

Fortgeschrittenen-Praktikum
Technische Universität Darmstadt

Betreuer: Dr. Mathias Sinther
Durchführung: 06.07.2009
Abgabe: 28.07.2009



Versuch A 3.3

Polarisation und Doppelbrechung

Oliver Bitterling


Mathieu Omet
(mathieuomet@gmx.de)

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden die unterschiedlichen Polarisationsseigenschaften von Licht und seine Wechselwirkung mit anisotropen Kristallen untersucht.

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen	1
1.1	Polarisiertes Licht	1
1.2	Erzeugung von polarisiertem Licht	2
1.3	Optische Aktivität	3
2	Auswertung	4
2.1	Aufgabe 1	4
2.2	Aufgabe 2	5
2.3	Aufgabe 3	6
2.4	Aufgabe 4	10
2.5	Aufgabe 5	11
2.6	Fazit	12
	Abbildungsverzeichnis	13
	Literaturverzeichnis	14

Kapitel 1

Theoretische Grundlagen

1.1 Polarisiertes Licht

Licht ist eine elektromagnetische Welle, die aus der Schwingung eines elektrischen und eines magnetischen Feldes, die zueinander und zu der Ausbreitungsrichtung der Welle orthogonal sind, besteht. Ausschlaggebend für den Polarisationszustand ist die Ausrichtung des elektrischen Feldvektors. Natürliches Licht ist unpolarisiert, das heißt die Feldvektoren der einzelnen Wellenzüge sind statistisch ausgerichtet. Abgesehen davon gibt es drei verschiedene Polarisationszustände.

- Lineare Polarisation: Man bezeichnet Licht als linear polarisiert wenn alle Feldvektoren in eine Richtung schwingen.
- Zirkulare Polarisation: Zirkular polarisiertes Licht entsteht bei der Überlagerung zweier Wellenzüge, deren E-Vektoren orthogonal zueinander sind und ihre Schwingungen eine Phasenverschiebung von 90° zueinander haben. Dies ergibt einen E-Vektor, der in konstantem Abstand um den Nullpunkt rotiert. Die Drehrichtung wird durch das Vorzeichen der Phasendifferenz vorgegeben.
- Elliptische Polarisation: Elliptische Polarisation kann als Allgemeinfall der ersten beiden Fälle betrachtet werden. Sie tritt auf, wenn die Phasenverschiebung zwischen den orthogonalen E-Vektoren nicht 90° entspricht oder die Amplituden der Wellenzüge unterschiedlich sind. Als Ergebnis rotiert der effektive E-Vektor auf einer elliptischen Bahn.

1.2 Erzeugung von polarisiertem Licht

Da die meisten konventionellen Lichtquellen nur unpolarisiertes Licht produzieren, benötigt man für Experimente Methoden, um aus diesem polarisiertes Licht zu erzeugen. Gängige Methoden sind Reflexion, Doppelbrechung und Dichroismus.

- Reflexion: Bei der Interaktion von Licht mit einer Grenzfläche stellen Polarisation parallel und orthogonal zur Grenzfläche zwei ausgezeichnete Zustände dar, deren Reflexionseigenschaften unterschiedlich sind. Orthogonal zur Grenzfläche polarisiertes Licht wird generell schlechter reflektiert als parallel polarisiertes. Es existiert sogar der sogenannte Brewster-Winkel, bei dem das orthogonale Licht vollständig transmittiert wird. Man kann sich diesen Vorgang mit der Vorstellung von winzigen Dipolen, die von der Welle zu Schwingungen angeregt werden, erklären. Dipole können entlang ihres Schwingungsvektors keine Energie ausstrahlen. Folglich können Wellen, die orthogonal zur Grenzfläche polarisiert sind, nicht reflektiert werden. Sendet man unpolarisiertes Licht unter dem Brewster-Winkel auf ein Material, ist der reflektierte Anteil folglich linear polarisiert.
- Doppelbrechung: In anisotropen Kristallen ist die Dielektrizitätskonstante kein Skalar, sondern ein Tensor dritter Ordnung. Das führt dazu, dass Licht mit unterschiedlichen Polarisationsseigenschaften je nach Eintrittsrichtung unterschiedlich gebrochen wird. Unterschiedliche Schwingungsrichtungen unterliegen somit einem anderen Brechungsindex, was zu unterschiedlichen Brechungswinkeln und unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit führt. Ein anisotroper Kristall hat eine bis drei ausgezeichnete optische Achsen. Dringt ein Strahl nicht parallel zu einer optischen Achse in ein Material ein, so wird er in zwei Teilstrahlen aufgeteilt. Der Anteil der Wellen, die parallel zur Optischen Achse liegen, wird als ordentlicher Strahl bezeichnet, während der orthogonale Anteil als außerordentlicher Strahl bezeichnet wird. Durch ihre unterschiedlichen Brechungsindizes bewegen sich die Strahlen nicht gleichschnell durch die Materie und treten auch an unterschiedlichen Stellen aus. Dies kann verwendet werden, um die beiden Polarisationsrichtungen voneinander zu trennen und somit linear polarisiertes Licht zu erhalten. Weiterhin ist es möglich, durch genaue Abmessung des Kristalls durch die unterschiedliche Laufzeit der Strahlen eine Phasenverschiebung von 90 zu erzeugen und somit zirkular polarisiertes Licht zu erzeugen.
- Dichroismus: Dichroitische Farbstoffe haben die Eigenschaft den or-

dentlichen und den außerordentlichen Strahl unterschiedlich stark zu absorbieren. So hergestellte Polarisatoren sind sehr dünn aber weder die Absorption noch die Transmission nimmt optimale Werte an, so dass für genauere Messungen andere Methoden verwendet werden müssen.

- Drahtgitter Polarisatoren: Ebenfalls zur Polarisation von Licht kann man Plättchen mit eng beieinander liegenden parallelen Leitern in Form von Gitterstäben verwenden. Der Abstand der Leiter muss im Bereich der Wellenlänge der Strahlung, die polarisiert werden soll, liegen. Parallel zu den Gitterstäben polarisiertes Licht regt in ihnen einen Strom an, dessen Feld dem der Erzeugerwelle entgegengesetzt ist. Hinter dem Polarisator löschen sich die Wellen durch destruktive Interferenz gegenseitig aus, so dass die Ursprungswelle reflektiert wird. Orthogonal polarisiertes Licht hingegen kann das Gitter problemlos durchdringen. Dieser Aufbau kann auch, indem er drehbar aufgebaut wird, als Analysator verwendet werden.

1.3 Optische Aktivität

Als optisch aktiv wird ein Material bezeichnet, das in der Lage ist die Polarisationsrichtung eines linear polarisierten Strahls zu drehen. Anschaulich kann man es sich vorstellen, wenn man den Strahl in zwei gegeneinander zirkular polarisierte Strahlen zerlegt. In optisch aktiven Medien hat die eine Rotationsrichtung eine andere Phasengeschwindigkeit. Beim Durchqueren des Materials entsteht so eine Phasenverschiebung zwischen den beiden Wellen, die sich nach Verlassen des Mediums als eine Drehung der Polarisationsrichtung ausdrückt.

Kapitel 2

Auswertung

2.1 Aufgabe 1

Das Licht wird durch einen Polarisationsfilter polarisiert und danach durch einen zweiten Polarisationsfilter, der an dieser Stelle als Analysator dient, geschickt, bevor dessen Intensität gemessen wird. Dabei wird der Analysator in 10° -Schritten gedreht, bis er einen Vollkreis beschrieben hat. Bei jedem Schritt wird ein Messwert aufgenommen. Die Messwerte sind in Abbildung 2.1 dargestellt.

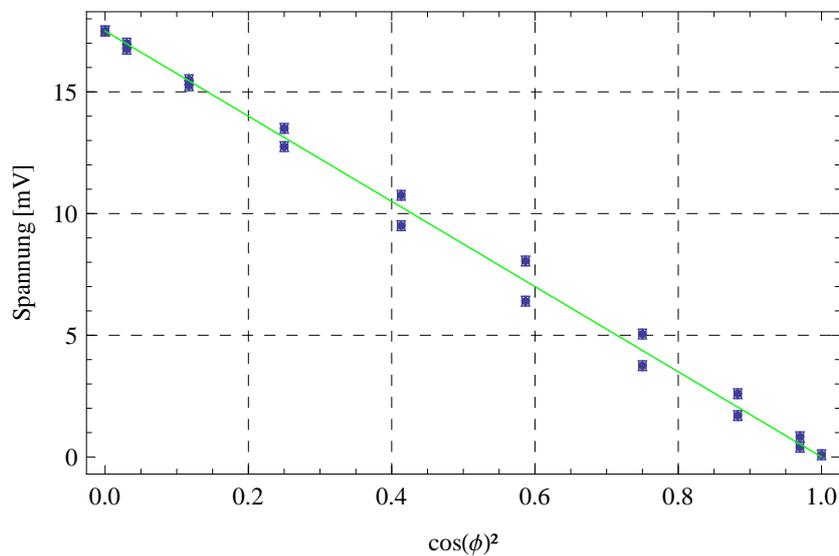


Abbildung 2.1: Intensität [mV] des Lichts in Abhängigkeit von $\cos(\Phi)^2$. In blau die gemessenen Werte mit Fehler, in grün der erwartete lineare Verlauf.

Wie schon oben angesprochen, misst der Detektor die Intensität des Lichtes und nicht dessen Amplitude. Daher ist eine Abhängigkeit der Form $I \propto \cos(\Phi)^2$ zu erwarten.

Auch wenn nicht alle Messwerte auf der erwarteten Gerade (in Abbildung 2.1 durch die grüne Linie dargestellt) verlaufen, lässt sich aber immerhin feststellen, dass sie von der Grundtendenz eindeutig den Erwartungen folgen.

2.2 Aufgabe 2

Nun soll die Rotationsdispersion untersucht werden. Dazu wurde der Drehwinkel der Polarisationssebene nach dem Durchgang durch ein Quarzplättchen, welches optisch aktiv ist, bei verschiedenen Wellenlängen vermessen. Die Messung wurde wie folgt durchgeführt.

Die unterschiedlichen Wellenlängen wurde durch unterschiedliche Filter erzeugt [1]. Bei jedem Filter wurde der Analysator so gedreht, dass man mit dem Auge ein Helligkeitsminimum des Lichtstrahls wahrnahm.

Die spezifische Drehung errechnet sie wie folgt.

$$\Phi_{sp} = \frac{\Phi}{d} \quad (2.1)$$

Wobei die Dicke des Quarzplättchens $d=4\text{mm}$ beträgt. Die daraus resultierenden Werte sind in Abbildung 2.2 dargestellt.

Die Messwerte und berechneten Werte sind in folgender Tabelle 2.1 nochmals dargestellt. Die Fehler ergaben sich durch eine Unsicherheit beim Ablezen des Winkels und wurden über Gauss'sche Fehlerfortpflanzung bestimmt.

λ [nm]	Φ [°]	Φ_{sp} [°/mm]
435	$112 \pm 3,5$	$28,0 \pm 0,8$
467	$135 \pm 3,5$	$33,8 \pm 0,8$
516	$154 \pm 3,5$	$38,5 \pm 0,8$
585	$177 \pm 3,5$	$44,3 \pm 0,8$
616	$185 \pm 3,5$	$46,2 \pm 0,8$
686	$192 \pm 3,5$	$48,0 \pm 0,8$

Tabelle 2.1: Messwerte und berechnete Werte mit Fehlern zur Messung der Rotationsdispersion des Quarzplättchens.

Des Weiteren wurde ein Fit an diese Daten durchgeführt. Als Funktion wurde Gleichung 2.2 verwendet.

$$\Phi_{sp} = a \cdot \lambda^b \quad (2.2)$$

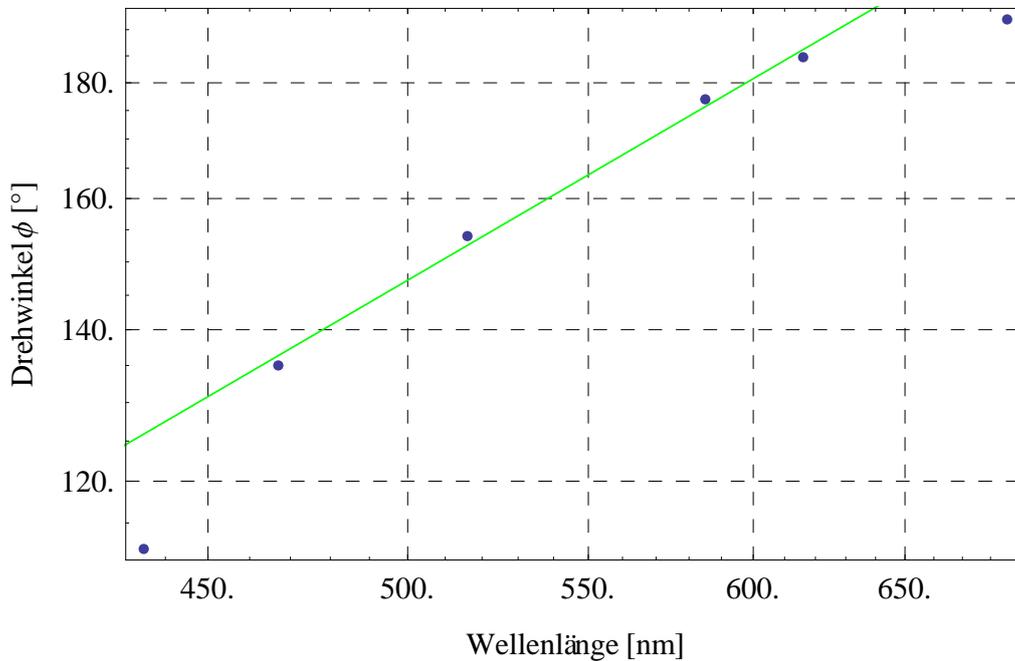


Abbildung 2.2: Rotationsdispersion des Quarzplättchens. Aufgetragen sind doppellogarithmisch der spezifische Winkel Φ_{sp} [°/mm] über der Wellenlänge λ [nm] in blau. Die zugehörige Fitfunktion in grün.

Dabei ist λ die Variable und a und b sind die Parameter. Es wurden $a \approx 0,034$ und $b \approx 1,12$ bestimmt.

Die sich daraus ergebene Funktion ist in grün in Abbildung 2.2 eingezeichnet. Da die Messungen nur von 0 - 180° vorgenommen wurden, wurden die restlichen Werte für den Bereich bis 360° punktgespiegelt.

2.3 Aufgabe 3

Im Folgenden sind die Messwerte zur Messung der Polarisation eines doppelbrechenden Glimmerplättchens in Abbildung 2.3 bis 2.8 dargestellt.

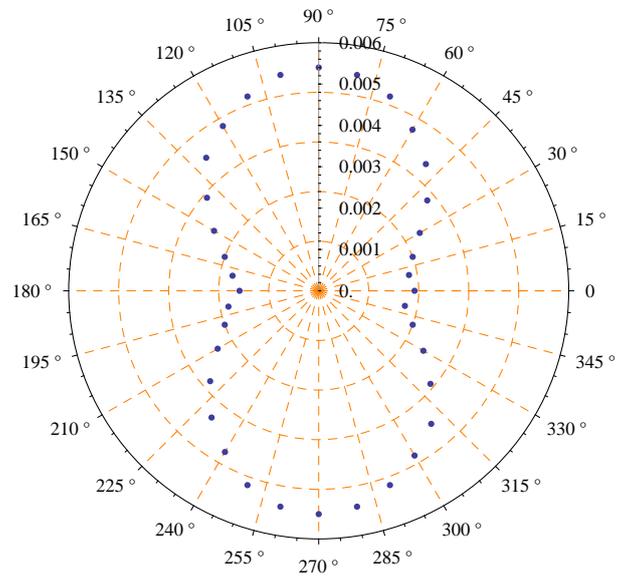


Abbildung 2.3: Polarplot der gemessenen Polarisation bei $\lambda = 435\text{nm}$

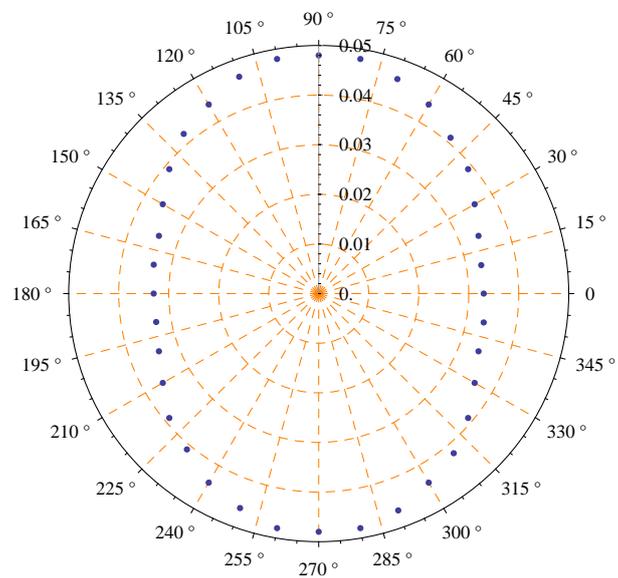


Abbildung 2.4: Polarplot der gemessenen Polarisation bei $\lambda = 467\text{nm}$

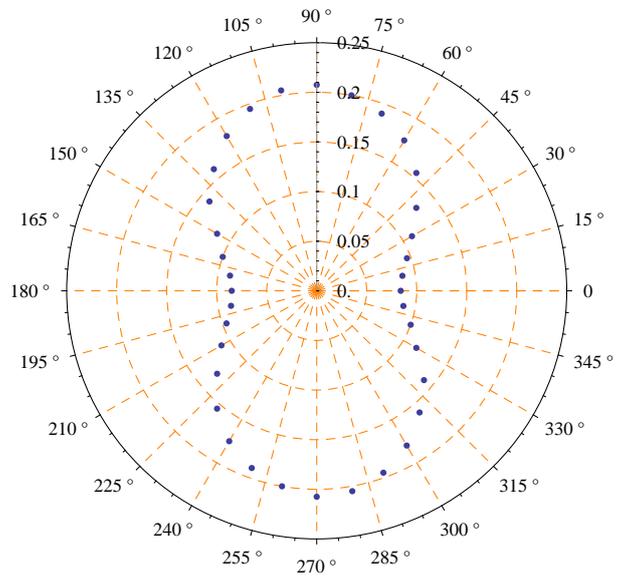


Abbildung 2.5: Polarplot der gemessenen Polarisation bei $\lambda = 516\text{nm}$

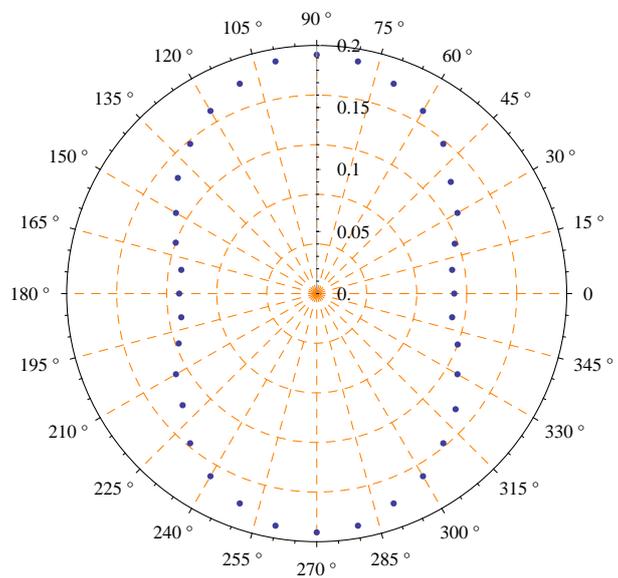


Abbildung 2.6: Polarplot der gemessenen Polarisation bei $\lambda = 585\text{nm}$

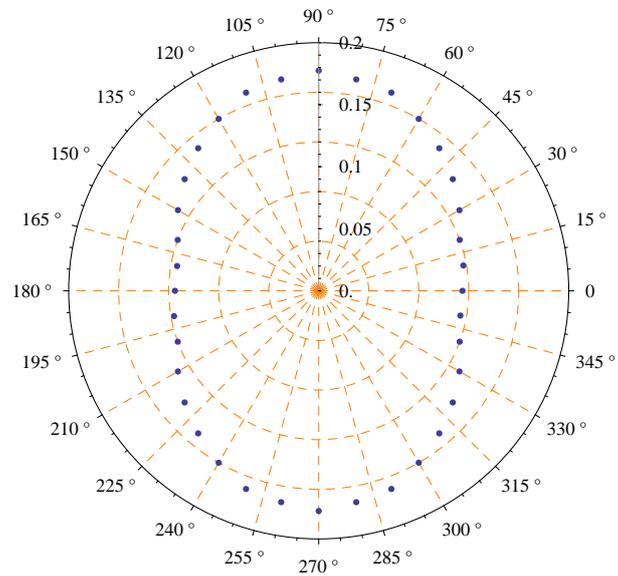


Abbildung 2.7: Polarplot der gemessenen Polarisation bei $\lambda = 616\text{nm}$

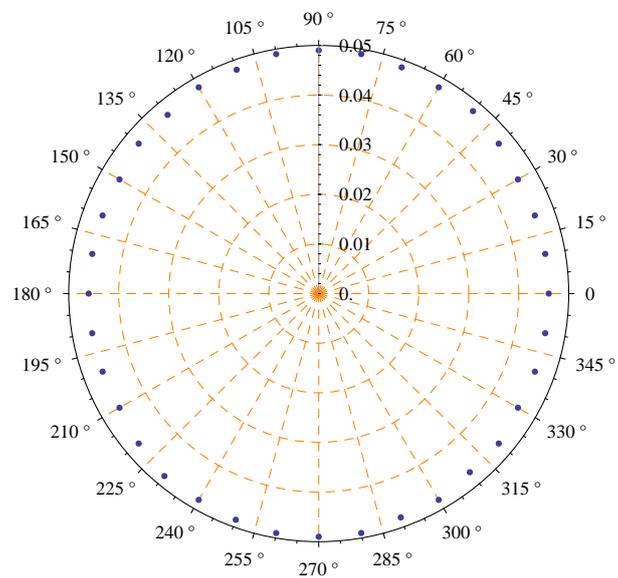


Abbildung 2.8: Polarplot der gemessenen Polarisation bei $\lambda = 686\text{nm}$

Zu erkennen ist, dass die Polarisierung mit zunehmender Wellenlänge stärker zirkular wird. Das bedeutet gleichzeitig, dass die Phasenverschiebung abnimmt.

Nach Gleichung 2.3

$$\tan\Phi_s = \frac{b}{a} \Rightarrow \Phi = 2\arctan\frac{b}{a} = 2\arctan\sqrt{\frac{U_b}{U_a}} \quad (2.3)$$

ergibt sich die Phasenverschiebung über das Verhältnis der beiden Hauptachsen. Zur Fehlerabschätzung erst der Fehler des Quotienten $\frac{U_b}{U_a}$ ermittelt. Danach wurde der Gesamtfehler nach Gleichung 2.4 bestimmt.

$$X := \frac{U_b}{U_a} \Rightarrow \Delta\Phi = \frac{\delta\Phi}{\delta X} \Delta X = \frac{1}{1+X} \frac{\Delta X}{\sqrt{X}} \quad (2.4)$$

Die daraus resultierenden Ergebnisse sind in Tabelle 2.2 dargestellt.

λ [nm]	U_a [V]	U_b [V]	Φ [°]
435	$0,0019 \pm 0,0002$	$0,0054 \pm 0,0002$	$141 \pm 3,1$
467	$0,033 \pm 0,005$	$0,048 \pm 0,002$	$111 \pm 0,9$
516	$0,084 \pm 0,002$	$0,2075 \pm 0,002$	$136 \pm 2,2$
585	$0,11 \pm 0,002$	$0,1925 \pm 0,002$	$121 \pm 1,5$
616	$0,115 \pm 0,002$	$0,1775 \pm 0,002$	$114 \pm 1,4$
686	$0,046 \pm 0,002$	$0,049 \pm 0,005$	$94 \pm 1,3$

Tabelle 2.2: Übersicht über Werte der kleinen und großen Halbachse, bzw. der errechneten Phasenverschiebung durch das Gitterplättchen

2.4 Aufgabe 4

Mit dem Soleil'schen Kompensator kann man zwei senkrecht zueinander polarisierten Teilwellen eine Phasenverschiebung hinzufügen. Diese ergibt sich aus

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} (d_1 - d_2) (n_o - n_e) \quad (2.5)$$

Dabei sind d_1 und d_2 die Dicken der beiden Plättchen. Aus Gleichung 2.5 ist sofort zu erkennen, dass die Wirkung des Kompensator abhängig von der Wellenlänge λ ist.

Zunächst werden Polarisator und Analysator senkrecht zueinander eingestellt. Im Falle, dass man weißes Licht durch den Aufbau strahlt, ist das die Einstellung für ein Minimum. Verwendet man nun Licht mit nur einer

Wellenlänge, kann man für eine Phasendifferenz von 2π weitere Minima finden. Dabei kann man die Winkel zwischen den Minima einzelner Ordnungen bestimmen.

Es ergibt sich in Gleichung 2.6 dargestellte Zusammenhang. Nimmt man einen Fehler von 0,05 Skalenteilen an, ergibt sich der relative Fehler von $\frac{\Delta\phi}{\phi}$.

$$\phi = \frac{360}{\text{Skalenteile}} \Rightarrow \frac{\Delta\phi}{\phi} \approx 0,01 \quad (2.6)$$

Die Werte für die Eichung sind in Tabelle 2.3 aufgelistet.

λ [nm]	-1	0	+1	ϕ [°]
435	30,8	40,92	51,06	$35,51 \pm 0,35$
467	60,05	71,91	4,73	$29,17 \pm 0,29$
516	73,72	5,88	18,145	$29,48 \pm 0,29$
585	60,85	74,81	9,33	$25,28 \pm 0,25$
616	49,05	63,69	78,36	$24,54 \pm 0,24$
686	60,61	76,31	-	$22,23 \pm 0,22$

Tabelle 2.3: Werte für die Eichung

2.5 Aufgabe 5

Zur Messung der Dispersion wurde die gleiche Messung, wie in Kapitel 2.4 beschrieben, durchgeführt. Allerdings mit Einsatz des Glimmerplättchens zwischen Polarisator und Analysator. Durch die vorangegangene Eichung lassen sich die Einstellungen an der Mikrometerschraube in Winkel umrechnen. Dieser wird über die Differenz der Skalenteile für die jeweilige Ordnung bestimmt, danach wird über alle drei Ordnungen gemittelt. Der Fehler hierbei, wo bei zu der Fehler bei der Eichung auch beachtet ist, beträgt etwa 5%. Die aufgenommenen Werte sind in Tabelle 2.4 dargestellt.

λ [nm]	-1	0	+1	ϕ [°]
435	43,87	54,92	65,93	$152,65 \pm 7,63$
467	65,61	76,67	7,58	$122,06 \pm 6,10$
516	65,75	78,90	10,11	$121,64 \pm 6,08$
585	64,93	79,95	12,68	$111,85 \pm 5,59$
616	49,01	64,815	79,165	$101,47 \pm 5,07$
686	62,86	78,93	15,50	$97,43 \pm 4,87$

Tabelle 2.4: Werte für die Dispersion

2.6 Fazit

Generell ist festzuhalten, dass die Messungen für Filter 2, der hauptsächlich Licht einer Wellenlänge von 467 nm durchlassen soll, unerwartet ausfallen. Der Filter scheint eher die Eigenschaften eines Filter zu besitzen, der längere Wellenlängen durchlässt. Dies mag eventuell damit zu begründen sein, dass bei vorangegangenen Versuchen dieser Filter Verschmutzungen oder Beschädigungen erlitten hat.

Bei der Auswertung der Daten in Aufgabe 2 wurde sich dafür entschieden, die Werte der Minimabestimmung mit dem Auge zu nehmen. Dies geschah aus dem Grund, dass das menschliche Auge einen Wellenlängenbereich des Lichtes von etwa 350 bis 800 nm abdeckt. In diesen Bereich fallen genau die verwendeten Lichtstrahlen. Der Detektor hat ein unbestimmtes Verhalten über der Wellenlänge. Daher ist es möglich, dass er bei gleichen Intensitäten bei verschiedenen Wellenlängen andere Messwerte liefert.

Im Vergleich der Werte aus Aufgabe 3 und 5 stimmt der Trend der Ergebnisse überein. Ein Grund dafür ist, dass die Messung bei Aufgabe 5 die Fehler größer sind, da die Genauigkeit, mit der die Skalenteile abgelesen werden können, recht groß ist.

Insgesamt ist es äußerst schwierig zu beurteilen, welcher Verlauf nun wirklich der Rotationsdispersion des Glimmerplättchens entspricht.

Abbildungsverzeichnis

2.1	<i>Intensität [mV] des Lichts in Abhängigkeit von $\cos(\Phi)^2$. In blau die gemessenen Werte mit Fehler, in grün der erwartete lineare Verlauf.</i>	4
2.2	<i>Rotationsdispersion des Quartzplättchens. Aufgetragen sind doppellogarithmisch der spezifische Winkel Φ_{sp} [°/mm] über der Wellenlänge λ [nm] in blau. Die zugehörige Fitfunktion in grün.</i>	6
2.3	<i>Polarplot der gemessenen Polarisation bei $\lambda = 435\text{nm}$</i>	7
2.4	<i>Polarplot der gemessenen Polarisation bei $\lambda = 467\text{nm}$</i>	7
2.5	<i>Polarplot der gemessenen Polarisation bei $\lambda = 516\text{nm}$</i>	8
2.6	<i>Polarplot der gemessenen Polarisation bei $\lambda = 585\text{nm}$</i>	8
2.7	<i>Polarplot der gemessenen Polarisation bei $\lambda = 616\text{nm}$</i>	9
2.8	<i>Polarplot der gemessenen Polarisation bei $\lambda = 686\text{nm}$</i>	9

Literaturverzeichnis

- [1] Versuchsanleitung *Physikalisches Praktikum für Fortgeschrittene* - Versuch 3.3.: *Polarisation und Doppelbrechung*, Darmstadt