

V400

Reflexion, Brechung und Beugung

Katharina Popp
katharina.popp@tu-dortmund.de

Nicolai Weitkemper
nicolai.weitkemper@tu-dortmund.de

Durchführung: 29.06.2021

Abgabe: 06.07.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
2.1	Strahlenoptik	3
2.2	Wellenoptik	7
3	Durchführung	9
3.1	Untersuchung der Reflexion	10
3.2	Untersuchung der Brechung	10
3.3	Untersuchung der Beugung am Gitter	11
4	Auswertung	12
4.1	Reflexionsgesetz	12
4.2	Brechungsgesetz	13
4.3	Strahlversatz	14
4.4	Prisma	15
4.5	Beugung am Gitter	16
5	Diskussion	18
	Literatur	19

1 Zielsetzung

In diesem Versuch werden die Welleneigenschaften von Licht betrachtet. Zu diesem Zweck werden Reflexion, Brechung und Beugung eines Lichtstrahls und somit die Regeln der Strahlen- und Wellenoptik untersucht.

2 Theorie

Im Folgenden werden die theoretischen Grundlagen der Strahlen- und Wellenoptik erläutert.

Licht ist ein Teil des elektromagnetischen Wellenspektrums. Das für Menschen sichtbare Lichtspektrum umfasst die Wellenlängen von 380 nm bis 780 nm, wobei das optische Spektrum bei 100 nm beginnt und bis hin zu 1 mm reicht.

2.1 Strahlenoptik

In der Strahlenoptik wird die Ausbreitung der Lichtwellen über Wellenfronten und deren Normalen beschrieben. Die Lichtstrahlen breiten sich geradlinig aus und beeinflussen sich gegenseitig nicht. Beim Auftreffen einer Wellenfront auf eine Grenzfläche können nachfolgend beschriebenen Phänomene auftreten. Die Grenzfläche stellt eine Trennung zweier verschiedener Medien dar, deren Brechungsindizes mit n_1 und n_2 beschrieben werden. Abbildung 1 stellt dieses Szenario qualitativ dar. Die Faktoren c_1 und c_2 beschreiben in dieser Abbildung die Brechungsindizes.

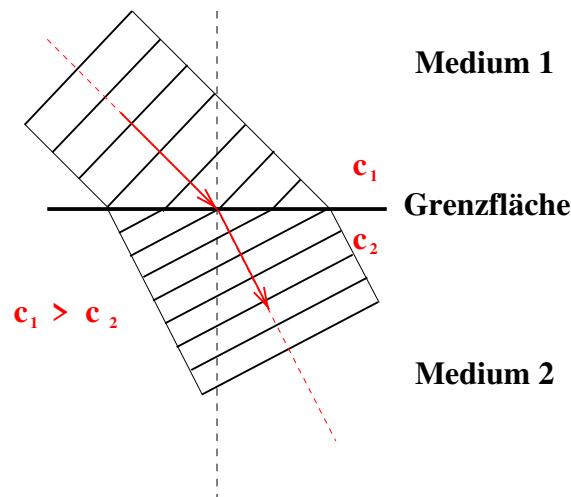


Abbildung 1: Brechung einer Wellenfront an einer Grenzfläche zu einem anderen Medium. [1]

Reflexion Bei der Reflexion trifft ein Lichtstrahl in einem Winkel α_1 (gemessen zum Lot) auf die Grenzfläche und wird um den gleichen Winkel α_2 reflektiert. Somit gilt:

$$\alpha_1 = \alpha_2 . \quad (1)$$

Dies ist in Abbildung 2 dargestellt.

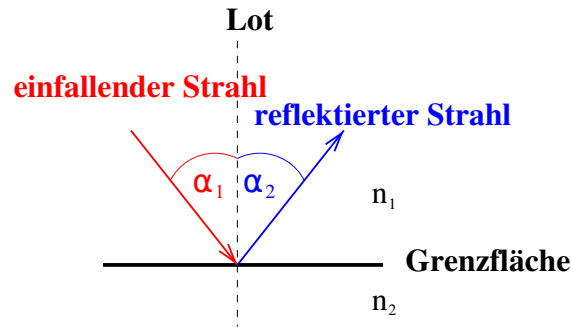


Abbildung 2: Reflexion eines Lichtstrahls an einer Grenzfläche. [1]

Brechung Trifft ein Lichtstrahl auf eine Grenzfläche zwischen zwei Medien, so wird der Strahl *gebrochen*.

Beim Übergang von Luft mit dem Brechungsindex $n = 1,000\,292 \approx 1$ in ein anderes Medium wird der Brechungsindex n_2 des Mediums als *absoluter Brechungsindex* bezeichnet. Weiterhin wird unter Beobachtung der Ausbreitungsgeschwindigkeit v der Wellen zwischen dem *optisch dichteren* und dem *optisch dünneren* Medium unterschieden. Wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vergleich zu einem anderen Medium größer ist, wird dieses Medium als das optisch dichtere Medium bezeichnet. Wenn umgekehrt die Ausbreitungsgeschwindigkeit zu einem anderen Medium geringer ist, heißt dieses Medium optisch dünner.

Ist das zweite Medium optisch dichter als das erste, wird der Strahl zum Lot hingebrochen, ist das erste Medium optisch dichter, wird der Strahl vom Lot weg gebrochen.

Beim Übergang zwischen den Medien verändert sich die Ausbreitungsrichtung des Lichtstrahls, was in der Abbildung 3 dargestellt ist.

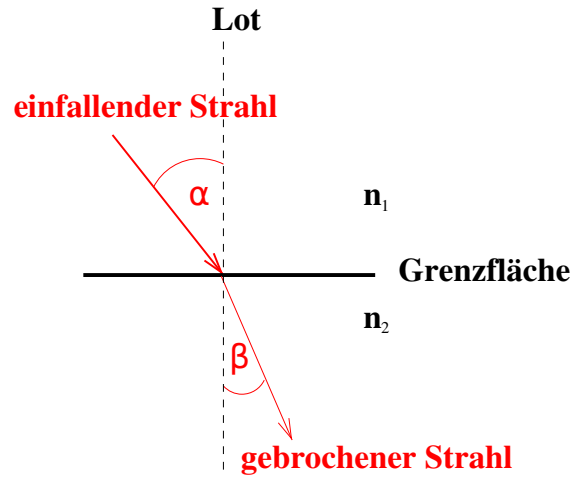


Abbildung 3: Brechung eines Lichtstrahls an einer Grenzfläche. [1]

Nach dem Snellius'schen Brechungsgesetz gilt beim Übergang zwischen den Medien

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

was sich umformen lässt zu

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta .$$

Die Faktoren v_1 und v_2 beschreiben die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Strahls im jeweiligen Medium. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Luft beträgt $v = c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

Für den Fall, dass der Strahl beim Übergang von einem Medium in ein zweites Medium gebrochen wird, sich in diesem weiterbewegt und beim Austritt zurück in das erste Medium wieder gebrochen wird, ergibt sich ein Strahlversatz s , welcher mit der Gleichung

$$s = d \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta} \quad (3)$$

berechnet werden kann. Die beschriebene Situation ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

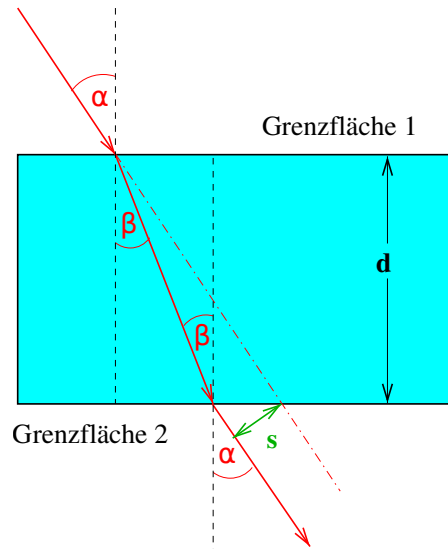


Abbildung 4: Strahlversatz eines Lichtstrahls beim Durchqueren eines Mediums mit anderem Brechungsindex. [1]

Reflexion und Transmission Tatsächlich wird ein Lichtstrahl beim Auftreffen auf eine Grenzfläche zum Teil reflektiert und gebrochen. Die Intensität des reflektierten Strahls wird mit R bezeichnet, während die Intensität des transmittierten, gebrochenen Strahls mit T bezeichnet wird. Die Größe von R und T ist materialabhängig, allerdings ist die Gesamtintensität stets erhalten:

$$R + T = 1 .$$

In Abbildung 5 ist der Fall der Reflexion und Brechung, beziehungsweise Transmission dargestellt.

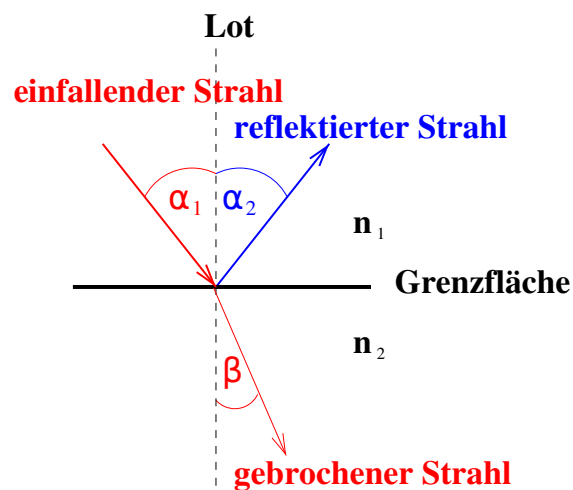


Abbildung 5: Reflexion und Brechung eines Lichtstrahls an einer Grenzfläche. [1]

2.2 Wellenoptik

Zusätzlich zu den oben genannten Phänomenen kann ein Lichtstrahl an einem Hindernis *gebeugt* werden, sodass sich das Licht auch im eigentlichen Schattenraum ausbreitet. Dies kann allerdings nur mit der Wellenoptik erklärt werden.

Die Wellenoptik untersucht die Welleneigenschaften von Licht, wie die Amplitude, die Frequenz und die Wellenlänge.

Für elektromagnetische Wellen gilt das Superpositionsprinzip, sodass sich die Amplituden zweier sich überlagernder Wellen addieren, und sich eine Gesamtintensitätsverteilung ergibt.

Unter der Bedingung der Kohärenz, also bei gleicher Frequenz und Polarisation sowie fester Phasenbeziehung, kann Licht Interferenzeffekte zeigen; es kommt, je nach Phasenverschiebung, zu konstruktiver oder destruktiver Interferenz.

Für den Begriff der Beugung ist das Huygens'sche Prinzip relevant. Es sagt aus, dass jeder Punkt einer Wellenfront Ausgangspunkt einer neuen Elementarwelle mit gleicher Frequenz ist, wobei die Einhüllende der Elementarwellen eine neue Wellenfront ergibt.

Nun wird ein Spalt der Breite a betrachtet. Die Wellenfront, die auf den Spalt trifft, wird in jedem Punkt zu Wellen gleicher Frequenz und Phasenbeziehung gebeugt. Es ergibt sich ein Interferenzmuster. Die Betrachtung eines Spaltes kann auf ein Gitter mit N Spalten erweitert werden. Für die Intensitätsmaxima k -ter Ordnung gilt:

$$d \cdot \sin \alpha = k \lambda . \quad (4)$$

Die Größe d stellt die Gitterkonstante dar; sie beschreibt, wie viele Spalte pro Millimeter das Gitter besitzt.

Schließlich wird die Brechung an einem Prisma wie in Abbildung 6 betrachtet.

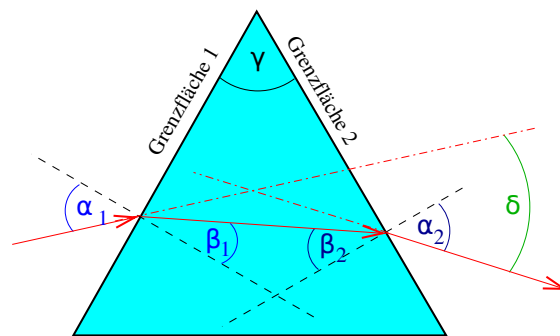


Abbildung 6: Brechung eines Lichtstrahls an einem optische Prisma. [1]

Bei der Brechung am Prisma sind die Wellenlänge sowie die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts für die Brechungsverhältnisse relevant.

Der Lichtstrahl wird beim Durchgang durch das Prisma abglenkt. Diese Ablenkung kann durch

$$\delta = (\alpha_1 + \alpha_2) - (\beta_1 + \beta_2) \quad (5)$$

bestimmt werden. Der Brechungswinkel β ist abhängig von der Wellenlänge, während der Einfallswinkel α beim Einfall von weißem Licht für alle Farben gleich ist. Die Abhängigkeit des Brechungswinkels von der Wellenlänge wird Dispersion genannt.

3 Durchführung

Für die Messung werden zwei Laser verwendet, welche monochromatisches Licht der Wellenlängen $\lambda = 635 \text{ nm}$ (rotes Licht) und $\lambda = 532 \text{ nm}$ (grünes Licht) erzeugen.

Abbildung 7 zeigt den grundlegenden Versuchsaufbau. Die zwei Laser sind übereinander auf einer transparenten Grundplatte befestigt und lassen sich auf etwa einem Halbkreis um einen zentralen Punkt verschieben, auf dem verschiedene Objekte platziert werden können. Auf der transparenten Platte ist außerdem ein Reflexionsschirm angebracht, der auf zwei verschiedene Höhen eingestellt werden kann.

Zur Messung wird die Platte auf eine Vorlage gestellt, welche eine Skala zeigt, auf welcher die zu bestimmenden Winkel abgelesen werden können.

Als optische Elemente dienen ein Spiegel (Reflexionsplatte), eine planparallele Platte, sowie ein Prisma und Gitter verschiedener Gitterkonstanten. Einige dieser optischen Elemente sind in Abbildung 8 zu sehen.

Das optisch dünnere Medium ist bei allen Versuchen Luft.

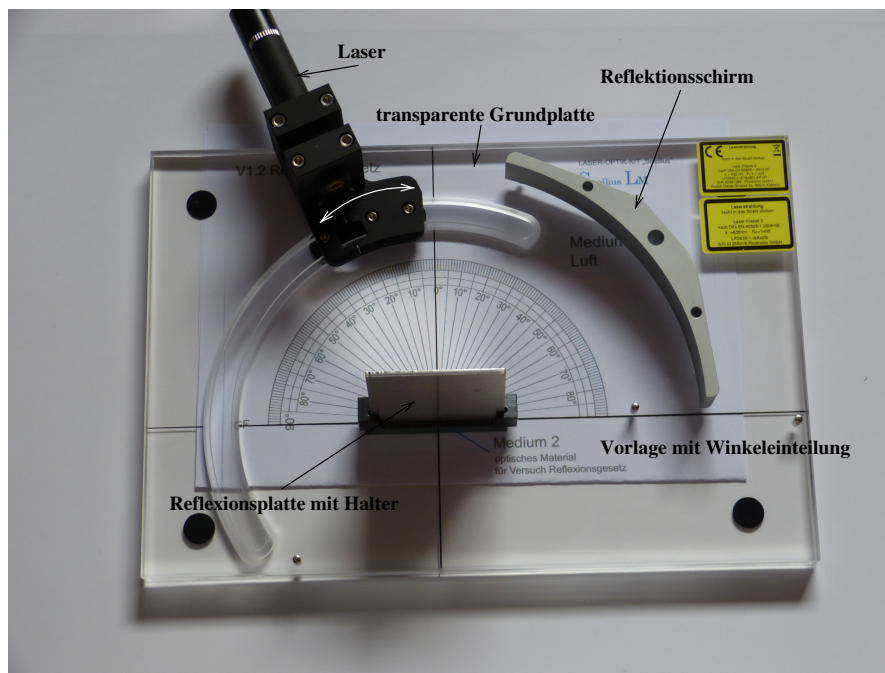


Abbildung 7: Aufbau zur Untersuchung von Reflexion, Brechung und Beugung eines Lichtstrahls. [1]

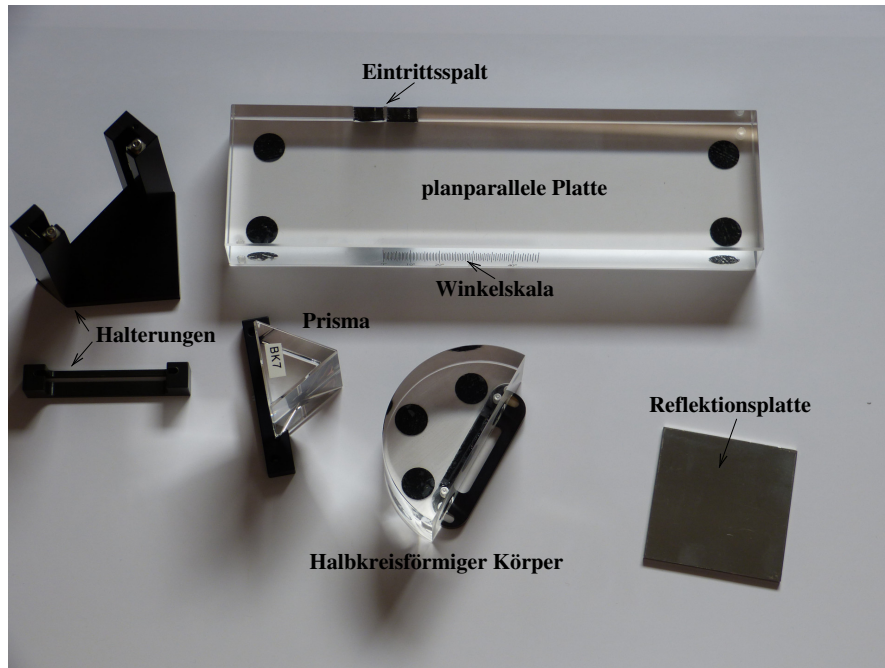


Abbildung 8: Optische Elemente zur Messung von Reflexion, Brechung und Beugung.
[1]

3.1 Untersuchung der Reflexion

Für diese Messung wird der Spiegel mithilfe einer Halterung in der Mitte der transparenten Platte positioniert. Es werden die Vorlage **A** und der grüne Laser verwendet. Nun wird der Laser verschoben, sodass der Lichtstrahl in einem Einfallswinkel α_1 auf den Spiegel trifft.

Es werden für sieben verschiedene Winkel α_1 die Ausfallswinkel α_2 gemessen.

3.2 Untersuchung der Brechung

Diese Messung setzt sich aus zwei Teilen zusammen: Es wird die Brechung an einer planparallelen Platte sowie an einem Prisma untersucht.

planparallele Platte Für die Messung mit der planparallelen Platte werden der grüne Laser und die Vorlage **A** verwendet. Beim Aufstellen der in Abbildung 8 gezeigten Platte muss darauf geachtet werden, dass der darauf angebrachte Eintrittsspalt zum Laser hin zeigt. Der Brechungswinkel kann mithilfe der Skala auf der anderen Seite abgelesen werden.

Es werden für sieben verschiedene Einfallswinkel α die Brechungswinkel β gemessen.

Prisma Für die Messung der Brechung am Prisma werden beide Laser verwendet, sowie die Vorlage, auf der ein Prisma-Umriss abgebildet ist. Das gleichseitige dreieckige Prisma wird in die Mitte der transparenten Platte gesetzt, wobei der Lichtstrahl auf eine der ebenen Flächen trifft. Gegenüber dem Laser wird eine Winkelskala aufgestellt, auf der auch die Lichtpunkte sichtbar gemacht werden.

Es werden die Austrittswinkel α_2 für sechs Einfallswinkel α_1 gemessen, wobei α_1 in einem Bereich von $10^\circ \leq \alpha_1 \leq 60^\circ$ liegen soll.

3.3 Untersuchung der Beugung am Gitter

Für diese Messung wird ein Gitter vor der Kante der transparenten Platte platziert, damit beide Laserstrahlen auf das Gitter treffen. Den Lasern wird eine Winkelskala von $-35^\circ \leq \varphi \leq 35^\circ$ gegenübergestellt, auf der die Intensitätsmaxima, welche als Lichtpunkte erkennbar sind, abgelesen werden können.

Die Messung wird mit beiden Lasern zugleich für die Gitter mit 600 Linien/mm, 300 Linien/mm und 100 Linien/mm durchgeführt, wobei sich abhängig von der Anzahl der Gitterlinien verschieden viele Intensitätsmaxima messen lassen.

4 Auswertung

In den folgenden Unterabschnitten werden die verschiedenen Messungen dargestellt und ausgewertet.

4.1 Reflexionsgesetz

Zur Verifizierung des Reflexionsgesetzes werden für verschiedene Einfallswinkel α_1 die Ausfallswinkel α_2 gemessen, wie Tabelle 1 zeigt.

Tabelle 1: Messwerte zum Reflexionsgesetz.

$\alpha_1 / ^\circ$	$\alpha_2 / ^\circ$
50	51,00
40	41,50
30	31,50
20	21,25
10	12,00
25	26,25
35	36,00

Nach dem Reflexionsgesetz (1) ist anzunehmen, dass der Einfallswinkel dem Ausfallswinkel genau entspricht. Daher wird die mittlere Abweichung $|\alpha_1 - \alpha_2|$ bestimmt. Sie beträgt $1,357^\circ$.

Im Rahmen der Messgenauigkeit, für die hier jedoch ein empirischer Wert fehlt, stimmen Einfallswinkel und Ausfallswinkel also überein. Damit ist das Reflexionsgesetz verifiziert.

Eine alternative Betrachtungsweise ist das Ausführen einer Regressionsrechnung. Die bestimmten Parameter der Regressionsgerade $\alpha_2 = a\alpha_1 + b$ lauten $a = 0,982 \pm 0,009$ und $b = (1,89 \pm 0,28)^\circ$. Abbildung 9 zeigt die Messwerte und die daraus bestimmte Regressionsgerade sowie die ideale Gerade $\alpha_1 = \alpha_2$ beziehungsweise $a = 1, b = 0$.

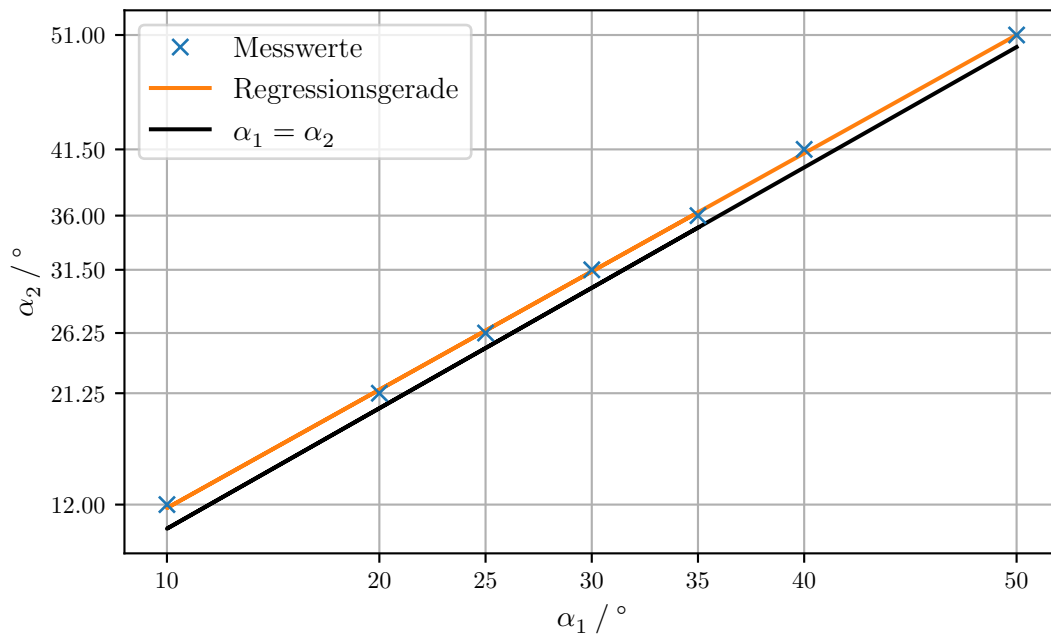


Abbildung 9: Einfallswinkel in Abhängigkeit des Ausfallswinkels.

4.2 Brechungsgesetz

Tabelle 2 zeigt die an der planparallelen Platte aufgenommenen Messwerte zum Brechungsgesetz. Dabei ist α der Einfallswinkel und β der Brechungswinkel.

Tabelle 2: Messwerte zum Brechungsgesetz.

$\alpha / ^\circ$	$\beta / ^\circ$
10	7,50
20	13,75
25	17,00
30	20,00
40	26,00
50	31,25
60	35,50
73	40,00

Nach Einsetzen von $n_1 \approx 1$ für Luft als erstes Medium in das Snellius'schen Brechungsgesetz (2) kann der Brechungsindex des zweiten Mediums direkt als

$$n_2 = n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

bestimmt werden. Im Mittel ergibt sich $n = 1,45 \pm 0,02$.

Die Lichtgeschwindigkeit v in Plexiglas kann ebenfalls aus dem Brechungsgesetz (2) gewonnen werden:

$$\begin{aligned} \frac{v_1}{v_2} &= \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} & (v_1 =: c; v_2 =: v) \\ \Rightarrow v &= c \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{c}{n} . \end{aligned}$$

Im Mittel ergibt sich $v = (2,068 \pm 0,026) \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

4.3 Strahlversatz

Für den Strahlversatz bei einer planparallelen Platte wurden keine Messwerte aufgenommen. Allerdings kann dieser für gegebene Einfallswinkel α aus (3) berechnet werden. Als Brechungsindex wird der in Unterabschnitt 4.2 bestimmte Wert $n = 1,45$ angenommen; die Länge der Platte entlang des Lots ist mit $d = 5,85 \text{ cm}$ gegeben.

In Tabelle 3 sind beispielhaft Werte für den Winkelbereich $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ angegeben; Abbildung 10 stellt den Zusammenhang grafisch dar.

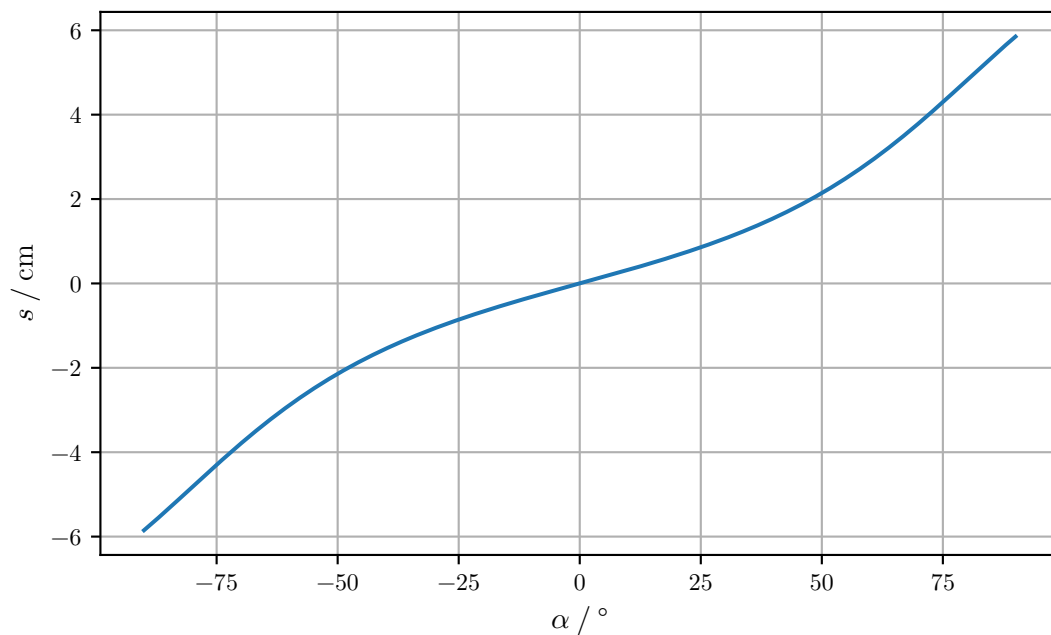


Abbildung 10: Strahlversatz in Abhängigkeit des Winkels.

Tabelle 3: Berechneter Strahlversatz in Abhängigkeit des Einfallswinkels.

$\alpha / ^\circ$	s / cm
0	0,00
10	0,32
20	0,67
30	1,06
40	1,54
50	2,14
60	2,89
70	3,79
80	4,82
90	5,85

4.4 Prisma

Für diese Messreihe wurden in Abhängigkeit vom Einfallswinkel α_1 die Ausfallswinkel $\alpha_{2,\text{grün}}$ für den grünen Laser beziehungsweise $\alpha_{2,\text{rot}}$ für den roten Laser bestimmt.

Es soll nun die Ablenkung δ bestimmt werden, wie sie in Abbildung 6 dargestellt war. Die Formel (5) für die Ablenkung δ benötigt neben den gemessenen Werten für Einfallswinkel α_1 und Austrittswinkel α_2 auch die Brechungswinkel β_1 und β_2 . Wegen der Winkelbeziehung $\beta_1 + \beta_2 = \gamma$ kann jedoch auch der brechende Winkel $\gamma = 60^\circ$ [1] des benutzten Prismas eingesetzt werden. Der Brechungsindex für Kronglas beträgt $n = 1,510$ [2].

Die so gewonnenen Ablenkungen δ sind zusammen mit den Messwerten in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Am Prisma gemessene Einfallswinkel, Austrittswinkel und die daraus berechnete Ablenkung.

$\alpha_1 / ^\circ$	$\alpha_{2,\text{grün}} / ^\circ$	$\delta_{\text{grün}} / ^\circ$	$\alpha_{2,\text{rot}} / ^\circ$	$\delta_{\text{rot}} / ^\circ$	$(\delta_{\text{grün}} - \delta_{\text{rot}}) / ^\circ$
20	23,00	-17,00	23,50	-16,50	-0,50
30	71,00	41,00	70,00	40,00	1,00
40	55,50	35,50	55,00	35,00	0,50
50	44,50	34,50	44,25	34,25	0,25
60	36,00	36,00	35,75	35,75	0,25

4.5 Beugung am Gitter

Wie in Unterabschnitt 3.3 beschrieben, wurden für Gitter unterschiedlicher Gitterkonstanten d und zugleich mit zwei Lasern der Wellenlängen $\lambda = 635 \text{ nm}$ (rot) und $\lambda = 532 \text{ nm}$ (grün) die zu den Intensitätsmaxima gehörigen Ablenkwinkel gemessen. Zusammen mit der Beugungsordnung k sind die gewonnenen Messwerte in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Messwerte zur Beugung am Gitter.

k	$d = 100/\text{mm}$		$d = 200/\text{mm}$		$d = 600/\text{mm}$	
	grün	rot	grün	rot	grün	rot
-10	-32,25	–	–	–	–	–
-9	-28,75	–	–	–	–	–
-8	-25,25	-31,75	–	–	–	–
-7	-22,00	-26,50	–	–	–	–
-6	-18,75	-22,75	–	–	–	–
-5	-15,50	-18,75	–	–	–	–
-4	-12,50	-15,00	–	–	–	–
-3	-9,25	-11,25	-29,25	–	–	–
-2	-6,25	-7,50	-19,00	-23,00	–	–
-1	-3,25	-3,75	-9,50	-11,25	-18,75	-22,75
0	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	0,00	0,00
1	3,00	3,50	9,25	11,00	19,25	23,25
2	6,00	7,25	19,00	22,75	–	–
3	9,25	11,00	29,00	35,50	–	–
4	12,25	15,00	–	–	–	–
5	15,50	19,00	–	–	–	–
6	19,00	–	–	–	–	–
7	22,25	–	–	–	–	–

Die Abbildung 11 visualisiert die gemessenen Ablenkwinkel. Es sei angemerkt, dass die Intensitätsmaxima tatsächlich punktförmig sind; es wurden nur zur besseren Erkennbarkeit Linien verwendet. Sich überschneidende rote und grüne Linien werden dunkelgrün dargestellt.

Nach Umstellen von (4) kann für jedes Intensitätsmaximum der Ordnung $k \neq 0$ die zugehörige Wellenlänge berechnet werden:

$$k\lambda = d \cdot \sin \alpha$$

$$\Leftrightarrow \lambda = \frac{d \cdot \sin \alpha}{k} .$$

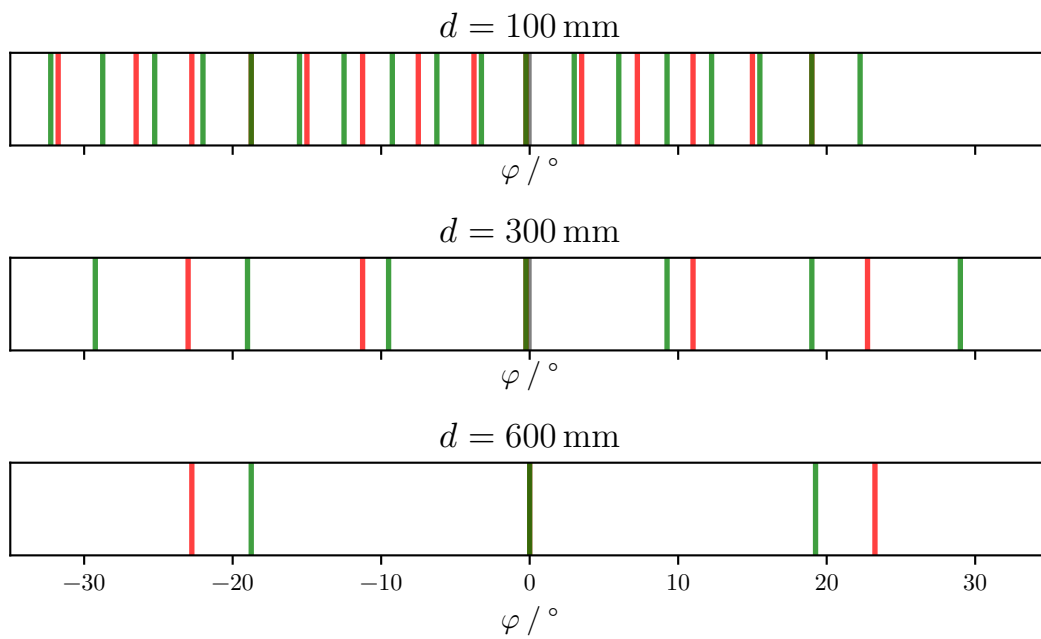


Abbildung 11: Intensitätsmaxima in Abhängigkeit des Ablenk winkels für verschiedene d und λ .

Wird die Wellenlänge für jedes Intensitätsmaximum bestimmt und anschließend ein Mittelwert gebildet, ergibt sich $\lambda = (538,52 \pm 1,77)$ nm für den grünen und $\lambda = (644,60 \pm 2,42)$ nm für den roten Laser.

5 Diskussion

Das Reflexionsgesetz konnte in Unterabschnitt 4.1 im Rahmen der Messgenauigkeit verifiziert werden. Da jedoch keine Messungen mehrfach durchgeführt wurden, kann zur Messgenauigkeit ohne die Annahme, dass das Reflexionsgesetz gilt, keine empirische Angabe gemacht werden. Diese Einschätzung stützt sich vielmehr auf die Beobachtung, dass je nach Blickwinkel auf den Versuchsaufbau die abgelesenen Werte um circa 2° variierten. Die Steigung der Regressionsgeraden weicht um 1,79 % vom Idealwert $a = 1$ ab. Dass der Achsenabschnitt nicht genau bei $b = 0$ liegt, ist auf einen systematischen Fehler zurückzuführen. Die wahrscheinlichste Ursache ist, dass Spiegel oder Skala nicht genau ausgerichtet waren.

In Unterabschnitt 4.2 wurde der Brechungsindex von Plexiglas zu $1,45 \pm 0,02$ bestimmt; der Literaturwert lautet 1,489 [3]. Damit ergibt sich eine Abweichung von 0,04 beziehungsweise 2,6 %.

Der Strahlversatz in einer planparallelen Platte wurde nur theoretisch bestimmt. Die Werte in Tabelle 3 sowie der Graph in Abbildung 10 erscheinen jedoch plausibel.

Unterabschnitt 4.4 widmete sich der Ablenkung von Laserlicht im Prisma. Bei Betrachtung von Abbildung 6 wird klar, dass $\delta < 2\gamma = 120^\circ$ gelten muss. Dies erfüllen die berechneten δ offensichtlich. An der letzten Spalte von Tabelle 4 zeigt sich, dass grünes Laserlicht stärker als rotes abgelenkt wird. Wenngleich der Effekt hier noch in der Größenordnung der Messungenauigkeit liegt, deutet sich zumindest an, dass es sich um Dispersion handelt.

Anhand der Beugung am Gitter konnte in Unterabschnitt 4.5 die Wellenlänge der beiden Laser genau bestimmt werden; die relative Abweichung der Wellenlänge des grünen Lasers beträgt 1,51 %, die des roten Lasers beträgt 1,23 %.

Die in mehreren Abschnitten verwendete Näherung des Brechungsindex von Luft $n = 1.000292 \approx 1$ konnte problemlos angewandt werden, weil die dadurch entstehende (relative) Abweichung sehr klein im Vergleich zu den Messwerten und sonstigen Ungenauigkeiten ist – sie wirkt sich auf die angegebenen Dezimalstellen nicht aus.

Literatur

- [1] *Versuchsanleitung zum Versuch 400: Reflexion, Brechung und Beugung.* TU Dortmund.
- [2] *Brechzahl.* URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/brechzahl/1958> (besucht am 04.07.2020).
- [3] *Brechungsindex von Acrylate, Lucite, Perspex, Plexiglass.* URL: <https://www.filmetrics.de/refractive-index-database/Acrylic/Acrylate-Lucite-Perspex-Plexiglass> (besucht am 04.07.2020).