

V400

Reflexion, Brechung und Beugung

Philip Jaletzky
philip.jaletzky@udo.edu

Matthias Maile
matthias.maile@udo.edu

Durchführung: 15.06.2021

Abgabe: 22.06.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Reflexion	3
2.2 Brechung	4
2.3 Reflexion und Transmission	4
2.4 Wellenoptik	5
3 Durchführung	6
3.1 Versuchsaufbau	6
3.2 Durchführung	7
4 Vorbereitung	8
5 Auswertung	8
5.1 Reflexionsgesetz	9
5.2 Brechungsgesetz	10
5.3 Strahlversatz	11
5.4 Prisma	12
5.5 Beugung am Gitter	13
6 Diskussion	15
Literatur	15

1 Zielsetzung

In diesem Versuch werden grundlegende Gesetzmäßigkeiten der Strahlenoptik, die aus den Phänomenen der Reflexion, Brechung und Beugung von Licht resultieren, untersucht.

2 Theorie

Wellen und ihre Ausbreitung werden in der Strahlenoptik mit Lichtstrahlen beschrieben. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit und somit auch die lokale Lichtgeschwindigkeit in unterschiedlichen Materialien unterschiedlich ist, entsteht beim Übergang von einem Material in ein anderes der Effekt der Brechung. Der Lichtstrahl wird gebrochen und verändert seine Richtung. Diese Änderung berechnet sich durch die Beziehung

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (1)$$

hier sind v die Geschwindigkeiten und n die Brechungsindizes in den jeweiligen Materialien. Der Einfallswinkel ist α und der Brechungswinkel β .

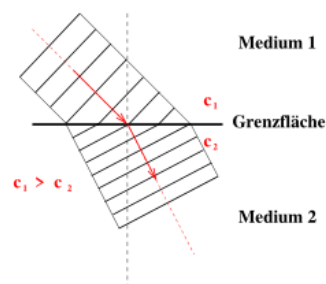


Abbildung 1: Schema der Brechung mit der Beziehung der Ausbreitungsgeschwindigkeiten. [3]

Werden zwei Materialien verglichen, wird das Material mit höherer Ausbreitungsgeschwindigkeit als optisch dichter bezeichnet und das andere Material als optisch dünner. Bei diesem Experiment ist das optisch dünnere Medium immer Luft mit $n \approx 1$. Im Bereich der Strahlenoptik bzw. geometrischen Optik sind Lichtstrahlen innerhalb eines homogenen Mediums immer geradlinig und unterschiedliche Strahlen interferieren nicht miteinander.

2.1 Reflexion

Wird ein Lichtstrahl an einer ebenen Fläche reflektiert, so ist nach dem Reflexionsgesetz der Einfallswinkel α_1 gleich dem Reflexionswinkel α_2 . Dies ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt.

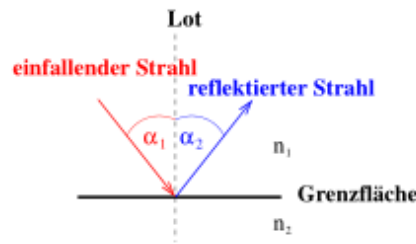


Abbildung 2: Verhalten eines Lichtstrahls bei Reflexion mit Einfallswinkel und Reflexionswinkel. [3]

2.2 Brechung

Beim Auftreffen auf ein Medium mit einem anderem Brechungsindex n wird der Lichtstrahl unter einer Richtungsänderung gebrochen (siehe Abbildung 3). Diese Brechung erfolgt nach dem Gesetz von Snellius:

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

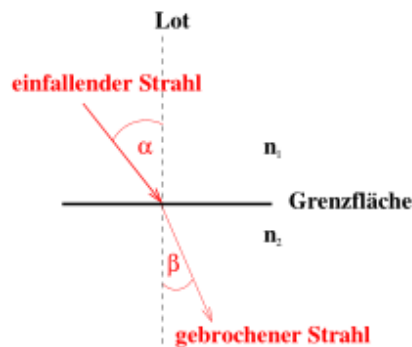


Abbildung 3: Verhalten eines gebrochenen Lichtstrahls mit Einfallswinkel und Brechungswinkel. [3]

2.3 Reflexion und Transmission

Im Normalfall wird ein Lichtstrahl weder komplett gebrochen noch komplett reflektiert, in der Regel wird ein Teil der Intensität transmittiert und ein Teil gebrochen. In diesem Fall ergeben die Intensitäten dieser beiden Teile wieder die Intensität des einfallenden Strahls.

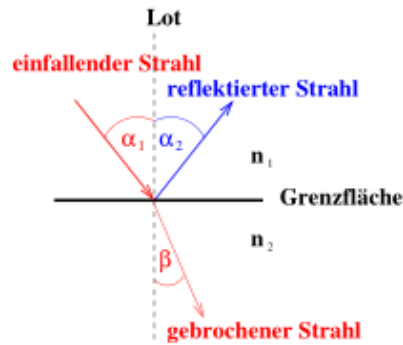


Abbildung 4: Verhalten eines Lichtstrahls bei Reflexion und Transmission mit Einfallswinkel, Reflexionswinkel und Brechungswinkel. [3]

2.4 Wellenoptik

Die Strahlenoptik kann allerdings nicht alle beobachtbaren Phänomene wie zum Beispiel die Beugung erklären. Um die Beugung zu erklären muss mit der Wellenoptik argumentiert werden.

In diesem Bereich besitzen Wellen eine Frequenz ν , die Ausbreitungsgeschwindigkeit v und somit auch eine Wellenlänge λ . Mehrere Wellen interferieren jetzt miteinander, das bedeutet, dass sich die Gesamtintensität der Wellen an einem Punkt aus der Summe der Einzelintensitäten berechnet (Superpositionsprinzip). Sind unterschiedliche Wellen aus der gleichen Frequenz und dem gleichen Phasengang aufgebaut, erzeugen sie ein so genanntes Interferenzbild. Bei Interferenz wird zwischen konstruktiver und destruktiver Interferenz unterschieden. Haben zwei Wellen gleiche Frequenz, Intensität und genau einen Gangunterschied von $\lambda/2$, so können sie sich komplett auslöschen.

In diesem Versuch wird auch die Beugung an einem Gitter genauer untersucht, es ist wichtig, dass die Dimensionen des Gitters klein im Vergleich zur Wellenlänge des Lichts sind. Hier besagt das Huygensche Prinzip: "Jeder Punkt einer Welle ist der Ausgangspunkt einer Elementarwelle gleicher Frequenz. Die Einhüllende aller Sekundärwellen stellt zu einem späteren Zeitpunkt die neue Lage der Wellenfront dar"[3]

Ein einfaches Beispiel hierzu ist der Einzelspalt. Trifft monochromatisches Licht, also eine ebene Wellenfront gleicher Phase auf einen Spalt der Breite a wird das Licht nach dem Huygenschen Prinzip in allen Punkten des Spalts gebeugt. Die neuen Wellenfronten haben dann dieselbe Frequenz, eine feste Phasenbeziehung und auf einem Schirm in einem bestimmten Abstand kann ein Interferenzbild gemessen werden. Die Intensitätsmaxima werden dann durch

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

berechnet. Hier beschreibt α den Winkel zur geradlinigen Ausbreitung des k 'ten Intensitätsmaximums bei einem Einzelspalt der Breite a und einer Wellenlänge λ .

Analog lässt sich ein Gesetz für ein Gitter aus N -Einzelspalten aufstellen:

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

In dieser Gleichung ist d die Gitterkonstante des gewählten Gitters.

3 Durchführung

3.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau basiert auf einer Grundplatte, an der ein grüner Laser und ein roter Laser angebracht sind (siehe Abbildung 5). Diese sind übereinander befestigt und lassen sich auf einem Halbkreis drehen. In der Mitte dieses Halbkreises lassen sich verschiedene optische Elemente befestigen. Die verschiedenen optischen Elemente sind in Abbildung 6 zu sehen.

Als Schutz vor dem Laserlicht ist auf der Platte ein Reflexionsschirm angebracht. Zum Messen der verschiedenen optischen Phänomene stehen einige unterschiedliche Versuchsvorlagen zur Verfügung, die unter die Platte gelegt werden können, um die Winkel abzulesen.

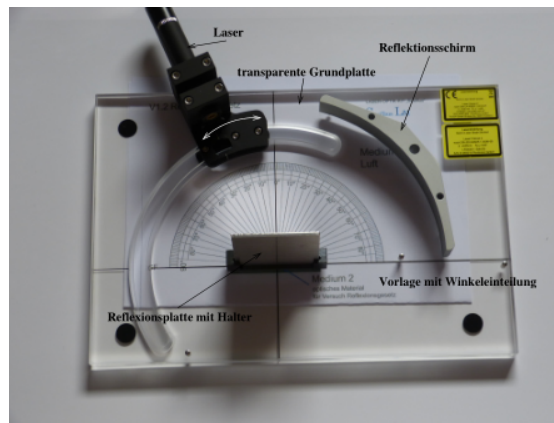


Abbildung 5: Die genutzte Grundplatte. [3]

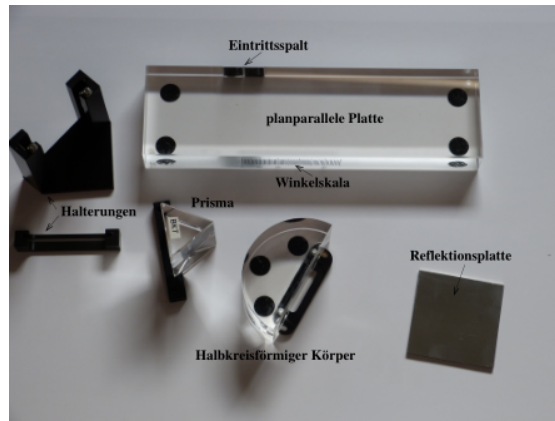


Abbildung 6: Die genutzten optischen Elemente. [3]

Bei dem Aufbau der unterschiedlichen Teil-Experimente ist darauf zu achten, dass die optischen Elemente nur an den Halterungen berührt werden, da die Oberflächen durch den Fettfilm der Finger beschädigt werden können.

3.2 Durchführung

Aufgabenteil 1

Für Aufgabenteil 1 wird ein Spiegel auf die Grundplatte gesetzt und für den grünen Laser 7 Messpaare aus Einfallswinkel und auftretendem Reflexionswinkel gemessen.

Aufgabenteil 2

In Aufgabenteil 2 wird die planparallele Platte (siehe Abbildung 6) aufgesetzt und es werden für den grünen Laser 7 Messpaare aus dem Einfallswinkel und Brechungswinkel abgelesen. Die Platte wird so positioniert, dass man den Brechungswinkel an der planparallelen Platte ablesen kann.

Aufgabenteil 3

Für Aufgabenteil 3 (Berechnung des Strahlversatzes) können die Messwerte aus Aufgabenteil 2 genutzt werden.

Aufgabenteil 4

Nun wird die planparallele Platte durch das Prisma ersetzt und die entsprechende Vorlage unter die Platte geschoben, sodass der Einfallswinkel und der Ausfallswinkel aus dem Prisma abgelesen werden können. Hier werden jeweils 5 Messpaare für die beiden sichtbaren Winkel für den grünen und den roten Laser aufgenommen.

Aufgabenteil 5

Zuletzt werden für die Gitter mit den Gitterkonstanten 600, 300 und 100, für rotes und grünes Licht jeweils für alle sichtbaren Beugungsordnungen auf beiden Seiten die Winkel-Abstände der Maxima zum Mittelpunkt vermessen.

4 Vorbereitung

Als Vorbereitung sollten verschiedene Brechungsindize aus passender Literatur herausgesucht werden. Diese sind in Tabelle 1 angegeben. Wegen der Unsicherheit für Kronglas

Tabelle 1: Brechungsindex verschiedener Materialien. [1]

Material	Brechungsindex n
Luft	1,000292
Wasser	1,33
Kronglas	1,46 ... 1,65
Plexiglas (PMMA)	1,49
Diamant	2,42

wird mit $n(\text{Kronglas}) = 1,55$ gerechnet.

Ferner sollte für die Liniendichten 600, 300, 100 Linien/mm die Gitterkonstante berechnet werden. Dies ist der Kehrwert der Dichte, damit folgen

$$d\left(100 \frac{\text{Linien}}{\text{mm}}\right) = 10 \mu\text{m}, \quad d\left(300 \frac{\text{Linien}}{\text{mm}}\right) = 3,3 \mu\text{m}, \quad d\left(600 \frac{\text{Linien}}{\text{mm}}\right) = 1,67 \mu\text{m}. \quad (5)$$

5 Auswertung

Im nachfolgenden Teil sollen die Messdaten ausgewertet werden. Dazu werden die Formeln für Mittelwert und Standardabweichung

$$\mu(T) = \bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (6)$$

$$\sigma(T) = \sigma_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n}} \quad (7)$$

verwendet. Die beiden Formeln beziehen sich jeweils auf n Messwerte.

5.1 Reflexionsgesetz

In diesem Teil soll das Reflexionsgesetz $\alpha_1 = \alpha_2$ überprüft werden. Es folgt direkt das Verhältnis

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = 1. \quad (8)$$

Zu sechs verschiedenen Einfallswinkeln wurde der Ausfallwinkel gemessen, die Messdaten sowie das Winkelverhältnis sind in Tabelle 2 angegeben. Aus den Werten für das Verhältnis

Tabelle 2: Messwerte und Winkelverhältnis für das Reflexionsgesetz. Die Winkel sind in Grad.

α_1	α_2	$\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$
20	19,5	0,975
25	25,5	1,02
29	29,5	1,017
35	35,5	1,014
40	41	1,025
45	46	1,022
50	51	1,02

lassen sich Mittelwert und Standardabweichung berechnen

$$\mu\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right) = 1,013 \quad \sigma\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right) = 0,018. \quad (9)$$

Damit folgt das experimentell bestimmte Winkelverhältnis von

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = 1,013 \pm 0,018. \quad (10)$$

In Abbildung 7 sind die Messdaten grafisch dargestellt. Als Abweichung wurde für die Winkel grundsätzlich mit 1° gerechnet.

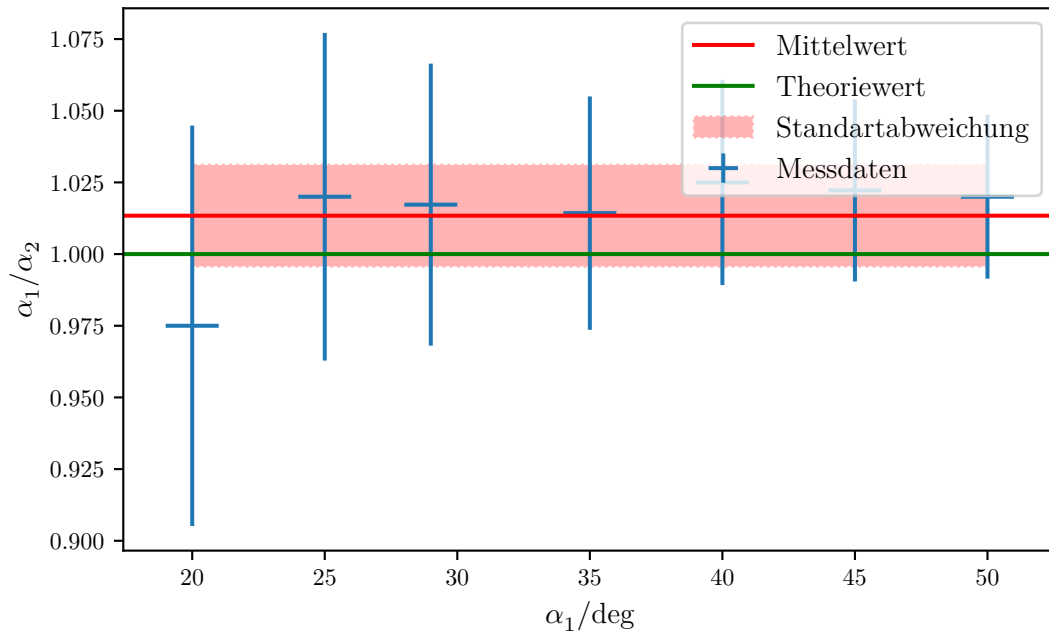


Abbildung 7: Winkelverhältnis aus den Messdaten sowie Mittelwert, Standardabweichung und Theoriewert 1.

5.2 Brechungsgesetz

Nun soll das Brechungsgesetz

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n \quad (11)$$

untersucht werden. Das vorgehen ist ähnlich zu dem für das Reflexionsgesetz im vorherigen Abschnitt. Hier ist jedoch das Verhältnis des sinus zu Ein- und Brechungswinkel von Interesse. Die Messwerte, der sinus der Winkel sowie das Verhältnis der beiden Sinuswerte sind in Tabelle 3 gegeben. Das weitere Vorgehen ist ebenso analog. Mittelwert und Standardabweichung folgen aus den oben genannten Gleichungen, mit diesen lässt sich hier für den Brechungsindex

$$n = 1,474 \pm 0,022 \quad (12)$$

errechnen. Als Theoriewert folgt aus der Literatur [1]

$$n_{\text{Theo}} = 1,49. \quad (13)$$

Die für die Rechnung verwendeten Werte sind auch nochmals in Abbildung 8 dargestellt. Wie im vorangegangenen Teil wurde auch hier mit einer Messungenauigkeit von einem Grad gerechnet.

Tabelle 3: Messwerte und Winkelverhältnis für das Brechungsgesetz. Die Winkel sind in Grad.

α	β	$\sin \alpha$	$\sin \beta$	$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$
30	19	0,500	0,326	1,536
35	24	0,574	0,407	1,410
40	26	0,643	0,438	1,466
50	31	0,766	0,515	1,487
55	34	0,819	0,559	1,465
60	36	0,866	0,588	1,473
70	39,5	0,940	0,636	1,477

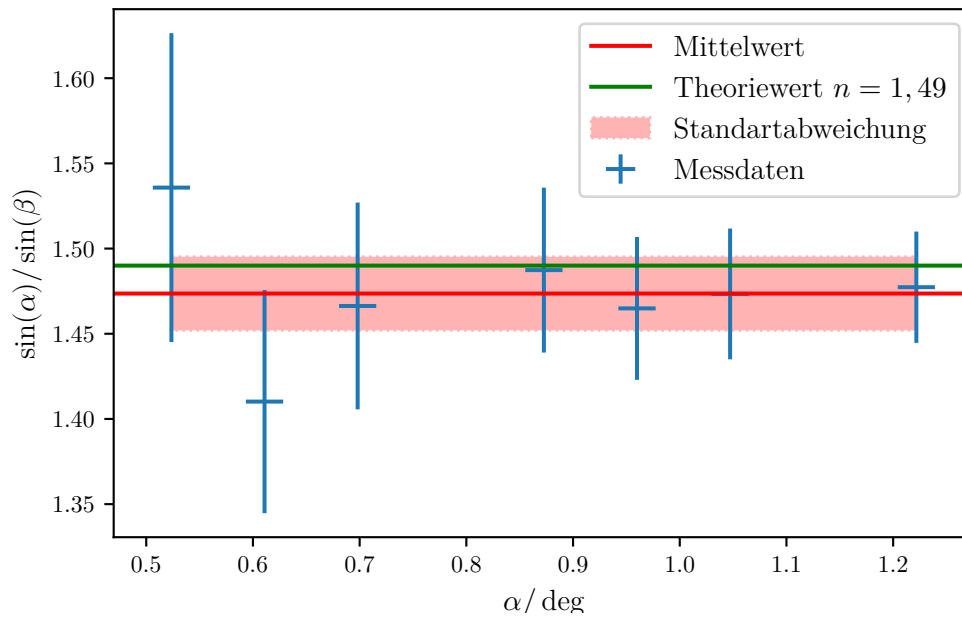


Abbildung 8: Verhältnis der Werte von Einfallswinkel- und Brechungswinkel.

5.3 Strahlversatz

Für die in Unterabschnitt 5.2 gemessenen Werte lässt sich auch der Strahlversatz berechnen. Für planparallele Platten ist dieser gegeben durch

$$s = d \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta}. \quad (14)$$

Dabei ist $d = 5,85 \text{ cm}$ die Dicke der Platte. Die errechneten Werte sind in Tabelle 4 angegeben.

Tabelle 4: Strahlversatz für die gemessenen Winkelpaare α und β .

α	β	s/cm
30	19	3,4
35	24	2,7
40	26	3,2
50	31	3,7
55	34	3,7
60	36	4
70	39,5	4,7

5.4 Prisma

In diesem Teil soll nun die Ablenkung δ von einem Prisma für zwei Wellenlängen bestimmt werden. Mit der Formel

$$\delta = (\alpha_1 + \alpha_2) - (\beta_1 + \beta_2) \quad (15)$$

und dem Zusammenhang

$$\beta_i = \arcsin\left(\frac{\sin \alpha_i}{n}\right), \quad (16)$$

welcher direkt aus dem Snelliusschen Brechungsgesetz folgt, lässt sich δ bestimmen. Die Messwerte sowie die Ergebnisse für die Ablenkung sind in Tabelle 5 dargestellt. Die Abhängigkeit $\delta(\alpha_1)$ ist auch in Abbildung 9 grafisch dargestellt.

Tabelle 5: Messwerte und errechnete Werte für das Prisma.

α_1	α_2^{rot}	$\alpha_2^{\text{grün}}$	β_1	β_2^{rot}	$\beta_2^{\text{grün}}$	δ^{rot}	$\delta^{\text{grün}}$
30	77	78	18,8	38,9	39,1	49,2	50,0
35	65	66	21,7	35,8	36,1	42,5	43,1
40	57	58	24,5	32,8	33,2	39,7	40,3
45	51	52	27,1	30,1	30,6	38,8	39,3
50	45	45,5	29,6	27,1	27,4	38,2	38,5

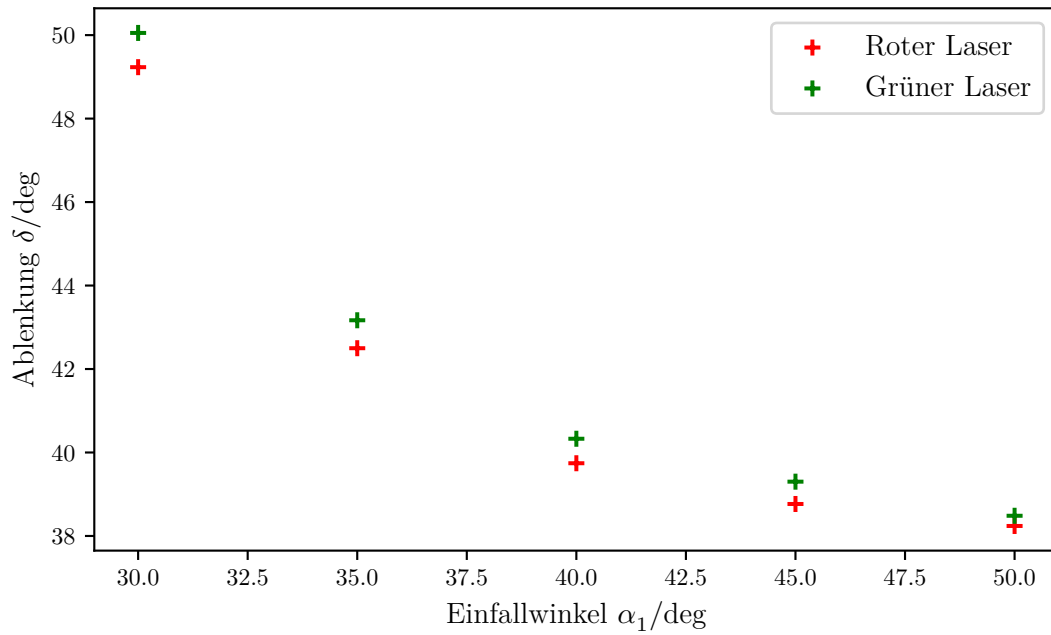


Abbildung 9: Die errechneten Werte der Ablenkung in Abhängigkeit vom eingestellten Einfallswinkel α_1 .

5.5 Beugung am Gitter

Für den letzten Teil wurden drei Gitter mit 100, 300 bzw. 600 Linien/mm betrachtet. Die Gitterkonstanten sind jeweils die Kehrwerte mit

$$d\left(100 \frac{\text{Linien}}{\text{mm}}\right) = 10 \mu\text{m} \quad d\left(300 \frac{\text{Linien}}{\text{mm}}\right) = 3,3 \mu\text{m} \quad d\left(600 \frac{\text{Linien}}{\text{mm}}\right) = 1,67 \mu\text{m}. \quad (17)$$

Die Messwerte sind in den nachfolgenden Tabellen gegeben. Es wurde jeweils nach der linken und rechten Streuung getrennt, wodurch für jeden Laser und jede Ordnung je zwei Winkel φ_i gemessen wurden. Für die Auswertung wurde zunächst mit der Formel

$$\lambda = d \frac{\sin \varphi}{k} \quad (18)$$

mit den jeweiligen Werten für d für jeden Winkel die Wellenlänge bestimmt. Zuletzt wurde von diesen Wellenlängen Mittelwert und Standardabweichung berechnet. Das ergab die Werte in Tabelle 9. Zuletzt kann mit der Python Bibliothek uncertainties über die in Tabelle 9 angegeben Werte gemittelt werden. Mit dieser erhält man die Wellenlängen

$$\lambda^{\text{rot}} = (645 \pm 5) \text{nm} \quad \lambda^{\text{grün}} = (538 \pm 6) \text{nm} \quad (19)$$

Tabelle 6: Messwerte zu Streuung an einem 100 Linien/mm Gitter. Die Winkel sind in Grad

Beugungsordnung k	$\varphi_1^{\text{grün}}$	$\varphi_2^{\text{grün}}$	φ_1^{rot}	φ_2^{rot}
1	3	3,2	3,8	3,8
2	6	6,2	7,2	7,5
3	9,1	9,5	11,1	11,1
4	12,2	12,6	15	15
5	15,5	16		
6	18,8	19,2		
7	22	22,8		

Tabelle 7: Messwerte zu Streuung an einem 300 Linien/mm Gitter. Die Winkel sind in Grad

Beugungsordnung k	$\varphi_1^{\text{grün}}$	$\varphi_2^{\text{grün}}$	φ_1^{rot}	φ_2^{rot}
1	9	9,3	11	11
2	18,2	19	22,2	22,8

Tabelle 8: Messwerte zu Streuung an einem 600 Linien/mm Gitter. Die Winkel sind in Grad

Beugungsordnung k	$\varphi_1^{\text{grün}}$	$\varphi_2^{\text{grün}}$	φ_1^{rot}	φ_2^{rot}
1	18,8	19,5	23,5	22,8

Tabelle 9: Ergebnisse für die Wellenlängen der zwei Laser.

	λ^{rot}	$\lambda^{\text{grün}}$
100 Linien/mm	$(648 \pm 11,1) \text{ nm}$	$(540 \pm 11,2) \text{ nm}$
300 Linien/mm	$(631 \pm 5,7) \text{ nm}$	$(526 \pm 9,8) \text{ nm}$
600 Linien/mm	$(656 \pm 9,4) \text{ nm}$	$(548 \pm 9,6) \text{ nm}$

6 Diskussion

Im ersten Teil wurde das Reflexionsgesetz überprüft. Das Verhältnis zwischen Einfall und Ausfallwinkel, welches in der Theorie den Wert 1 hat, wurde experimentell mit dem Ergebnis

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = 1,013 \pm 0,018 \quad (20)$$

bestimmt. Die Abweichung liegt bei weniger als 2% und der Theoriewert liegt innerhalb einer Standardabweichung.

Die Messung zum Brechungsgesetz verlief ähnlich gut. Es wurde ein Brechungsindex

$$n = 1,474 \pm 0,022 \quad (21)$$

experimentell nachgewiesen. Wie bei der ersten Messung, liegt der Literaturwerte für Plexiglas aus PMMA

$$n_{\text{Lit}} = 1,49 \quad (22)$$

auch hier im Intervall einer Standardabweichung zum gemessenen Wert.

Für das Prisma wurde der Ablenkwinkel δ berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 grafisch dargestellt. Die errechneten Werte sind in Tabelle 10 nochmals zusammengefasst.

Tabelle 10: Zusammenhang zwischen Einfallswinkel α_1 und Ablenkung δ für rotes und grünes Licht.

α_1	δ^{rot}	$\delta^{\text{grün}}$
30	49,2	50,0
35	42,5	43,1
40	39,7	40,3
45	38,8	39,3
50	38,2	38,5

Im letzten Teil wurde Beugung am Gitter betrachtet. Dabei wurde mit den Winkeln der Maxima bei drei verschiedenen Gittern die Wellenlänge des verwendeten Lasers berechnet. Die einzelnen Messungen sind untereinander konsistent mit ihren Ergebnissen. Abschließend wurden die Wellenlängen

$$\lambda^{\text{rot}} = (645 \pm 5)\text{nm} \quad \lambda^{\text{grün}} = (538 \pm 6)\text{nm}$$

ermittelt, welche im Bereich der Literaturwerte für die entsprechenden Farbspektren liegen [2].

$$\lambda_{\text{Lit}}^{\text{rot}} = 650 \text{ bis } 750\text{nm} \quad \lambda_{\text{Lit}}^{\text{grün}} = 490 \text{ bis } 575\text{nm} \quad (23)$$

Literatur

- [1] *Brechungsindex der Luft und anderer Stoffe*. 2021. URL: <https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Brechungsindex> (besucht am 22.06.2021).

- [2] *Licht Wellenlänge*. 2019. URL: <https://www.frustfrei-lernen.de/optik/licht-wellenlaenge.html> (besucht am 22.06.2021).
- [3] *Versuchsanleitung, V400: Reflexion, Brechung und Beugung*. Fakultät Physik, TU Dortmund.