

V400

# Reflexion, Brechung und Beugung

Marc Schröder  
marc.schroeder@udo.edu

Svenja Dreyer  
svenja.dreyer@udo.edu

Durchführung: 11.04.2023

Abgabe: 17.04.2023

TU Dortmund – Fakultät Physik

# **Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Reflexion . . . . .	3
2.2 Brechung . . . . .	4
2.3 Prisma . . . . .	5
2.4 Wellenoptik und Beugung am Gitter . . . . .	6
<b>3 Durchführung</b>	<b>6</b>
3.1 Versuchsaufbau . . . . .	6
3.2 Untersuchung des Reflexionsgesetz . . . . .	8
3.3 Untersuchung des Brechungsgesetz . . . . .	8
3.4 Bestimmung des Austrittswinkel aus einem Prisma . . . . .	8
3.5 Bestimmung der Wellenlänge eines Lasers durch Verwendung eines Gitters	8
<b>4 Auswertung</b>	<b>9</b>
4.1 Das Reflexionsgesetz . . . . .	9
4.2 Das Brechungsgesetz . . . . .	9
4.3 Planparallele Platte . . . . .	10
4.4 Prisma . . . . .	11
4.5 Beugung am Gitter . . . . .	11
<b>5 Diskussion</b>	<b>12</b>
<b>6 Anhang</b>	<b>13</b>
<b>Literatur</b>	<b>16</b>

# 1 Zielsetzung

In diesem Versuch sollen die grundlegenden Gesetzmäßigkeiten von Licht bei Kontakt mit verschiedenen Materialien untersucht werden. Dabei werden die Phänomene der Reflexion, Brechung und Beugung untersucht.

## 2 Theorie

Licht wird im Allgemeinen als ein Teil des Spektrums von elektromagnetischer Strahlung im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm bezeichnet. Damit besitzt Licht erst einmal die klassischen Welleneigenschaften und folgt an Grenzübergängen zu anderen Medien den Maxwellgleichungen. Daher kann es sich um Objekte beugen und in den Schattenbereich von vollständig absorbierenden oder reflektierenden Hindernissen eindringen. Dieses Phänomen wird Beugung genannt. Außerdem gilt das Superpositionsprinzip für Lichtwellen, die sich überlagern. Diese Phänomene sind allerdings nur bei der Wechselwirkung mit Objekten in der Größenordnung der Wellenlänge relevant. Bei der Wechselwirkung in deutlich größeren Maßstäben können die Lichtwellen näherungsweise als Strahlen in Richtung der Wellennormale beschrieben werden. Dieser Teil der Optik heißt geometrische Optik und in ihr lassen sich Übergänge zu anderen Medien besonders einfach beschreiben. Lichtstrahlen verlaufen dort geradlinig und wechselwirken bei Kreuzung der Strahlen nicht. Im Allgemeinen teilt sich das Licht bei Grenzübergängen zu anderen Medien in einen transmittierenden Anteil  $T$ , der in das Medium eindringt, und einem reflektierenden Anteil  $R$ , der an der Grenzfläche nur abgelenkt wird. Die Anteile müssen gemäß  $R + T = 1$  die gesamte Intensität der einfallenden Welle tragen.

### 2.1 Reflexion

In Abbildung 1 ist eine Reflexion schematisch dargestellt. Das Reflexionsgesetz, das den Einfallswinkel  $\alpha_1$  und den Reflexionswinkel  $\alpha_2$  in Zusammenhang setzt, lautet

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

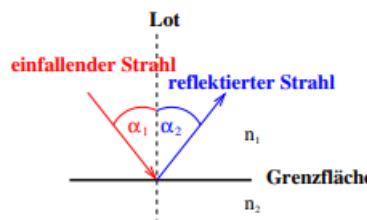


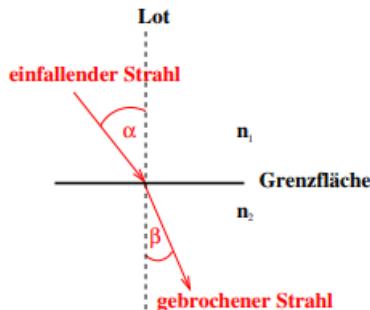
Abbildung 1: Reflexion an einer Grenzfläche[2].

## 2.2 Brechung

Das Phänomen der Brechung tritt auf, wenn Licht in ein anderes Medium mit anderen elektromagnetischen Eigenschaften eintritt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten  $v$  von Licht unterscheiden sich wegen diesen Unterschieden, bei verschiedenen Materialien. Beim Übergang zwischen zwei Medien ändert sich daher die Richtung des Lichtstrahls, wie in Abbildung 2 dargestellt. Die Brechung wird durch das Snelliuss Brechungsgesetz

$$n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \beta \Leftrightarrow \frac{n_1}{n_2} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \quad (2)$$

beschrieben, wobei  $\alpha$  der Winkel des einfallenden Strahls und  $\beta$  der Winkel des gebrochenen Strahls zur Flächennormale ist.  $n$  ist eine einheitenlose Zahl, die Brechungsindex genannt wird und das Verhältnis eines Materials zum Vakuum beziehungsweise zu Luft beschreibt. Der Brechungsindex in Luft entspricht mit  $n = 1.000292$  fast dem Brechungsindex von 1, also dem Vakuum [2]. Das Material mit dem größeren Brechungsindex wird optisch dichter genannt. Beim Übergang in ein optisch dichteres Material wird ein Lichtstrahl zur Flächennormale hin gebrochen.



**Abbildung 2:** Brechung beim Übergang in ein optisch dichteres Medium[2]

In Tabelle 1 sind die Brechungsindizes einiger Licht durchlässiger Materialien aufgelistet.

**Tabelle 1:** Brechungsindizes verschiedener Stoffe[1].

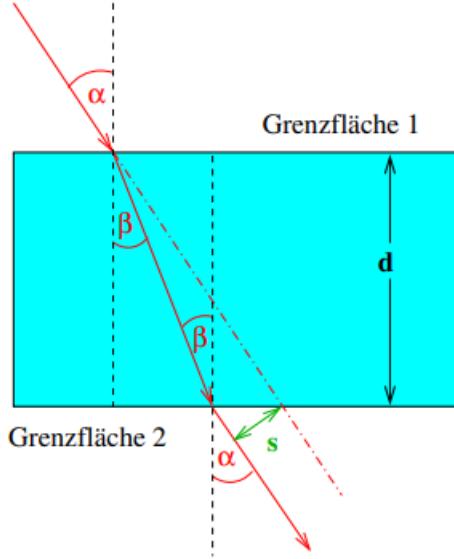
Material	Brechungsindex $n$
Luft	1,000 292
Wasser	1,333
Kronglas	1,52
Plexiglas	1,49
Diamant	2,42

Nun wird ein Objekt mit planparallelen Grenzflächen, das gegenüber Luft optisch dicht ist, betrachtet. Fällt auf eine solche Platte ein Lichtstrahl, wie in Abbildung 3 dargestellt, wird der Lichtstrahl an beiden Grenzflächen im gleichen Verhältnis einmal hin und einmal

weg von der Flächennormale gebrochen. Dies resultiert darin, dass der Lichtstrahl im gleichen Winkel die Platte verlässt wie er eingetreten ist. Der einzige Unterschied, der durch das hineinbringen der Platte entsteht ist ein Strahlenversatz  $s$ , der durch die Formel

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

beschrieben werden kann. Dabei beschreibt  $\alpha$  den Einfallswinkel,  $\beta$  den Brechungswinkel und  $d$  die Dicke der durchlaufenden Platte.



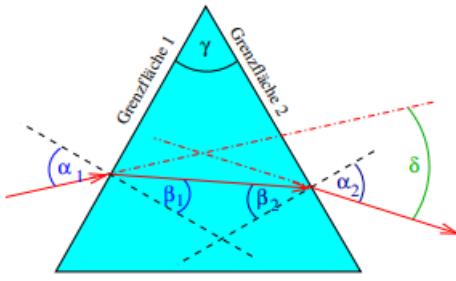
**Abbildung 3:** Strahlenversatz beim Durchlaufen einer planparallelen Platte[2].

### 2.3 Prisma

Ein Prisma ist ein Objekt mit einem größeren Brechungsindex als Licht, bei dem die Grenzflächen nicht parallel zueinander stehen. Diese Eigenschaft macht ein Prisma besonders geeignet um die Dispersion von Licht bei Grenzübergängen zu zeigen. Die Lichtstrahlen unterschiedlicher Wellenlängen werden, auf Grund der verschiedenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Licht im neuen Medium, unterschiedlich stark gebrochen. Dadurch, dass die Grenzflächen nicht parallel sind, wird die Aufspaltung in verschiedene Brechungswinkel beim Austritt nicht aufgehoben, sondern verstärkt. In Abbildung 4 ist der Strahlengang eines monochromatischen Lichtstrahls dargestellt. Der zugehörige Ablenkwinkel  $\delta$  kann durch die Gleichung

$$\delta = (\alpha_1 + \alpha_2) - (\beta_1 + \beta_2) \quad (4)$$

beschrieben werden.  $\beta_1$  und  $\beta_2$  können über das Brechungsgesetz nach Gleichung (2) aus  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$ , sowie über die Beziehung  $\beta_1 + \beta_2 = \gamma$ , bestimmt werden.



**Abbildung 4:** Darstellung eines Strahlengangs durch ein Prisma[2].

## 2.4 Wellenoptik und Beugung am Gitter

Gitter sind Objekte, bei denen die undurchlässigen Bereiche in Größenordnungen der Wellenlänge vorliegen. Bei Licht sollten die Abstände der Spalten im  $\mu\text{m}$  Bereich liegen. Dann wirkt jeder Spalt wie eine Punktquelle für eine Lichtwelle, die alle zueinander kohärent sind, da sie aus der gleichen Ursprungswelle entstanden sind. Dadurch ergibt sich ein Interferenzmuster. Die konstruktiv interferierenden Stellen, also die Stellen wo sich das Licht aus dem Gitter positiv verstärken, lassen sich unter einem Winke  $\phi$  zum "0-ten Maximum", der Teil des Lichts der mittig senkrecht zum Gitter interferiert, beobachten. Dabei sind Maxima bei verschiedenen Winkeln beobachtbar. Jedem Maximum wird dabei eine Beugungsordnung  $k$  zugeschrieben. Mit größer werdendem Winkel der Maxima steigt die Beugungsordnung an. Aus den gemessenen Winkel der einzelnen Maxima mit Ordnung  $k$  und der Kenntnis des Gitterabstands  $d$  lässt sich die Wellenlänge des einfallenden Lichts durch

$$\lambda = d \frac{\sin \phi}{k} \quad (5)$$

bestimmen. [2]

## 3 Durchführung

### 3.1 Versuchsaufbau

In diesem Versuch werden die optischen Eigenschaften von Licht untersucht. Dafür werden zwei Laser mit unterschiedlicher Wellenlänge als Quelle eines fokussierten Lichtstrahls verwendet. Der eine Laser emittiert rotes Licht der Wellenlänge  $\lambda = 635 \text{ nm}$  und der andere grünes Licht der Wellenlänge  $\lambda = 532 \text{ nm}$ . In Abbildung 5 ist der generelle Versuchsaufbau dargestellt. Alle Elemente sind auf einer transparenten Grundplatte angeordnet, so dass verschiedene Vorlagen, wie eine Winkeleinteilung, zur quantitativen Bestimmung der Größen darunter platziert werden können. In der Mitte der Platte kann ein zu untersuchendes optisches Element, wie sie in Abbildung 6 dargestellt sind, platziert werden. Der Laser befindet sich im festen Abstand zur Mitte der Platte. Er kann allerdings in der Winkelposition verändert werden. Beim Aufbau der optischen

Messvorrichtungen ist zu beachten, dass die optischen Elemente nur am Rand angefasst werden dürfen, da der Fettfilm die Oberflächen der Elemente beschädigen kann.

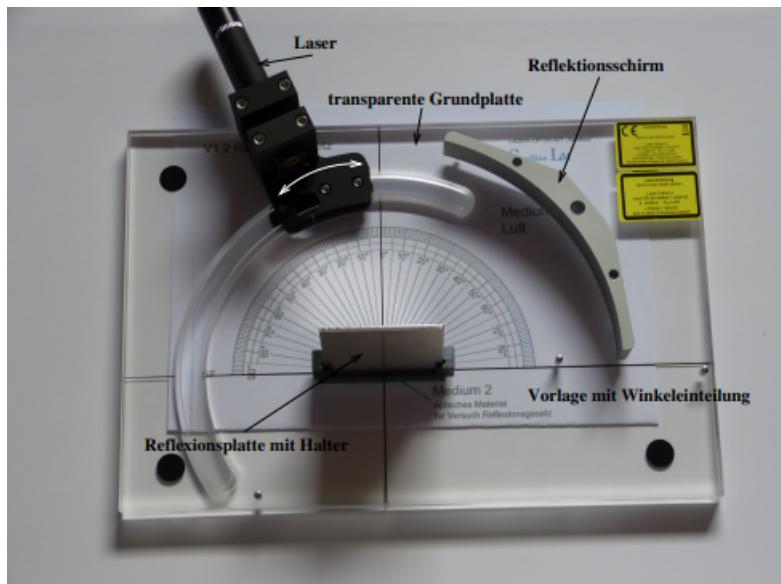


Abbildung 5: Grundaufbau des Versuchs[2]

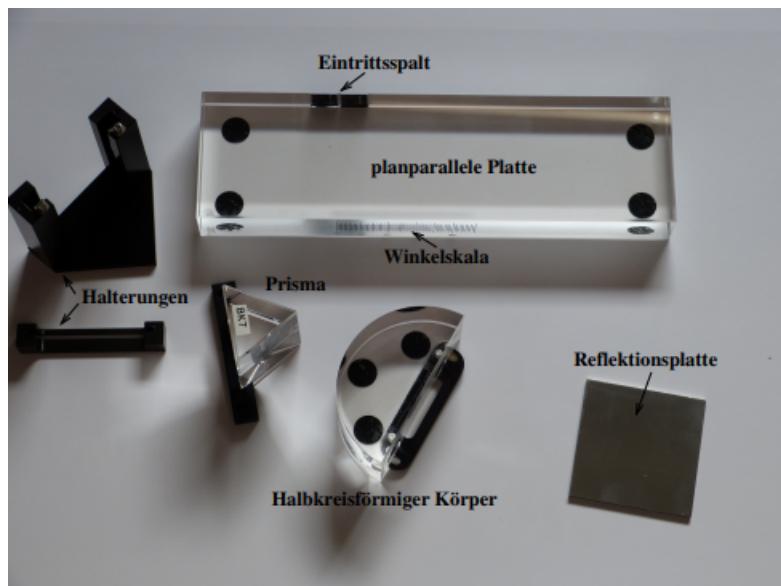


Abbildung 6: Optische Elemente[2]

### **3.2 Untersuchung des Reflexionsgesetz**

Für diesen Versuch wird in der Mitte der Platte eine Reflexionsplatte angebracht. Als Vorlage wird eine Winkeleinteilung unter die Grundplatte gelegt, sodass Einfalls- und Ausfallswinkel gemessen werden können. Als Lichtquelle wird der grüne Laser eingeschaltet. Nun wird in jedem Messvorgang der Einfallswinkel durch Ablesen der Position des Lasers an der Winkelskala gemessen und der Ausfallswinkel wird durch Ablesen der Winkelposition des auf der Reflexionsplatte auftreffenden Laserstrahls gemessen. Nach jedem Messvorgang wird die Winkelposition des Lasers verändert, bis 7 Messvorgänge durchgeführt worden sind.

### **3.3 Untersuchung des Brechungsgesetz**

Nun wird die Reflexionsplatte durch die planparallele Platte aus Plexiglas ersetzt. Es wird wieder der grüne Laser verwendet. Das emittierte Licht des Lasers wird nun nicht mehr reflektiert. Stattdessen dringt es in das Material ein und wird dort gebrochen. Der Einfallswinkel wird wie bei der Reflexion bestimmt. Der Brechungswinkel lässt sich an einer Skala der planparallelen Platte ablesen. Diese ist so präpariert, dass der Lichtstrahl an einer bestimmten Stelle eindringt und so dem klar sichtbaren Austrittspunkt einem Brechungswinkel zugeordnet werden kann. Die Messung wird für 7 verschiedene Einfallswinkel durchgeführt.

### **3.4 Bestimmung des Austrittswinkel aus einem Prisma**

In diesem Versuchsteil wird auf die Plattenmitte ein Prisma angebracht. Es werden, wie bei den vorherigen Versuchen die Einfallswinkel und die Ausfallwinkel zur Flächennormale der Austrittsgrenzfläche gemessen. Für diese Messung wird eine neue Vorlage, sowie ein spezieller Winkelschirm, verwendet. Der Winkelschirm wird gemäß der Vorlage so justiert, dass der gut sichtbare Auftrittspunkt des Laserstrahls auf dem Schirm dem Winkel zur Flächennormale entspricht. Dadurch kann am Schirm dieser Winkel direkt abgelesen werden. Die Messung wird bei 5 verschiedenen Einfallswinkeln im Bereich  $10^\circ$  bis  $60^\circ$  und jeweils für beide Laser wiederholt. Da der Laserstrahl im Prisma mehrmals reflektiert wird, tritt aus verschiedenen Stellen des Prismas ein Strahl heraus. Diese besitzen allerdings eine geringere Intensität als der zu beobachtende Strahl. Daher wird bei der Untersuchung darauf geachtet nur den austretenden Strahl mit der höchsten Intensität zu beachten.

### **3.5 Bestimmung der Wellenlänge eines Lasers durch Verwendung eines Gitters**

Nun sollen das Interferenzbild eines Gitters untersucht werden. Dafür wird erneut eine neue Winkelskala benutzt. Diese ist deutlich größer und ermöglicht eine genauere Messung in geringeren Winkelbereichen ( $0^\circ$ - $30^\circ$ ). Die Vorlage wird nun allerdings vor die Platte und nicht unter die Platte gelegt. Bevor das Gitter auf die eingezeichnete Position gestellt wird, muss der Laser so justiert werden, dass er auch bei genau  $0^\circ$  auf dem,

entsprechend der Vorlage aufgebauten Winkelschirm auftrifft. Daraufhin können die 3 verschiedenen zu Verfügung stehenden Gitter mit 600 Linien/mm, 300 Linien/mm und 100 Linien/mm aufgestellt werden. Die Messung wird bei jedem Gitter und mit beiden Lasern durchgeführt. Gemessen wird nur der Winkel der einzelnen auf dem Schirm zu beobachtenden Intensitätsmaxima. Jedem Maximum wird dabei eine Beugungsordnung gemäß der Entfernung zu  $0^\circ$  zugeordnet.

## 4 Auswertung

### 4.1 Das Reflexionsgesetz

Die gemessenen Einfallswinkel  $\alpha_1$  und Reflexionswinkel  $\alpha_2$  werden in der Tabelle 2 dargestellt.

**Tabelle 2:** Messwerte zur Überprüfung des Reflexionsgesetzes.

$\alpha_1/^\circ$	$\alpha_2/^\circ$
20	18
25	24
30	28
35	32
40	36
45	41
50	45

### 4.2 Das Brechungsgesetz

Die gemessenen Einfallswinkel  $\alpha$  und Brechungswinkel  $\beta$  werden in der Tabelle 3 aufgelistet. Zur Berechnung des Brechungsindex  $n$  von Plexiglas wird die Formel

$$n = \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} \quad (6)$$

verwendet. Die gemessene Werte werden zur Berechnung eingesetzt und ebenfalls in der Tabelle 3 dargestellt.

**Tabelle 3:** Messwerte zur Überprüfung des Brechungsgesetz.

$\alpha/^\circ$	$\beta/^\circ$	$n$
10	7	1.42
20	13.5	1.46
30	19.5	1.49
40	25.5	1.49
50	31	1.48
60	36	1.47
70	48.5	1.25

Für die Berechnung des Brechungsindex für Plexiglas wird nun der Mittelwert berechnet. Daraus ergibt sich ein Brechungsindex von

$$n = 1.43.$$

Um die Lichtgeschwindigkeit  $v$  im Plexiglas zu bestimmen wird der Zusammenhang aus 2 verwendet. Dabei ist  $n_1$  der Brechungsindex von Luft, welcher 1 beträgt und  $v_1 = 2.99 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Somit ergibt sich für die Lichtgeschwindigkeit im Plexiglas

$$v_{\text{Plexi}} = 208\,601\,391,65 \text{ m/s}.$$

### 4.3 Planparallele Platte

Zur Bestimmung des Strahlenversatz  $s$  werden zwei Methoden verwendet. Bei der ersten Methode werden die gemessenen Einfallswinkel  $\alpha$  und Ausfallwinkel  $\beta$  aus der Tabelle 3 verwendet und in die Formel 3 eingesetzt. Dabei beträgt die Dicke der Platte  $d = 5,85 \text{ cm}$ . Bei der zweiten Methode wird der Winkel  $\beta_{\text{berechnet}}$  mithilfe von 6 berechnet und anschließend der Strahlenversatz bestimmt. Für den Brechungsindex wird das Ergebnis  $n = 1.43$  aus 4.2 verwendet.

Die Ergebnisse werden in der Tabelle 4 dargestellt.

**Tabelle 4:** Berechneter Strahlenversatz mithilfe zweier verschiedener Methoden.

$\alpha/^\circ$	1. Methode		2. Methode	
	$\beta/^\circ$	$s/cm$	$\beta_{\text{berechnet}}/^\circ$	$s/cm$
10	7	0.30	6.97	0.31
20	13.5	0.68	13.83	0.64
30	19.5	1.13	20.46	1.03
40	25.5	1.62	26.71	1.50
50	31	2.22	32.39	2.09
60	36	2.94	37.27	2.84
70	48.5	3.23	41.08	3.75

## 4.4 Prisma

Bei dem verwendeten Prisma handelt es sich um ein Prisma aus Kornglas. Dieser hat einen brechenden Winkel von  $\gamma = 60^\circ$ . Um die Ablenkung  $\delta$  der beiden Laser am Prisma zu berechnen, wird die Formel 4 verwendet. Die berechneten Ergebnisse werden in der Tabelle 5 dargestellt.

**Tabelle 5:** Messwerte und berechnete Ablenkung zweier Laser an einem Prisma.

$\alpha_1 / {}^\circ$	Grüner Laser		Roter Laser	
	$\alpha_2 / {}^\circ$	$\delta_{\text{grün}}$	$\alpha_2 / {}^\circ$	$\delta_{\text{rot}}$
30	74	44	75	45
35	65	40	66	41
40	59.5	39.5	58	38
45	52	37	52	37
50	47	37	46	36

## 4.5 Beugung am Gitter

Für die verwendeten Gitter wurden zunächst die Gitterkonstanten berechnet, indem der Kehrwert der Anzahl/mm gebildet wird. Das Gitter mit 600 Linien/mm hat eine Gitterkonstante  $d = 1,66 \mu\text{m}$ . Für 300 Linien/mm ist  $d = 3,33 \mu\text{m}$  und für 100 Linien/mm beträgt die Gitterkonstante  $d = 10 \mu\text{m}$ . Zur Berechnung der Wellenlänge wird die Formel 5 verwendet. Die Messwerte, sowie die berechneten Wellenlängen für den roten Laser werden in der Tabelle 6 und die für den grünen Laser in 7 dargestellt.

**Tabelle 6:** Messwerte und berechnete Wellenlänge des roten Lasers.

$d/\mu\text{m}$	$k$	$\varphi / {}^\circ$	$\lambda / \text{nm}$
1.66	1	22	621.8
3.33	1	11	635.3
	2	21.5	610.2
	3	33	604.5
10	1	3	523.3
	2	6.5	566.0
	3	10	578.8
	4	14	604.8
	5	21	716.7

**Tabelle 7:** Messwerte und berechnete Wellenlänge des grün Lasers.

	$d/\mu m$	$k$	$\varphi/^\circ$	$\lambda/nm$
	1.66	1	19	540.4
	3.33	1	9	520.9
		2	18	514.5
		3	28	521.1
	10	1	3	523.3
		2	5.5	479.2
		3	8.5	492.6
		4	11.5	498.4
		5	14.5	500.7

Um die Wellenlänge des jeweiligen Lasers zu bestimmen, wird der Mittelwert aus den berechneten Werten der Tabellen gebildet. Somit ergeben sich die Wellenlängen

$$\lambda_{\text{rot}} = 606.82$$

und

$$\lambda_{\text{grün}} = 510.15.$$

## 5 Diskussion

Aufgrund dessen, dass der Einfallswinkel nicht mit den Reflexionswinkel übereinstimmen, konnte das Reflexionsgesetz nicht bewiesen werden. Dies könnte unter anderem an Ablesungsfehler liegen. Der Winkel konnte auf  $\pm 1^\circ$  gemessene werden. Jedoch auch mit dieser Abweichung stimmen  $\alpha_1$  mit  $\alpha_2$  zum größten Teil nicht überein.

Der Theoriewert des Brechungsindex von Plexiglas liegt bei

$$n_{\text{theorie}} = 1.49.$$

Der im Versuch berechnete Brechungsindex beträgt

$$n_{\text{berechnet}} = 1.43.$$

Somit ergibt sich eine Abweichung von 4,02 %.

Die Abweichung des gemessenen Ausfallwinkel  $\beta$  und des berechneten  $\beta_{\text{berechnet}}$  lassen sich aufgrund von Ablesungsfehler erklären. Die größte Abweichung hat der Einfallswinkel  $\alpha = 70^\circ$  mit 15,29 %. Bei diesem Einfallswinkel haben somit auch die beiden berechneten Strahlenversätze die größte Abweichung von 13,86 %. Die kleinste Abweichung der Strahlenversätze ist bei einem Einfallswinkel von  $\alpha = 10^\circ$  mit einer Abweichung von 3,22 %. Durch das berechnen der Ausfallwinkel, kann der Strahlenversatz genauer berechnet

werde, da Unsicherheiten nur beim ablesen der gemessenen Einfallswinkel auftreten können. Bei der 1. Methode gibt es durch das Ablesen beider Winkel eine weitere Fehlerquelle.

Die Wellenlängen der Laser sind in der Theorie

$$\lambda_{\text{rot, theorie}} = 635 \text{ nm}$$

und

$$\lambda_{\text{grün, theorie}} = 532 \text{ nm}.$$

Die berechneten Wellenlängen sind

$$\lambda_{\text{rot}} = 606.82$$

und

$$\lambda_{\text{grün}} = 510.15$$

Damit besitzt der rote Laser eine Abweichung von 4,43 % und der grüne Laser eine Abweichung von 4,10 %.

## 6 Anhang

V400

### 1) Reflexionsgesetz

Einfall  
 $\alpha_1 = 20^\circ$

Austritt  
 $\alpha_2 = 18^\circ$

$\alpha_r = 30^\circ$

$\alpha_t = 40^\circ$

$\alpha_n = 50^\circ$

$\alpha_h = 45^\circ$

$\alpha_s = 41^\circ$

$\alpha_a = 35^\circ$

$\alpha_d = 32^\circ$

$\alpha_x = 25^\circ$

$\alpha_c = 24^\circ$

### 2) Brechungsgesetz

$\alpha = 10^\circ$

$\beta = 7^\circ$

$\alpha = 20^\circ$

$\beta = 13.5^\circ$

$\alpha = 30^\circ$

$\beta = 19.5^\circ$

$\alpha = 40^\circ$

$\beta = 25.5^\circ$

$\alpha = 50^\circ$

$\beta = 31^\circ$

$\alpha = 60^\circ$

$\beta = 36^\circ$

$\alpha = 70^\circ$

$\beta = 48.5^\circ$

### 3) Blank parallele Platte

Messwerte aus 2 verwenden

### 4) Prisma

Eintritt  
Grunddauer:

$\alpha_1 = 30^\circ$

$\alpha_2 = 70^\circ$

$\alpha_r = 35^\circ$

$\alpha_i = 65^\circ$

$\alpha_t = 40^\circ$

$\alpha_c = 65^\circ$

$\alpha_n = 50^\circ$

$\alpha_h = 75^\circ$

$\alpha_s = 55^\circ$

$\alpha_a = 60^\circ$

$\alpha_d = 45^\circ$

$\alpha_x = 50^\circ$

$\alpha_c = 75^\circ$

$\alpha_t = 66^\circ$

$\alpha_r = 58^\circ$

$\alpha_i = 52^\circ$

$\alpha_s = 44^\circ$

$\alpha_a = 46^\circ$



## Literatur

- [1] Dietmar Mende und Günter Simon. „Wellen“. In: *Physik-Gleichungen und Tabellen*, S. 272–325. DOI: 10.3139/9783446438613.007. eprint: <https://www.hanser-elibrary.com/doi/pdf/10.3139/9783446438613.007>. URL: <https://www.hanser-elibrary.com/doi/abs/10.3139/9783446438613.007>.
- [2] *Versuchsanleitung zu V400*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2023.