

Physiklabor für Anfänger*innen
Ferienpraktikum im Wintersemester 2020/21

Versuch 79: Linear polarisiertes Licht



durchgeführt am 03.03.2021

Assistent:



Inhaltsverzeichnis

1 Ziel des Versuchs	3
2 Versuchsaufbau und Durchführung	4
2.1 Linear polarisiertes Licht	4
2.2 Polarimeter und optisch aktive Substanzen	5
3 Auswertung und Fehleranalyse	7
3.1 Linear polarisiertes Licht	7
3.2 Polarimeter und optisch aktive Substanzen	9
3.2.1 Küvette A	10
3.2.2 Küvette B	10
3.2.3 Längeres Glasrohr	11
3.2.4 Kürzeres Glasrohr	11
4 Zusammenfassung und Diskussion	13
4.1 Linear polarisiertes Licht	13
4.2 Polarimeter und optisch aktive Substanzen	13
4.2.1 Drehvermögen von Quarz	13
4.2.2 Ermittlung der unbekannten Konzentration einer Zuckerlösung	15
4.3 Mögliche Verbesserung der Messmethoden	15
Literaturverzeichnis	15
Abbildungsverzeichnis	16
Tabellenverzeichnis	17
5 Anhang	19

1 Ziel des Versuchs

ist

Thema dieses Versuches die Polarisation von Licht.

Im ersten Versuchsteil geht es dabei um ein Nachweisverfahren für linear polarisiertes Licht. Dabei wird mithilfe eines Polarisators linear polarisiertes Licht erzeugt und mit einem Analysator nachgewiesen, wobei insbesondere mittels einer Photodiode die Abhängigkeit der Durchlassintensität von der Wellenlänge des verwendeten Lichtes untersucht wird.

Im zweiten Versuchsteil werden dagegen mit einem Halbschattenpolarimeter verschiedene optisch aktive Materialien, sowohl feste Substanzen als auch Lösungen, untersucht und für verschiedene Wellenlängen deren Drehvermögen bestimmt. Daraus wiederum kann dann auch die unbekannte Konzentration einer der Lösungen bestimmt werden.

2 Versuchsaufbau und Durchführung

2.1 Linear polarisiertes Licht

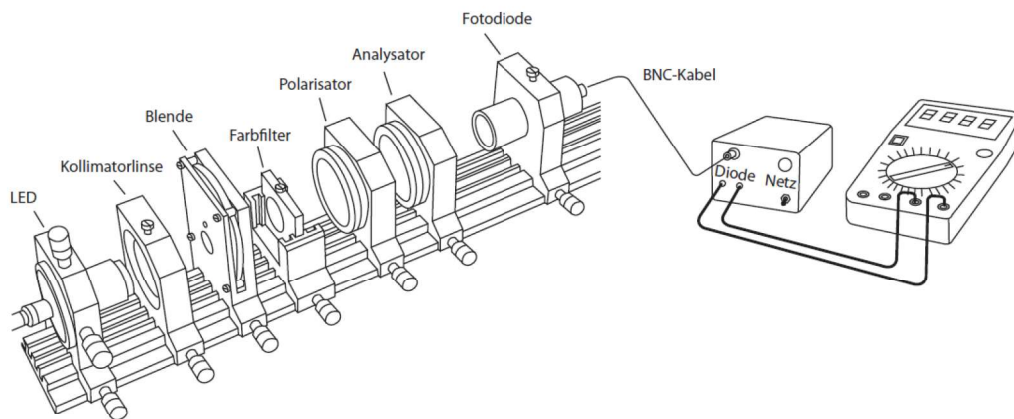


Abb. 2.1: Versuchsaufbau Teil 1: Messung der Polarisation von Licht [1]

Im ersten Versuchsteil soll die Polarisation von LED-Licht mit einem Polarisator und einem Analysator untersucht werden, wobei der Verlauf der Durchlassintensität I'/I in Abhängigkeit des Winkels α , um den der Analysator gegenüber dem Polarisator verdreht ist, für drei verschiedene Lichtfarben untersucht wird.

Vorher müsst ihr I , I' und α definieren, sonst ist das nicht nachvollziehbar.

Zunächst muss dafür auf einer optischen Bank der Strahlengang (siehe Abb. 2.1) aufgebaut werden. Dieser besteht aus einer LED, vor die eine Kollimatorlinse und eine verstellbare Blende gesetzt werden, um später die Lichtintensität zu maximieren. Dahinter wiederum wird eine Halterung für Farbfilter eingesetzt, sodass man später die Wellenlängenabhängigkeit prüfen kann. Außerdem setzt man dahinter zwei drehbare Polarisationsfilter – der erste wirkt später als Polarisator, der zweite als Analysator. Am Ende dieses Strahlengangs wird nun noch eine Fotodiode gesetzt, die an einen Widerstand und ein Digitalmultimeter angeschlossen ist. Mit der Fotodiode kann die Durchlassintensität gemessen werden, wobei der Widerstand dazu da ist, dass trotz des relativ geringen Fotostroms eine Spannung U , die proportional zur Lichtintensität ist, abfällt, die sich gut mit dem Digitalmultimeter messen lässt.

Bevor mit der Messung begonnen werden kann, sollten noch die Position der Kollimatorlinse und die Öffnung der Blende so angepasst werden, dass die Lichtintensität bei paralleler Stellung der Ebenen der beiden Polarisationsfilter möglichst groß ist, allerdings nicht größer als 200 mV, der verwendete Messbereich des Digitalmultimeters. Außerdem sollte noch sichergestellt werden, ob die mit 0° gekennzeichneten Stellungen der Polarisationsfilter wirklich den Polarisierungsebenen entsprechen. Der als Analysator wirkende Polarisationsfilter wird dazu auf 0° gestellt, und durch Verdrehen des Polarisators wird überprüft, wo die bei der Fotodiode ankommende Lichtintensität maximal ist.

Prinzipiell sollten die Bauteile des Strahlengangs relativ nah beieinander stehen, damit die Störungen durch Streulicht und externe Lichtquellen minimiert werden. Am besten wird auch

der Versuchsraum abgedunkelt.

Nun wird einmal für weißes Licht und dann für zwei unterschiedliche Farbfilter die in der Fotodiode ankommende Lichtintensität in Abhängigkeit vom Winkel α der Polarisations Ebenen von Analysator und Polarisator gemessen. Der Polarisator bleibt dazu fest stehen, der Analysator wird in seiner Halterung verdreht. Gemessen wird im Bereich von -90° bis $+90^\circ$. Dabei notiert man sich immer den Winkel α des Analysators und die auf dem Digitalmultimeter angezeigte Spannung U .

Sollte man zuvor festgestellt haben, dass die auf der Halterung des Polarisators angegebene Stellung für 0° nicht der maximalen Lichtintensität entspricht, muss man das entsprechende Offset dann natürlich vom auf der Halterung angegebenen Analysatorwinkel abziehen.

Außerdem sollte die Optimierung der Lichtintensität durch Linsenposition und Blendenöffnung beim Einsetzen eines neuen Farbfilters immer noch einmal neu durchgeführt werden.

Sehr schön!

2.2 Polarimeter und optisch aktive Substanzen

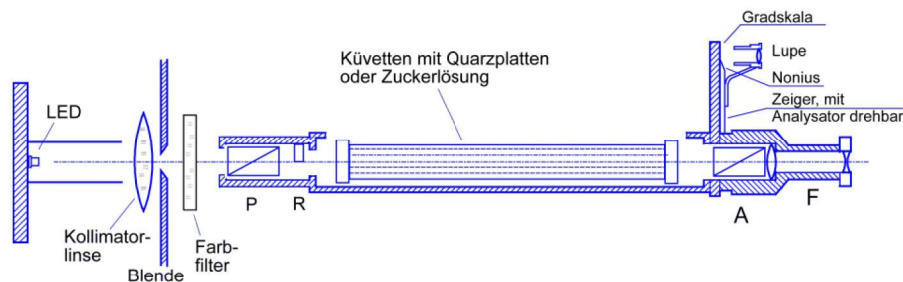


Abb. 2.2: Versuchsaufbau Teil 2: Halbschattenpolarimeter [1]

Im zweiten Versuchsteil werden mit einem Halbschattenpolarimeter die Drehvermögen verschiedenener optisch aktiver Substanzen bestimmt.

Dazu muss zunächst der Versuchsaufbau aus Teil 1 modifiziert werden. Die Fotodiode und die beiden Polarisationsfilter werden dazu entfernt und durch ein Halbschattenpolarimeter ersetzt (siehe Abb. 2.2). Die Position der Kollimatorlinse und die Öffnung der Blende werden außerdem so angepasst, dass die Eintrittsöffnung des Polarimeters von einem schmalen kollimierten Lichtbündel gut ausgeleuchtet wird. Außerdem wird die Farbfilterhalterung direkt vor die Blende geschoben, damit später wirklich das gesamte durch das Polarimeter betrachtete Gesichtsfeld gleichmäßig ausgeleuchtet ist.

Außerdem sollte durch Verschieben des Okularauszugs die Trennungslinie der beiden Gesichtsfeldhälften scharf gestellt werden, damit später der Helligkeitsunterschied zwischen ihnen gut erkennbar ist. Gegebenenfalls muss auch noch die Intensität der LED mithilfe des Spannungsreglers an ihrem Netzgerät angepasst werden, da eine zu niedrige oder hohe Intensität es später schwer macht, Helligkeitsunterschiede genau zu erkennen.

Nun wird für drei verschiedene Farbfilter (rot, grün, blau) zunächst die Nullstellung β_0 des Halbschattenpolarimeters gesucht. Dazu wird der Farbfilter eingesetzt und durch Verdrehen des Analysators des Polarimeters der Punkt gesucht, an dem beide Gesichtshälften gleich dunkel sind. Wichtig ist dabei, dass man diesen Punkt nicht mit dem Punkt verwechselt, an dem die beiden Gesichtshälften zwar ebenfalls die selbe Helligkeit haben, aber die Gesamthelligkeit sehr

viel größer ist. Den Halbschattenpunkt kann man am besten daran erkennen, dass davor die eine Gesichtshälfte dunkler ist, danach die andere.

Den entsprechenden Winkel β_0 kann man nun an der Skala des Halbschattenpolarimeters mit Hilfe einer Lupe und eines Nonius ablesen. Im Idealfall ist β_0 für alle drei Farbfilter identisch.

Nun werden verschiedene optisch aktive Substanzen untersucht – zunächst zwei Küvetten A und B der Längen d_A und d_B mit einem aus links- bzw. rechtsdrehendem Quarz bestehenden Fenster, außerdem zwei verschieden lange Glasrohre mit unterschiedlichen Konzentrationen an Zuckerlösung. Die Längen d dieser Rohre jeweils eingraviert, die Konzentration der Zuckerlösung ist jedoch nur für das längere Rohr bekannt.

Für jeden der drei Farbfilter werden nun also nacheinander diese Substanzen in das Halbschattenpolarimeter eingesetzt. Dabei hellt sich das Gesichtsfeld jeweils deutlich auf und es muss der Winkel β gesucht werden, an dem die beiden Gesichtshälften wieder gleich dunkel sind. Dabei ist zu beachten, dass es oft schwer ist, die beiden Gesichtshälften exakt gleich hell einzustellen, weil die Farbfilter jeweils einen Wellenlängenbereich durchlassen und es daher sein kann, dass eine der Gesichtshälften einen leicht anderen Farbton hat als die andere – eine subjektiv gleiche Helligkeit ist also nicht unbedingt herstellbar.

Was ist beta?

Die Differenz der Winkel $\alpha = \beta - \beta_0$ entspricht dann dem Drehwinkel der Substanz, aus dem sich dann mit den bekannten Dicken/Längen (und bei der ersten Zuckerlösung die Konzentration) deren Drehvermögen $[\alpha]$ bestimmen lässt. Dieses Drehvermögen ist für die beiden Zuckerlösungen identisch, sodass sich auch deren bisher unbekannte Konzentration berechnen lässt.

Auch sehr gut!

Auch hier gilt: Aufbau und Durchführung werden leider nicht benotet, es ist eure Entscheidung, wie ausführlich ihr das macht. Aber so ist es wunderbar nachvollziehbar, was getan wurde, was ich gut finde.

3 Auswertung und Fehleranalyse

3.1 Linear polarisiertes Licht

Im ersten Teil des Versuchs wurde durch einen Polarisator Licht einer LED polarisiert und mit Hilfe eines Analysators untersucht. Dazu wurde die abfallende Spannung U , welche proportional zur Intensität I ist, bei verschiedenen Winkeln α des Analysators mit einer Photodiode und einem Digitalmultimeter gemessen. Anschließend wurde die Messung zusätzlich noch zwei Mal mit Licht, welches zuvor einen Farbfilter passierte, durchgeführt, um die Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichts zu überprüfen. Die maximalen Spannungen lagen für die unterschiedlichen Lichtquellen (mit und ohne Farbfilter) alle bei $\alpha=0^\circ$ und betrugen

$$U_{\text{max,weiß}} = (152,4 \pm 0,8) \text{ mV}$$

$$U_{\text{max,rot}} = (131,2 \pm 0,7) \text{ mV}$$

$$U_{\text{max,grün}} = (45,2 \pm 0,2) \text{ mV}$$

Die Unsicherheit auf allen gemessenen Spannungen setzt sich aus der statistischen Unsicherheit $\Delta U_{\text{stat}} = 0,1 \text{ mV}$ (aufgrund der Schwankungen der Anzeige am Digitalmultimeter) und der systematischen Unsicherheit des Digitalmultimeters zusammen. Für den verwendeten Messbereich 200 mV beträgt diese $(0,5\% + 2 \text{ Digits})$, also ist $\Delta U_{\text{sys}} = \sqrt{(0,005 \cdot U)^2 + (0,2 \text{ mV})^2}$. Die Gesamtunsicherheit auf U ist also:

$$\begin{aligned} s_U &= \sqrt{(\Delta U_{\text{stat}})^2 + (\Delta U_{\text{sys}})^2} = \sqrt{(0,1 \text{ mV})^2 + (0,005 \cdot U)^2 + (0,2 \text{ mV})^2} \\ &= \sqrt{(0,005 \cdot U)^2 + (0,05 \text{ mV})^2} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Aus der Proportionalität von U und I folgt

$$\frac{U}{U_{\text{max}}} = \frac{I'}{I} \quad (3.2)$$

Die Unsicherheit des Quotienten lässt sich dabei mit einem Spezialfall der Gaußschen Fehlerfortpflanzung zu

$$s_{I'/I} = \frac{I'}{I} \sqrt{\left(\frac{s_U}{U}\right)^2 + \left(\frac{s_{U_{\text{max}}}}{U_{\text{max}}}\right)^2} \quad (3.3)$$

bestimmen.

Alle gemessenen Werte, so wie die daraus berechneten Verhältnisse I'/I aller Winkel α sind mit ihren jeweiligen Unsicherheiten in [Tabelle 5.1](#) aufgelistet. Der Fehler für α ist dabei aufgrund der Einstellgenauigkeit am Analysator bei allen Messungen $s_\alpha = \pm 1^\circ$.

Die Verhältnisse I'/I wurden als Funktion des Winkels α in Abbildung 3.1 bis 3.3 für jede Farbe einzeln aufgetragen. Die Fehlerbalken entsprechen dabei den Unsicherheiten $s_{I'/I}$ und s_α der einzelnen Werte. Der theoretische Verlauf

$$\frac{I'}{I}(\alpha) = \frac{I \cos^2(\alpha)}{I} = \cos^2(\alpha) \quad (3.4)$$

wurde zusätzlich in die Diagramme eingezeichnet, um die Qualität der Messung optisch beurteilen zu können.

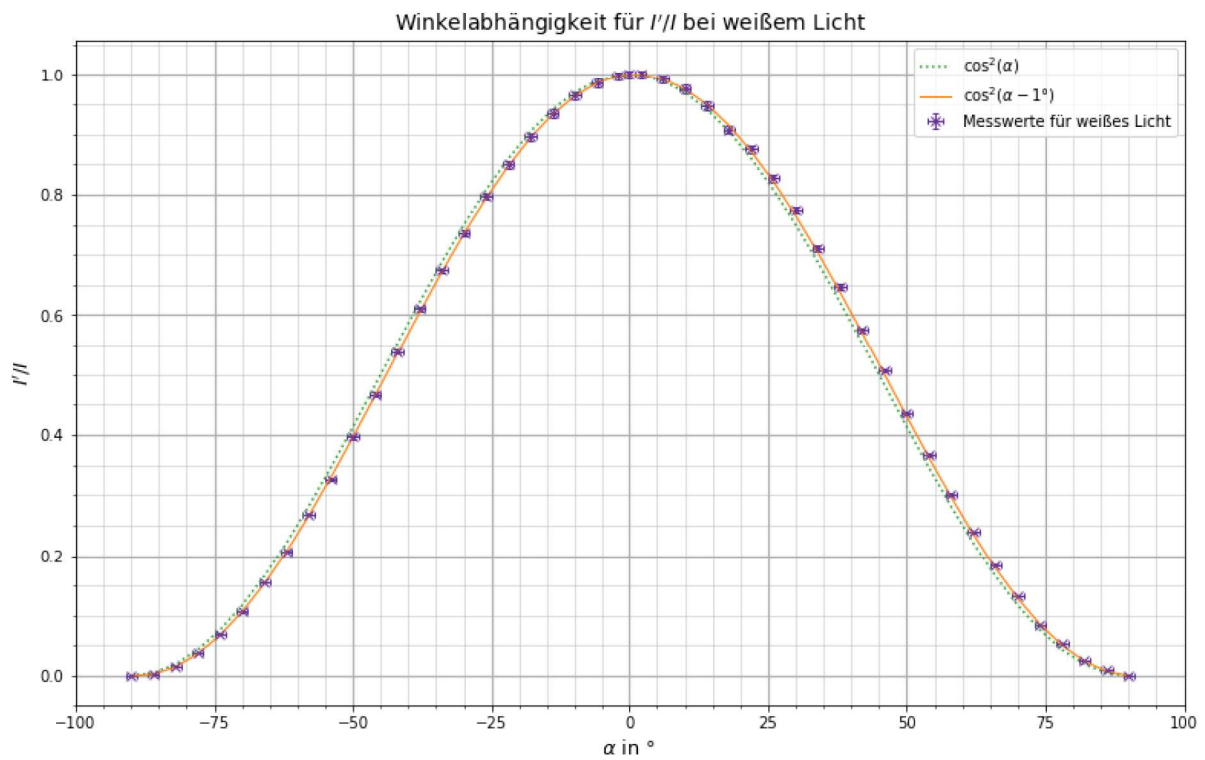


Abb. 3.1: I'/I in Abhängigkeit von α für weißes Licht

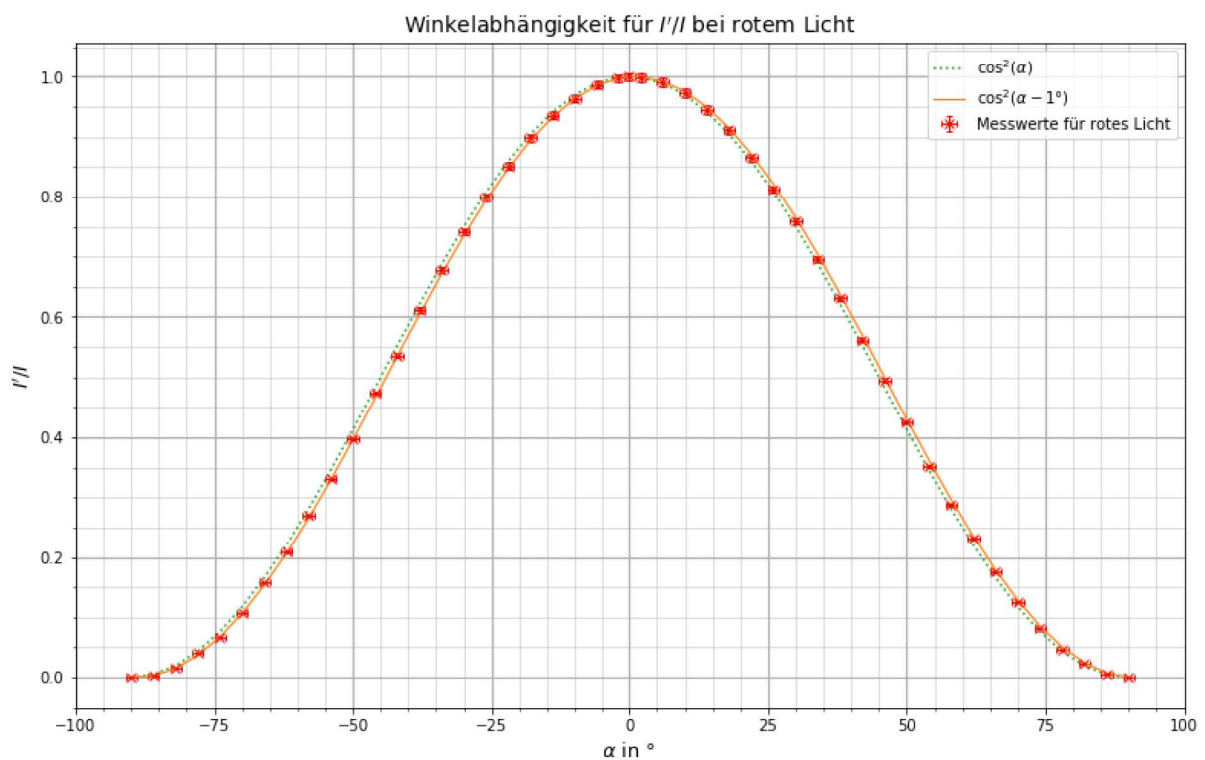


Abb. 3.2: I'/I in Abhängigkeit von α für rotes Licht

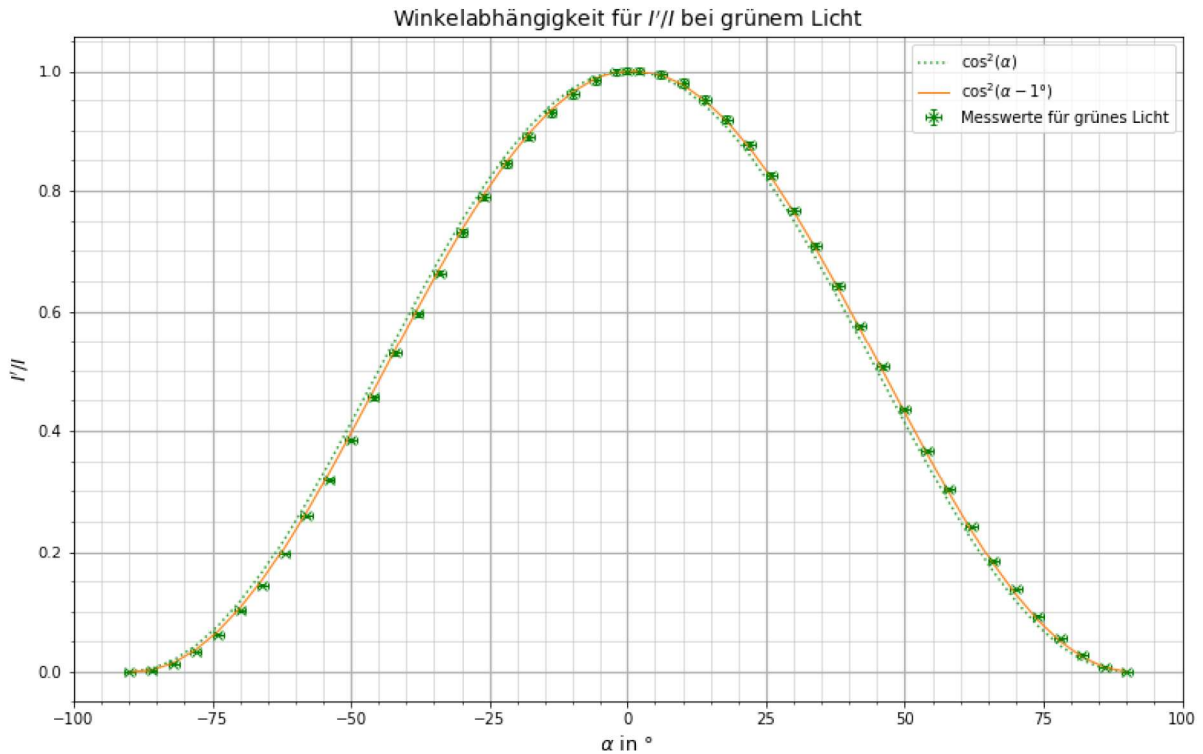


Abb. 3.3: I'/I in Abhängigkeit von α für grünes Licht

Wie man sieht, ist der experimentell bestimmte Verlauf von I'/I für alle Wellenlängen ein $\cos^2$ -Verlauf, wie aus der Theorie erwartet. Dennoch entsprechen die Verläufe nicht ganz der erwarteten $\cos^2(\alpha)$ -Verteilung, sondern eher dem ebenfalls eingezeichneten Verlauf von $\cos^2(\alpha - 1^\circ)$ – das deutet auf einen systematischen Fehler von $s_{\alpha, \text{sys}} = +1^\circ$ in α hin.

Außerdem sieht man, dass die Lage der Minima und Maxima von I'/I unabhängig von der Wellenlänge des verwendeten Lichtes ist.

3.2 Polarimeter und optisch aktive Substanzen

Im zweiten Teil des Versuchs sollten mit Hilfe eines Halbschattenpolarimeters für unterschiedliche Substanzen das Drehvermögen für unterschiedliche Farben und der Drehsinn bestimmt werden. Dazu wurde für jede Substanz der Winkel der Nullstellung β_0 und der Winkel β mit Probe, bei dem beide Gesichtsfeldhälften die gleiche Halbdunkelheit zeigen, für alle Farbfilter (rot, gelbgrün und blau) gemessen.

Der tatsächliche Drehwinkel α der Polarisations Ebenen für die Probematerialien ergibt sich aus der Winkeldifferenz der Analysatorstellungen

$$\alpha = \beta - \beta_0 \quad , \quad (3.5)$$

mit einer Unsicherheit, die sich durch einen Spezialfall der Gaußschen Fehlerfortpflanzung berechnen lässt, von

$$s_\alpha = \sqrt{(s_\beta)^2 + (s_{\beta_0})^2} = 0,2^\circ \quad . \quad (3.6)$$

Die Unsicherheiten der Winkelmessungen mit Probe setzen sich dabei aus einem Einstellfehler des Winkels, welcher auf $\pm 0,2^\circ$ geschätzt wurde, und einem Ablesefehler, welcher auf $\pm 0,1^\circ$

geschätzt wurde, zusammen, und ergibt sich zu

$$s_\beta = \sqrt{(s_{\text{Einstell}})^2 + (s_{\text{Ablese}})^2} = 0,2^\circ \quad (3.7)$$

Die Unsicherheit auf den Winkel der Nullstellung wurde nur auf $s_{\beta_0} = 0,1^\circ$ geschätzt, da dieser besser einstellbar war.

Aus dem so berechneten Drehwinkel α kann das spezifische Drehvermögen der Probe

$$\text{für feste Substanzen: } [\alpha]_{\text{fest}} = \frac{\alpha}{d} \quad (3.8)$$

$$\text{für Lösungen: } [\alpha]_{\text{Lösung}} = \frac{\alpha}{c \cdot d} \quad (3.9)$$

wobei d die Länge der von Licht durchstrahlten Probe und c die Konzentration der Lösung ist, berechnet werden. Die Unsicherheit ergibt sich dabei aus der Gaußschen Fehlerfortpflanzung zu

$$\text{für feste Substanzen: } s_{[\alpha]_{\text{fest}}} = \frac{1}{d} s_\alpha \quad (3.10)$$

$$\text{für Lösungen: } s_{[\alpha]_{\text{Lösung}}} = \sqrt{\left(\frac{s_\alpha}{c \cdot d}\right)^2 + \left(\frac{\alpha \cdot s_c}{c^2 \cdot d}\right)^2} \quad (3.11)$$

wobei die Dicke d als exakte Größe angenommen wird.

Diese Berechnungen können nun für die Messwerte der untersuchten Proben durchgeführt werden.

3.2.1 Küvette A

Die Küvette A ist ein Quarzfenster und hat laut Versuchsanleitung eine Dicke von $d_A = 1,5$ mm. Es handelt sich dabei um linksdrehenden Quarz. Mit den Gleichungen (3.5) bis (3.11) kann nun das spezifische Drehvermögen der Küvette A und dessen Unsicherheit für die unterschiedlichen Farben bestimmt werden. Die Messwerte und berechneten Ergebnisse sind in Tabelle 3.1 aufgelistet.

Farbe	Nullstellung β_0 in $^\circ$	Winkel β in $^\circ$	Drehwinkel α in $^\circ$	Drehvermögen $[\alpha]_{\text{fest}}$ in $^\circ/\text{mm}$
rot	$0,4 \pm 0,1$	$-28,3 \pm 0,2$	$-28,7 \pm 0,2$	$-19,13 \pm 0,13$
gelbgrün	$0,4 \pm 0,1$	$-40,5 \pm 0,2$	$-40,9 \pm 0,2$	$-27,27 \pm 0,13$
blau	$0,4 \pm 0,1$	$-60,9 \pm 0,2$	$-61,3 \pm 0,2$	$-40,87 \pm 0,13$

Tab. 3.1: Messwerte, berechneter Drehwinkel und Drehvermögen der Küvette A für verschiedene Farben

3.2.2 Küvette B

Die Küvette B ist ebenfalls ein Quarzfenster und hat laut Versuchsanleitung ebenfalls eine Dicke von $d_B = 1,5$ mm. Es handelt sich hier jedoch um rechtsdrehendes Quarz. Mit den Gleichungen (3.5) bis (3.11) kann nun auch hier das spezifische Drehvermögen der Küvette B und dessen Unsicherheit für die unterschiedlichen Farben bestimmt werden. Die Messwerte und berechneten Ergebnisse sind in Tabelle 3.2 aufgelistet.

Farbe	Nullstellung β_0 in $^\circ$	Winkel β in $^\circ$	Drehwinkel α in $^\circ$	Drehvermögen $[\alpha]_{\text{fest}}$ in $^\circ/\text{mm}$
rot	$0,4 \pm 0,1$	$29,4 \pm 0,2$	$29,0 \pm 0,2$	$19,33 \pm 0,13$
gelbgrün	$0,4 \pm 0,1$	$41,3 \pm 0,2$	40.33 $39,9 \pm 0,2$	27.27 $26,60 \pm 0,13$
blau	$0,4 \pm 0,1$	$62,5 \pm 0,2$	62.1 $61,8 \pm 0,2$	41.40 $41,20 \pm 0,13$

Tab. 3.2: Messwerte, berechneter Drehwinkel und Drehvermögen der Küvette B für verschiedene Farben

3.2.3 Längeres Glasrohr

Das längere Glasrohr war mit einer Zuckerlösung in destilliertem Wasser mit einer Konzentration von $c = (21,3 \pm 0,5) \text{ g}/(100 \text{ cm}^3)$ gefüllt. Das Glasrohr hatte außerdem eine innere Länge von $d = 190,09 \text{ mm} = 19,009 \text{ cm}$. Es wurde ebenfalls in den Lichtweg des Halbschattenpolarimeters gebracht und es wurden die gleichen Messungen wie für die Küvetten A und B durchgeführt. Die Messwerte sind in Tabelle 3.3 aufgelistet.

Farbe	Nullstellung β_0 in $^\circ$	Winkel β in $^\circ$	Drehwinkel α in $^\circ$	Drehvermögen $[\alpha]_{\text{Lösung}}$ in $^\circ/(g \cdot \text{cm}^2)$
rot	$0,4 \pm 0,1$	$20,9 \pm 0,2$	$20,5 \pm 0,2$	$5,06 \pm 0,13$
gelbgrün	$0,4 \pm 0,1$	$29,3 \pm 0,2$	$28,9 \pm 0,2$	$7,14 \pm 0,17$
blau	$0,4 \pm 0,1$	$42,5 \pm 0,2$	$42,1 \pm 0,2$	$10,40 \pm 0,25$

Tab. 3.3: Messwerte, berechneter Drehwinkel und Drehvermögen des langen Glasrohrs für verschiedene Farben

In Tabelle 3.3 sind außerdem die berechneten Drehwinkel und Drehvermögen der Zuckerlösung für verschiedene Farben angegeben. Diese wurden ebenfalls mit den Gleichungen (3.5) bis (3.11) berechnet, wobei hier die Gleichungen für Lösungen verwendet wurden.

also 3.5, 3.9 und 3.11

3.2.4 Kürzeres Glasrohr

Auch das kürzere Glasrohr ist mit einer Zuckerlösung gefüllt. Die Konzentration dieser Lösung ist jedoch nicht bekannt und soll im Laufe dieser Auswertung bestimmt werden. Das kürzere Glasrohr hat eine innere Länge von $d = 94,7 \text{ mm} = 9,47 \text{ cm}$. Wie auch bei den anderen Messreihen wurde die Nullstellung β_0 und der Winkel β mit der Lösung gemessen.

Aus diesen Messwerten kann analog mit Gleichung (3.5) der Drehwinkel α und mit Gleichung (3.6) die Unsicherheit dieses Winkels bestimmt werden. Mit dem Drehwinkel einer Farbe und dem in Abschnitt 3.2.3 bereits bestimmten spezifischen Drehvermögen der Zuckerlösung einer Farbe kann die Konzentration der hier unbekannten Zuckerlösung mit

$$c = \frac{\alpha}{[\alpha]_{\text{Lösung}} \cdot d} \quad (3.12)$$

bestimmt werden. Die Unsicherheit lässt sich dabei mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung zu

$$s_c = \sqrt{\left(\frac{s_\alpha}{[\alpha]_{\text{Lösung}} \cdot d}\right)^2 + \left(\frac{\alpha \cdot s_{[\alpha]_{\text{Lösung}}}}{d \cdot ([\alpha]_{\text{Lösung}})^2}\right)^2} \quad (3.13)$$

berechnen.

Alle Messwerte dieser Reihe, die Drehwinkel der einzelnen Farben und die Konzentration der Zuckerlösung, für jede Farbe einzeln berechnet, sind in Tabelle 3.4 aufgelistet.

Farbe	Nullstellung β_0 in $^\circ$	Winkel β in $^\circ$	Drehwinkel α in $^\circ$	Konzentration c in g/cm^3
rot	$0,4 \pm 0,1$	$27,0 \pm 0,2$	$26,6 \pm 0,2$	$0,555 \pm 0,015$
gelbgrün	$0,4 \pm 0,1$	$38,5 \pm 0,2$	$38,1 \pm 0,2$	$0,563 \pm 0,013$
blau	$0,4 \pm 0,1$	$57,9 \pm 0,2$	$57,5 \pm 0,2$	$0,584 \pm 0,014$

Tab. 3.4: Messwerte, berechneter Drehwinkel der einzelnen Farben und Konzentrationen der Zuckerlösung im kleinen Glasrohr

Aus den drei einzeln berechneten Konzentrationen kann nun der Mittelwert

$$\bar{c} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 c_i = (0,567 \pm 0,009) \text{ g}/\text{cm}^3 \quad (3.14)$$

mit einer Standardunsicherheit auf den Mittelwert von

$$s_{\bar{c}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 (c_i - \bar{c})^2} = 0,009 \text{ g/cm}^3 \quad (3.15)$$

gebildet werden.

4 Zusammenfassung und Diskussion

4.1 Linear polarisiertes Licht

Für weißes, rotes und grünes Licht wurde in diesem Versuchsteil die Winkelabhängigkeit des Verlaufs von I'/I untersucht. Aus der Theorie erwartet man dabei einen $\cos^2$ -Verlauf – diese Erwartung wurde auch bestätigt (siehe Diagramme 3.1, 3.2 und 3.3).

Festgestellt wurde allerdings ein Offset des Winkels α von 1° , da die experimentellen Verläufe eher dem Verlauf von $\cos^2(\alpha - 1^\circ)$ entsprechen – diese Funktion wurde ebenfalls mit eingezeichnet und verläuft, anders als $\cos^2(\alpha)$, auch bei allen drei Farben durch die Fehlerbalken aller Messpunkte.

Dieser systematische Fehler entstand vermutlich dadurch, dass die Polarisatorstellung bei 0° auf der Skala der Halterung nicht vollkommen parallel zur Analysatorstellung bei 0° war. Zwar wurde dies vor der Messung überprüft, da die Skala auf der Halterung des Polarisators aber in 2° -Schritten verläuft und es prinzipiell schwierig war, einen Winkel zwischen den 2° -Skalenstrichen einzustellen, und außerdem die Anzeige der Spannung auf dem Multimeter ständig um $0,1\text{ mV}$ schwankte, sodass das Maximum nicht exakt identifizierbar war, wurde das 1° -Offset dabei nicht bemerkt.

"ständig" ist etwas umgangssprachlich

Die Diagramme 3.1, 3.2 und 3.3 zeigen außerdem, dass die maximale und minimale Durchlassintensität nicht abhängig von der Wellenlänge ist, da die Maxima bei allen Verläufen an der gleichen Stelle liegen und auch alle drei Verläufe der selben Funktion ($\cos^2(\alpha - 1^\circ)$) folgen. Gerade auch die Tatsache, dass der Verlauf von weißem Licht, welches keine einzelne bestimmte Wellenlänge hat, ebenfalls mit den Verläufen der anderen beiden Lichtfarben übereinstimmt, bestätigt dies.

4.2 Polarimeter und optisch aktive Substanzen

4.2.1 Drehvermögen von Quarz

Das spezifische Drehvermögen $[\alpha]_{\text{fest}}$ von Quarz in Abhängigkeit der Drehrichtung (Küvette A: linksdrehend und Küvette B: rechtsdrehend) wurde für drei unterschiedliche Farben experimentell bestimmt. In Tabelle 4.1 sind die berechneten Drehvermögen noch einmal zusammengefasst dargestellt.

Farbe	spezifisches Drehvermögen $[\alpha]_{\text{fest}}$ in $^\circ/\text{mm}$	
	Quarz A (linksdrehend)	Quarz B (rechtsdrehend)
rot	$-19,13 \pm 0,13$	$19,33 \pm 0,13$
gelbgrün	$-27,27 \pm 0,13$	$26,60 \pm 0,13$
blau	$-40,87 \pm 0,13$	$41,20 \pm 0,13$

Tab. 4.1: Experimentell bestimmte Drehvermögen von Quarz

Vergleicht man die spezifischen Drehvermögen der unterschiedlich drehenden Quarze in Tabelle 4.1 miteinander, so ist leicht zu erkennen, dass die Vorzeichen und damit die Richtungen,

Wenn man hier kleinlich ist wäre eine genauere Beschreibung "im Uhrzeigersinn" oder "gegen den Uhrzeigersinn".

in welche die Polarisation durch den Quarz gedreht wird, unterschiedlich sind. Der linksdrehende Quarz (Küvette A) drehte die Polarisation in negative Winkelrichtung. Dies entspricht bei Betrachtung entgegen der Ausbreitungsrichtung des Lichts einer Drehung der Polarisations-ebene nach links. Der rechtsdrehende Quarz drehte die Polarisations-ebene dagegen bei gleicher Betrachtung nach rechts. Dies bestätigt die Beschriftung der Küvetten und zeigt, dass es sich hierbei um in entgegengesetzte Richtungen drehende Quarze handelt.

Außerdem ist deutlich erkennbar, dass das spezifische Drehvermögen stark von der Wellenlänge abhängig ist und für kleinere Wellenlängen größer wird. Diese Wellenlängenabhängigkeit wird auch Rotationsdispersion genannt und konnte durch unsere Messung experimentell bestätigt werden.

Vergleicht man jeweils den Betrag der mit den beiden Quarzen bestimmten Drehvermögen $[\alpha]_{\text{fest}}$ für jede Farbe, ergeben sich als Abweichungen in Einheiten der kombinierten Standardunsicherheit:

$$t_{\text{rot}} = \frac{||[\alpha]_{\text{fest,r,A}}| - |[\alpha]_{\text{fest,r,B}}||}{\sqrt{(s[\alpha]_{\text{fest,r,A}})^2 + (s[\alpha]_{\text{fest,r,B}})^2}} = 1,1 \quad (4.1)$$

$$t_{\text{gelbgrün}} = \frac{||[\alpha]_{\text{fest,g,A}}| - |[\alpha]_{\text{fest,g,B}}||}{\sqrt{(s[\alpha]_{\text{fest,g,A}})^2 + (s[\alpha]_{\text{fest,g,B}})^2}} = 3,6 \quad (4.2)$$

$$t_{\text{blau}} = \frac{||[\alpha]_{\text{fest,b,A}}| - |[\alpha]_{\text{fest,b,B}}||}{\sqrt{(s[\alpha]_{\text{fest,b,A}})^2 + (s[\alpha]_{\text{fest,b,B}})^2}} = 1,8 \quad (4.3)$$

Die spezifischen Drehvermögen der Farben rot und blau sind somit auf einem Signifikanzniveau von 5% verträglich, die Drehvermögen der Farbe gelbgrün jedoch nicht. Trotzdem ist zu erkennen, dass auch diese sich in der gleichen Größenordnung befinden und in einer 4σ -Umgebung verträglich sind. Womöglich wurden jedoch die Unsicherheiten der Messung zu gering abgeschätzt.

Die verwendeten Farb-Absorptionsfilter ließen außerdem einen relativ breiten Wellenlängenbereich durch, aus diesem Grund ließ sich eine subjektive völlige Helligkeitgleichheit der beiden Gesichtshälften bei gleichem Farbeindruck nicht einstellen. Vor allem mit eingelegter Probe war dies schwierig, wiesen die beiden Gesichtshälften nicht mehr identische Farben auf, was den Vergleich der Intensitäten erschwerte. Da jedoch der Winkelbereich zwischen den beiden Fällen, bei denen jeweils eine Gesichtshälfte dunkel war, sehr schmal war, konnte der Drehwinkel trotzdem relativ genau eingestellt werden. Nichtsdestotrotz kann es aus diesem Grund zu Unsicherheiten in der Messung gekommen sein.

Da den Farb-Absorptionsfiltern keine genaue Wellenlänge zugeordnet werden können, können die bestimmten Drehvermögen nicht genau mit Literaturwerten verglichen werden. Aus diesem Grund werden die Wellenlängen der Farbfilter hier nur grob anhand ihrer Farbe abgeschätzt [2]

rot: $\lambda \approx 620$ bis 780 nm

gelbgrün: $\lambda \approx 500$ bis 575 nm

blau: $\lambda \approx 450$ bis 482 nm

und mit den Literaturwerten [3] in Tabelle 4.2 verglichen.

Top!

Ihr habt im Experiment gesehehn, dass das blaue Spektrum am weitesten ist, hier hätte man dementsprechend etwas mehr machen können.

Farbe	Wellenlänge λ in nm	spez. Drehvermögen in $^{\circ}/\text{mm}$
violett/blau	436	41,55
grün	509	29,72
rot	656	17,32

Tab. 4.2: Literaturwerte der Drehvermögen von Quarz in Abhängigkeit der Wellenlänge

Eventuell wäre hier die direkte Gegenüberstellung mit vllt. den Mittelwerten aus Tab. 4.1 sinnvoll.

Beim Vergleich der experimentell bestimmten Drehvermögen von Quarz mit den Werten in Tabelle 4.2 ist zu erkennen, dass sie sich alle jeweils in der gleichen Größenordnung befinden und man kann deswegen davon ausgehen, dass es sich bei den experimentell bestimmten Drehvermögen von Quarz um realistische Werte handelt.

4.2.2 Ermittlung der unbekannten Konzentration einer Zuckerlösung

Zu Bestimmung der Konzentration der zweiten Zuckerlösung wurde das deren spezifisches Drehvermögen benötigt. Da dieses unabhängig von der Konzentration ist, wurde zuerst das spezifische Drehvermögen der ersten Zuckerlösung, deren Konzentration bekannt war, für drei unterschiedliche Farben bestimmt. Ermittelt wurde je ein spezifisches Drehvermögen der Zuckerlösung von

$$\begin{aligned}\text{für rot: } [\alpha]_{\text{Zuckerlösung}} &= 5,06 \pm 0,13 \\ \text{für gelbgrün: } [\alpha]_{\text{Zuckerlösung}} &= 7,14 \pm 0,17 \\ \text{für blau: } [\alpha]_{\text{Zuckerlösung}} &= 10,04 \pm 0,25\end{aligned}$$

Auch an diesen Werten kann man erneut die Wellenlängenabhängigkeit des spezifischen Drehvermögens erkennen. Über die Richtigkeit dieser Drehvermögen kann jedoch nur schwer eine Aussage getroffen werden, da nicht genug Angaben über die Zuckerlösung bekannt sind, um diese mit Literaturwerten zu vergleichen.

Mithilfe dieser Drehvermögen konnte anschließend die unbekannte Konzentration der zweiten Zuckerlösung zu

$$c = (0,567 \pm 0,009) \text{ g/cm}^3$$

berechnet werden. Da die drei berechneten Konzentrationen unter Berücksichtigung der Genauigkeit der Messung relativ nahe zusammenliegen, kann davon ausgegangen werden, dass sowohl die drei Drehvermögen als auch die Konzentration der Zuckerlösung realistische Werte sind. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die unbekannte Zuckerlösung eine größere Konzentration als die bekannte Zuckerlösung aufweist.

4.3 Mögliche Verbesserung der Messmethoden

Insgesamt waren alle Messungen dieses Versuches sehr genau und es gab kaum Quellen für Unsicherheiten.

Im ersten Versuchsteil haben die Messwerte sehr gut die Theorie bestätigt – einmal abgesehen davon, dass es beim Winkel α einen systematischen Fehler gab, vermutlich bedingt durch die Einstellung des als Polarisator wirkenden Polarisationsfilters. Dies lag hauptsächlich an der schlechten Einstellbarkeit von Winkeln zwischen den Skalenstrichen und der schwankenden Anzeige am Digitalmultimeter. Verbessern ließe sich das vermutlich, indem man einen Polarisationsfilter, dessen Halterung mehr Skalenstriche besitzt, verwendet, und ein Digitalmultimeter, das im Messbereich 200 mV mehr Nachkommastellen anzeigt. Der $\cos^2$ -Verlauf ist jedoch auch trotz dieser systematischen Unsicherheit sehr gut erkennbar.

Im zweiten Versuchsteil bestätigten die Messungen mit Quarz die Theorie ebenfalls gut, auch wenn die relativ große Wellenlängenbreite der Farb-Absorptionsfilter die Einstellung einer Helligkeitsgleichheit erschwerte. Diese Unsicherheit könnte durch spezifischere Farbfilter, welche eine geringere Wellenlängenbreite aufweisen, verringert werden. Auch die Messungen mit den Zuckerlösungen scheinen realistisch, konnten jedoch nicht mit Literaturwerten überprüft werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Versuchsaufbau Teil 1/2: *Versuchsanleitungen Physik-Labor für Anfänger*innen, Teil II* (Stand: 02/2021), S. 97/98
- [2] Farbspektrum: <https://www.hug-technik.com/inhalt/ta/farben.html>, aufgerufen am 04.03.2021
- [3] Rotationsdispersion des Quarzes: *Meschede, Dieter und Gerthsen, Christian: Gerthsen Physik, Auflage von 2015*, Seite 571, Tabelle 11.2

Kritik:

- Keine klare Definition der Messgrößen I , I' , β (vobei β sehr kleinlich)
- Falsche Rechnung (Tab. 3.2)
- + Sehr gute Beschreibung von Aufbau und Durchführung
- + Klare, nachvollziehbare Auswertung, übersichtliche Tabellen
- + Klare Nomenklatur
- + Systematische Fehlerkorrektur in Aufg. 1
- + Top Diskussion, vor allem noch Vergleich mit Literaturwerten aus [3]

Note: 1.0

Abbildungsverzeichnis

2.1	Versuchsaufbau Teil 1: Messung der Polarisation von Licht [1]	4
2.2	Versuchsaufbau Teil 2: Halbschattenpolarimeter [1]	5
3.1	I'/I in Abhängigkeit von α für weißes Licht	8
3.2	I'/I in Abhängigkeit von α für rotes Licht	8
3.3	I'/I in Abhängigkeit von α für grünes Licht	9
5.1	Laborheft Seite 1	21
5.2	Laborheft Seite 2	22
5.3	Laborheft Seite 3	23

Tabellenverzeichnis

3.1	Messwerte, berechneter Drehwinkel und Drehvermögen der Küvette A für verschiedene Farben	10
3.2	Messwerte, berechneter Drehwinkel und Drehvermögen der Küvette B für verschiedene Farben	10
3.3	Messwerte, berechneter Drehwinkel und Drehvermögen des langen Glasrohrs für verschiedene Farben	11
3.4	Messwerte, berechneter Drehwinkel der einzelnen Farben und Konzentrationen der Zuckerlösung im kleinen Glasrohr	11
4.1	Experimentell bestimmte Drehvermögen von Quarz	13
4.2	Literaturwerte der Drehvermögen von Quarz in Abhängigkeit der Wellenlänge . .	14
5.1	Messwerte und berechnete Verhältnisse I'/I des ersten Versuchsteils	20

5 Anhang

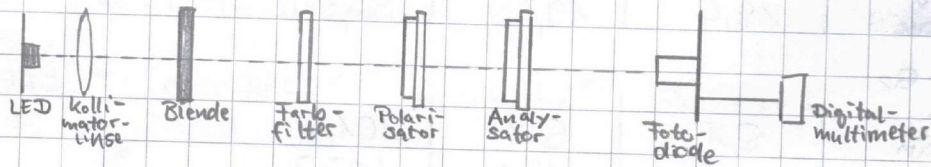
	weiß				rot				grün			
α in °	U mV	s_U mV	I'/I	$s_{I'}/I$	U mV	s_U mV	I'/I	$s_{I'}/I$	U mV	s_U mV	I'/I	$s_{I'}/I$
-90	0,1	0,1	0,0007	0,0003	0,0	0,1	0,0000	-	0,0	0,1	0,0000	-
-86	0,5	0,1	0,0033	0,0003	0,5	0,1	0,0038	0,0004	0,1	0,1	0,0022	0,0011
-82	2,5	0,1	0,0164	0,0003	2,0	0,1	0,0152	0,0004	0,6	0,1	0,0133	0,0011
-78	5,9	0,1	0,0387	0,0004	5,3	0,1	0,0404	0,0005	1,5	0,1	0,0332	0,0011
-74	10,6	0,1	0,0696	0,0006	8,7	0,1	0,0663	0,0006	2,8	0,1	0,0620	0,0012
-70	16,2	0,1	0,1063	0,0008	14,1	0,1	0,1075	0,0009	4,6	0,1	0,1018	0,0013
-66	23,7	0,1	0,1555	0,0011	20,6	0,1	0,1570	0,0012	6,5	0,1	0,1438	0,0015
-62	31,6	0,2	0,2073	0,0015	27,3	0,1	0,2081	0,0015	8,9	0,1	0,1969	0,0018
-58	40,9	0,2	0,2683	0,0019	35,5	0,2	0,2706	0,0020	11,7	0,1	0,2588	0,0022
-54	49,7	0,3	0,3261	0,0023	43,3	0,2	0,3300	0,0024	14,4	0,1	0,3186	0,0025
-50	60,4	0,3	0,3963	0,0028	52,1	0,3	0,3971	0,0028	17,4	0,1	0,3850	0,0030
-46	71,2	0,4	0,4672	0,0033	62,2	0,3	0,4741	0,0034	20,6	0,1	0,4558	0,0034
-42	82,1	0,4	0,5387	0,0038	70,2	0,4	0,5351	0,0038	23,9	0,1	0,5288	0,0040
-38	93,1	0,5	0,6109	0,0043	80,2	0,4	0,6113	0,0043	26,9	0,1	0,5951	0,0044
-34	102,7	0,5	0,6739	0,0048	88,9	0,4	0,6776	0,0048	30,0	0,2	0,6637	0,0049
-30	112,2	0,6	0,7362	0,0052	97,2	0,5	0,7409	0,0053	33,0	0,2	0,7301	0,0053
-26	121,5	0,6	0,7972	0,0057	104,8	0,5	0,7988	0,0057	35,7	0,2	0,7898	0,0058
-22	129,5	0,6	0,8497	0,0060	111,7	0,6	0,8514	0,0060	38,2	0,2	0,8451	0,0061
-18	136,6	0,7	0,8963	0,0064	117,9	0,6	0,8986	0,0064	40,2	0,2	0,8894	0,0065
-14	142,5	0,7	0,9350	0,0066	122,8	0,6	0,9360	0,0066	42,0	0,2	0,9292	0,0067
-10	147,0	0,7	0,9646	0,0068	126,5	0,6	0,9642	0,0068	43,4	0,2	0,9602	0,0070
-6	150,2	0,8	0,9856	0,0070	129,5	0,6	0,9870	0,0070	44,4	0,2	0,9823	0,0071
-2	152,0	0,8	0,9974	0,0071	130,9	0,7	0,9977	0,0071	45,1	0,2	0,9978	0,0072
0	152,4	0,8	1,0000	0,0071	131,2	0,7	1,0000	0,0071	45,2	0,2	1,0000	0,0072
2	152,4	0,8	1,0000	0,0071	131,1	0,7	0,9992	0,0071	45,2	0,2	1,0000	0,0072
6	151,3	0,8	0,9928	0,0070	130,0	0,7	0,9909	0,0070	44,9	0,2	0,9934	0,0072
10	148,7	0,7	0,9757	0,0070	127,7	0,6	0,9733	0,0070	44,2	0,2	0,9979	0,0071
14	144,4	0,7	0,9475	0,0067	124,0	0,6	0,9451	0,0067	43,0	0,2	0,9153	0,0069
18	138,4	0,7	0,9081	0,0064	119,5	0,6	0,9108	0,0065	41,5	0,2	0,9513	0,0069
22	133,4	0,7	0,8753	0,0062	113,6	0,6	0,8659	0,0061	39,6	0,2	0,9181	0,0067
26	126,0	0,6	0,8268	0,0059	106,7	0,5	0,8133	0,0058	37,3	0,2	0,8252	0,0060
30	117,9	0,6	0,7736	0,0055	99,6	0,5	0,7951	0,0054	34,7	0,2	0,7677	0,0056
34	108,4	0,5	0,7113	0,0050	91,3	0,5	0,6959	0,0050	32,0	0,2	0,7080	0,0052
38	98,7	0,5	0,6476	0,0046	82,8	0,4	0,6311	0,0045	29,0	0,2	0,6416	0,0047
42	87,7	0,4	0,5755	0,0041	73,6	0,4	0,5610	0,0040	26,0	0,1	0,5752	0,0043
46	77,3	0,4	0,5072	0,0036	64,9	0,3	0,4947	0,0035	22,9	0,1	0,5066	0,0038
50	66,4	0,3	0,4357	0,0031	55,8	0,3	0,4253	0,0030	19,7	0,1	0,4358	0,0033
54	55,8	0,3	0,3661	0,0026	46,2	0,2	0,3521	0,0025	16,6	0,1	0,3673	0,0029
58	45,9	0,2	0,3012	0,0022	37,8	0,2	0,2881	0,0021	13,7	0,1	0,3031	0,0024
62	36,4	0,2	0,2388	0,0017	30,4	0,2	0,2317	0,0017	10,9	0,1	0,2412	0,0021
66	28,1	0,1	0,1844	0,0013	23,0	0,1	0,1753	0,0013	8,3	0,1	0,1836	0,0017
70	20,2	0,1	0,1325	0,0010	16,5	0,1	0,1258	0,0010	6,2	0,1	0,1372	0,0015
74	12,8	0,1	0,0840	0,0007	10,7	0,1	0,0816	0,0007	4,2	0,1	0,0929	0,0013
78	8,1	0,1	0,0531	0,0005	6,1	0,1	0,0465	0,0005	2,5	0,1	0,0553	0,0012
82	3,9	0,1	0,0256	0,0004	3,1	0,1	0,0236	0,0004	1,3	0,1	0,0288	0,0011
86	1,4	0,1	0,0092	0,0003	0,8	0,1	0,0061	0,0004	0,4	0,1	0,0088	0,0011
90	0,2	0,1	0,0013	0,0003	0,0	0,1	0,0000	-	0,0	0,1	0,0000	-

Tab. 5.1: Messwerte und berechnete Verhältnisse I'/I des ersten Versuchsteils

Versuch 79: Linear polarisiertes Licht

Teil 1: Linear polarisiertes Licht

Versuchsaufbau



Weißes Licht

α in $^\circ$	U in mV	α in $^\circ$	U in mV	α in $^\circ$	U in mV	α	U
90	0,2	34	108,4	-18	136,6	-74	10,6
86	1,4	30	117,9	-22	129,5	-78	5,9
82	3,9	26	126,0	-26	121,5	-82	2,5
78	8,1	22	133,4	-30	112,2	-86	0,5
74	12,8	18	138,8	-34	102,7	-90	0,1
70	20,2	14	144,4	-38	93,1		
66	28,1	10	148,7	-42	82,4		
62	36,4	6	151,3	-46	71,2		
58	45,9	2	152,4	-50	60,4		
54	55,8	0	152,4	-54	49,7		
50	66,4	-2	152,1	-58	40,9		
46	77,3	-6	150,2	-62	31,6		
42	87,7	-10	147,0	-66	23,7		
38	98,7	-14	142,5	-70	16,2		

Abb. 5.1: Laborheft Seite 1

α in $^\circ$	rot U in mV	grün U in mV	α in $^\circ$	rot U in mV	grün U in mV
90	0,0	0,0	-54	43,3	14,4
86	0,8	0,4	-58	35,5	11,7
82	3,1	1,3	-62	27,3	8,9
78	6,1	2,5	-66	20,6	6,5
74	10,7	4,2	-70	14,1	4,6
70	16,5	6,2	-74	8,7	2,8
66	23,0	8,3	-78	5,3	1,5
62	30,4	10,9	-82	2,0	0,6
58	37,8	13,7	-86	0,5	0,1
54	46,2	16,6	-90	0,0	0,0
50	55,8	19,7			
46	64,9	22,9			
42	73,6	26,0			
38	82,8	29,0			
34	91,3	32,0			
30	99,6	34,7			
26	106,7	37,3			
22	113,6	39,6			
18	119,5	41,5			
14	124,0	43,0			
10	127,7	44,2			
6	130,0	44,9			
2	131,1	45,2			
0	131,2	45,2			
-2	130,9	45,1			
-4					
-6	129,5	44,4			
-10	126,5	43,4			
-14	122,8	42,0			
-18	117,9	40,2			
-22	111,7	38,2			
-26	104,8	35,7			
-30	97,2	33,0			
-34	88,9	30,0			
-38	80,2	26,9			
-42	70,2	23,9			
-46	62,2	20,6			
-50	52,1	17,4			

Unsicherheiten:

$$\Delta\alpha = \pm 1^\circ$$

Digitalmultimeter:

$$\Delta U_{\text{stat}} = \pm 0,1 \text{ mV} \quad \rightarrow \text{Schwankung der Anzeige}$$

$$\Delta U_{\text{sys}} = \pm (0,5\% + 2 \text{ Digits})$$

Abb. 5.2: Laborheft Seite 2

Teil 2: Polarimeter

Versuchsaufbau siehe Anleitung

Küvette A (Quarz):

Farbe	Nullstellung β_0	β (mit Küvette)
rot	$0,4^\circ$	$-28,3^\circ$ $-28,3^\circ$
grün	$0,4^\circ$	$-40,5^\circ$
blau	$0,4^\circ$	$-60,9^\circ$

Einstellfehler für β : $\pm 0,2^\circ$

$\Delta\beta_0 = \Delta\beta = \pm 0,1^\circ \rightarrow$ Ablesefehler

Küvette:
linksdrehend
 $d_A = 1,5\text{ mm}$

Küvette B (Quarz): rechtsdrehend, $d_B = 1,5\text{ mm}$

Farbe	β_0	β
rot	$0,4^\circ$	$29,4^\circ$
grün	$0,4^\circ$	$41,3^\circ$
blau	$0,4^\circ$	$62,5^\circ$

Einstellfehler für β : $\pm 0,2^\circ$

$\Delta\beta_0 = \Delta\beta = \pm 0,1^\circ$: Ablesefehler

Längeres Glasrohr (Zuckerlösung): $l = 190,09\text{ mm}$

Farbe	β_0	β
rot	$0,4^\circ$	$20,9^\circ$ $20,9^\circ$
grün	$0,4^\circ$	$29,3^\circ$
blau	$0,4^\circ$	$42,5^\circ$ $42,5^\circ$

Unsicherheiten: 11

Kürzeres Glasrohr (Zuckerlösung): $l = 94,7\text{ mm}$

Farbe	β_0	β
rot	$0,4^\circ$	$27,0^\circ$ $27,0^\circ$
grün	$0,4^\circ$	$38,5^\circ$
blau	$0,4^\circ$	$57,9^\circ$

