

# Ausarbeitung zu "Beugung und Brechung"

Anfängerpraktikum Teil 3  
Technische Universität München

Clara Donat, Matthias Quintern  
Kurs Block A, Gruppe 5, Team 9

11. März 2021

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1	Beugung . . . . .	2
2.1.1	Huygens-Prinzip . . . . .	2
2.1.2	Beugung am Gitter . . . . .	2
2.1.3	Beugung am Spalt . . . . .	3
2.1.4	Reales Gitter . . . . .	3
2.1.5	Spektrale Auflösung . . . . .	3
2.1.6	Ortsauflösung . . . . .	4
2.2	Brechung . . . . .	4
2.2.1	Brechungsindex und minimaler Ablenkungswinkel . . . . .	4
2.2.2	Prismenspektroskop . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Experimentelles Vorgehen</b>	<b>5</b>
3.1	Bestimmung der Spaltbreite . . . . .	5
3.2	Bestimmung der Wellenlänge am Gitter . . . . .	5
3.3	Versuche mit dem Prismenspektroskop . . . . .	5
3.3.1	Prismenwinkel . . . . .	5
3.3.2	Winkel der minimalen Ablenkung . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>6</b>
4.1	Bestimmung der Spaltbreite . . . . .	6
4.2	Bestimmung der Wellenlänge am Gitter . . . . .	7
4.3	Bestimmung des Prismenwinkels . . . . .	8
4.4	Bestimmung des Brechungsindex des Prismas . . . . .	8
4.5	Bestimmung der Spektrallinien der Energiesparlampe . . . . .	9
<b>5</b>	<b>Fragen</b>	<b>10</b>
5.1	Geeignete Lichtquelle für Interferenzerscheinungen . . . . .	10
5.2	Beugungserscheinungen . . . . .	10
5.3	Geschwindigkeit von Licht in Glas . . . . .	10
5.4	Dispersion . . . . .	10
5.5	Auflösungsvermögen eines Prismenspektrometers . . . . .	11
5.6	Brechungsindex von Flintglas . . . . .	11
5.7	Verlauf des wellenlängenabhängigen Brechungsindex . . . . .	11

## 1 Einleitung

Dieser Versuch beschäftigt sich mit der Beugung und Brechung von Licht. Speziell wird dabei die Beugung am Einzelspalt und am Gitter untersucht sowie der Prismenwinkel und der minimale Ablenkungswinkel eines Prismenspektroskops ermittelt.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Beugung

#### 2.1.1 Huygens-Prinzip

Die Beugung von Licht tritt immer dann auf, wenn der betrachtete Körper bzw. die Öffnung in der Größenordnung der Lichtwellenlänge liegt. Das Huygens-Prinzip besagt hierbei, dass von jedem Punkt der Wellenfront eine neue Elementarwelle ausgeht, die mit den anderen Elementarwellen interferiert. Da man in diesem Versuch die Beugungserscheinungen in großer Entfernung vom beugenden Objekt untersucht (Fraunhofersche Beugung), werden die Lichtstrahlen als parallel angenommen.

#### 2.1.2 Beugung am Gitter

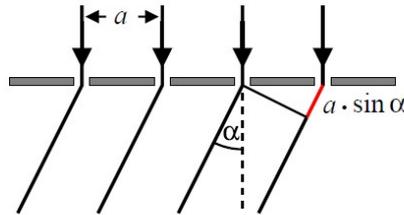


Abbildung 1: Beugung am Gitter mit Spaltabstand  $a$ , Einfallswinkel  $\alpha$  des Lichts und Gangunterschied  $a \cdot \sin \alpha$  (Grafik aus [5])

Betrachtet man ein von parallelem, monochromatischem Licht beleuchtetes Gitter mit  $N$  Spalten, so geht nach dem Hugenstsschen Prinzip von jedem Spalt eine Elementarwelle aus. Wie in Abbildung 1 dargestellt, haben diese Wellen bei einem Spaltabstand  $a$  und einem Beobachtungswinkel  $\alpha$  eine Phasendifferenz von  $\delta = 2\pi \frac{a}{\lambda} \sin(\alpha)$ . Die Amplitude der Lichtwelle in Beobachtungsrichtung ergibt sich durch die Superposition der Einzelwellen:

$$E(\alpha) = \sum_{n=1}^N E' \cos(2\pi ft + n\delta). \quad (1)$$

Hierbei steht  $E'$  für die Amplitude der Einzelwelle und  $f$  ist die Frequenz des Lichts. Berechnet man die Summe in Gleichung 1 und quadriert anschließend das Ergebnis [5], erhält man:

$$J \propto \frac{\sin^2(N\delta/2)}{\sin^2(\delta/2)} = \frac{\sin^2(\pi N \frac{a}{\lambda} \sin\alpha)}{\sin^2(\pi \frac{a}{\lambda} \sin\alpha)} \quad (2)$$

für die Intensität  $J$  des Lichts, welche proportional zur quadrierten Feldamplitude ist.

Wird der Nenner in Gleichung 2 Null, hat die Intensität dort ein Hauptmaximum. Der Gangunterschied

der Lichtstrahlen ist hier ein Vielfaches der Wellenlänge.

$$\text{Hauptmaxima} \quad n \cdot \lambda = a \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

$$\text{Minima} \quad n \cdot \lambda = N \cdot a \cdot \sin \alpha \quad (4)$$

$n$  bezeichnet die Ordnung der Extrema, wobei man beim ungebeugten Strahl mit  $n = 0$  beginnt.

### 2.1.3 Beugung am Spalt

Man kann einen Spalt der Breite  $d$  näherungsweise als ein Gitter mit unendlich vielen und dichten Strichen ansehen. Ersetzt man nun das Produkt aus Spaltenzahl  $N$  und Spaltabstand  $a$  in Gleichung 2 mit  $d$ , ergibt sich für die Intensitätsverteilung eines Einzelspalts:

$$J \propto \left( \frac{\sin(\pi \frac{d}{\lambda} \cdot \sin \alpha)}{\pi \frac{d}{\lambda} \cdot \sin \alpha} \right)^2. \quad (5)$$

Die Intensität wird minimal, wenn der Zähler in Gleichung 5 verschwindet.

$$\text{Minima} \quad n \cdot \lambda = d \cdot \sin \alpha \quad (6)$$

$$\text{Maxima} \quad \left(n + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda \simeq d \cdot \sin \alpha \quad (7)$$

### 2.1.4 Reales Gitter

Berücksichtigt man die endliche Ausdehnung  $d$  der Gitterspalte, ergibt sich das Beugungsbild eines realen Gitters in Abbildung 2 aus der Überlagerung des Beugungsbildes eines realen Gitters wie in Abschnitt 2.1.2 und dem eines Spalts aus Abschnitt 2.1.3.

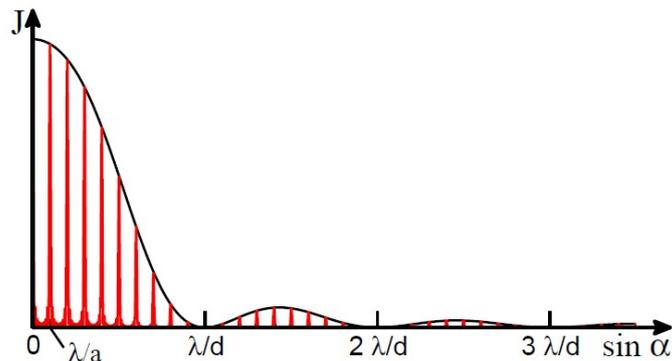


Abbildung 2: Beugungsbild eines realen Gitters mit Spaltbreite  $d$ . Das Hauptmaximum ist bei  $x = 0$  und die Minima bei  $n \cdot \frac{\lambda}{d}$  (Grafik aus [5])

### 2.1.5 Spektrale Auflösung

Mithilfe eines Beugungsgitters lässt sich eine Spektralanalyse des Lichts durchführen. Dazu wird die Wellenlängenabhängigkeit der Beugungsrichtung ausgenutzt. Zwei benachbarte Wellenlängen  $\lambda$  und  $\lambda + \Delta\lambda$  sind noch als verschieden wahrnehmbar, wenn das Maximum der Wellenlänge  $\lambda$  in das Minimum von  $\lambda + \Delta\lambda$  fällt. Mit diesen Wellenlängen bestimmt man das *Auflösungsvermögen*  $U$  des Gitters zu

$$U = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = n \cdot N. \quad (8)$$

Dabei ist  $N$  die Zahl der vom Licht durchsetzten Gitterstriche und  $n$  die Ordnungszahl.

### 2.1.6 Ortsauflösung

Durch Beugungseffekte kann das Auflösungsvermögen  $A$  eines optischen Instruments nicht unendlich groß werden. Durch die Beugung des einfallendes Lichts an z.B. einer Linsenfassung wird ein Lichtpunkt unscharf abgebildet. Diese Randeefekte lassen sich durch eine Vergrößerung des Objektivdurchmessers  $D$  oder einer Verringerung der Wellenlänge  $\lambda$  minimieren, es gilt also  $A \propto \frac{D}{\lambda}$ .

## 2.2 Brechung

Für die Erklärung der Lichtbrechung benötigt man die Welleneigenschaften des Lichtes nicht, stattdessen wird nur angenommen dass die Lichtgeschwindigkeit  $c_m$  in einem Medium von diesem abhängig ist. Zusätzlich kann sie abhängig von der Wellenlänge sein, was *Dispersion* genannt wird.

### 2.2.1 Brechungsindex und minimaler Ablenkungswinkel

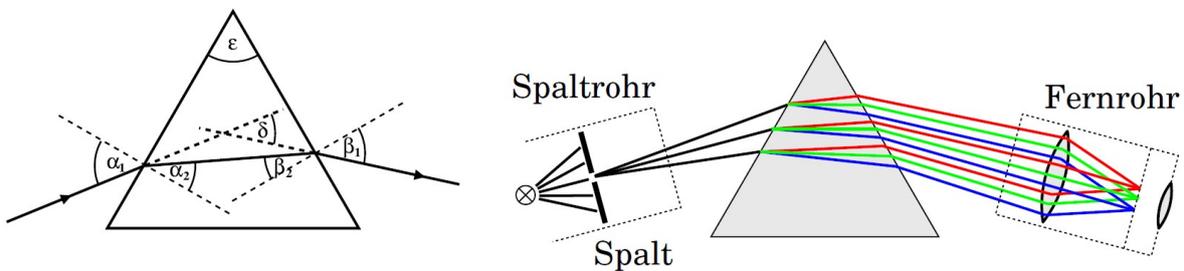
Der material- und wellenlängenabhängige *Brechungsindex*  $n$  eines Mediums gibt das Verhältnis zwischen Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c$  und der Lichtgeschwindigkeit im Medium  $c_m$  an:

$$n = \frac{c}{c_m}. \quad (9)$$

Licht wird gebrochen, wenn es zwischen zwei Medien mit unterschiedlichen Brechungsindizes  $n_1$  und  $n_2$  übergeht. Es ändert sich also die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes. Für das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten  $c_1$  und  $c_2$ , der Brechungsindizes und der Einfalls- bzw. Ausfallswinkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  gilt mit dem *Snellius'schem Brechungsgesetz*

$$\frac{\sin(\alpha_1)}{\sin(\alpha_2)} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (10)$$

Die Winkel werden dabei zwischen Lichtstrahl und dem Lot auf dem jeweiligen Material gemessen.



(a) Strahlengang durch ein Prisma mit Öffnungswinkel  $\epsilon$ . Das Licht fällt unter dem Winkel  $\alpha_1$  ein, wird jeweils an der Außenwand gebrochen, beim Durchlaufen des Prismas abhängig von der Wellenlänge gebrochen und tritt im Winkel  $\beta_1$  wieder aus. Die Gesamtablenkung beträgt  $\delta = \alpha_1 + \beta_1 - \epsilon$  (Grafik aus [5])

(b) Aufbau eines Prismenspektroskops: Licht wird an einem Spalt gebrochen, beim Durchlaufen des Prismas abhängig von der Wellenlänge gebrochen und dann in einem Fernrohr abgebildet. (Grafik aus [5])

Zur Bestimmung des Brechungsindex eines Prismas lässt sich der *Winkel der minimalen Ablenkung*  $\delta_{\min}$  nutzen. Bei diesem ist der Strahlengang durch das Prisma symmetrisch, für den Einfallswinkel  $\alpha$  und den Ausfallswinkel  $\beta$  gilt  $\alpha = \beta$ . Damit lässt sich der Winkel der minimalen Ablenkung berechnen:

$$\delta_{\min} = 2 \cdot \beta - \epsilon. \quad (11)$$

Für den Brechungsindex gilt [5]

$$n = \frac{\sin\left(\frac{\delta_{\min} + \epsilon}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\epsilon}{2}\right)}, \quad (12)$$

wobei  $\epsilon$  den Öffnungswinkel des Prismas bezeichnet. Der Strahlengang ist in Abbildung 3a allgemein dargestellt.

### 2.2.2 Prismenspektroskop

Abbildung 3b zeigt schematisch den Aufbau eines Prismenspektroskops. Das Prisma besteht aus dispersivem lichtbrechendem Material und hat zwei polierte Seiten, die den Winkel  $\epsilon$  einschließen. Das Licht fällt auf einen Eintrittsspalt und durchläuft dann das Prisma, wobei es aufgrund der Dispersion wellenlängenabhängig gebrochen wird. Das abgelenkte Licht lässt sich dann durch ein Fernrohr beobachten. Dabei entsteht für jede Wellenlänge ein Bild des Spaltes, die Bilder sind im Fernrohr seitlich zueinander verschoben.

5.1

## 3 Experimentelles Vorgehen

### 3.1 Bestimmung der Spaltbreite

In diesem Versuchsteil wird ein Spalt von Laserlicht mit einer Wellenlänge von  $\lambda_{\text{Laser}} = (532 \pm 1) \text{ nm}$  beleuchtet. Das Beugungsbild entsteht schließlich auf halbtransparentem Papier, das an einer Schirmhalterung mit einer Breite von  $b = 2 \text{ mm}$  befestigt ist.

Um später die Spaltbreite bestimmen zu können, misst man für drei unterschiedliche Abstände  $l_i$  des Spaltes vom Schirm jeweils die Abstände der Beugungsminima  $d_{i,n}$  gleicher Ordnung  $n$  zueinander. Dazu markiert man die auf das Papier projizierten Minima mit einem Stift, entfernt den Papierstreifen von der Halterung und bestimmt die Distanzen am Papier mit einem Messschieber.

### 3.2 Bestimmung der Wellenlänge am Gitter

Hier wird statt einem Laser eine Hg-Dampflampe als Lichtquelle verwendet. Durch einen Spalt der Breite  $d_{\text{Gitter}} = 0.5 \text{ mm}$  trifft das Licht auf zwei Linsen, wodurch das Lichtbündel aufgeweitet wird. Direkt hinter der zweiten Linse ist ein Gitter mit Gitterkonstante  $a = 10,00 \mu\text{m}$  und einer Toleranz von  $\pm 0,2\%$  positioniert.

Das am Gitter gebeugte Licht trifft schließlich auf einen Papierstreifen, auf dem die Maxima bis zur fünften Ordnung für die Farben orange, grün und blau eingezeichnet werden.

Diese Messung wird für drei verschiedene Gitter-Schirm Abstände  $l_i$  wiederholt, wobei bei den zwei letzten Abständen nur vier Maxima auf dem Papier markiert werden.

Aufgrund der geltenden Corona-Beschränkungen konnte dieses Experiment nicht in Präsenz durchgeführt werden. Stattdessen wurden auf Moodle die Werte für die Abstände zwischen Gitter und Schirm sowie ein Bild von den eingezeichneten Maxima der verschiedenen Farben zur Verfügung gestellt [1].

### 3.3 Versuche mit dem Prismenspektroskop

Bei diesem Versuchsteil befindet sich ein Prisma mit zwei polierten Seiten auf einer drehbaren Halterung mit Winkelskala. Ein Fernrohr lässt sich frei um das Prisma bewegen.

Den Winkel, um den das Fernrohr um das Prisma gedreht wird, kann man durch Differenz der abgelesenen Winkel vor und nach der Drehung bestimmen. Durch einen variabel einstellbaren Spalt trifft das zu untersuchende Licht auf das Prisma.

#### 3.3.1 Prismenwinkel

Für die Bestimmung des Prismenwinkels  $\epsilon$  wird das Prisma so ausgerichtet, dass das Licht auf die Schnittkante der polierten Flächen fällt. Anschließend richtet man das Fernrohr jeweils auf die Reflektion auf beiden Seiten aus und liest den Winkel ab. Der Prismenwinkel berechnet sich dann mit

$$\epsilon = \frac{\alpha}{2}, \quad (13)$$

wobei  $\alpha$  die Differenz der beiden gemessenen Winkel ist. Als Lichtquelle wird eine Energiesparlampe verwendet.

### 3.3.2 Winkel der minimalen Ablenkung

Ähnlich wie in Abbildung 3b wird das Prisma so gedreht, dass das Licht an einer seiner polierten Seiten gebrochen wird und bei der anderen wieder austritt.

Nun richtet man das Fernrohr auf den gebrochenen Lichtstrahl aus und stellt es so scharf, dass man die Spektrallinien deutlich sieht und voneinander unterscheiden kann.

Um den Winkel der minimalen Ablenkung einer Wellenlänge zu ermitteln, betrachtet man die entsprechende Spektrallinie durch das Fernrohr und dreht gleichzeitig langsam das Prisma. Dadurch verschiebt sich die Spektrallinie im Fernrohr in eine Richtung. Bei dem gesuchten Winkel dreht sich die Richtung, in die die Spektrallinie verschoben wird, um. Dann liest man den Winkel des Fernrohrs ab. Um den Ablenkungswinkel zu bestimmen, benötigt man noch den Nullwinkel. Diesen erhält man, in dem man das Prisma aus der Halterung entfernt und das Fernrohr auf den Spalt ausrichtet.

Als Lichtquelle wird zunächst die Hg-Lampe verwendet und anschließend die Energiesparlampe.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Bestimmung der Spaltbreite

Im Experiment wurden die Abstände zwischen den Minima gleicher Ordnung und nicht die Distanz zwischen Minimum und dem Maximum nullter Ordnung gemessen. Daher teilt man die notierten Werte durch 2, um  $s$  zu erhalten. Von den Distanzen  $l$  zwischen dem Spalt und dem Schirm muss man jeweils noch die Hälfte der Breite der Spalt- und der Schirmhalterung abziehen. Da leider vergessen wurde, diese Strecken abzumessen, werden die Abmessungen der Halterungen auf 2 mm und 10 mm geschätzt. Insgesamt werden von den gemessenen Distanzen also 6 mm abgezogen.

Das Verhältnis  $\frac{s}{l}$  lässt sich auch folgendermaßen schreiben:

$$\frac{s}{l} = \tan \alpha. \quad (14)$$

$\alpha$  bezeichnet den Winkel, unter dem die Beugungsordnungen  $n$  beobachtet werden. In Gleichung 14 und 6 darf die Kleinwinkelnäherung  $\tan \alpha \simeq \sin \alpha \simeq \alpha$  angewendet werden, weil die Abweichung vom größten Wert  $\frac{s}{l_{\max}} = 0,04089(45)$  zu  $\arctan \frac{s}{l_{\max}} = 0,04087$  erst die fünfte Nachkommastelle betrifft.

Trägt man nun die  $\frac{s_i}{l_i}$  der drei Messungen gegen die jeweilige Ordnung  $n$  in einem Diagramm auf, ergibt sich ein Verlauf wie in Abbildung 4.

Die in Abbildung 4 eingezeichnete Ausgleichsgerade  $f = \frac{s}{l} = k \cdot n + e$  hat die Steigung  $k = (4,43 \pm 0,19) \cdot 10^{-3}$ . Die Gerade schneidet die y-Achse nahezu am Ursprung, weswegen  $e$  so klein ist, dass der Parameter vernachlässigt werden kann. Dies und der kleine Wert für  $u(k)$  deutet darauf hin, dass die Messung relativ genau war. Die Unsicherheit  $u(\frac{s}{l})$  und (Fehlerbalken in Abbildung 4) lassen sich mit den auf  $u(s) = 0,5 \text{ mm}$  und  $u(l) = \sqrt{2 \cdot 0,5^2} = 0,071$  geschätzten Einzelunsicherheiten bestimmen, die in die Gaußsche Fehlerfortpflanzung eingesetzt werden.

Nun soll noch die Spaltbreite  $d$  ermittelt werden. Dazu wendet man die Kleinwinkelnäherung auf Gleichung 6 an, welche sich dadurch zu:

$$n \cdot \lambda = d \cdot \sin \alpha \approx d \cdot \alpha = d \cdot \frac{s}{l} = d \cdot k \cdot n \quad (15)$$

ändert. In Gleichung 15 wurde zudem die Beziehung aus Formel 14 und die Funktionsgleichung  $f$  berücksichtigt. Stellt man Gleichung 15 nach  $d$  um, erhält man  $d = \frac{\lambda}{k} = (120,2 \pm 5,2) \mu\text{m}$ . Die Unsicherheit  $u(d)$  wurde mithilfe von  $u(\lambda) = 1 \text{ nm}$  [5] und  $u(k) = 0,19 \cdot 10^{-3}$  berechnet, die in die Gaußsche Fehlerfortpflanzung eingesetzt wurden. Vergleicht man  $d$  mit dem Literaturwert  $d_{\text{lit}} = (123 \pm 2) \mu\text{m}$  auf dem Reiter, so stimmen beide innerhalb der Unsicherheiten überein.

Insgesamt eignet sich dieses Verfahren also sehr gut zur Bestimmung der Ausdehnung von kleinen Beugungsöffnungen.

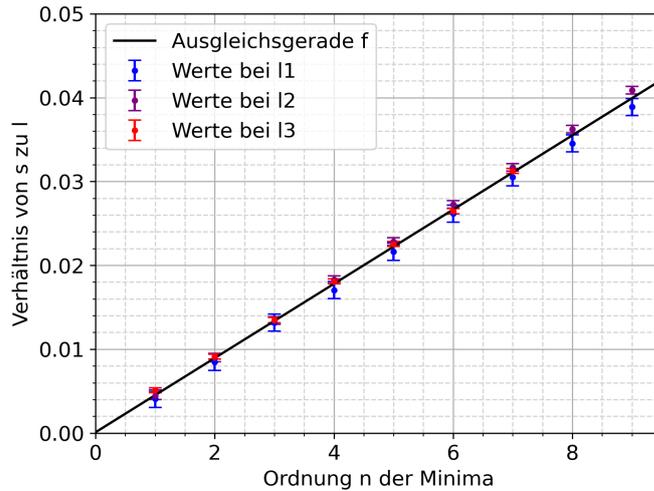


Abbildung 4: Verhältnis  $\frac{s}{l}$  der Abstände  $s_i$  zwischen Minimum und zentralem Beugungsmaximum zum jeweiligen Spalt-Schirm-Abstand  $l_i$  gegen die Ordnung  $n$

## 4.2 Bestimmung der Wellenlänge am Gitter

Auf dem Bild der Versuchsanordnung, das auf Moodle zu finden ist, erkennt man, dass das Papier an der dem Gitter abgewandten Seite angebracht ist. Wegen den in 4.1 abgeschätzten Halterungsbreiten addiert man zu den  $l_i$  also jeweils noch 4 mm.

Die in Abschnitt 4.1 beschriebene Kleinwinkelnäherung kann hier nicht angewendet werden, da für den größten gemessenen Wert  $\frac{s}{l_{\max}} = 0,2870(18) \ll 1$  nicht erfüllt ist.

Erstellt man nun für jede Farbe einen Plot, in dem  $\sin(\arctan(\frac{s}{l})) = \sin \alpha$  gegen die Ordnung  $n$  der Maxima aufgetragen ist, kann man einen linearen Zusammenhang wie in den Abbildungen 5a, 5b und 5c feststellen.

Die Geradengleichungen  $f_i = k_i \cdot n + e_i$  aus den Fits haben die Steigungen  $k_1 = (57,25 \pm 0,48) \cdot 10^{-3}$ ,  $k_2 = (54,51 \pm 0,66) \cdot 10^{-3}$  und  $k_3 = (43,61 \pm 7,30) \cdot 10^{-3}$ , welche aus Matlab abgelesen wurden. Wie in Abschnitt 4.1 können auch hier die  $e_i$  vernachlässigt werden, da sie extrem klein sind.

Mit den gleichen Unsicherheiten für  $s$  und  $l$  wie in 4.1, wurde mit Python die Gaußsche Fehlerfortpflanzung von  $\sin(\arctan(\frac{s}{l}))$  berechnet.

Da die Abstände zwischen den blauen Maxima am kleinsten und zwischen den orangen Maxima am größten waren, besitzt dementsprechend die Ausgleichsgerade  $f_3$  die geringste und  $f_1$  die größte Steigung.

Zudem fällt auf, dass die Unsicherheit für die blauen Werte mit Abstand am höchsten ist. In der Versuchsanleitung ist vermerkt, dass die blauen Maxima nur schwach zu sehen sind [5]. Dies könnte eine mögliche Erklärung für die größere Unsicherheit bei der blauen Farbe sein.

Um nun die genaue Wellenlänge für jede der drei Farben zu ermitteln, formt man Gleichung 3 mit  $\sin(\arctan(\frac{s}{l})) = \sin \alpha \approx k_i \cdot n$  zu:

$$n \cdot \lambda = a \cdot k_i \cdot n \quad (16)$$

um. Für die unterschiedlichen Wellenlängen ergeben sich numerisch folgende Werte:  $\lambda_{\text{orange}} = (572,5 \pm 4,9) \text{ nm}$ ,  $\lambda_{\text{grün}} = (545,1 \pm 6,7) \text{ nm}$  und  $\lambda_{\text{blau}} = (436,1 \pm 73,0) \text{ nm}$ . Die Unsicherheiten für die Wellenlängen wurden mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung ermittelt. Die experimentell bestimmten Werte für  $\lambda$  stimmen innerhalb der Unsicherheiten mit den Literaturwerten  $\lambda_{\text{orange, lit}} = 577,0 \text{ nm}$ ,  $\lambda_{\text{grün, lit}} = 546,1 \text{ nm}$  und  $\lambda_{\text{blau, lit}} = 435,8 \text{ nm}$  [6] überein.

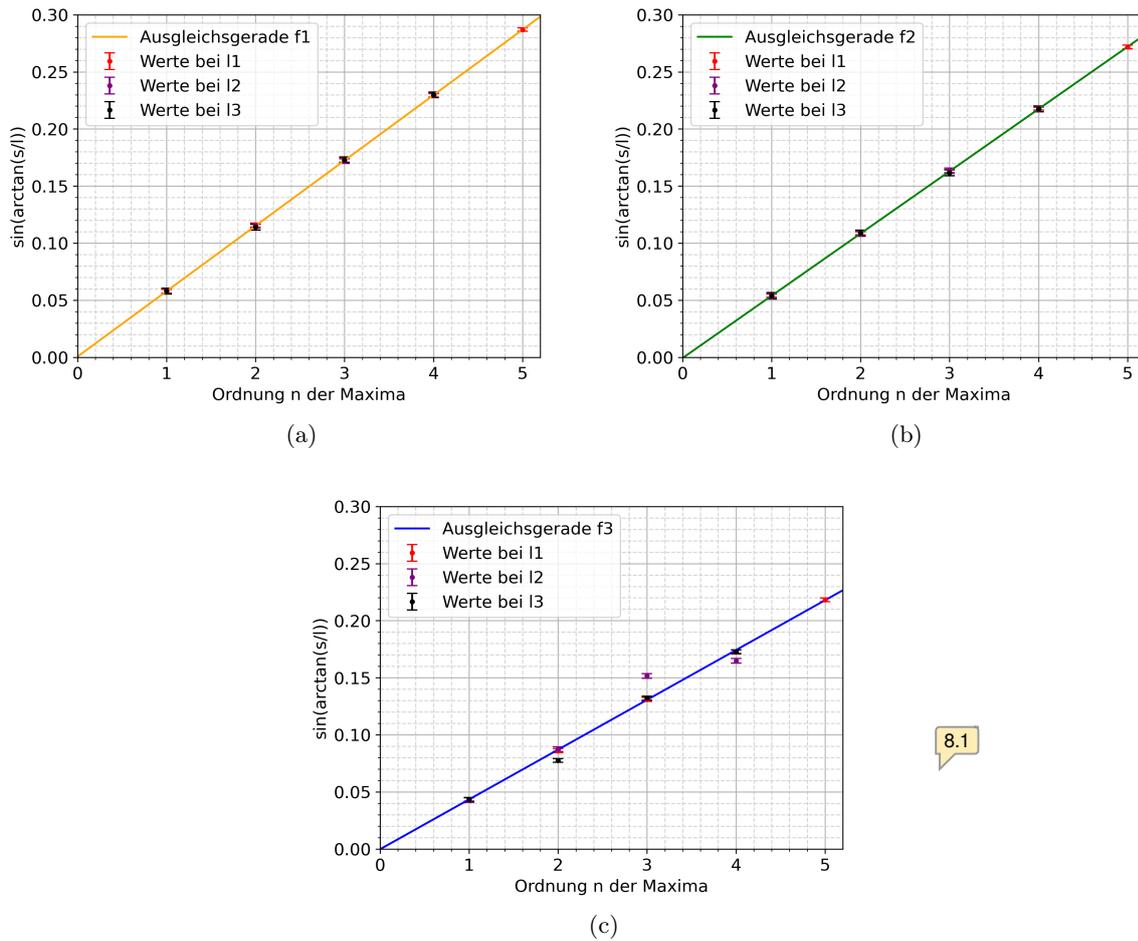


Abbildung 5:  $\sin \alpha$  gegen  $n$  für die orangene (a), grüne (b) und blaue (c) Spektrallinie der Hg-Dampflampe

### 4.3 Bestimmung des Prismenwinkels

Mithilfe der beiden gemessenen Winkel  $\psi = (7.8 \pm 0.3)^\circ$  und  $\phi = (127.4 \pm 0.3)^\circ$  berechnet sich der Prismenwinkel mit Gleichung 13 zu  $\epsilon = (59.8 \pm 0.2)^\circ$ .

Dies liegt im erwarteten Bereich, da der Querschnitt des Prismas ungefähr wie ein gleichseitiges Dreieck aussah.

Für die Winkelmessungen wurde jeweils eine Ableseunsicherheit von  $u(\alpha) = 0,3^\circ$  abgeschätzt.

### 4.4 Bestimmung des Brechungsindex des Prismas

Farbe der Linie	Wellenlänge $\lambda$ [nm]	Winkel $\delta_{\min}$ [°]	Brechungsindex $n$
Orange	579,07	$36,8 \pm 1,7$	$1,498 \pm 0,010$
Grün	546,07	$37,2 \pm 1,7$	$1,502 \pm 0,010$
Blau	435,83	$41,2 \pm 1,7$	$1,548 \pm 0,014$

Tabelle 1: Wellenlänge (Literaturwerte [6]), Minimalablenkungswinkel und Brechungsindex für die Spektrallinien der Hg-Lampe

Der Winkel der minimalen Ablenkung wurde bei der Quecksilberdampflampe für die blaue, grüne und

„rechte“ orangene Spektrallinie mithilfe von Gleichung 11 bestimmt. Daraus lässt sich mit Gleichung 9 der Brechungsindex  $n(\lambda)$  berechnen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 aufgetragen. Für die gemessenen Winkel wurde ein Ablesefehler von  $u_1(\theta) = 0,3^\circ$  geschätzt, zusätzlich wird noch eine Bestimmunsicherheit  $u_2(\theta) = 0,5^\circ$  berücksichtigt. Für diese wurde der Minimalwinkel einer Linie von beiden Teammitgliedern separat bestimmt; die Differenz der Werte bildet dann die Unsicherheit.

Wie erwartet ist der Ablenkwinkel für kürzere Wellenlängen höher und damit auch der Brechungs-

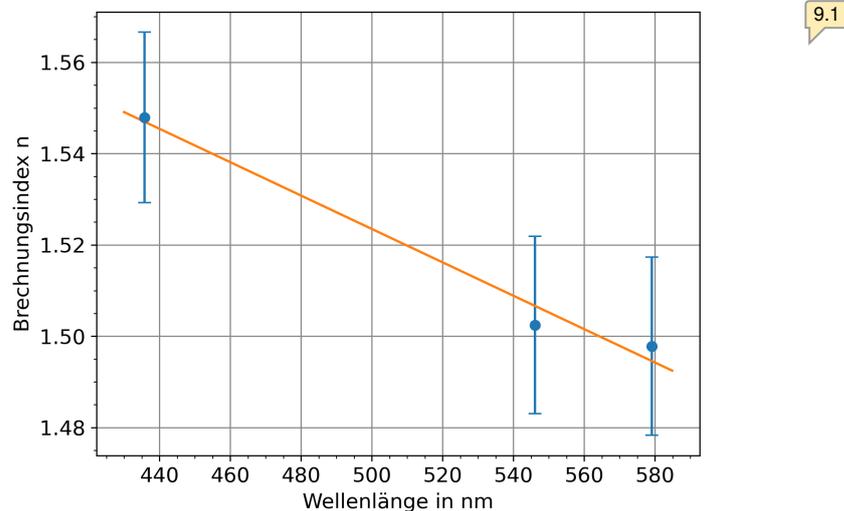


Abbildung 6: Brechungsindex  $n$  in Abhängigkeit der Wellenlänge  $\lambda$  bei der Hg-Lampe mit linearer Ausgleichsgerade

index. Abbildung 6 zeigt den Brechungsindex in Abhängigkeit der Wellenlänge. Zusätzlich wurde eine Ausgleichsgerade  $n(\lambda) = 1,71 - 3,66 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{m}} \cdot \lambda$  aufgetragen. Die Gerade verläuft innerhalb der Fehlerbalken, der lineare Zusammenhang scheint für diesen Wellenlängenbereich also gerechtfertigt.

Die Daten sind allerdings nicht sehr aussagekräftig, für eine genauere Bestimmung des Zusammenhangs von Wellenlänge und Brechungsindex müsste der Versuch für mehr als nur drei Spektrallinien durchgeführt werden.

Für  $\lambda = 546 \text{ nm}$  findet man den Literaturwert  $n = 1,520$  [4] (BK-7 Glas). Dieser Wert liegt zwar nicht innerhalb der Unsicherheit von  $n = 1,502 \pm 0,010$ , aber in der richtigen Größenordnung. Da die Glassorte des Prismas nicht bekannt ist, lässt sich auch kein exakter Literaturwert finden, da die Brechungsindizes für verschiedene Glassorten unterschiedlich sind.

#### 4.5 Bestimmung der Spektrallinien der Energiesparlampe

Mithilfe des Winkels der minimalen Ablenkung lässt sich nun wieder der Brechungsindex des Prismas für die Spektrallinien bestimmen. Um die Wellenlänge der Linien zu erhalten, wird die Funktion der Ausgleichsgerade aus dem vorhergehenden Teil nach  $\lambda$  umgestellt:

$$\lambda = \frac{1,71 - n}{3,66} \cdot 10^{-6} \text{ m.} \quad (17)$$

Die erhaltenen Ergebnisse für die am besten sichtbarsten Spektrallinien sind in Tabelle 2 aufgetragen.

Farbe der Linie	Winkel $\delta_{min}$ [°]	Brechungsindex $n$	Wellenlänge $\lambda$ [nm]
Blau	41,2	1,548	433
Grün	37,4	1,505	551
Gelb	36,6	1,495	577
Orange	36,2	1,491	589
Rot	36,0	1,488	596

Tabelle 2: Minimalablenkungswinkel, Brechungsindex und bestimmte Wellenlänge für die Spektrallinien der Energiesparlampe

Die Wellenlängen der blauen und grünen Linie der Energiesparlampe liegen sehr nah an denen der Quecksilberdampfampe. Dies würde nahelegen, dass in der Energiesparlampe Quecksilber verwendet wird. Für die orangene Linie mit Wellenlänge  $\lambda = 589$  nm findet sich auch eine Quecksilberspektrallinie mit  $\lambda = 588,8$  nm [6], jedoch ist mit dem Wert eine verhältnismäßige niedrige Intensität angegeben. Die orangene Linie schien bei der Energiesparlampe aber die stärkste zu sein.

Es ist allerdings möglich, dass die Lampe zwar mit Quecksilber gefüllt ist, jedoch zusätzlich mit einem Leuchtstoff beschichtet ist. Diese Leuchtstoffe absorbieren Licht im UV-Bereich und emittieren sichtbares Licht. Sie werden beispielsweise in Leuchtstoffröhren verwendet, da Quecksilber zu einem großem Teil nicht sichtbares UV-Licht austrahlt [2]. Die Spektrallinien, die nicht zum Quecksilber passen, könnten dann von dem Leuchtstoff ausgestrahlt werden.

Für die rote Linie wurde die Wellenlänge zu  $\lambda = 596$  nm bestimmt, jedoch beginnt rotes Licht erst ab 680 nm-700 nm. Das zeigt, dass die in Teil 4.4 gemachte Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen Wellenlänge und Brechungsindex nicht allgemein gültig ist.

10.1

## 5 Fragen

### 5.1 Geeignete Lichtquelle für Interferenzerscheinungen

Interferenzerscheinungen lassen sich am besten bei monochromatischen Lichtquellen mit großer Kohärenzlänge beobachten. Eine große Kohärenzlänge führt dazu, dass die Interferenzerscheinungen auch bei langen optischen Weglängen beobachtbar sind. Hat man kein monochromatisches Licht, können sich Minima und Maxima ähnlicher Wellenlängen überlagern, wodurch man die Extrema nicht richtig wahrnehmen kann. Diese Voraussetzungen sind zum Beispiel bei Lasern erfüllt.

### 5.2 Beugungserscheinungen

Beugungserscheinungen sind am besten beobachtbar, wenn das betrachtete Objekt in der Größenordnung der Wellenlänge des Lichts liegt (vgl. Abschnitt 2.1.1). Unterscheiden sich die Größenordnungen von  $\lambda$  und der Körperausdehnung, kommt es auch zur Beugung; jedoch ist hier die Intensität des gebeugten Lichts sehr gering, sodass man es schlechter wahrnehmen kann.

### 5.3 Geschwindigkeit von Licht in Glas

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht in Glas  $c_{\text{Glas}}$  hängt vom Brechungsindex  $n_{\text{Glas}}$  der betrachteten Glassorte ab:

$$c_{\text{Glas}} = \frac{c_{\text{Vak}}}{n_{\text{Glas}}}, \quad (18)$$

wobei  $c_{\text{Vak}}$  die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist. Mit einem ungefähren Brechungsindex von  $n = 1,5$  erhält man  $c_{\text{Glas}} \approx 2 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , also ungefähr  $2/3$  der Vakuumlichtgeschwindigkeit.

### 5.4 Dispersion

Der Begriff *Dispersion* bezeichnet den Effekt, dass der Brechungsindex im Medium von der Wellenlänge des Lichts abhängt. Dabei unterscheidet man zwischen der sogenannten *normalen* und *anormalen* Di-

spersion. Erstere ist dadurch gekennzeichnet, dass Licht umso stärker gebrochen wird, je kürzer dessen Wellenlänge ist. Bei der *anormalen* Dispersion nimmt im Gegensatz dazu der Brechungsindex mit steigendem  $\lambda$  zu.

Man macht sich die Dispersion in diesem Versuch beim Prismenspektrometer zu Nutze.

## 5.5 Auflösungsvermögen eines Prismenspektrometers

Die Auflösung des Spektrometers kann durch einige Faktoren beeinflusst werden, wie beispielsweise die Beschaffenheit der Oberfläche. Ist diese nicht ordentlich geschliffen oder hat eine Fettschicht durch das Anfassen ohne Handschuhe, wird das Auflösungsvermögen verringert, da an diesen unsauberen Oberflächen weitere Beugungseffekte auftreten können.

Zudem wird das entstehende Bild mit größerer werdender Spaltbreite unschärfer .

## 5.6 Brechungsindex von Flintglas

Der Brechungsindex von Flintglas nimmt vom roten zum blauen Spektralbereich zu [3]. Es handelt sich also um ein Medium mit normaler Dispersion.

## 5.7 Verlauf des wellenlängenabhängigen Brechungsindex

Wie in Teil 4.5 schon ermittelt, ist der Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Brechungsindex nicht-linear.

# 6 Literaturverzeichnis

- [1] *Beugung am Gitter*. Technische Universität München. 4. Juni 2020. URL: <https://www.moodle.tum.de/mod/page/view.php?id=1421176> (besucht am 13.03.2021).
- [2] *Funktionsprinzip von Leuchtstofflampen*. URL: <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/stromwirkungen/ausblick/funktionsprinzip-von-leuchtstofflampen> (besucht am 13.03.2021).
- [3] *Optical constants of BAF10*. URL: <https://refractiveindex.info/?shelf=3d&book=glass&page=BAF10> (besucht am 13.03.2021).
- [4] *Optical constants of BK7*. URL: <https://refractiveindex.info/?shelf=glass&book=BK7&page=SCHOTT> (besucht am 13.03.2021).
- [5] Fakultät für Physik. *Lichtbeugung und Lichtbrechung (BUB)*. Technische Universität München. 16. Nov. 2015. URL: <https://www.ph.tum.de/academics/org/labs/ap/ap3/BUB.pdf> (besucht am 12.03.2021).
- [6] *Strong Lines of Mercury (Hg)*. National Institute of Standards und Technology. URL: <https://www.physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/Tables/mercurytable2.htm> (besucht am 13.03.2021).

A1  $l_1 = (195 - 145,4) \text{ cm}$

$U(s) = 1 \text{ mm}$   
 $U(l_i) = 0,5 \text{ mm}$

n (Ordnung)	s (Abstand / Minima) [cm]
1	0,4
2	0,83
3	1,29
4	1,67
5	2,12
6	25,2,565
7	2,99
8	3,85
9	3,81

$l_2 = (195 - 84) \text{ cm}$

n	s [cm]
1	0,98
2	1,98
3	2,96
4	4,04
5	5,04
6	6,02
7	7,00
8	8,00
9	9,03

$l_3 = (195 - 28,5) \text{ cm}$

n	1	2	3	4	5	<del>6</del>	6	<del>7</del>
s [cm]	1,695	3,03	4,47	6,00	7,48	<del>8,1</del>	8,775	10,37

A2

$\theta_0 = 7,8^\circ$

$\theta_1 = 127,4^\circ$

$v(\theta) = 0,3^\circ$

$\theta_L [^\circ]$

$\theta_S [^\circ]$

orange

Hg-Dampflampe

134,0

182,3

$\theta_L [^\circ]$

$\theta_S [^\circ]$

grün

~~134,7~~

133,7

182,2

$\theta_L [^\circ]$

$\theta_S [^\circ]$

blau

133,6

184,1

$\theta_L [^\circ]$

$\theta_S [^\circ]$

blau

Energiesparlampe

133,2

183,7

$\theta_L [^\circ]$

$\theta_S [^\circ]$

grün

134,9

183,5

$\theta_L [^\circ]$

$\theta_S [^\circ]$

gelb

133,0

181,2

$\theta_L [^\circ]$

$\theta_S [^\circ]$

orange

133,1

181,2

$\theta_L [^\circ]$

$\theta_S [^\circ]$

rot

134,1

182,0

$\theta_L [^\circ]$

$\theta_S [^\circ]$

orange stark

134,1

182,1

# Index der Kommentare

---

- 5.1 Wenn Ihr in LATEX das siunit Package verwendet wird das Leerzeichen hen zwischen Zahlenwert und Einheit automatisch gesetzt...
- 8.1 Es sollten ja laut ABW zwei signifikante Stellen für die Unsicherheiten verwendet werden. Führende Nullen zählen hier nicht mit...
- 9.1 Achtet bitte darauf Punkt und Komma konsistent zu verwenden...
- 10.1 Sehr ausführlich und umfassend diskutiert...