

# IO2

Modul Optik

## **Refraktion und Reflexion**

In der geometrischen Optik sind die Phänomene der Reflexion sowie der Refraktion (Brechung) von enormer Bedeutung. Beide haben auch vielfältige technische Anwendungen. Dieses Experiment ist dazu gedacht, beide Effekte näher kennenzulernen und die zugrunde liegenden physikalischen Gesetze zu studieren.



## Versuch IO2 - Refraktion und Reflexion

In der geometrischen Optik sind die Phänomene der Reflexion sowie der Refraktion (Brechung) von enormer Bedeutung. Beide haben auch vielfältige technische Anwendungen. Dieses Experiment ist dazu gedacht, beide Effekte näher kennenzulernen und die zugrunde liegenden physikalischen Gesetze zu studieren.

## 1.1 Fragen zur Vorbereitung

- Was versteht man unter dem Begriff Reflexion?
- In welcher Beziehung stehen Einfallswinkel und Ausfallswinkel bei der Reflexion zueinander?
- Wie lautet das Gesetz von Snellius?
- Was versteht man unter Refraktion/Brechung?
- Was besagt das Fermat'sche Prinzip?
- Was ist geometrische Optik und wann ist diese gültig?
- Sind Refraktion und Reflexion Phänomene, die eine Wellennatur des Lichtes vermuten lassen, d.h. ist es für diese Effekte hilfreich, sich Licht als Welle vorzustellen?
- Was versteht man unter optisch dichteren - bzw. optisch dünneren Medien? Wodurch unterscheiden sich beide voneinander?
- Was ist Totalreflexion und wann tritt diese auf?
- Was ist eine virtuelle Abbildung, was eine reelle Abbildung?
- Was ist Dispersion?
- Wie lautet der Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge des Lichts?
- Was versteht man unter Phasen- bzw. Gruppengeschwindigkeit?
- Konstruiere den Strahlengang für a) eine Sammellinse, b) eine Zerstreuungslinse und c) ein Prisma

## 1.2 Theorie

### 1.2.1 Reflexion und Refraktion

Unter Reflexion bezeichnet man in der Optik das Phänomen der Änderung der Ausbreitungsrichtung elektromagnetischer Strahlung beim Auftreffen auf eine Grenzfläche zwischen zwei Medien mit unterschiedlichen optischen Dichten. Unter Refraktion/Brechung versteht man den Effekt, bei welchem elektromagnetische Strahlung beim Übergang zwischen Medien unterschiedlicher optischer Dichte die Ausbreitungsrichtung ändert bzw. abgelenkt wird. Ein Medium wird als optisch dichter bezeichnet, wenn elektromagnetische Strahlung darin eine kleinere Ausbreitungsgeschwindigkeit hat als im Vergleichsmedium (z.B. Luft oder im Vakuum). Auf diesen Sachverhalt wird im nächsten Abschnitt näher eingegangen. Beschrieben wird dieser Sachverhalt durch den sogenannten BRECHUNGSINDEX  $n$ . Für Vakuum ist der Brechungsindex per Definition exakt 1, für Luft gilt  $n = 1,0003$ . Für optisch dichtere Medien ist der Brechungsindex grösser als eins, so gilt z.B. für Wasser  $n = 1,33$ , während die diversen Arten von Gläsern in der Regel Brechungsindices zwischen 1,5 und 2 haben.

Sind die Oberflächenstrukturen des betrachteten Mediums klein im Vergleich zur Wellenlänge, so gilt das REFLEXIONSGESETZ. Der reflektierte Anteil wird unter einem Winkel  $\beta$  zur Senkrechten zurückgeworfen (vgl. Abb. 1.1), welche gleich dem Winkel  $\alpha$  zwischen der einfallenden Strahlung und der Senkrechten ist - Einfallswinkel ist gleich Ausfallswinkel.

Ein Teil der einfallenden Strahlung passiert jedoch die Grenzfläche zwischen beiden Medien, erfährt dabei jedoch ebenfalls eine Änderung seiner Ausbreitungsrichtung, man spricht hier von Refraktion bzw. Brechung. Beim Übergang in ein optisch dichteres Medium wird das Licht immer zur Senkrechten<sup>1</sup> hin gebrochen.

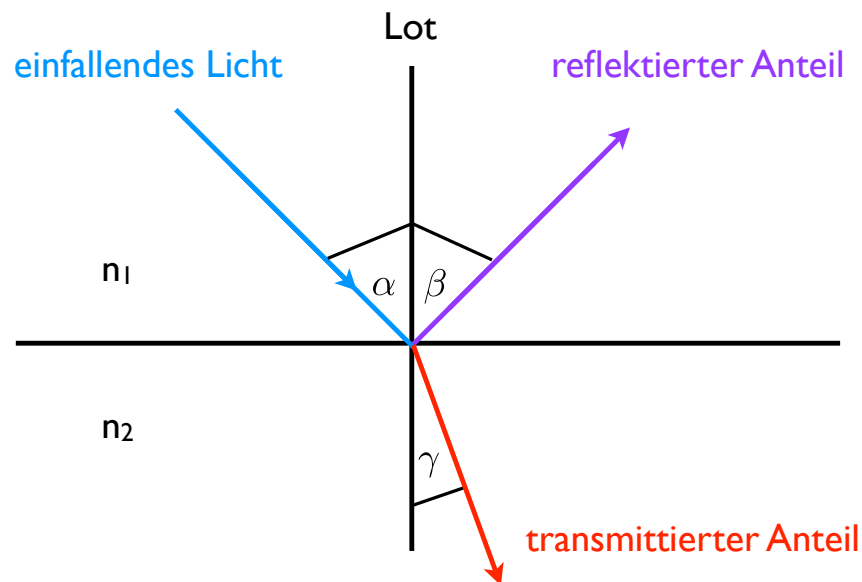


Abbildung 1.1: Hier ist schematisch dargestellt, wie einfallendes Licht an der Grenzfläche zwischen zwei optisch unterschiedlich dichten Medien reflektiert wird. Weiterhin ist der Skizze zu entnehmen, dass es ebenfalls einen transmittierten Beitrag gibt. Dieser Anteil erfährt aber ebenfalls eine Änderung der Ausbreitungsrichtung - er wird gebrochen.

Würde das Licht nicht gebrochen werden, so wären Energie und Impuls nicht erhalten. Mathematisch lässt sich dieses Phänomen durch das sogenannte SNELLIUS'SCHE GESETZ beschreiben, welches lautet:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1.1)$$

Hierbei bezeichnet  $v$  die Phasengeschwindigkeit der elektromagnetischen Strahlung im jeweiligen Medium, auf welche im nächsten Abschnitt näher eingegangen wird. Aus obiger Gleichung kann man auf sehr einfache Weise einen interessanten Spezialfall ableiten. Offensichtlich gilt:

$$\sin \alpha = \sin \gamma \cdot \frac{n_2}{n_1} \quad (1.2)$$

Da aber der Sinus nicht grösser als eins werden kann, ist diese Bedingung nicht für alle Winkel erfüllbar, in diesem Grenzfall gilt dann:

$$\alpha_g = \arcsin \left( \sin \gamma \cdot \frac{n_2}{n_1} \right) \Rightarrow \gamma = \arcsin \left( \frac{n_1}{n_2} \right) \text{ bzw. } \arcsin (1) \quad (1.3)$$

Es zeigt sich, dass elektromagnetische Strahlung in diesem Grenzfall nicht mehr in das optisch dichtere Medium eindringen kann - sie wird komplett reflektiert, daher spricht man von TOTALREFLEXION.

<sup>1</sup>In älteren Werken findet man oftmals noch die Bezeichnung Lot für die Senkrechte.

## 1.2.2 Phasen- und Gruppengeschwindigkeit

Im obigen Abschnitt wurde bereits erwähnt, dass sich elektromagnetische Strahlung in Medien unterschiedlicher optischer Dichte unterschiedlich schnell ausbreitet. Letzten Endes sind hierfür die elektrischen und magnetischen Eigenschaften des entsprechenden Materials verantwortlich, d.h. die Permeabilität  $\mu$  und die Permittivität  $\epsilon$ . In der Elektrodynamik kann folgender Zusammenhang gezeigt werden:

$$c_{Medium}^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon \mu} \Rightarrow c_{Medium} = \frac{c_{Vakuum}}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c_{Vakuum}}{n} \quad (1.4)$$

Nun gilt es zu beachten, dass bei transversalen Welle d.h. Wellen, bei welchen die Schwingung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stattfindet, zwei verschiedene Geschwindigkeiten zu unterscheiden sind. Betrachtet man einen bestimmten Punkt einer Welle bzw. eine bestimmte Phase der Welle, so bewegt sich dieser Punkt/die Phasen mit der so genannten PHASENGESCHWINDIGKEIT  $v_{ph}$ . Für die Phasengeschwindigkeit gilt im Allgemeinen,

$$v_{ph} = \lambda \cdot f = \frac{\omega}{k} \quad (1.5)$$

wobei in dieser Gleichung die Wellenlänge  $\lambda$ , und die Frequenz  $f$  der betrachteten Wellen darstellen. Alternativ kann man diesen Zusammenhang auch durch die Kreisfrequenz  $\omega$  und den Betrag des Wellenvektors  $k$  ausdrücken.

Weiterhin betrachten wir nun ein Wellenpaket, wie es in der unten stehenden Abbildung 1.2 dargestellt ist. Dieses Wellenpaket breitet sich mit der sogenannten GRUPPENGESCHWINDIGKEIT aus, welche im Allgemeinen von der Phasengeschwindigkeit verschieden ist. Es gilt:

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (1.6)$$

Setzt man Gleichung 1.5 in Gleichung 1.6 ein, so erhält man den allgemeinen Zusammenhang zwischen Gruppen- und Phasengeschwindigkeit:

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{\partial(v_{ph} \cdot k)}{\partial k} = v_{ph} + k \cdot \frac{\partial v_{ph}}{\partial k} \quad (1.7)$$

Falls die Phasengeschwindigkeit keine Funktion des Wellenvektors ist, so verschwindet der zweite Term und Phasen- und Gruppengeschwindigkeit sind identisch. Optische Medien, in denen dies der Fall ist, bezeichnet man als NICHT-DISPERSIV, dies ist für elektromagnetische Strahlung nur im Vakuum der Fall. Gruppen- und Phasengeschwindigkeit sind für elektromagnetische Strahlung im Vakuum beide gleich der Vakuumlichtgeschwindigkeit.

In anderen optischen Medien, wie z.B. den in diesem Experiment verwendeten Gläsern, ist dies nicht der Fall. Hier ist die Phasengeschwindigkeit eine Funktion des Wellenvektors. Dieses Phänomen nennt man DISPERSION<sup>2</sup>. Es lässt sich experimentell sehr einfach beobachten, in dem man Licht durch ein Prisma scheinen lässt. Weisses Licht, welches bekanntermassen aus verschiedenen Wellenlängen zusammengesetzt ist, wird in seine verschiedenen Wellenlängen aufgespalten - man sieht ein Spektrum.

Man kann im Falle der Brechung zeigen, dass sich beim Übergang in ein anderes Medium nur die Phasengeschwindigkeit ändert, nicht jedoch die Gruppengeschwindigkeit. Weiterhin kann man unter Verwendung von Gleichung 1.5 zeigen, dass sich beim Übergang in das Medium die Wellenlänge ändert, nicht jedoch die Frequenz.

---

<sup>2</sup>In der Physik ist es allgemein üblich von Dispersion zu sprechen, sobald eine Grösse von der Frequenz bzw. dem Wellenvektor  $\vec{k}$  abhängt.

Es sei an dieser Stelle noch erwähnt, dass die Phasengeschwindigkeit von elektromagnetischer Strahlung auch grösser als die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum sein kann. Dies liegt daran, dass die Phasengeschwindigkeit nicht für das Übertragen von Energie bzw. Information verwendet werden kann. Die Gruppengeschwindigkeit hingegen kann niemals grösser werden als die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

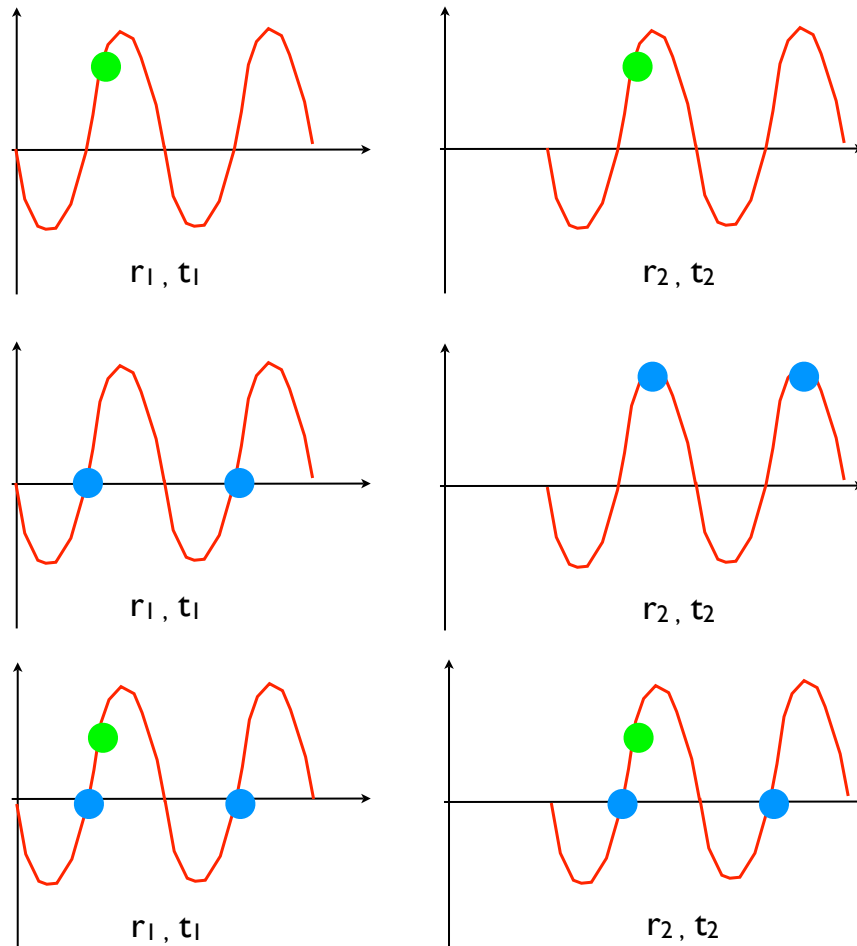


Abbildung 1.2: Die obere Zeile zeigt einen Wellenzug zu zwei verschiedenen Zeiten und Orten. Die betrachtete Phase ist mit einem grünen Punkt markiert. Dieser Punkt befindet sich zur Zeit  $t_1$  am Punkt  $r_1$  und bewegt sich nun mit der Phasengeschwindigkeit weiter, z.B. befindet er sich zu Zeit  $t_2$  am Punkt  $r_2$ .

Die zweite Zeile zeigt einen Wellenzug, bei welchem ein Ausschnitt mit Hilfe zweier blauer Punkte markiert ist. Dieser Ausschnitt bewegt sich mit der Gruppengeschwindigkeit von  $r_1$  nach  $r_2$ . Da in diesem Beispiel die Gruppengeschwindigkeit ungleich der Phasengeschwindigkeit ist, haben die beiden blauen Punkte zur Zeit  $t_1$  und zur Zeit  $t_2$  unterschiedliche Phasen. In der letzten Zeile sind Phasen- und Gruppengeschwindigkeit identisch.

### 1.3 Experiment

Der Aufbau unseres Experimentes besteht im Wesentlichen aus einer Halogenlampe, welche als Lichtquelle dient, sowie einem Beobachtungsschirm mit Winkelskala, auf welchem verschiedene Gläser und Spiegel befestigt werden können. Eine Linse dient dazu, das Licht der Halogenlampe auf das entsprechende Glas bzw. den entsprechenden Spiegel zu fokussieren. Einfallendes und auslaufendes Licht können nun beobachtet und Winkel können gemessen werden. Die gesamte Apparatur wird auf einer optischen Schiene montiert.

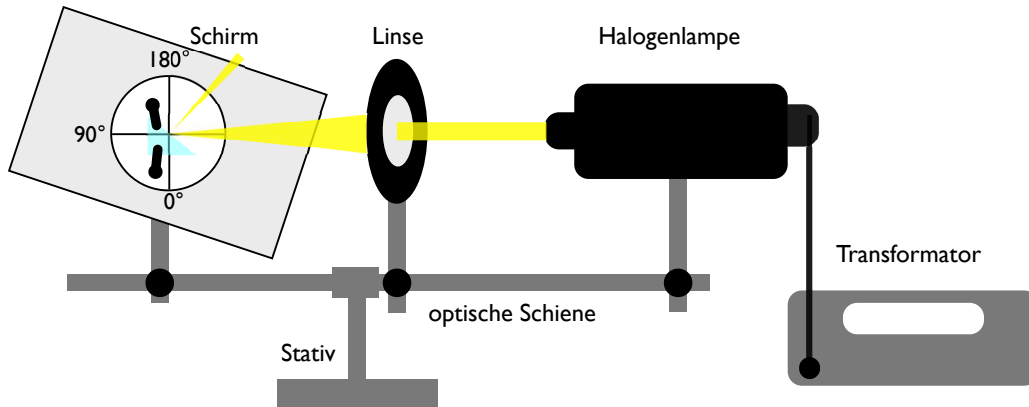


Abbildung 1.3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. Auf einer optischen Schiene werden eine Halogenlampe, eine Linse und ein Beobachtungsschirm mit Gradskala montiert. Fokussiert man das Licht der Lampe mit Hilfe der Linse auf das Beobachtungsobjekt, welches im Zentrum des Schirms befestigt werden kann, so ist es möglich, den resultierenden Strahlengang deutlich zu beobachten. Mit Hilfe der Skala des Schirms ist es nun möglich, die Winkel zu messen.

#### 1.3.1 Versuchszubehör

Gegenstand	Anzahl
Halogenlampe	1
Netzgerät	1
Linse	1
Schirm mit Winkelskala	1
optische Schiene	1
Muffen	3
Stativfuss	1
Gläser, Spiegel und Farbblende	9



### 1.3.2 Versuchsdurchführung

- Befestige die Halogenlampe, den Beobachtungsschirm mit Winkelskala und die Linse auf der optischen Bank.
- Drehe den Beobachtungsschirm in die Waagrechte, so dass die  $0^\circ$  Marke parallel zur optischen Schiene verläuft. Fokussiere mit Hilfe der Linse das Licht der Lampe auf das Zentrum des Beobachtungsschirms, welcher mit einem Kreuz markiert ist. Achte darauf, dass der einfallende Lichtstrahl dabei möglichst auf der  $0^\circ$  Skala verläuft, da sonst grosse, systematische Messfehler auftreten können. Gegebenenfalls kann die Höhe des Schirms oder der Linse variiert werden. Auf dem Schirm befinden sich zwei Klemmen, welche dazu verwendet werden, die Gläser/Spiegel auf dem Schirm zu befestigen. Schätze ab, wie genau Du auf die Null justiert hast, das heisst: Wie exakt kannst Du im Anschluss Winkel abmessen?
- Setze nun den geraden Spiegel in die Apparatur ein. Miss für 20 verschiedene Einfallswinkel den resultierenden Ausfallswinkel des Lichts. Dazu kann der Beobachtungsschirm gedreht werden.
- Setze anschliessend den Hohlspiegel ein. Skizziere den resultierenden Strahlengang. Ist ein Brennpunkt zu erkennen? Hängt die beobachtete Abbildung vom Winkel ab, mit welcher das Licht auftritt? Hängt die Abbildung davon ab, wo das Licht auf den Spiegel trifft, also z.B. eher mittig oder aussen am Rand?
- Setze nun das Umkehrprisma ein (gleichschenkliges Dreieck). Suche alle Konfigurationen, für welche Totalreflexion beobachtet werden kann und skizziere den Strahlengang.
- Setze nun das zweite Prisma ein und skizziere erneut für drei verschiedene Positionen den Strahlengang. Wann kann Dispersion beobachtet werden? Skizziere das resultierende Spektrum. Welche Farbe des Spektrums wird stärker gebrochen, Rot oder Blau?
- Nun ist das halbkreisförmige Glas zu verwenden. Setze es mit der flachen Seite Richtung Lampe zeigend in die Apparatur ein. Miss für 20 verschiedene Einfallswinkel den Winkel, unter welchem das Licht gebrochen wird. Dazu ist es ratsam, ein Lineal zu Hilfe zu nehmen.
- Schliesslich kann das runde Glas eingesetzt werden - was beobachtest Du?

### 1.4 Auswertung

- Berechne für das Experiment mit dem geraden Spiegel den Quotienten aus Einfallswinkel und Ausfallswinkel. Berechne anschliessend aus allen so erhaltenen Werten den Mittelwert und die Standardabweichung. Kannst Du das Reflexionsgesetz bestätigen? wie sind eventuell vorhandene Abweichungen zu erklären? Trage Deine Ergebnisse in einem Graphen auf (Messwerte mit Fehlerbalken, Fehlerbalken gemäss der abgeschätzten Messunsicherheit, berechneten Mittelwert als Gerade hinzufügen).
- Für das Experiment mit dem halbkreisförmigen Glas kann das Snellius'sche Gesetz verwendet werden, um den Brechungsindex des verwendeten Glases zu berechnen. Bestimme diesen Brechungsindex, d.h. berechne  $n$  für alle Deine Messwerte, bestimme Mittelwert und Standardabweichung Deiner Resultate und trage diese in einem Graphen auf.

- Alle im Abschnitt 1.3.2 aufgeführten Strahlengänge und Beobachtungen sind ebenfalls Gegenstand des anzufertigenden Protokolls - bitte achte auf Vollständigkeit.

## **Literatur**

- Demtröder Band 2 - *Elektrizität und Optik*, 6. Auflage: Abschnitt 8.4.2 - 8.4.6 und 9.2 - 9.5
- Demtröder Band 1 - *Mechanik und Wärme*, 6. Auflage: Abschnitt 11.9.7