

ANFÄNGERPRAKTIKUM DER FAKULTÄT FÜR PHYSIK,  
UNIVERSITÄT GÖTTINGEN

---

**Versuch 23**  
**Fresnelsche Formeln und Polarisation**

---

Praktikant/in:

Mitpraktikant/in:

E-Mail:

Betreuer/in:

Datum der Durchführung: 18.01.2024

Testat:

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>4</b>
2.1	Brechungsindex und Polarisation . . . . .	4
2.2	Fresnelsche Formeln . . . . .	5
2.3	Brewster-Winkel . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Durchführung</b>	<b>6</b>
3.1	Versuchsaufbau . . . . .	6
3.2	Justierung und Referenzmessung . . . . .	6
3.3	Messung . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>11</b>
<b>6</b>	<b>Anhang</b>	<b>13</b>
6.1	Formeln für Fehlerrechnung und lineare Regression . . . . .	13
	<b>Literatur</b>	<b>15</b>

---

# 1 Einleitung

Polarisation von elektromagnetischen Wellen ist nicht nur in der Physik ein wichtiges Thema, auch im Alltag ist Polarisation überall zu finden. So sind Funkwellen horizontal oder vertikal polarisiert um ohne Auslöschung mit einer einzelnen Stabantenne empfangen werden zu können. Dies ist zum Beispiel bei der Seefahrt und Luftfahrt in Verwendung. Satellitenkommunikation hingegen ist in der Regel zirkular polarisiert, da dies weniger störungsanfällig ist beim Durchgang durch die Ionosphäre.

Aber auch in der Fotografie finden Polarisationsfilter eine große Anwendung. So werden durch verschiedene Polarisationsfilter Reflexionen an glatten Oberflächen unterdrückt, Farben werden kräftiger oder unterdrückt, je nach verwendetem Filter und dessen Ausrichtung. Auf den Fotos erkennt man diese Effekte besonders gut: alle Farben sind kräf-



**(a)** Foto, aufgenommen am Adriatischen Meer in Kroatien, ohne Polarisationsfilter, [1]



**(b)** Foto, aufgenommen am Adriatischen Meer in Kroatien, mit Polarisationsfilter, [1]

tiger und die Lichtreflexionen vom Meer sind geringer.

Es gibt sogar Hinweise darauf, dass Polarisationsfilter in Form von sogenannten „Sonnensteinen“ bereits zwischen dem 9. und 11. Jahrhundert von Wikingern verwendet wurden, um Navigation im Polarmeer zu ermöglichen, wenn genaue Positionsermittlung aufgrund von trübem Himmel im Polarsommer, wenn die Sonne immer sichtbar bleibt, kaum möglich ist. Es wird von einer drehbaren Scheibe berichtet<sup>1</sup>, mit deren Hilfe es möglich war, den genauen Stand der Sonne auch bei bedecktem Himmel zu bestimmen. Es wird vermutet, dass dies durch Erkennen eines Polarisationsmusters möglich war.

Im Gegensatz zu den Wikingern wissen wir mittlerweile, wie die Fresnelschen Formeln zur genauen Beschreibung verschiedener Polarisierungseffekte verwendet werden und warum diese Effekte auftreten. Dies soll in diesem Protokoll genauer betrachtet werden.

---

<sup>1</sup>[2] berichtet über Funde zu diesen Sonnensteinen

## 2 Theorie

### 2.1 Brechungsindex und Polarisierung

Licht breitet sich als Transversalwelle in Richtung  $\vec{k}$  im Raum aus. Dabei ist die Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Materialien unterschiedlich, woraus sich der sogenannte Brechungsindex  $n$  bestimmen lässt, durch  $n = \frac{c_{\text{Vakuum}}}{c_{\text{Material}}}$ . Trifft nun die Lichtwelle aus einem Medium mit Brechungsindex  $n_e$  in einem Winkel  $\theta_e$  auf ein anderes Material mit Brechungsindex  $n_t$ , so gilt das SNELLIUS-sche Gesetz, siehe [4, S. 33],

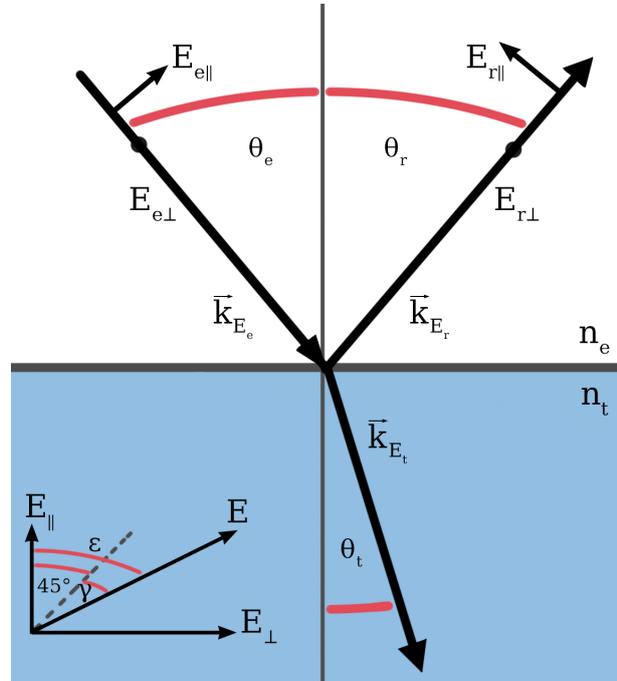
$$n_e \sin(\theta_e) = n_t \sin(\theta_t). \quad (2.1.1)$$

Dabei ist  $\theta_t$  der Austrittswinkel im zweiten Medium, vergl. Abbildung 2.1.

Dabei schwingen sowohl der Feldstärkenvektor  $\vec{E}$  des elektrischen Felds, als auch der Feldstärkenvektor  $\vec{B}$  des magnetischen Felds senkrecht zu  $\vec{k}$ . Die tatsächliche Richtung der Schwingung gibt dabei die sogenannte Polarisierung an. So heißt Licht linear polarisiert, wenn  $\vec{E}$  in einer Ebene schwingt. Betrachtet man nun den Winkel, den diese Ebene zur senkrechten Ebene der Beobachtung aufspannt, kann man diesen bestimmen, anschaulich in Abbildung 2.1 unten links dargestellt. Es folgt

$$\tan(\varepsilon) = \frac{E_{\perp}}{E_{\parallel}}. \quad (2.1.2)$$

Eine weitere Möglichkeit der Polarisierung von Licht ist elliptische Polarisierung, wobei  $\vec{E}$  entlang einer Ellipse um  $\vec{k}$  schwingt. Ein Spezialfall hiervon ist die zirkuläre Polarisierung, bei der der Abstand vom Mittelpunkt konstant ist,  $\vec{E}$  sich also auf einer Kreisbahn bewegt.



**Abbildung 2.1:** Reflexion und Transmission einer Lichtwelle an einem Medium mit Brechungsindex  $n_t$  schematisch dargestellt, eigene Skizze

---

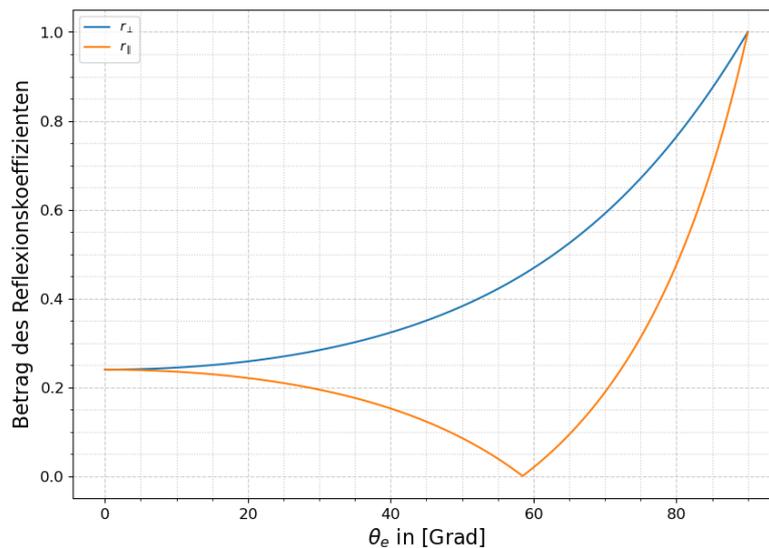
## 2.2 Fresnelsche Formeln

Trifft linear polarisiertes Licht auf ein dichteres Medium, wird ein Teil des Lichts reflektiert. Zur genaueren Betrachtung teilt man das Licht in eine senkrechte und eine parallele Komponente zur Einfallsebene auf. Für diese können dann Reflexionskoeffizienten  $r_{\perp}$  und  $r_{\parallel}$  bestimmt werden nach den Fresnelschen Formeln nach [4, S.38]

$$r_{\perp} = \frac{E_{r_{\perp}}}{E_{e_{\perp}}} = \frac{n_e \cos(\theta_e) - n_t \cos(\theta_t)}{n_e \cos(\theta_e) + n_t \cos(\theta_t)} = -\frac{\sin(\theta_e - \theta_t)}{\sin(\theta_e + \theta_t)}, \quad (2.2.1)$$

$$r_{\parallel} = \frac{E_{r_{\parallel}}}{E_{e_{\parallel}}} = \frac{n_t \cos(\theta_e) - n_e \cos(\theta_t)}{n_t \cos(\theta_e) + n_e \cos(\theta_t)} = \frac{\tan(\theta_e - \theta_t)}{\tan(\theta_e + \theta_t)}. \quad (2.2.2)$$

## 2.3 Brewster-Winkel



**Abbildung 2.2:** Betrag der Reflexionskoeffizienten  $r_{\perp}$  und  $r_{\parallel}$ , geplottet gegen den Einfallswinkel  $\theta_e$  für Brechungsindizes  $n_e = 1$  und  $n_t = 1,63$ , geplottet mit Python

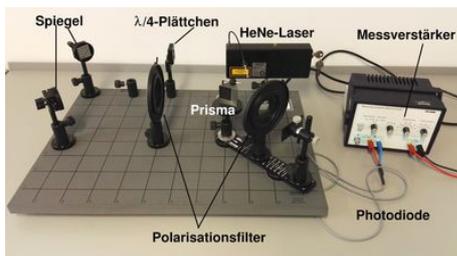
In Abbildung 2.2 ist der Betrag der Reflexionskoeffizienten gegen den Einfallswinkel  $\theta_e$  aufgetragen. Dabei erkennt man eine Nullstelle von  $r_{\parallel}$ , dies ist der Fall beim sogenannten Brewster-Winkel  $\theta_B$ . Nach [4, S. 40] folgt dann die Gleichung

$$\tan(\theta_B) = \frac{n_t}{n_e}. \quad (2.3.1)$$

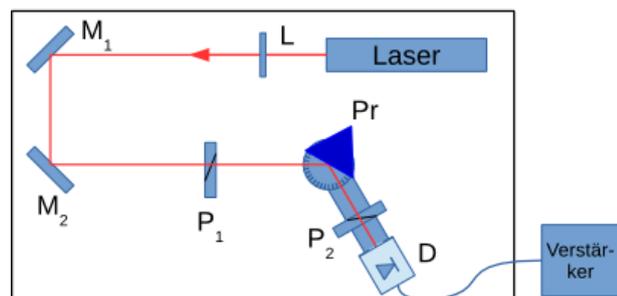
## 3 Durchführung

### 3.1 Versuchsaufbau

In diesem Versuch wird mit den in 3.1a gezeigten Materialien ein Polarimeter aufgebaut, schematisch dargestellt in 3.1b. Dafür wird ein Helium-Neon-Laser mit der Wellenlänge  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$  verwendet, dessen Licht mit einem  $\frac{\lambda}{4}$ -Plättchen zirkular polarisiert wird. Das Licht des Lasers wird dann über zwei Spiegel durch den ersten Polarisationsfilter (Polarisator) geleitet. Je nach durchzuführender Messung befindet sich danach noch das Glasprisma, mit Brechungsindex  $n = 1,63$ , und der zweite Polarisationsfilter (Analyseur) im Strahlengang, bevor das Licht auf die Photodiode trifft. Diese sind auf einem Schwenkarm angebracht, damit auch bei Reflexion des Lichts am Prisma das Licht auf die Photodiode trifft. Die Photodiode wird an einen Verstärker angeschlossen, welcher mit einem Multimeter verbunden wird, zum ablesen der Messwerte.



(a) Versuchsaufbau mit benötigten Materialien: zwei Spiegel,  $\frac{\lambda}{4}$ -Plättchen, Prisma, zwei Polarisationsfilter, Helium-Neon-Laser, Photodiode und Messverstärker, [3]



(b) Schematische Darstellung der Aufbaus, wobei  $M_1$  und  $M_2$  die Spiegel,  $L$  das  $\frac{\lambda}{4}$ -Plättchen und  $P_1$  und  $P_2$  die Polarisationsfilter und das Prisma  $Pr$  darstellen,[3]

### 3.2 Justierung und Referenzmessung

Zunächst muss der Aufbau justiert werden, dafür werden das Prisma und der Analyseur nicht benötigt und werden aus dem Strahlengang entfernt. Der Schwenkarm und die Spiegel werden so eingestellt, dass das Licht zentral durch den Prismenstich verläuft und dann mittig auf die Photodiode trifft.

Der Polarisator wird nun nacheinander auf  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$  eingestellt. Der Verstärker ist so einzustellen, dass die gemessene Spannung höchstens 10 V beträgt. Die Messwerte für  $0^\circ$  und  $90^\circ$  sind zu notieren als Referenzmessung.

---

### 3.3 Messung

Das Prisma wird für die Messungen wieder auf dem Pristentisch platziert, mit einer der reflektierenden Seiten im Mittelpunkt des Tisches. Der Polarisationsfilter wird auf  $0^\circ$  gestellt. Der Schwenkarm wird auf einen Winkel von  $\Phi = 10^\circ$  in  $5^\circ$  Schritten bis  $\Phi = 150^\circ$  gestellt. Für jeden Winkel  $\Phi$  wird nun der Pristentisch so gedreht, dass das Licht zentral auf die Photodiode trifft. Es wird die gemessene Intensität notiert.

Diese Messungen werden wiederholt für die Einstellung des Polarisationsfilters auf  $90^\circ$ . Für die letzte Messreihe wird der Analysator in den Aufbau eingesetzt. Der Polarisator wird auf  $45^\circ$  gestellt und durch drehen des Analysators wird der Winkel der minimalen Intensität des Lichts bestimmt. Auch dies wird für den Winkel  $\Phi$  des Schwenkarms zwischen  $10^\circ$  und  $150^\circ$  gemessen und notiert.

---

## 4 Auswertung

Um den tatsächlichen Einfallswinkel  $\theta_e$  des Lichts auf dem Prisma zu bestimmen, muss der gemessene Winkel  $\Phi$  umgerechnet werden, da  $\Phi$  aus der Null-Position des Schwenkarms gemessen wurde. Wie in Abbildung 2.1 gezeigt, wird  $\theta_e$  zum Lot hin gemessen, damit folgt direkt:

$$\theta_e = 90^\circ - \frac{\Phi}{2}. \quad (4.0.1)$$

Der Fehler wurde dabei berechnet nach Gaußscher Fehlerfortpflanzung 6.1.5 mit

$$\sigma_{\theta_e} = \frac{\sigma_\Phi}{2}, \quad (4.0.2)$$

wobei  $\sigma_\Phi = 2,5^\circ$  entspricht. Die Intensität des Lichts bei der Photodiode ist proportional zur gemessenen Spannung am Multimeter. Somit muss diese normiert werden, bevor eine Aussage getroffen werden kann. Also ist die normierte Intensität

$$I = \frac{U}{U_0}, \quad (4.0.3)$$

wobei  $U_0$  die Referenzmessung ist. Der Fehler berechnet sich nach Gaußscher Fehlerfortpflanzung 6.1.5 zu

$$\sigma_I = \sqrt{\left(\frac{\sigma_U}{U_0}\right)^2 + \left(\frac{U\sigma_{U_0}}{U_0^2}\right)^2}, \quad (4.0.4)$$

wobei durch große Schwankungen und einem nach dem Experiment festgestelltem Kabelbruch, welcher diese vermutlich verursachte, ein Fehler von  $\sigma_U = \pm 0,03 \text{ V}^2$  geschätzt wurde.

In Abbildung 4.1 wurde die so bestimmte normierte Intensität gegen den Einfallswinkel geplottet. Zum Vergleich sind in diesem Plot auch die Theoriekurven eingezeichnet.

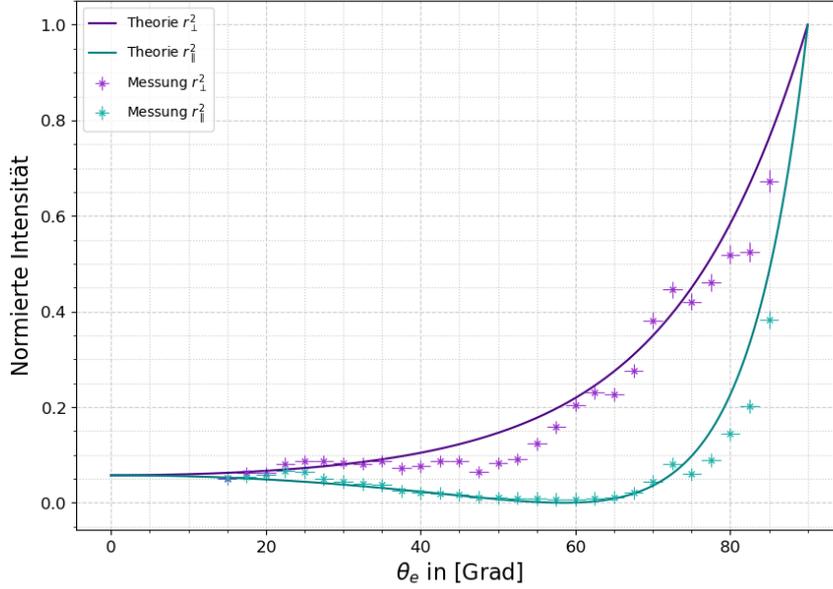
Aus den Messdaten kann nun, wie in Abbildung 4.1 zu erkennen, der Brewster-Winkel abgelesen werden. Der Brewster-Winkel ist der Winkel  $\theta_e$ , bei welchem die gemessene Intensität für parallel polarisiertes Licht auf Null fällt. In diesem Fall ist die gemessene Intensität bei  $\theta_{e1} = 60^\circ$  und  $\theta_{e2} = 57,5^\circ$  minimal mit einer gemessenen Spannung von  $U = 0,016 \text{ V}$ . Nimmt man nun den Mittelwert nach Gleichung 6.1.1 gibt dies einen experimentell bestimmten Brewster-Winkel von  $\theta_B = (58,75 \pm 1,8)^\circ$ .

Nach Gleichung 2.3.1 kann der Brechungsindex des Prismas nun bestimmt werden mit

$$n_t = n_e \cdot \tan(\theta_B) = 1,65 \pm 0,12, \quad (4.0.5)$$

---

<sup>2</sup>Hierbei wurde nach Gleichung 6.1.4 der Gesamtfehler mit Herstellerangaben zum Multimeter, sowie Ungenauigkeit auf dem kleinsten Skalenteil bestimmt, diese wirken sich in diesem Fall jedoch nicht auf die signifikanten Stellen aus und werden daher nicht weiter erwähnt



**Abbildung 4.1:** Normierte Intensität geplottet gegen den Einfallswinkel  $\theta_e$  für parallel und senkrecht polarisiertes Licht

wobei der Fehler bestimmt wurde nach Gaußscher Fehlerfortpflanzung 6.1.5 mit

$$\sigma_{n_t} = \sigma_{\theta_B} \cdot \frac{1}{\cos^2(\theta_B)}. \quad (4.0.6)$$

Parallel und senkrecht polarisiertes Licht wird unterschiedlich reflektiert, weshalb sich die Schwingungsebene von linear polarisiertem Licht dreht, dieser Drehwinkel ist nach Gleichung 2.1.2 gegeben als

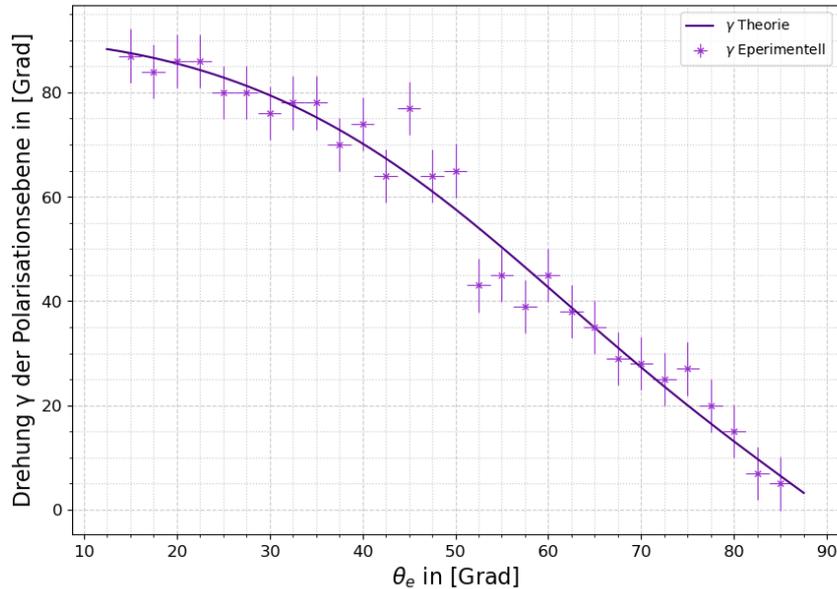
$$\tan(\varepsilon) = \frac{E_{\perp}}{E_{\parallel}} = \frac{r_{\perp}}{r_{\parallel}} = -\frac{\cos(\theta_e - \theta_t)}{\cos(\theta_e + \theta_t)}. \quad (4.0.7)$$

Da durch den Polarisator die Schwingungsebene des Lichts in einem  $45^\circ$  Winkel auf das Prisma trifft, gilt hier  $\varepsilon = \gamma + \frac{\pi}{4}$ . Damit folgt für die theoretische Bestimmung von  $\gamma$  die Funktion

$$\gamma = \arctan \left( -\frac{\cos \left( \theta_e - \arcsin \left( \frac{\sin(\theta_e)}{n} \right) \right)}{\cos \left( \theta_e + \arcsin \left( \frac{\sin(\theta_e)}{n} \right) \right)} \right). \quad (4.0.8)$$

Für die Messung war die Polarisationsebene durch den Polarisator um  $45^\circ$  gedreht, also wird  $\gamma$  bestimmt nach  $\gamma = \delta - 45^\circ$ , wobei  $\delta$  der gemessene Winkel ist. Der Fehler  $\sigma_\delta$  wurde dabei bestimmt nach Gleichung 6.1.4 mit  $\sigma_\delta = \sqrt{1^2 + 5^2}$ , wobei zusätzlich zur

Ungenauigkeit der Skala ein Fehler von etwa  $5^\circ$  angenommen wurde, da die minimale Intensität meist über einen Bereich von etwa  $10^\circ$  gleichbleibend war. Mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung 6.1.5 ergibt sich für den Fehler von  $\gamma$  die Berechnung  $\sigma_\gamma = \sqrt{\sigma_\delta^2 + 1}$ , da auch der Fehler beim Polarisator auf  $\pm 1^\circ$  abgeschätzt wird. Diese so bestimmten



**Abbildung 4.2:**  $\gamma$  aufgetragen gegen den Winkel  $\theta_e$  mit Fehler, sowie Theoriekurve nach Gleichung 4.0.7, wobei diese beim Brewster-Winkel einen Phasensprung hat, welcher hier der Übersicht halber verschoben wurde, da sich dadurch lediglich eine Phasenverschiebung ergibt.

Messdaten für  $\gamma$  sind in Abbildung 4.2 aufgetragen gegen den Winkel  $\theta_e$ . Der Brewster-Winkel kann nun aus Abbildung 4.2 abgelesen werden, da bei  $\gamma = 45^\circ$  die gesamte parallel polarisierte Komponente des Lichts verschwinden sollte. Es ist zu erkennen, dass drei Messpunkte mit Fehlerintervallen auf der Linie für  $\gamma = 45^\circ$  liegen, der Mittelwert dieser, bestimmt nach Gleichung 6.1.1 ist bei  $\theta_B = (57,5 \pm 1,25)^\circ$ . Auch damit kann der Brechungsindex des Prismas nach Gleichung 2.3.1 bestimmt werden, wobei der Fehler analog zu Gleichung 4.0.6 bestimmt wird. Dies ergibt

$$n_t = 1,57 \pm 0,08. \quad (4.0.9)$$

---

## 5 Diskussion

Die einzelnen Teile des Versuchsaufbaus waren zum größten Teil fest mit einer Platte verbaut, auf der der Versuch durchgeführt wurde. Dies führte zu einigen Schwierigkeiten beim Justieren, da es nur schwer möglich war, das Licht an den Spiegeln so zu reflektieren, dass es mittig durch den Prismenstisch und auf die Photodiode traf. Der Lichtstrahl befand sich schließlich nach dem Justieren so nah am Rand eines der Spiegel, dass weiteres Verstellen nicht möglich war, war aber immer noch nicht perfekt zentriert. Ein einfaches Verschieben des Spiegels auf der Platte hätte dieses Problem gelöst, was jedoch nicht möglich war.

Dem Handbuch zufolge sind die Polarisationsfilter auch nicht symmetrisch, was ein weiteres Problem ist, da die Winkelskala am Analysator auf beiden Seiten lediglich bis  $90^\circ$  geht, was für diese Messung nicht ausreichend war und einen deutlich erkennbaren „Knick“ in Abbildung 4.2 verursacht hat.

Zudem dreht sich die unter dem Prismenstisch angebrachte Winkelskala beim Drehen des Schwenkarms teilweise mit, was eine größere Ungenauigkeit beim Einstellen des Winkels nach sich zieht. Eine Möglichkeit diese zu befestigen, wäre zur Fehlerminimierung hilfreich.

Auch die Halterung des Prismas auf dem Prismenstisch brachte ein Problem mit sich, da sie zwangsläufig an irgendeinem Punkt der Messung gegen eine unter dem Prismenstisch angebrachte Feststellschraube trifft, sodass sich dieser nicht mehr weiter drehen lässt. Um dies zu beheben muss die Halterung gelöst und verschoben werden, was potenziell eine Verschiebung des Prismas nach sich zieht.

Auch waren auf dem  $\frac{\lambda}{4}$ -Plättchen, den Polarisationsfiltern und dem Prisma sehr viele Fingerabdrücke, welche die Messung beeinflussen können, weshalb wir das Prisma vor Beginn gereinigt haben. Die Polarisationsfilter und das  $\frac{\lambda}{4}$ -Plättchen sind aber empfindlicher als das Prisma, sodass hier eine Anleitung zum Reinigen, ohne diese Teile zu beschädigen, hilfreich gewesen wäre.

Es gestaltete sich auch als schwierig, den Lichtstrahl nach Änderung des Winkels des Schwenkarms wieder genau auf die Photodiode zu fokussieren, da kleine Veränderungen, die mit dem Auge schwer wahrzunehmen waren, schon einen großen Einfluss auf die gemessene Spannung am Multimeter hatten.

Das genaue Ausrichten des Analysators brachte auch ein paar Schwierigkeiten mit sich, da das Raumlicht auch einen, kleinen aber merkbaren, Einfluss auf die gemessenen Werte hat, sodass man beim Drehen des Analysators auf die eigene Positionierung achten muss. Es war nicht immer möglich einen Einfluss durch eigenen Schattenwurf zu verhindern, da der Analysator recht schwergängig war. Unabhängig davon war der Bereich, in dem sich der gemessene Wert nicht verändert hat, unerwartet groß, was ein richtiges Einstellen und Ablesen des Analysators erschwert hat.

Nach Durchführung des Versuchs stellte sich heraus, dass mindestens eines der verwendeten Kabel einen Kabelbruch aufwies, welcher vermutlich der Grund für stärkere Schwankung der angezeigten Werte des Multimeters zur Folge hatte und an einigen Stel-

---

len Grund für „Ausreißer“-Werte sein könnte, da das Multimeter sich nach einer bestimmten Zeit selbst abschaltet und wieder Einschalten die Kabel bewegt. Dies ist während der Messung zweimal passiert, wobei beim ersten Mal erst drei Messwerte genommen wurden und es so sinnvoller war, die Messreihe neu zu starten.

Derlei Probleme würden sich vermeiden lassen, wenn kaputte Bauteile nicht wieder zurück geräumt würden. Da dies nicht zuverlässig der Fall ist, empfiehlt es sich für weitere Experimente alle verwendeten Materialien genau zu kontrollieren.

Der durch die Intensität abgelesene Brewster-Winkel gab für den Brechungsindex einen Wert von  $n_t = 1,65 \pm 0,12$ , was in einem  $1\text{-}\sigma$ -Intervall zum theoretischen Wert nach Herstellerangaben von  $n_t = 1,63$  liegt, was für die oben genannten Fehlerquellen ein überraschend guter Wert ist.

Auch der aus der Drehung der Polarisationssebene bestimmte Wert für den Brechungsindex liegt mit  $n_t = 1,57 \pm 0,08$  in einem  $1\text{-}\sigma$ -Intervall zum theoretischen Wert.

An den Plots erkennt man besser die Probleme der oben genannten Einflüsse der Messungen, in Abbildung 4.1 erkennt man, dass viele der Messpunkte nicht einmal mit ihren Fehlerintervallen auf den erwarteten Kurven liegen und es besonders im Bereich der größeren Einfallswinkel ( $\theta_e > 70^\circ$ ) große Verschiebungen auf beiden Kurven gibt. Dies liegt vermutlich daran, dass hier das Licht im Vergleich zum geraden Strahlengang kaum abgelenkt wurde, was einen größeren Einfluss durch die nicht perfekte Justierung nach sich zieht.

Auch an Abbildung 4.2 erkennt man, dass einige der Messpunkte definitiv „Ausreißer“ im Vergleich zu anderen sind, am deutlichsten zu erkennen bei  $\theta_e = 45^\circ$  oder  $\theta_e = 52,5^\circ$ . Es ist auch deutlich der Punkt zu sehen, ab dem die Messung des Analysators auf der anderen Seite fortgesetzt werden musste, durch den „Knick“ zwischen  $\theta_e = 50^\circ$  und  $\theta_e = 52,5^\circ$ . Abgesehen davon liegen die Werte aber fast alle in einem  $1\text{-}\sigma$ -Intervall der Theoriekurve.

---

## 6 Anhang

### 6.1 Formeln für Fehlerrechnung und lineare Regression

Mittelwert (Bestwert, für den die quadratischen Abweichungen minimal werden): wird verwendet, um verschiedene Werte für **dieselbe** gemessene Größe zu mitteln:

$$\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.1.1)$$

Gewichteter Mittelwert: wird verwendet, um durch Mitteln der Ergebnisse mehrerer Messvorgänge, abhängig von unterschiedlichen Variablen, eine Größe zu bestimmen:

$$\bar{x} = \frac{\sum_i \frac{x_i}{\sigma_i^2}}{\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (6.1.2)$$

Fehler des gewichteten Mittelwertes:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}}} \quad (6.1.3)$$

Gesamtfehler: der Gesamtfehler ist eine Möglichkeit, den statistischen und systematischen Fehler in der Formel zu verbinden und auf einen Fehler zu berechnen; der systematische Fehler ist ein Fehler, der sich beispielsweise durch eine falsche Messkalibrierung durch einen gesamten Versuch, auch bei Wiederholung desselben Experimentes, durchzieht. Der statistische Fehler ist ein zufälliger Fehler, der durch ungenaues Ablesen oder Zufälligkeiten im Versuchsaufbau entsteht:

$$\sigma_{ges} = \sqrt{\sigma_{sys}^2 + \sigma_{stat}^2} \quad (6.1.4)$$

Fehlerfortpflanzung: die zu berechnende Größe  $f$ , die von den zu bestimmenden Größen  $A$  und  $B$  abhängt, kann um weitere Variablen  $C$ ,  $D$ ,  $E$  usw. ergänzt werden, wenn sich die Formel so gestaltet; die Fehler für weitere Variablen werden nach derselben Logik unter der Wurzel hinzugefügt; wurde sie verwendet, wurden die jeweiligen Größen und Ableitungen in die Formel eingesetzt:

$$\sigma_f = \sqrt{\left(\sigma_A \cdot \frac{\partial f}{\partial A}\right)^2 + \left(\sigma_B \cdot \frac{\partial f}{\partial B}\right)^2} \quad (6.1.5)$$

---

Lineare Regression: die Steigung  $m$  und der Achsenabschnitt  $b$  des linearen Fits werden – wenn benutzt – durch ein Skript in Python berechnet:

$$m = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (6.1.6)$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (6.1.7)$$

Fehler für die Fitwerte der linearen Regression:

$$\sigma_m^2 = \frac{n \sum (y_i - b - m x_i)^2}{(n - 2)(n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2)} \quad (6.1.8)$$

$$\sigma_b^2 = \frac{\sum x_i^2 \sum (y_i - b - m x_i)^2}{(n - 2)(n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2)} \quad (6.1.9)$$

---

## Literatur

- [1] [https://de.wikipedia.org/wiki/Polarisationsfilter#Anwendung\\_in\\_der\\_Fotografie](https://de.wikipedia.org/wiki/Polarisationsfilter#Anwendung_in_der_Fotografie), last access: 20.01.24.
- [2] <https://web.archive.org/web/20120424001533/http://www.nordskip.com/vsagas.html>, last access: 20.01.24.
- [3] J. Große-Knetter. Praktikum zu Experimentalphysik III: 23 - Fresnelsche Formeln und Polarisation, 2020. <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/8006>, last access: 05.01.24.
- [4] U. Zinsh W. Zinsh. *Optik Lichtstrahlen - Wellen - Photonen*. Oldenbourg Verlag München, 4. edition, 2013.

---

## Abbildungsverzeichnis

2.1	Reflexion und Transmission einer Lichtwelle an einem Medium mit Brechungsindex $n_t$ schematisch Dargestellt, eigene Skizze . . . . .	4
2.2	Betrag der Reflexionskoeffizienten $r_{\perp}$ und $r_{\parallel}$ , geplottet gegen den Einfallswinkel $\theta_e$ für Brechungsindizes $n_e = 1$ und $n_t = 1,63$ , geplottet mit Python . . . . .	5
4.1	Normierte Intensität geplottet gegen den Einfallswinkel $\theta_e$ für parallel und senkrecht polarisiertes Licht . . . . .	9
4.2	$\gamma$ aufgetragen gegen den Winkel $\theta_e$ mit Fehler, sowie Theoriekurve nach Gleichung 4.0.7, wobei diese beim Brewster-Winkel einen Phasensprung hat, welcher hier der Übersicht halber verschoben wurde, da sich dadurch lediglich eine Phasenverschiebung ergibt. . . . .	10