kann die Lehrperson den Kindern nicht abnehmen, sondern er muss die Eigenkonstruktion anregen [6, S. 10]. Aber es gelingt in der Regel

2. Theorieteil

nicht einfach die Alltagsvorstellungen und Präkonzepte zu tilgen, aber es kann ausgehend von den Vorstellungen der Schüler und Schülerinnen ein Konzeptwechsel angeregt werden [6, S. 11].

In der Optik, wie in allen anderen Bereichen der Physik, prägt der Alltag viele Vorstellungen der Schüler und Schülerinnen:

Das Licht begegnet einem tagtäglich und folglich macht sich auch jeder seine eigene Vorstellung davon. Licht wird meistens als etwas wahrgenommen, was Objekte sichtbar macht oder sie hell macht. Oft wird das Licht mit seiner Quelle gleichgesetzt oder mit dem Zustand „hell“. Auch wird Licht als etwas Substantielles gesehen, das den Raum zwischen der Quelle und dem Gesehenen füllt. Die Alltagserfahrung lehrt auch, dass durch Licht, zum Beispiel beim Einschalten in einem Raum, der ganze Raum gleichzeitig hell wird. Dennoch ergaben Untersuchungen, dass die Mehrheit der Schüler und Schülerinnen denkt, das Licht benötige zu einem Beobachter auf einem entfernten Berg etwas Zeit. Eine andere Untersuchung zeigte, dass Schüler und Schülerinnen beim Einschalten einer Lichtquelle das Licht zwei unterschiedlich entfernte Punkte gleichzeitig erreicht. [22] Das Licht wird häufig nicht als etwas Strömendes, sondern als etwas Statisches betrachtet. Beim Einschalten wandert das Licht bis zur Wand und dann steht es. [23]

Ein großes Problem bei Schülern und Schülerinnen stellt der Vorgang des Sehens dar. Die Mehrheit denkt, das Licht einer Lichtquelle muss nicht ins Auge gelangen, um die Lichtquelle zu sehen. Zwischen Licht und Sehen wird kein enger Zusammenhang gesehen, es können auch Dinge gesehen werden, wenn kein Licht ins Auge fällt, solange diese beleuchtet werden. Diese Vorstellung deckt sich auch mit den Vorstellungen zur Reflexion (siehe nächster Absatz). [23]

Bei der Reflexion von Licht muss man bei Schülervorstellungen zwischen der Reflexion an allgemeinen Oberflächen, oder der Reflexion an Spiegeln unterscheiden. Es wird von Schülern und Schülerinnen im Allgemeinen keine Verbindung zwischen der Streuung und Reflexion an Oberflächen und der Wahrnehmung dieser Oberflächen hergestellt. Diese Oberflächen werden durch das Licht lediglich hell gemacht. So wird kein Zusammenhang zwischen dem Licht, das von Lichtquellen ausgesandt wird, und dem, das von Oberflächen abgestrahlt wird, erkannt. Bei spiegelnden Oberflächen wird sehr wohl ein Abprallen der Lichtstrahlen vermutet. Beim Spiegel herrscht die Vorstellung vor, das

Bild liege auf der Spiegeloberfläche. Auch wird zwischen der Reflexion (beziehungsweise dem Reflexionsgesetz) und dem Spiegelbild keine Verknüpfung wahrgenommen. [22]

Im Gegensatz zur Lage des Bildes bei der Reflexion haben Schüler und Schülerinnen kein Problem mit der Lage des Bildes bei der Brechung von Licht im Wasser. Es wird akzeptiert, dass es sich innerhalb des Wassers und nicht an der Oberfläche befindet und dass es sich an einer anderen Stelle befindet als das Objekt eigentlich ist. Dennoch wird die optische Hebung von Objekten im Wasser häufig nicht auf die Brechung von Licht zurückgeführt, sondern auf Änderung des Kontrastes oder der Helligkeit oder auf eine scheinbare Bewegung oder Spiegelung. [22]

Didaktische Ansätze zu Brechung und Reflexion

Hartmut Wiesner entwickelte 1995 zusammen mit Peter Engelhardt und Dietmar Herdt in [24] und [25] einen Unterrichtsvorschlag zum Thema Optik. Dieser orientiert sich stark an den Schülervorstellungen und beginnt mit der Sender-Empfänger-Vorstellung für den Sehvorgang, geht über die Ausbreitung des Lichtes über Schatten und die Bildentstehung bei der Lochkamera hin zum Spiegelbild. Erst nach dem Spiegelbild wird das Reflexionsgesetz eingeführt. Davor wird bei der Spiegelung vor allem Wert auf die Eigenschaften (Wie verhält sich das Spiegelbild bei Verschiebung des Gegenstandes? Wie unterscheidet sich das Spiegelbild vom Gegenstand?) und die Lage des Spiegelbildes (Wo befindet sich das Spiegelbild eigentlich?) gelegt. Das Reflexionsgesetz wird behandelt, wenn schon ein intuitives Verständnis für das Spiegelbild entwickelt wurde. Die Lernziele der Unterrichtseinheit über das Reflexionsgesetz sind die Kenntnis, dass die Reflexion eine Sonderform der Lichtstreuung an sehr glatten Oberflächen ist und die Fähigkeit, das Reflexionsgesetz formulieren zu können. Um diese Ziele zu erreichen, wurde ein Modell aus sechs Schritten entwickelt.

Im ersten Schritt wird gezeigt, was ein Spiegel mit dem Licht eigentlich macht. Dazu wird ein Planspiegel mit einer Mattscheibe verglichen, um zu zeigen, dass der eine mehr reflektiert und der andere mehr streut. Der zweite Schritt beschreibt die geometrische Konstruktion mit Hilfe von Strahlen, durch die Aufgabenstellung motiviert, wie ein Spiegel zu halten sei, um eine Person zu blenden. Anschließend sollen im dritten Schritt die Einfallswinkel und Reflexionswinkel gemessen werden. Dabei werden parallele Lichtbündel reflektiert und mithilfe einer optischen Scheibe die Winkel gemessen. Im vierten Schritt wird das Reflexionsgesetz formuliert. Den fünften Schritt stellt ein Demonstrationsversuch dar und der sechste Schritt besteht aus Übungen. [24, S.35-38]

2. Theorieteil

In dem Unterrichtsvorschlag wird anschließend noch der Zusammenhang zwischen Spiegelbild und Reflexionsgesetz erörtert. Darauf folgt eine Unterrichtseinheit über das Brechungsgesetz. [25, S.13-16] Die Ziele sind:

Die Schüler sollen

1. eigene Beobachtungen kennen, die auf die Lichtbrechung zurückzuführen sind (optische Hebung)
2. den Lichtweg von einem im Wasser liegenden Gegenstand bis zum Auge qualitativ angeben können
3. das Brechungsgesetz in qualitativer Form angeben und anwenden können
4. zusammengehörende Winkelpaare aus einer Tabelle oder am Graphen $\beta(\alpha)$ bestimmen können
5. das Brechungsgesetz bei einfachen Konstruktionen anwenden können
6. wissen, dass bei gekrümmten Grenzflächen das Brechungsgesetz auf die Tangente bezogen wird

[25, S.13]

Auch diese Unterrichtseinheit besteht aus sechs Schritten. Im ersten Schritt starten die Schüler und Schülerinnen mit Hausexperimenten, angeleitet durch ein Arbeitsblatt. Im zweiten Schritt steht die Frage nach dem Weg des Lichts von der Münze im Wasser ins Auge im Mittelpunkt. Dabei wird Wasser stückweise in eine Schüssel geleert, auf deren Grund eine Münze liegt, während man die Münze mit einem Beamer an die Wand projiziert, um die Position der Münze zu kennzeichnen. Anschließend beobachtet man die Münze mit einem hohlen Rohr, wobei ein Ende am Auge und ein Ende an der Wasseroberfläche positioniert wird. Dadurch erkennt man den Knick des Lichtstrahls. Der dritte Schritt beschäftigt sich mit der qualitativen Erfassung des Brechungsgesetzes mithilfe eines „Apparats zur Brechung und Reflexion“ von Leybold, der sich nur in geringem Maße von jenem des arabischen Naturforschers Ibn-al-Haitam unterscheidet (siehe 2.2.3). Der vierte Schritt behandelt die quantitative Erfassung des Brechungsgesetzes im Wasser. Dazu wird eine Scheibe mit Winkelaufteilungen bis zum Durchmesser ins Wasser eingeführt und mithilfe einer Lampe die Brechungswinkel gemessen. In Schritt fünf wird dasselbe für den Übergang des Lichts von Luft zu Plaxiglas an einem Glashalbzylinder durchgeführt. Der sechste und letzte Schritt behandelt die Frage nach der Brechung an gekrümmten Flächen. [25, S.13-16]

Den Rest des Unterrichtsvorschlags bilden Unterrichtseinheiten über Totalreflexion, Linsen und andere Anwendungen.

Es gibt weit mehr didaktische Ansätze, Unterrichtsvorschläge und Ideen für den Optikunterricht. Dieser Vorschlag zeichnet sich durch die konsequente Berücksichtigung der Schülervorstellungen und der großen Anzahl an Schüler- und Schülerinnenaktivitäten aus. Im Folgenden soll dieser Unterrichtsvorschlag als Rahmenmodell dienen, um die historisch orientierte Erarbeitung von Brechungs- und Reflexionsgesetz zu entwickeln.

2.3.2. Nature of Science (NOS)

In der Didaktik der Physik, und im Weiteren in der Didaktik der Naturwissenschaften, spielt der Begriff Nature of Science (NOS) eine immer größere Rolle. Dominik Ertl übersetzt diesen Begriff in [7] aus dem angelsächsischen Raum mit *Natur* oder *Wesen der Naturwissenschaften*.

Im Folgenden wird zu Beginn kurz der Begriff NOS erklärt, dann die Notwendigkeit der Schülervorstellungen von NOS (in der Regel Views of Nature of Science (VNOS) genannt) für den Physikunterricht gerechtfertigt, und anschließend diese VNOS näher beleuchtet und zuletzt mögliche Verbesserungen des Unterrichts in Hinblick auf die Entwicklung adäquater VNOS vorgestellt.

NOS

Der Begriff NOS wird in der Fachwelt unterschiedlich ausgelegt. Jedoch hat sich eine Definition von Norman G. Lederman besonders durchgesetzt. In [14] formuliert er sieben Kernaspekte von NOS:

Scientific knowledge is tentative (subject to change), empirically based (based on and/or derived from observations of the natural world), and subjective (involves personal background, biases, and/or is theory-laden); necessarily involves human inference, imagination, and creativity (involves the invention of explanations); and is socially and culturally embedded. Two additional important aspects are the distinction between observations and inferences, and the functions of and relationships between science theories and laws. [14, S. 833]

Der größte Streitpunkt vieler Didaktiker ist die Frage, ob die wissenschaftliche Methode („scientific inquiry“) ein Teil der NOS ist [4]. Aufbauend auf diesen sieben Aspekten und je nachdem, ob Scientific Inquiry als Bestandteil der NOS gesehen wird oder nicht, werden die Vorstellungen der Schüler und Schülerinnen zu NOS und ihre Auswirkungen auf das Lernen von Physik in vielen empirischen Studien erforscht.

Views of Nature of Science (VNOS)

In der Metastudie [4] aus dem Jahr 2011 fassen Feng Deng, Der-Thanq Chen Chin-Chung Tsai und Ching Sing Chai 105 empirische Studien zu den Schülervorstellungen zu NOS zusammen. Deng et al. berücksichtigen dabei die unterschiedlichen den Studien zugrundeliegenden theoretischen Rahmen. Dabei unterteilen sie die betrachteten empirischen Studien in drei Kategorien, dem Unidimension Framework (UD), dem Multidimension Framework (MD) und dem Argumentative Resource Framework (AR). Der UD Framework betrachtet die VNOS als ein Kontinuum von einem statischen empiristischen Bild der Naturwissenschaften bis zu einem dynamischen konstruktivistischen Bild. Der MD Framework behandelt die VNOS als eine multidimensionale Bild, dessen einzelne Dimensionen (z.B. Rolle der Kreativität/Vorstellungskraft in den Naturwissenschaften) teilweise unabhängig voneinander sind und jeweils ein Kontinuum von empiristischen bis zu konstruktivistischen Sichtweisen darstellen. Der AR Framework versteht unter den VNOS, wie Schüler und Schülerinnen über wissenschaftliche Probleme diskutieren („argumentative resources drawn in practice“ [4, S.967]) und wie kritisch sie mit wissenschaftlichen Problemen umgehen. Er zielt weniger auf die korrekte Wiedergabe der NOS ab, entkoppelt eines wissenschaftlichen Problems, als auf die sinngemäße Anwendung. [4]

Für ein Unterrichtskonzept sind zwei Aspekte besonders relevant. Erstens, um einen NOS fokussierten Unterricht zu rechtfertigen, sind die Einflüsse der VNOS auf den Unterricht und auf die Schüler und Schülerinnen von Bedeutung. Zweitens stellt sich die Frage, welche VNOS in der Regel vorherrschen, um diese weiterzuentwickeln.

Der Zusammenhang zwischen VNOS und dem Lernen physikalischer Inhalte wird in etlichen Studien untersucht. UD Studien fanden meistens eine positive Korrelation. Schüler und Schülerinnen mit einer konstruktivistischen Sicht bevorzugen eine konstruktivistisch-orientierte Lernumgebung, zeigen bessere metakognitiven Eigenschaften, ziehen bessere Schlussfolgerungen und diskutieren konstruktiver. Schüler und Schülerinnen mit eher empiristischen Sichtweisen tendieren dazu, routinierter auswendig zu lernen und durch Prüfungen motiviert zu werden. Es wird auch beobachtet, dass Schüler und Schülerinnen mit „gebildeteren“ („sophisticated“) VNOS ein besseres ganzheitliches Verständnis von relevanten physikalischen Konzepten zeigen. Die UD Studien besagen generell, dass lediglich bestimmte Dimensionen einen Einfluss auf das Lernen physikalischer Inhalte haben. So hat zum Beispiel die Sichtweise der Schüler und Schülerinnen auf das Wesen der wissenschaftlichen Methode („Nature of scientific method“) einen signifikanten Ein-

2. Theorieteil

fluss auf ihre Problemlösungsstrategien. Auch tendieren Schüler und Schülerinnen, die ein dynamisches konstruktivistisches Bild der Naturwissenschaften besitzen, dazu, eine tiefgründigere Motivation zum Lernen physikalischer Inhalte zu entwickeln. Hingegen entwickeln Schüler und Schülerinnen, die der Meinung sind, wissenschaftliches Wissen sei von externen Autoritäten (z.B. berühmte Physiker) festgelegt, eher nur oberflächliche Lernstrategien. Einige Studien konnten auch zeigen, dass die VNOS eine Rolle in der Argumentation von physikalischen Problemen spielt. In den AR Studien gibt es mehrdeutige Ergebnisse. Die Veränderungen der VNOS sind nicht immer ergänzend mit einer Verbesserung der Lernstrategie. Jedoch kann beobachtet werden, dass besser genutzte ARs zu besseren Erklärungen der Schüler und Schülerinnen führt. [4]

Die einfachste Aussage über VNOS lassen jene Studien zu, die dem UD Framework unterliegen, da einfache statistische Verfahren angewandt werden können. Danach haben die meisten Studenten gemischte VNOS zwischen einem dynamisch konstruktivistischen Bild und einem statisch empiristischen Bild. Nur ein geringer Teil ist entweder von einem rein statischen oder einem rein dynamischen Bild überzeugt. Bei den MD Studien erkennt man, dass in unterschiedlichen Dimensionen bei denselben Schülern und Schülerinnen unterschiedliche Auffassungen (einmal eher konstruktivistische, einmal eher empiristische) auftreten, auch korrelieren manche Dimensionen untereinander. In einigen Studien korrelieren sogar alle betrachteten Dimensionen signifikant miteinander. Viele dieser Studien zeigen, dass Schüler und Schülerinnen eher empiristische Weltbilder haben. Viele glauben an eine absolute Wahrheit, die von Wissenschaftlern „aufgedeckt“ wird und das wissenschaftliche Wissen nähert sich dieser absoluten Wahrheit immer weiter an. Ein großes Problem ist, dass kein Unterschied zwischen wissenschaftlichen Theorien und Gesetzen gesehen wird. Dennoch sind sich Schüler und Schülerinnen oft über die Veränderlichkeit der Naturwissenschaften einig (wobei die Veränderungen der oben genannten Annäherung entsprechen) und sehen ein, dass neue Theorien durch bestehende Theorien und kulturelle Gegebenheiten beeinflusst werden. Die AR Studien zeigen, wie Schüler und Schülerinnen physikalische Behauptungen diskutieren und welche Argumentationsformen angewandt werden. Dabei unterscheidet eine Studie zum Beispiel in intuitive, religiöse, rationale, empiristische, historische, wahrnehmende, repräsentative, autoritative und kulturelle Argumentationsansätze. [4]

Didaktische Ansätze zur Entwicklung der VNOS

Es wurden vielfältige Methoden erarbeitet, um die VNOS weiterzuentwickeln. Ein vielversprechender Ansatz ist das Unterrichten mit historischen und philosophischen Elementen, in der Literatur vor allem unter dem Begriff History and Philosophy in Science Education (HPS) zu finden. [13] Auch kann zum Beispiel das Durchführen von historischen Experimenten [11] oder das Schlüpfen in die Rolle eines berühmten Physikers [2] positive Auswirkungen auf die VNOS haben. Im Folgenden wird ein Projekt und vier ausgewählte Methoden für den Physikunterricht vorgestellt.

Dietmar Höttecke führte zusammen mit zehn Partnern aus sieben europäischen Ländern und Israel zwischen 2008 und 2010 ein Projekt namens HIPST (History and Philosophie in Science Teaching) durch. Dieses sollte eine Brücke zwischen der didaktischen Forschung und der Schule darstellen und HPS evaluieren. Dabei wurde bei einigen nationalen Konferenzen die Meinung von Historikern, Lehrern, Experten für naturwissenschaftliche Museen, Naturwissenschaftsphilosophen und viele mehr diskutiert und folglich unterstützende Materialien für Lehrer und Lehrerinnen erstellt. Anschließend wurden Fallstudien durchgeführt und evaluiert. [12]

Die grundlegende Theorie hinter HPS ist, dass durch das angeleitete Nachstellen physikalischer Probleme aus der Wissenschaftsgeschichte, Schüler und Schülerinnen ihre eigenen Erfahrungen mit jenen der Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen vergangener Tage vergleichen und sich mit ihnen identifizieren. Es wurden Methoden entwickelt, bei denen die Schüler- und Schülerinnenaktivitäten im Mittelpunkt stehen. Diese sollen motivieren, die kognitiven und metakognitiven Fähigkeiten und das kreative und reflektierte Denken fördern. Die Ideen und Handlungen vergangener Physiker und Physikerinnen können in der Regel einen guten Leitfaden für schülerzentrierte Aktivitäten liefern, da die Schüler und Schülerinnen eventuell ähnlich handeln. Sie bekommen einen Einblick in die Entstehung physikalischen Wissens. Gerade Briefe oder Forschungstagebücher von Forschern oder Forscherinnen können zusätzlich zur Leitung durch die Lehrkraft verwendet werden. Physikalische Inhalte können durch die Lehrkraft in historische Kontexte implementiert werden. [13]

Eine Methode stellt **das kreative Schreiben** dar. Die Schüler und Schülerinnen sollen Briefe, Tagebucheinträge oder Ähnliches aus der Sicht eines fiktiven Charakters schreiben. Dadurch identifizieren sie sich mit dem jeweiligen Charakter und die Perspektiven des oder der Lernenden werden aufgezeigt. Diese Perspektiven liefern aus konstruktivisti-

scher Sicht einen Startpunkt für das Lernen. Ein weiterer positiver Aspekt des kreativen Schreibens ist die Möglichkeit zur Reflexion über NOS. [13]

Auch **das Rollenspiel** im Physikunterricht bietet viele Vorteile. Durch die physische, kognitive und emotionale Auseinandersetzung in einem physikalischen Kontext wird das Verständnis komplexerer Konzepte gefördert. Durch die Identifikation mit einer berühmten Persönlichkeit oder einem Objekt wird das erworbene Wissen eher als das der Schüler und Schülerinnen betrachtet. In analogen Aktivitäten („analogical activities“ [13, S.1242]) sollen die Lernenden in die Rolle physikalischer Objekte (z.B. Atome, Elektronen, ...) schlüpfen, um physikalische Modelle zu untersuchen. In methaphorischen Aktivitäten sollen die Schüler und Schülerinnen Meinungen verschiedener Physiker oder Physikerinnen erarbeiten und historische Szenen oder Diskussionen nachstellen. Dabei gibt es einen Regisseur, der eine Szene oder ein „Monument“ (siehe [13]) „baut“ und viele Akteure, die seine Instruktionen kommentarlos befolgen. Wichtig ist, dass nicht die Meinungen der Schüler und Schülerinnen im Mittelpunkt stehen, sondern die jener Physiker und Physikerinnen (oder wie der Regisseur diese interpretiert), die repräsentiert werden. Dadurch können vor allem soziale Aspekte in den Naturwissenschaften aufgezeigt und reflektiert werden. Eine dritte Möglichkeit des Rollenspiels bietet die Simulation von Naturwissenschaften. Das heißt, die Schüler und Schülerinnen halten sich so gut wie möglich an die Handlungen der betrachteten Physiker oder Physikerinnen. Zum Beispiel sollen sie versuchen, ein Experiment aus der Sicht einer bestimmten Theorie zu beschreiben. Es können Experimente geplant und ausgeführt sowie Daten gesammelt werden und vieles mehr. Dieses eigene Handeln bietet eine Grundlage für das Reflektieren über naturwissenschaftliche Handlungen und liefert gute Einblicke in die NOS. [13] Yilmaz Cakici und Eylem Bayir untersuchten zudem in mehreren Fallstudien die Einflüsse von Rollenspielen (Porträtieren von Naturwissenschaftlern) auf die VNOS. Bei 40-45% aller Kinder konnte eine positive Änderung der Sichtweise auf die Veränderlichkeit und die empirischen und kreativen Aspekte der Naturwissenschaften festgestellt werden, bei 50-60% auf die Subjektivität der Naturwissenschaften und den sozio-kulturellen Einfluss und bei 72% auf die naturwissenschaftliche Methode. [2]

Es zeigt sich, dass auch **das Nachbauen historischer Experimente** im Physikunterricht eine gute schülerzentrierte Methode darstellt. Dabei steht vor allem die Prozedur des Experimentierens, die Situationsabhängigkeit und die Zufälligkeit von Experimenten im Vordergrund. Auch die Authentizität der Experimente kann motivierend sein. Das

2. Theorieteil

Experimentieren liefert auch eine Möglichkeit zur Reflexion über das Beobachten in den Naturwissenschaften. [13]

Abd-el-Khalick zeigte in [1], dass lediglich das historisch orientierte Unterrichten nicht zwangsläufig eine Verbesserung der VNOS mit sich führt, sondern es benötigt das explizite Ansprechen von bestimmten Aspekten von NOS. **Das Reflektieren** über NOS wird zu einem wesentlichen Bestandteil des Unterrichts, wenn man die VNOS der Schüler und Schülerinnen verändern will. Übliche Methoden für die Reflexion im Klassenzimmer sind die Gruppendiskussion, spezifisches Fragen der Lehrkraft und eine geleitete Reflexion. Hierbei ist jedoch eine große Gefahr, dass die Lehrkraft zurück in den lehrerzentrierten Unterricht verfällt. Höttecke schlägt in [13] die Methode „reflection corner“ (im Folgenden mit Reflexionsecke übersetzt) vor. Dabei wird die hintere Hälfte der Klasse als „Reflexionsecke“ definiert. Die vordere Seite wird für verschiedene Lernaktivitäten der Schüler und Schülerinnen genutzt. Dadurch wird eine physische Abtrennung geschaffen, um die Details und den Inhalt der Schüleraktivitäten von den abstrakten und grundlegenden Ideen der Physik zu trennen. Das heißt, dass das Kognitive vom Metakognitiven getrennt wird. Von Zeit zu Zeit werden die Schüler und Schülerinnen aufgefordert, die Aufmerksamkeit in die „Reflexionsecke“ zu lenken, um dort über NOS zu reflektieren. Dort soll eine zentrale und eher allgemeine Frage, von verschiedenen Perspektiven, immer wieder während des Arbeitens beantwortet werden (z.B. Wie arbeiten Wissenschaftler? Wie generieren sie neues Wissen? ...). Des Weiteren zeigt sich, dass die Methode „think, pair, share“⁹ gut für die Behandlung der Frage im Rahmen des Unterrichts geeignet ist. Zur Reflexion eignet sich das eigene Handeln, Ideen, Ergebnisse oder aber das Handeln und gewisse Gedankengänge von bekannten Forschern oder Forscherinnen. Auch über soziale und kulturelle Probleme können reflektiert werden. [13]

⁹Zuerst alleine über eine Frage nachdenken, dann mit einem Partner und anschließend in der Gruppe vorstellen und diskutieren

3. Entwicklung der Unterrichtssequenz

In diesem Kapitel wird eine Unterrichtssequenz, aufbauend auf den Erkenntnissen des vorigen Kapitels, entwickelt. Zu Beginn wird erörtert, an welcher Stelle des Unterrichtes die Sequenz stattfinden soll und welche Rahmenbedingungen (Vorkenntnisse u. Ä.) vorliegen. Anschließend werden die Ziele der Unterrichtssequenz formuliert und gerechtfertigt. Dann wird die Sequenz in einzelne Unterrichtseinheiten zerlegt und der Aufbau beschrieben. Im letzten Schritt wird jede Unterrichtseinheit detailliert geplant, Unterrichtsmaterialien erstellt und präsentiert.

3.1. Implementierung

Die Unterrichtssequenz ist für die Sekundarstufe I, im Zuge der erstmaligen Einführung der Optik, geplant. Den Rahmen der Unterrichtssequenz liefert der Unterrichtsvorschlag zur Optik von Wiesner et al. in [24] und [25] (siehe auch Abschnitt 2.3.1). Demzufolge ist das für die geplante Unterrichtssequenz relevante¹ Vorwissen, mit dem bei den Schüler und Schülerinnen zu rechnen ist, durch die Lernziele in [24] festgelegt:

Die Schüler sollen

- das Sehen primärer und sekundärer Lichtquellen einordnen als einen Vorgang, bei dem vom wahrgenommenen Gegenstand Licht ausgeht, ins Auge fällt und dort den Wahrnehmungsreiz auslöst; [24, S.15]
- beleuchtete Gegenstände als Zwischensender von Licht ansehen und den Begriff der Lichtstreuung anwenden können; [24, S.15]

¹Die anderen Lernziele aus [24] sind als Vorwissen vorhanden, aber nicht unmittelbare Voraussetzungen für die Unterrichtssequenz

3. Entwicklung der Unterrichtssequenz

- die Vorstellung erwerben, daß Licht eine kontinuierliche Strömung darstellt mit einer zwar sehr großen, aber dennoch endlichen Strömungsgeschwindigkeit; [24, S.18]
- wenigstens einen Versuch angeben können, der zeigt, daß die Ausbreitung des Lichtes geradlinig erfolgt; [24, S.18]
- erkennen, daß Lichtwege umkehrbar sind. [24, S.18]
- wissen, daß man einen Gegenstand in der Richtung wahrnimmt, aus der das Licht von diesem Gegenstand ins Auge fällt [...] [24, S.27]

Dieses Vorwissen stellt die Grundlage für die folgende Planung dar und wird stets als bekannt vorausgesetzt.

3.2. Ziele

An dieser Stelle wird eine Unterscheidung getroffen zwischen physikalischen, inhaltlichen und NOS Zielen. Bei ersterem steht vor allem die Brechung und Reflexion, sowohl phänomenologisch als auch quantitativ im Mittelpunkt. Bei letzterem spielt einerseits der philosophische Aspekt (Was ist ein Gesetz? Was eine Theorie? Wie entsteht physikalisches Wissen?) und andererseits der praktische Aspekt (Wie arbeiten Physiker? Welche Eigenschaften hat ein Physiker? Wie baut man Experimente?) eine wesentliche Rolle.

3.2.1. Inhaltliche Ziele

Die Schüler und Schülerinnen sollen nach der Unterrichtssequenz

1. wissen, wie sich das Spiegelbild zum ursprünglichen Objekt verhält (vorne - hinten, links - rechts, ...);
2. erkennen, wie sich die Lage des Spiegelbildes verändert, wenn sich die Lage des Objekts verändert;
3. wissen, wo sich das Spiegelbild tatsächlich befindet;
4. die Reflexion als Sonderform der Lichtstreuung erkennen;
5. den Beweis von Heron für das Reflexionsgesetz grob beschreiben können;

3. Entwicklung der Unterrichtssequenz

6. das Reflexionsgesetz formulieren können;
7. das Experiment von Ptolemäus zur Reflexion beschreiben und erklären können;
8. das Reflexionsgesetz anwenden können;
9. wissen, was man unter optischer Hebung versteht;
10. wissen, dass der Weg des Lichtes an einem Übergang optischer Medien verändert wird und Brechung genannt wird;
11. wissen, dass auch der senkrechte Einfall gebrochen wird (Objekt wird trotz senkrechten Einfalls gehoben);
12. den Weg des Lichtes vom Objekt zum Auge beschreiben können;
13. das Experiment von Ptolemäus zur Brechung beschreiben und erklären können;
14. das Brechungsgesetz formulieren können.

3.2.2. NOS Ziele

Die Schüler und Schülerinnen sollen nach der Unterrichtssequenz

1. wissen, dass die Beobachtung der Ausgangspunkt und die Grundlage des naturwissenschaftlichen Forschens ist
2. über die Subjektivität von Beobachtungen reflektieren können
3. sich der Veränderlichkeit physikalischen Wissens bewusst sein und ein Beispiel nennen können
4. sich über die Bedeutung des Experiments in der Physik klar sein
5. wissen, dass das Experiment die Methode zur Überprüfung einer Theorie oder eines Gesetzes darstellt
6. ein Bewusstsein für die Begriffe Theorie, Gesetz und Experiment besitzen

3.3. Aufbau

Die Unterrichtssequenz ist in zwei Teile unterteilt, die Reflexion und die Brechung von Licht. Diese Teile sind in einzelne logische Blöcke gegliedert. Diese entsprechen nicht genau den 50 Minuten einer Unterrichtsstunde, sondern die gewählte Zeit wird ungefähr als Richtwert vorgeschlagen. Die tatsächliche Zeit ist abhängig von der Klasse und der jeweiligen unterrichtenden Lehrkraft. Im Folgenden wird der Aufbau beschrieben, erläutert und argumentiert.

3.3.1. Der Rahmen

Der Unterricht ist stark schülerzentriert und der Lehrer oder die Lehrerin halten sich eher im Hintergrund und unterstützen - wenn notwendig - moderieren und koordinieren. Jede Unterrichtseinheit wird durch Arbeitsblätter angeleitet. Auf den Arbeitsblättern stehen Arbeitsaufträge, die mit Symbolen gekennzeichnet sind, welche die Art des Auftrages definieren (siehe Tabelle 3.3.1). Es ist auch vermerkt, ob die Arbeit alleine oder in der Gruppe zu erfolgen hat. Neben diesem inhaltlichen roten Faden gibt es zeitgleich die „Reflexionsecke“ (siehe Abschnitt 2.3.2) im hinteren Bereich der Klasse. Dort werden in jedem logischen Block eine oder mehrere Fragen aufliegen, deren Beantwortung im Zuge des Blockes erfolgt. Zu unterschiedlichen Zeitpunkten innerhalb eines Blocks sollen sich die Schüler und Schülerinnen mit diesen Fragen befassen. Wichtig ist es zu betonen, dass die Fragen nicht als richtig oder falsch bewertet werden. Am Ende eines Blockes wird im Plenum über die Fragen diskutiert. Die Fragen sind inhaltlich entkoppelt.

3.3.2. Teil 1: Reflexion

Die Reflexion wird zuerst behandelt, da sie den Schülern und Schülerinnen aus dem Alltag vertrauter ist und das Reflexionsgesetz historisch früher entdeckt wurde. Um einen intuitiven Zugang zur Reflexion zu bekommen, werden zu Beginn die Eigenschaften des Spiegelbildes erforscht (vgl. [24]). Dabei steht vor allem die Beobachtung im Vordergrund. Anschließend soll experimentell die Lage des Spiegelbildes gesucht werden. Angelehnt an die Ableitung des Reflexionsgesetzes durch Heron von Alexandria soll durch das Wissen aus dem Experiment ein quantitatives Gesetz gefunden werden. Dieses Gesetz wird durch das Experiment von Ptolemäus bestätigt. Jeder dieser vier Schritte stellt einen logischen Block dar und wird im Folgenden detailliert geplant.

3. Entwicklung der Unterrichtssequenz

Tabelle 3.1.: Symbole für die Arbeitsaufträge

Diskutiere	
Notiere	
Lese	
Konstruiere/Zeichne	
Experimentiere	

I. Die Beobachtung: Verhalten des Spiegelbildes

Beschreibung der Einheit:

Zu Beginn des naturwissenschaftlichen Forschens steht immer eine Beobachtung. Jeder Schüler und jede Schülerin kennt den Spiegel bereits aus dem Alltag. Im Zentrum der Unterrichtseinheit steht das reine Beobachten und gutes Beobachten ist nicht selbstverständlich. Es stellen sich die grundlegenden Fragen: Was wird beobachtet? Was kann überhaupt beobachtet werden? Ist die Beobachtung abhängig vom Wissen des Beobachtenden? Um das (naturwissenschaftliche) Beobachten zu lernen, bietet sich das Interview als Methode der Wahl aus dem Repertoire des kreativen Schreibens (siehe Abschnitt 2.3.2) an. Dabei sollen die Schüler und Schülerinnen zuerst alleine Fragen formulieren (z.B.: Was passiert mit dem Spiegelbild, wenn du die Schachtel nach rechts verschiebst?)

3. Entwicklung der Unterrichtssequenz

und anschließend in Zweiergruppen je in die Rolle eines Interviewers und eines antiken Forschers schlüpfen. Zur Verfügung haben sie einen Spiegel und ein Objekt (z.B.: eine kleine Schachtel oder einem Würfel). Der Interviewer soll seine Fragen über das Spiegelbild stellen und der Forscher soll diese nach bestem Wissen und Gewissen beantworten. Dann werden die Rollen getauscht. Einerseits muss sich der Interviewer sinnvolle Fragen überlegen und andererseits muss der Forscher gezielte Beobachtungen beschreiben. Die Erkenntnisse sollen schriftlich festgehalten werden und anschließend im Plenum der Klassengemeinschaft diskutiert werden, wodurch unterschiedliche Fragen aufgeworfen werden und gezeigt wird, dass die Beobachtung abhängig von den gestellten Fragen ist. Während der Diskussion hält die Lehrkraft an der Tafel alle Erkenntnisse fest, systematisiert sie und räumt Missverständnisse aus dem Weg. Die Erkenntnisse über die Beobachtung an sich sollen gesondert vom Inhalt ebenfalls in der „Reflexionsecke“ (siehe Abschnitt 2.3.2) reflektiert werden.



Abbildung 3.1.: Intuitives Probieren mit einem Würfel

Ziele der Einheit:

Inhaltliche Ziele: 1, 2

NOS Ziele: 1, 2

Material:

Spiegel, Objekt (z.B.: Schachtel, Würfel), Arbeitsblätter „Reflexion 1“, „Reflexion 2“ (siehe Anhang A)

II. Experiment 1: Lage des Spiegelbildes

Beschreibung der Einheit:

Nachdem ein intuitives Verständnis des Spiegelbildes entstanden ist, soll nun die Lage des Spiegelbildes ermittelt werden. Dieser logische Block orientiert sich nicht an der Wissenschaftsgeschichte, bildet jedoch eine essentielle Grundlage für den Beweis des Reflexionsgesetzes durch Heron. In Gruppen (3-4 Schüler oder Schülerinnen) soll folgendes Schülerexperiment durchgeführt werden: Jede Gruppe bekommt eine rechteckige Glasplatte, deren eine Hälfte auf einer Seite mit einer Spiegelfolie überzogen ist. Des Weiteren bekommt jede Gruppe zwei identische Objekte (z.B.: Schachteln oder Würfel). Nun sollen die Schüler und Schülerinnen ein Objekt vor den Halbspiegel, am besten mittig, stellen und mit dem zweiten Objekt durch Probieren den Ort des Spiegelbildes suchen. Dabei werden sie bald erkennen, dass das Spiegelbild hinter dem Spiegel sein muss. Das Ziel ist es, das zweite Objekt so hinter dem Spiegel zu platzieren, dass es mit dem Spiegelbild des ersten Objektes übereinstimmt. Anschließend sollen die Schüler und Schülerinnen die Ergebnisse notieren und die Lage ausmessen und geometrisch nachzeichnen. Ziel des Experimentes ist es, die Schülervorstellung, das Bild befinde auf der Spiegeloberfläche, zu widerlegen (siehe Abschnitt 2.3.1).

Ziele der Einheit:

Inhaltliche Ziele: 3

Material:

Halbspiegel, 2 identische Objekte (z.B.: Schachteln oder Würfel), Arbeitsblatt „Reflexion 3“ (siehe Anhang A)

III. Das Gesetz: Reflexionsgesetz nach Heron

Beschreibung der Einheit:

In der Rolle eines Lehrlings von Heron von Alexandria sollen die Schülerinnen und Schüler den Beweis von Heron (siehe Abschnitt 2.2.1) erarbeiten, nachvollziehen und in eigenen Worten erklären können. Dafür steht ihnen ein altes „Schriftstück“ zur Verfügung,

3. Entwicklung der Unterrichtssequenz

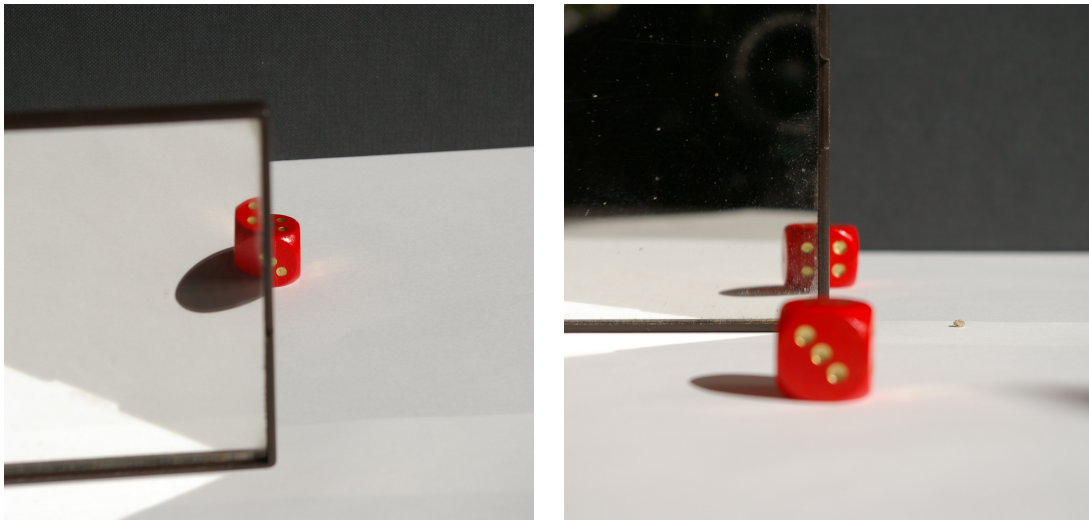


Abbildung 3.2.: Das Spiegelbild des Würfels und der Würfel hinter dem Spiegel koinzidieren nicht. Durch Verschieben des hinteren Objekts: Das Spiegelbild und der hintere Würfel stimmen über ein.

dass sie auf Herons Schreibtisch „finden“. Auf diesem Schriftstück ist ein Denkansatz von Heron zu finden. Er formuliert jedoch seinen Ansatz mit dem damals üblichen Konzept des Sehstrahls, der vom Auge aus zum Objekt wandert. Die Schülerinnen und Schüler sollen daraufhin diskutieren, warum diese Formulierung nicht zeitgemäß ist. Das Ziel ist es, dass noch einmal wiederholt wird, dass das Licht vom Objekt ins Auge fällt und nicht umgekehrt. Sie sollen diesen Denkansatz dahingehend umformulieren. Am zweiten Arbeitsblatt geht es um die Rekonstruktion des Beweises von Heron. Dazu soll zuerst in Partnerarbeit eine Skizze des Denkansatzes gezeichnet werden und anschließend ausgehend von der Skizze der Beweis erarbeitet werden. Am Lehrertisch befinden sich Hinweiskärtchen. Die Schüler und Schülerinnen können jederzeit Hinweiskärtchen anschauen, aber immer nur in der richtigen Reihenfolge und vor allem immer nur eines. Die Kärtchen dürfen nicht vom Lehrertisch entfernt werden. Folglich müssen sich die Schüler und Schülerinnen den Inhalt zumindest bis zu ihrem Platz merken. Zu guter Letzt sollen die Ergebnisse von allen in eigenen Worten schriftlich festgehalten werden. Im Plenum werden die Ergebnisse diskutiert und Fehler korrigiert, sowie das Reflexionsgesetz in moderner Schreibweise noch einmal festgehalten. In der „Reflexionsecke“ wird zuerst gefordert, die Aussage: „Die Physik ist unveränderlich!“ zu kommentieren. Nachdem festgestellt wurde, dass Heron eine andere Vorstellung vom Sehen hatte, als heute üblich, ist diese Aufgabe unschwer zu bewältigen. Eine größere Herausforderung stellt die zweite Aufgabe dar. Das Gesetz von Heron gilt ja trotz seiner anderen Vorstellung

3. Entwicklung der Unterrichtssequenz

vom Sehen. Also obwohl die Theorie eine andere ist, lässt sich anscheinend ein „richtiges“ Gesetz ableiten. Das Entscheidende ist an der Stelle jedoch, dass nicht die Theorie des Sehstrahls entscheidende Voraussetzung ist, sondern die Eigenschaft des Sehstrahls, den kürzesten Weg zu nehmen, dieselbe ist, wie die des Lichtstrahls.

Ziele der Einheit:

Inhaltliche Ziele: 5,6

NOS-Ziele: 3

Material:

Arbeitsblätter „Reflexion 4“ , „Reflexion 5“ , „Reflexion 6“ , „Reflexion 7“ (siehe Anhang A)

IV. Experiment 2: Experiment des Ptolemäus

Beschreibung der Einheit:

Im letzten Block zur Reflexion steht das Experiment des Ptolemäus (siehe Abschnitt 2.2.2) im Mittelpunkt. Nach einem kurzen einleitenden Text erhalten die Schüler und Schülerinnen den Arbeitsauftrag, den Text von Ptolemäus durchzulesen. Der Text beruht auf der englischen Übersetzung, wurde jedoch auf Deutsch übersetzt, stellenweise vereinfacht und angepasst. In einer Partnerarbeit sollen die Schüler und Schülerinnen eine Skizze des Versuches anfertigen und beschriften. Der Sinn dahinter ist, das sinnerfassende Lesen zu trainieren und das Anfertigen von Skizzen zu verbessern. Anschließend soll das beschriebene Experiment in einer Partnerarbeit durchgeführt werden und eine Tabelle angelegt werden. Im Plenum werden die Ergebnisse zusammengefasst. Dabei soll vor allem der Sinn des Experimentes zur Sprache kommen. Zuvor wurde bereits ein Gesetz abgeleitet und erst jetzt wurde geschaut, ob das Experiment das Gesetz widerlegt. In dieser Einheit soll anhand der Eisenscheibe aufmerksam gemacht werden, dass die Reflexion eine Sonderform der Streuung darstellt, indem man die polierte Seite mit der nicht polierten Seite vergleicht. In der „Reflexionsecke“ wird das Experiment an sich zur Sprache gebracht. Die erste Frage beschäftigt sich damit, was man überhaupt unter einem Experiment versteht. Die zweite Frage stellt das Gesetz dem Experiment gegenüber und soll zur Diskussion anregen, was „Priorität“ hat. Einige werden das Experiment in Frage stellen und andere das Gesetz.

Ziele der Einheit:

3. Entwicklung der Unterrichtssequenz

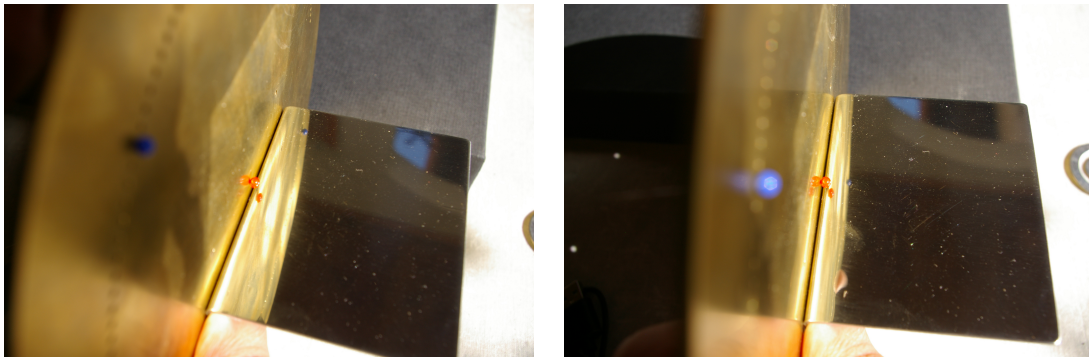


Abbildung 3.3.: Die hintere blaue Stecknadel soll in einer Linie mit der roten Stecknadel und der vorderen blauen Stecknadel liegen. Beim linken Bild ist dies nicht der Fall. Beim rechten schon.

Inhaltliche Ziele: 4, 7

NOS-Ziele: 4, 5

Material:

Runde Messingscheibe mit Löchern in drei Quadranten, polierte Eisenscheibe (inkl. Schrauben), 3 Stecknadeln, Arbeitsblätter „Reflexion 8“ , „Reflexion 9“ , „Reflexion 10“ (siehe Anhang A)

3.3.3. Teil 2: Brechung

Die Brechung eines Lichtstrahls an einer ebenen Grenzfläche stellt in der Regel eine größere Herausforderung dar. Wieder steht zu Beginn die Beobachtung. Hier wurde ein oft verwendetes Experiment gewählt, das bereits von Euklid erwähnt wurde. Eine Münze am Grund eines Gefäßes wird durch das Eingießen von Wasser scheinbar angehoben. Ausgehend von dieser Beobachtung, wird erkannt, dass der Weg des Lichtes einen „Knick“ beim Übergang zweier optischer Medien hat. Dieser „Knick“ soll quantitativ anhand des Experimentes von Ptolemäus untersucht werden (siehe Abschnitt 2.2.2). Bevor das Brechungsgesetz von Snellius aus diesen Daten abgeleitet wird, soll noch das von Snellius erwähnte Experiment des Ibn-Al-Haitam durchgeführt werden (siehe Abschnitt 2.2.3). Dabei steht vor allem die Erkenntnis im Vordergrund, dass auch der senkrechte Lichtstrahl vom Übergang ins andere Medium beeinflusst wird. Brechung ist somit abhängig von den betroffenen Medien und nicht bloß von der Oberfläche. Anschließend wird der Weg des Snellius rekonstruiert.

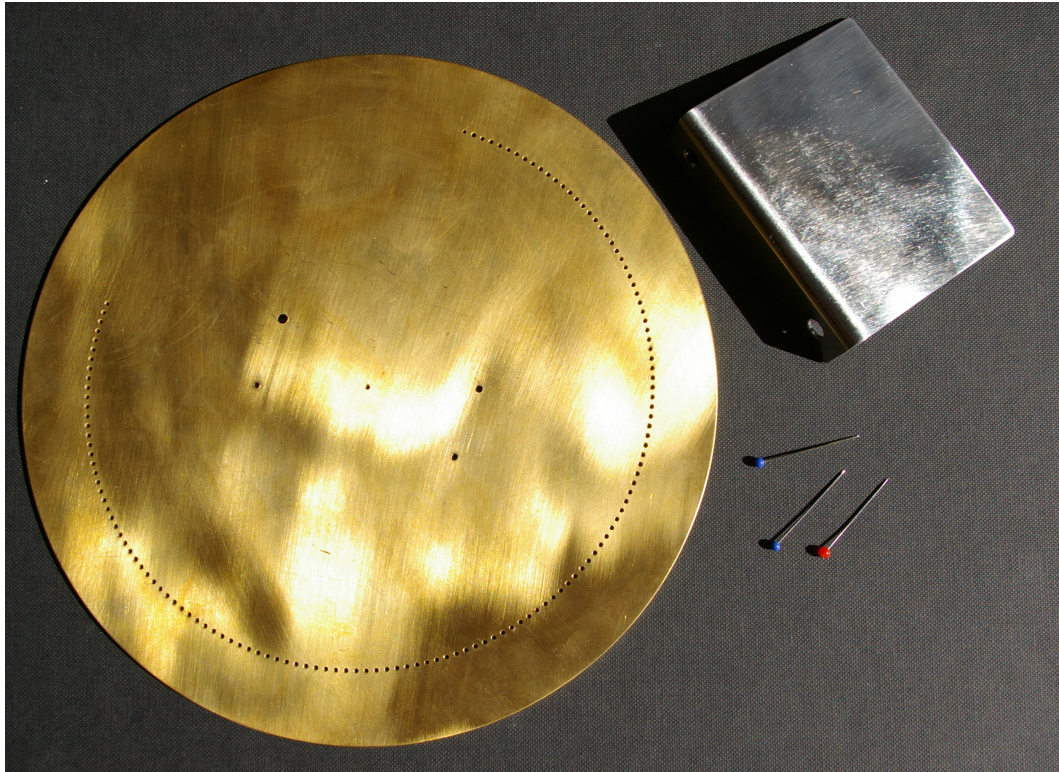


Abbildung 3.4.: Materialien für das Experiment des Ptolemäus: Runde Messingscheibe mit Löchern in drei Quadranten, polierte Eisenscheibe und 3 Stecknadeln

I. Die Beobachtung: Münze im Gefäß

Beschreibung der Einheit:

Bereits Euklid erwähnte eine Beobachtung: Wenn man auf den Grund eines Gefäßes eine Münze legt und den Kopf so positioniert, dass sie gerade hinter dem Gefäßrand verschwindet, taucht sie plötzlich wieder auf, wenn man Wasser in das Gefäß gießt. Sie wird scheinbar angehoben. Das Ziel dieser Einheit es, einerseits die optische Hebung zu zeigen und andererseits die Ursache der Hebung im „Knick“ des Weges des Lichtstrahles zu finden. Ausgangsposition ist ein undurchsichtiges Gefäß, wie bei Euklid beschrieben, und eine Münze am Grund. Zuerst wird phänomenologisch durch Eingießen von Wasser gezeigt, dass die Münze angehoben wird. Die Schüler und Schülerinnen sollen anschließend die Beobachtung genau beschreiben und eine Skizze anfertigen. Die erste Erkenntnis soll sein: Der Lichtweg kann nicht gerade sein. An der Stelle ist bereits bekannt, dass der Lichtweg in der Luft gerade ist. Der nächste Schritt findet sich in ähnlicher Form auch in [25] wieder. Mit einem Strohhalm sollen die Schüler und Schülerinnen in einer

3. Entwicklung der Unterrichtssequenz

Partnerarbeit die Münze anvisieren. Einer oder eine zielt mit dem Strohhalm bis zur Wasseroberfläche, sodass er oder sie die Münze sieht. Der oder die Zweite skizziert den Weg des Lichtes passend im Heft. Um der Frage nachzugehen, ob der Weg des Lichtes vom Wasserstand abhängt, wird dasselbe Experiment mit verschiedenen Wasserständen durchgeführt. Die Ergebnisse werden wieder im Plenum diskutiert, zusammengetragen, organisiert und förmlich ins Heft geschrieben. Hier ist es wichtig, auf die Konstruktion des Bildortes einzugehen. Der Bildort befindet sich dort, wo der scheinbare Lichtstrahl das Lot auf die Grenzfläche durch das Objekt schneidet. In der „Reflexionsecke“ steht wieder die Beobachtung im Zentrum. Dafür wird dieselbe Frage wie in 3.3.2.I. an derselben Stelle aufliegen. Dadurch kann diese Frage wieder weiterentwickelt werden.



Abbildung 3.5.: Auf dem Grund des Gefäßes liegt eine Münze, die gerade hinter dem Rand verschwindet. Durch eingießen von Wasser wird die Münze plötzlich sichtbar.

Ziele der Einheit:

Inhaltliche Ziele: 9, 10, 12

NOS-Ziele: 1, 2

Material:

Undurchsichtiges Gefäß (Häferl), durchsichtiges Gefäß (Glas), Münze, Wasser, Strohhalm, Arbeitsblätter „Brechung 1“ , „Brechung 2“ , „Brechung 3“ (siehe Anhang A)

II. Experiment 1: Experiment des Ptolemäus

Beschreibung der Einheit:

Anders als beim Reflexionsgesetz ist die Herleitung des Brechungsgesetzes weit komplexer. Der „Knick“ im Lichtweg ist gut erkennbar, aber um zu erkennen, welche Regelmäßigkeit dahinter liegt, muss zuerst ein quantitatives Experiment durchgeführt werden. Das erste dieser Art war ebenfalls von Ptolemäus (siehe Abschnitt 2.2.2). Für das Experiment wird dieselbe bronzene Scheibe wie in dem Experiment zum Reflexionsgesetz von Ptolemäus verwendet. Der Aufbau dieses Experiments ist analog zum Experiment im logischen Block „IV. Experiment 2: Experiment des Ptolemäus aus Teil 1: Reflexion“ (siehe 3.3.2.IV.). In der Rolle eines Archäologen, der auf einen Text von Ptolemäus stößt, soll der Text gelesen und analysiert werden. In einer Partnerarbeit soll eine Skizze anhand des Textes angefertigt werden und schließlich das Experiment durchgeführt werden. Die Messwerte sollen in einer Tabelle festgehalten werden. Anschließend sind die Schüler und Schülerinnen dazu angehalten, eine Regelmäßigkeit zu finden. Einige werden vielleicht „fast-Regelmäßigkeiten“ finden und eventuell ihre Messwerte leicht „korrigieren“. Es ist nicht zu erwarten, dass jemand tatsächlich eine Regelmäßigkeit findet. Im Plenum werden alle Ergebnisse zusammengetragen und diskutiert. Aus den Messungen der unterschiedlichen Gruppen soll eine umfangreiche Tabelle über die Abhängigkeit von Einfallswinkel und Brechungswinkel angelegt werden. Wenn mehrere Gruppen denselben Einfallswinkel gewählt haben, wird als Brechungswinkel der Mittelwert genommen. Die anzufertigende Skizze soll gemeinsam noch einmal angefertigt werden und der Weg des Lichtes eingezeichnet werden, um eine einheitliche und vollständige Mitschrift zu garantieren. In der „Reflexionsecke“ soll der Unterschied zwischen der Rolle des ersten und des zweiten Experimentes von Ptolemäus im historischen Kontext erarbeitet werden. Es gibt an der Stelle zwar keine Entkoppelung des Inhaltes, aber dies ist in Kauf zu nehmen. Im ersten Experiment wurde experimentiert, um ein bestehendes Gesetz zu bestätigen und im zweiten Experiment wurde experimentiert, um ein unbekanntes Gesetz zu finden.

Ziele der Einheit:

Inhaltliche Ziele: 13

NOS-Ziele: 4

3. Entwicklung der Unterrichtssequenz

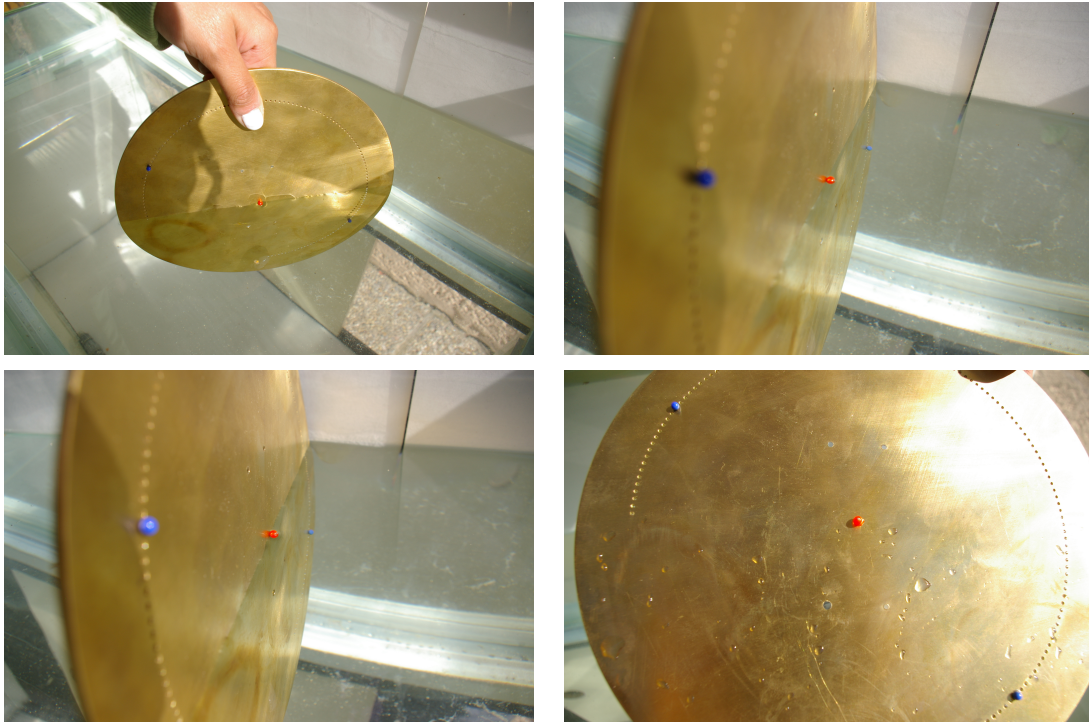


Abbildung 3.6.: Die Kreisscheibe wird bis zur Hälfte ins Wasser eingeführt. Anschließend wird wieder die hintere blaue Stecknadel in eine Linie mit der roten und der vorderen blauen Stecknadel gebracht. Außerhalb des Wassers kann schließlich der Brechungswinkel gemessen werden.

Material:

Runde Messingscheibe mit Löchern in drei Quadranten, großer Wasserbehälter, 3 Stecknadeln, Arbeitsblätter „Brechung 4“ , „Reflexion 5“ , „Reflexion 6“ (siehe Anhang A)

III. Experiment 2: Experiment des Ibn-al-Haitam

Beschreibung der Einheit:

Nachdem den Schülerinnen und Schülern bewusst ist, dass der Weg des Lichtes beim Übergang von Luft zu Wasser geknickt ist, wird der Grenzfall des senkrecht einfallenden Strahls betrachtet. Hier gibt es keinen Knick. Das Experiment des Ibn-al-Haitam, welches auch von Snellius in seiner Schrift über das Brechungsgesetz erwähnt wurde, zeigt sehr gut, was mit dem senkrechten Strahl passiert (siehe Abschnitt 2.2.3). In einer Gruppe von drei Kindern soll das Experiment des Ibn-al-Haitam nachgestellt werden. Dabei bekommt jede Gruppe eine laminierte feste Papierkreisscheibe mit radialen Linien vom Mittelpunkt nach außen. Nun sollen die Schüler und Schülerinnen die Kreisscheibe bis über die Mittellinie ins Wasser eintauchen und frontal von schräg oben auf die Kreis-

3. Entwicklung der Unterrichtssequenz

scheibe blicken. Man erkennt, dass die schräg zur Wasseroberfläche verlaufenden Linien einen Knick haben, die senkrechte Linie jedoch nicht. Aber der Mittelpunkt ist angehoben. Das bedeutet auch die senkrechte Linie wird gebrochen, indem sie verkürzt wird. Diesen Sachverhalt sollen die Schüler und Schülerinnen anhand der Arbeitsanweisungen erarbeiten. Dabei soll zuerst in einer Partnerarbeit das Experiment durchgeführt werden und Beobachtungen genau beschrieben werden. Die Kernfragen sind: Was passiert mit den einzelnen Linien? Was passiert mit dem Mittelpunkt des Kreises? Die Beobachtungen sollen ins Heft notiert werden und eine Skizze des Versuchs soll angefertigt werden. Anschließend sollen diese Beobachtungen im Plenum diskutiert, die Skizze gemeinsam an der Tafel wiederholt und die Resultate schriftlich festgehalten werden. Anschließend wird den Schülern und Schülerinnen ein Zitat von Snellius vorgelegt, in dem er behauptet, die Brechung sei eine Eigenschaft der gesamten Dichte eines durchsichtigen Gegenstandes und nicht nur seiner Oberfläche. Die Schüler und Schülerinnen sollen nach dem „Think, Pair, Share“-Prinzip zuerst in Einzel-, dann in Partnerarbeit und zuletzt im Plenum die Frage behandeln, was Snellius mit der Aussage meint, beziehungsweise wie er auf diese Aussage, ausgehend von der Beobachtung des Ibn-al-Haitam, kommt. Das Ziel der Einheit ist es, den Schülern und Schülerinnen vor Augen zu führen, dass es nicht nur zu einem Knick des Lichtstrahls an der Grenzfläche kommt, sondern auch zu einem scheinbaren Anheben des Objekts beziehungsweise zu einer scheinbaren Verkürzung des Lichtstrahls. In der „Reflexionsecke“ soll wieder die Frage zur Beobachtung aus den Einheiten 3.3.2.I. und 3.3.3.I. weiterentwickelt werden.

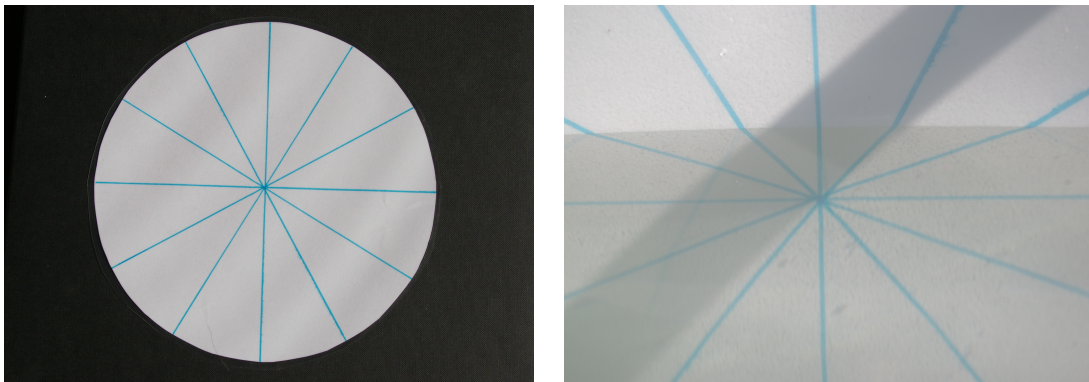


Abbildung 3.7.: Links: Eine folierte Kreisscheibe mit radialen Linien nach außen. Rechts: Wenn die Kreisscheibe bis über den Mittelpunkt ins Wasser eingeführt ist, wird der Mittelpunkt angehoben und somit die senkrecht ins Wasser tauchende Linie verkürzt.

Ziele der Einheit:

Inhaltliche Ziele: 11

NOS-Ziele: 1, 2

Material:

Laminierte Papierkreisscheibe mit mehreren radialen Linien, Behälter mit Wasser, Arbeitsblätter „Brechung 7“, „Brechung 8“, „Brechung 9“ (siehe Anhang A)

IV. Das Gesetz: Brechungsgesetz nach Snellius**Beschreibung der Einheit:**

Üblicherweise wird das Brechungsgesetz im Unterricht erst formuliert, wenn die Funktionen Sinus und Cosinus im Mathematikunterricht erarbeitet wurden. Mithilfe des Entdeckungsweges von Snellius kann das Brechungsgesetz einfach als Verhältnis des gebrochenen Lichtstrahls zum scheinbaren (vom Auge wahrgenommenen) Lichtstrahl beschrieben werden (siehe 2.2.3). Dieser Entdeckungsweg stellt den Leitfaden für die Unterrichtseinheit dar. Zuerst sollen die Schüler und Schülerinnen mithilfe der in 3.3.3 angelegten Tabelle eine Brechungskurve anlegen. Dabei bekommen sie die Anweisung, sich vorzustellen 150 cm groß zu sein (Augenhöhe) und ganz am Rand eines 150 cm tiefen und 500 cm langen Wasserbeckens zu stehen. Alle 2° sehen sie eine Münze im Wasser am Beckenboden liegen. Diese Szene sollen sie im Maßstab 1:10 in einer Partnerarbeit konstruieren. Anschließend sollen sie mit der Tabelle der Einfallswinkel und Brechungswinkel die wirkliche und scheinbare Lage der Münzen konstruieren. Dabei sollen die Schüler und Schülerinnen implizit das Konstruieren von Brechungsvorgängen lernen und festigen. Die entstehende Kurve, wenn man die Bildpunkte der Münze verbindet, wird als Brechungskurve vorgestellt. An dieser Stelle erfolgt eine Aufarbeitung und Diskussion im Plenum, sowie ein einheitliches Festhalten des Wissens. Die Suche nach einer Regelmäßigkeit in der Kurve wird Snellius überlassen und nur ein Zitat von ihm erwähnt, indem er behauptet, das Verhältnis von scheinbarem zu wirklichem Lichtstrahl bleibt immer gleich. Die Schüler und Schülerinnen sollen das überprüfen und die Konstruktionsvorschrift für die Brechungskurve exemplarisch einzeichnen. Aufbauend auf dieses Wissen soll das Brechungsgesetz mithilfe von Verhältnissen, ohne Sinus und Cosinus Funktion, formuliert werden. Zum Schluss erfolgt wieder eine Diskussion und eine Behebung aufgetretener Probleme. In der „Reflexionsecke“ soll der Satz: „Ein Gesetz kann nur aus einem Experiment abgeleitet werden!“ diskutiert werden. Dabei werden einige vielleicht erkennen, dass Heron's Gesetz nicht aus einem Experiment, sondern aus einer Theorie abgeleitet

3. Entwicklung der Unterrichtssequenz

wurde. Die Theorie wurde jedoch aus einem Experiment entwickelt. Des Weiteren soll eine Definition für den Begriff „Gesetz“ gesucht und ein Unterschied zwischen Gesetz und Theorie diskutiert werden. Das Ziel ist, ein Bewusstsein für die Begriffe Theorie, Gesetz und Experiment zu schaffen.

Ziele der Einheit:

Inhaltliche Ziele: 12, 14

NOS-Ziele: 6

Material:

A3-Blätter, Geodreieck, Arbeitsblätter „Brechung 10“ , „Brechung 11“ , „Brechung 12“ (siehe Anhang A)

3.3.4. Der Abschluss

Am Ende der Unterrichtssequenz sollen die Ergebnisse der Reflexionsecke diskutiert und thematisiert werden. Die einzelnen Fragen sollen zuerst mit dem Sitznachbarn und anschließend im Plenum diskutiert werden. Die Lehrperson hat sich vor der Diskussion mit dem Thema NOS auseinanderzusetzen, um keine unangemessenen Vorstellungen zu fördern.

Des Weiteren ist es empfehlenswert, die Anwendung des Reflexions- und Brechungsgesetzes zu üben und zu festigen. Anschließend sollten die Lernziele überprüft werden.

4. Diskussion

In diesem letzten Kapitel sollen einerseits die wichtigsten Inhalte der Diplomarbeit noch einmal zusammengefasst, mögliche Probleme bei der Umsetzung diskutiert und ein Ausblick auf eine Weiterentwicklung geliefert werden.

Welche Vorteile bietet der wissenschaftshistorisch orientierte Unterricht gegenüber dem herkömmlichen Unterricht? Ersterer liefert zunächst einen Anhaltspunkt für eine Struktur des Unterrichts: den chronologischen Verlauf. Die Art und Weise, wie die Entwicklung physikalischen Wissens erfolgt, ist in den meisten Fällen logisch, genetisch und ähnlich dem Lernprozess eines Schülers oder einer Schülerin. Neben den Inhalten steht beim historisch orientierten Unterricht vor allem das Wesen der Naturwissenschaften (Nature of Science (NOS)) im Mittelpunkt. Das heißt, jene Aspekte der Physik, die im herkömmlichen, an Inhalten orientierten Unterricht in der Regel vernachlässigt werden. Die Schüler und Schülerinnen bekommen einen Einblick darin, wie die Physik funktioniert, wie physikalisches Wissen entsteht und wie Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen arbeiten. Doch es reicht nicht nur die historische Orientierung, um eine adäquate Sicht auf die Physik zu schaffen. Es bedarf der gezielten Reflexion und Thematisierung aufgetretener Wesenseigenschaften der Naturwissenschaft. Die Schüler und Schülerinnen sollen mit dem Wissen über das Wesen der Physik Naturwissenschaften kritisch hinterfragen können und über physikalische Themen angemessen diskutieren können. Nicht zu vernachlässigen ist auch der motivationale Faktor des Selbermachens und des Versetzens in große Persönlichkeiten.

Die Herausforderung des Lehrers oder der Lehrerin liegt nicht nur bei der Vorbereitung und Ausarbeitung der Unterrichtseinheiten, die eine gründliche, über das herkömmliche Fachwissen hinausgehende Recherche erfordert. Die Lehrkraft muss sich auch über die aktuelle Sicht auf das Wesen der Physik klar sein. Die didaktische Literatur bietet einen sehr guten Überblick. Da der Unterricht sehr schülerzentriert ist, muss die Lehrkraft in den Hintergrund treten sowie gut moderieren und koordinieren können. Reflexionen

4. Diskussion

müssen gezielt angeregt werden und Diskussionen müssen gut gelenkt werden.

In dieser Arbeit wurde lediglich ein mögliches Thema exemplarisch ausgearbeitet, um aufzuzeigen, wie so ein Unterricht aussehen kann. Die Wissenschaftsgeschichte bietet viele Themen an, in denen unterschiedlichste Aspekte der Physik behandelt werden können. Ob es Streitigkeiten in der Physik, wie bei Isaac Newton und Christaan Huygens, oder wissenschaftliche Revolutionen, wie die allgemeine Relativitätstheorie oder die Quantenmechanik sind. Man kann zeigen, dass die Physik veränderlich und vom Mensch konstruiert ist. Dass es keine absolute Wahrheit gibt. Wie sich Theorien verändern. Wie Experimente scheitern und entwickelt werden. Wie Gesetze gefunden werden.

A. Arbeitsblätter

Die Arbeitsblätter sind einheitlich gestaltet und geben die Arbeitsanweisungen. Durch Symbole ist die Art des Arbeitsauftrages gekennzeichnet. Alle Grafiken sind selbst erstellt und alle Texte selbst verfasst, oder wurden bereits in der Diplomarbeit zitiert.

Wie verhält sich das Spiegelbild?

Im alten Griechenland, ein paar hundert Jahre vor unserer Zeitrechnung, lebten viele wissenshungrige Forscher und Philosophen. Viele Dinge, die wir jetzt als selbstverständlich sehen, haben dort ihren Ursprung, wie etwa das Wissen rund um den Spiegel, den heute jeder schon zu Hause hat. Du bist nun auf der Spur zu diesem Wissen und arbeitest für eine antike griechische Zeitung und planst ein Interview mit einem antiken Forscher.



Einzelarbeit: Notiere dir vier Fragen, die du einem alten griechischen Forscher über die Eigenschaften eines Spiegelbildes stellen würdest! (Beispiel: Wie verhält sich links zu rechts?)



Partnerarbeit: Stelle deinem Partner deine vier Fragen! Dieser versucht in die Rolle des antiken Forschers zu schlüpfen und die Fragen durch ausprobieren mit dem Spiegel und der Schachtel zu beantworten. Anschließend tauscht ihr die Rollen!



Partnerarbeit: Notiert die Antworten und fasst eure Ergebnisse zusammen!

04.10.2015

Markus Obczovsky

Reflexion 1



„Reflexionsecke“

Ist eine Beobachtung im Allgemeinen deiner Meinung nach objektiv, also unabhängig des Beobachters? Begründe deine Antwort, gib Voraussetzungen an, unter denen die Aussage stimmt oder nicht stimmt. Es gibt kein falsch und richtig.

04.10.2015

Markus Obczovsky

Reflexion 2



Wo liegt das Spiegelbild?



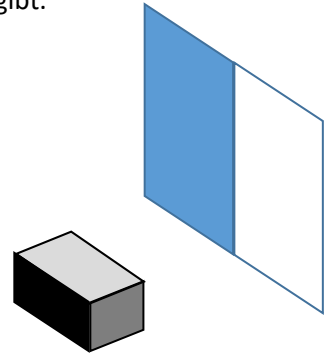
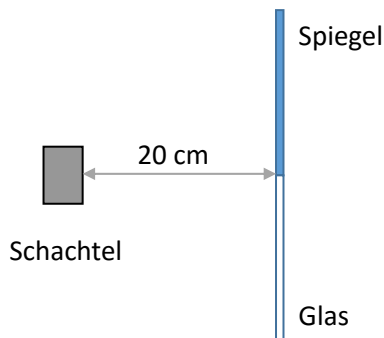
Gruppenarbeit: Ihr habt einen „Halbspiegel“ und zwei Schachteln. Platziert den Spiegel vor euch auf dem Tisch, sodass die Spiegelseite links und die Glasseite rechts ist. Nun platziert eine der Schachteln mittig 20 cm vor dem Spiegel. Dann seht ihr eine halbe Schachtel im Spiegel. Jetzt versucht, die andere Schachtel so zu positionieren, dass sie zusammen mit dem halben Spiegelbild der ersten Schachtel eine vollständige Schachtel ergibt.



Notiert eure Ergebnisse und beschreibt die Lage des Spiegelbildes!



Einzelarbeit: Zeichne das Spiegelbild in folgender Skizze ein:



Heron's Reflexionsgesetz

Im entfernten Alexandria stand im 1. Jahrhundert eine riesige Bibliothek. Dort arbeiteten viele berühmte Forscher, Physiker, Philosophen, Mathematiker und andere Gelehrte. Einer von ihnen war Heron von Alexandria. Stell dir vor du bist ein Student oder eine Studentin dieses großen Gelehrten. Als er eines Tages nicht in seinem von Büchern und Pergamenten überschwemmten Büro sitzt und du versuchst, dort für ein wenig Ordnung zu sorgen, stößt du plötzlich auf folgende Schriftrolle:

Der Sehstrahl von Punkt A, dem Auge, soll über einen Punkt P auf dem ebenen Spiegel zum Punkt B, einem Objekt, gelangen. Dieses Problem ist dasselbe, als ob der Sehstrahl von Punkt A zum Spiegelbild B' des Punktes B gelangen würde...



Partnerarbeit: Diskutiere mit deinem Sitznachbarn, was an Herons Überlegung nicht mehr zeitgemäß ist!



Formuliere den Denkansatz von Heron so um, dass er mit dem im Unterricht Gelernten zusammenpasst!



Heron's Reflexionsgesetz

Aufbauend auf diesen Denkansatz konnte Heron beweisen, dass bei der Reflexion der Ausfallswinkel des Lichtes gleich dem Einfallswinkel des Lichtes auf die Spiegeloberfläche ist. Hilf Heron dabei, den Beweis schön aufzuschreiben.



Partnerarbeit: Versuche gemeinsam mit deinem Sitznachbarn, eine Skizze von Herons Denkansatz zu zeichnen!



Partnerarbeit: Versucht, ausgehend von dieser Skizze und den Überlegungen, zu zeigen, dass der Einfallswinkel des Lichtes gleich dem Ausfallswinkel des Lichtes auf eine ebene Spiegeloberfläche ist! (Beim Lehrertisch findet ihr Hinweiskärtchen von Heron!)



Notiere deine Ergebnisse in eigenen Worten!

Bonusfrage: Welche Voraussetzung verwendet Heron?

04.10.2015

Markus Obczovsky

Reflexion 5



Hinweiskärtchen

I Wo auf dem Spiegel kann der Punkt P nur liegen?

II Ich glaube, der Punkt P liegt auf der Verbindungsline von A und B' . . . aber wieso?

III Vielleicht sollte ich die einzelnen Winkel vergleichen, da ergibt sich vielleicht ein Zusammenhang. . .

IV Der Winkel, den die Strecke PB' mit der Spiegeloberfläche einschließt, sieht doch ähnlich groß aus, wie der Winkel den die Strecke PA mit der Spiegeloberfläche einschließt, oder? Aber warum. . .

V Der Winkel, den die Strecke PB mit der Spiegeloberfläche einschließt und der Winkel den die Strecke PB' mit der Spiegelfläche einschließt sind doch auch ähnlich. . .

VI Wenn der erste mit dem zweiten Winkel und der zweite mit dem dritten Winkel übereinstimmen. . . was heißt das dann?

04.10.2015

Markus Obczovsky

Reflexion 6



„Reflexionsecke“

Die Physik ist unveränderlich! Kommentiere diese Aussage!

Verliert ein Gesetz seine Gültigkeit, wenn die Theorie dahinter geändert wird?

04.10.2015

Markus Obczovsky

Reflexion 7



Das Experiment von Ptolemäus

Egal was in der Physik behauptet wird: Man muss es in einem Experiment nachweisen können. Das erste bekannte Experiment zum Reflexionsgesetz wurde von Claudius Ptolemäus durchgeführt. Er lebte vor ungefähr 1900 Jahren im alten Griechenland, kurz nach Heron von Alexandria. Unter Forschern und Forscherinnen ist es üblich, ein Forschungstagebuch zu führen. Darin beschreiben sie Gedankengänge, Experimente, Beobachtungen und dokumentieren ihre Arbeit. Bei einer Ausgrabung in Griechenland findest du eine alte Schriftrolle, in der Claudius Ptolemäus sein Experiment beschreibt. Daneben liegt eine bronzene Kreisscheibe mit Löchern, eine Eisenscheibe und zwei Schrauben. Leider ist die Beschriftung verblasst und nicht mehr erkenntlich.



Einzelarbeit: Lies den Text von Ptolemäus genau durch!



Partnerarbeit: Versuche mit deinem Partner eine Skizze des Versuches anzufertigen und vervollständige dort die verblasste Beschriftung, die im Text erwähnt wird!



Partnerarbeit: Führe mit deinem Partner das beschriebene Experiment mit vier verschiedenen Punkten L durch, und trage die gemessenen Winkel für LAB und BAM in eine Tabelle ein.



Einzelarbeit: Übertrage die Tabelle sauber in dein Heft.

04.10.2015

Markus Obczovsky

Reflexion 8



[Experiment 999] Man nehme eine runde, bronzene Scheibe, mittlerer Größe und man bezeichne ihren Mittelpunkt mit A. Man schleife beide Seiten so gut wie möglich und runde ihre Kanten ab und poliere sie. Anschließend zeichne man einen kleinen Kreis mit Mittelpunkt A auf eine der Seiten. Am Kreis seien alle zwei Grad in allen Quadranten, außer dem dritten, Löcher. Man bezeichne den Punkt des ersten Loches im zweiten Quadranten mit B. Weiters zeichne man zwei Strecken, BD und GE, die sich im Mittelpunkt A im rechten Winkel schneiden und ihre Endpunkte am Kreis besitzen. Anschließend zeichne man die Strecke BA in Weiß. Nun forme man eine dünne, kleine, quadratische Scheibe aus Eisen und poliere sie zu einem sauberen Spiegel. Man lege des Weiteren die Bronzeplatte mit der beschrifteten Seite nach oben auf den Tisch und schraube die Eisenscheibe mittig auf die Strecke GAE in die vorgefertigten Löcher. Nun positioniere man eine Stecknadel in einem Punkt L, der auf dem Kreis liegt und sich im zweiten Quadranten befindet. Anschließend stecke man eine Stecknadel in den Punkt A. Nun visiere man vom Punkt L aus, den Punkt A an, indem man das Auge an Punkt L legt und in Richtung Punkt A sieht. Folglich nehme man eine weitere Stecknadel und positioniere sie im ersten Quadranten derart, dass sie in einer Linie mit den beiden anderen Stecknadeln liege. Dieser Punkt sei M.



„Reflexionsecke“

Versuche jemandem das Wort „Experiment“ zu erklären, ohne dabei „Experiment“ oder „experimentieren“ zu verwenden!

Was passiert, wenn ein Experiment andere Ergebnisse hervorbringt, als durch ein Gesetz vorhergesagt wurden?



Die Münze im Gefäß des Euklid

Der griechische Mathematiker und Naturwissenschaftler Euklid bemerkte am Anfang unserer Zeitrechnung folgendes Phänomen:

Man lege auf den Grund eines Gefäßes eine Münze. Anschließend positioniere man sein Auge so, dass die Münze gerade hinter dem Rand des Gefäßes aus dem Sichtfeld verschwindet. Nun gieße man vorsichtig Wasser in das Gefäß...



Partnerarbeit: Stelle das Experiment des Euklid mit deinem Sitznachbarn nach!



Partnerarbeit: Beschreibe gemeinsam mit deinem Sitznachbarn, was du siehst und vervollständige aus der Sicht des Euklid den obigen Text.



Einzelarbeit: Notiere deine Beschreibung in dein Heft.



Partnerarbeit: Fertige eine Skizze des Experiments an.

04.10.2015

Markus Obczovsky

Brechung 1



Die Münze im Gefäß des Euklid



Partnerarbeit: Welchen Weg nimmt das Licht? Diskutiere und überlege mithilfe deiner Skizze mit deinem Sitznachbarn!



Partnerarbeit: Nehmt ein durchsichtiges Glas anstatt des undurchsichtigen Gefäßes und führt denselben Versuch noch einmal durch!



Partnerarbeit: Nun nehmt euch einen Strohhalm zur Hilfe. Schau so durch den Strohhalm, dass sich das eine Ende am Auge befindet und das andere Ende knapp über der Wasseroberfläche. Tauche den Strohhalm dabei nicht ins Wasser. Nun visiere so die Münze an. Dein Sitznachbar oder deine Sitznachbarin soll beschreiben, was ihm oder ihr auffällt. Wechselt euch anschließend ab!



Partnerarbeit: Diskutiert über eure Beobachtung!



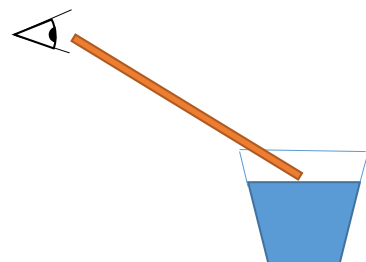
Einzelarbeit: Notiere deine Ergebnisse in dein Heft!



Partnerarbeit: Führt dasselbe Experiment mit unterschiedlich hohem Wasserstand durch! Was fällt euch auf? Was verändert sich? Verändert sich überhaupt etwas?



Einzelarbeit: Notiere deine Ergebnisse in dein Heft!



04.10.2015

Markus Obczovsky

Brechung 2



„Reflexionsecke“

Ist eine Beobachtung im Allgemeinen deiner Meinung nach objektiv, also unabhängig des Beobachters? Begründe deine Antwort, gib Voraussetzungen an, unter denen die Aussage stimmt oder nicht stimmt. Es gibt keine Bewertung von falsch und richtig.

04.10.2015

Markus Obczovsky

Brechung 3



Das Experiment von Ptolemäus 2

Bei derselben Ausgrabung in Griechenland findest du eine zweite alte Schriftrolle, in der Claudius Ptolemäus ein weiteres Experiment beschreibt. Daneben liegt dieselbe bronzene Kreisscheibe mit Löchern und ein großer Wasserbehälter. Die Beschriftung ist ebenfalls verblasst und nicht mehr erkenntlich.



Einzelarbeit: Lies den Text von Ptolemäus genau durch!



Partnerarbeit: Versuche mit deinem Partner eine Skizze des Versuches anzufertigen und vervollständige dort die verblasste Beschriftung, die im Text erwähnt wird!



Partnerarbeit: Führe mit deinem Partner das beschriebene Experiment mit fünf verschiedenen Punkten Z durch, und trage die gemessenen Winkel für ZEA und AEM in eine Tabelle ein.



Einzelarbeit: Übertrage die Tabelle sauber in dein Heft.



Partnerarbeit: Suche mit deinem Sitznachbar nach einer Regelmäßigkeit!

04.10.2015

Markus Obczovsky

Brechung 4



[Experiment V] Man zeichne einen Kreis mit dem Mittelpunkt E auf die Bronzescheibe, sodass alle kreisförmig angeordneten Löcher auf dem Kreis liegen. Zudem markiere man die Punkte A, B, G und D auf dem Kreis, wobei die Durchmesser AG und BD im rechten Winkel zueinander stehen und der Punkt B auf dem ersten Loch des 2ten Quadranten liegt. Man stecke eine Stecknadel in den Punkt E und tauche die Bronzescheibe stehend in ein mit klarem Wasser gefülltes Gefäß soweit ein, bis die Strecke BD in der Ebene der Wasseroberfläche liegt. Man markiere einen Punkt Z im zweiten Quadranten mit einer Stecknadel und visiere von Punkt Z aus den Punkt E an, dass der Punkt Z und der Punkt E in einer Linie liegen. Anschließend markiere man mit einer dritten Stecknadel jenen Punkt im vierten Quadranten unter Wasser, der auf derselben Linie wie die Punkte Z und E liegt. Diesen Punkt bezeichne man mit M.



„Reflexionsecke“

Wo liegt der Unterschied zwischen dem ersten Experiment des Ptolemäus und dem zweiten, bezogen auf die Rolle des Experimentes an sich? Gibt es überhaupt einen Unterschied? Sind alle Experimente vom Prinzip her gleich? Wie ist der Zusammenhang zwischen dem Experiment und dem Gesetz?



Das Experiment des Ibn-al-Haitam

Nicht nur die alten Griechen waren am wissenschaftlichen Fortschritt beteiligt, sondern auch im arabischen Raum gab es einen großen Wissensdurst. Einer der arabischen Forscher war Ibn-al-Haitam. Auch er untersuchte die Brechung von Licht an ebenen Grenzflächen. Dabei entwickelte er ein äußerst nützliches Experiment. Er nahm eine Kreisscheibe und zeichnete in regelmäßigen Abständen Linien vom Mittelpunkt radial nach außen.



Partnerarbeit: Taucht den Kreis bis über die Mittellinie ins Wasser ein. Nun dreht den Kreis, bis eine der Linien senkrecht auf die Wasseroberfläche steht.



Stellt euch vor, ihr seid zwei Forscher und dokumentiert euren Versuch und beschreibt alles, was ihr seht. Behandelt dabei folgende Fragen: Was passiert mit den einzelnen Linien? Was passiert mit dem Mittelpunkt des Kreises?



Notiert eure Beobachtungen in Form eines Textes!



Skizziert den Versuchsaufbau!

04.10.2015

Markus Obczovsky

Brechung 7



Das Experiment des Ibn-al-Haitam

Der niederländische Forscher Willebrordus Snellius schreibt Anfang des 17ten Jahrhunderts aufgrund des Experiments von Ibn-al-Haitam:

Ich glaube, dass die Brechung des Lichtes nicht von der Oberfläche eines durchsichtigen Gegenstandes, sondern von seiner ganzen Dichte her geschieht.



Einzelarbeit: Was kann Snellius mit seiner Aussage gemeint haben? Nimm Bezug auf das Experiment und die Beobachtungen! Wie kommt Snellius auf diese Idee? Mach dir Notizen zu deinen Überlegungen!



Partnerarbeit: Diskutiere mit deinem Sitznachbarn über die obige Frage!



Notiert eure Überlegungen!

04.10.2015

Markus Obczovsky

Brechung 8



„Reflexionsecke“

Ist eine Beobachtung im Allgemeinen deiner Meinung nach objektiv, also unabhängig des Beobachters? Begründe deine Antwort, gib Voraussetzungen an, unter denen die Aussage stimmt oder nicht stimmt. Es gibt keine Bewertung von falsch und richtig.

04.10.2015

Markus Obczovsky

Brechung 9



Die Brechungskurve

Stell dir vor du bist 150 cm groß (Augenhöhe) und du stehst ganz am Rand eines Wasserbeckens. Das Wasserbecken ist an allen Punkten 150 cm tief und hat eine Gesamtlänge von 500 cm. Du lässt deinen Blick über die Wasseroberfläche schweifen und siehst alle 2 Grad eine Münze im Wasser am Boden liegen.



Partnerarbeit: Nehmt ein Blatt der Größe A3 und konstruiert eine zweidimensionale Ansicht des Wasserbeckens von der Seite im Maßstab 1:10!



Nehmt euch die Tabelle mit den Einfallswinkel- und Brechungswinkel und zeichnet die Lichtwege von den Münzen zum Auge ein! Wo liegen die Münzen wirklich? Wo liegen die Münzen scheinbar? Wo liegt die Kante zwischen Beckenwand und Beckenboden scheinbar?

Die entstehende Kurve nennt sich Brechungskurve.

04.10.2015

Markus Obczovsky

Brechung 10



Die Brechungskurve

Snellius fragte sich nach einer Regelmäßigkeit in dieser Kurve und fand folgendes:

Der wirkliche Strahl hat zum scheinbaren, in ein und demselben anderen Medium dasselbe Verhältnis.

Das heißt, die Brechungskurve kommt zustande, wenn das Dreieck (bestehend aus dem wirklichen Lichtstrahl im Wasser, dem scheinbaren Lichtstrahl im Wasser und einer senkrechten Verbindungsstrecke) so verschoben wird, dass das Verhältnis des wirklichen zu dem scheinbaren Lichtstrahl gleichbleibt.



Zeichnet einige dieser Dreiecke in unterschiedlicher Farbe an!



Überprüft, ob Snellius recht hat und legt eine Tabelle an! Vergleicht mindestens 5 Verhältnisse miteinander!



Versucht ein Brechungsgesetz mit diesem Wissen zu formulieren!

04.10.2015

Markus Obczovsky

Brechung 11



„Reflexionsecke“

Ein Gesetz kann nur aus einem Experiment abgeleitet werden! Stimmt diese Aussage? Begründe deine Antwort!

Versuche eine geeignete Definition für den Begriff Gesetz zu finden!

Was ist der Unterschied zwischen einem Gesetz und einer Theorie?

04.10.2015

Markus Obczovsky

Brechung 12



Literaturverzeichnis

- [1] Abd-El-Khalick, Fouad and Norman G. Lederman: *The Influence of History of Science Courses on Students' Views of Nature of Science*. Journal of research in science teaching, 37(10):1057–1095, 2000.
- [2] Cakici, Yilmaz and Eylem Bayir: *Developing Children's Views of the Nature of Science Through Role Play*. International Journal of Science Education, 34(7):1075–1091, 2012.
- [3] Demtröder, Wolfgang: *Experimentalphysik 2 - Elektrizität und Optik*. Springer, Berlin, Heidelberg, 5. Auflage, 2008, ISBN 978-3-540-68210-3.
- [4] Deng, Feng, Der Thanq Chen, Chin Chung Tsai, and Ching Sing Chai: *Students' views of the nature of science: A critical review of research*. Science Education, 95(6):961–999, 2011.
- [5] Duit, Reinders: *Alltagsvorstellungen berücksichtigen!* In: *Schülervorstellungen in der Physik - Festschrift für Hartmut Wiesner*, Seiten 3–7. Aulis Verlag, 3. Auflage, 2004.
- [6] Duit, Reinders: *Schülervorstellungen - von Lerndefiziten zu neuen Unterrichtsansätzen*. In: *Schülervorstellungen in der Physik - Festschrift für Hartmut Wiesner*, Seiten 8–14. Aulis Verlag, 2004.
- [7] Ertl, Dominik: *Sechs Kernaspekte zur Natur der Naturwissenschaften*. Plus Lucis, 1(2):16–20, 2013.
- [8] Feynman, Richard P., Robert B. Leighton, and Matthew Sands: *The Feynman Lectures on Physics - Mainly electromagnetism and matter. Volume 2*. Basic Books, United States, first trade paper edition, 2011, ISBN 978-0-465-02494-0.
- [9] Feynman, Richard P., Robert B. Leighton, and Matthew Linzee Sands: *The Feynman Lectures on Physics: Mainly mechanics, radiation, and heat -*. Basic Books, United States, 2011, ISBN 978-0-465-02414-8.

- [10] Hentschel, Klaus: *Das Brechungsgesetz in der Fassung von Snellius*. Archive for History of Exact Sciences, 2001.
- [11] Höttecke, Dietmar: *How and What Can We Learn From Replicating Historical Experiments? A Case Study*. Science & Education, 9:343–362, 2000.
- [12] Höttecke, Dietmar: *HIPST - History and Philosophie in Science Teaching: A European Project*. Science and Education, 21:1229–1232, 2012.
- [13] Höttecke, Dietmar, Andreas Henke, and Falk Riess: *Implementing History and Philosophy in Science Teaching: Strategies, Methods, Results and Experiences from the European HIPST Project*. Science and Education, 21:1233–1261, 2012.
- [14] Lederman, Norman G.: *Nature of science: Past, present and future*. In Abell, S. K. and N. G. Lederman (editors): *Handbook of research on science education*. Mahwah, NJ: Erlbaum, 2007.
- [15] Maxwell, James Clerk: *A Dynamic Theory of the Electromagnetic Field*. Philosophical Transaction of the Royal Society of London, 1865.
- [16] Park, David: *The Fire Within the Eye - A Historical Essay on the Nature and Meaning of Light*. Princeton University Press, Kassel, new edition, 1999, ISBN 978-0-691-05051-5.
- [17] Russo, Lucio und B. Deninger: *Die vergessene Revolution oder die Wiedergeburt des antiken Wissens*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1. Auflage, 2005, ISBN 978-3-540-27707-1.
- [18] Sidoli, Nathan: *Heron of Alexandria's Date*. Centaurus, 53(1):55 – 61, 2011, ISSN 00088994.
- [19] Smith, A. Mark: *Ptolemy's Theory of Visual Perception - An English Translation of the Optics with Introduction and Commentary*. American Philosophical Society, 1996, ISBN 978-0-871-69862-9.
- [20] Smith, A. Mark: *Ptolemy and the Foundations of Ancient Mathematical Optics - A Source Based Guided Study*. American Philosophical Society, 1999, ISBN 978-0-871-69893-3.

- [21] Smith, A.Mark: *Ptolemy's search for a law of refraction: A case-study in the classical methodology of "saving the appearances" and its limitations*. Archive for History of Exact Sciences, 26(3):221–240, 1982, ISSN 0003-9519.
- [22] Wiesner, Hartmut: *Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten im Bereich der Optik*. In: *Schülervorstellungen in der Physik - Festschrift für Hartmut Wiesner*, Seiten 155–159. Aulis Verlag, 3. Auflage, 2004.
- [23] Wiesner, Hartmut: *Verbesserung des Lernerfolgs im Unterricht über Optik (I)*. In: *Schülervorstellungen in der Physik - Festschrift für Hartmut Wiesner*, Seiten 160–164. Aulis Verlag, 2004.
- [24] Wiesner, Hartmut, Peter Engelhardt und Dietmar Herdt: *Unterricht Physik - Experimente, Medien, Modelle*, Band 1: Optik I: Lichtquellen, Reflexion. Aulis Verlag Deubner, Köln, 2. verbesserte Auflage, 1995.
- [25] Wiesner, Hartmut, Peter Engelhardt und Dietmar Herdt: *Unterricht Physik - Experimente, Medien, Modelle*, Band 2: Optik II: Brechung, Linsen. Aulis Verlag Deubner, Köln, 2. verbesserte Auflage, 2007.

Abbildungsverzeichnis

2.1. Herleitung des Brechungsindex n	13
2.2. Das elektrische Feld E_P einer Ebene von Oszillatoren bei $x = 0$ im Punkt P	16
2.3. Herleitung des Reflexions- und Brechungsgesetzes	20
2.4. Herleitung des Reflexionsgesetzes	23
2.5. Herleitung des Brechungsgesetzes	25
2.6. Herleitung des Reflexionsgesetzes nach Heron	28
2.7. Definition des Bildortes B nach Snellius	32
2.8. Brechungskurve mit einer Schrittweite von $\Delta\phi = 10^\circ$	33
2.9. Brechungskurve mit einer Schrittweite von $\Delta\phi = 2^\circ$	33
2.10. Konstruktion der Brechungskurve	34
2.11. Herleitung des Brechungsgesetzes	35
3.1. Intuitives Probieren mit einem Würfel	51
3.2. Das Spiegelbild des Würfels und der Würfel hinter dem Spiegel koinzidieren nicht. Durch Verschieben des hinteren Objekts: Das Spiegelbild und der hintere Würfel stimmen über ein.	53
3.3. Die hintere blaue Stecknadel soll in einer Linie mit der roten Stecknadel und der vorderen blauen Stecknadel liegen. Beim linken Bild ist dies nicht der Fall. Beim rechten schon.	55
3.4. Materialien für das Experiment des Ptolemäus: Runde Messingscheibe mit Löchern in drei Quadranten, polierte Eisenscheibe und 3 Stecknadeln	56
3.5. Auf dem Grund des Gefäßes liegt eine Münze, die gerade hinter dem Rand verschwindet. Durch eingießen von Wasser wird die Münze plötzlich sichtbar.	57
3.6. Die Kreisscheibe wird bis zur Hälfte ins Wasser eingeführt. Anschließend wird wieder die hintere blaue Stecknadel in eine Linie mit der roten und der vorderen blauen Stecknadel gebracht. Außerhalb des Wassers kann schließlich der Brechungswinkel gemessen werden.	59

3.7. Links: Eine folierte Kreisscheibe mit radialen Linien nach außen. Rechts: Wenn die Kreisscheibe bis über den Mittelpunkt ins Wasser eingeführt ist, wird der Mittelpunkt angehoben und somit die senkrecht ins Wasser tauchende Linie verkürzt.	60
---	----

Tabellenverzeichnis

3.1. Symbole für die Arbeitsaufträge	50
--	----

Glossar

AR Argumentative Resource Framework

HPS History and Philosophy in Science Education

MD Multidimension Framework

NOS Nature of Science

UD Unidimension Framework

VNOS Views of Nature of Science