

VERSUCH 400

Reflexion, Brechung und Beugung

Tabea Hacheny
tabea.hacheny@tu-dortmund.de

Bastian Schuchardt
bastian.schuchardt@tu-dortmund.de

Durchführung: 05.04.2022

Abgabe: 12.04.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Strahlenoptik	3
2.1.1 Reflexion	3
2.1.2 Brechung	3
2.1.3 Reflexion und Transmission	3
2.2 Wellenoptik	4
2.2.1 Beugung am Gitter	4
3 Durchführung	5
3.1 Reflexionsgesetz	5
3.2 Brechungsgesetz	5
3.3 Prisma	5
3.4 Gitter	5
4 Auswertung	6
4.1 Vorbereitungsaufgaben	6
4.1.1 Brechungsindex verschiedener Materialien	6
4.1.2 Gitterkonstanten d	6
4.2 Reflexionsgesetz	6
4.3 Brechungsgesetz	7
4.3.1 Brechungsindex Plexiglas	7
4.3.2 Lichtgeschwindigkeit v im Plexiglas	7
4.4 Planparallele Platten	8
4.4.1 Berechnung mit Messwerten	8
4.4.2 Berechnung mit Brechungsindex	8
4.5 Prisma	8
4.5.1 Grüner Laser	9
4.5.2 Roter Laser	10
5 Diskussion	10
Literatur	10

1 Zielsetzung

In diesem Versuch sollen die grundlegenden Gesetzmäßigkeiten -Reflexion, Beugung und Brechung- der klassischen Optik überprüft werden.

2 Theorie

2.1 Strahlenoptik

Die Ausbreitung von Wellen wird in der Strahlenoptik, die auch geometrische Optik genannt wird, durch die Wellennormale beschrieben. Trifft ein Lichtstrahl nun auf eine Grenzfläche, so wird dieser gebrochen. Durch die Materialabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit im Medium, durch den der Lichtstrahl läuft, können die Ausbreitungsgeschwindigkeiten v_1 und v_2 durch die Brechungsindizes n_1 und n_2 der Materialien und durch den Einfallswinkel α und den Brechungswinkel β durch die Gleichung

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

beschrieben werden. In diesem Versuch ist das eine Medium Luft, das die Ausbreitungsgeschwindigkeit $v_1 = 22,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ und einen Brechungsindex von $n_1 = 1,000292$ hat [1]. Da der Lichtstrahl immer von Glas auf Luft, in der die Lichtgeschwindigkeit größer ist, trifft, ist Luft das optische dünnere Medium und Glas das optisch dichtere Medium.

2.1.1 Reflexion

Nach dem Reflexionsgesetz ist Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel. Dementsprechend gilt

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

2.1.2 Brechung

Wenn ein Lichtstrahl mit Einfallswinkel α auf ein anderes Medium mit Brechungsindex n trifft, erfährt er eine Richtungsänderung. Dieser Umstand wird Brechung genannt und lässt sich durch das Snelliussche Brechungsgesetz

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta \quad (2)$$

beschreiben. β ist dabei der Ausfallswinkel.

2.1.3 Reflexion und Transmission

Im den meisten Fällen tritt Reflexion und Brechung gleichzeitig auf, wenn Licht auf ein anderes Medium trifft. So wird ein Teil des Lichts reflektiert und ein anderer transmittiert und gebrochen. Das Verhältnis von reflektierten und transmittierten Licht ist material abhängig, aber für die Intensitäten muss gelten $R + T = 1$.

In Abbildung 1 sind die oben genannten Gesetze noch einmal graphisch dargestellt.

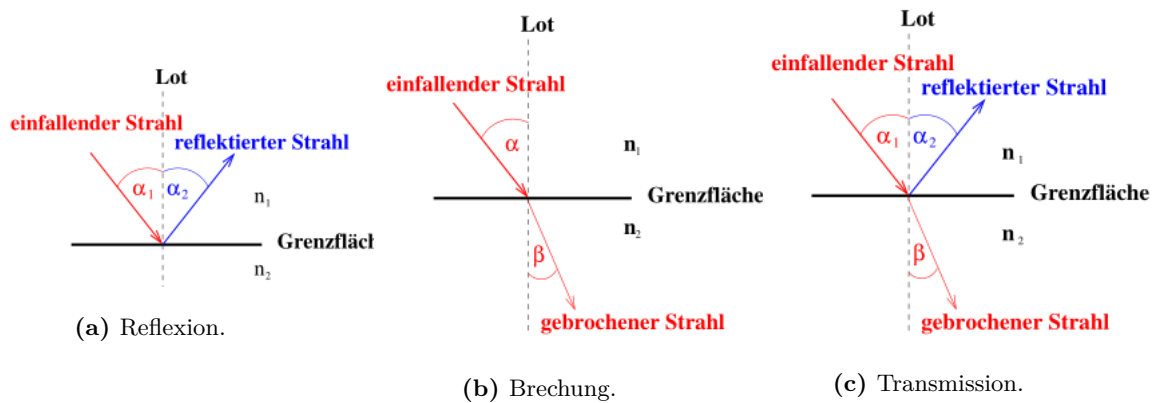


Abbildung 1: Skizzen von Reflexion, Brechung und Transmission [1].

2.2 Wellenoptik

Sobald Licht auf Objekte trifft, die verhältnismäßig klein im Vergleich zur Wellenlänge sind, kommt die geometrische Optik an ihre Grenzen, da sich nun das Licht auch im Schattenraum ausbreitet. Die charakteristischen Merkmale einer Welle sind die Frequenz ν , die Wellenlänge λ und die Ausbreitungsgeschwindigkeit v . Licht besteht dabei aus Wellenzügen, die meist nicht länger als 10^{-8} s dauern. Weiterhin können bei gleicher Frequenz und fester Phasenbeziehung durch Superposition der Wellen Interferenzbilder entstehen. Es wird zwischen konstruktiver und destruktiver Interferenz unterschieden. Wenn der Gangunterschied bei gleicher Intensität $\lambda/2$ beträgt, kommt es zur vollständigen Auslöschung der Welle.

2.2.1 Beugung am Gitter

Ist das Hindernis im Vergleich zur Wellenlänge klein, so kann es zur Beugung führen. Die Beugung lässt sich dabei durch das Huygensche Prinzip erklären.

Trifft eine ebene Wellenfront auf das Gitter, das zu Anschauungszwecken auch als Einzelspalt vorstellbar ist, so wird jeder Punkt im Spalt gebeugt und Ausgangspunkt einer neuen Elementarwelle mit gleicher Frequenz und fester Phasenbeziehung. Wird im Abstand L zum Spalt ein Schirm aufgestellt, so sind Interferenzmuster beobachtbar. Für die Interferenzmaxima gilt der Zusammenhang

$$a \cdot \sin \alpha = k \cdot \lambda. \quad (3)$$

Dabei ist a die Spaltbreite. Die Intensitätsminima werden dabei mit der Variable k durchnummeriert und befinden sich in einem Winkel α relativ zur geradlinigen Ausbreitungsrichtung der Welle. Dieser Zusammenhang lässt sich auf ein Gitter mit N -Einfachspalten gleicher Breite und mit der Gitterkonstanten d verallgemeinern. Für die Intensitätsmaxima gilt

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

Dies gilt solange, dass Licht gerade auf das Gitter einfällt. k wird dabei zur Nummerierung der Intensitätsmaxima verwendet.

3 Durchführung

Es wird eine transparente Glasplatte verwendet, auf der sich im Halbkreis verschiebbare Laserdioden befinden. Die untere Laserdiode emittiert grünes Licht mit der Wellenlänge $\lambda = 532 \text{ nm}$ und die obere rotes Licht mit der Wellenlänge $\lambda = 635 \text{ nm}$. Auf der Mitte der Platte können unterschiedliche optische Elemente montiert werden. Auf der anderen Seite der Platte ist ein Reflexionsschirm zum Schutz vor dem Laserlicht befestigt. In diesem Versuch ist immer Luft das optische dünnerer Medium mit der Lichtgeschwindigkeit c und dem Brechungsindex $n \approx 1$.

3.1 Reflexionsgesetz

Ein Spiegel wird in der Mitte der Platte befestigt. Um die Einfallswinkel und Ausfallswinkel ablesen zu können, wird eine Vorlage unter die Platte geschoben. Dann wird für sieben Winkel mit dem grünen Laser die beiden Winkel gemessen.

3.2 Brechungsgesetz

Nun wird eine planparallele Platte anstelle des Spiegels eingesetzt. Die Vorlage und der Laser bleiben unverändert. Durch die Vorlage lassen sich sowohl der Einfallswinkel, als auch der Brechungswinkel ablesen. Es wird für sieben verschiedene Winkel gemessen und der Strahlenversatz berechnet.

3.3 Prisma

Das Prisma wird nun an Stelle der planparallelen Platte angebracht und die Winkelvorlage gewechselt. Weiterhin wird ein Transmissionsschirm, der mit einer Winkelskala versehen ist, am Ende der Vorlage befestigt. Dann werden erst mit dem grünen Laser und später mit dem roten Laser die Ausfallswinkel α_2 für fünf verschiedene Einfallswinkel α_1 im Bereich $10^\circ \leq \alpha_1 \leq 60^\circ$ gemessen.

3.4 Gitter

Die Vorlage bleibt unverändert, der Transmissionsschirm wird gewechselt und das Prisma wird durch ein Gitter ausgetauscht. Dabei wird das Gitter am Ende der Platte platziert, so dass auch der grüne Laser trotz mangelnder Höhe auf das Gitter trifft. Es wird mit beiden Lasern die k -ten Intensitätsmaxima samt Winkel des Beugungsmusters gleichzeitig gemessen.

4 Auswertung

4.1 Vorbereitungsaufgaben

Im Rahmen der Vorbereitungsaufgaben wird im Folgenden der Brechungsindex verschiedener Materialien recherchiert und die Gitterkonstanten verschiedener Gitter ausgerechnet.

4.1.1 Brechungsindex verschiedener Materialien

Tabelle 1: Brechungsindex verschiedener Materialien.

Material	Brechungsindex n
Luft	1,0003 [3]
Wasser	1,333 [3]
Kronglas	1,510 [2]
Plexiglas	1,492 [4]
Diamant	2,417 [3]

4.1.2 Gitterkonstanten d

- 600 Linien/mm; $d = \frac{10}{6} \mu\text{m}$
- 300 Linien/mm; $d = \frac{10}{3} \mu\text{m}$
- 100 Linien/mm; $d = \frac{10}{1} \mu\text{m}$

4.2 Reflexionsgesetz

Bei diesem Versuch wurde der grüne Laser, Vorlage A und ein Spiegel verwendet. Der genauere Aufbau ist bei dem Kapitel Durchführung zu finden. Um das Reflexionsgesetz zu beweisen, wurden insgesamt 7 Messwerte für Einfallswinkel und Ausfallswinkel genommen. Diese sind in folgender Tabelle aufgelistet. Die Winkel konnten mit einer Genauigkeit

Tabelle 2: Einfallswinkel und Ausfallswinkel.

Einfallswinkel $\alpha_1 / ^\circ$	Ausfallswinkel $\alpha_2 / ^\circ$	Differenz $x / ^\circ$
$80 \pm 0,5$	$80,5 \pm 0,5$	0,5
$70 \pm 0,5$	$70,5 \pm 0,5$	0,5
$60 \pm 0,5$	$60,5 \pm 0,5$	0,5
$50 \pm 0,5$	$50 \pm 0,5$	0
$40 \pm 0,5$	$40 \pm 0,5$	0
$30 \pm 0,5$	$30 \pm 0,5$	0
$20 \pm 0,5$	$20 \pm 0,5$	0

von bis zu $0,5^\circ$ gemessen werden.

Mit dieser Messungenauigkeit ergibt sich eine durchschnittliche Differenz des Einfallswinkels und Ausfallswinkels von $x = 0,2143^\circ \pm 0,7071^\circ$. Die Meßunsicherheit wurde mithilfe Gaußschen Fehlerfortpflanzung berechnet.

4.3 Brechungsgesetz

Um das Brechungsgesetz zu beweisen, wird der in der Durchführung beschriebene Versuchsaufbau verwendet. Da der Lichtstrahl von einem optisch dünneren Medium (Luft, $n_1 = 1$) in ein dickeres übergeht, gilt das Snelliussche Brechungsgesetz Gleichung 2 mit $n_1 = 1$ und $n_2 = n$.

Um die Gesetzmäßigkeiten zu überprüfen, wurden jeweils 7 Einfallswinkel und Brechungswinkel gemessen, die sich in nachfolgender Tabelle finden lassen.

Tabelle 3: Einfallswinkel und Brechungswinkel.

Einfallswinkel $\alpha / ^\circ$	Brechungswinkel $\beta / ^\circ$	Brechungsindex n
$70 \pm 0,5$	$39 \pm 0,5$	$1,493 \pm 0,017$
$60 \pm 0,5$	$35,5 \pm 0,5$	$1,491 \pm 0,0197$
$50 \pm 0,5$	$30,5 \pm 0,5$	$1,510 \pm 0,025$
$40 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$	$1,521 \pm 0,032$
$30 \pm 0,5$	$19 \pm 0,5$	$1,536 \pm 0,028$
$20 \pm 0,5$	$13 \pm 0,5$	$1,520 \pm 0,068$
$10 \pm 0,5$	$6,5 \pm 0,5$	$1,534 \pm 0,139$

4.3.1 Brechungsindex Plexiglas

Die Messwerte ergeben mit Gleichung 2 und der Gaußschen Fehlerfortpflanzung den Brechungsindex $n = 1,515 \pm 0,035$.

Für die Gaußsche Fehlerfortpflanzung wurde folgende Formel benutzt:

$$\Delta n = \sqrt{\left(\frac{\cos(\alpha)}{\sin(\beta)}\right)^2 \cdot \Delta \alpha^2 + \left(-\frac{\sin(\alpha) \cos(\beta)}{\sin(\beta)^2}\right)^2 \cdot \Delta \beta^2} \quad (5)$$

4.3.2 Lichtgeschwindigkeit v im Plexiglas

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht verhält sich antiproportional zum Brechungsindex und lässt sich nach

$$v = \frac{c}{n} \quad (6)$$

bestimmen. Wobei v die neue Ausbreitungsgeschwindigkeit, c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und n der Brechungsindex ist.

Die neue Ausbreitungsgeschwindigkeit ist demnach $197.882.810,6 \pm 4.571.559,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

4.4 Planparallele Platten

Für diesen Versuch wurden dieselben Messwerte genommen wie für den Brechungsindex. Die Messwerte lassen sich in Tabelle 3 wiederfinden. Es werden jeweils nur die ersten 5 Messwerte verwendet.

4.4.1 Berechnung mit Messwerten

Zunächst wird der Strahlversatz mithilfe der Messwerte und der Formel

$$s = d \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos(\beta)} \quad (7)$$

berechnet. Dazu wird die Gaußsche Fehlerfortpflanzung

$$\Delta s = \sqrt{\left(\frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos(\beta)}\right)^2 \Delta \alpha^2 + \left(-\frac{\sin(\beta) \sin(\beta - \alpha) + \cos(\beta) \cos(\beta - \alpha)}{\cos(\beta)^2}\right)^2 \Delta \beta^2} \quad (8)$$

verwendet.

Tabelle 4: Einfallswinkel, Brechungswinkel und Strahlversatz mit Messwerten.

Einfallswinkel $\alpha / ^\circ$	Brechungswinkel $\beta / ^\circ$	Strahlversatz s / m
$70 \pm 0,5$	$39 \pm 0,5$	$0,0388 \pm 0,0006$
$60 \pm 0,5$	$35,5 \pm 0,5$	$0,0298 \pm 0,0007$
$50 \pm 0,5$	$30,5 \pm 0,5$	$0,0227 \pm 0,0007$
$40 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$	$0,0167 \pm 0,0007$
$30 \pm 0,5$	$19 \pm 0,5$	$0,0118 \pm 0,0007$

Der berechnete Strahlversatz lässt sich in der Tabelle 4 finden.

4.4.2 Berechnung mit Brechungsindex

Nun wird der Brechungswinkel mithilfe des Brechungsindex aus dem vorherigen Versuch berechnet und dann der Strahlversatz berechnet. Es gilt $n = 1,515 \pm 0,035$.

Der berechnete Strahlversatz lässt sich in der Tabelle 5 finden.

4.5 Prisma

In diesem Versuch wird die Ablenkung δ untersucht, die ein Lichtstrahl beim Durchgang durch ein Prisma erfährt. Der Versuch wird wie beschrieben durchgeführt und jeweils fünf Einfallswinkel α_1 und Ausfallswinkel α_2 für einen grünen und roten Laser gemessen. Die Ablenkung berechnet sich nach $\delta = (\alpha_1 + \alpha_2) - (\beta_1 + \beta_2)$.

Zunächst wird der Brechungswinkel im Prisma mithilfe von Gleichung 2 und $n = 1,510$ bestimmt.

Tabelle 5: Einfallswinkel, Brechungswinkel und Strahlversatz mit Brechungsindex.

Einfallswinkel $\alpha / ^\circ$	Brechungswinkel $\beta / ^\circ$	Strahlversatz s / m
70	$38,335 \pm 0,018$	$0,0391 \pm 0,0006$
60	$34,864 \pm 0,016$	$0,0303 \pm 0,0007$
50	$30,374 \pm 0,014$	$0,0228 \pm 0,0007$
40	$25,105 \pm 0,011$	$0,0166 \pm 0,0006$
30	$19,271 \pm 0,008$	$0,0115 \pm 0,0005$

4.5.1 Grüner Laser

Die Messwerte und berechneten Werte für den grünen Laser lassen sich in Tabelle 6 und die Ablenkung in Tabelle 7 finden.

Tabelle 6: Einfallswinkel, Ausfallswinkel beim grünen Laser.

Einfallswinkel $\alpha_1 / ^\circ$	Brechungswinkel $\beta_1 / ^\circ$	Einfallswinkel 2 $\beta_2 / ^\circ$	Ausfallswinkel $\alpha_2 / ^\circ$
$40 \pm 0,5$	$25,194 \pm 0,005$	$34,806 \pm 0,005$	$60,5 \pm 0,5$
$45 \pm 0,5$	$27,923 \pm 0,005$	$32,077 \pm 0,005$	$55 \pm 0,5$
$50 \pm 0,5$	$30,485 \pm 0,004$	$29,515 \pm 0,004$	$50 \pm 0,5$
$55 \pm 0,5$	$32,853 \pm 0,004$	$27,147 \pm 0,004$	$45 \pm 0,5$
$60 \pm 0,5$	$34,997 \pm 0,004$	$25,003 \pm 0,004$	$40 \pm 0,5$

Die Gaußsche Fehlerfortpflanzung des Brechungswinkel berechnet sich zu:

$$\Delta\beta_1 = \left(\frac{\cos(\alpha_1)}{n_{\text{Kron}} \cdot \sqrt{1 - \frac{\sin(\alpha_1)^2}{n_{\text{Kron}}^2}}} \right) \Delta\alpha_1 \quad (9)$$

Der zweite Einfallswinkel β_2 lässt sich aus der Winkelbeziehung des Prismas ableiten:

$$\beta_2 = 60^\circ - \beta_1$$

Tabelle 7: Ablenkung beim grünen Laser.

Ablenkung $\delta / ^\circ$
$40,5 \pm 0,707$
$40 \pm 0,707$
$40 \pm 0,707$
$40 \pm 0,707$
$40 \pm 0,707$

Hiermit ergibt sich nun eine Ablenkung δ von $\delta = 40,1 \pm 0,1^\circ$.

4.5.2 Roter Laser

Die Rechnung zum roten Laser erfolgt analog zum grünen Laser. Die Messwerte und berechneten werden finden sich in Tabelle 8 und Tabelle 9.

Tabelle 8: Einfallswinkel, Ausfallswinkel beim roten Laser.

Einfallswinkel $2 \alpha_1 / ^\circ$	Brechungswinkel $\beta_1 / ^\circ$	Einfallswinkel $2 \beta_2 / ^\circ$	Ausfallswinkel $\alpha_2 / ^\circ$
$40 \pm 0,5$	$25,194 \pm 0,005$	$34,806 \pm 0,005$	$61 \pm 0,5$
$45 \pm 0,5$	$27,923 \pm 0,005$	$32,077 \pm 0,005$	$54 \pm 0,5$
$50 \pm 0,5$	$30,485 \pm 0,004$	$29,515 \pm 0,004$	$49 \pm 0,5$
$55 \pm 0,5$	$32,853 \pm 0,004$	$27,147 \pm 0,004$	$44 \pm 0,5$
$60 \pm 0,5$	$34,997 \pm 0,004$	$25,003 \pm 0,004$	$40 \pm 0,5$

Tabelle 9: Ablenkung beim roten Laser.

Ablenkung $\delta / ^\circ$
$41 \pm 0,707$
$39 \pm 0,707$
$39 \pm 0,707$
$39 \pm 0,707$
$40 \pm 0,707$

Hiermit ergibt sich nun eine Ablenkung δ von $\delta = 39,6 \pm 0,4^\circ$.

5 Diskussion

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuch Reflexion, Beugung und Brechung*. 2014.
- [2] Spektrum.de. *Brechzahlen*. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/brechzahl/1958> (besucht am 09.04.2022).
- [3] Universität Wien. *Brechungsindexe*. URL: [https://www.univie.ac.at/mikroskopie/1_grundlagen/optik/strahlenoptik/2_lichtbrechung.htm#:~:text=Brechungsindex%20\(n\)%3A,Luft%3A%201%2C0003](https://www.univie.ac.at/mikroskopie/1_grundlagen/optik/strahlenoptik/2_lichtbrechung.htm#:~:text=Brechungsindex%20(n)%3A,Luft%3A%201%2C0003) (besucht am 09.04.2022).
- [4] Wikipedia.de. *Brechungsindex*. URL: <https://www.wikiwand.com/de/Brechungsindex> (besucht am 09.04.2022).