

VERSUCH NUMMER 400

Reflexion, Brechung und Beugung

Irgendjemand

irgend.jemand@tu-dortmund.de

Someone

some.one@tu-dortmund.de

Durchführung: 19.04.2022

Abgabe: 26.04.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	1
2 Theoretische Grundlagen	1
2.1 Strahlenoptik	1
2.2 Reflexion	1
2.3 Brechung	2
2.3.1 Planparallele Platte	2
2.3.2 Prisma	3
2.4 Beugung	3
3 Versuchsaufbau und Durchführung	4
3.1 Reflexion	5
3.2 Brechung	5
3.2.1 Planparallele Platte	5
3.2.2 Prisma	5
3.2.3 Gitter	5
4 Auswertung	6
4.1 Reflexion	6
4.2 Brechung	6
4.3 Plan-parallele Platte	7
4.4 Prisma	7
4.5 Gitter	7
5 Diskussion	8
Literatur	8

1 Zielsetzung

In diesem Versuch sollen die Reflexions-, Brechungs- und Beugungseigenschaften von sichtbarem Licht untersucht werden. Es werden verschiedene optische Elemente verwendet um diese nachzuweisen.

2 Theoretische Grundlagen

Für die Beschreibung von Brechung und Reflexion genügt es die Gesetze der Strahlenoptik anzuwenden. Mit dieser können die Effekte ausreichend beschrieben werden.

2.1 Strahlenoptik

Das Licht besteht aus Elektromagnetischer Strahlung und kann in der Strahlenoptik durch die Darstellung der Wellenberge beschrieben werden. Dazu sind nur die Normalen die senkrecht zur Wellenfront dargestellt. Die Wellennormalen werden als Lichtstrahl bezeichnet. Zudem hat die Ausbreitung von Licht in verschiedenen Materialien eine andere Geschwindigkeit. Wenn Licht sich in einem Medium langsamer ausbreitet als in einem anderen wird dieses als optisch dünneres Material bezeichnet. Ist die Ausbreitung in einem Medium schneller wird dieses als optisch dichteres Medium bezeichnet. In einem Medium mit konstanter optischer Dichte bereitet sich der Lichtstahl geradlinig aus. Die Wellennormalen werden in Abbildung 1 dargestellt.

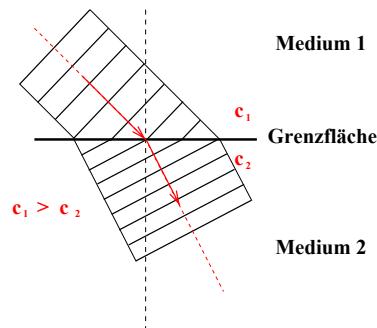


Abbildung 1: Abbildung der Wellennormalen und des Lichtstahls an einer Grenzfläche [1]

Die optische Dichte eines Materials ist im Brechungsindex festgehalten. Optisch dichtere Materialien besitzen einen größeren Brechungsindex als optisch dünnere Medien.

2.2 Reflexion

Ein fundamentales Gesetz der geometrischen Optik ist das Reflexionsgesetz.

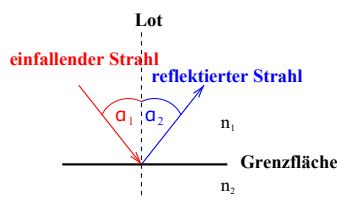


Abbildung 2: Abbildung der Reflexion an einer Grenzfläche [1]

Wenn ein Lichtstrahl wie in Abbildung 2 dargestellt gilt für den Einfallswinkel α_1 und dem Austrittswinkel α_2 immer die Beziehung.

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

2.3 Brechung

Das Phänomen der Brechung ist in Abbildung 3 dargestellt.

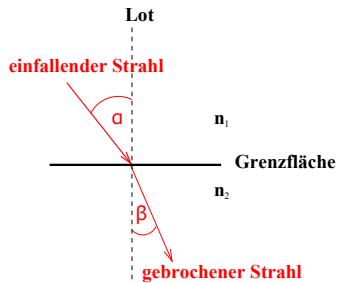


Abbildung 3: Abbildung der Brechung an einer Grenzfläche [1]

Für die Brechungsindizes n_1 und n_2 gilt für die Winkel α und β das Gesetz von Snellius

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

Durch dieses lassen sich auch die in Abbildung 1 dargestellten Geschwindigkeiten c_1 und c_2 bestimmen. Es gilt

$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c_1}{c_2}. \quad (3)$$

Tatsächlich treten aber auch beide Phänomene gleichzeitig auf wie in Abbildung 4 zu erkennen ist.

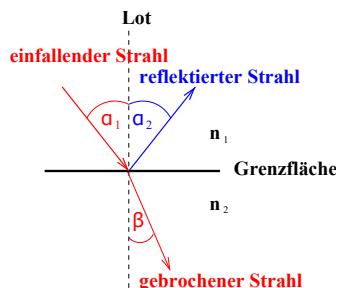


Abbildung 4: Abbildung der Reflexion und Brechung an einer Grenzfläche [1]

Dabei wird die Intensität des Lichtes auf die beiden Teilstrahlen gespalten. Bis auf kleine Absorptionsverluste bleibt die gesamte Energie aber erhalten. Diese Effekte werden nun an zwei spezifischen Beispielen dargestellt.

2.3.1 Planparallele Platte

Mit Hilfe der planparallelen Platte kann auf noch einem Weg das Brechungsgesetz getestet werden. Dazu wird der Strahl an einer Grenzfläche beobachtet. Dies ist in Abbildung 5 dargestellt.

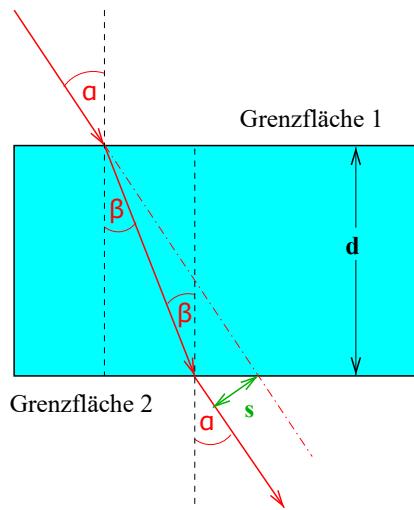


Abbildung 5: Strahlengang in der planparallele Platten. [1]

Der Lichtstrahl ändert nach der doppelten Brechung nicht seine Richtung sondern bekommt lediglich einen Versatz s . Dieser Versatz kann mit den Winkeln α und β durch

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

bestimmt werden. d beschreibt dabei die Breite der Platte.

2.3.2 Prisma

Das Phänomen der Brechung ist besonders auch in einem Prisma zu beobachten. In dem Prisma trifft der Lichtstrahl auf zwei Grenzflächen. Dies wird in Abbildung 6 dargestellt.

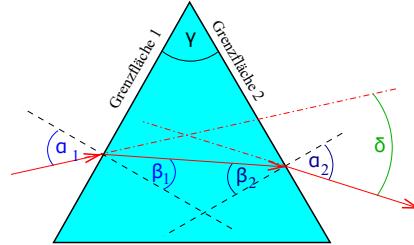


Abbildung 6: Strahlengang in einem Prisma[1]

Durch das bestimmen der Winkel α und β kann δ durch

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

berechnet werden. Außerdem können diese über das Brechungsgesetz $\sin \alpha = n \sin \beta$ und über die Winkelformel $\beta_1 + \beta_2 = \gamma$ mit $\gamma = 60^\circ$. Also lässt sich der Winkel δ durch

$$\delta = \alpha_1 + \alpha_2 - \left(\arcsin\left(\frac{\sin \alpha_1}{n}\right) + \arcsin\left(\frac{\sin \alpha_2}{n}\right) \right) \quad (6)$$

bestimmen.

2.4 Beugung

Um die Beugung von Licht an Spalten zu erklären genügt die vorherige Darstellung des Lichtes nicht mehr aus. Es müssen nun expliziter die Welleneigenschaften von Licht beachtet werden. Wenn Licht als Welle angesehen wird

kann dieser eine Frequenz f und eine Wellenlänge λ zugeordnet werden. Vor allem kann es bei diesen Wellen zur Interferenz kommen dies bedeutet das sich Intensitäten von verschiedenen Wellen gegenseitig auslöschen können. Dazu kann es aber nur kommen wenn diese die gleiche Phasenverschiebung und Frequenz haben. Wenn Licht auf einen Spalt mit einer im Vergleich zur Wellenlänge λ kleinen Öffnung der Länge a trifft kommt es an jedem Punkt zur Beugung. Die so neu entstandenen Strahlen können miteinander Interferieren. Dies beruht auf dem Prinzip von Huygen welches behauptet das jeder Punkt einer Welle auch der Ausgangspunkt einer weiteren Welle zu späterem Zeitpunkt sein kann. Weshalb die gebeugten Strahlen sowohl die selbe Frequenz als auch Phasenverschiebung besitzen und damit Interferenzfähig sind. Die Wellen erfahren auf ihrem weg zum Schirm einen unterschiedlichen Gangunterschied. Wenn dieser $\frac{\lambda}{2}$ beträgt löschen sich die Wellen aus. So kommt es zu Minima und Maxima am Schirm und es kann ein Interferenzmuster erkannt werden. Die Maxima können mit Hilfe der Gleichung 7 bestimmt werden. α beschreibt den Winkel vom Spalt zu einem Punkt auf dem Schirm. k ist eine Ganzzahl für das k -te Maximum von der Mitte des Schirms.

$$a \sin(\alpha) = k\lambda \quad (7)$$

Ähnliche Überlegungen führen zu einer Formel (8) für die Maxima bei Beugung an einem Gitter. Ein Gitter besteht lediglich aus N Einzelspalten.

$$d \sin(\alpha) = k\lambda \quad (8)$$

d beschreibt die Gitterkonstante.

3 Versuchsaufbau und Durchführung

Es werden zwei verschiedene Laser verwendet. Entweder ein roter Laser mit $\lambda = 640$ nm und ein grüner Laser mit $\lambda = 530$ nm. Der generelle Aufbau des Versuchs ist in Abbildung 7 dargestellt. Weitere Optische Elemente werden in Abbildung 8 gezeigt. Diese werden für die weiteren Versuche benötigt.

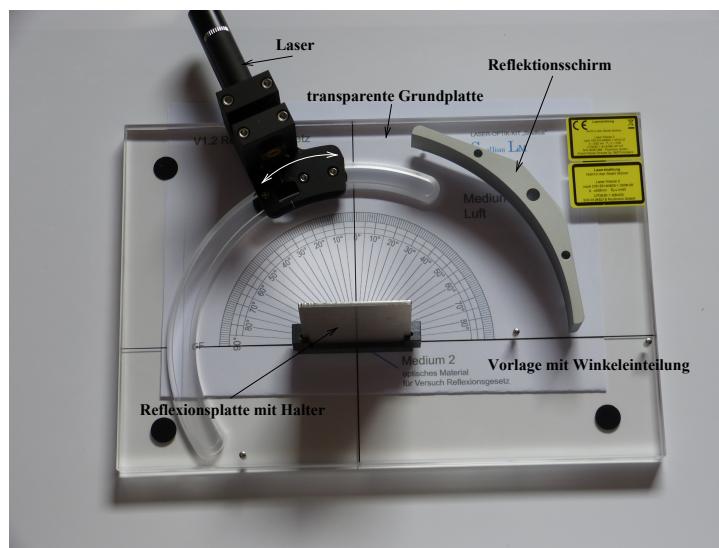


Abbildung 7: [1]

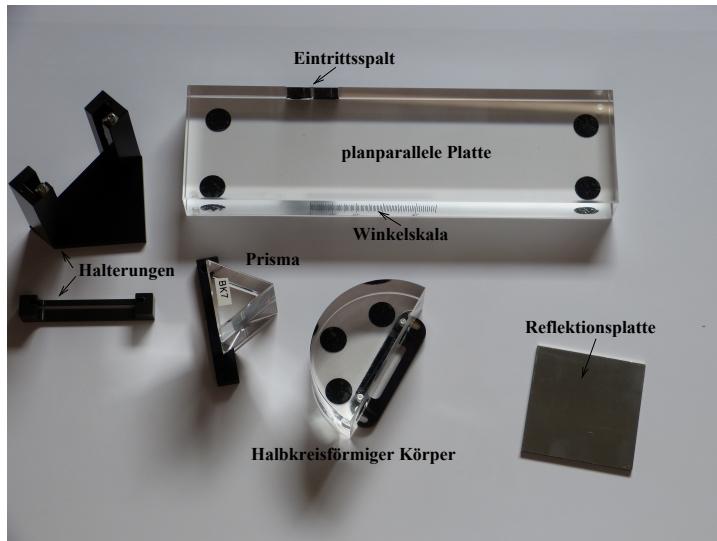


Abbildung 8: [1]

3.1 Reflexion

Um das Reflexionsgesetz nachzuweisen werden mit den in Abbildung 7 dargestellten Aufbau 7 Einfallswinkel eingestellt. Zu jedem wird an der Skala der Ausfallwinkel abgelesen. Zum Bestätigen des Gesetzes werden die Winkel verglichen.

3.2 Brechung

Zur Bestätigung des Brechungsgesetz wird eine planparallele Platte aus Plexiglas, wie in Abbildung 8 zu sehen, verwendet. Es wird ein Lichtstrahl des grünen Lasers in die planparallele Platte geleitet und an der Skala der Brechungswinkel abgelesen. Mit den Winkeln α und β kann so der Brechungsindex des Plexiglases errechnet werden. Dazu wird der Brechungsindex von Luft als etwa 1 angenommen. Damit gilt für den Brechungsindex von dem Plexiglas

$$n = \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)}. \quad (9)$$

3.2.1 Planparallele Platte

Die planparallele Platte wird verwendet um den Brechungsindex von Plexiglas zu bestimmen. Dazu wird der grüne Laser auf die Eintrittsfläche gerichtet und der Strahl wie in Unterunterabschnitt 2.3.1 verfolgt. Die Winkel α und β werden mit Hilfe der Winkelskala abgelesen. Mit diesen soll der Versatz s bestimmt werden. Zum Vergleich der Genauigkeit wird der Versatz s auch im Versuchsaufbau nachgemessen. Es werden aus 5 verschiedenen Winkeln Messungen aufgenommen.

3.2.2 Prisma

Für das Prisma werden beide Laser verwendet. Dazu wird das Prisma mit der passenden Skala auf die Vorrichtung gelegt. Zur Bestimmung der Winkel wird eine Winkelskala aufgestellt. Nun wird für $6 \alpha_1$ zwischen 10° und 60° der Winkel α_2 gemessen.

3.2.3 Gitter

Zur Bestimmung der Wellenlänge werden sowohl der rote als auch der grüne Laser auf Gitter mit verschiedenen Gitterkonstanten gelenkt. Sie werden so ausgerichtet, dass das Hauptmaxima mit $k = 0$ bei 0° liegt. Nun entstehen weitere Maxima. Diese werden durch die Anzahl der Maxima k beschrieben. Zu jedem Maxima wird der Winkel φ bestimmt. Mit den bestimmten Winkeln soll die Wellenlänge berechnet werden.

4 Auswertung

Es werden die verschiedenen Versuchsaufbauten einzeln ausgewertet.

4.1 Reflexion

Tabelle 1: Messwerte der Reflexion

$\alpha / {}^\circ$	$\beta / {}^\circ$
70	70
60	60
50	50
40	40
30	30
20	20
10	10

Die gemessenen Werte für den reflektierten Winkel sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Werte weisen dabei keine Abweichung von der erwarteten Formel $\alpha = \beta$. Es wird jedem Winkel aber eine Abweichung von $0,50^\circ$ zugeordnet. Weshalb die Formel im Rahmen der Abweichung stimmt.

4.2 Brechung

Für die Berechnung des Brechungsindex werden die bestimmten Daten aus Tabelle 2 verwendet. Über Gleichung 9 kann so auch das angegebene n bestimmt werden.

Tabelle 2: Messwerte der planparallelen Platte

$\alpha / {}^\circ$	$\beta / {}^\circ$	n
70	39	$1,493\,19 \pm 0,016\,77$
60	36	$1,491\,34 \pm 0,019\,73$
50	31	$1,487\,35 \pm 0,024\,19$
40	26	$1,493\,08 \pm 0,031\,42$
30	20	$1,461\,90 \pm 0,041\,43$
20	14	$1,465\,10 \pm 0,063\,79$
10	6,0	$1,661\,25 \pm 0,160\,57$

Alle Mittelwerte einer N -fach gemessenen Größe x werden über die Formel

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (10)$$

berechnet. Der zugehörige Fehler des Messwertes berechnet sich dann über

$$\Delta \bar{x} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}. \quad (11)$$

Setzt sich eine zu berechnende Größe aus mehreren mit Unsicherheit behafteten Messwerten zusammen, so ist die Unsicherheit dieser Größe über die Gaußsche Fehlerfortpflanzung gegeben

$$\Delta f(x_1, \dots, x_N) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot (\Delta x_i)^2 \right]}. \quad (12)$$

Bei der Angabe des Endergebnisses werden schließlich alle statistischen Teilfehler addiert. Alle Berechnungen sowie das Bestimmen der Unsicherheiten werden mit Python 3.8.8 und entsprechenden Bibliotheken¹ durchgeführt. Auch bei diesen Werten ist zu beachten das es immer einen Fehler beim Ablesen von $0,50^\circ$ gibt. So kann $n = 1,51 \pm 0,05$ berechnet werden.

Mit diesem n wird die Lichtgeschwindigkeit in Plexiglas bestimmt. Es gilt

$$v = \frac{c}{n} = (1,99 \pm 0,06) \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad (13)$$

4.3 Plan-parallele Platte

Zur Bestimmung der Wegänderung s werden auch die aus Unterabschnitt 4.2 bekannten Daten verwendet. Über die Gleichung 4 kann der Versatz s_1 bestimmt werden. Der Abstand d beträgt dabei 5,8 cm. Zum Vergleich wird mit dem Brechungsindex, der in Unterabschnitt 4.2 bestimmt wurde, der Winkel β berechnet. Es wird also mit dem Brechungsgesetz zunächst β berechnet und wieder mit Gleichung 4 s_2 bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt. Zum Vergleich der Werte wird auch die Differenz $\Delta s = s_2 - s_1$ bestimmt.

Tabelle 3: Berechnete Werte für s

$\alpha / {}^\circ$	s_1 / cm	s_2 / cm	$\Delta s / \text{cm}$
70	$3,88 \pm 0,06$	$4,06 \pm 0,07$	$0,18 \pm 0,07$
60	$2,98 \pm 0,07$	$3,17 \pm 0,09$	$0,19 \pm 0,09$
50	$2,22 \pm 0,07$	$2,39 \pm 0,09$	$0,17 \pm 0,09$
40	$1,62 \pm 0,07$	$1,72 \pm 0,08$	$0,10 \pm 0,09$
30	$1,08 \pm 0,07$	$1,18 \pm 0,06$	$0,10 \pm 0,08$
20	$0,68 \pm 0,07$	$0,73 \pm 0,05$	$0,05 \pm 0,07$
10	$0,41 \pm 0,07$	$0,35 \pm 0,03$	$0,06 \pm 0,06$

4.4 Prisma

Für das Prisma werden die Winkel α_1 und α_2 bestimmt. Dabei wird einmal mit dem grünen und einmal mit dem roten Laser gemessen. Mit den Winkeln kann nach Gleichung 6 der Winkel δ bestimmt werden. Dazu wird für den Brechungsindex von Kronglas $n = 1.51[5]$ verwendet.

Tabelle 4: Messwerte des Prisma

$\alpha_1 / {}^\circ$	$\alpha_{2,\text{grün}} / {}^\circ$	$\alpha_{2,\text{rot}} / {}^\circ$	$\delta_{2,\text{grün}} / {}^\circ$	$\delta_{2,\text{rot}} / {}^\circ$
60	78	76	$62,5 \pm 2,8$	$60,9 \pm 2,8$
50	60	58	$44,4 \pm 2,3$	$43,2 \pm 2,3$
40	47	46	$32,7 \pm 1,9$	$32,3 \pm 1,8$
30	39	37	$25,0 \pm 1,5$	$24,1 \pm 1,4$
20	30	31	$17,5 \pm 1,1$	$17,9 \pm 1,1$
10	28	27	$13,2 \pm 0,8$	$12,9 \pm 0,8$

4.5 Gitter

Für die Bestimmung der Wellenlänge des Lichts werden die Daten aus Tabelle 5 verwendet. Diese wird dabei jeweils mit Gleichung 8 berechnet. Umgeformt ergibt sich also

$$\lambda = d \frac{\sin \varphi}{k}. \quad (14)$$

¹Numpy [2], Uncertainties [3] and Matplotlib [4]

Damit lässt sich der Mittelwert bilden und es ergibt sich für das grüne Licht $\lambda_{\text{grün}} = (528 \pm 9) \text{ nm}$ und für das rote $\lambda_{\text{rot}} = (627 \pm 9) \text{ nm}$.

Tabelle 5: Messwerte des Gitters

d / mm	k	$\varphi_{\text{rot}} / {}^\circ$	$\varphi_{\text{grün}} / {}^\circ$	$\lambda_{\text{rot}} / \text{nm}$	$\lambda_{\text{grün}} / \text{nm}$
0,017	1,0	23	19	638 ± 13	543 ± 14
0,0033	1,0	12	9,0	665 ± 29	521 ± 29
		22	18	624 ± 13	515 ± 14
0,010	1,0	2,3	3,0	400 ± 90	523 ± 87
	2,0	7,0	6,0	610 ± 40	523 ± 43
	3,0	11	9,0	636 ± 29	521 ± 29
	4,0	15	12	626 ± 21	520 ± 21
	5,0	19	15	635 ± 17	518 ± 17
	6,0	23	18	638 ± 13	515 ± 14
	7,0	27	22	637 ± 11	535 ± 12

5 Diskussion

Zunächst ist zu sagen das die beobachten Winkel bei der Reflexion immer einer Ungenauigkeit unterliegen und deshalb das Gesetz nur im Rahmen dieser bestätigt wurde. Zur Bestätigung der restlichen berechneten Werte werden die Literaturwerte verwendet. Für Plexiglas gilt $n_{\text{plex,lit}} = 1,5$ [5], dass bedeutet der berechnete Wert besitzt eine Abweichung von $(1,2 \pm 3,2)\%$. In Tabelle 2 wurde auch die Differenz Δs bestimmt. Der Mittelwert der Abweichung Δs beträgt $(1,0 \pm 0,6) \text{ mm}$. Diese Abweichung der Methoden ist relativ gering. Generell sollte der berechnete Winkel β bessere Ergebnisse liefern da aber der Brechungsindex auch durch Messungen bestimmt wurde unterliegt dieser einem Fehler. Dieser Fehler liegt aber wie oben erwähnt nur bei $(1,2 \pm 3,2)\%$ und die berechneten Werte für β sollten bessere Werte liefern. Die Werte für den Winkel δ in der Prisma Messung in Unterabschnitt 4.4 können nicht verglichen werden. Im Rahmen der Messunsicherheit sollten diese allerdings gute Werte liefern. Es ist aber zu beachten das Kronglas für verschiedene Zusammensetzungen unterschiedliche Brechungsindizes besitzen kann. Das heisst für bessere Werte muss der spezifische Brechungsindizes des Prismas besser bestimmt werden. Die berechneten Wellenlängen sollen mit den Literaturwerten verglichen werden. Für diese gilt $\lambda_{\text{grün,lit}} = 530 \text{ nm}$ [1] und $\lambda_{\text{rot,lit}} = 640 \text{ nm}$ [1]. Also ergibt sich eine Abweichung von $(0,8 \pm 1,6)\%$ für den grünen Laser und $(1,3 \pm 1,3)\%$ für den roten Laser. Diese geringen Abweichungen zeigen, dass die Wellenlänge gut durch diesen Versuch bestimmt werden kann.

Literatur

- [1] Versuch Nr. 400. Reflexion, Brechung und Beugung. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2022.
- [2] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: Computing in Science & Engineering 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [3] Eric O. Lebigot. Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [4] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: Computing in Science & Engineering 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [5] Refractive index database. Mikhail Polyanskiy. URL: <https://refractiveindex.info/> (besucht am 30.04.2022).