

VERSUCHSBERICHT ZU

O3 – POLARISATION

Gruppe Mi 11

Alex Oster(a_oste16@uni-muenster.de)
Jonathan Sigrist(j_sigr01@uni-muenster.de)

durchgeführt am 13.06.2018
betreut von Dennis Mallach

19. Juni 2018

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	1
2	Untersuchung von Polarisation	2
2.1	Allgemeines zu dem Aufbau	2
2.1.1	Versuchsmaterialien	2
2.1.2	Polarisation von Licht	3
2.2	Teilversuch 1: Polarisatoren und Gesetz von Malus	4
2.3	Teilversuch 2: $\lambda/2$ -Plättchen	7
2.4	Teilversuch 3: Reflexionsvermögen einer Glasplatte und Brewster Winkel	10
2.5	Teilversuch 4: Strahlenversatz bei Zuckerlösungen	13
2.6	Teilversuch 5: Kristallpolarisation an einem Kalkspat	15
3	Schlussfolgerung	17
4	Anhang	18
4.1	Unsicherheiten	18
	Literatur	20

1 Kurzfassung

Dieser Bericht beschäftigt sich mit der Untersuchung von Polarisation bzw. genauer mit der Wechselwirkung von polarisiertem Licht mit Materie. Dazu werden in fünf Teilversuchen verschiedene Phänomene der Polarisation betrachtet. Zu diesen gehören lineare Polarisierung anhand von Polarisatoren, der Drehung der Polarisationssebene durch ein $\lambda/2$ -Plättchen, dem Reflexionsvermögen einer Glasplatte und dem Sonderfall des Brewster-Winkel, dem Strahlenversatz innerhalb Zuckerlösungen unterschiedlicher Konzentration, sowie Polarisation in Kristallen.

Ziel dieser Untersuchung ist im Wesentlichen die Übereinstimmung der gemessenen und ermittelten Größen mit der Theorie, die den einzelnen Teilversuchen zu Grunde liegt. Das Gesetz von Malus ließ sich durch die Polarisatoren bestätigen, wie auch das Drehen der Polarisationssebene um den zweifachen ($1,998 \pm 0,006$ -fachen) Winkel um den das $\lambda/2$ -Plättchen gedreht wurde. Ebenso, wenn auch ungenauer ließ sich die Brewster-Beziehung bei der Glasplatte begründen und mit einem Brechungsindex von $n = 1,5508 \pm 0,0008$ ließ sich die Platte allgemein zu Glas als Material zuordnen. Für den Strahlenversatz in Abhängigkeit der Konzentration ließ sich das lineare Verhältnis zeigen und die Konzentration von Zucker in einer Röhre ohne Angabe ließ sich dadurch bestimmen. Auch bei dem letzten Teilversuch ließen sich die Beobachtungen anhand der Theorie erklären.

2 Untersuchung von Polarisation

2.1 Allgemeines zu dem Aufbau

2.1.1 Versuchsmaterialien



Abbildung 1: Für den Versuch verwendete Materialien.[2]

Die für diesen Versuch verwendeten Materialien sind in Abb. 1 dargestellt. Bei diesen handelt es sich um:

1. eine Photodiode zur Erzeugung von Photostrom durch das einfallende Laserlicht nach der Polarisation.
2. zwei Polarisatoren zum Polarisieren des Laserlichts, die Winkel werden im Folgenden mit $\phi_{p1/p2}$ bezeichnet.
3. eine Glasplatte zur Untersuchung ihres Reflexionsvermögens.
4. ein Messgerät um die Intensität des Lichts dem Photostrom zu entnehmen.
5. ein Kalkspat zur Untersuchung von Polarisation an Kristallen.

6. ein $\lambda/2$ -Plättchen zur Drehung der Polarisationssebene, dessen Winkel mit $\phi_{\lambda/2}$ bezeichnet wird.
7. ein Laser zur Erzeugung von Licht, welches untersucht werden soll.
8. einige Röhren, die mit Zuckerlösungen unterschiedlicher Konzentration befüllt sind, welche zur Untersuchung des Strahlenversatzes in Abhängigkeit der Konzentration dienen.

Für die verschiedenen Teilversuche werden jeweils nur einige dieser Materialien verwendet. Da der Photostrom sehr gering ist, wird die dazu proportionale Spannung, welche ebenso proportional zu der Intensität ist, an der Photodiode gemessen. Die Betrachtung der Unsicherheiten, die bei den Materialien auftreten und den Rechnungen auftauchen sind im Anhang 4 aufgeführt.

2.1.2 Polarisation von Licht

Licht, welches im Wesentlichen eine elektromagnetische Welle mit hoher Frequenz ist, breitet sich als Transversalwelle aus. Das bedeutet, dass der elektrische Feldvektor senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingt. Polarisation beschreibt die Änderung der Schwingungsrichtung des E-Feldvektors. Bei einem Laser tritt das Licht unpolarisiert, bzw. eigentlich in alle Richtungen polarisiert, aus. Polarisatoren dienen dazu nur in bestimmte Richtungen polarisiertes Licht durchzulassen. Das von ihnen ausgehende Licht wird dann linear polarisiert genannt.

Der Laser und die beiden Polarisatoren werden für alle Teilversuche verwendet.

2.2 Teilversuch 1: Polarisatoren und Gesetz von Malus

Methoden

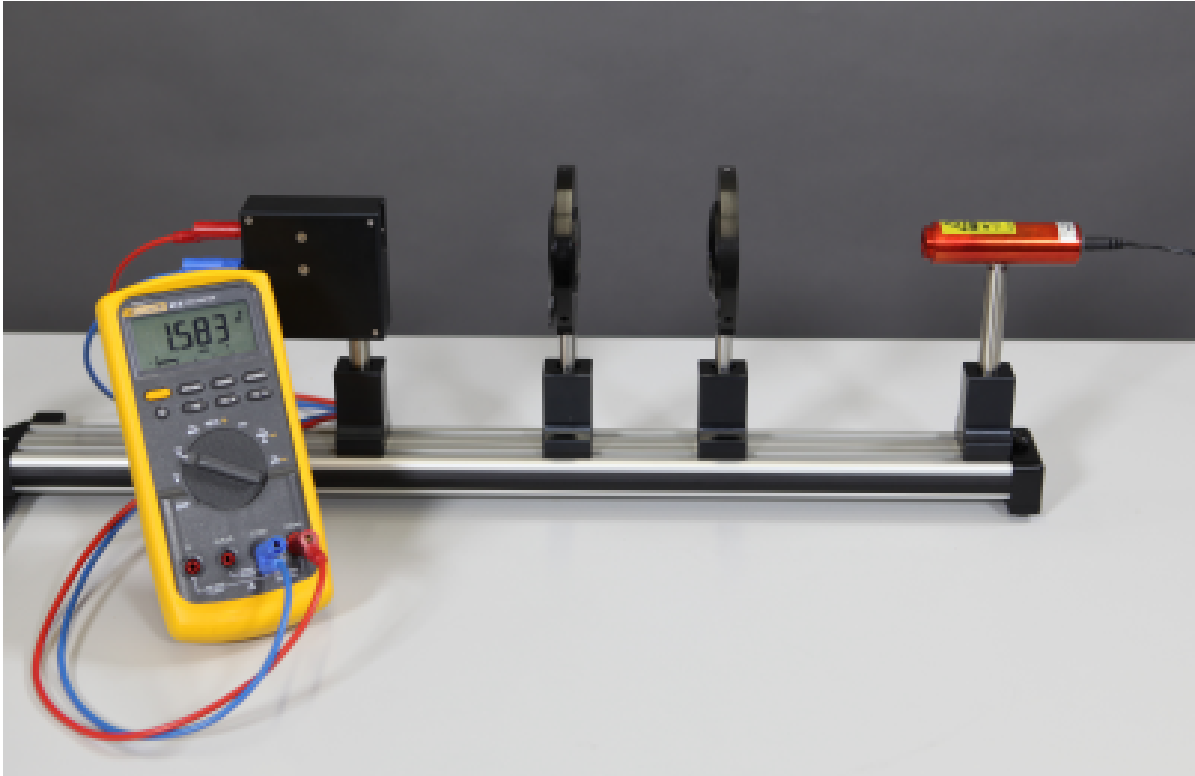


Abbildung 2: Aufbau des ersten Teilversuches[2]

Der Aufbau des ersten Teilversuches ist in Abb. 2 dargestellt. Zunächst soll jedoch nur einer der Polarisatoren zwischen dem Laser und der Photodiode stehen. Diese soll so gedreht werden, dass die gemessene Spannung maximal ist. Dann soll der zweite Polarisator hinzugefügt werden und ausgehend von dem gleichen Winkel wie bei dem ersten in 10° Schritten bis $\pm 90^\circ$ von dem Ausgangswinkel die Spannung gemessen werden. Dies dient zu der Überprüfung des Gesetzes von Malus, welches sich wie folgt definiert:

$$I = I_0 \cos^2 \phi. \quad (2.1)$$

Dabei ist I die gemessene Intensität, I_0 die Ausgangsintensität und $\phi = \phi_{p2}$ der Winkel um den der zweite Polarisator gedreht sein soll. Da jedoch Spannung betrachtet werden sollen,

werden statt I und I_0 gerade U und U_0 betrachtet, was aufgrund der Proportionalität von I und U ebenfalls dem Gesetz von Malus genügen sollte.

Durchführung

Der Winkel, bei dem die gemessene Spannung bei nur einem Polarisator maximal war, belief sich auf $\phi_0 = (106,0 \pm 0,4)^\circ$. So wurden nach dem Einfügen des zweiten Polarisators die Spannungen für die Winkel $\phi_{p2} = (16,0 \pm 0,4)^\circ$ bis $(196,0 \pm 0,4)^\circ$ gemessen. Hierbei ließ sich beobachten, dass ausgehend von ϕ_0 bei zunehmendem und abnehmendem Winkel die Intensität kleiner wurde. Zudem wurden die Minima an den beiden Enden der Messungen, also gerade bei $\pm 90^\circ$ verzeichnet. Abb. 3 beinhaltet die gemessenen Werte.

Datenanalyse

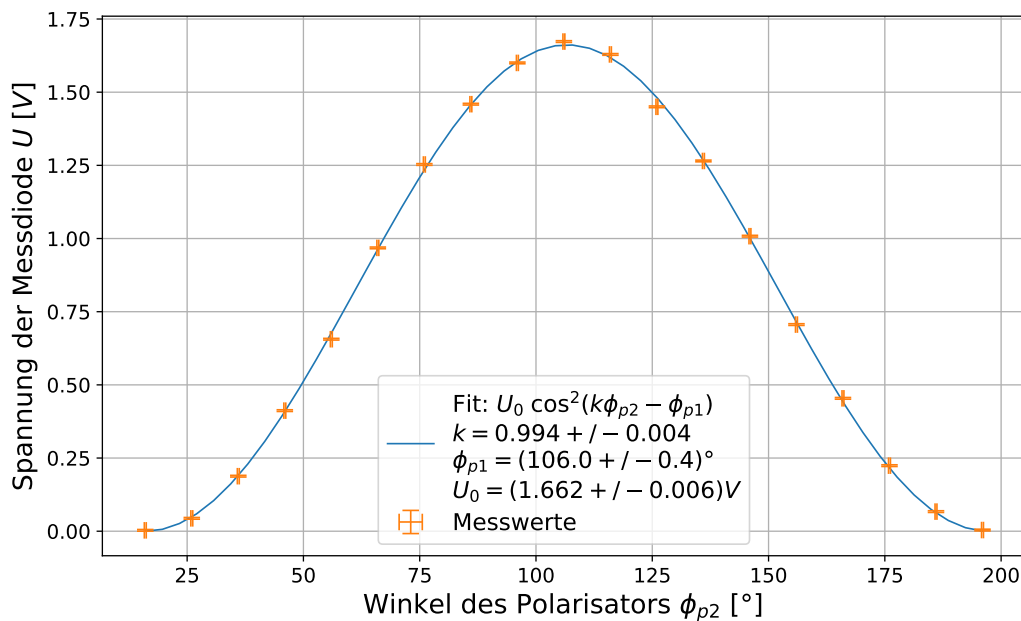


Abbildung 3: Messpunkte für die Polarisation und \cos^2 -Fit zur Überprüfung des Gesetzes von Malus.

Über die Messpunkte in Abb. 3 wurde zusätzlich ein \cos^2 -Fit gelegt, um die Form des Gesetzes von Malus zu überprüfen. Der Fit verläuft dabei durch jeden Messpunkt

bzw. einer Unsicherheit dieser Punkte. Dabei ergibt sich für $U_0 = (1,662 \pm 0,006) \text{ V}$ und für den Polarisationswinkel $\phi_{p1} = (106,0 \pm 0,4)^\circ$. Hinzu kommt ein Korrekturfaktor $k = 0,994 + -0,004$ um Fehler beim Fitten zu reduzieren.

Diskussion

Nun zu der Überprüfung der Hypothese, dass die Ergebnisse dieses Teilversuches mit dem Gesetz von Malus übereinstimmen. Die Größe k wird hierfür als 1 angenommen, da nahezu keine Abweichung davon vorliegt und nur dem Fit dient. Da die Messpunkte alle auf dem \cos^2 -Fit liegen und die Intensität I proportional zu der gemessenen Spannung U ist, lässt sich die Hypothese bestätigen. Auch ohne Einstrahlung des Laserlichts von außen eine geringfügige Spannung von $(3,00 \pm 0,21) \text{ mV}$ durch das Licht in dem Raum aufgenommen wurde, diese hatte jedoch keinen nennenswerten Einfluss auf das Ergebnis.

2.3 Teilversuch 2: $\lambda/2$ -Plättchen

Methoden



Abbildung 4: Aufbau des zweiten Teilversuches.[2]

Der Aufbau des zweiten Teilversuches ist in Abb. 4 dargestellt. Dieser Teilversuch verläuft analog zu dem ersten, nur dass hier zusätzlich das $\lambda/2$ -Plättchen zwischen den beiden Polarisatoren platziert wird.

Beim Eintritt in das Plättchen sind der parallele und der orthogonale Teil des E-Feld Vektors in Phase. Nach dem Durchlaufen des doppelbrechenden Plättchens (n_1, n_2) ist aufgrund der unterschiedlichen Laufzeiten der beiden Komponenten eine Phasendifferenz $\Delta\phi$ zwischen ihnen entstanden.

Gilt für die Dicke d des Plättchens $d \cdot (n_2 - n_1) = \lambda/2$, so wird $\Delta\phi = \pi$ und der E-Feld Vektor dreht sich um den Winkel $\Delta\alpha = 2\phi$. Drehen des $\lambda/2$ -Plättchens um einen Winkel ϕ führt zu einer Drehung der Polarisationssebene um den doppelten Winkel 2ϕ .

Für diesen Versuch soll das $\lambda/2$ -Plättchen gedreht werden und beobachtet werden um welchen Winkel sich das Maximum über Drehung des zweiten Polarisators verschoben hat.

Durchführung

Wie auch bei dem ersten Teilversuch war die gemessene Spannung für die Polarisatoren bei $\phi_{p1} = (106,0 \pm 0,4)^\circ$ maximal. Zunächst wurde gesucht, bei welchem Winkel des $\lambda/2$ -Plättchens das Maximum bei dem hinteren Polarisator gleich bleibt. Dies war bei $\phi_{0,\lambda/2} = (108,0 \pm 0,8)^\circ$ der Fall. Zur Überprüfung, ob sich der Polarisatorwinkel für das Maximum um das Doppelte des Drehwinkels $\phi_{\lambda/2}$ verschiebt, wurde letzterer auf $(152,0 \pm 0,8)^\circ$ gesetzt. Daraufhin ließ sich das Maximum an dem zweiten Polarisator bei $\phi_{p2} = (196,0 \pm 0,4)^\circ$ finden. Für $\Delta\phi_{\lambda/2} = 44^\circ$ ($\approx 45^\circ$ in seiner Unsicherheit) findet an dem Polarisator eine Änderung von $\Delta\phi_{p2} = 90^\circ$ statt. Ausgehend von dem ursprünglichen Maximum wurden nun für fünf weitere Winkel $\phi_{\lambda/2}$ in 10° Schritten die Maximawinkel ϕ_{p2} aufgezeichnet.

Datenanalyse

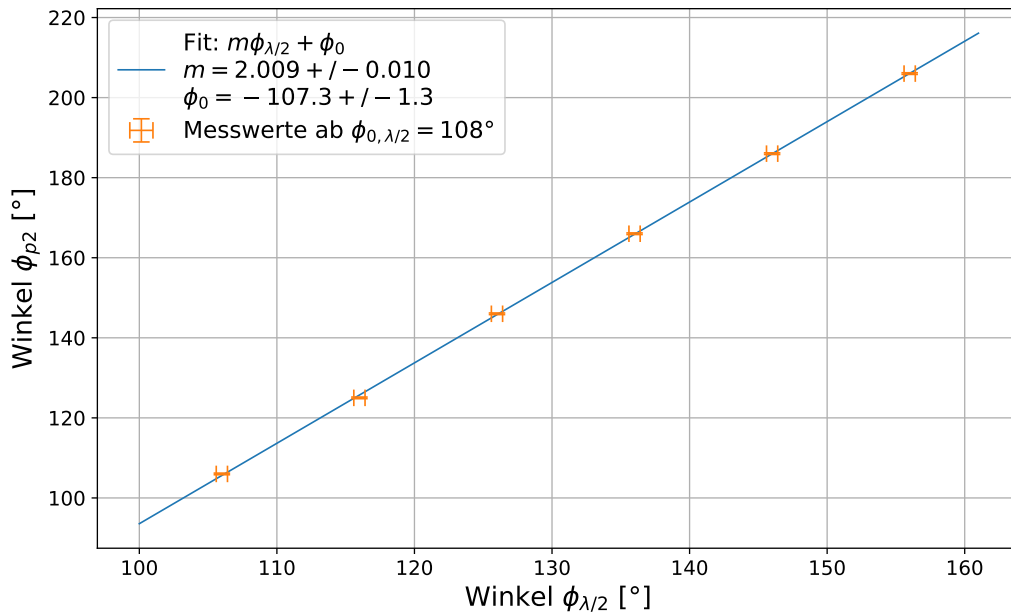


Abbildung 5: Messpunkte und linearer Fit für das Verhältnis m der Winkel $\phi_{\lambda/2}$ und $\phi_{p2} = \phi'$.

Aus den Messpunkten ließ sich das Verhältnis der beiden Winkel $\phi_{\lambda/2}$ und ϕ_{p2} genauer

bestimmen. Da der lineare Faktor zwei zu erwarten war, wurde an dieser Stelle ein linearer Fit verwendet. Abb. 5 stellt diesen Verlauf und die Messpunkte dar. Die Steigung des Fits beträgt $m = 1,998 \pm 0,006$, 2 liegt somit innerhalb einer Unsicherheit.

Diskussion

Das Ergebnis dieses Teilversuches ist, dass das Verhältnis zwischen den Winkeln $\phi_{\lambda/2}$ und ϕ_{p2} gerade $1,998 \pm 0,006$ entspricht. Der Wert ist in Übereinstimmung mit der Hypothese, dass dieses Verhältnis zwei entspricht, da er sich innerhalb der Unsicherheiten des Ergebnisses befindet.

2.4 Teilversuch 3: Reflexionsvermögen einer Glasplatte und Brewster Winkel

Methoden



Abbildung 6: Aufbau des dritten Teilversuches[2]

Der dritte Teilversuch soll wie in Abb. 6 dargestellt aufgebaut werden. Hier steht statt des $\lambda/2$ -Plättchens nun eine Glasplatte in dem Strahlengang. Nun soll betrachtet werden wie sich das Reflexionsvermögen der Glasplatte für Einstrahlung von senkrecht bzw. parallel polarisiertem Licht verhält. Senkrechtes (s) und paralleles (p) polarisiertes Licht sind die Anteile des polarisierten Lichts, die selbsterklärend senkrecht bzw. parallel zu der Glasplatte eingestrahlt werden. Dazu wird die Photodiode an einem Ende und der Laser an dem anderen angebracht, sodass diese an dem beweglichen Gelenk mit der Glasplatte um einen variablen Winkel Θ versetzt werden können. Für die Winkel 30° bis 85° soll dafür in 5° Schritten die Intensität gemessen werden. Besonders ist hierbei der Brewster-Winkel, bei dem der reflektierte und der transmittierte Strahl senkrecht zueinander verlaufen bzw. der E-Feld Vektor ausschließlich senkrecht zu der Einfallsebene schwingt. Dadurch spielt in der Messung auch nur der parallele Anteil des Laserlichts eine Rolle. Aus dem Snellius'schen Brechungsgesetz folgt für die Brewster-Beziehung dann

$$\tan \Theta_B = n, \quad (2.2)$$

für den Fall dass einer der Brechungsindizes eins entspricht (wie hier bei Luft). Die Größe n beschreibt hier dann den Brechungsindex der Glasplatte.

Durchführung

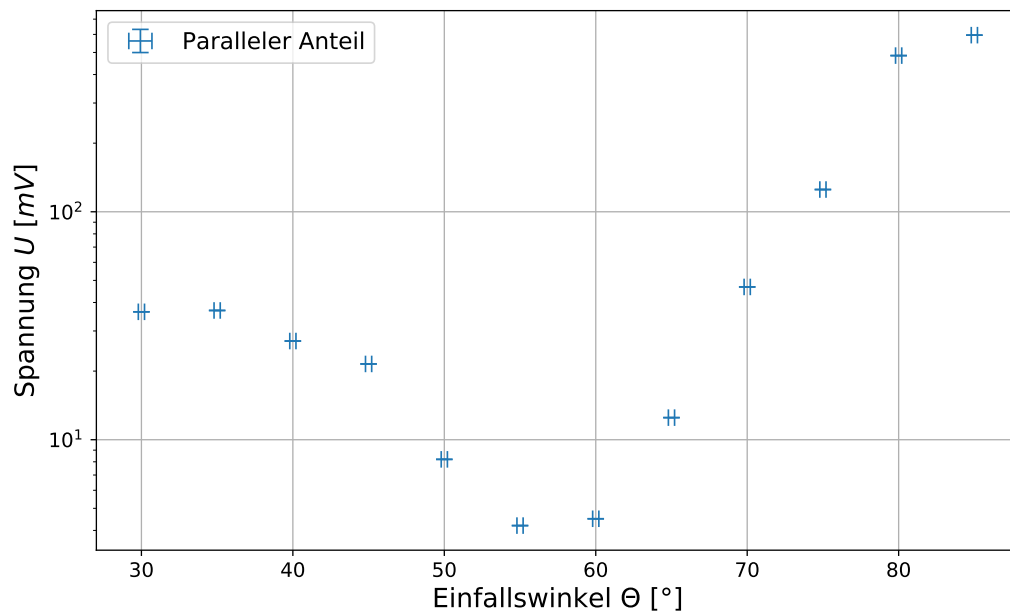


Abbildung 7: Aufgenommene Spannungen in Abhängigkeit des Winkels Θ . Die Spannung ist logarithmisch aufgetragen, um das Minima beim Brewster-Winkel Θ_B deutlicher erkennen zu können.

Für die Winkel $(30,0 \pm 0,4)^\circ$ bis $(85,0 \pm 0,4)^\circ$ wurden in $(5,0 \pm 0,4)^\circ$ die zugehörigen Spannungen an der Photodiode gemessen. Diese sind in 7 aufgetragen.

Datenanalyse

Die geringste Spannung unter den Messpunkten ließ sich bei $\Theta = (55,0 \pm 0,4)^\circ$ beobachten. Damit sollte der Brewster-Winkel für die Glasplatte bei $\Theta_B = (55,0 \pm 0,4)^\circ$ liegen. Einsetzen dieses Winkels in Gl. 2.2 führt zu dem Brechungsindex $n = 1,5508 \pm 0,0008$ für die Glasplatte.

Diskussion

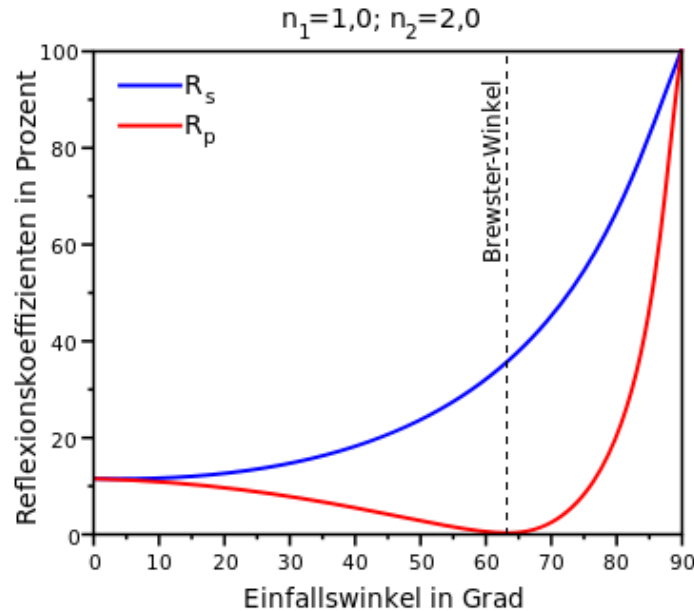


Abbildung 8: Theoretische Kurve des parallel polarisierten Anteils (rot) bei $n_2 = 2$. [1]

Um zu überprüfen, ob die gemessenen und ermittelten Werte mit dem bereits bewiesenen Sachverhalt übereinstimmen, dienen die Abb. 8 und Literaturwerte für den Brechungsindex von Glas. Vergleicht man zunächst die aufgenommenen Messpunkte aus Abb. 7 mit der theoretischen Kurve aus Abb. 8, bei der der Brechungsindex $n_2 = n = 2$ ist, so besitzt der Verlauf des gemessenen Anteils eine ähnliche Form wie die der theoretischen (roten) Kurve. Da der aus den Messpunkten ermittelte Brechungsindex bei $n = 1,5508 \pm 0,0008$ liegt, ist eine exakte Übereinstimmung mit der Theorie für $n = 2$ jedoch auch nicht zu erwarten gewesen. Des Weiteren stellt sich die Frage ob der ermittelte Wert für den Brechungsindex der Glasplatte einen passenden darstellt. Für Kronglas dient der Literaturwert[3] von $n = 1,5145$ und für Flintglas $n = 1,6661$. Eine genaue Beschreibung, um welches Glas es sich bei der Platte handelte, war nicht gegeben und zu keinem der beiden Literaturwerte liegt eine genaue Übereinstimmung vor. Da der n jedoch zwischen beiden liegt, lässt sich zumindest vermuten, dass die Glasplatte tatsächlich aus einem Glas besteht. Ein Widerspruch zu den Fresnel'schen Formeln und der Beugungstheorie lässt sich an dieser Stelle nicht finden.

2.5 Teilversuch 4: Strahlenversatz bei Zuckerlösungen

Methoden

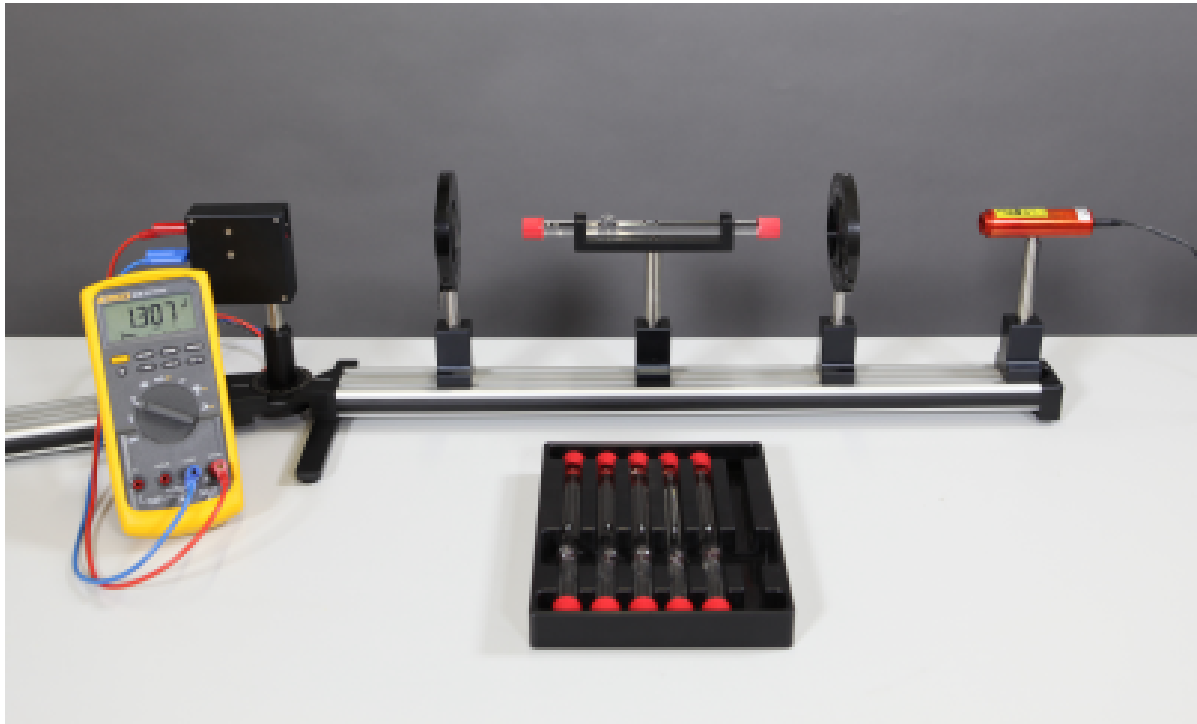


Abbildung 9: Aufbau des vierten Teilversuches[2]

Der Aufbau des vierten Teilversuches ist in Abb. 9 dargestellt. Auch hier wird erneut Materie zwischen die Polarisatoren gebracht. Dieses Mal handelt es sich um mit Zuckerlösung gefüllte Röhren unterschiedlicher Konzentration. Hier sollen die Winkel, an dem zweiten Polarisator, für die unterschiedlichen Konzentration untersucht werden, an denen Minima der Spannung auftreten. Daraus lässt sich eine Funktion des Winkels in Abhängigkeit der Konzentration aufstellen und die unbekannte Konzentration der „U“-Röhre über dessen Winkel bestimmt werden.

Durchführung

Für die unterschiedlichen Konzentrationen wurden die Winkel aufgetragen, bei denen das Minimum der Spannung auftrat. Bei den Messpunkten ließ sich ein linearer Verlauf beobachten. Diese sind in Abb. 10 aufgeführt. Der Winkel der „U“-Röhre belief sich auf

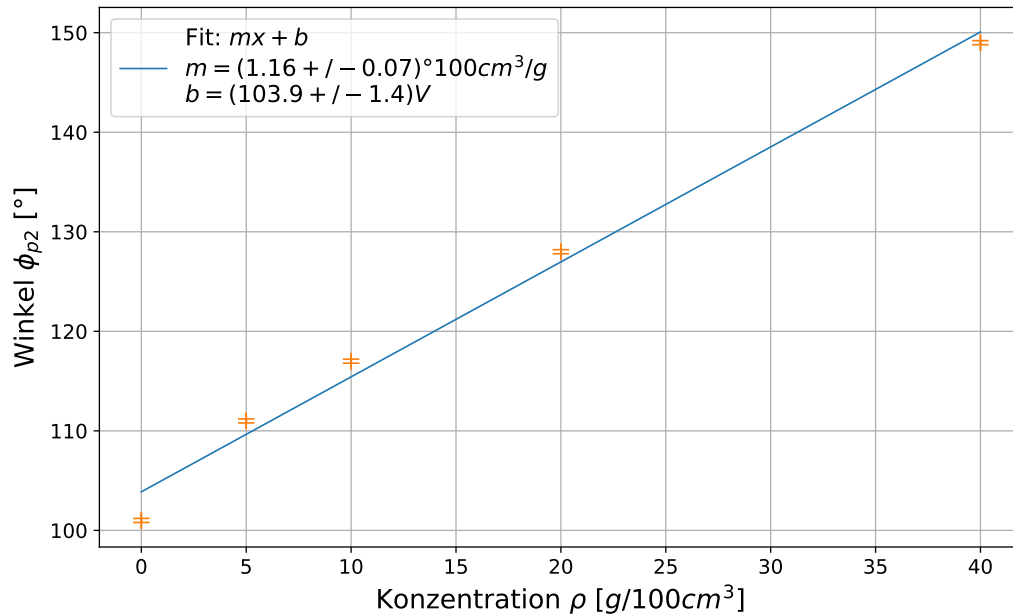


Abbildung 10: Messpunkte und linearer Fit für die Röhren mit bekannter Zuckerkonzentration

$(43,0 \pm 0,4)^\circ$, welcher zwischen den beiden Winkeln für die Röhren mit einer Konzentration von 200 g/L und 400 g/L lag.

Datenanalyse

Die Linearität α zwischen Konzentration und Strahlenversatz setzt sich aus dem spezifischen optischen Drehvermögens α_s mal der Schichtdicke d der Flüssigkeit zusammen. In Abb. 10 ließ sich α durch $m = (1,16 \pm 0,07) \text{ V}/\rho$ beschreiben. Aus dem verwendeten linearen Fit, ließ sich die Konzentration der „U“-Röhre auf $\rho = (252 \pm 20) \text{ g/L}$ bestimmen.

Diskussion

Auch an dieser Stelle lässt sich die Erwartung eines linearen Verlaufs, aufgrund der wenigen Messpunkte jedoch nur ungenau, bestätigen. Dass der Wert für die Konzentration der „U“-Röhre von $\rho = (252 \pm 20) \text{ g/L}$ zwischen 200 g/L und 400 g/L lag, stimmt zudem mit der Beobachtung der Winkel überein.

2.6 Teilversuch 5: Kristallpolarisation an einem Kalkspat

Methoden



Abbildung 11: Aufbau des letzten Teilversuches[2]

Abb. 11 stellt den Aufbau für den letzten Teilversuch dar. Hier werden zwischen die Polarisatoren das $\lambda/2$ -Plättchen und der Kalkspat gesetzt. Die Photodiode soll bei diesem Versuch nicht verwendet werden. Stattdessen soll ein Schirm hinter dem zweiten Polarisator stehen, auf dem die Intensität des Laserlichts beobachtet und diskutiert werden soll.

Durchführung

Nach dem Einsetzen der Versuchsmaterialien und folgender Inbetriebnahme des Lasers ließen sich vier Lichtpunkte auf dem Schirm ausmachen. Drehen des $\lambda/2$ -Plättchens führte dazu, dass jeweils zwei der Lichtpunkte verschwanden, nach weiteren $(45,0 \pm 0,4)^\circ$ wieder auftauchten und dafür die anderen beiden an Intensität verloren. Bei dem Drehen des zweiten Polarisators wurde das gleiche, nur mit anderen Paaren der Punkte, bei $(90,0 \pm 0,4)^\circ$ beobachtet. Waren es bei dem $\lambda/2$ -Plättchens die Punktpaare (1,2) und

(3,4), so waren es beim dem Polarisator die Paare (1,4) und (2,3). Für den Fall, dass beide so gedreht waren, dass je ein Paar verschwindet, war nur einer der vier Lichtpunkte sichtbar.

Diskussion

Die Beobachteten Verhältnisse lassen sich auf die Polarisation an Kristallen zurückführen. Bei dem Strahlengang durch den Kristall, wird der Strahl in zwei Teile geteilt. Einerseits in den „ordentlichen“ Strahl, welcher sich gemäß dem Snellius'schen Brechungsgesetz verhält und mit dem Brechungsindex n_1 in dem Kristall gebrochen wird, sowie andererseits dem „außerordentlichen“ Strahl, welcher um einen anderen Winkel durch den Brechungsindex n_2 gebrochen wird. Die Strahlen sind nach Austritt aus dem Kristall orthogonal zueinander polarisiert. Im Falle zweier linear polarisierter Strahlen, die orthogonal aufeinander liegen, redet man von zirkulärer Polarisation, ansonsten von elliptischer. Trifft Licht mit senkrecht und parallel polarisierten Komponenten auf den Kristall, so werden beide jeweils in einen ordentlichen und einen außerordentlichen Strahl gebrochen. Daher lassen sich vier Lichtpunkte auf dem Schirm erkennen. Wird das $\lambda/2$ -Plättchen so gedreht, dass nur der parallele bzw. senkrechte Anteil durchgelassen wird, so wird auch nur einmal in zwei Strahlen geteilt, weswegen nur zwei Lichtflecke dann auf dem Schirm erkennbar sind. Dass nach $(45,0 \pm 0,4)^\circ$ die orthogonale Polarisation auftritt ist dem zweiten Teilversuch zu entnehmen. Analog mit dem zweiten Polarisator nach $(90,0 \pm 0,4)^\circ$. Für den Fall, dass nach dem Drehen des $\lambda/2$ -Plättchens nur noch zwei Lichtpunkte zu erkennen sind, lässt sich durch Drehen des zweiten Polarisators einer der beiden auslöschen. Auch hier wird dann nur der parallele bzw. senkrechte polarisierte Anteil des Lichtstrahls hinter dem Kristall durchgelassen. Somit lässt sich dieses Phänomen erklären.

3 Schlussfolgerung

Die Ziele dieser Untersuchung eine Übereinstimmung der gemessenen und ermittelten Größen mit der Theorie, die den einzelnen Teilversuchen zu Grunde liegt, zu finden, wurde im Wesentlichen erreicht. Das Gesetz von Malus ließ sich durch die Polarisatoren bestätigen, wie auch das Drehen der Polarisationssebene um den zweifachen ($1,998 \pm 0,006$ -fachen) Winkel um den das $\lambda/2$ -Plättchen gedreht wurde. Ebenso, wenn auch ungenauer ließ sich die Brewster-Beziehung bei der Glasplatte begründen und mit einem Brechungsindex von $n = 1,5508 \pm 0,0008$ ließ sich die Platte allgemein zu Glas als Material zuordnen. Für den Strahlenversatz in Abhängigkeit der Konzentration ließ sich das lineare Verhältnis zeigen und die Konzentration von Zucker in einer Röhre ohne Angabe ließ sich dadurch bestimmen. Auch bei dem letzten Teilversuch ließen sich die Beobachtungen anhand der Theorie erklären.

Abschließend lässt sich behaupten, dass die Untersuchung erfolgreich verlief und eine Wiederholung daher nicht nötig ist. Zur Erweiterung würde es sich anbieten auch $\lambda/4$ -Plättchen und andere Kristalle zu untersuchen. Dies würde jedoch den Rahmen einer experimentellen Übung vermutlich sprengen.

4 Anhang

4.1 Unsicherheiten

Jegliche Unsicherheiten werden nach GUM bestimmt und berechnet. Die Gleichungen dazu finden sich in 12 und 13. Für die Unsicherheitsrechnungen wurde die Python Bibliothek „uncertainties“ herangezogen, welche den Richtlinien des GUM folgt. Alle konkreten Unsicherheitsformeln stehen weiter unten. Für Unsicherheiten in graphischen Fits wurden die y -Unsicherheiten beachtet und die Methode der kleinsten Quadrate angewandt. Dafür steht in der Bibliothek die Methode „`scipy.optimize.curve_fit()`“ zur Verfügung.

Für digitale Messungen wird eine Unsicherheit von $u(X) = \frac{\Delta X}{2\sqrt{3}}$ angenommen, bei analogen eine von $u(X) = \frac{\Delta X}{2\sqrt{6}}$.

Spannung Es wird einheitlich im Bereich bis 20 V gemessen. Das Voltmeter hatte eine digitale Anzeigegenauigkeit von $\Delta U = 0,01 \text{ V}$.

Polariseur Beide Polariseure hatten angegebene analoge Gradstriche mit $\Delta\phi = 1^\circ$.

Standbein Das Standbein auf welchem der Spiegel gedreht wurde, hatte ebenfalls eine Schrittweite von $\Delta\Theta = 1^\circ$ und konnte analog abgelesen werden.

$\lambda/2$ -Platte Die Winkelmarkierungen auf der $\lambda/2$ -Platte waren in einem Abstand von $\Delta\varphi_{\lambda/2} = 2^\circ$ analog abzulesen.

Brewster-Winkel Der Reflektionswinkel mit minimalem parallelen Anteil wurde aus der Abb. ?? abgelesen. Dabei kann der Wert auf ein Intervall der Breite $\Delta\varphi_B = 10^\circ$ abgeschätzt werden. Anhand der theoretischen Vorhersage nach Abb. 8 kann er als analog angesehen werden.

$$x = \sum_{i=1}^N x_i; \quad u(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u(x_i)^2}$$

Abbildung 12: Formel für kombinierte Unsicherheiten des selben Typs nach GUM.

$$f = f(x_1, \dots, x_N); \quad u(f) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right)^2}$$

Abbildung 13: Formel für sich fortplanzende Unsicherheiten nach GUM.

$$n = \arctan(\varphi_B); \quad u(n) = \frac{u(\varphi_B)}{1 + \varphi_B^2}$$

Abbildung 14: Unsicherheitsformel für den Brechungsindex des Glases.

$$\rho = \frac{U - b}{m}; \quad u(\rho) = \rho \sqrt{\frac{u^2(U) + u^2(b)}{(U - b)^2} + \frac{u^2(m)}{m^2}}$$

Abbildung 15: Unsicherheitsformel für die Konzentration der unbekannten Zuckerlösung. m, b sind dabei die Fitparameter der Geraden aus Abb. ??.

Literatur

- [1] Cepheiden(<https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Cepheiden>). *Brewster-Winkel*. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Brewster-Winkel#/media/File:Frensel-Reflexionskoeffizienten_vs_Winkel_DE.svg (besucht am 17.06.2018).
- [2] WWU Münster. *03 - Polarisation*. URL: <https://sso.uni-muenster.de/LearnWeb/learnweb2/course/view.php?id=28561§ion=21> (besucht am 18.06.2018).
- [3] Mikhail Polyanskiy. *Refractive Index Database*. URL: <https://refractiveindex.info/?shelf=3d&book=glass&page=BK7> (besucht am 19.06.2018).