

# V400 Reflexion, Brechung und Beugung

**Ziel:** Es sollen grundlegende Gesetzmäßigkeiten der Strahlenoptik an verschiedenen Beispielen kennengelernt werden.

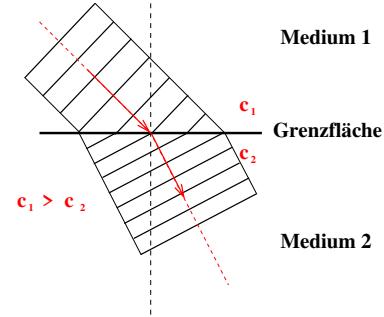
**Stichworte:** Absorption, Beugung, Brechung, Brechungsgesetz, Brechungsindex, Dispersion, Einfallsebene, Gangunterschied, Huygensche Prinzip, Interferenz, optisch dichteres/dünneres Medium, monochromatisch, Phase, Reflexion, Strahlenoptik, Totalreflexion, Transmission, Wellenoptik

## Theoretische Grundlagen

Licht besteht aus elektromagnetischer Strahlung. Das optische Spektrum fängt beim Ultravioletten Licht (100 nm bis 380 nm) an und reicht bis ins Infrarotspektrum (780 nm bis 1 mm). Das menschliche Auge ist dabei nur für den Bereich von 380 nm bis 780 nm empfindlich. Die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen lässt sich mit den Maxwellschen Gleichungen beschreiben, aber für die Reflexion und die Brechung an Grenzflächen können auch die einfache Regeln der Strahlenoptik angewendet werden.

In der Strahlenoptik wird die Wellenausbreitung durch die Normalen der Wellenflächen, die senkrecht auf der Wellenfront steht, verwendet werden. Die Wellennormale wird in der Strahlenoptik Lichtstrahl genannt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Lichtwelle ist in verschiedenen Materialien unterschiedlich groß. Bei einem Übergang von einem Material 1 zu einem Material 2 wird der Lichtstrahl gebrochen, wobei zwischen den beiden Ausbreitungsgeschwindigkeiten  $v_1$  und  $v_2$  die Beziehung

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$



besteht, dabei ist  $n$  der Brechungsindex der jeweiligen Materialien,  $\alpha$  ist der Einfallswinkel und  $\beta$  ist der Brechungswinkel.

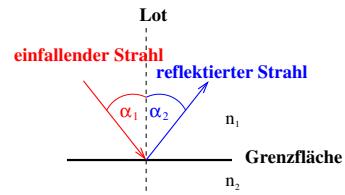
Wie in unserem Versuch, ist das eine Medium in der Regel Luft. Licht hat in Luft einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von  $v_1 = c = 2.9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  und einem Brechungsindex von  $n_1 = 1.000292$ . Ist das eine Medium Luft, dann ist  $n_2$  der absolute Brechungsindex des anderen Materials. Ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle in einem Medium größer als in dem anderen Material, dann wird das Material als optisch dichter bezeichnet. Bei geringerer Ausbreitungsgeschwindigkeit wird von einem optisch dünneren Medium gesprochen.

In der Strahlenoptik oder auch geometrischen Optik breiten sich die Lichtstrahlen in einem homogenen Medium geradlinig aus, wenn sich zwei oder mehrere Lichtstrahlen kreuzen, dann beeinflussen sich die Lichtstrahlen nicht gegenseitig. Der Weg des Lichtstahls ist umkehrbar.

## Reflexion

Fällt ein Lichtstrahl auf eine Grenzfläche und wird reflektiert, dann ist nach dem **Reflexionsgesetz** der Einfallswinkel ( $\alpha_1$ ) gleich dem Reflexionswinkel ( $\alpha_2$ ).

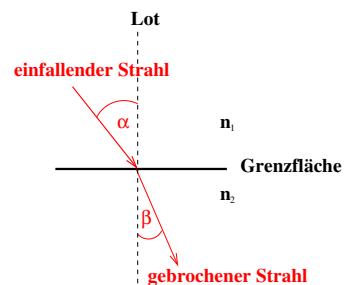
$$\alpha_1 = \alpha_2 \quad (2)$$



## Brechung

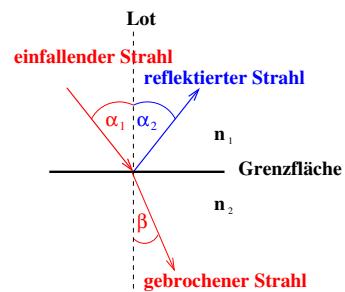
Trifft ein Lichtstrahl auf ein anderes Medium mit einem Brechungsindex  $n$  und breitet sich in diesem Medium aus, dann sind die Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den beiden Medien verschieden und der Lichtstrahl erfährt an der Grenzfläche eine Richtungsänderung. Man sagt 'Der Lichtstrahl wird gebrochen'. Nach dem **Gesetz von Snellius** gilt:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta \quad (3)$$



## Reflexion und Transmission

In der Regel wird ein Lichtstrahl an einer Grenzfläche zu einem anderen Medium nicht vollständig reflektiert bzw. gebrochen. Ein Teil der Intensität  $R$  wird **reflektiert** und der andere Teil der Intensität  $T$  wird **transmittiert** und gebrochen. Abhängig vom Material unterscheidet sich der Anteil von Reflexion zu Transmission. Es gilt aber immer  $R + T = 1$ .



Trifft Licht auf ein Hindernis, so kann häufig beobachtet werden, dass sich das **Licht im Schattentraum ausbreitet**. Um dies Phänomen der **Beugung** zu erklären reicht die Strahlenoptik nicht aus. Für die Erklärung muß die **Wellenoptik** herangezogen werden.

In diesem Versuch werden die Welleneigenschaften von Licht untersucht. Charakteristisch für eine elektromagnetische Welle ist die Frequenz  $\nu$  bzw die Wellenlänge  $\lambda$  und die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$ . Überlagern sich zwei oder mehr Wellen, so addieren sich die **Amplituden** der Wellen in jedem Punkt. Die resultierende Intensitätsverteilung entspricht der Summe der Einzelintensitäten (**Superpositionsprinzip**). Licht besteht aus zahlreichen Wellenzügen, die in der Regel nicht länger als  $10^{-8}s$  dauern. Haben diese Wellenzüge dieselbe Frequenz und eine **feste Phasenbeziehung**, so erzeugen sie ein **Interferenzbild**. Je nach Phasenbeziehung kommt es bei der Überlagerung von Wellen gleicher Frequenz zu einer **Verstärkung** (konstruktive Interferenz) oder einer Abschwächung (destruktive Interferenz). Bei einem **Gangunterschied** von  $\lambda/2$  und gleicher Intensität löschen sich zwei Wellen sogar vollständig aus.

Im vorliegenden Versuch sollen die Interferenzerscheinungen untersucht werden, die durch **Beugung** am Gitter entstehen. Jedes Hindernis im Weg einer Wellenausbreitung, dessen Abmessung **klein im Vergleich zur Wellenlänge** ist, kann zur Beugung führen. Die Ausbreitung einer Welle kann dabei mit dem **Huygenschen Prinzip** konstruiert werden, welches besagt, 'Jeder Punkt einer Welle ist der Ausgangspunkt einer Elementarwelle gleicher Frequenz. Die **Einhüllende** aller Sekundärwellen stellt zu einem späteren Zeitpunkt die **neue Lage der Wellenfront** dar'. Ein einfaches Hindernis ist ein Spalt. Trifft eine ebene Wellenfront auf einen Spalt der Spaltbreite  $a$ , dann werden alle Punkte in der Spaltöffnung gebeugt. Die gebeugten Wellen haben

dabei dieselbe Frequenz und eine feste Phasenbeziehung. Auf einem Schirm, der sich in einem Abstand  $L$  vom Spalt befindet, ergibt sich ein Muster aus dunklen und hellen Interferenzstreifen. Die genaue Intensitätsverteilung soll an dieser Stelle nicht weiter betrachtet werden. Die hellen Streifen erscheinen dabei an den Stellen, für die gilt:

$$a \sin \alpha = k \lambda \quad (4)$$

wobei  $\lambda$  die Wellenlänge des Lichtes ist, die den Einfachspalt der Breite  $a$  beleuchtet. Auf dem Schirm erscheint dass  $k$ -te Intensitätsminimum in einem Winkel  $\alpha$  relativ zur geradlinien Ausbreitungsrichtung.

Ein Strichgitter besteht aus  $N$ -Einfachspalten gleicher Breite. Bei senkrechten Einfall einer Wellenfront auf ein Strichgitter mit der Gitterkonstante  $d$ , lassen sich die Bedingungen für die Intensitätsminima und -maxima analog zum Einfachspalt herleiten. Für die Intensitätsmaxima  $k$ -ter Ordnung gilt

$$d \sin \alpha = k \lambda \quad (5)$$

wobei  $d$  die Gitterkonstante ist.

## Vorbereitung

Informieren Sie sich in der Literatur über den Brechungsindex von folgenden Materialien:

Material	Brechungsindex n
Luft	1,00292
Wasser	1,3330
Kronglas	1,510
Plexiglas	1,49
Diamant	2,417

Literatur: studyflix.de, spektrum.de, plasticexpress.de

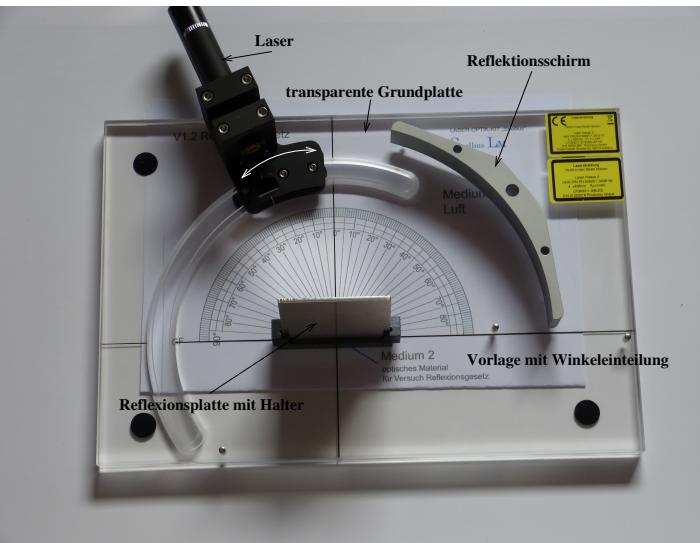
Berechnen Sie die Gitterkonstante  $d$  für ein Gitter mit

- 600 Linien/mm  $\Rightarrow d = 0,00167 \text{ mm}$
- 300 Linien/mm  $\Rightarrow d = 0,0083 \text{ mm}$
- 100 Linien/mm  $\Rightarrow d = 0,01 \text{ mm}$

## Versuchsaufbau

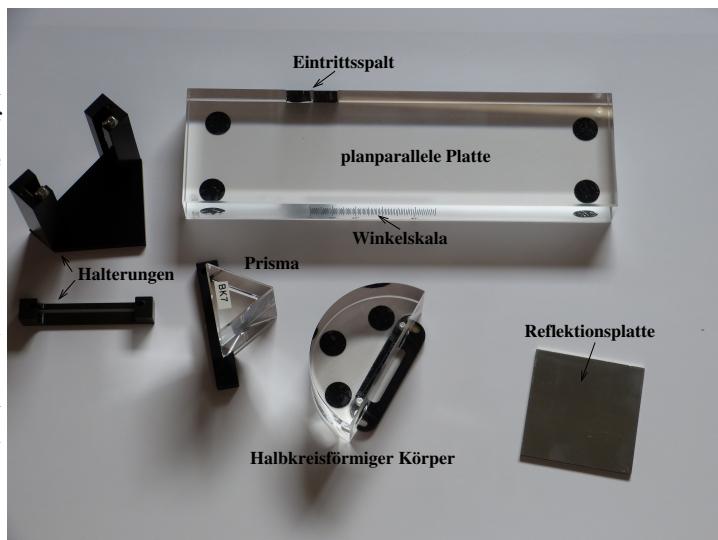
Kernstück des Versuchsaufbaus ist eine transparente Grundplatte auf der sich zwei Laserdiodenmodule befinden, die sich im Halbkreis bewegen lassen. Die obere Laserdiode emittiert rotes Licht mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 635\text{nm}$ , die untere Laserdiode emittiert grünes Licht der Wellenlänge  $\lambda = 532\text{nm}$ . In der Mitte des Halbkreises lassen sich je nach Versuchsaufgabe verschiedene geometrische Elemente positionieren. Bei allen Experimenten ist das optisch dünne Medium Luft mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$  und dem Brechungsindex  $n \approx 1$ .

Zum Schutz vor dem Laserlicht befindet sich ein Reflexionsschirm am Ende des Halbkreises. Beim Einsatz von beiden Lasermodulen kann der Reflexionsschirm durch einen zweiten Reflexionsschirm erhöht werden. Für die Untersuchung zur Brechung und Transmission kann ein Transmissionsschirm aufgestellt werden. Die zu bestimmenden Winkel können mit Hilfe des Transmissionsschirms und verschiedenen Versuchsvorlage gemessen werden. Die Versuchsvorlagen werden dabei unter die transparente Grundplatte gelegt, um so die Winkel einfacher ablesen zu können.



In der linken Abbildung sind verschiedene optische Elemente und Halterungen abgebildet. Zur besseren Platzierung der Optiken sind auf der Grundplatte Aluminiumstifte angebracht, auf die die Halterungen passgenau platziert werden können.

Achtung: Bitte die optischen Elemente IMMER an der Halterung oder am Rand anfassen. Durch den Fettfilm der Finger können die Oberflächen der optischen Elemente irreparabel beschädigt werden.



# Aufgaben und Versuchsdurchführung

## Aufgabe 1: Reflexionsgesetz

Trifft ein Lichtstrahl auf einen Spiegel, dann wird der Lichtstrahl an der Grenzfläche reflektiert und es gilt:

$$\alpha_1 = \alpha_2 \quad (6)$$

Verwenden Sie für diesen Versuch den grünen Laser, die Vorlage A und den Halter mit dem Spiegel. Setzen Sie den Spiegel in die Mitte der Grundplatte.

- Bestimmen Sie für 7 Einfallswinkel  $\alpha_1$  den Reflexionswinkel  $\alpha_2$ .
- Wie genau können die Winkel gemessen werden?

## Aufgabe 2: Brechungsgesetz

Geht ein Lichtstrahl von einem optisch dünneren Medium in ein optisch dichteres Medium über, so wird der Lichtstrahl zum Lot hin gebrochen. Ist das optisch dünneren Medium Luft und  $n_1 = 1$ , dann gilt für das Brechungsgesetz

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n \quad (7)$$

mit  $n_2 = n$ .

Verwenden Sie für diesen Versuch den grünen Laser die Vorlage A und die planparallele Platte. Positionieren Sie die Platte so, dass der Eintrittsspalt zur Winkelskala zeigt und sie den Winkel des gebrochenen Lichtstrahls an der gegenüberliegenden, auf der planparallelen Platte aufgeklebten Skala ablesen können.

- Bestimmen Sie für  $m = 7$  verschiedene Einfallswinkel  $\alpha$  den Brechungswinkel  $\beta$ .
- Berechnen Sie aus den Daten den Brechungsindex  $n$  für Plexiglas. Vergleichen Sie das Ergebnis mit der Literaturangabe aus der Vorbereitungsaufgabe.
- Wie groß ist die Lichtgeschwindigkeit  $v$  im Plexiglas?

## Aufgabe 3: Planparallele Platten

Wird ein Lichtstrahl an einer Platte mit parallelen Grenzflächen und einem optisch dichteren Medium gebrochen, dann wird der Lichtstrahl an jeder Grenzfläche zum Teil reflektiert und zum Teil gebrochen. Der Teil des Lichtstrahls, der durch die planparallele Platte hindurch geht und an beiden Grenzflächen gebrochen wird, ändert nicht seine Richtung. Er erfährt einen Strahlversatz  $s$ . Der Strahlversatz wird dabei durch den Einfallswinkel  $\alpha$  und der Geometrie sowie dem Material der Platte bestimmt. Der Strahlversatz lässt sich durch

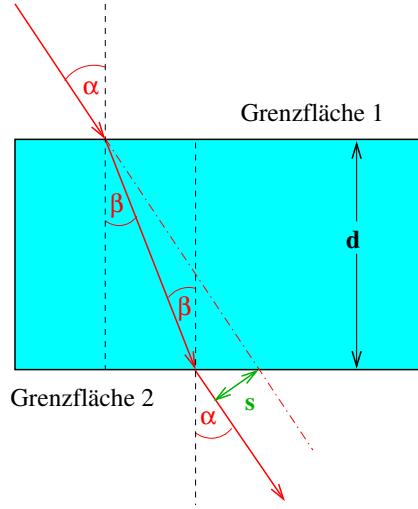
$$s = d \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta} \quad (8)$$

berechnen.

Verwenden Sie für diesen Versuch die Vorlage A und die planparallele Platte. Bauen Sie den Versuch analog zu Aufgabe 2 auf und verwenden Sie wieder den grünen Laser. Stellen Sie den Transmissionsschirm mit der Winkelskala auf, um den Strahlversatz besser messen zu können.

- Überprüfen Sie mit Hilfe der unten abgebildeten Strahlverläufe die Formel für den Strahlversatz  $s$ .
- Bestimmen Sie für 5 verschiedene Einfallswinkel den Strahlversatz. Messen Sie hierzu den Einfallwinkel  $\alpha$  und den Brechungswinkel  $\beta$ .
- Bestimmen Sie den Strahlversatz, indem Sie den Winkel  $\beta$  mit dem Brechungsgesetz berechnen. Verwenden Sie den in Aufgabe 2 ermittelten Brechungsindex.
- Vergleichen Sie die beiden Methoden.

$$d = 5.85 \text{ cm}$$



#### Aufgabe 4: Prisma

Ein optisches Prisma wird durch nicht parallele Flächen begrenzt. Die Flächen, durch die der Lichtstrahl ein- bzw austritt, sind die brechenden Kanten, die den brechenden Winkel  $\gamma$  des Prismas begrenzen.

Das Brechungsverhältnis eines Mediums hängt von der Ausbreitungsgeschwindigkeit und somit auch von der Wellenlänge des Lichtes ab. Fällt weißes Licht auf ein Prisma, dann ist der Einfallwinkel  $\alpha$  für alle Wellenlängen gleich. Der Brechungswinkel  $\beta$  ist aber abhängig von der Wellenlänge des Lichtes. Diese Abhängigkeit wird Dispersion genannt. Die Ablenkung  $\delta$ , die der Strahl beim Durchgang durch das Prisma erfährt, wird durch

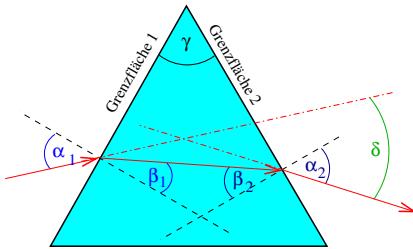
$$\delta = (\alpha_1 + \alpha_2) - (\beta_1 + \beta_2) \quad (9)$$

berechnet. Die Winkel  $\beta_1$  und  $\beta_2$  können über das Brechungsgesetz  $\sin \alpha = n \sin \beta$  und die Winkelbeziehung  $\beta_1 + \beta_2 = \gamma$  berechnet werden.

Verwenden Sie für diesen Versuch den grünen und den roten Laser sowie die Vorlage C und das Prisma. Das Prisma besteht aus Kronglas und hat einen brechenden Winkel von  $\gamma = 60^\circ$ . Der Reflexionsschirm muß bei diesem Versuch erhöht werden.

- Bestimmen Sie mit dem grünen Laser für 5 verschiedene Einfallswinkel  $\alpha_1$  die Austrittswinkel  $\alpha_2$ . Der Einfallwinkel soll im Winkelbereich von  $10^\circ \leq \alpha_1 \leq 60^\circ$  liegen.

- Berechnen Sie die Ablenkung  $\delta$ . Verwenden Sie hierzu den Brechungsindex für Kronglas, den Sie in der Vorbereitungsaufgabe ermittelt haben.
- Wiederholen Sie die Messung für den roten Laser. Verwenden Sie hierbei dieselben Einfallswinkel, wie bei der Messung mit dem grünen Laser.



### Aufgabe 5: Beugung am Gitter

Bauen Sie den Versuch auf und justieren Sie den optischen Aufbau ohne Beugungsgitter. Achten Sie darauf, dass das Laserlicht die Winkelskala des Transmissionsschirmes bei  $0^0$  Grad trifft und dass der Transmissionsschirm im Kreis um die Winkelskala der Vorlage angeordnet ist. Dadurch können die Ablenkwinkel  $\varphi$  direkt abgelesen werden. Mit der Gitterkonstante  $d$  kann für jede Beugungsordnung  $k$  die Wellenlänge  $\lambda$  des verwendeten Lasers berechnet werden. Die Beziehung für die Beugungsmaxima lautet:

$$\lambda = d \frac{\sin \varphi}{k} \quad (10)$$

Setzen Sie ein Beugungsgitter in die Halterung. Beginnen Sie mit dem Gitter, das 600 Liniene/mm hat. Messen Sie die Beugungsmaxima für den roten und den grünen Laser aus und bestimmen Sie die Wellenlängen der beiden Lasermodule. Vergleichen Sie anschließend die gemessene und die tatsächliche Wellenlänge der Lasermodule.