

V400

## **Reflexion, Brechung und Beugung**

Tahir Kamcili  
tahir.kamcili@udo.edu

Marina Andreß  
marina.andress@udo.edu

Durchführung: 08.06.2021

Abgabe: 15.06.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Reflexion und Brechung . . . . .	3
2.2 Beugung . . . . .	5
<b>3 Durchführung</b>	<b>6</b>
<b>4 Auswertung</b>	<b>7</b>
4.1 Reflexion . . . . .	7
4.2 Brechungsgesetz . . . . .	7
4.3 Strahlversatz . . . . .	8
4.4 Prisma . . . . .	9
4.5 Beugung am Gitter . . . . .	10
<b>5 Diskussion</b>	<b>12</b>
5.1 Reflexionsgesetz . . . . .	12
5.2 Brechungsgesetz . . . . .	12
5.3 Gitter . . . . .	13
<b>Literatur</b>	<b>13</b>

# 1 Zielsetzung

In diesem Versuch werden Reflexion, Brechung und Beugung auf ihre Gesetzmäßigkeiten überprüft.

## 2 Theoretische Grundlagen

Licht besteht aus elektromagnetischer Strahlung. Das für das menschliche Auge sichtbare Lichtspektrum befindet sich im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm, auf den sich in diesem Versuch beschränkt wird. Im folgenden werden verschiedene Phänomene mithilfe der Strahlen- und Wellenoptik näher erläutert.

### 2.1 Reflexion und Brechung

In der Strahlenoptik wird das Licht auf die Wellennormale, die senkrecht auf der Wellenfront steht und als Lichtstrahl bezeichnet wird, beschränkt. Mithilfe der Strahlenoptik können im folgenden zwei Vorgänge genauer betrachtet werden:

#### 1. Reflexion

Trifft ein Lichtstrahl auf eine Grenzfläche, so wird dieser zurückgeworfen, anstatt im Medium weiter zu propagieren. Dabei gilt das Reflexionsgesetz

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

das besagt, dass der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel ist.

#### 2. Brechung

Fällt ein Lichtstrahl auf eine Grenzfläche eines anderen Mediums mit Brechungsindex  $n$  und breitet sich in diesem aus, ändert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit und der Lichtstrahl ändert seine Richtung. Der Lichtstrahl wird gemäß des Gesetzes von Snellius gebrochen, nach dem gilt:

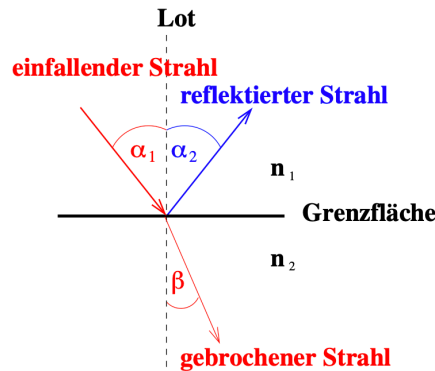
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (2)$$

Dabei sind  $n_1$  und  $n_2$  die Brechungsindizes des ersten und zweiten Mediums und  $v_1$  und  $v_2$  die jeweiligen Ausbreitungsgeschwindigkeiten. Das Material mit der größeren Ausbreitungsgeschwindigkeit wird als optisch dichter und das mit der kleineren als optisch dünner bezeichnet. Beim Übergang von einem optisch dünneren zu einem dichten Medium wird der Lichtstrahl zum Lot hin gebrochen. Da in diesem Versuch für den Brechungsindex  $n_1 \approx 1$  mit Luft als optisch dünnerem Medium gilt, kann das Brechungsgesetz zu

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n \quad (3)$$

vereinfacht werden.

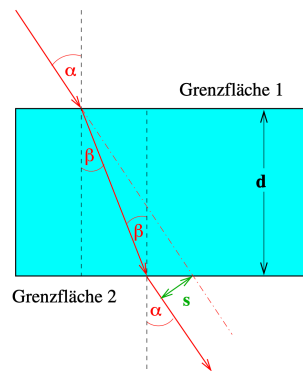
In der Realität finden zumeist Reflexion und Brechung gleichzeitig statt. Der Lichtstrahl teilt sich in einen Teil mit der Intensität  $R$  der reflektiert, und einen Teil mit der Intensität  $T$  der transmittiert wird auf. Dabei gilt stets  $R + T = 1$ . Das Prinzip der Reflexion und Brechung ist in Abbildung 1 dargestellt.



**Abbildung 1:** Reflexion und Brechung eines Lichtstrahls (Quelle: [8]).

### Planparallele Platten

Mit der Reflexion und Brechung kann nun der Strahlversatz an einer planparallelen Platte aus Abbildung 2 hergeleitet werden.



**Abbildung 2:** Strahlversatz an einer planparallelen Platte (Quelle: [8]).

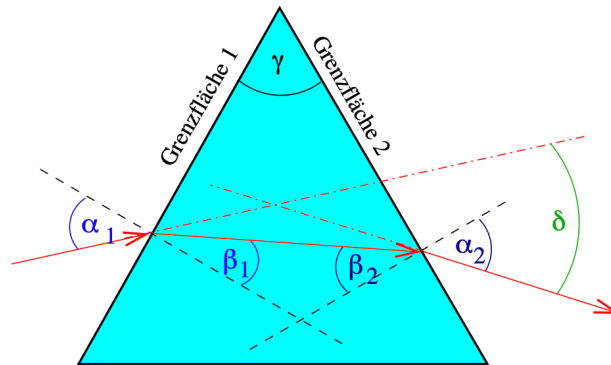
Der auf die planparallele Platte treffende Lichtstrahl wird am optisch dichteren Medium an der Grenzfläche zum Teil reflektiert und zum Lot gebrochen. Da der gebrochene Lichtstrahl an der zweiten Grenzfläche erneut gebrochen wird, diesmal jedoch zur Grenzfläche hin, erfährt dieser keine Richtungsänderung sondern nur einen Strahlversatz  $s$ , der durch

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

beschrieben werden kann.

## Prisma

Das optische Prisma ist in Abbildung 3 dargestellt.



**Abbildung 3:** Brechung am optischen Prisma (Quelle: [8]).

Die brechenden Kanten des Prismas durch die der Lichtstrahl ein- und austritt stehen nicht parallel zueinander und begrenzen den brechenden Winkel  $\gamma$ . Die Ablenkung

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

die durch zweifache Brechung an den Grenzflächen entsteht, ist abhängig von der Wellenlänge des Lichtes. Diese Abhängigkeit wird als Dispersion bezeichnet.

## 2.2 Beugung

Unter der Beugung versteht man die Ausbreitung des Lichtes im Schattenraum nachdem es auf ein Hindernis getroffen ist. Um das Phänomen der Beugung erklären zu können, wird sich nun auf die Wellenoptik bezogen. Charakteristische Welleneigenschaften sind die Wellenlänge  $\lambda$  und die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$ . Bei der Überlagerung von Wellen addieren sich die Intensitäten in jedem Punkt zu einer resultierenden Intensitätsverteilung. Wenn die einzelnen Wellenzüge dieselbe Frequenz und eine feste Phasenbeziehung haben, entsteht ein Interferenzbild. Abhängig von der Phasenbeziehung kommt es zur konstruktiven (verstärkenden) oder zur destruktiven (abschwächenden) Interferenz. Gelangt Licht durch ein Gitter, kommt es zur Beugung wenn die Spaltbreite  $d$  klein im Vergleich zur Wellenlänge ist. Für die Intensitätsmaxima des Interferenzmusters gilt die Beziehung

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

Dabei ist  $d$  die Gitterkonstante,  $\alpha$  der Winkel relativ zur gradlinigen Ausbreitungsrichtung und  $k$  die Ordnung des Maximums.

### 3 Durchführung

Der Versuchsaufbau besteht aus einer Glasplatte, auf der sich zwei übereinander gelegte Lasermodule im Halbkreis schieben lassen. Die Laser emittieren dabei grünes ( $\lambda = 532$  nm) und rotes ( $\lambda = 635$  nm) Licht. Auf der Platte befinden sich außerdem Befestigungsmöglichkeiten für diverse Objekte. Es gibt zudem die Möglichkeit, Schablonen unter die Glasplatte zu legen sowie Schirme aufzustellen, um Winkel besser ablesen zu können.

Zuerst wird ein Spiegel in der Mitte befestigt, um das Reflexionsgesetz zu untersuchen. Mithilfe einer passenden Schablone können die Ausfallswinkel  $\alpha_2$  für sieben Einfallswinkel  $\alpha_1$  abgelesen werden. Dabei wird der grüne Laser verwendet. Die gemessenen Winkel befinden sich in Tabelle 1

Für die Untersuchung des Brechungsgesetzes wird die planparallele Platte montiert und wieder der grüne Laser verwendet. Unter Verwendung einer anderen Schablone kann der Brechungswinkel  $\beta$  für sieben Einfallswinkel  $\alpha$  bestimmt werden, die sich in Tabelle 2 befinden.

Anschließend wird das Prisma platziert, und beide Laser eingeschaltet. Die Einfallswinkel  $\alpha_1$  sind für beide Laser gleich, jedoch werden für den grünen und roten Laser unterschiedliche Brechungswinkel gemessen, die in Tabelle 5 notiert sind.

Zuletzt werden drei unterschiedliche Gitter (600, 300 und  $100 \frac{\text{lines}}{\text{mm}}$ ) nacheinander platziert und jeweils die Interferenzmuster des roten und grünen Lasers auf einen Schirm projiziert. Es werden jeweils die Winkel der Intensitätsmaxima gemessen sowie die dazugehörige Ordnung notiert. Die Messwerte befinden sich in Tabelle

## 4 Auswertung

Im diesem Kapitel wird der Versuch ausgewertet. Bei jeder durchgeführten Messung besteht eine Messunsicherheit von  $\Delta\alpha = 0.5^\circ$ , zusätzlich wurden alle berechneten Unsicherheiten mit Python mit dem Paket `uncertainties`[4].

### 4.1 Reflexion

Um das Reflexionsgesetz  $\alpha_1 = \alpha_2$  zu überprüfen werden für 7 Einfallswinkel  $\alpha_1$  die Reflexionswinkel  $\alpha_2$  bestimmt. Die Messergebnisse befinden sich in der Tabelle 1.

**Tabelle 1:** Messwerte des Einfallswinkels  $\alpha_1$  und dem Reflexionswinkel  $\alpha_2$

$\alpha_1 / ^\circ$	$\alpha_2 / ^\circ$
20	20
30	30
40	40
45	45
50	50
60	60
70	70

Die Messergebnisse bestätigen ziemlich gut das Reflexionsgesetz.

### 4.2 Brechungsgesetz

Das Brechungsgesetz wird an der planparallelen Platte untersucht und der Brechungsindex wird an der Winkelskala abgelesen. Die Messergebnisse befinden sich in der Tabelle 2.

**Tabelle 2:** Messwerte des Einfallswinkels  $\alpha$ , dem Brechungswinkel  $\beta$  und dem Brechungsindex  $n$

$\alpha / ^\circ$	$\beta / ^\circ$	Brechungsindex $n$
10	7	$1.42 \pm 0.10$
20	13,5	$1.47 \pm 0.05$
30	20	$1.462 \pm 0.035$
40	25	$1.521 \pm 0.028$
50	31	$1.487 \pm 0.022$
60	35,5	$1.491 \pm 0.018$
70	39	$1.491 \pm 0.018$

Aus der ?? und dem Brechungsindex  $n_1 = 1$  und  $n_2 = n$  kann der Zusammenhang

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n \quad (7)$$

hergeleitet werden. Daraus lässt sich dann der Brechungsindex für die 7 Messergebnisse berechnen und mitteln. Die 7 berechneten Brechungsindizes befinden sich ebenfalls in der Tabelle 2. Alle Werte gemittelt ergeben sich zu

$$n = 1,478 \pm 0,018.$$

Zusätzlich lässt sich mit Hilfe der Gleichung 2 die Geschwindigkeit im Plexiglas bestimmen. Dazu wird die Gleichung nach  $v_2$  umgestellt, somit ergibt sich

$$v_2 = \frac{v_1}{n}. \quad (8)$$

Wenn  $n = 1.478 \pm 0.018$  und  $v_1 = c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  ergibt sich für die Ausbreitungsgeschwindigkeit

$$v_2 = 2,029 \cdot 10^8 \pm 0,025 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

### 4.3 Strahlversatz

Der Strahlversatz  $s$  durch einen Körper mit planparallelen Flächen ist gegeben durch die Formel

$$s = d \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta}. \quad (9)$$

Mithilfe dieser Gleichung lässt sich der Strahlversatz für jedes einzelne Messpaar berechnen. Der Strahlversatz für jedes einzelne Messpaar befindet sich in der Tabelle 3.

**Tabelle 3:** Messwerte des Einfallswinkels  $\alpha$ , dem Brechungswinkel  $\beta$  und dem berechneten Strahlenversatz  $s$

$\alpha / ^\circ$	$\beta / ^\circ$	Strahlenversatz $s / \text{cm}$
10	7	$0,31 \pm 0,05$
20	13,5	$0,68 \pm 0,05$
30	20	$1,08 \pm 0,05$
40	25	$1,67 \pm 0,05$
50	31	$2,22 \pm 0,04$
60	35,5	$2,98 \pm 0,04$
70	39	$3,877 \pm 0,029$

Zum Vergleich kann der Winkel  $\beta$  auch mit dem im vorherigen Kapitel berechneten Brechungsindex über das Gesetz von Snellius berechnet werden, sodass

$$\beta = \arcsin\left(\frac{\sin(\alpha)}{n}\right) \quad (10)$$

folgt. So ergibt sich für jedes  $\alpha$  ein neues  $\beta$  mit welchem der Strahlenversatz  $s$  neu berechnet werden kann. Die errechneten Werte befinden sich in der Tabelle 4.



**Tabelle 4:** Messwerte des Einfallswinkels  $\alpha$ , dem errechneten Brechungswinkel  $\beta$  und dem berechneten Strahlenversatz  $s$

$\alpha / ^\circ$	$\beta / ^\circ$	Strahlenversatz $s / \text{cm}$
10	$6,7494 \pm 0,0859$	$0,334 \pm 0,009$
20	$13,384 \pm 0,1661$	$0,693 \pm 0,017$
30	$19,767 \pm 0,2291$	$1,103 \pm 0,025$
40	$25,783 \pm 0,3437$	$1,596 \pm 0,033$
50	$31,226 \pm 0,4010$	$2,20 \pm 0,04$
60	$35,867 \pm 0,5156$	$2,95 \pm 0,04$
70	$39,476 \pm 0,5729$	$3,849 \pm 0,034$

#### 4.4 Prisma

Das Prisma besteht aus Kronglas. Dieses hat einen Brechungsindex von  $n_{\text{Kron}} = 1,51673$  [3]. Die Dispersion  $\delta$  ist im allgemeinen gegeben durch

$$\delta = (\alpha_1 + \alpha_2) - (\beta_1 + \beta_2) \quad (11)$$

$$= (\alpha_1 + \alpha_2) - \left( \arcsin \left( \frac{\sin(\alpha_1)}{n_{\text{kron}}} \right) + \arcsin \left( \frac{\sin(\alpha_2)}{n_{\text{kron}}} \right) \right), \quad (12)$$

wobei im allgemeinen die Winkelbeziehung  $\beta_1 + \beta_2 = \gamma$  hergeleitet werden. Im Prisma gilt im allgemein  $\gamma = 60^\circ$ .

Bei der Messung wurde mit einem grünen Laser und einem roten Laser gemessen. Die Messergebnisse befinden sich in der Tabelle 5. Mithilfe dieser und  $\gamma = 60^\circ$  lässt sich die Dispersion berechnen. Die berechneten Werte für diese sind in der Tabelle 6 eingetragen. Zusätzlich lässt sich noch über den Brechungsindex des Prismas die Dispersion berechnen. Diese Messergebnisse befinden sich in der Tabelle 7.

**Tabelle 5:** Messwerte des Einfallswinkels  $\alpha_1$  und den Austrittswinkel  $\alpha_2$ , je für das grüne und rote Laserlicht

$\alpha_1 / ^\circ$	Rot $\alpha_2 / ^\circ$	Grün $\alpha_2 / ^\circ$
30	81,5	83,5
40	61	61,5
50	50	50,5
60	41,6	42,4
70	36	36,7

**Tabelle 6:** Errechnete Werte für die Dispersion vom roten und grünen Laser

$\delta_{\text{Rot}} / ^\circ$	$\delta_{\text{Grün}} / ^\circ$
51,5	53,5
41,0	41,5
40,0	40,5
41,6	42,4
46,0	46,7

**Tabelle 7:** Errechnete Werte für die Dispersion vom roten und grünen Laser

$\delta_{\text{Rot}} / ^\circ$	$\delta_{\text{Grün}} / ^\circ$
51,55	53,33
40,71	41,02
39,32	39,58
40,82	41,19
44,91	45,21

## 4.5 Beugung am Gitter

Nun wird die Beugung der Laser am Gitter untersucht. Mithilfe des Zusammenhangs

$$\lambda = d \frac{\sin \varphi}{k} \quad (13)$$

kann bei bekannter Gitterkonstanten  $d$ , Ablenkwinkel  $\varphi$  und Beugungsordnung  $k$  die Wellenlänge berechnet werden. Die Messwerte der unterscheidlichen Gitter sind in der Tabelle 8, Tabelle 9, Tabelle 10. Es wird für jeden Laser die errechneten Wellenlängen  $\lambda$  gemittelt und die Standardabweichung mithilfe der Python Bibliothek `uncertainties` berechnet und einmal für alle Gitter und komplett gemittelt in Tabelle 11 angegeben.

**Tabelle 8:** Messwerte am Gitter mit 600 Linien/mm.

Beugungsordnung $k$	$\varphi_1^{\text{rot}} / ^\circ$	$\varphi_2^{\text{rot}} / ^\circ$	$\varphi_1^{\text{grün}} / ^\circ$	$\varphi_2^{\text{grün}} / ^\circ$
1	22,5	23	19	19

**Tabelle 9:** Messwerte am Gitter mit 300 Linien/mm.

Beugungsordnung $k$	$\varphi_1^{\text{rot}} / ^\circ$	$\varphi_2^{\text{rot}} / ^\circ$	$\varphi_1^{\text{grün}} / ^\circ$	$\varphi_2^{\text{grün}} / ^\circ$
3	34,2	35	28,5	28,5
2	22	22,25	18,8	18,5
1	10,8	10,9	9,3	9

**Tabelle 10:** Messwerte am Gitter mit 100 Linien/mm.

Beugungsordnung $k$	$\varphi_1^{\text{rot}} / ^\circ$	$\varphi_2^{\text{rot}} / ^\circ$	$\varphi_1^{\text{grün}} / ^\circ$	$\varphi_2^{\text{grün}} / ^\circ$
5	18,7	18,9	15,9	16,5
4	14,8	15,1	12,5	12,4
3	11	11,2	9,4	9,2
2	7,2	7,5	6,3	6
1	3,5	3,9	3,1	3,1

**Tabelle 11:** Errechnete Wellenlängen für den roten und grünen Laser.

	$\lambda_{\text{rot}}$	$\lambda_{\text{grün}}$
100 Linien/mm	(643 $\pm$ 17,2) nm	(542 $\pm$ 11,1) nm
300 Linien/mm	(622 $\pm$ 4,7) nm	(525 $\pm$ 5,6) nm
600 Linien/mm	(645 $\pm$ 6,7) nm	(543 $\pm$ 0) nm
Komplett gemittelt	(637 $\pm$ 6) nm	(537 $\pm$ 4) nm

## 5 Diskussion

### 5.1 Reflexionsgesetz

Laut dem Reflexionsgesetz wird das Licht im einfallenden Winkel reflektiert. Bei der Auswertung fällt sofort auf dass dies experimentell bestätigt wird. Trotzdem können während der Messungen aufgetreten sein.

Da mit Unterlagen gearbeitet wurde besteht eine mögliche Fehlerquelle in dem nicht richtig sitzen dieser. Eine andere besteht darin dass die Skala an welcher abgelesen wurde nicht super exakt ist.

### 5.2 Brechungsgesetz

In der Auswertung wurde der Brechungsindex von Plexiglas bestimmt zu

$$n = 1.478 \pm 0.018$$

und die Schallgeschwindigkeit

$$v = 2.029 \cdot 10^8 \pm 0.025 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Laut Literatur [3] sind die Werte für den Brechungsindex und die Schallgeschwindigkeit gegeben als

$$\begin{aligned} n_{\text{Lit}} &= 1.491 \\ v_{\text{Lit}} &= 2.01 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \end{aligned}$$

Mithilfe der Formel

$$\Delta p = \left| \frac{f - g}{f} \right|, \quad (14)$$

wobei p die Prozentuale Abweichung darstellt und f und g jeweilige Zahlenwerte dessen Abweichungen zu einander untersucht werden sollen. So ergibt sich für die Abweichungen folgende Werte

$$\begin{aligned} p_{\text{index}} &= 0,87\% \\ p_{\text{geschwindigkeit}} &= 0,945\%. \end{aligned}$$

Die Abweichungen sind sehr gering und die Messung kann als Bestätigung angenommen werden. Fehlerursachen können auch hier nicht richtig sitzende Messinstrumente sein, in diesem Fall die Skala, sowie die Halterungen welche etwas spiel hatten.

### 5.3 Gitter

Licht mit der Farbe rot liegt normalerweise im Bereich von 650 bis 750nm und Licht mit der Farbe grün liegt normalerweise im Bereich von 490 bis 575nm [1].

Experimentell wurde für die Laser jeweils eine Wellenlänge von

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{rot}} &= (637 \pm 6) \text{ nm} \\ \lambda_{\text{grün}} &= (537 \pm 4) \text{ nm}\end{aligned}$$

bestimmt. Das Grüne Licht liegt genau in dem Intervall, beim roten Licht gibt es mit Gleichung 14 eine Abweichung von

$$p_{\text{rot}} = 2\%$$

zu 650 nm. Diese Abweichung kann zum einen durch die nicht extrem genaue Skala, einer wahrscheinlich minimal versetzten Unterlage, sowie dem erklärt werden kann, dass es schwierig ist eine klare Grenze auszumachen, wann eine bestimmte Wellenlänge eine bestimmte Farbe ist.

### Literatur

- [1] 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/>.
- [2] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [3] Horst Kuchling. *Taschenbuch der Physik*. Hanser Verlag, 2014. ISBN: 9783446442184.
- [4] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [5] *Literaturwert für Licht*. 2021. URL: <https://www.chemie.de/lexikon/Licht.html> (besucht am 25.06.2021).
- [6] *Literaturwert für spezifische Wärmekapazität von Wasser*. 2020. URL: [https://www.chemie.de/lexikon/Spezifische\\_W%C3%A4rmekapazit%C3%A4t.html](https://www.chemie.de/lexikon/Spezifische_W%C3%A4rmekapazit%C3%A4t.html) (besucht am 01.11.2020).
- [7] 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/>.
- [8] *Versuchsanleitung zu Versuch V400 Reflexion, Brechung, Beugung*. Fakultät Physik, TU Dortmund. 2021.