

V400

Reflexion, Brechung und Beugung

Theodor Zies

theodor.zies@tu-dortmund.de

Tom Troska

tom.troska@tu-dortmund.de

Durchführung: 17.05.2022

Abgabe: 24.05.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1. Zielsetzung	3
2. Theorie	3
2.1. Reflexion und Transmission nach der Strahlenoptik	3
2.2. Beugung am Gitter nach der Wellenoptik	5
3. Durchführung	5
3.1. Versuchsaufbau	5
3.2. Reflexionsgesetz	6
3.3. Brechungsgesetz	6
3.4. Prisma	6
3.5. Gitter	7
3.6. Vorbereitungsaufgaben	7
4. Auswertung	7
4.1. Reflexionsgesetz	7
4.2. Brechungsgesetz	8
4.3. Strahlenversatz	9
4.4. Prisma	9
4.5. Beugung am Gitter	10
5. Diskussion	11
Literatur	11
A. Anhang	12
A.1. Originaldaten	12

1. Zielsetzung

In diesem Versuch sollen die grundsätzlichen Gesetzmäßigkeiten der Strahlenoptik, wie Reflexion und Transmission, untersucht werden.

2. Theorie

Licht besteht aus elektromagnetischer Strahlung und lässt sich durch verschiedene Zusammenhänge der Strahlen- und der Wellenoptik beschreiben. Das optische Spektrum des Lichts reicht von einer Wellenlänge von 100 nm bis 1 mm, wobei das menschliche Auge nur für Licht zwischen Wellenlängen von 380 nm bis 780 nm empfindlich ist.

2.1. Reflexion und Transmission nach der Strahlenoptik

In der Strahlenoptik wird die Ausbreitung von Lichtwellen über die Wellennormale beschrieben und eignet sich zur Beschreibung von Reflexions- und Transmissionseffekten, nicht jedoch für manche andere Effekte, wie Interferenz oder Beugung.

Trifft Licht auf eine Grenzfläche, so wird ein Teil reflektiert, wobei der Winkel des einfallenden Lichtstrahls dem Winkel des ausfallenden Lichtstrahls gemäß

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

entspricht. In verschiedenen Materialien breitet sich Licht mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aus. Aus diesem Grund verändert sich der Weg des Lichts um einen Brechungswinkel. Mit materialabhängigen Brechungsindices n ergibt sich für die Transmission von Licht in ein anderes Medium die Relation

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

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit verändert sich zu

$$v = \frac{c}{n}. \quad (3)$$

In aller Regel wird ein Teil des auf eine Grenzfläche treffenden Lichts reflektiert und der restliche Teil transmittiert durch die Grenzfläche in das andere Medium. Es ergibt sich, dass der transmittierte Teil T und der reflektierte Teil R zusammen genau dem einfallenden Teil entsprechen müssen, also gilt $T + R = 1$. In Abbildung 1 sind die beschriebenen Sachverhalte nochmals graphisch veranschaulicht.

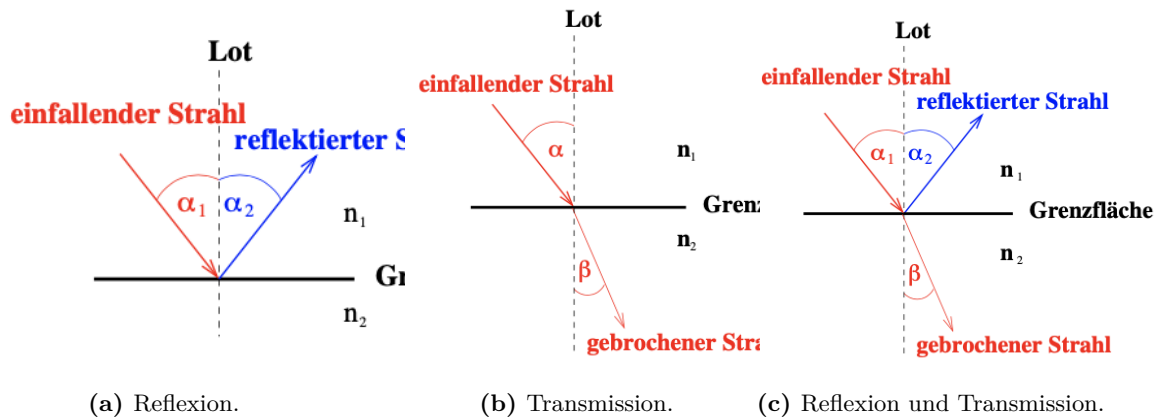


Abbildung 1: Skizzierung der Reflexion und Transmission von Licht [4].

Die Brechung von Licht hat zur Folge, dass Lichtstrahlen unter einem Strahlenversatz aus einer planparallelen Platte wieder austreten. Dies ist in Abbildung 2 dargestellt.

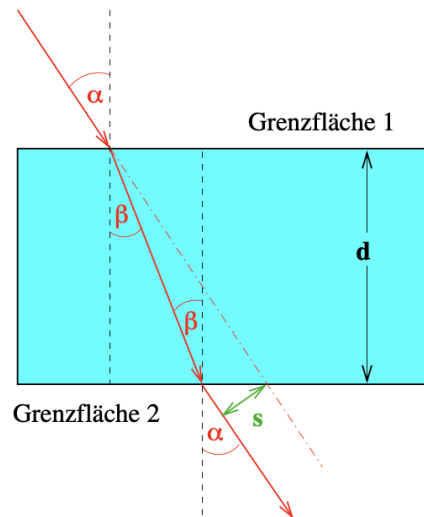


Abbildung 2: Strahlenverlauf in einer planparallelen Platte [4].

Für den Strahlenversatz s ergibt sich die Gleichung

$$s = d \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta}. \quad (4)$$

Für ein Prisma entsteht ein ähnlicher Zusammenhang. Hier wird der Strahlenversatz durch einen Winkel δ beschrieben, der wie in Abbildung 3 definiert ist.

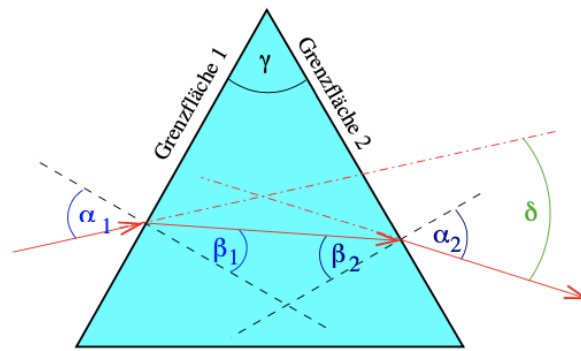


Abbildung 3: Strahlenverlauf in einem Prisma [4].

Für den Winkel δ folgt

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

2.2. Beugung am Gitter nach der Wellenoptik

Mithilfe der Wellenoptik lassen sich Effekte wie Interferenzbilder erklären. Dabei wird Licht als Welle angenommen und es gilt demnach das Superpositionsprinzip, wonach sich Wellen überlagern können. Ebenfalls relevant ist das Huygensche Prinzip, welches besagt, dass im Falle einer Brechung einer Welle jeder Punkt der Welle Ausgangspunkt einer neuen Elementarwelle mit selber Phase und Frequenz ist und die Einhüllende aller Elementarwellen die neue Wellenfront bildet.

Trifft eine Wellenfront auf ein Brechungsgitter lässt sich das auftretende Interferenzmuster mit eben diesen beiden Prinzipien erklären und die durch konstruktive Interferenz auftretenden Intensitätsmaxima genügen dem Zusammenhang

$$d \sin \alpha = k\lambda. \quad (6)$$

Hierbei bezeichnet d die Gitterkonstante, also die Breite der Öffnung der einzelnen Gitterspalten. Der Winkel α wird zwischen dem k -ten Intensitätsmaximum und dem Gitter gemessen und $k\lambda$ ist ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge des einfallenden Lichts.

3. Durchführung

3.1. Versuchsaufbau

Für diesen Versuch wird ein Aufbau verwendet, wie in Abbildung 4 zu sehen ist. Unter die transparente Glasplatte lassen sich verschiedene Winkelskalen legen, über die Einfallswinkel und Ausfallswinkel bestimmt werden können.

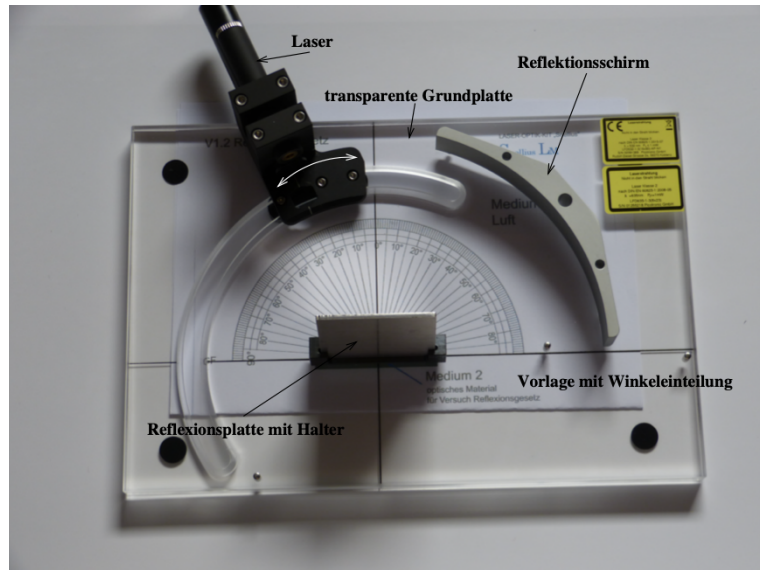


Abbildung 4: Aufbau des Versuchs mit Beschriftungen der einzelnen Bauteile [4].

Anstelle der eingezeichneten Reflexionsplatte lassen sich auch andere optische Elemente, wie ein Prisma oder eine planparallele Platte, in den Aufbau integrieren. Als Lichtquelle werden ein grüner und ein roter Laser mit den Wellenlängen von $\lambda_{\text{grün}} = 532 \text{ nm}$ und $\lambda_{\text{rot}} = 635 \text{ nm}$ verwendet.

3.2. Reflexionsgesetz

Zur Überprüfung des Reflexionsgesetzes wird in der Halterung ein Spiegel installiert und wird unter 7 verschiedenen Winkeln mit grünem Laserlicht bestrahlt. Mithilfe einer passenden Winkelskala unter dem Versuchsaufbau werden Einfallswinkel und Ausfallswinkel bestimmt.

3.3. Brechungsgesetz

Anstelle des Spiegels wird eine planparallele Platte in den Aufbau eingesetzt. In diese wird erneut unter 7 verschiedenen Einfallswinkeln grünes Laserlicht eingestrahlt. An einer Kante der planparallelen Platte lässt sich über eine Winkelskala der Brechungswinkel abgelesen.

3.4. Prisma

In einem nächsten Schritt wird ein Prisma in den Versuchsaufbau integriert. Außerdem wird an der unteren Kante eine horizontale Winkelskala platziert, mithilfe derer die Austrittswinkel für rotes und grünes Laserlicht gemessen werden. Hierbei werden gleiche 5 Eintrittswinkel für beide Laserstrahlen im Bereich von $10^\circ \leq \alpha_1 \leq 60^\circ$ gewählt.

3.5. Gitter

Das Prisma wird nun durch ein Gitter ersetzt und es werden die sichtbaren Intensitätsmaxima für grünes und rotes Laserlicht abgelesen. Dafür wird eine andere Winkelskala als Schirm verwendet. Dieser Teil des Versuches wird für Gitter mit 100, 300, und 600 Linien pro Millimeter durchgeführt.

3.6. Vorbereitungsaufgaben

In Vorbereitung auf die tatsächliche Durchführung des Versuchs sind einige Brechungsindizes herauszusuchen, die in Tabelle 1 dargestellt sind.

Tabelle 1: Brechungsindizes verschiedener Materialien.

Material	Brechungsindex n
Luft	1,0003 [1]
Wasser	1,333 [1]
Kronglas	1,510 [2]
Plexiglas	1,490 [2]
Diamant	2,417 [1]

Außerdem wird die Gitterkonstante für Gitter mit 600, 300, und 100 Linien pro Millimeter bestimmt.

Tabelle 2: Gitterkonstanten für Gitter mit 600, 300, und 100 Linien pro Millimeter.

Linien / mm	d / μm
600	$\frac{10}{6}$
300	$\frac{10}{3}$
100	10

4. Auswertung

4.1. Reflexionsgesetz

Im Folgenden werden in Tabelle 3 die gemessenen Winkel zur Überprüfung des Reflexionsgesetzes festgehalten.

Tabelle 3: Wertepaare der Einfallswinkel und Ausfallswinkel zur Überprüfung des Reflexionsgesetzes.

Einfallswinkel $\alpha_1 / ^\circ$	Ausfallswinkel $\alpha_2 / ^\circ$	Differenz $\Delta\alpha / ^\circ$
20	20	0
25	25	0
30	30	0
40	40	0
45	45,5	0,5
60	59,5	0,5
70	69,5	0,5

Der Ausfallswinkel entspricht hier bis auf geringe Fehler bei größeren α_1 genau dem Einfallswinkel, somit kann das Reflexionsgesetz verifiziert werden. Die Messungenauigkeit lag bei ca. $0,25^\circ$, da der Laserstrahl eine gewisse Breite aufweist, die ein genaueres Ablesen verhindert.

4.2. Brechungsgesetz

Die Messergebnisse für diesen Versuchsteil sind in Tabelle 4 zu finden.

Tabelle 4: Einfallswinkel α und zugehörige Brechungswinkel β .

Einfallswinkel $\alpha / ^\circ$	Brechungswinkel $\beta / ^\circ$
10	6,5
20	13
30	19,5
40	25,5
50	31,0
60	35,5
70	39,0

Mithilfe der Formel (2) wird für alle Messwertpaare der Brechungsindex n berechnet, es ergibt sich als Mittelwert der sieben Messungen:

$$n_{\text{exp}} = (1,502 \pm 0,016).$$

Der theoretische Wert für Plexiglas wurde im Rahmen der Vorbereitung bestimmt und liegt bei

$$n_{\text{theo}} = 1,49.$$

Unter Berücksichtigung der Unsicherheit des Mittelwertes lässt sich das Messergebnis also mit der Theorie vereinen.

Die Lichtgeschwindigkeit v in Plexiglas lässt sich somit nach (3) folgendermaßen berechnen:

$$v = \frac{c_{\text{Vakuum}}}{n} = (1.995 \pm 0.022) 10^6 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

4.3. Strahlenversatz

Bei der Auswertung dieses Versuchsteils werden die Daten aus dem vorherigen Abschnitt übernommen. Als erstes wird der Strahlenversatz mithilfe der Gleichung (4) aus den Messwerten in Tabelle 4 berechnet. Es ist ebenfalls möglich, den Strahlenversatz ohne Messung des Brechungswinkels zu bestimmen, da dieser aus dem Brechungsgesetz (2) berechnet werden kann. Anschließend wird der berechnete Brechungswinkel in (4) eingesetzt und erneut der Strahlenversatz bestimmt. Diese Rechenschritte werden für fünf Einfallswinkel durchgeführt, in Tabelle 5 sind die Ergebnisse zum Vergleich dargestellt.

Tabelle 5: Berechnete Strahlenversätze für fünf verschiedene Winkel.

Einfallswinkel $\alpha_1 / ^\circ$	1. Methode s / cm	2. Methode s / cm
10	0,359	0,346
20	0,732	0,716
30	1,131	1,137
40	1,623	1,639
50	2,222	2,253

Die Abweichung der beiden Methoden Δs ist stets kleiner als 0,1 cm und somit vernachlässigbar, dies lässt wiederum auf eine gute Ablesegenauigkeit des Brechungswinkel schließen.

4.4. Prisma

Gemessen wurden die Austrittswinkel je Farbe $\alpha_{2,\text{rot}}$ und $\alpha_{2,\text{grün}}$ abhängig vom Einfallswinkel α_1 . Aus den gewonnenen Daten wird für beide Laserfarben die Ablenkung δ berechnet, dafür wird das Brechungsgesetz (2) sowie die Winkelbeziehung (5) benutzt. Alle Ergebnisse sind in Tabelle 6 zu finden.

Tabelle 6: Berechnete Ablenkung δ für rotes sowie grünes Laserlicht.

$\alpha_1 / ^\circ$	$\alpha_{2,\text{rot}} / ^\circ$	$\delta_{\text{rot}} / ^\circ$	$\alpha_{2,\text{grün}} / ^\circ$	$\delta_{\text{grün}} / ^\circ$
30	79	49	81	51
35	69	44	70	45
40	60	40	61	41
45	53	38	54	39
50	47	37	48	38

Wie zu erwarten ist die Ablenkung abhängig von der Wellenlänge, was die unterschiedlichen Werte für δ_{rot} und $\delta_{\text{grün}}$ bestätigen. Außerdem fällt auf, dass die Ablenkung mit wachsendem Einfallswinkel geringer wird.

4.5. Beugung am Gitter

Abschließend werden die Messdaten zur Beugung des Laserlichts an den drei Gittern analysiert. Die Ergebnisse werden für jedes der verwendeten Gitter einzeln betrachtet. Zuerst wird in Tabelle 7 das Beugungsbild des Gitters mit $d = \frac{1}{600}$ mm betrachtet. Für jeden gemessenen Winkel wird zusätzlich mit (6) die Wellenlänge berechnet.

Tabelle 7: Intensitätsmaxima des roten und grünen Lasers für $d = \frac{1}{600}$ mm.

Beugungsordnung k	$\varphi_{k, \text{rot}} / ^\circ$	$\lambda_{\text{rot}} / \text{nm}$	$\varphi_{k, \text{grün}} / ^\circ$	$\lambda_{\text{grün}} / \text{nm}$
1	24	677,89	19,5	556,34

Die selben Auswertungsschritte werden für $d = \frac{1}{300}$ mm und $d = \frac{1}{100}$ mm wiederholt, alle Ergebnisse finden sich in Tabelle 8 und Tabelle 9.

Tabelle 8: Intensitätsmaxima des roten und grünen Lasers für $d = \frac{1}{300}$ mm.

Beugungsordnung k	$\varphi_{k, \text{rot}} / ^\circ$	$\lambda_{\text{rot}} / \text{nm}$	$\varphi_{k, \text{grün}} / ^\circ$	$\lambda_{\text{grün}} / \text{nm}$
1	11	636,03	9,5	550,16
2	23	651,22	19	542,61
3			29	538,68

Tabelle 9: Intensitätsmaxima des roten und grünen Lasers für $d = \frac{1}{100}$ mm.

Beugungsordnung k	$\varphi_{k, \text{rot}} / ^\circ$	$\lambda_{\text{rot}} / \text{nm}$	$\varphi_{k, \text{grün}} / ^\circ$	$\lambda_{\text{grün}} / \text{nm}$
1	4	697,56	4	697,56
2	6,5	566,02	6,5	566,02
3	11	636,03	9,5	550,16
4	15	647,05	12,5	541,10
5	19,5	667,61	16	551,27

Abschließend werden die Wellenlängen gemittelt und insgesamt ergibt sich

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{rot}} &= (650 \pm 40) \text{ nm} \\ \lambda_{\text{grün}} &= (570 \pm 50) \text{ nm}.\end{aligned}$$

Diese Werte liegen unter Berücksichtigung der Messunsicherheit im erwarteten Wellenlängenbereich für die jeweilige Farbe, in der Theorie [3] ist

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{rot,theo}} &= 635 - 770 \text{ nm} \\ \lambda_{\text{grün,theo}} &= 520 - 565 \text{ nm}.\end{aligned}$$

5. Diskussion

In den ersten beiden Versuchsteilen konnten alle theoretisch erwarteten Werte bestätigt werden. Die Messergebnisse besitzen also nur geringe Unsicherheiten, da größere Fehlerquellen in dem Versuch auszuschließen sind.

Bei der Berechnung des Strahlenversatzes konnte zwischen den beiden Methoden kein wesentlicher Unterschied festgestellt werden, auch hier werden die geringen Unsicherheiten bestätigt.

Bei der Brechung im Prisma konnte erfolgreich gezeigt werden, dass die Ablenkung tatsächlich Abhängig von der Wellenlänge ist, was theoretisch auch zu erwarten ist.

Im letzten Versuchsteil ließen sich ebenfalls realistische Werte für die Wellenlängen berechnen. In den ersten beiden Zeilen in Tabelle 9 fällt jedoch auf, dass sich die selben Wellenlängen für rot und grün ergeben. Dies ist höchstwahrscheinlich auf einen Ablesefehler der Intensitätsmaxima zurückzuführen, der im Nachhinein jedoch nur schwierig nachzuvollziehen ist. Insgesamt ergeben sich im Mittel trotzdem realistische Werte, sodass dieser Fehler keine allzu große Auswirkung zu haben scheint.

Literatur

- [1] Universität Wien. URL: https://www.univie.ac.at/mikroskopie/1_grundlagen/optik/strahlenoptik/2_lichtbrechung.htm (besucht am 24.05.2022).
- [2] KLA Corporation. URL: <https://www.filmetrics.de/refractive-index-database> (besucht am 17.05.2022).
- [3] PCC Group. URL: <https://www.products.pcc.eu/de/blog/wie-entstehen-farben-und-wieso-sehen-wir-sie-farbmodelle-und-ihre-beschreibung/> (besucht am 20.05.2022).
- [4] *Versuch V400: Reflexion, Brechung und Beugung*. TU Dortmund, Fakultät Physik.

A. Anhang

A.1. Originaldaten

V400 - Reflexion, Brechung, Beugung

① Reflexionsgesetz - sine Law

α_1	α_2	$\alpha_{1,ref}$	$\alpha_{2,ref}$	$\alpha_{1,sin}$	$\alpha_{2,sin}$
20,0	20,0	30	79	81	
25,0	25,0	35	69	70	
30,0	30,0	40	60	61	
40,0	40,0	45	53	54	
45,0	45,5	50	47	48	
60,0	59,5				
70,0	65,5				

② Gitter

α	β	α_{ref}	α_{sin}
10	6,5	600 0°, 24°, (-24°)	600 0°, 19,5°
20	13,0	300 0°, 11°, 23° (-11°, -23°)	300 0°, 9,5°, 19°, 29°
30	19,5	700 0°, 4°, 6,5°, 11°, 15°, 19,5°, 23°, 27,5°, 32°	700 0°, 4°, 6,5°, 9,5°, 17,5°, 16°, 15°
40	25,5		
50	31,0		
60	35,5		
70	39,0		

J. Müller