

Physiklabor für Anfänger*innen 2
Ferienpraktikum im Wintersemester 2018/19

Versuch 79: Polarimeter und linear polarisiertes Licht

(durchgeführt am 22. März 2019 bei)

23. März 2019

Inhaltsverzeichnis

1 Ziel des Versuchs	4
2 Physikalische Grundlagen	4
3 Aufbau und Durchführung	7
3.1 Linear polarisiertes Licht	7
3.2 Polarimeter und optisch aktive Substanzen	7
4 Messung	8
4.1 Messung von linear polarisiertem Licht	8
4.2 Untersuchung optisch aktiver Substanzen mit dem Polarimeter	8
5 Auswertung	10
5.1 Linear polarisiertes Licht	10
5.2 Polarimeter und optisch aktive Substanzen	12
5.3 Ermittlung der unbekanntes Konzentration einer Zuckerslösung	14
6 Diskussion	15
6.1 Linear polarisiertes Licht	15
6.2 Polarimeter und optisch aktive Substanzen	16
6.3 Ermittlung der unbekanntes Konzentration einer Zuckerslösung	17
A Anhang	20
A.1 Messwerte	20
A.2 Laborheft	22

In Tabelle 1 ist eine Übersicht über alle in diesem Versuchsprotokoll verwendeten Symbole gegeben.

Größensymbol	Bedeutung
\mathbf{E}	Elektrisches Feld
E_0	Amplitude des elektrischen Feldes
\mathbf{B}	Magnetisches Feld (magnetische Flussdichte)
B_0	Amplitude des magnetischen Feldes
\mathbf{r}	Ortsvektor
t	Zeit
\mathbf{k}	Wellenvektor
ω	Kreisfrequenz
I	Intensität
α	Drehwinkel, Analysatoreinstellung
β	Winkel zwischen Polarisationssebene des Lichts und Analysator
U	Spannung
$[\alpha]$	Spezifisches Drehvermögen
d	Propagationslänge
c	Lichtgeschwindigkeit, Konzentration
ϵ_0	Dielektrizitätskonstante
s_x	Unsicherheit auf (Mess-) Größe x

Tabelle 1: Symbole, die in diesem Versuchsprotokoll verwendet wurden.

1 Ziel des Versuchs

Bei diesem Versuch ist das Ziel, mit Hilfe eines Polarisators linear polarisiertes Licht zu erzeugen, die Polarisation mit einem Analysator nachzuweisen und die Wellenlängenabhängigkeit zu untersuchen. Anschließend soll die Drehung der Polarisationssebene durch optisch aktive Substanzen, sowie deren spezifisches Drehvermögen bestimmt werden. Außerdem soll die unbekannte Konzentration einer unbekanntes Zuckerlösung bestimmt werden.

2 Physikalische Grundlagen

Die aus den Maxwell-Gleichungen herleitbare Wellengleichung für \mathbf{E} - und \mathbf{B} -Felder wird gelöst durch elektrische, bzw. magnetische Felder der Art

$$\begin{aligned}\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) &= \mathbf{E}_0 e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} - i\omega t}, \\ \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) &= \mathbf{B}_0 e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} - i\omega t}.\end{aligned}\tag{1}$$

Dies sind linear polarisierte, ebene Wellen. Diese Funktionen erfüllen beide für sich die Wellengleichung. Setzen wir beide Felder allerdings in die differentielle Form des faradayschen Induktionsgesetzes,

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t},\tag{2}$$

ein, so finden wir:

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E}_0 = \omega \mathbf{B}_0 \quad (3)$$

Die Amplituden $\mathbf{E}_0, \mathbf{B}_0$ sind daher nicht unabhängig. Sind die Amplitude des \mathbf{E} -Feldes, die wir als Polarisationsrichtung definieren, und die Propagationsrichtung, die durch \mathbf{k} bestimmt wird, festgelegt, so kann \mathbf{B}_0 nur noch Werte der Art annehmen, dass Gleichung (3) erfüllt ist. Da \mathbf{B}_0 der magnetischen Flussdichte bestimmt, verläuft also \mathbf{B} stets senkrecht zum \mathbf{E} -Feld. Wie die Felder geometrisch zusammenhängen, ist in Abbildung 1 gezeigt. Ge-

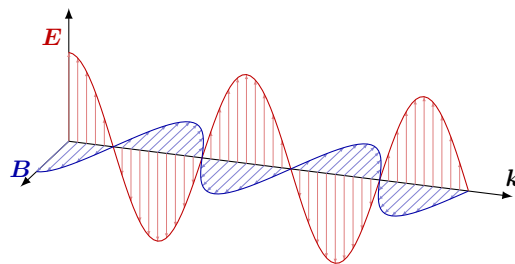


Abbildung 1: Eine ebene, linear polarisierte elektromagnetische Welle

wissermaßen erlaubt die Tatsache, dass \mathbf{B} durch den Wellenvektor \mathbf{k} sowie das elektrische Feld \mathbf{E} festgelegt ist, die Formulierung, dass eine elektrische Welle zwei Freiheitsgrade hat, die durch die Polarisationsrichtung und die Propagationsrichtung bestimmt werden. Beschränken wir daher diese beiden Größen auf konkrete Werte, so gibt es nur noch eine Möglichkeit, wie eine elektromagnetische Welle aussehen kann¹.

Diese Tatsache machen wir uns bei der Kombination eines Polarisators und eines Analysators zunutze, die beide Polarisationsfilter sind. Da der Polarisator die Richtung der Amplitude des elektrischen Feldes bestimmt, kann ebendiese nach Passieren von diesem nur noch eine Richtung haben, die wir mit einem zweiten Polarisationsfilter in der Amplitude einschränken. Ist der Winkel zwischen beiden Polarisationsfiltern α , so gilt für die Amplitude des elektrischen Feldes nach Passieren des Analysators

$$E' = E \cos(\alpha). \quad (4)$$

Dabei ist E' die Amplitude nach dem Analysator und E die Amplitude vor dem Analysator. Da die Intensität einer elektromagnetischen Welle wegen

$$I = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2 \quad (5)$$

proportional zu E^2 ist, folgt für durch einen Polarisator durchgelassenen Intensitäten:

$$I' = I \cos^2(\alpha). \quad (6)$$

¹Wenn wir von linear polarisierten, ebenen Wellen ausgehen.

Linear polarisierte Wellen, wie sie in Gleichung (1) dargestellt sind, sind nicht die einzige Möglichkeit, wie ebene Wellen aussehen können. Zirkular polarisierte Wellen beispielsweise sind ebenfalls ebene Wellen, bei denen die Feldstärke-Amplitude konstant bleibt, aber die Richtung zeitlich und räumlich ändert. Ferner können zwei zirkular polarisierte Wellen, die sich überlagern, wieder eine linear polarisierte Welle bilden. Dies ist schematisch in Abbildung 2 gezeigt.

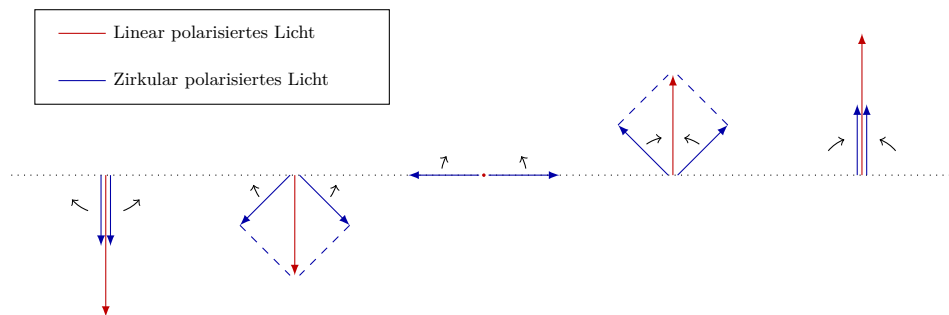


Abbildung 2: Überlagerung zweier zirkular polarisierter Wellen zu einer linear polarisierten Welle über eine halbe Periode

Ausgenutzt wird dieses Phänomen in einem $\lambda/2$ -Kristall, der in dem von uns verwendeten Versuchsaufbau (genauer gesagt: Im Halbschattenpolarimeter) verbaut ist. Dort existieren zwei verschiedene optische Achsen, die sich durch eine unterschiedliche Phasengeschwindigkeit auszeichnen. Dies hat zur Folge, dass sich die Polarisationsrichtung des Lichts nach Passieren des Kristalls verändert. Im Allgemeinen entsteht beim Austritt des Lichts aus dem Kristall eine elliptisch polarisierte Welle; der $\lambda/2$ -Kristall ist allerdings derartig abgemessen, dass wieder eine linear polarisierte Welle entsteht, die allerdings gegenüber der ursprünglichen Welle gedreht ist. Dies erhöht i. A. die Messgenauigkeit.

Optisch aktive Substanzen werden u. A. durch ihr *spezifisches Drehvermögen* charakterisiert. Die dafür nötigen Größen seien im Folgenden kurz definiert:

Bei der zirkularen Doppelbrechung gilt für den Drehwinkel α mit dem spezifischen Drehvermögen α_{fest} und der Propagationslänge d :

$$\alpha = [\alpha]_{\text{fest}} d. \quad (7)$$

Bei Lösungen muss zusätzlich die Konzentration c berücksichtigt werden:

$$\alpha = [\alpha]_{\text{Lösung}} cd. \quad (8)$$

3 Aufbau und Durchführung

3.1 Linear polarisiertes Licht

Wir bauten den Strahlengang, der in Abbildung 3 skizziert ist, mit einer Linse, einer verstellbaren Blende, zwei Polarisatoren und einer Photodiode auf. Danach optimierten wir die Linsenposition zwischen Lampe und Photodiode sowie die Wahl der Blende, sodass das Photodioden-Signal für parallele Stellung von Polarisator und Analysator möglichst groß, aber nicht größer als der Messbereich des Multimeters ist. Dann maßen wir die Lichtintensität in Abhängigkeit vom Winkel des Analysators. Dabei veränderten wir den Winkel des Analysators immer nur in kleinen Schritten.

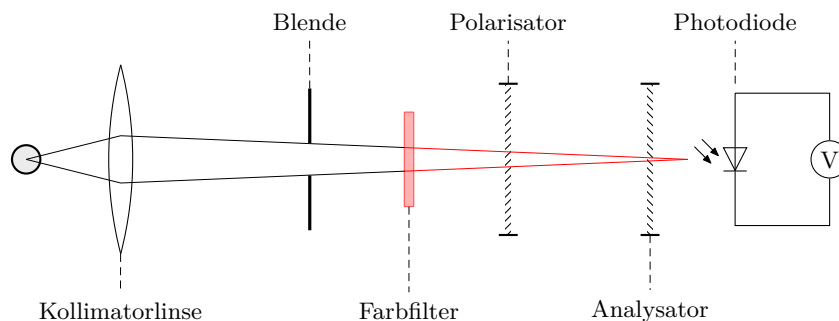


Abbildung 3: Skizze des Strahlengangs. Der Schaltkreis rechts ist ausschließlich symbolisch; tatsächlich wurde die Fotodiode über ein BNC-Kabel an eine Art Netzteil angeschlossen, in das auch das Voltmeter eingesteckt wurde.

Diese Messung wiederholten wir, nach jeweils neuer Optimierung des Photodiodensignals, für zwei verschiedene Farbfiler, die wir in den Filterhalter hinter der Linse einsetzten.

3.2 Polarimeter und optisch aktive Substanzen

Nun ersetzten wir im zuletzt verwendeten Versuchsaufbau die beiden Polarisatoren durch das Halbschattenpolarimeter und entfernten die Photodiode. Der Aufbau ist in Abbildung 4 zu sehen. Nach Abstimmung der Bauelemente aufeinander suchten wir mit dem Analysator die Nullstellung auf. So konnten wir mit einem der optischen Materialien im Lichtweg bei rotem, gelbgrünem und blauem Licht quantitative Messungen des Drehwinkels der Polarisations Ebenen für die Probematerialien durchführen. Die kleinen Winkel bestimmten wir mit Hilfe einer Ableselupe und eines Nonius. Dafür brachten wir zuerst die beiden kürzeren Küvetten ins Polarimeter, dann ein langes Glasrohr mit einer bekannten Zuckerlösung und anschließend ein kurzes Glasrohr mit einer unbekanntem Zuckerlösung. Wir bestimmten das alle verschiedenen Drehvermögen für jeden Farbfiler sowie den Drehsinn der

Küvetten.

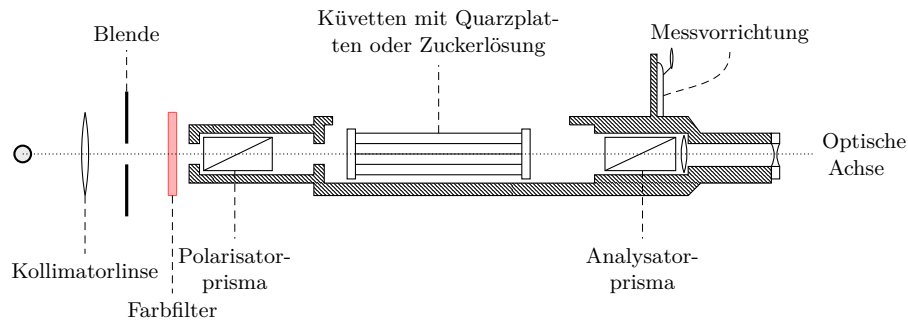


Abbildung 4: Skizze des Versuchsaufbaus. In der Messvorrichtung verbaut waren eine Gradskala mit Nonius, welche über eine Lube abgelesen werden konnte. Die Messvorrichtung ist mit dem Analysator drehbar.

4 Messung

4.1 Messung von linear polarisiertem Licht

Nach dem Aufbau des Strahlengangs maßen wir die Spannung an der Fotodiode in Abhängigkeit vom Winkel des Analysators. Diesen variierten wir zwischen -90° und 90° in Schritten von 3° . Die Spannungsmaxima befanden sich für alle drei Filter bei einem Analysatorwinkel von $(-1,0 \pm 0,5)^\circ$ bei einem Wert von $194,5 \text{ mV}$ ohne Filter, $197,9 \text{ mV}$ mit blauem Filter und $197,4 \text{ mV}$ mit rotem Filter.

Diese Messung wiederholten wir nach jeweils neuer Optimierung des Photodioden-Signals durch Ändern der Abstände der einzelnen Bauelemente auf der optischen Bank für den roten und blauen Farbfiler, die wir in den Filterhalter hinter der Linse einsetzten. Die Messergebnisse sind in Tabellen 8 und 9 zu finden. Für die Einstellung des Winkels, auf den wir die Drehung des Analysators einstellten, schätzen wir einen Fehler von $\pm 0,5^\circ$. Spannung maßen wir über das Multimeter. Nach Erfahrungen aus den vorangegangenen Versuchen schätzten wir den Fehler auf die Spannung mit 3% des Messwerte + 1 Digit recht konservativ ab.

4.2 Untersuchung optisch aktiver Substanzen mit dem Polarimeter

Zuerst stimmten wir die Bauelemente auf der optischen Bank aufeinander ab und stellten Eingangsspannung und Eingangsstrom bei jedem verwendeten Farbfiler so ein, dass wir ein gut erkennbares Lichtsignal am Ausgang des Polarimeters erhielten. Für jeden Farbfiler, d. h. den grünen, roten und blauen, suchten wir mit dem Analysator zuerst die Nullstellung auf.

Dann führten wir Messungen des Drehwinkels der Polarisations Ebenen für die Probematerialien durch. Die kleinen Winkel bestimmten wir mit Hilfe einer Ableselupe und eines Nonius. Dafür brachten wir zuerst die beiden kürzeren Küvetten ins Polarimeter und bestimmten das Drehvermögen sowie den Drehsinn. Die Küvette A war rechtsdrehend und die Küvette B linksdrehend. Anschließend brachten wir ein kürzeres Glasrohr der Länge 94,7 mm mit einer unbekanntem und ein längeres Glasrohr der Länge 190,09 mm mit einer bekannten Zuckerlösung in den Lichtweg.

Wir maßen die Winkel am Halbschattenpolarimeter, bei dem wir die Einstellung mit zwei gleich dunklen Hälften in der Nähe eines Minimums erhielten, jeweils zweimal, um ein genaueres Ergebnis zu bekommen. Für die Messungen mit dem grünen und blauen Farbfilter funktionierte unser Polarimeter vergleichsweise gut, da wir die etwa gleich dunklen Hälften am Ausgang des Polarimeters gut genug erkennen konnten, um den Winkel zu bestimmen, bei dem wir zwei gleich dunklen Hälften in der Nähe eines Minimums erhielten. Unter Verwendung des blauen Farbfilters funktionierte dies allerdings nicht mehr so gut. Deshalb verwendeten wir für diese Messungen ein anderes Polarimeter. Der Fehler auf die Winkelmessung setzt sich zusammen aus der quadratischen Addition von dem von uns abgeschätzten Parallaxenfehler von $\pm 0,05^\circ$, dem subjektiven Ablesefehler von $\pm 0,1^\circ$ und unter Verwendung des Polarimeters für die Untersuchung der Drehwinkel mit rotem und grünen Farbfilter zusätzlich noch von einem Winkel von $\pm 0,05^\circ$, weil bei diesem Polarimeter die Halterung der Lupe nicht fixiert war. Dies resultierte in einem Wackeln dieser Halterung beim Ablesen des Drehsinns. Unsere Ergebnisse dieses Versuchsteils befinden sich in Tabelle 2.

Filter	α_0 in $^\circ$		α in $^\circ$		
	Nullstellung	Küvette A	Küvette B	kurzes Glasrohr	langes Glasrohr
Grün	11,5	53,0	-27,1	49,8	39,1
	11,5	52,5	-27,3	49,4	40,4
Rot	11,4	39,7	-15,9	47,1	29,9
	11,5	40,0	-15,6	47,5	29,8
Blau	0,5	60,0	-56,0	55,8	40,0
	0,3	59,7	-57,3	56,4	39,8

Tabelle 2: Drehwinkel in $^\circ$ für die mit dem Halbschattenpolarimeter untersuchten Küvetten und Glasrohre bei verschiedenen Farbfiltern. Alle Messwerte sind mit einem Parallaxenfehler von $\pm 0,05^\circ$ und einem subjektiven Ablesefehler von $\pm 0,1^\circ$ versehen. Die Messwerte zu rotem und grünen Farbfilter haben aus dem oben genannten Grund zusätzlich noch einen Fehler von $\pm 0,05^\circ$

5 Auswertung

5.1 Linear polarisiertes Licht

In diesem Abschnitt sollen insbesondere die Messergebnisse aus Tabellen 8 und 9 ausgewertet werden. Dafür ist zunächst aus dem Einstellwinkel α des Analysators der tatsächlich für die Intensitätsverteilung relevante Winkel β zwischen Analysator und Polarisationssebene des Lichts auszurechnen. Da wir stets für die Lage der Maxima $\alpha_{\max} = (-1,0 \pm 0,5)^\circ$ maßen, berechnet sich β einfach als

$$\beta = \alpha - \alpha_{\max}, \quad (9)$$

wobei sich die Unsicherheit auf β nach Gaußscher Fehlerfortpflanzung berechnen lässt:

$$s_\beta = \sqrt{s_\alpha^2 + s_{\alpha_{\max}}^2} = 0,71^\circ \quad (10)$$

Obwohl wir den Einstellwinkel des Polarisators von $(0,0 \pm 0,5)^\circ$ nur auf $0,5^\circ$ genau kennen, fließt diese Unsicherheit nicht in die von α ein, da der Polarisatoreinstellwinkel zum einen konstant bleibt und zum anderen wir die Intensitätsverteilung sowieso mit einem Offset von α_{\max} versehen. Nun sind die Messwerte für die Spannung zu behandeln. Da wir an dem Intensitätsverhältnis interessiert sind, benutzen wir den Zusammenhang

$$\frac{I}{I'} = \frac{I}{I_{\max}} = \frac{U}{U_{\max}}, \quad (11)$$

um aus den Spannungswerten U und dem jeweiligen Maximalwert U_{\max} die Intensitätsverhältnisse zu berechnen. Der Fehler auf das Intensitätsverhältnis berechnet sich dabei folgendermaßen:

$$s_{\frac{I}{I'}} = s_{\frac{U}{U_{\max}}} = \sqrt{\left(\frac{s_U}{U_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{U}{U_{\max}^2} s_{U_{\max}}\right)^2} \quad (12)$$

Nun ist für jedes Wertepaar (α, U) mit der zugehörigen maximalen Spannung U_{\max} die Verteilung des Intensitätsverhältnisses in Abhängigkeit vom Winkel zwischen Polarisationssebene und Analysator, i. e. $(\beta, I/I')$, zu berechnen und graphisch aufzutragen. Die filterlosen Messreihen, sowie die Messreihen mit blauem, bzw. rotem Filter sind in Abbildungen 5 bis 7 gegeben. Die einzelnen Daten sind Tabellen 10 und 11 zu entnehmen.

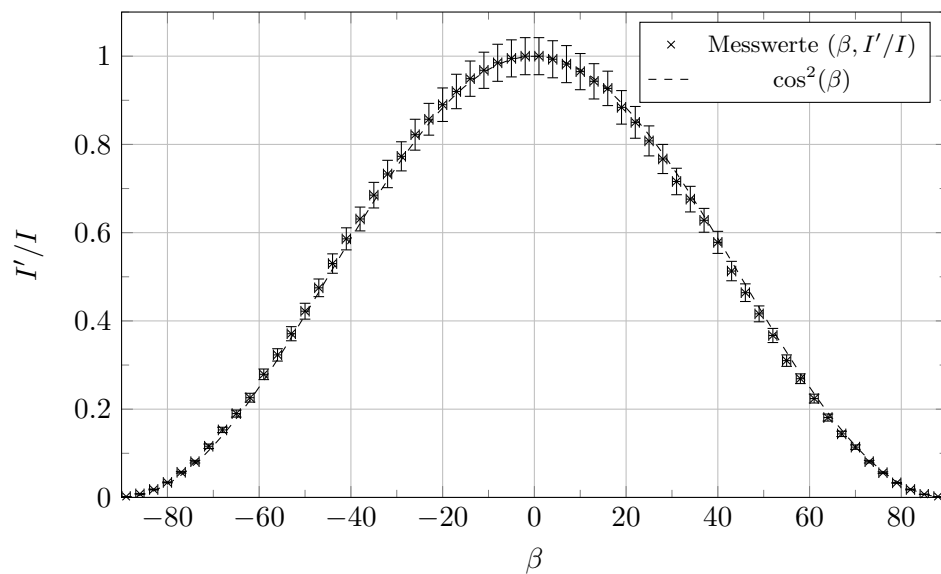


Abbildung 5: Intensitätsverhältnis für die filterlose Anordnung in Abhängigkeit vom Winkel β zwischen Polarisationsebene und Analysator. Zusätzlich ist die Funktion $\cos^2(\beta)$ eingetragen.

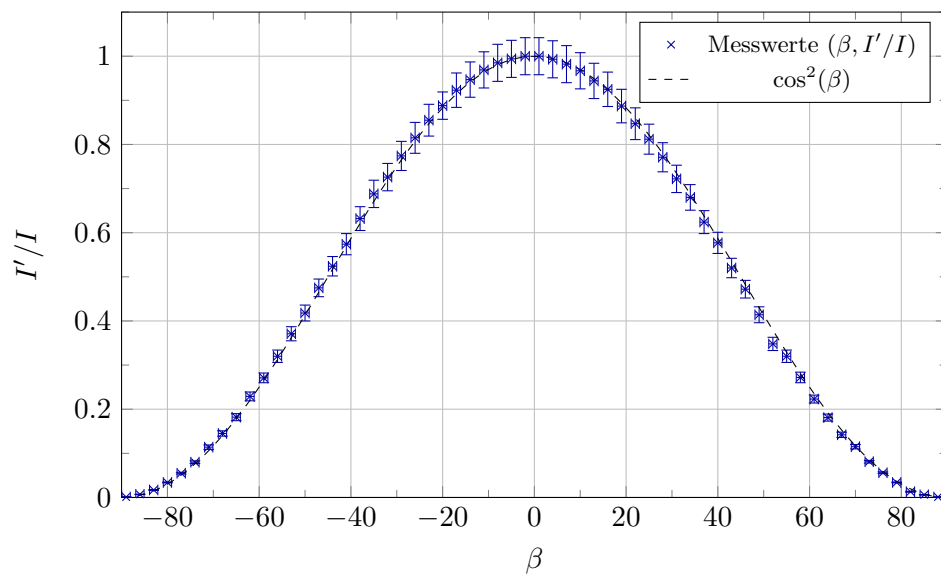


Abbildung 6: Intensitätsverhältnis für die Anordnung mit blauem Farbfilter in Abhängigkeit vom Winkel β zwischen Polarisationsebene und Analysator. Zusätzlich ist die Funktion $\cos^2(\beta)$ eingetragen.

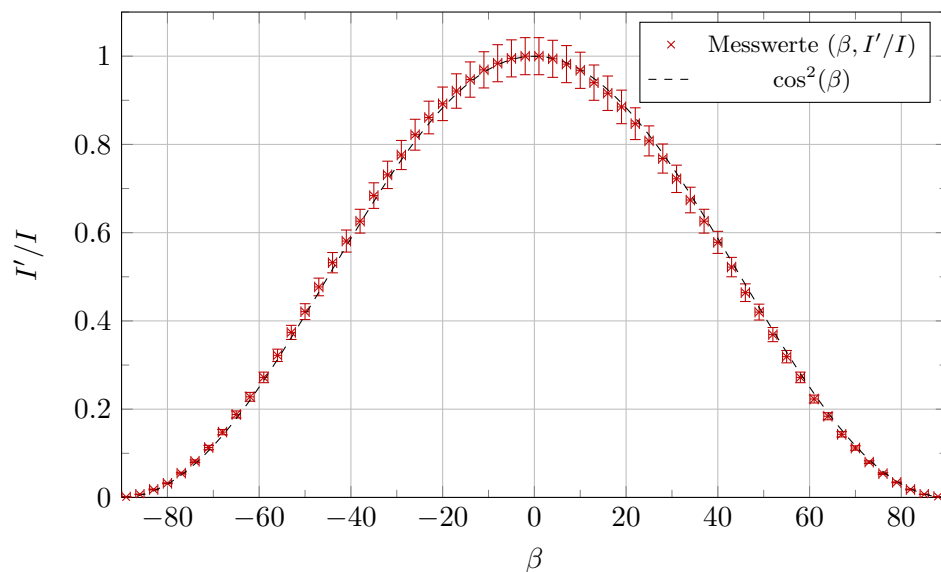


Abbildung 7: Intensitätsverhältnis für die Anordnung mit rotem Farbfilter in Abhängigkeit vom Winkel β zwischen Polarisationssebene und Analysator. Zusätzlich ist die Funktion $\cos^2(\beta)$ eingetragen.

Wie wir den Abbildungen 5 bis 7 entnehmen können, beschreibt I/I' den von der Theorie vorhergesagtem Verlauf von $\cos^2(\beta)$, der in jedes Diagramm gestrichelt eingetragen ist, insofern, dass weit über 68% aller Messwerte (innerhalb ihrer Fehlerbalken) vom theoretischen Verlauf getroffen werden.

5.2 Polarimeter und optisch aktive Substanzen

Zuerst ist anzumerken, dass die gemessenen Drehwinkel in diesen Teil des Versuchs alle mit Unsicherheiten behaftet sind, die sich, wie in den Messungen beschrieben, je nach Polarimeter aus der quadratischen Addition von zwei oder drei Fehlern berechnet. Das ergibt für Winkelmessungen mit dem ersten Polarimeter eine Unsicherheit von $\pm 0,12^\circ$ und für Messungen mit dem zweiten Polarimeter $\pm 0,11^\circ$.

Zuerst werten wir die Messungen der Küvetten A und B aus. Beide Küvetten haben nach der Versuchsanleitung [2] eine Dicke von $D = 1,5$ mm. Küvette A ist rechts- und Küvette B linksdrehend. Der Mittelwert der beiden Werte für die Nullstellung eines Farbfilters in Tabelle 2 ist als Offset α_0 zu betrachten, weil bei dieser Einstellung die beiden Gesichtsfelder in der Nähe eines Maximums von der selben Helligkeit waren, während sich keine Probe

im Polarimeter befand. Das ergibt die Offsets:

$$\begin{aligned}\alpha_{0,\text{grün}} &= (11,50 \pm 0,08)^\circ \\ \alpha_{0,\text{rot}} &= (11,45 \pm 0,08)^\circ \\ \alpha_{0,\text{blau}} &= (0,40 \pm 0,08)^\circ.\end{aligned}\tag{13}$$

Damit ergibt sich ein Schätzwert für den „tatsächlichen“ Drehwinkel α aus dem Mittelwert der beiden Werte, die sich aus der Differenz des in Tabelle 2 gemessenen Winkels α' für die jeweilige Küvette und α_0 ergeben. Sie sind mit einer Unsicherheit nach Gaußscher Fehlerfortpflanzung von

$$s_\alpha = \sqrt{s_{\alpha'}^2 + s_{\alpha_0}^2}\tag{14}$$

behaftet.

Für das erste verwendete Polarimeter ergibt das auf Messungen für den grünen und roten Farbfilter eine Unsicherheit von $s_{\alpha_{\text{grün}}} = s_{\alpha_{\text{rot}}} = 0,17^\circ$ und für den blauen Farbfilter unter Verwendung des zweiten Polarimeters von $s_{\alpha_{\text{blau}}} = 0,025^\circ$. Das ergibt für die Drehwinkel der Küvette A die folgenden Werte:

$$\begin{aligned}\alpha_{\text{grün}} &= (41,25 \pm 0,17)^\circ \\ \alpha_{\text{rot}} &= (28,40 \pm 0,17)^\circ \\ \alpha_{\text{blau}} &= (59,45 \pm 0,02)^\circ.\end{aligned}\tag{15}$$

Für die Küvette B erhalten wir die Ergebnisse für die Winkel α

$$\begin{aligned}\alpha_{\text{grün}} &= (-38,70 \pm 0,17)^\circ \\ \alpha_{\text{rot}} &= (-27,25 \pm 0,17)^\circ \\ \alpha_{\text{blau}} &= (-57,05 \pm 0,02)^\circ\end{aligned}\tag{16}$$

auf analoge Weise. So können wir über ?? das spezifische Drehvermögen $[\alpha]_{\text{fest}}$ für verschiedene Farbfilter bei dem rechts- sowie bei dem linksdrehenden Quarz bestimmen. Daraus erhalten wir insgesamt die Ergebnisse in Tabelle 3.

Die Unsicherheit auf das spezifische Drehvermögen berechnet sich nach der Gaußschen Fehlerfortpflanzung auf die folgende Weise:

$$s_{[\alpha]_{\text{fest}}} = \frac{s_\alpha}{D}.\tag{17}$$

Damit beträgt diese für das zuerst verwendete Polarimeter $0,11^\circ/\text{mm}$ und $0,08^\circ/\text{mm}$ für das zuletzt verwendete Polarimeter.

Farbfilter	$[\alpha]_{\text{fest}}$ in $\frac{^\circ}{\text{mm}}$	
	Küvette A	Küvette B
grün	$27,50 \pm 0,11$	$-25,80 \pm 0,11$
rot	$18,93 \pm 0,11$	$-18,17 \pm 0,11$
blau	$39,63 \pm 0,08$	$-38,03 \pm 0,08$

Tabelle 3: Spezifisches Drehvermögen in $\frac{^\circ}{\text{mm}}$ der Küvetten A und B bei unterschiedlichen Farbfiltern

5.3 Ermittlung der unbekanntenen Konzentration einer Zuckerlösung

Analog zum vorherigen Teil bestimmen wir mit den Messergebnissen zum längeren Glasrohr im Polarimeter aus Tabelle 2 wieder das spezifische Drehvermögen bestimmt. Auf dieselbe Weise wie im vorherigen Teil erhalten wir die Winkel

$$\begin{aligned}\alpha_{\text{grün}} &= (38,10 \pm 0,17)^\circ \\ \alpha_{\text{rot}} &= (35,80 \pm 0,17)^\circ \\ \alpha_{\text{blau}} &= (55,70 \pm 0,02)^\circ.\end{aligned}\tag{18}$$

Da das Glasrohr nach der Anleitung im Versuchsheft [2] mit einer Lösung von $(21,3 \pm 0,5)$ g Zucker pro 100 cm^3 destilliertem Wasser gefüllt war, können wir das Drehvermögen nun über ?? bestimmen, wobei noch die Länge $d = 190,09$ mm mit einzubeziehen ist:

$$[\alpha]_{\text{Lösung}} = \frac{\alpha}{cd}\tag{19}$$

Der Fehler dazu berechnet sich über die Gaußsche Fehlerfortpflanzung mit

$$s_{[\alpha]_{\text{Lösung}}} = [\alpha]_{\text{Lösung}} \sqrt{\left(\frac{s_\alpha}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{s_c}{c}\right)^2}.\tag{20}$$

Wir erhalten also experimentell für das spezifische Drehvermögen der von uns betrachteten Zuckerlösung in Tabelle 4.

Farbfilter	$[\alpha]_{\text{Lösung}}$ in $\frac{^\circ \text{cm}^3}{\text{g dm}}$
Grün	$94,10 \pm 2,25$
Rot	$88,42 \pm 2,12$
Blau	$137,57 \pm 3,23$

Tabelle 4: Spezifisches Drehvermögen der bekannten Zuckerlösung in $\frac{^\circ \text{cm}^3}{\text{g dm}}$ bei unterschiedlichen Farbfiltern

Mithilfe des so bestimmten Drehvermögens stellen wir nun $??$ nach c um,

$$c = \frac{\alpha}{[\alpha]_{\text{Lösung}} d}, \quad (21)$$

um die unbekannte Konzentration im kurzen Glasrohr zu bestimmen. Mit der nominellen Länge von 94,7 mm erhalten wir so das spezifische Drehvermögen mit einem Fehler von

$$s_c = c \sqrt{\left(\frac{s_\alpha}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{s_{\text{Lösung}}}{\alpha_{\text{Lösung}}}\right)^2}. \quad (22)$$

Die Winkel α , die für die Berechnung von c nötig waren, ließen sich wie im vorigen Abschnitt berechnen und sind mit den Konzentrationen in Tabelle 5 gelistet.

Farbfilter	α in $^\circ$	c in $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Grün	$25,25 \pm 0,17$	$0,283 \pm 0,009$
Rot	$18,35 \pm 0,17$	$0,291 \pm 0,009$
Blau	$39,50 \pm 0,20$	$0,303 \pm 0,009$

Tabelle 5: Wellenlängenabhängige Konzentration der unbekanntes Lösung

Da alle von der Wellenlänge unabhängigen berechneten unbekanntes Lösungen denselben Fehler haben, können wir den arithmetischen Mittelwert der Ergebnisse bilden, erhalten wir für die Konzentration den Wert

$$\bar{c} = (0,268 \pm 0,002) \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}. \quad (23)$$

Der Fehler auf den Mittelwert berechnete sich durch Division des Einzelfehlers durch $\sqrt{3}$. Ein Vergleichswert für die Konzentration fehlt leider.

6 Diskussion

6.1 Linear polarisiertes Licht

In Abschnitt 5.1 wurde die Winkelabhängigkeit von I/I' graphisch in Abbildungen 5 bis 7 dargestellt. Zusätzlich ist in jedem Diagramm $\cos^2(\beta)$ eingetragen, die – ebenfalls in jedem Diagramm – weitaus mehr als 68% aller Messwerte trifft. Insbesondere befinden sich die Maxima von allen Messwerten bei der gleichen Position *und* der Offset α_{max} , d. h. der Winkel, um welchen die Messwerte verschoben wurden, ist bei allen Messreihen gleich. Darum können wir in diesem Versuchsteil bestätigen, dass die Durchlassintensität dank des nahen Verlaufs aller Messwerte am Cosinus für alle Intensitäten unabhängig von der Wellenlänge ist.

Trotz des zufriedenstellenden Ergebnisses ist eine Diskussion der Fehler nicht zu vernachlässigen: So sind die Unsicherheiten – wie in den oben genannten Abbildungen deutlich sichtbar ist – besonders für hohe Spannungswerte sehr konservativ abgeschätzt worden. Der Kurvenverlauf der Cosinus-Funktion liegt auch sehr nahe an den Bestwerten, sodass die hoch abgeschätzte Unsicherheit gar nicht nötig gewesen wäre. Auch die Unsicherheit auf den Winkel α wurde – wenn auch nicht ganz so deutlich wie die auf die Spannung – in unseren Augen nach Betrachtung der Abbildungen zu hoch abgeschätzt. Die Justage des Analysatorwinkels verläuft also trotz der breiten Skalenschritte von 2° mit einer hohen Präzision, die wir bei der Durchführung nicht in einem derartigen Ausmaß erwarteten, sodass wir die Unsicherheit letztendlich hier auch überschätzten.

6.2 Polarimeter und optisch aktive Substanzen

In diesem Teil des Versuchs brachten wir zuerst die beiden Küvetten A rechtsdrehend und B linksdrehend ins Polarimeter. Dann erhielten wir für das Drehvermögen jedes Farbfilters die Ergebnisse aus Tabelle 6.

Farbfilter	$[\alpha]_{\text{fest}}$ in $\frac{^\circ}{\text{mm}}$	
	Küvette A	Küvette B
grün	$27,50 \pm 0,11$	$-25,80 \pm 0,11$
rot	$18,93 \pm 0,11$	$-18,17 \pm 0,11$
blau	$39,63 \pm 0,08$	$-38,03 \pm 0,08$

Tabelle 6: Spezifisches Drehvermögen in $\frac{^\circ}{\text{mm}}$ der Küvetten A und B bei unterschiedlichen Farbfilttern

Aus den Resultaten wird erkennbar, dass der rechtsdrehende Quarz eine Drehung der Polarisationssebene bei Betrachtung der entgegen der Ausbreitungsrichtung des Lichts hin zu positiven Winkeln, der linksdrehende Quarz entsprechend hin zu negativen Winkeln bewirkt. Wie erwartet, ist das spezifische Drehvermögen stark von der Farbe bzw. der jeweiligen Wellenlänge abhängig. Es ist eine Abnahme des Drehvermögens hin zu großen Wellenlängen zu beobachten. Dies ist auf die Rotationsdispersion auf Grund des spiraligen Kristallbaus von Quarz zurück zu führen. Die pro Farbfilter bestimmten Werte stimmen zwar im Rahmen der Unsicherheiten nicht ganz überein, liegen aber in der selben Größenordnung. Allerdings ist auch anzumerken, dass wir den Fehler auf die Winkelmessungen relativ gering abgeschätzt haben, besonders unter Verwendung des zweiten Polarimeters. Zudem ist anzumerken, dass das relative Drehvermögen des rechtsdrehenden Quarz stets absolut größer ist, als das des linksdrehenden. Der Grund dafür können systematische Fehler, wie z.B. äußere Lichteinflüsse sein oder ein Fehler, der aus der Ungenauigkeit beim Ablesen des Winkels entstanden

ist. Insgesamt lässt sich sagen, dass die einzelnen Ergebnisse etwa bis zu zwanzig σ -Umgebungen voneinander abweichen. Wir hätten den Fehler auf die Winkel also etwas größer abschätzen können. Gründe dafür sind, dass es nicht einfach ist, genau den Punkt am Polarimeter festzustellen, an dem die beiden ausgeleuchteten Hälften in der Nähe des Minimums in etwa die selben Intensität haben und dass beim Ablesen des Winkels durch das Okular sehr leicht Parallaxenfehler auftreten können.

Der Literaturwert des spezifischen Drehvermögens beläuft sich nach [1] für die Wellenlängen 436 nm, 509 nm, und 656 nm die Werte $41,55^\circ/\text{mm}$, $29,72^\circ/\text{mm}$, und $17,32^\circ/\text{mm}$. Die von den Farb-Absorptionsfiltern transmittierten Wellenlängen sind uns unbekannt. Von der Größenordnung her stimmen die Werte aber grob überein, wenn wir bedenken, dass die theoretischen Werte zu den Wellenlängen von 436 nm, 509 nm, und 656 nm etwa den Farben blau, grün und rot entspricht.

6.3 Ermittlung der unbekanntenen Konzentration einer Zuckerlösung

Nach Bestimmung der Drehwinkel zu jeder Farbe konnten wir experimentell für das spezifische Drehvermögen die Werte in Tabelle 7 erhalten.

Farbfilter	$[\alpha]_{\text{Lösung}}$ in $\frac{^\circ\text{cm}^3}{\text{g dm}}$
Grün	$94,10 \pm 2,25$
Rot	$88,42 \pm 2,12$
Blau	$137,57 \pm 3,23$

Tabelle 7: Spezifisches Drehvermögen der bekannten Zuckerlösung in $\frac{^\circ\text{cm}^3}{\text{g dm}}$ bei unterschiedlichen Farbfiltern

Wie erwartet ist das spezifische Drehvermögen wieder wellenlängenabhängig und nimmt zunehmend mit dieser ab. Anhand des positiven Vorzeichens erkennen wir, dass der verwendete Zucker rechtsdrehend ist.

Mithilfe des so bestimmten Drehvermögens konnten wir nun die unbekannte Konzentration im kurzen Glasrohr bestimmen und erhielten:

$$\bar{c} = (0,268 \pm 0,002) \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}. \quad (24)$$

α in $^\circ$	U in mV		
	Ohne Filter	Blauer Filter	Roter Filter
-90	$0,2 \pm 0,1$	$0,4 \pm 0,1$	$0,2 \pm 0,1$
-87	$1,4 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,1$	$1,4 \pm 0,1$
-84	$3,5 \pm 0,1$	$3,6 \pm 0,1$	$3,4 \pm 0,1$
-81	$6,3 \pm 0,2$	$6,8 \pm 0,2$	$6,7 \pm 0,2$
-78	$10,7 \pm 0,3$	$11,2 \pm 0,3$	$10,9 \pm 0,3$
-75	$15,9 \pm 0,5$	$16,0 \pm 0,5$	$15,8 \pm 0,5$
-72	$22,0 \pm 0,7$	$22,9 \pm 0,7$	$22,5 \pm 0,7$
-69	$28,8 \pm 0,9$	$30,2 \pm 0,9$	$28,7 \pm 0,9$
-66	$36,5 \pm 1,1$	$37,6 \pm 1,1$	$35,9 \pm 1,1$
-63	$44,4 \pm 1,3$	$44,8 \pm 1,3$	$45,2 \pm 1,4$
-60	$52,9 \pm 1,6$	$55,1 \pm 1,7$	$53,5 \pm 1,6$
-57	$62,6 \pm 1,9$	$63,9 \pm 1,9$	$63,2 \pm 1,9$
-54	$72,8 \pm 2,2$	$73,3 \pm 2,2$	$73,3 \pm 2,2$
-51	$81,8 \pm 2,5$	$83,5 \pm 2,5$	$82,6 \pm 2,5$
-48	$92,7 \pm 2,8$	$93,9 \pm 2,8$	$93,7 \pm 2,8$
-45	$103,5 \pm 3,1$	$104,8 \pm 3,1$	$103,5 \pm 3,1$
-42	$113,0 \pm 3,4$	$116,0 \pm 3,5$	$113,4 \pm 3,4$
-39	$121,8 \pm 3,7$	$124,9 \pm 3,7$	$124,7 \pm 3,7$
-36	$133,0 \pm 4,0$	$135,5 \pm 4,1$	$143,8 \pm 4,3$
-33	$142,2 \pm 4,3$	$145,0 \pm 4,3$	$143,3 \pm 4,3$
-30	$150,9 \pm 4,5$	$152,9 \pm 4,6$	$152,7 \pm 4,6$
-27	$159,9 \pm 4,8$	$162,6 \pm 4,9$	$160,9 \pm 4,8$
-24	$167,5 \pm 5,0$	$169,5 \pm 5,1$	$168,7 \pm 5,1$
-21	$173,4 \pm 5,2$	$176,0 \pm 5,3$	$145,6 \pm 4,4$
-18	$179,1 \pm 5,4$	$182,0 \pm 5,5$	$182,2 \pm 5,5$
-15	$184,1 \pm 5,5$	$187,7 \pm 5,6$	$187,0 \pm 5,6$
-12	$188,4 \pm 5,7$	$191,4 \pm 5,7$	$191,2 \pm 5,7$
-9	$191,3 \pm 5,7$	$194,9 \pm 5,8$	$194,5 \pm 5,8$
-6	$193,5 \pm 5,8$	$196,8 \pm 5,9$	$196,3 \pm 5,9$
-3	$194,5 \pm 5,8$	$197,8 \pm 5,9$	$197,4 \pm 5,9$

Tabelle 8: Photodiodenspannung U bei verschiedenen Filtern in Abhängigkeit des Winkels α in einem Bereich von -90° bis -3° . Die Unsicherheit auf α beträgt für jede Einstellung $0,5^\circ$.

α in $^\circ$	U in mV		
	Ohne Filter	Blauer Filter	Roter Filter
0	194,5 \pm 5,8	197,8 \pm 5,9	197,4 \pm 5,9
3	193,4 \pm 5,8	196,4 \pm 5,9	196,0 \pm 5,9
6	191,0 \pm 5,7	194,3 \pm 5,8	193,9 \pm 5,8
9	188,2 \pm 5,6	190,8 \pm 5,7	190,9 \pm 5,7
12	182,8 \pm 5,5	186,5 \pm 5,6	186,4 \pm 5,6
15	178,2 \pm 5,3	183,3 \pm 5,5	182,6 \pm 5,5
18	172,2 \pm 5,2	174,9 \pm 5,2	175,0 \pm 5,2
21	164,7 \pm 4,9	168,1 \pm 5,0	167,1 \pm 5,0
24	157,2 \pm 4,7	159,9 \pm 4,8	160,3 \pm 4,8
27	149,4 \pm 4,5	151,8 \pm 4,6	152,2 \pm 4,6
30	140,4 \pm 4,2	141,7 \pm 4,3	142,5 \pm 4,3
33	131,1 \pm 3,9	133,7 \pm 4,0	134,2 \pm 4,0
36	121,8 \pm 3,7	124,2 \pm 3,7	123,2 \pm 3,7
39	112,4 \pm 3,4	114,4 \pm 3,4	113,9 \pm 3,4
42	101,6 \pm 3,0	101,5 \pm 3,0	102,6 \pm 3,1
45	90,2 \pm 2,7	91,7 \pm 2,8	93,1 \pm 2,8
48	81,7 \pm 2,5	82,2 \pm 2,5	81,8 \pm 2,5
51	71,8 \pm 2,2	72,5 \pm 2,2	68,6 \pm 2,1
54	62,0 \pm 1,9	61,4 \pm 1,8	63,2 \pm 1,9
57	52,9 \pm 1,6	53,2 \pm 1,6	53,7 \pm 1,6
60	43,4 \pm 1,3	44,3 \pm 1,3	44,0 \pm 1,3
63	35,7 \pm 1,1	35,8 \pm 1,1	35,8 \pm 1,1
66	27,9 \pm 0,8	28,4 \pm 0,9	28,1 \pm 0,8
69	21,7 \pm 0,7	22,5 \pm 0,7	22,7 \pm 0,7
72	15,5 \pm 0,5	16,0 \pm 0,5	16,0 \pm 0,5
75	10,5 \pm 0,3	11,1 \pm 0,3	11,0 \pm 0,3
78	6,7 \pm 0,2	6,6 \pm 0,2	6,8 \pm 0,2
81	3,5 \pm 0,1	3,6 \pm 0,1	2,5 \pm 0,1
84	1,3 \pm 0,1	1,4 \pm 0,1	1,2 \pm 0,1
87	0,3 \pm 0,1	0,3 \pm 0,1	0,2 \pm 0,1
90	0,3 \pm 0,1	0,3 \pm 0,1	0,2 \pm 0,1

Tabelle 9: Photodiodenspannung U bei verschiedenen Filtern in Abhängigkeit des Winkels α in einem Bereich von 0° bis 90° . Die Unsicherheit auf α beträgt für jede Einstellung $0,5^\circ$.

A Anhang

A.1 Messwerte

β in $^\circ$	I/I'		
	Ohne Filter	Blauer Filter	Roter Filter
-89	$1,39 \pm 0,06$	$0,00 \pm 0,01$	$0,00 \pm 0,01$
-86	$1,40 \pm 0,06$	$0,01 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,01$
-83	$1,42 \pm 0,06$	$0,02 \pm 0,01$	$0,02 \pm 0,01$
-80	$1,43 \pm 0,06$	$0,03 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,01$
-77	$1,45 \pm 0,06$	$0,06 \pm 0,01$	$0,06 \pm 0,01$
-74	$1,47 \pm 0,06$	$0,08 \pm 0,01$	$0,08 \pm 0,01$
-71	$1,48 \pm 0,06$	$0,11 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,01$
-68	$1,50 \pm 0,06$	$0,15 \pm 0,01$	$0,16 \pm 0,01$
-65	$1,51 \pm 0,06$	$0,19 \pm 0,01$	$0,19 \pm 0,01$
-62	$1,53 \pm 0,06$	$0,23 \pm 0,01$	$0,23 \pm 0,01$
-59	$1,54 \pm 0,07$	$0,27 \pm 0,01$	$0,28 \pm 0,01$
-56	$1,56 \pm 0,07$	$0,32 \pm 0,01$	$0,33 \pm 0,01$
-53	$1,57 \pm 0,07$	$0,37 \pm 0,02$	$0,38 \pm 0,02$
-50	$1,59 \pm 0,07$	$0,42 \pm 0,02$	$0,43 \pm 0,02$
-47	$1,60 \pm 0,07$	$0,48 \pm 0,02$	$0,48 \pm 0,02$
-44	$1,62 \pm 0,07$	$0,53 \pm 0,02$	$0,54 \pm 0,02$
-41	$1,63 \pm 0,07$	$0,58 \pm 0,02$	$0,60 \pm 0,03$
-38	$1,65 \pm 0,07$	$0,63 \pm 0,03$	$0,64 \pm 0,03$
-35	$1,67 \pm 0,07$	$0,68 \pm 0,03$	$0,70 \pm 0,03$
-32	$1,68 \pm 0,07$	$0,73 \pm 0,03$	$0,75 \pm 0,03$
-29	$1,70 \pm 0,07$	$0,78 \pm 0,03$	$0,79 \pm 0,03$
-26	$1,71 \pm 0,07$	$0,82 \pm 0,03$	$0,84 \pm 0,04$
-23	$1,73 \pm 0,07$	$0,86 \pm 0,04$	$0,87 \pm 0,04$
-20	$1,74 \pm 0,07$	$0,89 \pm 0,04$	$0,90 \pm 0,04$
-17	$1,76 \pm 0,07$	$0,92 \pm 0,04$	$0,94 \pm 0,04$
-14	$1,77 \pm 0,08$	$0,95 \pm 0,04$	$0,97 \pm 0,04$
-11	$1,79 \pm 0,08$	$0,97 \pm 0,04$	$0,98 \pm 0,04$
-8	$1,80 \pm 0,08$	$0,98 \pm 0,04$	$1,00 \pm 0,04$
-5	$1,82 \pm 0,08$	$0,99 \pm 0,04$	$1,01 \pm 0,04$
-2	$1,84 \pm 0,08$	$1,00 \pm 0,04$	$1,02 \pm 0,04$

Tabelle 10: Intensitätsverhältnisse I/I' für gegebene Winkel β zwischen -90° und -2° zwischen Polarisationssebene des Lichtes und Analysator. Die Unsicherheit auf β beträgt für jeden Wert $0,71^\circ$.

β in $^\circ$	I/I'		
	Ohne Filter	Blauer Filter	Roter Filter
1	0,00 \pm 0,01	1,00 \pm 0,04	1,02 \pm 0,04
4	0,02 \pm 0,01	0,99 \pm 0,04	1,01 \pm 0,04
7	0,03 \pm 0,01	0,98 \pm 0,04	1,00 \pm 0,04
10	0,05 \pm 0,01	0,97 \pm 0,04	0,98 \pm 0,04
13	0,06 \pm 0,01	0,94 \pm 0,04	0,96 \pm 0,04
16	0,08 \pm 0,01	0,92 \pm 0,04	0,94 \pm 0,04
19	0,09 \pm 0,01	0,89 \pm 0,04	0,90 \pm 0,04
22	0,11 \pm 0,01	0,85 \pm 0,04	0,86 \pm 0,04
25	0,12 \pm 0,01	0,81 \pm 0,03	0,82 \pm 0,03
28	0,14 \pm 0,01	0,77 \pm 0,03	0,78 \pm 0,03
31	0,15 \pm 0,01	0,72 \pm 0,03	0,73 \pm 0,03
34	0,17 \pm 0,01	0,67 \pm 0,03	0,69 \pm 0,03
37	0,19 \pm 0,01	0,63 \pm 0,03	0,64 \pm 0,03
40	0,20 \pm 0,01	0,58 \pm 0,02	0,59 \pm 0,02
43	0,22 \pm 0,01	0,52 \pm 0,02	0,52 \pm 0,02
46	0,23 \pm 0,01	0,46 \pm 0,02	0,47 \pm 0,02
49	0,25 \pm 0,01	0,42 \pm 0,02	0,42 \pm 0,02
52	0,26 \pm 0,01	0,37 \pm 0,02	0,37 \pm 0,02
55	0,28 \pm 0,01	0,32 \pm 0,01	0,32 \pm 0,01
58	0,29 \pm 0,01	0,27 \pm 0,01	0,27 \pm 0,01
61	0,31 \pm 0,01	0,22 \pm 0,01	0,23 \pm 0,01
64	0,32 \pm 0,01	0,18 \pm 0,01	0,18 \pm 0,01
67	0,34 \pm 0,01	0,14 \pm 0,01	0,15 \pm 0,01
70	0,35 \pm 0,02	0,11 \pm 0,01	0,12 \pm 0,01
73	0,37 \pm 0,02	0,08 \pm 0,01	0,08 \pm 0,01
76	0,39 \pm 0,02	0,05 \pm 0,01	0,06 \pm 0,01
79	0,40 \pm 0,02	0,03 \pm 0,01	0,03 \pm 0,01
82	0,42 \pm 0,02	0,02 \pm 0,01	0,02 \pm 0,01
85	0,43 \pm 0,02	0,01 \pm 0,01	0,01 \pm 0,01
88	0,45 \pm 0,02	0,00 \pm 0,01	0,00 \pm 0,01
91	0,46 \pm 0,02	0,00 \pm 0,01	0,00 \pm 0,01

Tabelle 11: Intensitätsverhältnisse I/I' für gegebene Winkel β zwischen 1° und 90° zwischen Polarisationssebene des Lichtes und Analysator. Die Unsicherheit auf β beträgt für jeden Wert $0,71^\circ$.

A.2 Laborheft

Versuch 79: Polarmeter & linear pol Licht 22.3

ohne Filter $U_E = 3,4V$
 $I_E = 0,494$

U_{Licht}
 Lichtintensität

U Fehler $3 \times + 1$ Digit

Winkel (°)	U [mV]	Winkel (°)	I [mA]
270	0,2	270	15,5
273	1,4	273	10,5
276	3,5	276	6,7
279	6,3	279	3,5
282	10,7	282	1,3
285	15,9	285	0,3
288	22,0	288	0,3
291	28,8		
294	36,5		
297	44,4		
300	52,9		
303	62,6		
306	72,8		
309	81,8		
312	92,7		
315	103,5		
318	113,0		
321	121,8		
324	133,0		
327	142,2		
330	150,9		
333	159,9		
336	167,5		
339	173,4		
342	179,1		
345	184,1		
348	188,4		
351	191,3		
354	193,5		
357	194,1		
360	194,5		
363	193,4		
366	191,4		
369	188,8		
372	182,2		
375	178,2		
378	172,2		
381	164,4		
384	157,4		
387	149,4		
390	140,4		
393	131,1		
396	121,8		
399	112,4		
402	101,6		
405	90,2		
408	81,7		
411	71,8		
414	62,0		
417	52,9		
420	43,4		
423	35,7		
426	27,9		
429	21,7		

blauer Filter		roter Filter	
Winkel (°)	I [mA]	Winkel (°)	U [mV]
270	0,34	270	0,2
273	1,5	273	1,4
276	3,6	276	3,4
279	6,8	279	6,7
282	11,2	282	10,9
285	16,0	285	15,5
288	22,9	288	22,5
291	30,2	291	28,7
294	37,6	294	35,9
297	44,8	297	45,2
300	55,1	300	53,5
303	63,9	303	63,2
306	73,3	306	73,3
309	83,5	309	82,6
312	93,9	312	93,7
315	104,8	315	103,5
318	116,0	318	113,4
321	124,9	321	124,7
324	135,5	324	134,8
327	145,0	327	145,3
330	152,9	330	152,3
333	162,6	333	160,9
336	169,1	336	168,7
339	176,1	339	175,6
342	182,2	342	182,2
345	187,7	345	187,0
348	191,1	348	191,2
351	194,1	351	194,5
354	196,8	354	196,3
357	197,7	357	197,4
360	197,7	360	197,4
363	196,6	363	196,0
366	194,1	366	193,9
369	190,0	369	190,9
372	186,1	372	186,4
375	183,1	375	182,6
378	174,9	378	175,0
381	168,1	381	167,1
384	159,9	384	160,3
387	151,8	387	152,2
390	141,7	390	142,5

Maximum bei 357-359°

Maximum bei 297-303°

	blau	rot
33	133,7	134,2
36	124,2	123,2
39	114,4	113,9
42	101,5	102,6
45	89,7	93,1
48	82,2	81,8
51	72,5	68,6
54	61,4	63,2
57	53,2	53,7
60	44,3	44,0
63	35,8	35,8
66	28,5	28,1
69	22,5	22,7
72	16,0	16,0
75	11,1	11,0
78	6,6	6,8
81	3,6	2,5
84	1,4	1,2
87	0,3	0,2
90	0,3	0,2

(34,7mm)

2.) # Nullstellung	rechtsdrehend A	linksdrehend B	kurz	Lang (190,09mm)	
grün	11,5° 11,5°	(beidseitig) 53,0° 52,5°	-27,1° -27,3°	49,8° 49,4°	39,1° 40,4°
rot	11,4° 11,5°	39,7° 40,0°	-15,9° -15,6°	47,1° 47,5°	29,8° 35,8° 27,8° 33,9°
nders. Linierte blau	0,5° 0,3°	60,0° 59,7°	-56,0° -57,3°	55,8° 56,4°	40,0° 39,8°

Parallaxenfehler ±0,05°
Wachette (nicht fixiert ±0,05°)
für grün, rot

subjektiver Fehler ±0,1°

VT
22.03.2019
Diego Ramirez

Literatur

- [1] MESCHEDE, Dieter: *Gerthsen Physik*. Springer Verlag, 2010. – 571 S.
- [2] o.V.: *Versuchsanleitungen zum Physikkabor für Anfänger*innen, Teil 2*. 2019