

# Polarisation durch Reflexion



**ABSTRACT.** Die Polarisation ist eine bedeutsame Eigenschaft des Lichtes und findet Anwendung bspw. in der Polarimetrie, in der Datenübertragung und Fotografie. In diesem Experiment wurde die Reflektivität von Glas in Abhängigkeit des Einfallswinkels untersucht. Dafür wurde eine Linse mit Laserlicht bestrahlt und die reflektierte Intensität gemessen. Es konnten dabei deutliche Unterschiede für die verschiedenen Polarisationsrichtungen gezeigt werden. Der materialspezifische Brewsterwinkel wurde zu  $\alpha_B = (56 \pm 0,5)^\circ$  bestimmt und daraus ein Brechungsindex des Linsenglasses von  $n = (1,483 \pm 0,029)$  berechnet.

Messwerte und Unsicherheiten sind im Anhang zu finden. Die Propagation von Messunsicherheiten wurde stets gemäß der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung berechnet.

## I. PHYSIKALISCHER HINTERGRUND

Beim Übergang von Licht zwischen zwei schwachabsorbierenden Medien mit Brechungsindex  $n_1, n_2$  spaltet sich der Strahl in einen transmittierten (gebrochenen) und einen reflektierten Teilstrahl auf. Für Einfalls-, Reflexions- und Brechungswinkel  $\alpha_e, \alpha_r, \alpha_g$  gelten dann folgende Beziehungen:

$$\alpha_e = \alpha_r, \quad n_1 \sin \alpha_e = n_2 \sin \alpha_g \quad (1)$$

Anhand der Fresnelschen Formeln lässt sich das Reflexionsvermögen  $R$ , d.h. das Verhältnis zwischen reflektierter und einfallender Intensität berechnen. Dieses unterscheidet sich je nach Polarisierung des einfallenden Lichtes. Bei linear senkrecht bzw. parallel zur Einfallsebene polarisiertem Licht gilt

$$R_s = \frac{\sin^2(\alpha_e - \alpha_g)}{\sin^2(\alpha_e + \alpha_g)} \quad (2)$$

$$R_p = \frac{\tan^2(\alpha_e - \alpha_g)}{\tan^2(\alpha_e + \alpha_g)}$$

Bei senkrechter Inzidenz stimmen die Reflexionsvermögen überein. Während  $R_s$  bis  $90^\circ$  monoton steigend im Einfallswinkel ist, hat  $R_p$  beim sogenannten **Brewsterwinkel**  $\alpha_B$  eine Nullstelle und damit ein Minimum. Für diesen gilt

$$\tan \alpha_B = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

Somit ist der Brewsterwinkel materialspezifisch. Im Rahmen dieses Versuches wird an einem Lichtsensor die Intensität über die Feldstärke, d.h. mittels Spannungsmessung gemessen. Diese Spannung ist proportional zur Intensität, somit gilt für das Reflexionsvermögen, wenn  $U_e$  die Span-

nung bei direkt einfallendem Licht bezeichnet und  $U_r$  die bei reflektiertem Licht gemessene,

$$\sqrt{R} = \sqrt{\frac{U_r}{U_e}} \quad (4)$$

## II. VERSUCHSAUFBAU UND DURCHFÜHRUNG

### 1. Versuchsaufbau

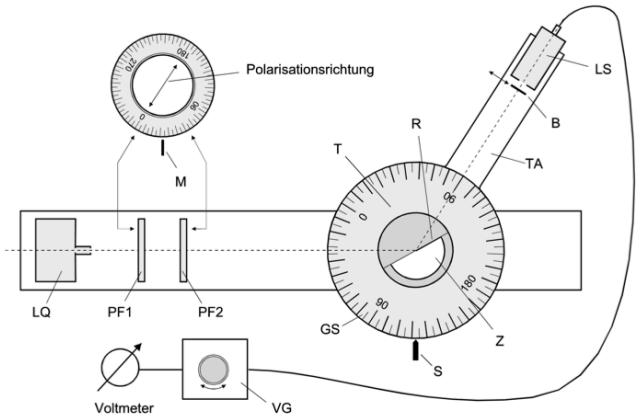


Abb. 1: Aufbau der Versuchsanordnung [1]

In Abb. 1 ist der Aufbau der Versuchsaufbau graphisch dargestellt. Das von der Laserdiode LQ emittierte Licht durchläuft zwei drehbare Polarisationsfilter PF1 und PF2, bevor es auf die Planfläche R einer halbierten Zylinderlinse Z trifft. Diese ist auf einer Drehscheibe T mit Winkelskala GS befestigt. Am Tragarm TA ist ein Lichtsensor LS befestigt, auf den der Strahl bei richtiger Einstellung der Linse trifft. Zum Abblenden bei der Justierung des Strahls steht eine Blende B zur Verfügung. Zur Kompensation des Effekts der Resthelligkeit im Raum und Kalibrierung des Sensors kann eine zusätzliche Spannung VG am

Lichtsensor eingestellt werden. Am Voltmeter wird der Messwert des Sensors abgelesen.

## 2. Durchführung

Zunächst wird die Versuchsanordnung richtig eingestellt. Dafür wird der Tragarm auf  $180^\circ$  geschwenkt, sodass der Laserstrahl direkt auf den Sensor trifft. Mittels der Stellschrauben am Laser wird der Strahl bei geschlossener Blende exakt auf die Eintrittsöffnung zentriert. Danach wird bei ausgeschaltetem Laser die Kompen-sationsspannung so eingestellt, dass das Voltmeter 0 V anzeigt. Anschließend kann der Laser wieder eingeschaltet und durch Drehung von PF1 die Spannung am Voltmeter bei direktem Durchlauf des Strahls auf  $U_e = 4,5$  V eingestellt werden.

Es werden dann zwei Messreihen für die jeweiligen linearen Polarisationsrichtungen aufgenommen. Dafür wird PF2 auf  $0^\circ$  (senkrecht) bzw.  $90^\circ$  (parallel) eingestellt und im Einfallwinkelbereich  $\alpha_e = 5 \dots 85^\circ$  für 32 Messwerte jeweils die Linse so gedreht, dass der Strahl lateral den Sensor trifft, mögliche Höhenabweichungen durch die Stellschraube korrigiert und die Spannung  $U_r$  abgelesen.

## III. AUSWERTUNG

Die in Tab. 1 und Tab. 2 im Anhang zu findenden Messwerte für die Spannung  $U_r$  am Lichtsensor rechnen wir gemäß (4) in Quadratwurzeln der Reflektivität  $R$  um. Diese können wir in Abhängigkeit des Einfallswinkels auftragen. Erwartet wird dabei, dass sich der Verlauf bei senkrechter bzw. paralleler Polarisation qualitativ unterscheidet, wobei letzteres beim Brewster-Winkel minimal wird.

Wie in Abb. 2 zu erkennen, folgen die Messwerte innerhalb der Unsicherheiten dem erwarteten Verlauf. Während die Kurve für senkrecht polarisiertes Licht monoton mit  $\alpha_e$  steigt, weist der Verlauf bei parallel polarisiertem Licht ein Minimum auf, welches in der theoretischen Erwartung beim Brewster-Winkel liegt. Auch zu erkennen ist, dass das Reflexionsvermögen bei senkrechter Inzidenz, i.e.  $\alpha_e = 0^\circ$ , für die beiden Polarisationsrichtungen wie erwartet übereinstimmt. Aus den Messwerten bzw. der Graphik können wir einen Brewster-Winkel von

$$\alpha_B = (56 \pm 0,5)^\circ \quad (5)$$

ablesen. Wir können damit außerdem den Brechungsindex des in der Linse verwendeten Glases bestimmen: Verwendet man als dünneres Medium Luft ( $n_1 = 1$ ), so vereinfacht sich (3) zu

$$n_2 = \tan \alpha_B = (1,483 \pm 0,029) \quad (6)$$

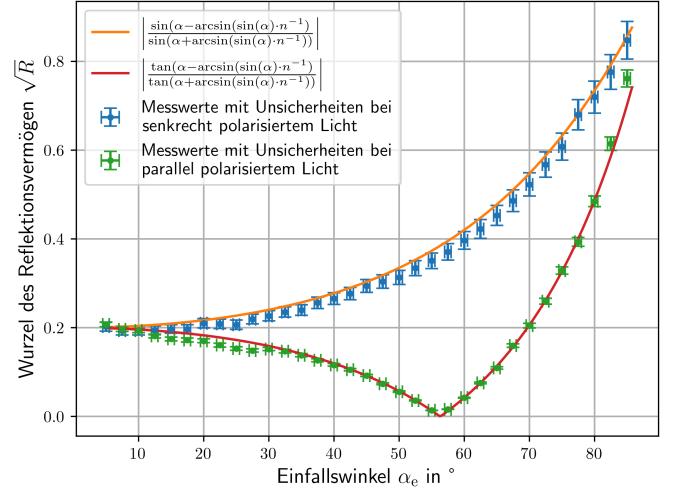


Abb. 2: Graphische Darstellung der beiden Messreihen. Messwerte für die Wurzel des Reflexionsvermögens in Abhängigkeit des Einfallswinkels mit Unsicherheiten in blau (Tab. 1) bzw. grün (Tab. 2). Theoretische Kurve gemäß (2) in orange bzw. rot.

Nach der Gleichung (2) gilt für die Wurzel des Reflexionsvermögens

$$\begin{aligned} \sqrt{R_s} &= \left| \frac{\sin(\alpha_e - \alpha_g)}{\sin(\alpha_e + \alpha_g)} \right| \\ \sqrt{R_p} &= \left| \frac{\tan(\alpha_e - \alpha_g)}{\tan(\alpha_e + \alpha_g)} \right| \end{aligned} \quad (7)$$

wobei wegen (1) gilt

$$\alpha_g = \arcsin\left(\frac{1}{n_2} \sin(\alpha_e)\right) \quad (8)$$

Wird dies eingesetzt, lässt sich unter Verwendung des eben bestimmten Wertes für den Brechungsindex  $n_2$  des Linsenglases die Gl. (7) jeweils als Funktion von  $\alpha_e$  darstellen. Dieser theoretische Verlauf ist auch in Abb. 2 eingezeichnet. Es ist zu erkennen, dass die Messwerte innerhalb der Unsicherheiten der theoretischen Kurve jeweils gut folgen, allerdings bei paralleler Polarisation im Winkelbereich zwischen  $10^\circ$  und  $30^\circ$  eine leichte Abweichung nach unten zu verzeichnen ist.

## IV. DISKUSSION

Im Rahmen der Auswertung konnte bestätigt werden, dass die Abhängigkeit des Reflexionsvermögens einer Glasoberfläche vom Einfallswinkel der Gleichung (2) folgt. Dabei wurde vor allem der qualitative Unterschied im Verlauf bei senkrechter bzw. paralleler Polarisation und die Existenz des Brewster-Winkels verdeutlicht. Es fällt bei parallel polarisiertem Licht eine leichte Diskrepanz der Messwerte zur theoretischen Kurve bei niedrigen

Winkeln auf. Dies kann damit zusammenhängen, dass vor jeder Messung der Laserstrahl neu justiert werden muss. Während des Aufnehmens der Messreihe weist der Strahl einen Drift nach unten auf, der durch stetige Korrektur nach oben an der Stellschraube kompensiert werden muss. Es ist denkbar, dass bei der zweiten Messreihe für einige Messpunkte dieser Effekt nicht beachtet und erst nach einiger Zeit, bei etwa  $30^\circ$ , wieder nachjustiert wurde. Ein nicht exakt auf die Sensoreintrittsöffnung ausgerichteter Laser führt zu einer niedrigeren Intensität im Sensor und damit zu einem scheinbar geringerem Reflexionsvermögen. Der bestimmte Brechungsindex der Linse ist konsistent mit der Erwartung von  $n_2 \approx 1,5$  für optisches Glas [2] (hier BK7).

## V. ANHANG

### 1. Versuchsbedingungen

- Betreuer: Birkan Düzel
- Raum 2'13 Messplatz 1
- Versuchsdatum: 28.01.2025

### 2. Unsicherheiten

Die Unsicherheit bei der Bestimmung der Winkelpositionen auf der Drehscheibe haben wir mittels einer Größtfehlerabschätzung zu  $u_P = 0,5^\circ$  bestimmt.

Die Unsicherheit der durch Rotation des ersten Polarisationsfilters eingestellten Referenzspannung  $U_e$  schätzen wir aufgrund der hohen Sensibilität im Einstellbereich mit  $u_{U_e} = 0,03$  V ab.

Die Unsicherheit der Spannung  $U_r$  am Lichtsensor schätzen wir aufgrund von möglichen leichten Abweichungen bei der Justierung des Strahls mit  $u_{U_r} = 0,005$  V ab.

### 3. Messreihen

Tab. 1: Erste Messreihe: Gemessene Spannung  $U_r$  am Lichtsensor bei einer Maximalintensität von  $U_e = 4,5$  V in Abhängigkeit des Einfallswinkels  $\alpha_e$  bei senkrechter Polarisation zur Einfallsebene

Einfallswinkel (°)	Diodenspannung (V)
5	0,1845
7,5	0,1685
10	0,1680
12,5	0,1699
15	0,1749
17,5	0,1746
20	0,1985
22,5	0,1964
25	0,1924
27,5	0,2168
30	0,2316
32,5	0,2495
35	0,2593
37,5	0,2952
40	0,3177
42,5	0,3444
45	0,3890
47,5	0,4165
50	0,4416
52,5	0,5030
55	0,5536
57,5	0,6193
60	0,7080
62,5	0,8031
65	0,9228
67,5	1,0625
70	1,2287
72,5	1,4486
75	1,6608
77,5	2,0783
80	2,3296
82,5	2,7090
85	3,2322

Tab. 2: Zweite Messreihe: Gemessene Spannung  $U_r$  am Lichtsensor bei einer Maximalintensität von  $U_e = 4,5$  V in Abhängigkeit des Einfallswinkels  $\alpha_e$  bei paralleler Polarisation zur Einfallsebene

Einfallswinkel ( $^{\circ}$ )	Diodenspannung (V)
5	0,19308
7,5	0,1735
10	0,1685
12,5	0,1480
15	0,1376
17,5	0,1337
20	0,1307
22,5	0,1164
25	0,1055
27,5	0,0997
30	0,1042
32,5	0,0975
35	0,0859
37,5	0,0725
40	0,0609
42,5	0,0500
45	0,0386
47,5	0,0246
50	0,0142
52,5	0,0059
55	0,0009
57,5	0,0012
60	0,0081
62,5	0,0259
65	0,0539
67,5	0,1147
70	0,1886
72,5	0,3033
75	0,4859
77,5	0,6955
80	1,0572
82,5	1,6984
85	2,6068

#### QUELLENVERZEICHNIS

- [1] D. Kohlberger *et al.*, "Versuchsanleitung "O11 Polarisation durch Reflexion"," *Humboldt-Universität zu Berlin*, 2024.
- [2] "Refractive index of glass, BK7," *refractiveindexinfo*, abgerufen am 30.01.25, [Online]. Available: <https://refractiveindex.info/?shelf=3d&book=glass&page=BK7>