Versuchsausarbeitung

Versuch 3.3 Polarisation und Doppelbrechung

Bastian Löher und Antje Weber

Mai 2008

Betreuer: Dr. Joachim Holzfuss

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung					
	1.1	Erzeugung und Nachweis von polarisiertem Licht	3			
	1.2	optische Aktivität	4			
	1.3	Dispersion	4			
2	Durchführung und Auswertung					
	2.1	Versuchsaufbau	4			
	2.2	Polarisation ohne Filter	5			
	2.3	Rotationsdispersion	5			
	2.4 Schwingungsellipsen in Abhängigkeit der Wellenlänge					
	2.5	Eichung des Kompensators	8			
	2.6	Bestimmung der Dispersion der Doppelbrechung	9			

1 Einführung

1.1 Erzeugung und Nachweis von polarisiertem Licht

Licht kann auch drei verschiedene Arten polarisiert sein:

- elliptisch
- zirkular
- linear

Polarisiertes Licht allgemein bedeutet, dass der E-Feldvektor in einer ganz bestimmten Weise schwingt. Ein allgemeiner E-Feldvektor \vec{E} kann aufgespalten werden in zwei orthogonale Anteile $E_{0x}\vec{e_x}$ und $E_{0y}\vec{e_y}$. Es gilt

$$\vec{E} = \vec{E_x} + \vec{E_y} = E_{0x} \cdot \cos(\omega t - kz) + E_{0y} \cdot \cos(\omega t - kz)$$
(1)

für linear polarisiertes Licht. Das bedeutet, dass beide Anteile in Phase schwingen und der Feldvektor seinen Betrag periodisch ändert. Bei einer Phasenverschiebung von $\Delta \phi = \frac{\pi}{2}$ ergibt sich zirkular polarisiertes Licht:

$$\vec{E} = E_{0x} \cdot \cos(\omega t - kz) + E_{0y} \cdot \cos(\omega t - kz - \frac{\pi}{2}) =$$
⁽²⁾

$$E_{0x} \cdot \cos(\omega t - kz) + E_{0y} \cdot \sin(\omega t - kz) \tag{3}$$

Der Feldvektor dreht sich also um die Achse der Ausbreitungsrichgung und ändert seinen Betrag dabei nicht. Linear und zirkular polarisiertes Licht sind Grenzfälle der elliptischen Polarisation. Es existiert also eine Phasenverschiebung $\Delta \phi \neq \{0, m \cdot \frac{\pi}{2}\}$. Das bedeutet, der E-Feldvektor rotiert um die z-Achse und ändert dabei periodisch seinen Betrag.

Um polarisiertes Licht zu erzeugen gibt es verschiedene Möglichkeiten:

• Reflexion (Brewsterwinkel):

Wird ein Lichtstrahl unter dem Brewsterwinkel an einem Medium reflektiert, so ist der reflektierte Strahl senkrecht zum gebrochenen Strahl polarisiert, da beide Strahlen einen Winkel von $\phi = \frac{\pi}{2}$ zueinander aufweisen.

• Doppelbrechung:

Doppelbrechende Materialien besitzen die Eigenschaft einen einfallenden Lichtstrahl in einen außerordentlichen und einen ordentlichen Strahl aufzuteilen. Dies geschieht aufgrund unterschiedlicher Brechungsindizes in verschiedenen Raumrichtungen. Das bedeutet, fällt ein unpolarisierter Strahl in einem bestimmten Winkel zur optischen Achse ein, so erfahren die beiden orthogonalen Komponenten des E-Feldes unterschiedliche Brechungsindizes, was eine unterschiedliche Brechung zur Folge hat. So folgt der ordentliche Strahl dem Gesetz von Snellius, wobei der außerordentliche Strahl selbst bei einem Einfallswinkel von $\phi = 0$ eine Brechung erfährt. Beide Strahlen sind senkrecht zueinander polarisiert. • Polarisatoren:

Die meisten Polarisatoren bestehen aus lang gestreckten Molekülen, die eine Art Streifengitter bilden. Trifft nun unpolarisiertes Licht auf dieses Gitter, so wird nur Licht einer bestimmten Schwingungsrichtung (senkrecht zum Gitter) durchgelassen, da der Brechungsindex waagrecht zum Gitter so groß ist, dass in dieser Ebene schwingende Feldkomponenten von den Molekülen absorbiert werden. Dies Art von Polarisatorfiltern sind also nur in der Lage linear polarisiertes Licht zu erzeugen.

• $\frac{\lambda}{4}$ -Plättchen:

Um auch zirkular polarisiertes Licht herstellen zu können, werden so genannte $\frac{\lambda}{4}$ -Plättchen eingesetzt. Sie bestehen aus doppelbrechenden Materialien, deren Dicke so gewählt wird, dass zwischen den orthogonalen E-Feldkomponenten ein Gangunterschied von $\frac{\lambda}{4}$ entsteht. Treten die beiden Strahlen aus dem Material wieder aus, addieren sich die beiden Komponenten zu einer zirkular polarisierten Welle. Ausgangspunkt für zirkulare Polarisation ist linear polarisiertes Licht. Umgekehrt kann auch linear polarisiertes Licht aus zirkular polarisiertem Licht hergestellt werden, da der Strahlengang umkehrbar ist.

1.2 optische Aktivität

Wird die Schwingungsebende von Licht beim Durchlaufen eines Mediums gedreht, so heißt das Medium *optisch aktiv*. Ob das Medium rechts oder linksdrehend ist, d.h. ob die Schwingungsebende nach links oder nach rechts gedreht wird, lässt sich allerdings nur experimentell ermitteln. Diese Eigenschaft ist auf die molekulare Struktur des optisch aktiven Materials zurück zu führen.

1.3 Dispersion

Allgemein bedeutet Dispersion in der Optik die Abhängigkeit des Brechungsindex von der Wellenlänge. Deutlich zu sehen ist Dispersion beim Durchlaufen von weißem Licht durch ein Prisma. Das weiße Licht wird in seine verschiedenen Frequenzen zerlegt und sichtbar wird ein Spektrum, das von rot bis blau reicht. Formal betrachtet bedeutet Dispersion, dass die Phasengeschwindigkeit $c_{Ph} = \frac{\omega}{k}$ von der Frequenz der Welle abhängt. Sichtbar wird diese Abhängigkeit der Frequenz bzw. der Wellenzahl k, durch eine zeitliche Änderung der einhüllenden Welle, da bei Dispersion Phasen- und Gruppengeschwindigkeit nicht identisch sind $(c_{Gr} = \frac{d\omega}{dk})$.

2 Durchführung und Auswertung

2.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abb. 1 dargestellt. Als Lichtquelle wurde eine Halogenlampe verwendet, deren Licht durch eine Linse kollimiert wird. Der darauf folgende Wasserbehälter dient als Infrarotfilter. Die Interferenzfilter wurden je nach Aufgabenstellung ersetzt bzw. aus dem Aufbau herausgenommen. Der Polarisator filtert aus dem einfallenden unpolarisierten Licht linear polarisiertes Licht einer Schwingungsebene heraus. In welcher Ebene das polarisierte Licht schwingen soll, kann an einer Grad-Skala eingestellt werden. Der Analysator stellt das Gegenstück zum Polarisator da. Mit ihm kann bestimmt werden, welche Art der Polarisation am Ende vorliegt. Das Glimmerplättchen und der Kompensator können passend zur Aufgabenstellung herausgenommen oder einzeln eingesetzt werden.



Abbildung 1 – Grundlegender Aufbau des Versuchs (schematisch). Für die einzelnen Teilaufgaben wurden nur Teile des Aufbaus verwendet.

2.2 Polarisation ohne Filter

Zuerst untersuchen wir die Intensität des Lichtstrahls nach dem Durchgang zwischen zwei Polarisatoren ohne jeden Filter dazwischen. In Abhängigkeit des relativen Winkels ϕ zwischen den beiden Polarisationsrichtungen der Polarisatorfolien ändert sich die Intensität des Lichts mit dem $\cos^2(\phi)$. In Abb. 2 ist diese Abhängigkeit aufgetragen. Wir sehen, dass hier ein linearer Zusammenhang besteht, wie zu erwarten war.

2.3 Rotationsdispersion

Die Rotationsstärke des Quarzplättchens ist abhängig von der Wellenlänge des eingestrahlten Lichts. Deshalb tritt bei Einstrahlung von Weißlicht Dispersion auf, die sich aber durch einen Unterschied in der Polarisationsebene anstatt durch einen veränderten Brechungswinkel (wie z.B. bei einem Prisma) zeigt. Diese Rotationsstärke haben wir analysiert, indem wir 6 verschiedene Interferenzfarbfilter verwendet haben und jeweils durch Drehung des Analysators die Winkel der beiden Intensitätsminima (bei maximaler Auslöschung, also 90° zwischen Analysator und gedrehter Polarisationsebene) notiert haben (siehe Tab. 1).

In der doppeltlogarithmischen Auftragung der Phasenverschiebung über der Wellenlänge des Farbfilters (Abb. 3) sehen wir einen linearen Zusammenhang, der mit der Dispersionsrelation $\phi \propto \lambda^{\alpha}$ verträglich ist. Je höher die Energie der Lichtquanten und je kleiner deren Wellenlänge ist, desto größer ist auch die Phasenverschiebung innerhalb des Quarzes. Die an



Abbildung 2 – Intensität in Anhängigkeit vom Drehwinkel des Analysators. Auftragung über $\cos^2(\phi)$

Nr.	Wellenlänge in nm	Minimum 1 [DEG]	Minimum 2 [DEG]	Fehler [DEG]
1	435	162	350	5
2	467	144	330	5
3	516	115	295	5
4	585	96	275	5
5	616	84	264	3
6	686	73	258	4

Tabelle 1 – Messwerte für die verschiedenen Wellenlängen

die Messwerte angefittete Gerade (in der Abbildung grün) hat eine Steigung α von -1.82, wobei der physikalisch sinnvolle Wert von 2 fast erreicht wird.

2.4 Schwingungsellipsen in Abhängigkeit der Wellenlänge

Als nächstes haben wir die Fähigkeit des doppelbrechenden Glimmerplättchens untersucht, aus linear polarisiertem Licht zirkular polarisiertes Licht herzustellen, wobei dazu ein Phasenunterschied zwischen dem ordentlichen und dem außerordentlichen Strahl von 90° benötigt wird. Dieser Phasenunterschied wird aber jedoch wegen der unterschiedlichen Brechzahlen für den außerordentlichen und den ordentlichen Strahl nur für eine bestimmte Wellenlänge erreicht. Der erste Teilversuch sieht deshalb vor, mit Hilfe von Interferenzfiltern die Wellenlänge des einfallenden Lichts zu beschränken und dann in Abhängigkeit des Drehwinkels des Analysators die transmittierte Intensität aufzunehmen. Bei linear polarisiertem Licht sollten die Messwerte in polarer Auftragung in etwa die Form einer stark eingeschnürten 'Erdnuss' haben, wobei bei ideal zirkular polarisertem Licht diese Einschnürung komplett verschwinden sollte und die Form der Kurve eine Ellipse beschreiben sollte. Die Auftragung der Daten für



Abbildung 3 – Rotationsdispersion des Quartzplättchens in Abhängigkeit der Wellenlänge.

die verschiedenen Interferenzfilter ist in den Abbildungen 4, 5, 6 zu sehen. Man kann deutlich erkennen, dass mit zunehmender Wellenlänge die Einschnürung der Kurve immer weiter abnimmt. Um die tatsächliche Phasenverschiebung aus den Daten zu ermitteln, haben wir quadrierte Ellipsen an die Messpunkte angefittet und jeweils die Ellipsenparameter a und b bestimmt (die Längen der Halbachsen). Aus diesen Parametern kann mit Hilfe der folgenden Formel die Phasenverschiebung zwischen den beiden Strahlen ermittelt werden:

$$\phi = 2 \arctan\left(\sqrt{\frac{a}{b}}\right) \tag{4}$$

Die ermittelten Werte für die Phasenverschiebung sind in Tabelle 2 aufgeschrieben. Wir sehen, dass die Phasenverschiebung bei der Wellenlänge 686 nm am ehesten 90° entspricht und an der Form des Graphen bei dieser Wellenlänge kann man auch sehen, dass hier am ehesten zirkular polarisiertes Licht erzeugt wurde.

Filter [nm]	а	b	Phasenverschiebung [DEG]
435	4.445	0.654	138.011 ± 1.94
467	21.07	4.143	132.181 ± 0.68
516	220.4	65.06	122.976 ± 0.64
585	103.5	214.2	110.375 ± 0.53
616	197.5	125.7	102.839 ± 0.50
686	30.32	24.06	96.6185 ± 0.31

Tabelle 2 – Phasenverschiebung des Glimmerplättchens und die gefitteten Parameter a und bfür die Ellipsen



Abbildung 4 - Phasenverschiebung des Glimmerplättchens bei 435 und 467 nm.



Abbildung 5 - Phasenverschiebung des Glimmerplättchens bei 516 und 585 nm.

2.5 Eichung des Kompensators

Die andere Variante zur Bestimmung der Wellenlänge, bei der das Glimmerplättchen zirkular polarisiertes Licht erzeugt ist mit Hilfe des SOLEIL'schen Kompensators. Dieser enthält einen in der Dicke variablen doppelbrechenden Kristall, mit dem jede beliebige Phasenverschiebung eingestellt werden kann. Die Beschriftung auf dem Einstellrad ist jedoch nicht absolut und muss deshalb zunächst geeicht werden. Dazu haben wir Messungen ohne das Glimmerplättchen durchgeführt und jeweils die Nullstellungen der 0. und ± 1 . Ordnung bei den verschiedenen Wellenlängen eingestellt. Die Skaleneinstellungen für benachbarte Null-



Abbildung 6 - Phasenverschiebung des Glimmerplättchens bei 616 und 686 nm.

stellungen entsprechen einer Phasendifferenz von 360°, weshalb sich ein Eichfaktor für die Umrechnung von Skalenteilen in Grad berechnen lässt. Die in Tabelle 3 angegebenen Fehler sind keine abgeschätzten Fehler, sondern entstanden durch die statistische Standardabweichung vom Mittelwert.

Wellenlänge des Filters [nm]	Min -1 [Skt]	Min. 0 [Skt]	Min. 1 [Skt]	Eichfaktor [DEG/Skt]
435	-7	3.6	14.1	34.12 ± 0.07
467	-7.5	3.6	14.5	30.51 ± 0.14
516	-9	3.6	15.8	28.12 ± 0.28
585	-10.6	3.6	17.6	25.81 ± 0.14
616	-11.5	3.6	18.3	24.08 ± 0.28
686	-13.25	3.6	19.9	21.50 ± 0.39

Tabelle 3 – Eichung des Kompensators

2.6 Bestimmung der Dispersion der Doppelbrechung

Durch die Kenntnis des Eichfaktors ist es nun möglich, mit dem SOLEIL Kompensator sinnvolle Messungen durchzuführen. Dazu haben wir diesmal mit Glimmerplättchen die 3 Minima ausgemessen und dann mittels des Umrechnungsfaktors die Phasenverschiebung berechnet. Die dazugehörigen Werte sind in Tabelle 4 zu sehen.

Wir sehen, dass auch mit dieser Messmethode eindeutig bestimmt wird, dass das Glimmerplättchen am ehesten mit Licht der Wellenlänge 686 nm zirkular polarisiertes Licht erzeugt. Die - zugegebenermaßen etwas ungewöhnlichen - Fehler entstammen wieder der Methode der Standardabweichung und sind aufgrund der geringen Statistik nicht sehr aussagekräftig. Trotzdem können wir guten Gewissens den obigen Schluss ziehen.

Filter [nm]	Min1 [Skt]	Min. 0 [Skt]	Min. 1 [Skt]	Phasenverschiebung [DEG]
1	-3.3	7.8	17.8	126.3 ± 0.26
2	-4.4	7.8	19.2	118.9 ± 37.0
3	-5.2	7.8	20.4	118.1 ± 16.5
4	-6.1	7.8	21.8	112.3 ± 5.5
5	-7.5	7.8	22.4	$97.5~\pm2.1$
6	-9.1	7.8	24.4	93.0 ± 5.6

Tabelle 4 - Messung mit Soleil'schem Kompensator

Zu guter Letzt vergleichen wir die beiden Messmethoden zur Bestimmnung der Dispersion des Glimmerplättchens, um festzustellen, welche denn besser geeignet ist. Wir haben mit beiden Messmethoden dasselbe Ergebnis erhalten, nämlich dass linear polarisiertes rotes Licht vom Glimmerplättchen in zirkular polarisiertes Licht umgewandelt wird. Wenn man die Fehler noch betrachtet kann man sagen, dass die Methode mit den Schwingungsellipsen deutlich genauer ist, was aber vermutlich daran liegt, dass wir einfach mehr Statistik aufgenommen haben. Die Methode mit dem SOLEIL Kompensator erscheint dabei aber wesentlich eleganter gelöst und war einfacher durchzuführen, da hier keine Ellipsen an die Werte angefittet werden mussten.



Abbildung 7 – Vergleich der beiden Messmethoden zur Untersuchung der Phasenverschiebung des Glimmerplättchens. (Blaue Punkte: Aufgabe 3, Grüne Punkte: Aufgabe 5.)