

V 400

Reflexion, Brechung und Beugung

Felix Symma

felix.symma@tu-dortmund.de

Joel Koch

joel.koch@tu-dortmund.de

Durchführung: 10.05.2022

Abgabe: 17.05.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
3 Durchführung	6
4 Auswertung	7
4.1 Reflexionsgesetz	7
4.2 Brechungsgesetz	8
4.3 Planparallele Platten	8
4.4 Prisma	10
4.5 Beugung am Gitter	11
5 Diskussion	12
Literatur	14
Anhang	14

1 Zielsetzung

In diesem Versuch sollen die Gesetze der Strahlenoptik für Reflexion, Brechung und Beugung von Licht verschiedener Wellenlängen überprüft werden.

2 Theorie

Das optische Spektrum reicht von ultraviolettem Licht mit einer Wellenlänge von 100 nm bis 380 nm bis hin zu infrarotem Licht mit einer Wellenlänge von 780 nm bis 1 mm. Das menschliche Auge kann davon jedoch nur den Teilbereich von 380 nm bis 780 nm erfassen.

Da Licht eine elektromagnetische Welle ist, lässt sich ihre Ausbreitung durch die Maxwell'schen Gleichung beschreiben. Für die Gesetze der Reflexion und der Brechung an Grenzflächen reichen aber auch die Gesetzmäßigkeiten der Strahlenoptik aus.

Die Wellenausbreitung in der Strahlenoptik wird durch die Normale der Wellenfläche, die senkrecht auf der Wellenfront steht und Lichtstrahl genannt wird, ausgezeichnet. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Lichtwelle ist in verschiedenen Medien unterschiedlich groß, weshalb sich das Licht bei einem Übergang von einem Material zu einem anderen zum Lot hin bricht. Eine mathematische Beziehung liefert das Snellius'sche Brechungsgesetz

$$n_1 \sin(\alpha) = n_2 \sin(\beta). \quad (1)$$

Dabei sind n_1 und n_2 die Brechungsindizes des jeweiligen Materials, α der Einfallswinkel und β der Ausfallswinkel. Ein Ausdruck für das Verhältnis der Geschwindigkeiten v von Lichtwellen in zwei Medien ist dabei durch

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

gegeben. Eine schematische Darstellung ist Abbildung 1 zu entnehmen. In der Abbildung trifft Licht aus einem optisch dünneren Medium, also einem Medium in dem sich eine Welle schneller bewegt, auf ein optisch dichteres Medium, in dem Wellen langsamer sind.

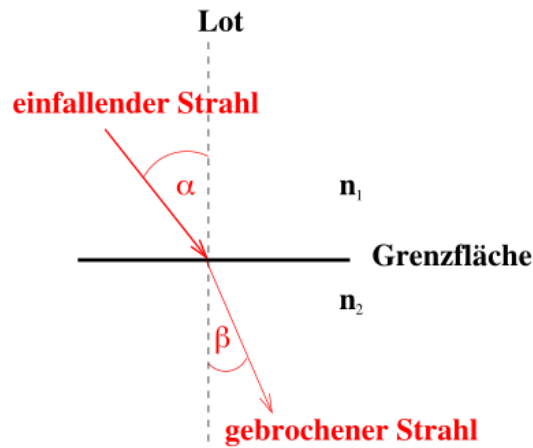


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Brechung eines Lichtstrahls zwischen zwei Medien[1].

Bei einem Prisma ist der Brechungswinkel von der Wellenlänge des Lichtes abhängig, was als Dispersion bezeichnet wird. Die Ablenkung δ , die der Strahl beim Durchgang durch das Prisma erfährt, wird durch die Gleichung

$$\delta = (\alpha_1 + \alpha_2) - (\beta_1 + \beta_2) \quad (3)$$

ausgedrückt. Eine schematische Darstellung des Strahlenganges von Licht durch ein Prisma ist in Abbildung 2 abgebildet.

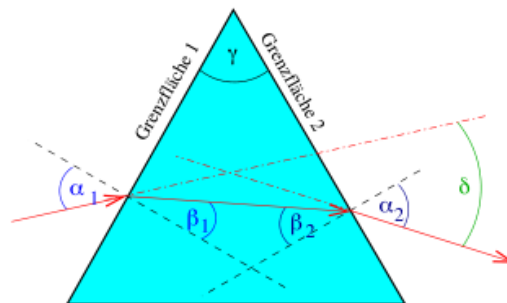


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Strahlenganges von Licht durch ein Prisma[1].

Neben der Brechung kann auch das Reflexionsgesetz mit der Strahlenoptik erklärt werden. Wenn ein Lichtstrahl auf eine Grenzfläche fällt, dann ist nach dem Reflexionsgesetz der Einfallswinkel α_1 gleich dem Reflexionswinkel α_2 , also

$$\alpha_1 = \alpha_2. \quad (4)$$

Eine schematische Darstellung des Phänomens ist Abbildung 3 zu entnehmen.

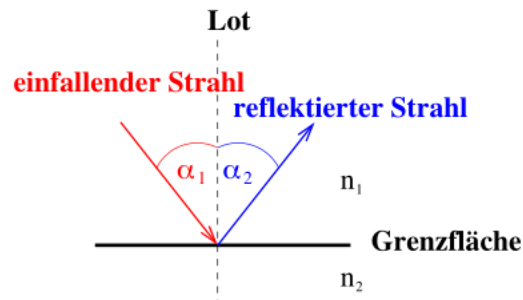


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Reflexion eines Lichtstrahls zwischen zwei Medien[1].

Da in der Regel, jedoch, ein Lichtstrahl an der Grenzfläche nicht vollständig reflektiert wird, gibt es noch einen Teil der in das Medium eindringt. Es gilt aber immer $R + T = 1$. In Abbildung 4 ist das kombinierte Phänomen von Transmission und Reflexion dargestellt.

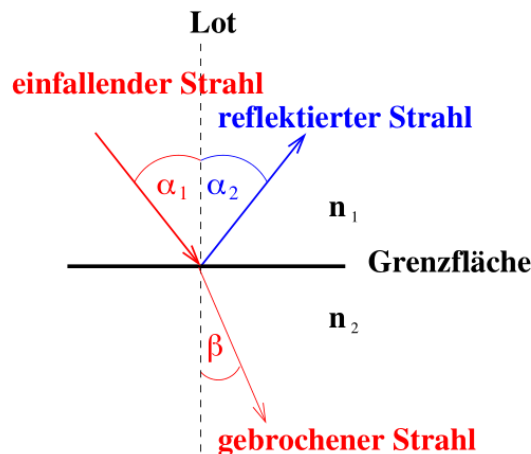


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Transmission und der Reflexion eines Lichtstrahls zwischen zwei Medien [1].

Wenn Licht auf ein Hinderniss trifft, kann man allerdings häufig beobachten, dass sich auch im geometrischen Schattenraum, also hinter dem Hinderniss, noch Licht befindet. Dieses Phänomen wird als Beugung bezeichnet. Um dieses Auftreten zu erklären werden die Gesetze der Wellenoptik verwendet, da die Strahlenoptik keine ausreichende Erklärung liefert.

In der Wellenoptik findet vor allem das Huygens'sche Prinzip Anwendung, das besagt,

dass jeder Punkt einer Welle der Ausgangspunkt einer Elementarwelle mit der gleichen Frequenz und Phase ist. Die Einhüllende aller Elementarwellen ist wieder die ursprünglich und stellt dessen Wellenfront auch zu einem späteren Zeitpunkt wieder dar. Jedes Hinderniss im Strahlengang einer Welle, dessen Abmaße klein gegenüber der Wellenlänge ist, kann zur Beugung führen.

Wenn sich überlagernde Wellen betrachtet werden, die dieselbe Frequenz und eine feste Phase besitzen, so ist zu beobachten, dass sie ein Interferenzbild erzeugen. Je nach der gegenseitigen Phasenbeziehung können sie konstruktiv oder destruktiv miteinander interferieren. Bei einem Gangunterschied von $\lambda/2$, also der halben Wellenlänge, löschen sich die Wellen vollständig aus. Wird eine Welle auf einen Spalt geworfen, so beugt sie sich in der Spaltöffnung. Gebeugte Wellen haben dieselbe Frequenz und eine feste Phase. Auf einem Schirm in einem Abstand L vom Spalt mit der Spaltbreite a ergibt sich ein Muster aus konstruktiver und destruktiver Interferenzstreifen. Die konstruktive Interferenz ist für Stellen mit dem Ausdruck

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

gegeben, wobei λ die Wellenlänge des einfallenden Lichtes ist. Auf dem Schirm erscheint ein k -tes Maximum in einem Winkel α relativ zur geradlinigen Ausbreitungsrichtung. Für ein Gitter aus N Einfachspalten gleicher Breite mit der Gitterkonstanten d folgt aus der Gleichung (5) eine Beziehung der Intensitätsmaxima bei einem Gitter zu

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

3 Durchführung

Der Versuch wird nach Abbildung 5 aufgebaut und es wird ein grüner Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm verwendet. Bei allen Experimenten ist das optisch dünnere Medium Luft mit der Lichtgeschwindigkeit $c \approx 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}^2$ und dem Brechungsindex $n \approx 1$. Die Abbildung 6 zeigt die in dem Versuch verwendeten optischen Elemente.

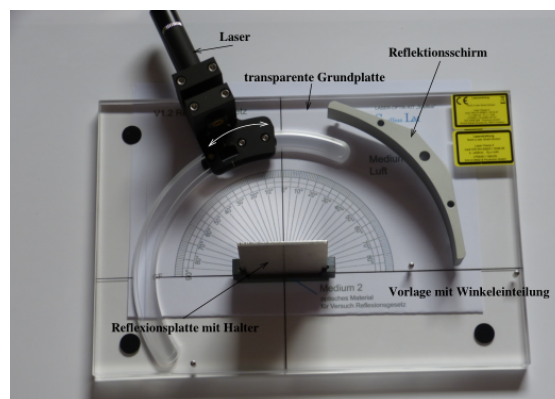


Abbildung 5: Abbildung des Versuchsaufbaus Reflexion [1].

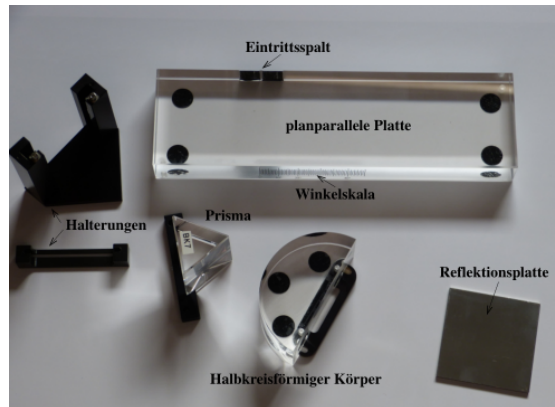


Abbildung 6: Abbildung der optischen Elemente [1].

Es wird in Abhängigkeit von sieben verschiedenen Einfallswinkeln der Reflexionswinkel aufgenommen, um das Reflexionsgesetz zu untersuchen.

In einem zweiten Teil soll das Brechungsgesetz untersucht werden, wofür die planparallele Platte mit dem Eintrittsspalt und der Winkelskala verwendet wird. Sie wird so auf der Glasplatte angebracht, dass von der Winkelskala der Brechungswinkel abzulesen ist. Es wird nun für sieben verschiedene Einfallswinkel der Brechungswinkel bei rotem Licht mit einer Wellenlänge von 635 nm gemessen.

In einem dritten Schritt soll nun das optische Prisma aus Abbildung 6 untersucht werden. Dazu wird es auf der Messapparatur angebracht und es wird für fünf verschiedene Einfallswinkel der jeweilige Austrittswinkel gemessen. Dazu sollen Einfallswinkel aus einem Winkelbereich von 10° bis 60° verwendet werden. Die Messungen werden sowohl für den roten, als auch für den grünen Laser durchgeführt.

Als letztes soll die Beugung an drei verschiedenen Gittern untersucht werden, wozu das Prisma gegen das zu untersuchende Gitter ausgetauscht wird. Es ist darauf zu achten, dass der Laser bei einem Winkel von 0° auf das Gitter trifft und der Transmissionsschirm im Kreis um die Winkelskala der Vorlage angeordnet ist. Es sollen nun die Interferenzmaxima für rotes und grünes Laserlicht gemessen werden.

4 Auswertung

4.1 Reflexionsgesetz

Im ersten Teil des Versuches werden die Reflexionswinkel des grünen Lasers in Abhängigkeit des Einfallswinkels gemessen. Es werden hierzu ein Spiegel und die Messvorlage A benutzt. Der verwendete Aufbau lässt eine Messung der Winkel auf ein halbes Grad genau zu. Die Ergebnisse der Messung sind in Tabelle 1 zu finden.

Tabelle 1: Messwerte des Reflexionswinkels.

Einfallswinkel / °	Ausfallswinkel / °	Abweichung / °
70	$70 \pm 0,5$	$0 \pm 0,5$
60	$55 \pm 0,5$	$5 \pm 0,5$
50	$46 \pm 0,5$	$4 \pm 0,5$
45	$41 \pm 0,5$	$4 \pm 0,5$
40	$37 \pm 0,5$	$3 \pm 0,5$
30	$27 \pm 0,5$	$3 \pm 0,5$
20	$18 \pm 0,5$	$2 \pm 0,5$

Es ergibt sich aus den 7 Messwerten eine durchschnittliche Abweichung von $3,0^\circ \pm 0,19^\circ$. Die Unsicherheit wurde hierbei mit Hilfe von Python berechnet.

4.2 Brechungsgesetz

Im zweiten Teil des Versuches soll nun der Brechungsindex von Plexiglas bestimmt werden. Hierfür wird erneut der grüne Laser verwendet. Außerdem eine planparallele Platte und die Messvorlage A. Um den Brechungsindex zu bestimmen, wird die Gleichung (1) genutzt, wobei $n_1 = 1$ angenommen wird und n_2 der zu bestimmende Index ist. Die Ergebnisse der 7 Messungen sind zusammen mit dem daraus resultierenden Index in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Messwerte des Brechungsindexes.

Einfallswinkel / °	Ausfallswinkel / °	Brechungsindex
70	$38 \pm 0,5$	$1,53 \pm 0,022$
60	$36 \pm 0,5$	$1,47 \pm 0,022$
50	$31 \pm 0,5$	$1,49 \pm 0,025$
45	$28,5 \pm 0,5$	$1,48 \pm 0,027$
40	$26 \pm 0,5$	$1,47 \pm 0,029$
30	$19,5 \pm 0,5$	$1,50 \pm 0,040$
20	$13,5 \pm 0,5$	$1,47 \pm 0,050$
10	$7 \pm 0,5$	$1,42 \pm 0,100$

Als Mittelwert folgt daraus für den Brechungsindex $n = 1,48 \pm 0,017$. Mit Gleichung (2) folgt daraus für die Lichtgeschwindigkeit in Plexiglas $v = (2,026 \pm 0,023) \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Die Unsicherheiten wurden erneut mit Hilfe von Python berechnet.

4.3 Planparallele Platten

Im dritten Teil des Versuches soll der Strahlenversatz eines Lichtstrahles an planparallelen Platten untersucht werden. Dafür muss zunächst eine Formel für den Strahlenversatz s anhand der Abbildung 7 bestimmt werden.

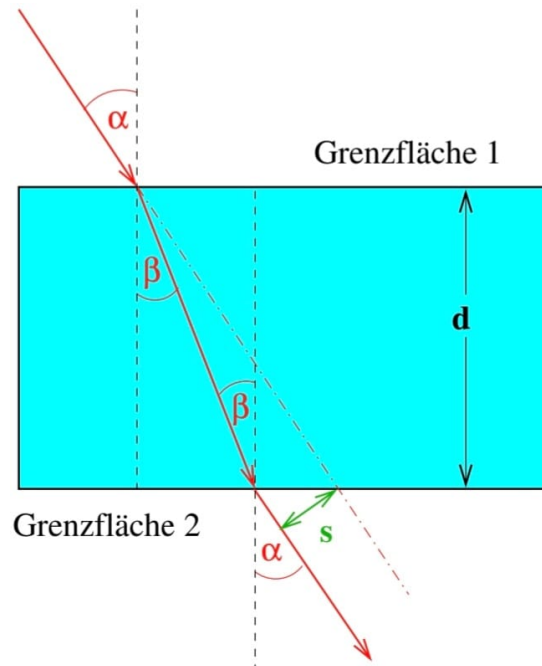


Abbildung 7: Brechung eines Lichtstrahles an Planparallelen Platten[1].

Zunächst wird ein Ausdruck für die Länge der Strecke a , die der Lichtstrahl im Medium zurücklegt, gesucht. Mit der Länge d und dem Winkel β ergibt sich

$$\cos(\beta) = \frac{d}{a} \Leftrightarrow a = \frac{d}{\cos(\beta)}.$$

Anschließend kann durch Betrachten des Winkels $\alpha - \beta$ ein Ausdruck für s gefunden werden.

$$\sin(\alpha - \beta) = \frac{s}{a} \Leftrightarrow s = a \sin(\alpha - \beta)$$

Der finale Ausdruck für s wird nun erhalten, indem der erste Ausdruck in den zweiten eingesetzt wird.

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

Der Strahlenversatz s kann nun anhand von Gleichung (7) bestimmt werden. Dafür werden zunächst fünf der Messwerte aus Tabelle 2 verwendet. Die berechneten Werte sind zusammen mit den verwendeten Winkeln in Tabelle 3 zu finden.

Tabelle 3: Berechnete Werte für den Strahlenversatz.

Einfallswinkel / °	Ausfallswinkel / °	Strahlenversatz / cm
70	$38 \pm 0,5$	$3,93 \pm 0,5$
60	$36 \pm 0,5$	$2,94 \pm 0,5$
50	$31 \pm 0,5$	$2,22 \pm 0,5$
45	$28,5 \pm 0,5$	$1,89 \pm 0,6$
40	$26 \pm 0,5$	$1,57 \pm 0,6$

Die Werte für den Strahlenversatz werden nun erneut bestimmt, wobei dieses Mal für β nicht die tatsächlich gemessenen Werte verwendet werden. Stattdessen werden Werte für β anhand von Gleichung (1) bestimmt, wobei $n_1 = 0$ angenommen wird und für n_2 der zuvor berechnete Wert $n = 1,48 \pm 0,017$ verwendet wird. Die so berechneten Werte sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Berechnete Werte für den Strahlenversatz.

Einfallswinkel / °	Ausfallswinkel / °	Strahlenversatz / cm
70	$39,41 \pm 0,019$	$3,85 \pm 0,6$
60	$35,81 \pm 0,018$	$2,96 \pm 0,4$
50	$31,17 \pm 0,016$	$2,21 \pm 0,5$
45	$28,54 \pm 0,016$	$1,89 \pm 0,4$
40	$25,74 \pm 0,015$	$1,60 \pm 0,7$

Die Differenzen der jeweiligen Werte für den Strahlenversatz aus beiden Berechnungsmethoden sind in Tabelle 5 mit den zugehörigen Einfallswinkeln aufgetragen.

Tabelle 5: Differenzen der verschieden berechneten Werte für den Strahlenversatz.

Einfallswinkel	Differenz Strahlenversatz
70	$0,08 \pm 0,5$
60	$0,02 \pm 0,5$
50	$0,01 \pm 0,5$
45	$0,00 \pm 0,5$
40	$0,03 \pm 0,6$

4.4 Prisma

Im nächsten Teil des Versuches soll die Ablenkung eines Prismas untersucht werden. Dazu wird ein Prisma aus Kronglas, ein grüner und roter Laser und die Messvorlage C verwendet. Die Ablenkung wird mit Hilfe von Gleichung (3), mit der Winkelbeziehung $\beta_1 + \beta_2 = \gamma$ bestimmt. γ wird als brechender Winkel bezeichnet und ist bei dem verwendeten Prisma

gegeben als $\gamma = 60^\circ$.

Die gemessenen Werte sind in Tabelle 6 zu finden.

Tabelle 6: Messwerte der Versuchsreihe mit dem Prisma.

Einfallswinkel / $^\circ$	Austrittswinkel Rot / $^\circ$	Austrittswinkel Grün / $^\circ$
55	$42 \pm 0,5$	$43 \pm 0,5$
50	$47 \pm 0,5$	$48 \pm 0,5$
45	$53 \pm 0,5$	$53 \pm 0,5$
40	$59 \pm 0,5$	$60 \pm 0,5$
35	$67 \pm 0,5$	$68 \pm 0,5$

Die daraus folgenden Ablenkungen sind für den roten und grünen Laser in Tabelle 7 dargestellt. Die Unsicherheiten wurden erneut mit Python bestimmt.

Tabelle 7: Berechnete Ablenkungen.

Ablenkung Rot / $^\circ$	Ablenkung Grün / $^\circ$
$37 \pm 0,5$	$38 \pm 0,5$
$37 \pm 0,5$	$38 \pm 0,5$
$38 \pm 0,5$	$38 \pm 0,5$
$39 \pm 0,5$	$40 \pm 0,5$
$42 \pm 0,5$	$43 \pm 0,5$

Daraus folgen die Mittelwerte $\delta_{\text{Rot}} = 38,6^\circ \pm 0,22^\circ$ und $\delta_{\text{Grün}} = 39,4^\circ \pm 0,22^\circ$.

4.5 Beugung am Gitter

Im letzten Teil des Versuches soll die Wellenlänge der verwendeten Laser durch die Beugung an verschiedenen Gittern ermittelt werden. Dafür werden drei verschiedenen Gitter mit 600, 300 und 100 Linien pro Millimeter und die beiden Laser verwendet. Die Messwerte für 100 Linien pro Millimeter sind in Tabelle 8, die für 300 in Tabelle 9 und die für 600 in Tabelle 10 zu finden.

Die Wellenlängen lassen sich nun anhand von Gleichung (6) bestimmen.

Tabelle 8: Messwerte bei einem Gitter mit 100 Linien/mm.

Ordnung	Beugungswinkel Rot / °	Beugungswinkel grün / °
1	$3 \pm 0,5$	$2,5 \pm 0,5$
2	$5,5 \pm 0,5$	$4,5 \pm 0,5$
3	$8 \pm 0,5$	$6,5 \pm 0,5$
4	$11 \pm 0,5$	$9 \pm 0,5$
5	$14 \pm 0,5$	$11,5 \pm 0,5$
6	$17 \pm 0,5$	$14 \pm 0,5$
7	$20 \pm 0,5$	$16 \pm 0,5$

Für das Gitter mit 100 Linien pro Millimeter ergibt sich $\lambda_{\text{Rot}} = (4,86 \pm 0,15) \cdot 10^{-7} \text{m}$ und $\lambda_{\text{Grün}} = (3,99 \pm 0,15) \cdot 10^{-7} \text{m}$.

Tabelle 9: Messwerte bei einem Gitter mit 300 Linien/mm.

Ordnung	Beugungswinkel Rot / °	Beugungswinkel grün / °
1	8	6,5
2	16,5	13,5
3	25,5	21

Für das Gitter mit 300 Linien pro Millimeter ergibt sich $\lambda_{\text{Rot}} = (4,72 \pm 0,034) \cdot 10^{-7} \text{m}$ und $\lambda_{\text{Grün}} = (3,88 \pm 0,15) \cdot 10^{-7} \text{m}$.

Tabelle 10: Messwerte bei einem Gitter mit 600 Linien/mm.

Ordnung	Beugungswinkel Rot / °	Beugungswinkel grün / °
1	16,5	13,5
2		29,5

Für das Gitter mit 600 Linien pro Millimeter ergibt sich $\lambda_{\text{Rot}} = (4,73 \pm 0,05) \cdot 10^{-7} \text{m}$ und $\lambda_{\text{Grün}} = (4,00 \pm 0,09) \cdot 10^{-7} \text{m}$.

Aus allen drei Messreihen ergibt sich so als Mittelwert $\lambda_{\text{Rot}} = (4,77 \pm 0,021) \cdot 10^{-7} \text{m}$ für den roten und $\lambda_{\text{Grün}} = (3,95 \pm 0,06) \cdot 10^{-7} \text{m}$ für den grünen Laser.

5 Diskussion

Es muss nach dem Auswerten der Messergebnisse festgestellt werden, dass diese teils deutlich von den zu erwarteten Werten abweichen.

In der ersten Messreihe wurden Reflexionswinkel in Abhängigkeit des Einfallswinkels

gemessen. Es wäre laut des Reflexionsgesetzes zu erwarten gewesen, dass sich beide Winkel jeweils garnicht, beziehungsweise nur sehr gering voneinander unterscheiden. Tatsächlich wurde aber eine durchschnittliche Abweichung von 3° gemessen, wobei der Wert 0° bei Weitem nicht in der errechneten Messunsicherheit liegt.

Im zweiten Teil der Messung wurden dann der Brechungsindex von Plexiglas und die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht in Plexiglas bestimmt. Als Ergebnisse lieferten die Messungen einen Index von $n = 1,48$, was eine Abweichung von 0,67% vom Literaturwert von $n = 1,49$ entspricht. Die daraus folgende Lichtgeschwindigkeit in Plexiglas wurde als $v = 2,026 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ bestimmt. Die Abweichung zum Literaturwert $v = 2,01 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ist hierbei 0,79%.

Im dritten Versuchsteil sollte der Strahlenversatz eines Lichtstrahles an Planparallelen Platten untersucht werden. Die zwei unterschiedlichen Methoden lieferten sehr ähnliche Ergebnisse. Die Differenzen der berechneten Werte aus beiden Methoden waren wesentlich geringer als die jeweiligen Unsicherheiten. Dies war allerdings zu erwarten, da zuvor bereits festgestellt wurde, dass der berechnete Wert für den Brechungsindex von Plexiglas sehr nahe am Literaturwert liegt.

Die vierte Messreihe bestand daraus, die Ablenkung der Laserstrahlen an einem Prisma zu ermitteln. Es wurden für den roten Laser eine Ablenkung von $\delta_{\text{Rot}} = 38,6^\circ$ und für den grünen Laser eine Ablenkung von $\delta_{\text{Grün}} = 39,4^\circ$ gemessen, beziehungsweise bestimmt.

In der letzten Messreihe sollten mit Hilfe dreier verschiedener Gitter mit unterschiedlichen Gitterkonstanten die Wellenlängen der verwendeten Laser bestimmt werden. Die errechnete Wellenlänge für den roten Laser beträgt $\lambda_{\text{Rot}} = 4,77 \cdot 10^{-7} \text{ m}$, was einer Abweichung von 33,12% zum tatsächlichen Wert von $\lambda_{\text{Rot}} = 6,35 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ entspricht. Für den grünen Laser wurde eine Wellenlänge von $\lambda_{\text{Grün}} = 3,95 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ errechnet. Die Abweichung vom tatsächlichen Wert von $\lambda_{\text{Grün}} = 5,32 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ beträgt 34,68%.

Gründe für die hohen Abweichungen könnten im Versuchsaufbau liegen. Die Messvorlagen wurden vor Beginn der Messung unter der Messapparatur platziert und von dieser an ihrer Position gehalten. Dies funktionierte allerdings nicht bei allen Messvorlagen. Es kam vor, dass durch Berührungen der Messapparatur die Messvorlage verrutschte und so ein genaues Ablesen der Winkel nicht möglich war.

Noch ungenauer waren die Transmissionsschirme, die senkrecht auf der Messapparatur platziert werden mussten. Dabei sollten die aufgezeichneten Winkel mit denen auf der, auf dem Tisch liegenden, Messvorlage übereinstimmen. Es war allerdings nicht möglich dies zu gewährleisten, da die Standfüße, mit denen die Transmissionsschirme aufrecht gehalten wurden, nicht in der Lage waren, diese in die Kreisbahnen zu formen, die durch die Messvorlagen vorgegeben waren.

Ebenso ist es möglich, dass die Unsicherheiten durch Ungenauigkeiten der Bauteile, wie zum Beispiel des Spiegels oder der Gitter, hervorgerufen wurden. Diese könnten durch das Alter der Bauteile bedingt sein.

Literatur

[1] *Reflexion, Brechung und Beugung*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2022.

Anhang

V400 - Reflexion, Beugung und Brechung

Aufgabe 1) Reflexion

Einfallswinkel α_1	Ausfallswinkel α_2
70°	70°
60°	55°
50°	46°
40°	37°
30°	27°
20°	18°
10°	11°
45°	41°

Aufgabe 2)

α_1	β
70°	38°
60°	36°
50°	34°
40°	28,5°
30°	26°
20°	13,5°
10°	12,5°
45°	7°

Aufgabe 4)

α_1	rot	grün
60°	38°	36°
50°	42°	43°
40°	47°	48°
30°	53°	52°
20°	58°	60°
10°	61°	63°

Aufgabe 5)

Winkel	Ordnung k	rot	grün	Gitterlinien
0°	0	0	0	100
	1	10,5	10,5	
	2	21	21	
	3	31,5	31,5	
	4	42	42	
10°	0	0	0	300
	1	10,5	10,5	
	2	21	21	
	3	31,5	31,5	
	4	42	42	
20°	0	0	0	600
	1	10,5	10,5	
	2	21	21	
	3	31,5	31,5	
	4	42	42	

hinter

Abbildung 8: Originale Messdaten.