

400

Reflexion, Brechung und Beugung

Leander Flottau
leander.flottau@tu-dortmund.de

Jan Gaschina
jan.gaschina@tu-dortmund.de

Durchführung: 22.06.2021

Abgabe: 29.06.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Reflexion und Brechung	3
2.2 Beugung	4
3 Durchführung	4
3.1 Aufbau	4
3.2 Reflexion	4
3.3 Brechung an den Platten	5
3.4 Brechung am Prisma	5
3.5 Beugung	6
4 Fehler	6
5 Auswertung	7
5.1 Vorbereitungsaufgaben	7
5.1.1 Brechungsindizes	7
5.1.2 Gitterkonstanten	8
5.2 Überprüfung des Reflexionsgesetzes	8
5.3 Brechungsgesetz	8
5.4 Planparallele Platten	9
5.5 Das Prisma	9
5.6 Beugung am Gitter	10
6 Diskussion	11
7 Literatur	12
8 Anhang	12

1 Zielsetzung

In diesem Experiment werden die Reflexions-, Brechungs- und Beugungseigenschaften von Licht anhand fünf verschiedener Experimente untersucht.

2 Theorie

Bei Licht handelt es sich um eine elektromagnetische Wellen, deren Verhalten allgemein aus den Maxwellschen Gleichungen folgt. Für Menschen sichtbares Licht hat eine Wellenlänge zwischen 380 und 780 nm

2.1 Reflexion und Brechung

Wenn sich Licht nur in eine bestimmte Richtung ausbreitet, kann es durch die Wellennormale der Wellenfront als Lichtstrahl beschrieben werden. Die Normale steht dabei senkrecht auf der Wellenfront. Mithilfe dieser sogenannten Strahlenoptik lassen sich insbesondere die Phänomene der Reflexion und Brechung von Licht gut erklären. In der Strahlenoptik breitet sich Lichtstrahlen geradlinig aus und interagieren nicht untereinander.

Wenn Licht auf eine Grenzfläche zu einem anderen Medium trifft, wird ein Teil des Lichtes reflektiert. Der Winkel des ausfallenden Lichtes entspricht dabei dem Einfallswinkel.

Licht breitet sich in unterschiedlichen Materialien unterschiedlich schnell aus. Das Verhältnis von der Phasengeschwindigkeit in einem beliebigen Material zur Vakuumlichtgeschwindigkeit c wird als Brechungsindex n des Materials bezeichnet, wobei für Luft die Näherung $n_L \approx 1$ angenommen werden kann. Beim Übergang zwischen Medien unterschiedlicher Brechungsindizes ändert sich der Propagationswinkel des Lichtes. Dieses Phänomen wird als Brechung bezeichnet. Der genaue Zusammenhang zwischen Einfallswinkel α und Brechungswinkel β wird durch das Snellius'sche Brechungsgesetz:

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

beschrieben. Für gewöhnlich wird Licht an Grenzflächen zwischen Materialien unter-

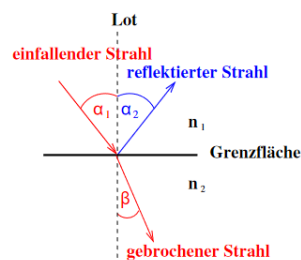


Abbildung 1: Reflexion und Brechung

schiedlicher optischer Dichten teils reflektiert und teils transmittiert und gebrochen.

Der Reflexionskoeffizient R und der Transmissionskoeffizient T sind definiert als das Verhältnis der reflektierten bzw. transmittierten Intensität zur einfallenden Intensität. Beide Koeffizienten müssen in Summe immer 1 ergeben.

2.2 Beugung

Wenn Licht auf einen Spalt oder ein undurchlässiges Objekt trifft, breitet es sich im Schattenraum auf eine Weise aus, die durch die klassische Strahlenoptik nicht erklärbar ist. Zur Erklärung dieser Beugung von Licht muss dieses als Welle mit einer bestimmten Frequenz bzw. Wellenlänge und Amplitude betrachtet werden. Wenn zwei Wellen überlagert werden addieren sich ihre Amplituden und es kommt zu Interferenz. Wenn die Wellen kohärent sind, also eine feste Phasenbeziehung besitzen und in ihrer Wellenlänge übereinstimmen führt dies je nach Gangunterschied zu einem bestimmten Interferenzbild. Dabei wird zwischen destruktiver und konstruktiver Interferenz unterschieden, wobei sich die Wellen bei ersterer gegenseitig abschwächen oder vollständig auslöschen, während sie sich bei zweiterer Verstärken. Wenn Licht auf einen Spalt trifft ist dieser gemäß des Huygensschen Prinzips Ausgangsort für eine Kugelförmige Elementarwelle. Bei einem optischen Gitter interferieren die einzelnen Elementarwellen und erzeugen ein Linienmuster als Interferenzbild. Dies ist dadurch zu erklären das nur für einige bestimmte Winkel ein Gangunterschied von $\Delta s = \lambda$ und somit konstruktive Interferenz zustande kommt, während bei den restlichen Winkeln destruktive Interferenz vorherrscht. Die Lage des Maximums k -ter Ordnung wird durch

$$a \sin(\alpha) = k\lambda \quad (2)$$

mit der Gitterkonstante a beschrieben.

3 Durchführung

3.1 Aufbau

Für diesen Versuch wird im wesentlichen eine transparente Glasplatte verwendet, auf der sich ein Modul mit regelbarem Winkel und zwei Laserdioden sowie ein Schirm befindet. Weiterhin existieren mehrere Unterlagen für die Platte, durch die Beispielsweise Anstell- oder Brechungswinkel abgelesen werden können. Der obere der beiden Laser emittiert rotes Licht der Wellenlänge $\lambda = 635 \text{ nm}$, der untere grünes Licht der Wellenlänge $\lambda = 532 \text{ nm}$. Außerdem können auf der Platte unterschiedliche optische Elemente platziert werden.

3.2 Reflexion

Für die erste Messreihe wird wie in Abbildung ?? ein Reflektor auf der Platte platziert. Anschließend wird für sieben unterschiedliche Einfallswinkel des Lasers der Ausfallswinkel gemessen.

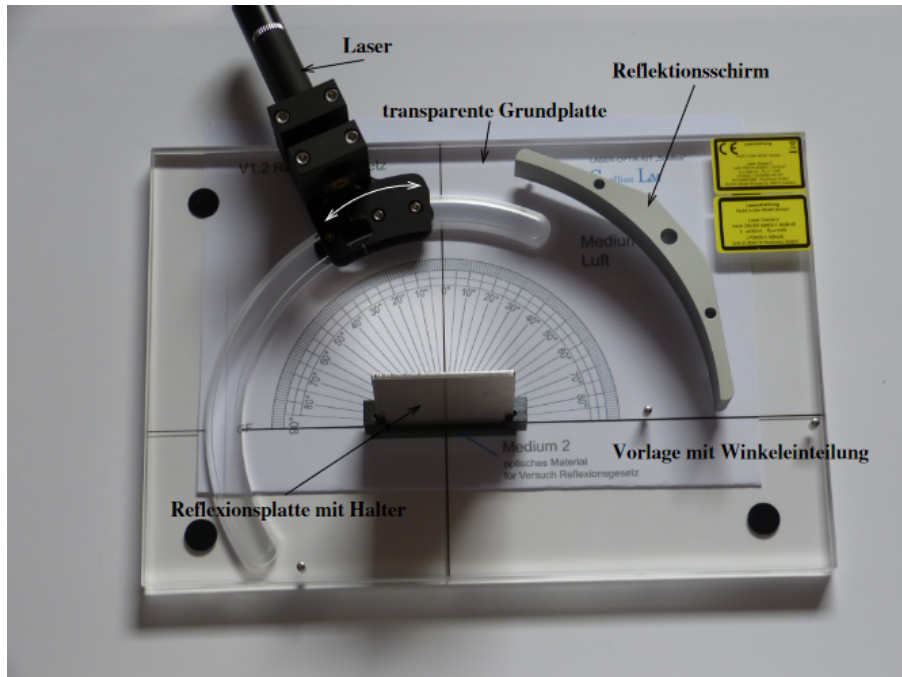


Abbildung 2: Versuchsanordnung (Reflexion)

3.3 Brechung an den Platten

Um die Brechung zu untersuchen wird der Laser auf eine planparallele Platte gerichtet. Auf dieser kann für sieben unterschiedliche Anstellwinkel an einer dafür an der Platte vorgesehenen Skala der Brechungswinkel abgelesen werden.

Wenn das Licht aus den Platten austritt kann ein Versatz s des Lichtstrahls gegenüber dem ursprünglichen Strahl beobachtet werden, wie in Abbildung ?? gezeigt. Dieser kann aus Einfallswinkel und Brechungswinkel gemäß

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

mit der Plattendicke d berechnet werden.

3.4 Brechung am Prisma

Für diesen Versuch wird das Lasermodul auf ein Prisma gerichtet. Mithilfe der dafür vorgesehenen Unterlage kann wiederum für sieben verschiedene Anstellwinkel der Austrittswinkel bestimmt werden. Da die Laser sich in ihrer Wellenlänge unterscheiden, werden sie unterschiedlich stark gebrochen, sodass sich die Austrittswinkel unterscheiden. Die Ablenkung δ kann durch

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

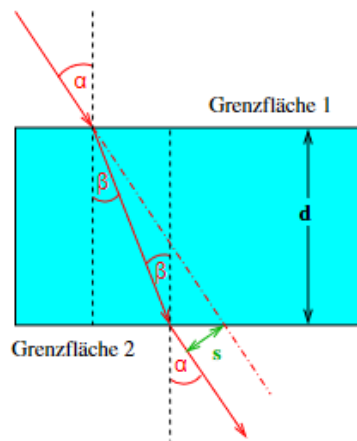


Abbildung 3: Geometrie der Lichtbrechung und Strahlenversatz

berechnet werden. Die Winkel β_1 bzw. β_2 werden dabei durch das Brechungsgesetz sowie

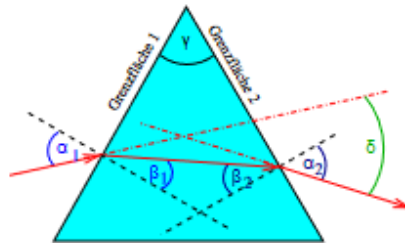


Abbildung 4: Brechung am Prisma

den Zusammenhang $\beta_1 + \beta_2 = \gamma = 60^\circ$ bestimmt.

3.5 Beugung

Für den letzten Versuchsteil werden die Laser senkrecht auf ein Gitter gerichtet. Anschließend kann auf dem dafür vorgesehenen Schirm abgelesen werden, bei welchen Winkeln die Maxima liegen. Dieses Vorgehen wird für beide Laser an drei verschiedenen Gittern wiederholt.

4 Fehler

Der Mittelwert:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=0} x_i \quad (5)$$

Die Standardabweichung:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (6)$$

Der Fehler des Mittelwertes:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

Die Gaußsche Fehlerfortpflanzung:

$$\sigma_x = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 \sigma_{x_n}^2} \quad (8)$$

Die Prozentuale Abweichung:

$$Abweichung = \frac{ExperimentellerWert - Theoriewert}{Theoriewert} \times 100 \quad (9)$$

5 Auswertung

In diesem Kapitel sollen die aufgenommenen Messwerte Ausgewertet und verrechnet werden.

5.1 Vorbereitungsaufgaben

Hier sind die Ergebnisse der Vorbereitungsaufgaben dargestellt.

5.1.1 Brechungsindizes

In Quelle 2 können folgende Brechungsindizes nachgeschlagen werden. Luft: $n_{Luft} = 1$,
Wasser: $n_{Wasser} = 1,333$,
Kronglas: $n_{Kron} = 1,5$,
Plexiglas: $n_{Plex} = 1,49$,
Diamant: $n_{Dia} = 2,42$.

5.1.2 Gitterkonstanten

Die Gitterkonstanten sind der Kehrwert der Anzahl der Gitterlinien pro mm. Das führt zu den Gitterkonstanten:

$$\begin{aligned}d_1 &= 0,01 \text{ 1/mm für } 100\text{L/mm}, \\d_2 &= \text{für } 300\text{L/mm und} \\d_3 &= \text{für } 600\text{L/mm}.\end{aligned}$$

5.2 Überprüfung des Reflexionsgesetzes

Nach dem Reflexionsgesetz ist der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel ($\alpha_1 = \alpha_2$). Es wird aus verschiedenen definierten Winkeln α_1 ein Laserstrahl auf einen Spiegel gerichtet und der Reflexionswinkel α_2 von einem Schirm abgelesen. Die theoretischen und gemessenen Winkel sowie die Abweichung sind in ?? dargestellt.

Tabelle 1: Einfalls- und Ausfallswinkel eines auf einen Spiegel gerichteten Laserstrahls.

$\alpha_1 / ^\circ$	$\alpha_2 / ^\circ$	$\alpha_{2,theo} / ^\circ$	Abweichung / %
20	20 ± 1	20	0,0
30	30 ± 1	30	0,0
35	35 ± 1	35	0,0
40	40 ± 1	40	0,0
45	45 ± 1	45	0,0
50	50 ± 1	50	0,0
60	60 ± 1	60	0,0

Da der Lasepunkt auf dem Schirm eine Ausdehnung von dem Equivalent eines Grades hat und die Skala für Einfalls- und Ausfallswinkel ebenfalls nur gradweise eingeteilt ist können die Winkel auch nur auf höchstens $\pm 1^\circ$ genau bestimmt werden.

5.3 Brechungsgesetz

Um den Brechungsindex zu bestimmen wird der Brechungswinkel bestimmt. Der Brechungsindex kann dann leicht über den Zusammenhang:

$$n_2 = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

bestimmt werden. Es werden die Werte für n_2 einzeln bestimmt, anschließend über Gleichung 5 gemittelt und in Tabelle 2 dargestellt. Die Fehler ergeben sich zunächst über Gleichung 8 und dann für den Mittelwert über Gleichung 7 Mit dem berechneten Wert für n lässt sich über die folgende Beziehung leicht die Lichtgeschwindigkeit v_2 im Medium berechnen.

$$v_2 = \frac{v_1}{n_2}, \quad v_1 = c = 29979 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Diese liegt demnach bei $v_2 = (2.034 \pm 0.019) \times 10^8 \text{ m/s}$

Tabelle 2: Brechung eines Laserstrahls im Medium.

$\alpha_1 / ^\circ$	$\beta / ^\circ$	n_2
20	$14,0 \pm 0,5$	$1,413 \pm 0,084$
30	$20,5 \pm 0,5$	$1,427 \pm 0,055$
35	$22,5 \pm 0,5$	$1,499 \pm 0,049$
40	$25,5 \pm 0,5$	$1,493 \pm 0,041$
45	$28,0 \pm 0,5$	$1,506 \pm 0,036$
50	$31,0 \pm 0,5$	$1,487 \pm 0,031$
60	$35,5 \pm 0,5$	$1,491 \pm 0,024$
\emptyset		$1,474 \pm 0,014$

5.4 Planparallele Platten

Wenn Licht durch zwei planparallele Schichtgrenzen hindurchfällt erfährt es einen Strahlversatz s . Dieser berechnet sich über:

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

Es wird einerseits der Einfallswinkel α_1 und der Brechungswinkel β_{gemessen} gemessen und andererseits wird der Winkel $\beta_{\text{berechnet}}$ aus dem Einfallswinkel und dem Brechungsindex aus Unterabschnitt 5.3 berechnet. Für beide wird dann der Strahlversatz berechnet und in Tabelle 3 dargestellt. Die Fehler ergeben sich über die Gaußsche-Fehlerfortpflanzung Gleichung 8. Die am Ende berechneten Mittelwerte ergeben sich mit ihrem Fehler über Gleichung 5 und Gleichung 7. Die berechneten Mittelwerte unterscheiden sich kaum

Tabelle 3: Brechung eines Laserstrahls im Medium.

$\alpha_1 / ^\circ$	$\beta_{\text{gemessen}} / ^\circ$	s_1 / cm	$\beta_{\text{berechnet}} / ^\circ$	s_2 / cm
20	$14,0 \pm 0,5$	$0,630 \pm 0,116$	$13,417 \pm 0,668$	$0,689 \pm 0,040$
30	$20,5 \pm 0,5$	$1,031 \pm 0,119$	$19,828 \pm 0,655$	$1,098 \pm 0,049$
35	$22,5 \pm 0,5$	$1,370 \pm 0,118$	$22,899 \pm 0,646$	$1,331 \pm 0,054$
40	$25,5 \pm 0,5$	$1,623 \pm 0,120$	$25,854 \pm 0,635$	$1,589 \pm 0,060$
45	$28,0 \pm 0,5$	$1,937 \pm 0,120$	$28,666 \pm 0,623$	$1,875 \pm 0,067$
50	$31,0 \pm 0,5$	$2,222 \pm 0,121$	$31,312 \pm 0,609$	$2,194 \pm 0,074$
60	$35,5 \pm 0,5$	$2,980 \pm 0,120$	$35,981 \pm 0,577$	$2,943 \pm 0,088$
\emptyset		$1,68 \pm 0,30$		$1,67 \pm 0,28$

voneinander und liegen im gegenseitigen Fehlerintervall.

5.5 Das Prisma

In einem Prisma wird Licht in abhängigkeit von seiner Wellenlänge λ gebrochen. In diesem Versuch trifft ein Laserstrahl in unterschiedlichen Winkeln α_1 auf das Prisma

und tritt im Winkel α_2 wieder aus. Die anderen Winkel ergeben sich dann über die Beziehungen:

$$\begin{aligned}\beta_2 &= \arcsin\left(\frac{\sin\alpha}{n_{kron}}\right), \\ \beta_1 &= \gamma - \beta_2 \text{ und} \\ \delta &= (\alpha_1 + \alpha_2) - (\beta_1 + \beta_2).\end{aligned}$$

Mit n_{kron} dem Brechungsindex von Kronglas aus Unterunterabschnitt 5.1.1 Für den grünen Laserstrahl sind die Ergebnisse in Tabelle 4 und für den roten in Tabelle 5 dargestellt. Die Messfehler ergeben sich hierbei über Gleichung 8 und der am Ende berechnete Mittelwert ergibt sich mit dem zugehörigen Fehler über Gleichung 5 und Gleichung 7.

Tabelle 4: Dispersion eines grünen Laserstrahls im Medium.

$\alpha_{1,grn} / ^\circ$	$\alpha_{2,grn} / ^\circ$	$\beta_{1,grn} / ^\circ$	$\beta_{2,grn} / ^\circ$	$\delta / ^\circ$
30	81±1	17,929±0,512	42,071±0,513	51,0±1,414
35	68±1	21,023±0,549	38,977±0,549	43,0±1,414
40	61±1	23,605±0,573	36,395±0,573	41,0±1,414
55	43±1	32,440±0,628	27,559±0,628	38,0±1,414
60	38±1	35,312±0,640	24,688±0,639	38,0±1,414
65	34±1	37,706±0,648	22,294±0,672	39,0±1,414
70	31±1	39,549±0,653	20,451±0,653	41,0±1,414
\emptyset				41,6±1,7

Tabelle 5: Dispersion eines roten Laserstrahls im Prisma.

$\alpha_{1,rot} / ^\circ$	$\alpha_{2,rot} / ^\circ$	$\beta_{1,rot} / ^\circ$	$\beta_{2,rot} / ^\circ$	$\delta / ^\circ$
30	79±1	18,245±0,517	41,755±0,517	49,0±1,414
35	67±1	21,356±0,552	38,643±0,552	42,0±1,414
40	60±1	24,019±0,577	35,981±0,577	40,0±1,414
55	42±1	33,003±0,630	26,997±0,630	37,0±1,414
60	37±1	35,903±0,642	24,097±0,642	37,0±1,414
65	33±1	38,316±0,650	21,684±0,649	38,0±1,414
70	30±1	40,172±0,655	19,828±0,655	40,0±1,414
\emptyset				40,4±1,6

5.6 Beugung am Gitter

Um die Wellenlänge der verwendeten Laser zu messen werden drei optische Beugungsgitter in den Strahlverlauf gestellt und die Beugungswinkel gemessen. Aus diesen lässt sich über die Beziehung:

$$\lambda = \frac{d \sin \alpha}{k}$$

mir d den in ?? berechneten Gitterkonstanten und k der Beugungsordnung, die Wellenlänge berechnen. Der Fehler pflanzt sich dabei über Gleichung 8 fort. Die berechneten λ sind in Tabelle 6 dargestellt und über Gleichung 5 gemittelt worden. Der Mittelwertfehler ergibt sich dabei mit Gleichung 7.

Tabelle 6: Beugung des roten und grünen Laserstrahls an verschiedenen Gittern.

$d / 1/\text{mm}$	k	$\alpha_{rot} / ^\circ$	$\lambda_{rot} / \mu\text{m}$	$\alpha_{grn} / ^\circ$	$\lambda_{rot} / \mu\text{m}$
0,01	1	4 ± 1	$0,697 \pm 0,174$	3 ± 1	$0,523 \pm 0,174$
	2	7 ± 1	$0,609 \pm 0,087$	6 ± 1	$0,523 \pm 0,087$
	3	11 ± 1	$0,636 \pm 0,057$	9 ± 1	$0,521 \pm 0,057$
	4	15 ± 1	$0,647 \pm 0,042$	12 ± 1	$0,519 \pm 0,043$
	5	19 ± 1	$0,651 \pm 0,033$	16 ± 1	$0,551 \pm 0,034$
	6	23 ± 1	$0,651 \pm 0,019$	19 ± 1	$0,543 \pm 0,028$
	7	27 ± 1	$0,648 \pm 0,022$	22 ± 1	$0,535 \pm 0,023$
	8	31 ± 1	$0,644 \pm 0,019$	26 ± 1	$0,548 \pm 0,019$
0,003	1	11 ± 1	$0,636 \pm 0,057$	9 ± 1	$0,521 \pm 0,057$
	2	22 ± 1	$0,624 \pm 0,027$	19 ± 1	$0,542 \pm 0,028$
	3	35 ± 1	$0,637 \pm 0,637$	28 ± 1	$0,522 \pm 0,017$
0,0016	1	23 ± 1	$0,651 \pm 0,027$	19 ± 1	$0,543 \pm 0,027$
\emptyset			$0,644 \pm 0,006$		$0,5327 \pm 0,0035$

6 Diskussion

In diesem Versuch wurde zunächst in Unterabschnitt 5.2 das Reflexionsgesetz überprüft. Hier entsteht, im Rahmen der eingeschränkten Messgenauigkeit, bei keinem aufgenommenen Messwert eine Abweichung von der Erwartung. Die Messgenauigkeit ist eingeschränkt, da der Lasepunkt auf dem Schirm eine Ausdehnung besitzt und die Skala nur gradweise und nicht direkt auf dem Schirm sondern nur darunter aufgetragen ist. Im nächsten Schritt, Unterabschnitt 5.3, wird dann der Brechungsindex von Plexiglas bestimmt. Der hier gemessene Wert liegt bei $n_{plex} = 1,474 \pm 0,014$ und weicht somit um etwa 1,08% von dem in Unterabschnitt 5.1.1 nachgeschlagenen Wert ab und liegt so knapp außerhalb des Fehlerintervalls. Ebenfalls wurde in diesem Kapitel die Lichtgeschwindigkeit in Plexiglas bestimmt, sie liegt bei $v_2 = (2,034 \pm 0,019) \times 10^8 \text{ m/s}$ und weicht somit ebenfalls um etwa 1% vom Theoriewert $v_{theo} = 201\,202\,991 \text{ m/s}$ ab. Im Anschluss daran wird in Unterabschnitt 5.4 der Strahlversatz an planparallelen Platten auf zwei verschiedene Weisen berechnet. Die berechneten Werte liegen bei $s_1 = 1,68 \pm 0,30 \text{ cm}$ und $s_2 = 1,67 \pm 0,28 \text{ cm}$. Sie unterscheiden sich also nur um etwa 0,6% und liegen gegenseitig im Fehlerintervall. In Unterabschnitt 5.5 werden dann die Wellenlängen abhangigen

Brechungswinkel welche durch ein Prisma erzeugt werden gemessen sie liegen für den grünen Laser bei $\delta_g = 41,6 \pm 1,7^\circ$ und für den roten laser bei $\delta_r = 40,4 \pm 1,6^\circ$. Hier leigen keine Theoriewerte zum Vergleich vor. Im letzten Kapitel Unterabschnitt 5.6 werden dann die Wellenlängen der benutzten Laser zu $\lambda_{rot} = 644,0 \pm 6\text{nm}$ und $\lambda_{grn} = 532,7 \pm 3,5\text{nm}$ bestimmt. Es liegen auch hier keine Werte zum Vergleich vor, jedoch sind die berechneten Wellenlängen in einem für die Lichtfarben typischen Bereich. Fehler können in diesen Versuchen vorallem durch ungenaue oder schlecht ablesbare Skalen entstehen. Die gemessenen Werte zeigen jedoch durchweg eine geringe Abweichung von der Erwartung. Die prozentualen Abweichungen werden über Gleichung 9 berechnet.

7 Literatur

1. TU-Dortmund, V204: Wärmeleitung von Metallen
2. Brechungsindexdatenbank, www.filmetrics.de abgerufen am 26.06.2021

8 Anhang

Auf der folgenden Seite befinden sich ein Scan der Orginalwerte.