

Versuch A3.3

Polarisation und Doppelbrechung

Aman Steinberg
Kirill Boguslavski
Betreuer: Dr. Mathias Sinther

25.10.2010

Contents

1	Einleitung	2
2	Ziel des Versuchs	2
3	Grundlagen	2
3.1	Polarisation	2
3.2	Doppelbrechung	3
3.3	Optische Aktivität	3
4	Durchführung	4
4.1	Versuchsaufbau	4
4.2	Gesetz von Malus	4
4.3	Rotationsdispersion von Quarz	4
4.4	Polarisation beim Glimmerplättchen	4
4.5	Polarisation beim Glimmerplättchen mit dem Soleil-Kompensator	5
5	Auswertung	5
5.1	Gesetz von Malus	5
5.2	Rotationsdispersion von Quarz	5
5.3	Doppelbrechende Eigenschaft von Quarz: Messung über Intensitätsverteilung	9
5.4	Doppelbrechende Eigenschaft von Quarz: Messung mit Kompensator	10
5.5	Interpretation und Bewertung der Messdaten und Verfahren	13
5.6	Nach dem Versuch	14

1 Einleitung

Eine elektromagnetische Welle wird nicht nur durch ihre Wellenlänge und ihre Richtung charakterisiert, sondern unter anderem durch ihre Polarisation, d. h. durch die Art der Oszillation ihres elektrischen Feldvektors. Da die Polarisationart ihre Eigenschaften beeinflusst (u. a. resultierende Intensitätsverteilungen, ihren Energiefluss oder ihre zeitliche Entwicklung), ist es von Belang, Informationen zu dieser Eigenschaft zu gewinnen.

2 Ziel des Versuchs

Der Versuch zielt darauf ab, ein grundlegendes Verständnis der Polarisation und Doppelbrechung zu erlangen, sowie Methoden kennen zu lernen, die Polarisation von Strahlung zu manipulieren und zu messen. Außerdem werden Eigenschaften von Festkörpern untersucht wie die Anisotropie oder die optische Aktivität, die die Polarisation der Welle beeinflussen.

3 Grundlagen

3.1 Polarisation

Sonnenlicht oder auch das Licht aus vielen künstlichen Lichtquellen (z.B. Glühbirnen) ist im Allgemeinen nicht polarisiert; die E-Feld-Vektoren liegen im Wellenzug in jeder Richtung vor. Man kann aber auch unpolarisiertes Licht derart manipulieren, dass man daraus polarisiertes Licht erhält, in dem alle E-Feld-Vektoren in dieselbe Richtung schwingen. Zur Erzeugung von polarisiertem Licht existieren mehrere Mechanismen:

1. Reflexion: vollständige Polarisation bei Reflexion unter dem Brewster-Winkel
Parallel zur Einfallsebene polarisierte Teilstrahlen treffen auf ein brechendes Material mit größerem Brechungsindex und regen dort Elektronen zu Dipolschwingungen an. Reflektierter und gebrochener Strahl stehen bei Einfall unter dem Brewster-Winkel orthogonal aufeinander. Die Elektronen können als Hertzsche Dipole nicht in Schwingungsrichtung abstrahlen, daher existiert im reflektierten Strahl kein parallel zur Einfallsebene polarisiertes Licht. Senkrecht zur Einfallsebene polarisierte Teilstrahlen regen die Elektronen zu Dipolschwingungen senkrecht zur Ein- bzw. Ausfallsebene an, die Abstrahlung ist maximal, der reflektierte Strahl ist vollständig polarisiert.
2. Streuung: schwache und nur teilweise Polarisation bei Rayleigh-Streuung
3. Doppelbrechung
4. Dichroismus, andere Mechanismen

Erzeugung und Nachweis

Linear polarisiertes Licht erzeugt man, indem man unpolarisiertes Licht auf einen Polarisator fallen lässt, der nur eine bestimmte Schwingungsrichtung der E-Feld-Vektoren hindurchlaufen lässt. Der Analysator dient zum Bestimmen der Polarisationsrichtung von polarisiert einfallendem Licht.

Polarisationstypen

- Linear polarisiertes Licht: Enthält ein Lichtstrahl nur in einer Ebene schwingende E-Feld-Vektoren, nennt man ihn linear polarisiert.
- Elliptisch polarisiertes Licht: Wenn sich die E-Feld-Vektoren bei der Ausbreitung im Raum mit der Zeit drehen, weil sie einen Phasenunterschied zueinander haben, nennt man das Licht allgemein elliptisch polarisiert.
- Zirkular polarisiertes Licht: Bei zirkular polarisiertem Licht handelt es sich um elliptisch polarisiertes mit einem Phasenunterschied von $\pi/2$ und immer gleichen Amplituden.

3.2 Doppelbrechung

Bei der Doppelbrechung macht man sich die Anisotropie gewisser Materialien, im Versuch eine Quarzplatte, zu Nutze. Bei anisotropen Materialien sind deren optische Eigenschaften nicht in alle Raumrichtungen gleich geartet, sondern richtungsabhängig. Es existiert in der Gitterstruktur eine vor anderen ausgezeichnete Richtung, die optische Achse. Die Strahlen linear polarisierten Lichts, das auf ein doppelbrechendes Medium fällt, werden in einen ordentlichen (o) und einen außerordentlichen (ao) Strahl aufgespalten. Die Schwingungsebene des o-Strahls ist senkrecht zur optischen Achse, die des ao-Strahls parallel dazu. Nun gilt, dass im doppelbrechenden Medium die Ausbreitungsgeschwindigkeit des ao-Strahles höher ist als die des o-Strahls und der ao-Strahl vom o-Strahl wegdreift, der o-Strahl läuft dem ao-Strahl hinterher. Treten beide Strahlen wieder aus, hat sich eine Phasendifferenz zwischen den Teilstrahlen eingestellt, aus linear polarisiertem Licht wird allgemein elliptisch polarisiertes. Bei einer Phasendifferenz von $\pi/2$, entsprechend $\lambda/4$, liegt sogar zirkular polarisiertes Licht vor (bei gleichen Amplituden der Teilstrahlen).

3.3 Optische Aktivität

Haben Stoffe die Eigenschaft, die Polarisationsrichtung von z. B. linear polarisiertem Licht zu drehen, nennt man sie optisch aktiv. Man nennt einen Stoff linksdrehend, wenn ein Analysator nach links gedreht werden muss, damit er parallel zur Polarisationsrichtung des Lichtes steht unter der Blickrichtung dem Lichtstrahl entgegen; man nennt ihn rechtsdrehend im entgegengesetzten Fall.

4 Durchführung

4.1 Versuchsaufbau

Als Lichtquelle dient eine Halogenlampe. Nachdem deren Licht durch eine Wasserküvette gelaufen ist, ist das infrarote Ende des Halogenspektrums herausgefiltert, das Filter BG 18 filtert das ultraviolette und infrarote Ende hinaus. Um einen geradlinigen Transit des Lichtes zu realisieren, werden alle benötigten Instrumente und Materialien auf einer optischen Bank aufgebaut.

4.2 Gesetz von Malus

Zunächst überprüfen wir in einem Aufbau aus Polarisator und Analysator die Gesetzmäßigkeit, dass die Intensität linear polarisierten Lichts nach Durchlaufen eines Analysators sich gemäß $\cos^2(\theta)$ gegenüber der Eingangsintensität I_0 verhält, das nennt man das Gesetz von Malus: $I(\theta) = I_0 \cos^2(\theta)$. Da Polarisator und Analysator nicht genau im Nulldurchgang aufeinanderstehen, müssen wir sie erst eichen: Polarisator und Analysator stehen parallel bei einem Winkelunterschied von 19° . Fehler: durch das Ablesen $\sim \Delta\varphi = 0,05^\circ$.

4.3 Rotationsdispersion von Quartz

Eine erneute Eichung liefert: Analysator 360° , Polarisator 20° . Ab jetzt messen wir weiterhin mit fester Polarisation.

Da das Strommessgerät, das die Intensität des einfallenden Lichtes gemessen hat, starke Fluktuationen aufweist und nur sehr schwer abzulesen ist, führen wir sowohl eine Strommessung durch als auch eine Datenerfassung mit bloßem Auge, letzteres geschieht bei hoher Dunkelheit, durch den Türspalt tritt noch Restlicht vom Flur ein. Wir suchen für 6 verschiedene Wellenlängen λ_i , $i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, die aus dem Halogenlampenlicht herausgefiltert werden, denjenigen Winkel, für den ein Minimum an Intensität durchgeht.

4.4 Polarisation beim Glimmerplättchen

Jetzt stellen wir den Analysator auf 90° und den Polarisator senkrecht dazu. Dann wird das Plättchen dazugeschaltet und das neue Minimum eingestellt. Von diesem wird noch 45° weiter gedreht (Glimmerplatte jetzt auf $74,5^\circ$). Wir konnten Störfaktoren wie Restbeleuchtung ausschließen, indem wir ein großes, lichtundurchlässiges schwarzes Tuch über den Strahlengang gelegt haben, um eine gute Abschirmung, nach außen wie nach innen, zu erzielen. Dadurch wurden die Fluktuationen des Messgeräts einigermaßen verringert. Wir haben für alle 6 Farbfilter die Intensitätsverteilung über den Winkel ausgemessen.

4.5 Polarisation beim Glimmerplättchen mit dem Soleil-Kompensator

Zunächst wird für jeden Farbfilter λ_i der Nulldurchgang geeicht. Danach werden der Soleil-Kompensator dazugeschaltet und durch Gegeneinanderverschieben der beiden Keile die Nebenminima bestimmt. Dieselbe Messung geschieht auch nochmal mit Glimmerplättchen.

5 Auswertung

5.1 Gesetz von Malus

Wir sollten die gemessene Intensität über $\cos^2(\varphi)$ auftragen (vgl. Figure 1 auf Seite 6), wobei wir die Messwerte zu Winkeleinstellungen in 10° -Abständen gemessen haben. Da diese Winkeleinstellungen sehr genau waren ($\Delta\varphi \approx 0.05^\circ$), wurden die horizontalen Fehlerbalken weggelassen. Die Spannungswerte (proportional zur Intensität) wurden mit einem allgemeinen Fehler von 0,01mV bewertet und dementsprechende Fehlerbalken eingetragen. Insgesamt gibt es vier Punkte pro $\cos^2(\varphi)$ -Wert, da in allen Einstellungen von 0° bis 360° gemessen wurde. Zuletzt wurden die Datenpunkte an eine Gerade ($f(x) = ax + b$) angepasst und die Parameter ergaben $a = -0.572453 \pm 0.00552$ ($\approx 0.942\%$) und $b = 0.643532 \pm 0.003455$ ($\approx 0.5369\%$). Der gefittete Funktion stimmt also sehr gut mit unseren Messpunkten überein und bestätigt das Gesetz von Malus $I = I_0 \cos^2(\varphi)$. In unserem Fall ist das φ um $\frac{\pi}{2}$ verschoben, weil wir bei der Messung bei dem Analysator 0° abgelesen haben, obwohl er auf 90° (also bei einem Intensitätsminimum) eingestellt war.

5.2 Rotationsdispersion von Quarz

Nun soll die Rotationsdispersion des Quarzplättchens untersucht werden. Dazu wurden die Messdaten mit $h(\lambda) = b\lambda^a$ gefittet, wobei uns ausschließlich der Parameter a interessiert. Die folgende Tabelle gibt Aufschluss über unsere Messungen:

λ/nm	$\Phi_1/^\circ$	$\Phi_2/^\circ$	$\Delta\Phi/^\circ$	$\Phi_{Gerät}/^\circ$
435	65	244	5	-
467	47	220	5	-
516	23	-	8	20 ± 15
585	173	340	10	-
616	166	356	10	-
686	138	220	15	-

Dabei sind Φ_1 und Φ_2 zwei Messwerte zu einer Wellenlänge mithilfe einer Dunkelstrommessung. $\Phi_{Gerät}$ ist der gemessene Winkel mittels des Messgerätes.

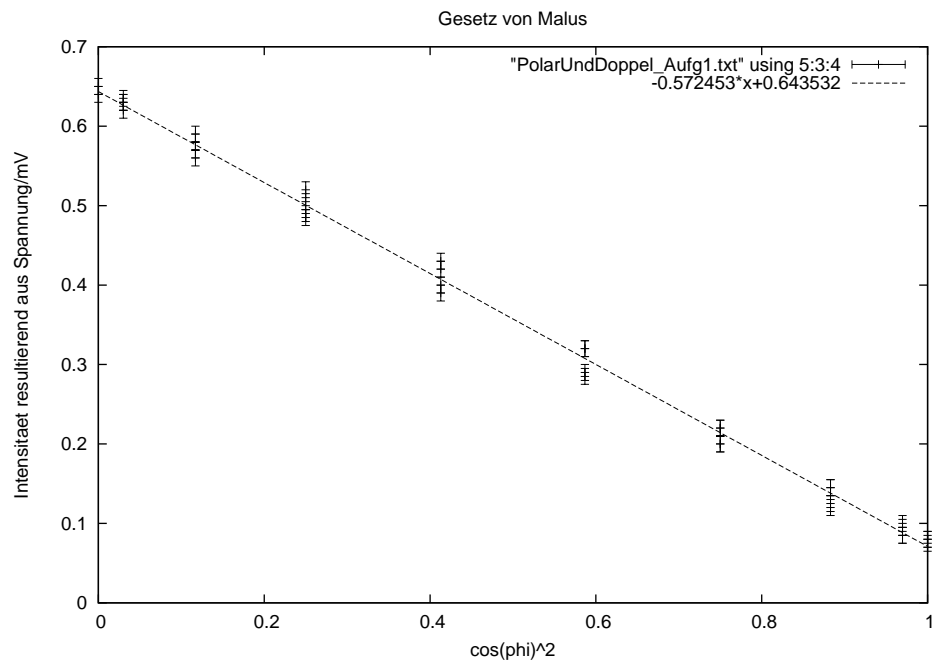


Figure 1: Überprüfung des Gesetzes von Malus Aufgabe 1

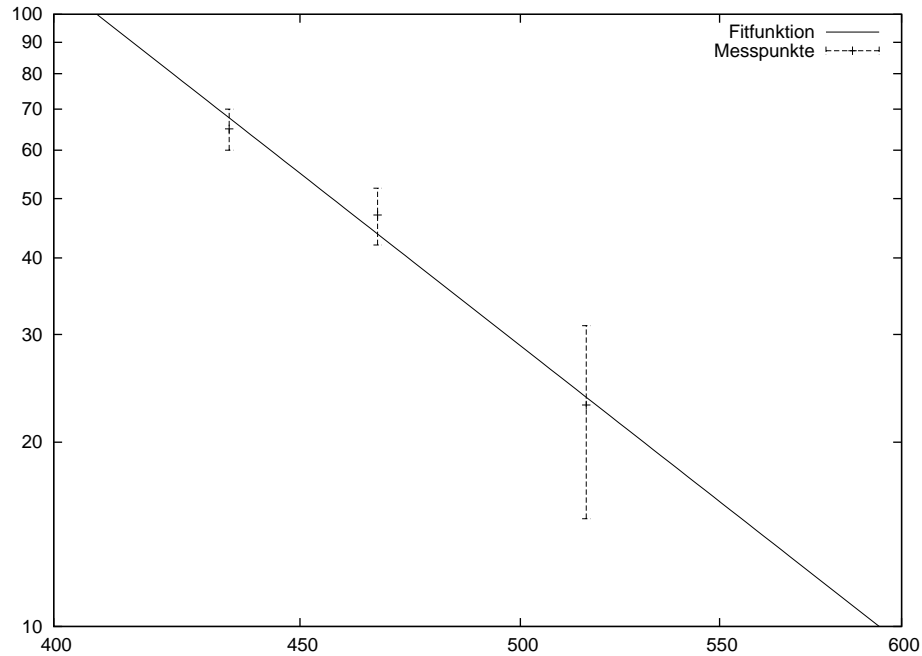


Figure 2: Die ersten drei Punkte der Messung für Abschnitt 5.2

In dieser Spalte steht nur ein Wert, da wir alle übrigen wegen der starken Oszillation des Zeigers nicht messen konnten. Die letzten Zeilen kann man wegen der krassen Sprünge als negative Winkel ansehen, was unserer Theorie vollständig widerspricht. Aus diesem Grund wurden nur die ersten drei Zeilen genommen, und auch dort nur der jeweils erste Wert. (s. S. 7)

Um eine gut approximierende Funktion zu erhalten, wurde eine Gerade $f(x) = a \ln x + t$ angesetzt und die Parameter wurden über logarithmisierte Werte approximiert. Dies ergab die Werte $a = -6.154 \pm 0.721$ und $t = 41.60 \pm 4.44$, also mit einem knapp 10-prozentigen Fehler. Um auf die gewünschte Form zu gelangen, muss $b = \exp t$ gerechnet werden. Letztlich bleibt die Beziehung $\Phi \sim \lambda^a$ mit $a \approx -6$. Dies weicht deutlich ab vom theoretischen Wert $a = -2$, dieser liegt nicht einmal in den Fehlergrenzen.

Dann haben wir eine andere Interpretation des Fehlers angenommen und betrachteten die ersten beiden Werte aus der zweiten und die letzten drei aus der ersten Φ -Spalte. Das Ergebnis ist auf Seite 8 zu sehen. Hier wurde auf die gleiche Weise die Fitfunktion bestimmt, allerdings ergaben hier die Werte $a = -1.185 \pm 0.068$ und $t = 12.69 \pm 0.43$. Hier ergaben die Fehler also deutlich kleinere Abweichungen von 5.7% und 3.3%. Der Wert für a ist zwar immer noch um einiges geringer als der literarische (Unterschied von ca. 40%), jedoch liegt dies an den zahlreichen systematischen Fehlern (vgl. die Diskussion im Abschnitt 5.5 auf Seite 13).

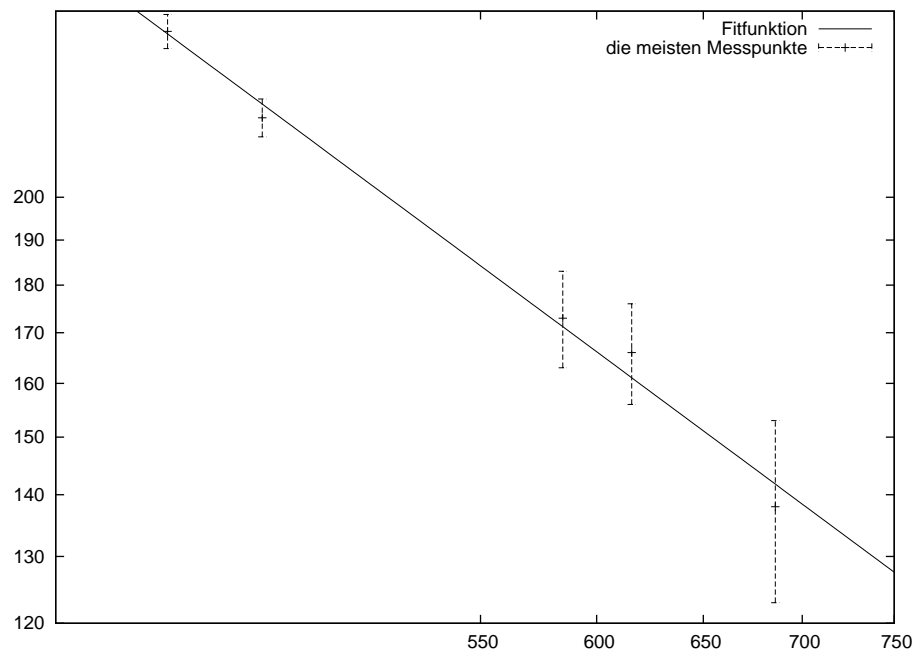


Figure 3: Punkte 1, 2, 4, 5 und 6 für Abschnitt 5.2

5.3 Doppelbrechende Eigenschaft von Quarz: Messung über Intensitätsverteilung

Wellenlängenabhängig soll die durch Doppelbrechung im Glimmerplättchen entstandene Phasendifferenz berechnet werden. Dabei wissen wir, dass die beiden gleich großen und in Phase schwingenden orthogonalen Anteile der am Polarisator entstandenen linear polarisierten Welle nach dem Durchgang durch das Plättchen um die Phasendifferenz Φ gegeneinander verschoben sind. Wenn a die Intensitätsamplitude der einen Hauptachse (der resultierenden Ellipse) und b die der anderen Hauptachse sind, so lässt sich die Intensitätsverteilung über dem Winkel φ mit $f(x) = a \cos^2(\varphi) + b \sin^2(\varphi)$ fiten.¹ Dies liegt daran, dass das elektrische Feld mit $\vec{E} = (\sqrt{a} \cos(\varphi), \sqrt{b} \sin(\varphi))$ gegeben ist und sich daraus die Intensität $I = \sqrt{\langle \vec{E}, \vec{E} \rangle}$ ergibt.

Aus den so ermittelten Intensitätsamplituden mit ihren jeweiligen Fehlern lässt sich die Phasendifferenz wie auf dem Aufgabenblatt ausgeführt berechnen:

$$\Phi = 2 \arctan\left(\frac{b}{a}\right)$$

mit dem Fehler durch die Gaußsche Fehlerfortpflanzung

$$\Delta\Phi = \frac{2}{a^2 + b^2} \sqrt{b^2(\Delta a)^2 + a^2(\Delta b)^2}$$

Damit ergibt sich folgende Tabelle:

λ/nm	$a/\mu V$	$\Delta a/\mu V$	$b/\mu V$	$\Delta b/\mu V$	$\Phi/^\circ$	$\Delta\Phi/^\circ$
435	-	-	-	-	-	-
467	-	-	-	-	-	-
516	8.680	0.113	1.500	0.113	19.61	1.47
585	9.103	0.016	4.236	0.016	49.91	0.18
616	11.216	0.060	3.034	0.060	30.27	0.59
686	1.3303	0.0216	0.8134	0.0224	62.89	1.63

Die Fehler dazu sind Ablesefehler der Spannung am Messgerät. Sie sind in der nachfolgenden Tabelle aufgetragen, in den Plots wurden aber keine Fehlerbalken hinzugefügt, weil die Fehler zu klein sind, dass sie visuell ins Gewicht fallen würden. Systematische Fehler sind hierin nicht inbegriffen, diese werden in Abschnitt 5.5 diskutiert.

¹Dabei sind statt der Intensitäten die angezeigten Spannungen am Messgerät in μV aufgeschrieben und für die Auswertung genommen worden. Deswegen sind in allen Plots und in der Tabelle Spannungen eingetragen; diese sind aber proportional zur gemessenen Intensität und somit wird überwiegend von Intensitäten gesprochen, obwohl die Einheiten streng genommen davon abweichen.

λ/nm	435	467	516	585	616	686
$\Delta U/\mu V$	0.05	0.05	0.1	0.1	0.3	0.03

Die Intensitätsverteilungen sind auf den Seiten 11 und 12 dargestellt. Die Plots erscheinen alle in Polarkoordinaten mit den gefitteten Funktionen.

Zur Analyse der Messreihen lässt sich hinzufügen, dass die gemessene Spannung (die äquivalent zur Intensität ist) teilweise negative Werte aufzeigt. Dies liegt vermutlich an einer falschen Justierung des Messgerätes, sodass der Nulldurchgang des Gerätes offenbar nicht dem realen Nulldurchgang entsprach. Als weitere mögliche Fehlerquelle käme in Frage, dass störende elektromagnetische Untergrundfelder (z.B. von den bei der Messung benutzten Geräten) oder ähnliche Störmechanismen das Messgerät selbst beeinflussten. Die Messung fand nämlich im sensibelsten Messbereich des Detektors statt, sodass von Null wenig verschiedene Intensitäten auf dem Messgerät durch obige Störfaktoren negativ erscheinen könnten. Dass wir so sensitiv messen mussten, liegt an der überaus geringen Intensität einiger Wellen, was bei den Wellen mit den Wellenlängen 435 nm und 467 nm durch ihre negativen Werte in der jeweiligen Messreihe besonders stark zum Ausdruck kommt. Da negative Intensitäten unphysikalisch sind und das Addieren einer konstanten Intensität zu den gemessenen Intensitäten die Messwerte völlig zerstört, wurden diese beiden Messreihen nicht in der obigen Tabelle ausgewertet und auch nicht geplottet. Im übrigen enthält die Messreihe bei 435 nm durchweg negative Werte (im Bereich $-0.4\mu V$ bis $-0.2\mu V$), die sich kaum voneinander unterscheiden. Auch dies ist ein Indiz dafür, dass bei dieser Messung vor allem eine Untergrundstrahlung (o. ä., siehe oben) gemessen wurde.

Außerdem sind unsere Messreihe gedreht, das heißt, sie fangen bei 0° nicht mit der kleinsten bzw. größten Intensität an, obwohl wir dachten, den Polarisator, den Analysator und das Plättchen richtig (wie in der Anleitung beschrieben) justiert zu haben, sodass Analysator und Polarisator senkrecht aufeinander stehen und das Plättchen um 45° zu ihnen gedreht ist. Um einen angemessenen Plot zu erreichen, drehten wir bei der Auftragung unsere Messwerte so, dass sich die jeweiligen Minima auf der y-Achse (und die Maxima auf der x-Achse) befinden.

Zur weiteren Interpretation und Fehlerdiskussion siehe Abschnitt 5.5.

5.4 Doppelbrechende Eigenschaft von Quarz: Messung mit Kompensator

Eine direktere Methode, die Rotationsdispersion zu messen, ist die Messung über einen Kompensator. Da sich die Abstände vom 0. Minimum durch das Glimmerplättchen ändern, lässt sich die Drehung mittels eines einfachen Quotienten berechnen. In der unten stehenden Tabelle zu jeder Wellenlänge (erste Spalte) zuerst ohne das Plättchen der mittlere Abstand vom 1. und -1. Minimum zum 0. Minimum mit dem jeweiligen Fehler und dann der mittlere Abstand mit dem Fehler mit Plättchen eingetragen. In den letzten beiden Spalten

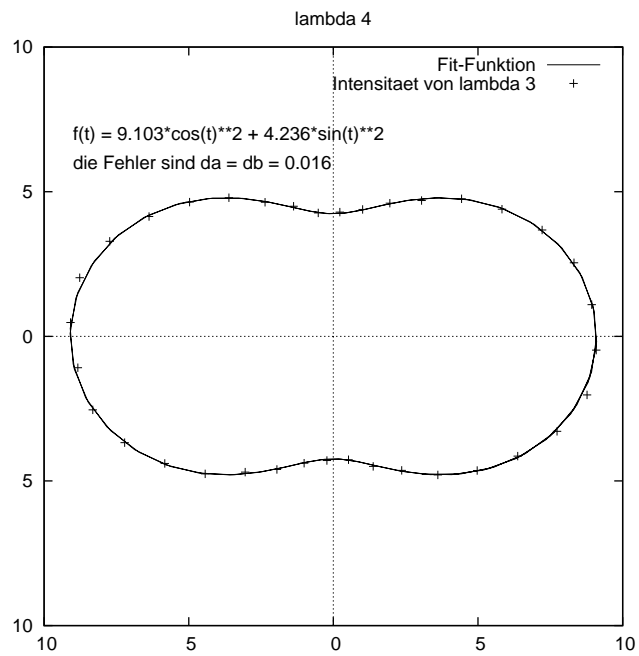
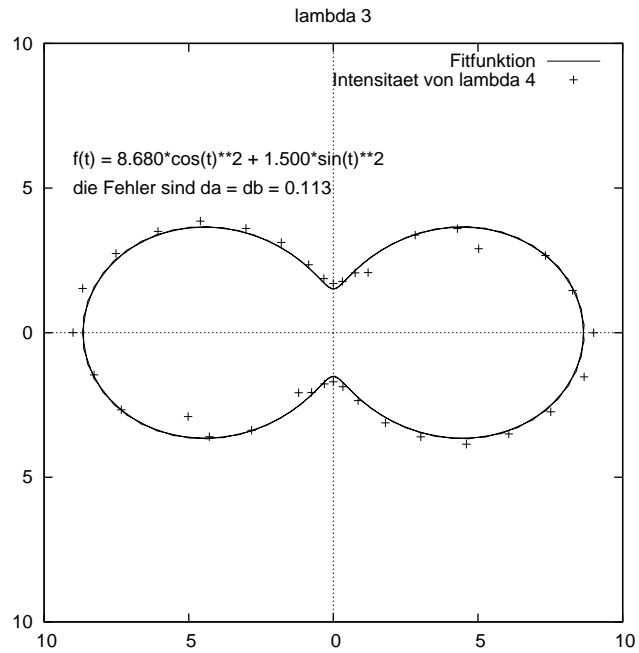


Figure 4: Plots zu Aufgabe 3

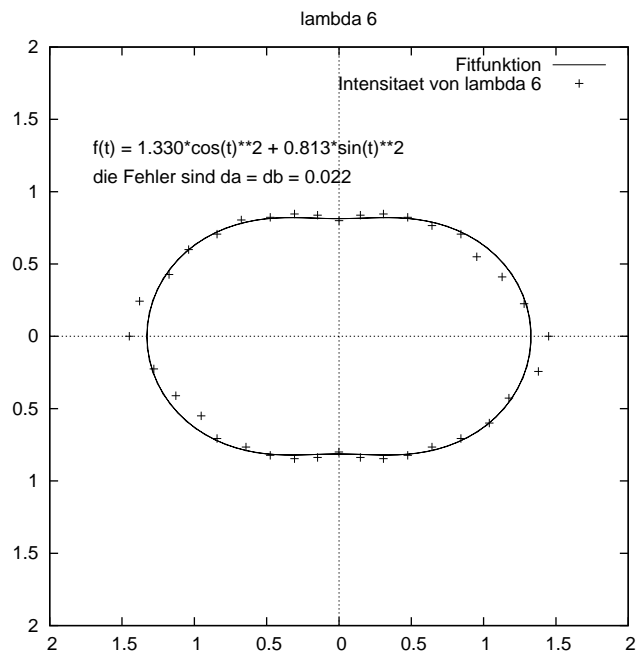
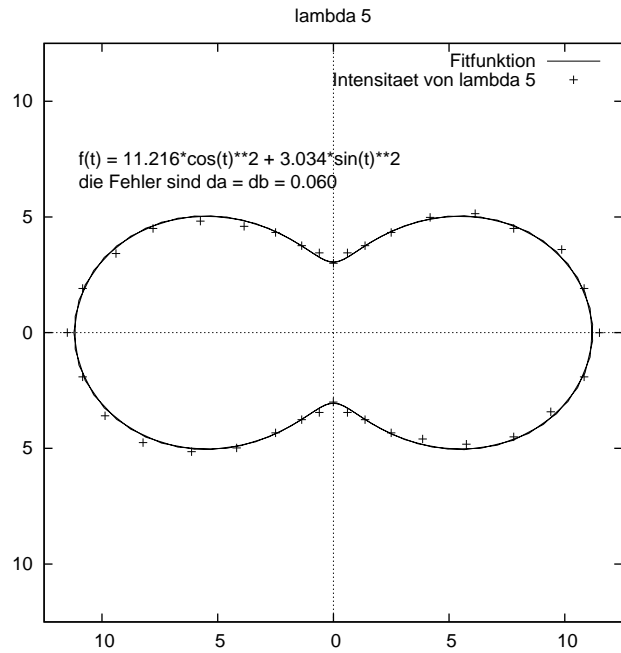


Figure 5: Weitere Plots zu Aufgabe 3

befinden sich der Winkel und sein Fehler. Die Abstände stehen in Skaleneinheiten, die Winkel in Grad.

Φ berechnet sich zu

$$\Phi = \frac{|\overline{O} - \overline{M}|}{\overline{O}} = \left| 1 - \frac{\overline{M}}{\overline{O}} \right|$$

und der Fehler zu

$$\Delta\Phi = \sqrt{\left(\frac{\Delta M}{\overline{O}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta OM}{\overline{O}^2}\right)^2}$$

λ/nm	\overline{O}/SE	$\overline{\Delta O}/SE$	\overline{M}/SE	$\overline{\Delta M}/SE$	$\Phi/^\circ$	$\Delta\Phi/^\circ$
435	9.405	3.910	12.295	0.955	17.606	31.680
467	13.825	0.148	14.015	0.403	0.787	1.783
516	14.755	0.021	14.565	0.078	0.738	0.313
585	10.52	0.764	11.665	0.672	6.236	5.887
616	16.97	1.032	16.645	0.898	1.097	4.570
686	9.21	1.358	10.915	0.375	10.607	10.277

5.5 Interpretation und Bewertung der Messdaten und Verfahren

Zum einen gibt es gravierende systematische Fehler, die mit den negativen Messwerten in Abschnitt 5.3 in Verbindung stehen müssen. Diese Fehler könnten mit umgebenden elektromagnetischen Feldern, mit einer falschen internen Justierung des Gerätes sowie an der geringen Intensität der zumessenden Wellen zusammenhängen (vgl. dortige Diskussion zu Fehlerquellen).

In Abschnitt 5.2 sind ebenfalls gravierende Unterschiede zur Theorie festgestellt worden. Unsere Messdaten machen es aber unmöglich, eine verlässliche Antwort auf die Qualität der theoretischen Überlegungen zu geben - diesmal liegt das Problem allerdings nicht am Messgerät, sondern an anderer Stelle. Obwohl wir uns sicher sind, den Versuchsaufbau mitsamt Justierung und Eichung vorschriftsgemäß durchgeführt zu haben, könnte es gerade in diesem Bereich zu weiteren systematischen Fehlern gekommen sein. Wegen der äußerst geringen Intensität der Strahlung könnten wir evtl. die Minima an falscher Stelle gesehen haben. Allerdings wäre der Fehler lange nicht so groß wie er durch die Messwerte dargestellt wird. Denn auch hier treten negative Winkel (vgl. Abschn. 5.3, wo negative Intensitäten auftreten), was hieße, dass Quarz plötzlich rechtsdrehend wird. Da unsere Fehlergrößen nicht so groß sind, dass die theoretischen Werte in den Fehlerschranken liegen würden, müssen, wie gesagt, systematische Fehler aufgetreten sein. Somit ist diese Messung nicht sehr ernst zu nehmen.

In Abschnitt 5.4 werden die Ergebnisse fast schon absurd, besonders in Anbetracht des Messfehlers, der bis zu 400% des berechneten Wertes beträgt. Natürlich ist dieser Messung absolut nicht zu trauen. Deswegen tendieren wir auf

jeden Fall zur (ziemlich genauen) Messmethode in Abschnitt 5.3, deren Messfehler nur wenige Prozent der berechneten Phasendifferenz betragen. Obwohl diese Messmethode länger dauert, würden wir auf jeden Fall diese empfehlen.

5.6 Nach dem Versuch

Nach dem Versuch hat der Betreuer bemerkt, dass der Polarisator bei ca. 220° statt bei 20° eingestellt war. Unklar ist, wie viele Messungen mit dieser Einstellung vorgenommen worden sind. Zumindest lassen sich die schlechten Ergebnisse von Abschnitt 5.4 auf diesen Umstand zurückbringen - auch dies nur vermutlich; bei den anderen Messreihen ist es weniger klar, da wir vor jeder Messung die Einstellungen kontrolliert haben und die anderen Ergebnisse um einiges besser sind (vgl. die Abschnitte 1 und 5.3). Die negativen Intensitäten sind mit diesem Umstand jedoch nicht erklärt.

References

- [1] Literaturnmappe zu diesem Versuch