

Polarisation

Protokoll zum Versuch Nummer O5 vom 22. Mai 2015

Frederik Edens, Dennis Eckermann

Gruppe 6mo

f_eden01@uni-muenster.de

dennis.eckermann@gmx.de

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Polarisation durch Reflexion	1
1.2. Doppelbrechung in Kalkspat	1
1.3. Polarisation durch selektive Absorption	1
1.4. $\lambda/2$ -Platte	2
1.5. Optische Aktivität	2
2. Auswertung	3
2.1. Überprüfung des Gesetz von Malus	3
2.2. $\lambda/2$ -Platte	4
2.3. Reflexion von p- und s-polarisierten Licht	5
2.4. Optische Aktivität von Zuckerlösungen	6
2.5. Kalkspat	8
3. Diskussion	9
3.1. Gesetz von Malus	9
3.2. $\lambda/2$ -Platte	9
3.3. p- und s-polarisiertes Licht	9
3.4. Optische Aktivität von Zuckerlösungen	10
3.5. Kalkspat	10
A. Anhang	11
A.1. Fehlerrechnung	11
A.2. Brechungsindex aus Brewsterwinkel	11

1. Einleitung

In diesem Versuch wird das Verhalten von polarisiertem Licht untersucht.

1.1. Polarisation durch Reflexion

Es wird von linear polarisiertem Licht gesprochen, wenn der E-Feldvektor in nur einer Raumrichtung schwingt und von zirkular polarisiertem Licht wenn der E-Feldvektor eine Schraubenlinie beschreibt. Es wird elliptisch polarisiert genannt, wenn der E-Feldvektor eine Ellipse beschreibt. Trifft Licht auf eine Glasfläche mit Brechungsindex n wird der Strahl teilweise reflektiert und teilweise gebrochen. Der Anteil des reflektierten Strahles hängt vom Einfallswinkel α und von der Polarisation des Lichts ab. Dabei hat senkrecht zur Einfallsebene Polarisiertes Licht (s-polarisiert) ein größeres Reflexionsvermögen als parallel zur Einfallsebene Polarisiertes Licht (p-polarisiert). Dabei gibt es für p-polarisiertes Licht einen Einfallswinkel α_B bei welchem kein Licht reflektiert wird, es gilt

$$\tan \alpha_B = n \quad (1.1)$$

somit ist das reflektierte Licht vollständig linear s-polarisiert.

1.2. Doppelbrechung in Kalkspat

Beim Durchgang von unpolarisiertem Licht durch den Kalkspatkristall, wird dieser in zwei Teilstrahlen aufgeteilt. Ein Strahl verhält sich nach dem Snelliusschen Brechungsgesetz und wird daher auch ordentlicher Strahl genannt, für diesen gilt der Brechungsindex n_o . Der andere Teilstrahl wird außerordentlicher Strahl genannt, für diesen gilt der Brechungsindex n_a . Die beiden Teilstrahlen sind orthogonal zueinander polarisiert. Der ordentliche Strahl ist s-polarisiert und der außerordentliche Strahl ist p-polarisiert.

1.3. Polarisation durch selektive Absorption

Polarisator und Analysator sind zwei einfache Polarisationsfilter. Fällt unpolarisiertes Licht auf so einen Filter, wird dieser Polarisator genannt. Mit einem zweiten Filter, dem Analysator, kann man nun untersuchen, ob z.B. die Polarisationssebene sich gedreht hat. Die Komponente $\vec{E} = \vec{E}_0 \cos \varphi$ wird durchgelassen und die Komponente $\vec{E}' = \vec{E}_0 \sin \varphi$ wird absorbiert, wenn φ der Winkel zwischen den Filtern ist. Da der gemessene

Kurzschlussstrom eines Photoelements proportional der Lichtintensität I ist, folgt das *Gesetz von Malus*

$$I = I_0 \cos^2 \varphi \quad (1.2)$$

1.4. $\lambda/2$ -Platte

Häufig ist es von Vorteil die Schwingungsebene von linear polarisiertem Licht um einen Winkel $\Delta\alpha$ zu drehen. Mit einer $\lambda/2$ -Platte ist dies möglich. Wenn der \vec{E} -Vektor den Winkel φ gegen die optische Achse hat, so kann dieser in zwei Komponenten aufspalten. Diese sind einmal der parallele Anteil $E_{\parallel} = E \cos \varphi$ und der senkrechte Anteil $E_{\perp} = E \sin \varphi$. Treffen die beiden Komponente in die Platte ein sind sie in Phase. Die Komponenten haben unterschiedliche Laufzeiten, so entsteht zwischen ihnen eine Phasendifferenz $\Delta\varphi$. Es gilt,

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d(n_2 - n_1) \quad (1.3)$$

d ist die Strecke die durchlaufen wird. Bei der $\lambda/2$ -Platte gilt, $d(n_2 - n_1) = \lambda/2$, also $\Delta\varphi = \pi$. Dabei hat sich der \vec{E} -Vektor um den Winkel $\Delta = 2\varphi$ durch das drehen der $\lambda/2$ -Platte lässt sich jeder Winkel und somit jede gewünschte Drehung herbeiführen.

1.5. Optische Aktivität

Diese Medien, z.B. eine Zuckerlösung, haben die Eigenschaft die Polarisationssebene linear polarisierten Lichts zu drehen. Generell fehlen solchen Substanzen bestimmte Symmetrieeigenschaften - Kristalle ohne Symmetriezentrum, Moleküle ohne Symmetriezentrum und Ebene, in allen Zustandsformen. Die Kristalle oder Moleküle sind in einer Lösung zwar statistisch verteilt, zeigen diese Eigenschaften aber trotzdem: Die Lichtwelle wird von der Substanz in eine Richtung gedreht, aber nicht in die andere Richtung zurück, da die Substanz "auf der Rückseite" nicht die selben Eigenschaften besitzt, da es nicht symmetrisch ist. Durchdringt eine Lichtwelle nun so eine Substanz, die in Lösung ist, so hängt der Drehwinkel α von der Konzentration c und der durchdrungenen Länge l proportional ab:

$$\alpha = \alpha_s \cdot c \cdot l \quad (1.4)$$

α_s ist der Proportionalitätsfaktor und heißt spezifische Drehung.

2. Auswertung

2.1. Überprüfung des Gesetz von Malus

Das Gesetz von Malus gibt den Zusammenhang (1.2) zwischen transmittierter Lichtintensität und Winkel des Polarisators an.

Um den Zusammenhang nachzuweisen wird die Intensität von Licht, dass durch zwei Polarisatoren gemessen. Da die Spannung am Photoelement proportional zur Lichtintensität ist, wird mit dieser Stellvertretend gearbeitet. Durch den ersten Polarisator wird die Polarisationssebene festgelegt. Diese wird im Verlauf der Messung beibehalten. Der zweite Polarisator wird zunächst so eingestellt, dass die Menge des transmittierten Lichts minimal wird. Daraufhin wird in 10° -Schritten die Spannung am Photoelement gemessen über einen Winkelbereich von insgesamt 180° .

Die von uns erhaltenen Messwerte sind im Laborbuch zu finden. Zur Auswertung haben wir diese noch um eine Spannung von $(2 \pm 1) \text{ mV}$ bereinigt, die ohne einfallendes Licht gemessen wird. Die um den systematischen Fehler bereinigten Messwerte haben wir mit Hilfe von *Gnuplot* nach dem *Least-Square-Fit* Verfahren gegen eine Funktion $I(\alpha) = I_0 \cos^2(\alpha - \alpha_0)$ gefittet. Abweichend von der Theorie taucht bei uns noch ein weiterer Summand im Argument des Kosinus auf, da wir die Winkel nicht in Bezug zur Polarisationssebene gemessen haben. Die bereinigten Werte und der dazugehörige Fit sind in Abbildung 1 zu sehen.

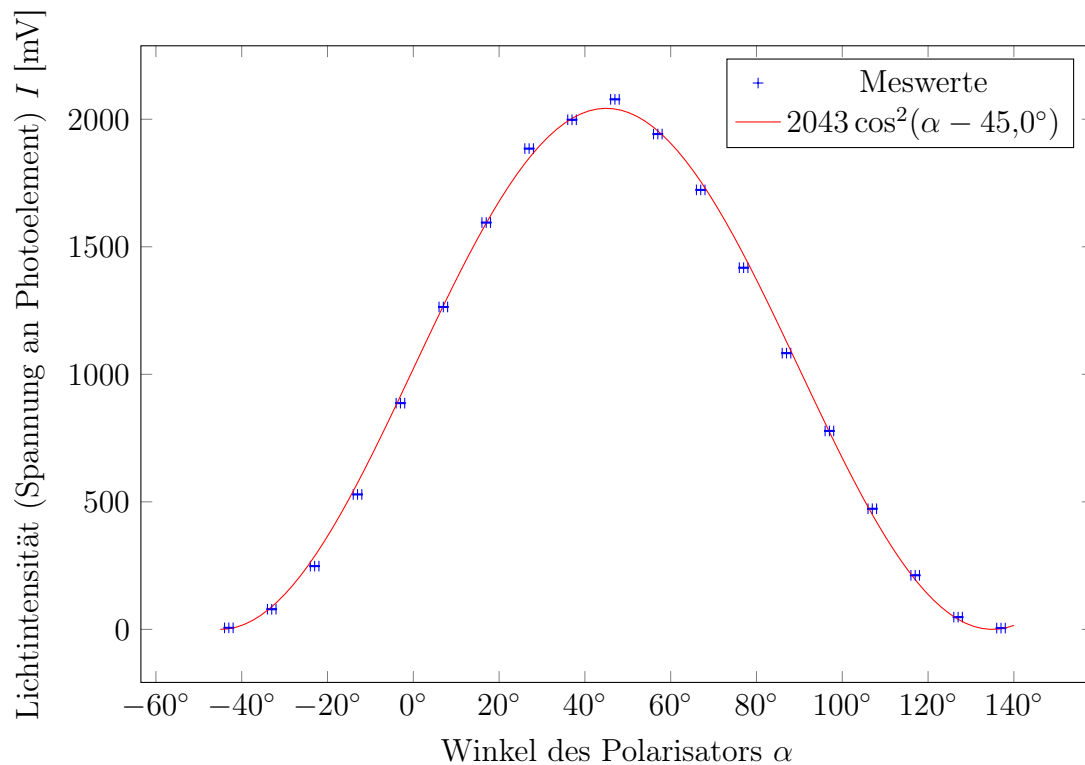


Abbildung 1 – Malus-Kurve

2.2. $\lambda/2$ -Platte

Nun sollen die Eigenschaften der $\lambda/2$ – Platte untersucht werden. Zuerst sollte geprüft werden, ob die $\lambda/2$ – Platte bei 45° die Polarisationssebene tatsächlich um 90° dreht. Um das zu untersuchen, wurden die Polarisationsfilter zunächst so eingestellt, dass der Relativwinkel 0° beträgt. Ohne $\lambda/2$ – Platte wäre die gemessene Intensität maximal. Bringt man die $\lambda/2$ – Platte hinter den ersten Polarisationsfilter so wird eine minimale Intensität gemessen. Werden nun die Polarisationsfilter so eingestellt, dass der Relativwinkel 90° beträgt, so wird ohne $\lambda/2$ – Platte ein Minimum gemessen. Mit $\lambda/2$ – Platte wird hier ein Maximum gemessen. Wird die $\lambda/2$ – Platte auf 30° eingestellt so ist ein Minimum bei einem Relativwinkel von 30° messbar und ein Maximum bei einem Relativwinkel von 120° .

2.3. Reflexion von p- und s-polarisierten Licht

In diesem Versuch wird die Reflexion von Licht an einer Glasplatte in Abhängigkeit der Polarisationsrichtung untersucht. Dazu wird die Lichtintensität des an einer Glasplatte reflektierten Lichts in Abhängigkeit vom Winkel gemessen. Als Lichtintensität wird die am Photosensor gemessene Spannung angenommen, da diese proportional zur einfallenden Lichtmenge ist. Dies führt man sowohl mit Licht durch, das senkrecht zur Brechungsebene polarisiert einfällt, als auch mit Licht, das parallel zur Brechungsebene polarisiert einfällt. Zudem misst man die Lichtintensität, wenn das Licht direkt, also ohne von der Glasplatte beeinflusst zu werden, in den Photosensor fällt. Daraus lässt sich dann das Verhältnis von reflektierten zu einfallenden Licht bestimmen.

Bei der Messung ist uns aufgefallen, dass nicht nur ein, sondern zwei reflektierte Lichtpunkte zu sehen sind. Auf eine mögliche Begründung gehen wir in der Diskussion ein. Während der Durchführung kam dadurch erschwerend hinzu, dass man den Sensor immer wieder passend auf einen Lichtpunkt ausrichten muss. Um möglichst vergleichbare Messungen durchzuführen haben wir den Sensor jeweils so ausgerichtet, dass die gemessene Spannung maximal wird.

Von unsere Messwerten, die im Laborbuch zu finden sind, haben wir zunächst den Spannungswert den wir an der Photodiode ohne einfallendes Licht messen abgezogen. Damit minimieren wir den systematischen Fehler. Daraufhin haben wir diese Werte durch die Gesamtlichtintensität geteilt, um den Reflexionskoeffizienten zu erhalten. Die Gesamtlichtintensität beträgt nach Abzug des systematischen Fehlers für parallel-polarisiertes Licht (914 ± 2) mV und für senkrecht-polarisiertes Licht (843 ± 2) mV. Die Fehlerfortpflanzung lässt sich dabei mit (A.1) bestimmen. Die so erhaltenen Werte sind in Abbildung 2 dargestellt.

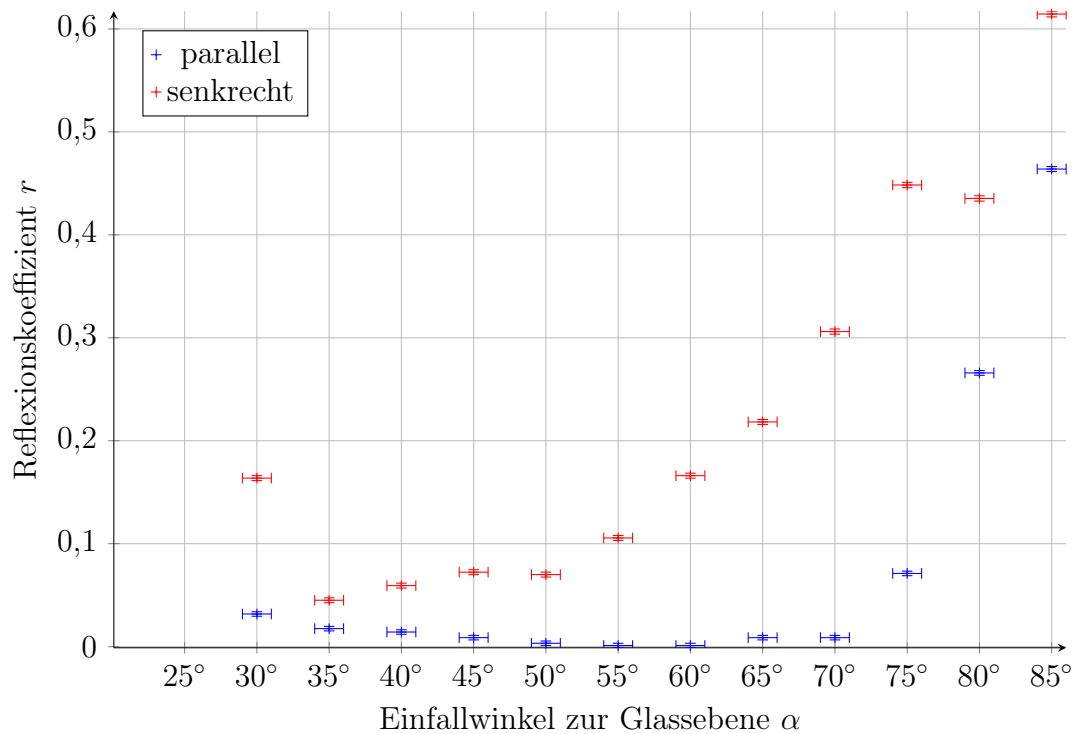


Abbildung 2 – Reflexion von polarisiertem Licht

Für parallel polarisiertes Licht ist zwischen $(55 \pm 1)^\circ$ und $(60 \pm 1)^\circ$ minimal. Somit liegt der Brewster-Winkel im Bereich $\alpha_B = (57,5 \pm 3,5)^\circ$. Aus (1.1) erhält man daraus den Brechungsindex des Glases, aus (A.2) die dazugehörige Unsicherheit. Wir erhalten $n = 1,57 \pm 0,22$.

2.4. Optische Aktivität von Zuckerlösungen

Ziel dieses Versuches ist es die Zuckerkonzentration einer Lösung anhand der optischen Aktivität zu bestimmen. Dazu sind als Hilfsmittel vier Zuckerlösungen mit bekannter Konzentration gegeben in gleich langen, transparenten Gefäßen wie die unbekannte Zuckerlösung. Dazu wird das Licht zunächst durch einen ersten Polarisator in einer Ebene linear polarisiert. Daraufhin fällt das Licht durch die Zuckerlösung und danach durch einen zweiten Polarisator. Diesen zweiten Polarisator dreht man so, dass die Menge des transmittierten Lichts minimal wird. In diesem Fall ist der Polarisator genau rechtwinklig zur Polarisationssebene. Somit lässt sich der Drehwinkel α in der Lösung aus dem

Winkel α_{12} zwischen den Polarisatoren errechnen durch

$$\alpha = \alpha_{12} - 90^\circ \quad (2.1)$$

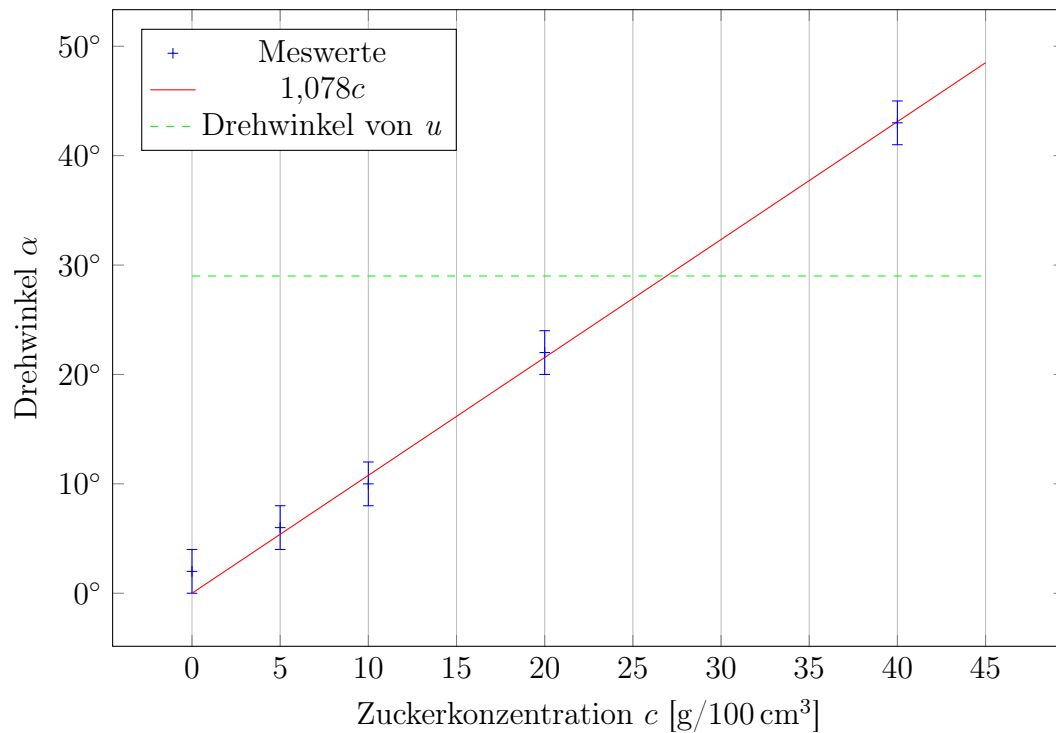
Nach (1.4) ist der Drehwinkel proportional zur Konzentration der Lösung bei konstanter Länge. Also lässt sich eine Ausgleichsgerade

$$\alpha(c) = k \cdot c \quad (2.2)$$

durch die Messwerte legen. Dabei ist k eine Proportionalitätskonstante. Aus dieser Geraden lassen sich die Drehwinkel beliebiger Konzentrationen bestimmen.

Bei der Durchführung haben wir den Winkel minimaler Intensität nicht mithilfe des Photosensors bestimmt. Da dieser für kleine Intensitäten nicht fein genug misst, haben wir stattdessen ein weißes Blatt Papier hinter den zweiten Polarisator gehalten und den Winkel gesucht, unter dem der Lichtpunkt verschwindet. Auf diese Methode lässt sich der Winkel genauer einstellen, als man ihn auf der Skala ablesen kann.

Unsere Messwerte sind in Abbildung 3 graphisch dargestellt. Für die Ausgleichsgerade haben wir mit *Gnuplot* nach dem *Least-Square-Fit* Verfahren unsere Messwerte gegen (2.2) gefittet. Wir erhielten daraus $k = 1,08 \pm 0,05$. Dabei ist 0,025 der von *Gnuplot* angegebene statistische Fehler. Dazu schätzen wir einen weiteren Fehler gleicher Größe aus der Unsicherheit der Messwerte ab.

Abbildung 3 – c - α -Diagramm des untersuchten Zuckers

Stellt man (2.2) um, erhält man

$$c = \frac{\alpha}{k} \quad (2.3)$$

Damit, und dem Fehler aus (A.1) erhalten wir für die Konzentration der unbekannten Lösung $c = (27,0 \pm 2,3) \text{ g/100 cm}^3$

2.5. Kalkspat

Wird der Laser durch einen Kalkspatkristall geschickt ist sichtbar, dass der Strahl sich aufteilt. Wird der Polarisationsfilter auf 29° eingestellt ist nur der untere Strahl sichtbar, bei 120° ist nur der obere Strahl sichtbar.

3. Diskussion

3.1. Gesetz von Malus

Das Gesetz von Malus passt sehr gut zur Darstellung der von uns gemessenen Daten. Mit nur einer Ausnahme berühren alle Messpunkte die nach dem Gesetz von Malus gefittete Kurve.

3.2. $\lambda/2$ -Platte

Bei einer Einstellung von 45° wurde, wie erwartet, eine Drehung der Polarisationssebene von 90° gemessen. Bei einer Veränderung von 45° auf 30° wurde eine Drehung der Polarisationssebene von 30° beobachtet, dies war ebenfalls erwartet.

3.3. p- und s-polarisiertes Licht

Vom Trend entsprechen die Kurven den theoretisch Erwarteten. Im Fall des parallel-polarisierten Lichts ist der Tiefpunkt im Bereich des Brewster-Winkels sichtbar geworden und die Lichtintensität ist in diesem Bereich fast nicht messbar. Auch bei senkrecht polarisiertem Licht sind mit steigenden Brechungswinkeln zunehmende Reflexionskoeffizienten sichtbar. Jedoch sind hier auch einige Ausreißer zu sehen. Insbesondere die gemessenen Intensitäten bei 30° und 75° fallen aus der Reihe.

Eine Erklärung für die Streuung der Messwerte kann auch die beschriebenen zwei reflektierten Punkte sein. Dass zwei Punkte zu sehen sind, ist wahrscheinlich eine Folge dessen, dass es an der Glasplatte zwei Reflexionsebenen gibt. Neben der vorderen Ebene wird beim Einfall reflektiert das Licht auch an der hinteren Glasebene beim Ausfall. Durch die Brechung beim Einfall kommt es dabei zum Parallelversatz und es sind zwei Lichtpunkte zu sehen.

Da nach den Snellius'schen Brechungsgesetzen der Lichtstrahl in die hintere Plattenebene steiler einfällt, kann das Licht hier zu großen Teilen reflektiert werden. Daher könnte dies eine Erklärung für den Ausreißer bei 30° sein.

Der Brechungsindex des Glases liegt in einem sinnvollen Bereich. Der Brechungsindex von verschiedenen Gläsern liegt im Bereich 1,5 bis 2,0 [1]. Der von uns bestimmte Wert $n = 1,57 \pm 0,22$ passt in diesen Bereich. Jedoch haben wir in vorherigen Versuchen bereits Methoden kennengelernt, um den Brechungsindex mit einfacheren Mitteln genauer

zu bestimmen. Es hat sich im Versuch zwar gezeigt, dass es möglich ist einen Brechungsindex so zu Bestimmen, ich halte es aber nicht für sinnvoll die Methode anzuwenden, wenn das einzige Ziel ist, den Brechungsindex eines Materials zu bestimmen.

3.4. Optische Aktivität von Zuckerlösungen

Der in der Theorie angenommene lineare Zusammenhang zwischen Konzentration der Lösung und Drehwinkel konnte im Versuch gut gezeigt werden. Die von uns erhaltenen Messwerte lassen sich durch eine Ursprungsgrade gut darstellen. Die Unsicherheit der ermittelten Konzentration ist mit etwa 10 % zwar relativ hoch, jedoch lassen sich im allgemeinen Winkel noch viel genauer bestimmen, als es uns im Versuch möglich war.

Ich kann mir für dieses Verfahren praktische Anwendung vorstellen. Die in diesem Versuch ermittelten Werte lassen sich relativ schnell und einfach ermitteln. Dies wäre technisch sogar voll automatisch umsetzbar. Will man nun die Lösungskonzentration von optisch aktiven Stoffen bestimmen, ist der Vorteil dieser Methode, dass sie "von außen" angewendet werden kann. Die Probe bleibt in Menge und Qualität vollständig erhalten.

3.5. Kalkspat

Wie erwartet ist der obere Strahl s-polarisiert und der untere p-polarisiert. Dies könnte beispielsweise in der optischen Datenübertragung technisch genutzt werden. In einem Lichtleiter wird ein Signal senkrecht und das andere Signal parallel polarisiert übertragen. Beim Empfänger werden diese dann mit einem Kalkspat wieder getrennt und können unabhängig verarbeitet werden.

A. Anhang

A.1. Fehlerrechnung

Für linear errechnete Größen $y(x_1, \dots, x_n)$ ist der Fehler allgemein gegeben durch

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(y \frac{\Delta x_i}{x_i} \right)^2} = |y| \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta x_i}{x_i} \right)^2} \quad (\text{A.1})$$

A.2. Brechungsindex aus Brewsterwinkel

Bei Rechnung mit Winkeln in Bogenmaß ist der Fehler aus der gaußschen Fehlerfortpflanzung gegeben durch

$$\Delta n = \left| \frac{\partial n}{\partial \alpha_B} \Delta \alpha_B \right| = \left| \frac{\Delta \alpha_B}{\cos^2 \alpha_B} \right| \quad (\text{A.2})$$

Literatur

- [1] Wikipedia. *Brechungsindex* — *Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*. [Online; Stand 28. Juni 2015]. 2015. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Brechungsindex&oldid=141014798>.