 <p><b>Technische Universität Dresden</b></p> <p><b>Fakultät Physik</b></p> <p>Physikalisches Grundpraktikum</p>	<p>Versuch: <b>PO</b></p> <p>Aktualisiert: am 16. April 2026</p>
---	--

## Polarisation

### Inhaltsverzeichnis

<b>1 Aufgabenstellung</b>	<b>2</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1 Linear polarisiertes Licht . . . . .	2
2.2 Natürliches und polarisiertes Licht . . . . .	2
2.3 Zirkular polarisiertes Licht . . . . .	3
2.4 Polarisatoren . . . . .	3
2.4.1 Polarisatoren aus Prismen, Doppelbrechung . . . . .	4
2.5 Optische Aktivität, Rotationsdispersion . . . . .	5
2.5.1 Optische Aktivität im Kristall . . . . .	6
2.5.2 Herstellung von zirkular (aus linear) polarisiertem Licht . . . . .	7
2.6 Faraday-Effekt . . . . .	7
<b>3 Versuchsdurchführung</b>	<b>7</b>
3.1 Halbschatten-Polarimeter . . . . .	7
3.2 Messung des Faraday-Effekts . . . . .	8
3.3 Messung der Drehrichtung . . . . .	8
<b>4 Durchführung</b>	<b>9</b>
<b>5 Anhang</b>	<b>10</b>
5.1 Polarisation durch Reflexion, Brewstersches Gesetz . . . . .	10
5.2 Polarisation durch Dichroismus . . . . .	10
5.3 Laurent-Platte . . . . .	12
5.4 Zum doppelbrechenden Kristall . . . . .	12
5.5 Tabellen . . . . .	13
<b>Fragen</b>	<b>13</b>
<b>Literatur</b>	<b>14</b>

# 1 Aufgabenstellung

1. Bestimmen Sie mit einem Polarimeter den Drehwinkel der Polarisationssebene von monochromatischem Licht bei Durchgang durch einen Quarz-Kristall.
2. Bestimmen Sie anhand des Drehwinkels der Polarisationssebene die Konzentration einer Zuckerlösung.
3. Ermitteln Sie jeweils die Drehrichtung anhand der Rotationsdispersion bei Verwendung von weißem Licht.
4. Ermitteln Sie die Verdet-Konstante einer gegebenen Flüssigkeit.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Linear polarisiertes Licht

Licht ist eine elektromagnetische Transversalwelle, wobei sich die Vektoren  $\vec{E}(z, t)$  (die elektrische Feldstärke) bzw.  $\vec{H}(z, t)$  (die magnetische Feldstärke, im folgenden nicht betrachtet) wellenförmig im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit  $c_0 = \frac{\omega}{k} = f \cdot \lambda = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}}$ , im Folgenden in  $z$ -Richtung, ausbreiten. Der einfachste Ansatz führt auf eine ebene Welle, die z.B. der partiellen Differentialgleichung für  $E_y$  genügt

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \quad \text{mit der Lösung} \quad E_y = \hat{E} \cdot e^{i(\omega t - kz)}. \quad (1)$$

Gleichung (1) beschreibt eine ebene, in  $y$ -Richtung linear polarisierte Transversalwelle, die sich in positiver  $z$ -Richtung ausbreitet. Die damit festgelegte Schwingungsebene SE (Polarisationsebene) des elektrischen Feldvektors ist die  $y - z$ -Ebene.

### 2.2 Natürliches und polarisiertes Licht

Natürliches Licht ist ein Gemisch von Transversalwellen, deren  $\vec{E}$ -Vektoren statistisch verteilt in allen Raumrichtungen und damit auch in der  $x$ - $y$ -Ebene schwingen. Die Schwingungsrichtung jeder natürlichen Teilwelle enthält Komponenten sowohl in  $x$ - als auch in  $y$ -Richtung. Polarisation ist das Ausfiltern einer Schwingungsrichtung (hier  $y$ -Richtung) durch Ausnutzung eines der folgenden Effekte:

1. Reflexion an dielektrischen Grenzschichten (z. B. Glasplatten);
2. Doppelbrechung (Kristalle, z B. Nicolsches Prisma);
3. Dichroismus (starke Dämpfung einer Schwingungsrichtung, z.B. Turmalin; Polarisationsfolien);
4. Streuung (z.B. Rayleigh-Streuung an Luft).

Der Polarisationsgrad ( $0 \leq V \leq 1$ ) gibt den Anteil der Intensität des polarisierten im Vergleich zum gesamten Licht an d.h.

$$V = \frac{I_p}{I_p + I_u}.$$

## 2.3 Zirkular polarisiertes Licht

Beschreibt die Projektion des elektrischen Feldvektors in der  $x$ - $y$ -Ebene eine Kreisbahn, so liegt zirkular polarisiertes Licht vor. Betrachtet man die Welle entgegen der Ausbreitungsrichtung (also in  $-z$ -Richtung), so spricht man von rechtszirkular polarisiertem Licht, wenn sich der elektrische Feldvektor im Uhrzeigersinn dreht und von linkszirkular polarisiertem Licht, wenn die Drehung gegen den Uhrzeigersinn erfolgt. Dann gilt neben:

$$E_y = \hat{E} \cdot e^{i(\omega t - kz)}$$

auch

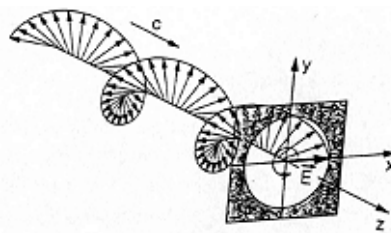
$$E_x^{\text{rechts}} = \hat{E} \cdot e^{i(\omega t - kz + \frac{\pi}{2})} \quad \text{und} \quad E_x^{\text{links}} = \hat{E} \cdot e^{i(\omega t - kz - \frac{\pi}{2})} \quad (2)$$

gilt. Bei festem Ort  $z$  entspricht dies einer Kreisschwingung, z.B. für eine Linksdrehung

$$\vec{E}(t) = \hat{E}_y \vec{e}_y \cos \omega t + \hat{E}_x \vec{e}_x \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad \text{sowie} \quad E^2 = E_y^2 + E_x^2 = \hat{E}^2 (\cos^2 \omega t + \sin^2 \omega t)$$

Überlagert man zu gleichen Anteilen rechts- und links-zirkular polarisiertes Licht, so resultiert wieder linear polarisiertes Licht.

Die Herstellung von zirkular polarisiertem aus linear polarisiertem Licht erfolgt z.B. durch ein  $\frac{\lambda}{4}$ -Plättchen.



**Abb. 1:** Rechts zirkular polarisierte monochromatische Lichtwelle

## 2.4 Polarisatoren

Im folgenden wird ein Polarisator P betrachtet, der nur die  $y$ -Komponente des Lichtes passieren lässt. Die  $y$ -Richtung wird dann Durchlassrichtung genannt. Zwei mechanische Analogien sollen kurz die Wirkungsweise eines solchen Polarisators verdeutlichen:

- Eine erste Analogie wäre ein Rost aus in  $y$ -Richtung ausgerichteten Stäben (Zaun), durch die sich transversale Seilwellen nur dann ungeschwächt ausbreiten, wenn die Schwingungsrichtung die  $y$ -Richtung ist.
- Im Gegensatz dazu lässt ein Rost aus Metallstäben von senkrecht auftretenden Mikrowellen nur die Komponenten durch, die senkrecht zu den Stäben orientiert sind. Grund dafür ist, dass die Parallelkomponente Elektronenschwingungen entlang des Stabes anregen, die der eingehenden Welle Energie entziehen sodass diese Komponente durch sehr starke Dämpfung vernichtet wird (Beispiel für Dichroismus).

Wird eine zweite, gleiche Einrichtung, der Analysator A, in den weiteren Strahlengang gebracht, so kann die Vorzugsrichtung von P dadurch kontrolliert werden, dass bei der Stellung von A in  $x$ -Richtung (gekreuzte Polarisatoren) Dunkelheit (bzw. ein Minimum an Lichterregung) beobachtet wird.

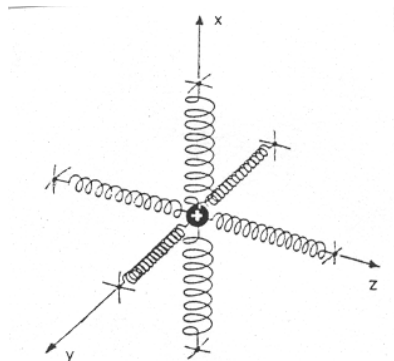
Für die von A und P durchgelassene Komponente gilt das Gesetz von Malus. Dabei wird die Abhängigkeit der hinter A beobachteten Intensität vom Winkel  $\vartheta$  zwischen P und A betrachtet. Die Amplitude genügt im Vakuum der Beziehung  $E(\vartheta) \propto \hat{E}_0 \cos \vartheta$ . Daher gilt für die Intensität

$$E^2(\vartheta) \propto J(\vartheta) = J_0 \cos^2 \vartheta. \quad (3)$$

### 2.4.1 Polarisatoren aus Prismen, Doppelbrechung

Optisch einachsige Kristalle (z.B. Quarz oder Kalkspat) zeigen eine Anisotropie in der Dielektrizitätskonstanten (DK), damit auch in der Phasengeschwindigkeit ( $c_e \neq c_o$ ) und in der Brechzahl ( $n_e = \frac{c_0}{c_e}$ ;  $n_o = \frac{c_0}{c_o}$ ). Gilt  $c_o > c_e$  (Quarz), d.h.  $n_o < n_e$ , so spricht man von einem positiv doppelbrechenden Kristall (siehe Tab. 2). Der ordentliche (ordinäre)  $o$ -Strahl verhält sich offenbar so, wie man es vom isotropen Glas kennt, wobei das Brechungsgesetz in bekannter Weise gilt. Der extraordinäre  $e$ -Strahl verhält sich, bedingt durch die abweichende Polarisation, anders.

Nur in einer ausgezeichneten Richtung, der optischen Achse OA sind die Brechzahlen gleich. Senkrecht dazu ist der Unterschied am größten. Zur simplen Veranschaulichung kann man ein Modell mit unterschiedlichen Kopplungsfedern in den 3 Raumrichtungen betrachten (Abbildung 2).



**Abb. 2:** Mechanisches Modell für die Anisotropie der DK

Ein Hauptschnitt HS des Kristalls enthält die OA.  $o$ - und  $e$ -Strahl sind senkrecht zueinander polarisiert. Der  $o$ -Strahl ist senkrecht zum HS, der  $e$ -Strahl parallel zum HS linear polarisiert. Im Nicolschen und auch Glan-Thompson-Prisma wird erreicht, dass der  $e$ -Strahl mit dem größeren  $n_e$  Wert zur weiteren Benutzung das Prisma verlässt, während der  $o$ -Strahl totalreflektiert und am Gehäuse absorbiert wird, da der  $n_k$ -Wert des Füllstoffes zwischen den beiden Teilprismen, zwischen  $n_e$  und  $n_o$  für Kalkspat liegt ( $n_o > n_k > n_e$ ). Oft wird 'Kanadabalsam' verwendet, ein transparent austrocknendes Harz mit hoher optischer Qualität.

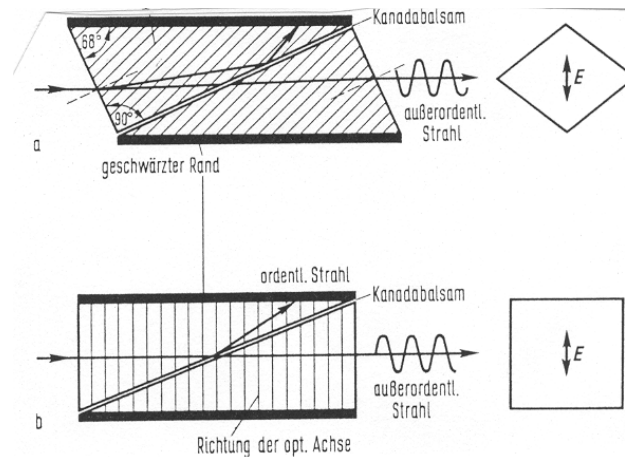


Abb. 3: Nicolsches (a) und Glan-Thompson-Prisma (b)[6]

## 2.5 Optische Aktivität, Rotationsdispersion

Substanzen, die bei Lichtdurchgang die Polarisationsrichtung drehen, heißen optisch aktiv. Wird ein solches Medium zwischen die gekreuzten Polarisatoren P und A gebracht, so beobachtet man eine gewisse Aufhellung, die erst durch Weiterdrehen von A um den zu messenden Winkel  $\alpha$  verschwindet.

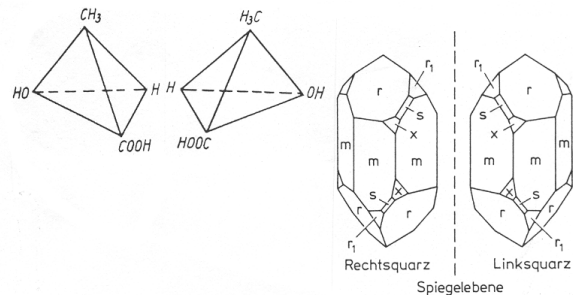


Abb. 4: Rechts- bzw. linksdrehende Milchsäure (a); rechts- bzw. linksdrehender Quarz (b)

Der Drehwinkel  $\alpha$  der Polarisationssebene hängt ab vom Lichtweg (Probenlänge  $d$ ) und der spezifischen Drehung  $\gamma$  (inklusive Vorzeichen), als Eigenschaft der Substanz (siehe Abbildung 4):

$$\alpha = \pm \gamma \cdot d \quad \text{mit} \quad \gamma \propto \frac{n_r - n_l}{\lambda}$$

Der spezifische Drehwinkel  $\gamma$  hängt auch von der Wellenlänge ab. Blaues Licht wird stärker gedreht als rotes Licht (Rotationsdispersion, Abbildung 5). Die optische Aktivität ist bedingt durch die Symmetrie-Eigenschaften der Kristalle bzw. der gelösten Moleküle bei Flüssigkeiten (Abbildung 4), womit unterschiedliche Lichtgeschwindigkeiten bzw. Brechzahlen ( $n_r \neq n_l$ ) für die links- und rechts-drehende zirkular polarisierten Wellen verbunden sind (zirkuläre Doppelbrechung).

Bei einem razemischen Gemisch kompensieren gleiche Anteile einer rechts- und einer linksdrehenden Lösung die Drehung der SE.

Wegen der Rotationsdispersion beobachtet man bei Beleuchtung mit weißem Licht bei rechtsdrehenden Substanzen bei Rechtsdrehung von A die Komplementärfarbe der jeweils ausgelöschten Komponente. Sind die Längen  $d$  groß, kommt es zu Überlagerungen von Spektren unterschiedlicher Ordnung.

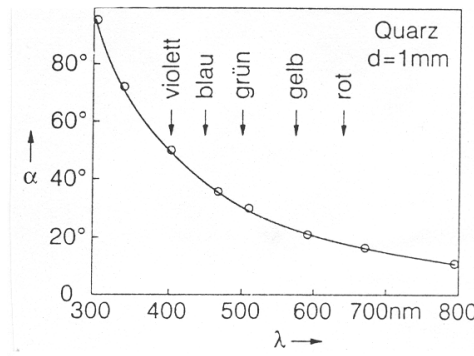


Abb. 5: Rotationsdispersion von Quarz [2],  $d = 1 \text{ mm}$

### 2.5.1 Optische Aktivität im Kristall

Wird ein optisch aktiver Kristall senkrecht zur optischen Achse zwischen die gekreuzten Polarisatoren P und A gebracht, so beobachtet man eine Drehung der Polarisationsrichtung. Linear polarisiertes Licht kann als Superposition einer rechts und einer links zirkular polarisierten Welle aufgefasst werden.

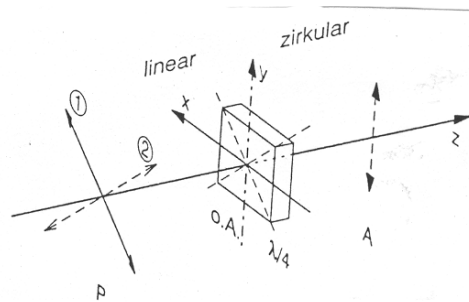


Abb. 6:  $\frac{\lambda}{4}$ -Platte zur Erzeugung von (links, 1) zirkular polarisiertem Licht

Im Kristall sind die Brechzahlen ( $n_l - n_r$ ) für rechts- und linksdrehende zirkular polarisierte Wellen unterschiedlich. Durch die Differenz in der Ausbreitungsgeschwindigkeit entsteht bei Durchgang durch den optisch aktiven Stoff eine Phasendifferenz zwischen dem links- und rechtszirkular polarisierten Licht, sodass sich die resultierende Polarisationsrichtung dreht. Bei doppelbrechenden Kristallen, die gleichzeitig optisch aktiv sind zeigt sich, dass die Differenz der Brechzahlen ( $n_l - n_r$ ) in der Regel um 2 Größenordnungen geringer ist als ( $n_e - n_o$ ) und von der Wellenlänge abhängt (Rotationsdispersion, Abbildung 5).

### 2.5.2 Herstellung von zirkular (aus linear) polarisiertem Licht

Die Dicke  $d$  einer  $\frac{\lambda}{4}$ -Platte ist gerade so bemessen, dass gilt  $(n_e - n_o)d = \frac{\lambda}{4}$  (Abbildung 6). Denn  $o$ - und  $e$ -Strahl erfahren in diesem Fall keine Richtungsänderungen, sondern nur unterschiedliche Phasenverschiebungen. Nach der  $\frac{\lambda}{4}$ -Platte beträgt  $\Delta\varphi$  gerade  $\frac{\pi}{2}$  und eine zirkular polarisierte Welle läuft weiter.

Kleine Phasenverschiebungen, die mit geringen Drehungen der Polarisationsrichtung (z.B. wenige Grad) verbunden sind, werden z.B. mit der Laurent-Platte (s.u.) im Halbschatten-Polarimeter erzeugt.

## 2.6 Faraday-Effekt

Substanzen, die nicht optisch aktiv sind (z.B. Wasser, Benzol, Toluol, siehe Tab. 1), zeigen unter dem Einfluss eines Magnetfeldes  $\vec{H} = H_z \vec{e}_z$  ebenfalls eine Drehung der SE. Diese Magnetorotation lässt sich mit der (wellenlängenabhängigen) Verdet'schen Konstanten  $V$  (siehe Tab. 1) beschreiben. Ist das Feld in  $z$ -Richtung inhomogen, so gilt

$$\alpha = V \cdot \int_0^d H_z(z) dz \quad (\text{homogen: } \alpha = V \cdot d \cdot H_z). \quad (4)$$

Das Vorzeichen von  $\alpha$  ergibt sich dabei aus dem Produkt von  $V$  und  $H_z$ : Das Vorzeichen von  $V$  ist materialspezifisch und legt die Drehrichtung der Rotation relativ zur Feldrichtung fest.

## 3 Versuchsdurchführung

### 3.1 Halbschatten-Polarimeter

Die Messung des Drehwinkels erfolgt meist mit dem Halbschatten-Polarimeter nach Lipich (Abbildung 7). Es ermöglicht einen parallelen Strahlengang, der die beiden Nicolschen Prismen als Polarisatoren (P,A)

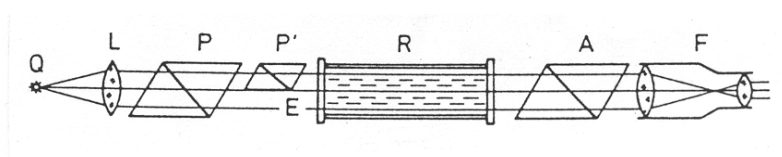


Abb. 7: Halbschatten-Polarimeter

sowie die Küvette durchsetzt und zum Messfernrohr gelangt, das sich im Zentrum eines Winkelmessers befindet. Zur Verbesserung der Winkelauflösung ist im Strahlengang ein Zusatzprisma  $P'$  (oder auch einer Laurent-Platte,  $\frac{\lambda}{2}$ -Quarzplatte) angebracht, das im oberen Teilstrahl eine zusätzliche Drehung der SE um den geringen Winkel  $2\delta$  bewirkt.

Man stellt den Analysator deshalb so ein, dass beide Gesichtsfelder gleich „grau“ erscheinen.

Das verwendete Messgerät (Abbildung 8) ermöglicht eine sehr genaue Winkel-Messung: Es wird am Strich der "0" des inneren Ringes abgelesen, der Strich des inneren Ringes, der mit einem Strich des äußeren Ringes genau abschließt, gibt die Nachkommastelle an. In dem Beispiel sind  $0,40^\circ$  eingestellt.

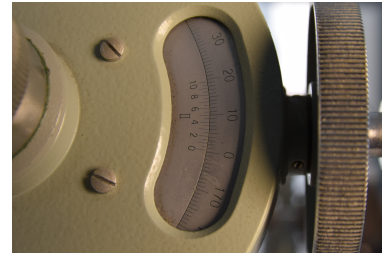


Abbildung 8: Verwendetes Messgerät

### 3.2 Messung des Faraday-Effekts

Die ca. 40 cm lange Küvette, an deren Ende sich P und A befinden, ist von einer kurzen dicken Zylinderspule mit inhomogener Feldverteilung umgeben, innerhalb derer für die magnetische Feldstärke nicht mehr gilt  $H = N \cdot \frac{I}{l}$  (lange Spule), sondern

$$H \approx C \cdot I \tag{5}$$

Zur Auswertung wird ein Relativverfahren benutzt: Einen mittleren  $C$ -Wert (Gerätekonstante) erhält man durch einen Vergleich mit dem Faradayeffekt an einer bekannten Flüssigkeit mit  $V_0$ . Deshalb wird im Vorversuch  $\alpha_0(I)$  bestimmt und damit  $C$  und danach  $\alpha_x$  bzw.  $V_x$  anhand der Gleichungen (4 und (5) im Relativverfahren, bezogen auf den gleichen Stromanstieg  $\Delta I$ , berechnet:

$$V_x = V_0 \frac{\alpha_x}{\alpha_0} \cdot \frac{d_0}{d_x} \tag{6}$$

Durch das Messen bei gleichen Bedingungen im Relativverfahren kürzt sich die unbekannte Gerätekonstante  $C$  heraus.

### 3.3 Messung der Drehrichtung

Misst man ausgehend von gekreuzten Polarisatoren (Dunkelstellung) mit monochromatischem Licht nach Einbringen der Probe mit konstanter Länge  $d$  den Drehwinkel  $\alpha$ , so ist eine Unterscheidung vom Komplementärwinkel ( $360^\circ - \alpha$ ) schwierig.

Zur Unterscheidung von rechts- bzw. linksdrehend wird mit Hilfe von weißem Licht anhand der Rotationsdispersion die natürliche spektrale Farbfolge (Abbildung 5) beim Drehen von A zu Hilfe genommen. Man beachte, dass die Komplementärfarbe der jeweils ausgelöschten Komponente beobachtet wird. Jedoch können die erwähnten Überlagerungen verschiedener Ordnungen bei dickeren Quarzplatten zu Komplikationen führen.

Absorbiertes Licht		Komplementärfarbe
Wellenlänge [nm]	Farbe	(beobachtete Farbe)
380-435	violett	gelb
435-480	blau	orange
480-500	blaugrün	rot
500-580	grün	purpur
580-595	gelb	violett
595-610	orange	blau
610-730	rot	blaugrün
730-770	purpur	grün

Abb. 9: Übersicht zur beobachteten Farbabfolge

## 4 Durchführung

- Bestimmen Sie mit einem Polarimeter die Drehrichtung und die spezifische Drehung  $\alpha_D$  für einen Quarz-Kristall aus 10 Einzelmessungen. Zur Bestimmung der Drehrichtung ist eine Glühlampe, für die spezifische Drehung  $\alpha_D$  eine Spektrallampe (Na,  $\lambda_{D\text{-Linien}} = (589,0 \pm 0,5) \text{ nm}$ ) zu verwenden. Die Dicke  $d$  der Quarz-Kristalle entnehmen Sie folgender Tabelle:

Kennzeichnung	$d / \text{mm}$
I	0,99
II	4,00
III	5,00
IV	2,50

Für die Messunsicherheit der Dicke gilt:  $\Delta d = 0,01 \text{ mm}$ .

- Ermitteln Sie die Drehrichtung und die Konzentration  $c$  einer Saccharose-Lösung aus 10 Einzelmessungen mit einem Polarimeter.
- Für Physik Bachelor und Lehramt Physik* Bestimmen Sie die Verdet-Konstante  $V$  von Toluol! Welches Vorzeichen hat  $V_{\text{Toluol}}$ ?

## Hinweise

Zu 1./2.: Die Quarz-Kristalle bzw. die Küvette sind vor jeder einzelnen Messung neu einzulegen und der Nullpunkt zu bestimmen.

Zu 2.: Der Zusammenhang zwischen Drehwinkel  $\alpha$  und Konzentration  $c$  lautet:  $\alpha = \alpha_D \cdot c \cdot l$ . Die spezifische Drehung der Zuckerlösung beträgt:  $\alpha_D = 6,65 \cdot 10^{-4} \frac{\text{°m}^2}{\text{g}}$ . Die Längen der Küvetten  $l$  sind am Versuchsplatz gegeben.

Zu 3.: Ermitteln Sie im Vorversuch die Apparaturkonstante  $C$  der Zylinderspule unter Verwendung der bekannten Verdet-Konstanten  $V$  von destilliertem Wasser:  $V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,0163 \cdot 1' \text{ A}^{-1}$  ( $1' \text{ A}^{-1} \equiv \text{Winkelminuten pro Ampere}$ ).  $C$  folgt aus der Abhängigkeit des Drehwinkels der Polarisations Ebene  $\alpha$  von der Stromstärke  $I$  (linearer Zusammenhang).

**Achtung:**  $|I_{\text{max}}| = 4 \text{ A}$

## 5 Anhang

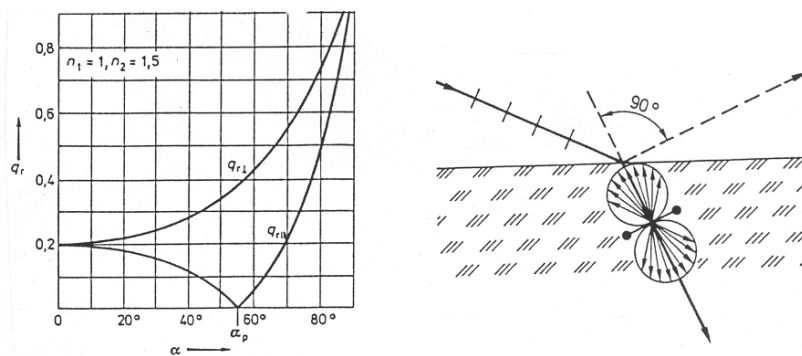
### 5.1 Polarisation durch Reflexion, Brewstersches Gesetz

Fällt monochromatisches linear polarisiertes Licht unter dem Einfallswinkel  $\alpha$  auf eine Glasplatte, so wird eine Teilwelle reflektiert und eine andere dringt in die Glasplatte ein.

Die Intensitäten von gebrochenem und reflektiertem Strahl hängen ab von  $\alpha$  und von der SE der einfallenden Welle. Außerdem unterscheiden sich beide Strahlen in ihrer Polarisationsrichtung. Mit den Fresnelschen Formeln (Gleichungen (7)) werden bezüglich der Einfallsebene die Amplituden von gebrochenen ( $t$ ) und reflektiertem ( $r$ ) für beide Polarisationsrichtungen ( $\perp$ ;  $\parallel$ ) theoretisch berechnet. In Abbildung 10 ist ein Ergebnis für den reflektierten Anteil dargestellt.

$$q_{r\perp} = \frac{E_{r\perp}}{E_{e\perp}} = -\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (a); \quad q_{t\perp} = \frac{E_{t\perp}}{E_{e\perp}} = \frac{2 \cos \alpha \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (b)$$

$$q_{r\parallel} = \frac{E_{r\parallel}}{E_{e\parallel}} = -\frac{\tan(\alpha - \beta)}{\tan(\alpha + \beta)} \quad (c); \quad q_{t\parallel} = \frac{E_{t\parallel}}{E_{e\parallel}} = \frac{2 \cos \alpha \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta) \cos(\alpha - \beta)} \quad (d) \quad (7)$$



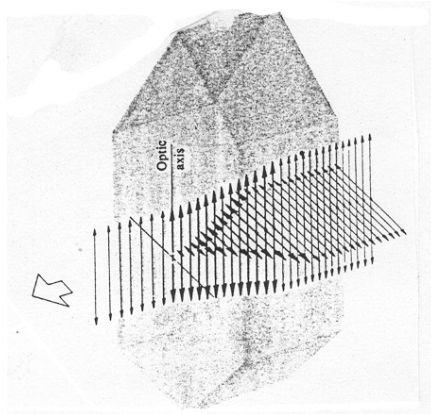
**Abb. 10:** Winkelabhängigkeit für die Amplitude des reflektierten Strahles (A, Fresnelschen Formeln (7 a,b)); mikroskopisches Modell (B)

Beim Polarisationswinkel  $\alpha_p$  stehen reflektierter ( $r$ ) und gebrochener ( $t$ ) Strahl senkrecht aufeinander ( $\alpha_p + \beta = 90^\circ$ ;  $\cos \alpha_p = \sin \beta$ ), woraus mit dem Brechungsgesetz das Brewstersche Gesetz folgt:  $\tan \alpha_p = n$ . Bei  $\alpha_p$  verschwindet die Parallel-Amplitude und das reflektierte Licht ist vollständig linear polarisiert, wenn natürliches Licht einfällt. Die Elektronen des Mediums strahlen als kleine angeregte Hertzsche Dipole nur senkrecht zu ihrer Schwingungsrichtung ab (Abbildung 10 b).

### 5.2 Polarisation durch Dichroismus

**Dichroismus:** Zweifarbigkeit, Farbe hängt von SE ab. Doppelbrechende Kristalle, z.B. auch Kalkspat, besitzen unterschiedliche Resonanzfrequenzen und damit auch Absorptionen in den drei Raumrichtungen, die aber meist im UV-Spektralbereich liegen.

Beim trigonal kristallisierenden Turmalin (kompliziertes Borsilikat) ist diese Eigenschaft für grünes Licht besonders stark ausgeprägt (Abbildung 11). Infolge dieser bezüglich der SE selektiven Absorption sind sie als Polarisatoren geeignet.



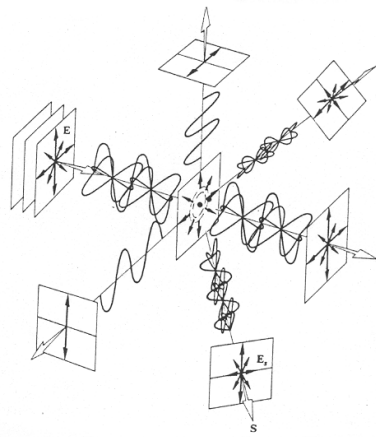
**Abb. 11:** Dichroismus im Turmalin-Kristall, Abhängigkeit der Absorption von der SE

### Polarisationsfolie

Sogenannte Polarisationsfilter bestehen z.B. aus Folien, in die kleine Kristallnadeln aus Jod-Chinin-Sulfat mit ausgeprägtem Dichroismus eingebettet wurden. Diese Nadeln müssen zur optimalen Ausnutzung des Dichroismus gut orientiert, d.h. parallel ausgerichtet sein. Es werden Polarisationsgrade von über 99% erreicht. In einer anderen Variante wird die Spannungsdoppelbrechung von gestreckter Zellulosehydratfolie ausgenutzt [1].

### Streuung

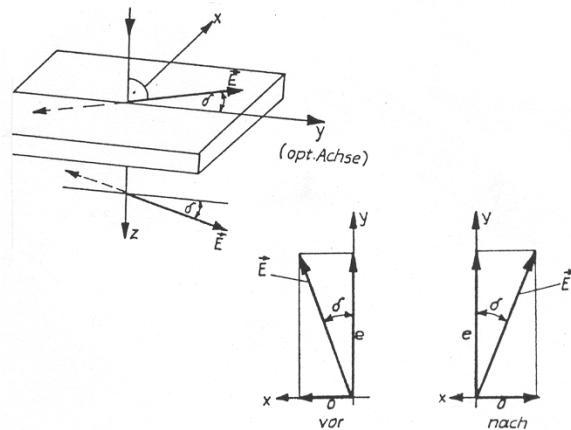
Tritt natürliches Licht in in  $z$ -Richtung ein Gas ein, so werden die Moleküle zu Schwingungen angeregt und können als kleine (Hertzsche) Dipole, die statistisch in der  $x - y$ -Ebene schwingen, angesehen werden. Dabei kommt als Schwingungsrichtung des seitlichen in  $x$ -Richtung beobachteten Streulichtes nur die  $y$ -Richtung in Frage, da keine  $z$ -Komponente existiert. Benachbarte Richtungen zeigen partielle Polarisation. Die Intensität ist sehr stark wellenlängenabhängig ( $\propto \frac{1}{\lambda^4}$ ; Rayleigh).



**Abb. 12:** Streuung von natürlichem Licht an Luftmolekülen

### 5.3 Laurent-Platte

Die  $\frac{\lambda}{2}$ -Quarz-Platte ist mit ihrer OA bezüglich der SE des einfallenden linear polarisierten Lichtes um den kleinen Winkel  $\delta$  verdreht. Im Kristall breiten sich  $o$ - und  $e$ -Strahl, in die das einfallende Licht zerlegt wird, unterschiedlich schnell aus (optisch positiv:  $c_o > c_e$ ). Am Ende des Kristalls beträgt der Phasenunterschied  $\Delta\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda_0}(n_e - n_o) = \pi$  und die SE der resultierenden linear polarisierten Welle ist um  $2\delta$  verdreht (ein Drehung der SE um  $\pi$  ist nicht nachzuweisen, Abbildung 13).



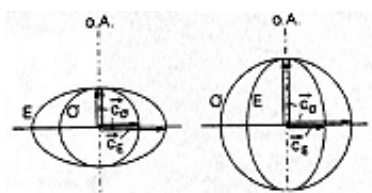
**Abb. 13:** Drehung der SE durch die Laurent-Platte Indizes:  $\lambda_0$  Vakuum;  $n_o$  ordinär;  $n_e$  extraordinär.

### 5.4 Zum doppelbrechenden Kristall

Der optisch einachsige doppelbrechende Kristall ist bei einem Hauptschnitt so geschliffen, dass die optische Achse in der Schnittebene liegt.

In der optischen Achse stimmen die  $c$ -Werte überein. In allen anderen Richtungen gibt es zwei Geschwindigkeiten  $c_o$  und  $c_e$  infolge der Anisotropie des Tensors der Dielektrizitätskonstanten. Daher sind beim „schiefen“ Fall (Einstrahlung ist nicht parallel zu OA bzw. senkrecht dazu) die Vektoren  $\vec{E}$  und  $\vec{D}$  nicht mehr parallel. Die Phasengeschwindigkeit wird abhängig von der Polarisationsrichtung.

Die Abbildung 14 zeigt sogenannte Wellenflächen, in denen die Lichtgeschwindigkeit im Medium in Abhängigkeit von der Richtung dargestellt ist. Das linke Bild betrifft den optisch negativen Kristall ( $c_o < c_e$ ;  $n_o > n_e$ ; z.B. Kalkspat), das rechte den positiven ( $c_o > c_e$ ;  $n_o < n_e$ ; z.B. Quarz).



**Abb. 14:** Wellenflächen im negativ (a) und positiv (b) einachsigen Kristall

## 5.5 Tabellen

Stoff	$V$ [Winkelminuten pro Ampere]
Natriumchlorid	0,0467
Quarz	0,0209
Monobromnaphtalin	0,1029
Benzol	0,0380
Wasser	0,0163

**Tab. 1:** Verdettsche Konstanten für Na-Licht ( $V = \frac{\alpha}{dH}$ ;  $[H]=\text{A/m}$ ) (aus [1], S 620).

Kristall	$n_o$	$n_e$	Bezeichnung der Doppelbrechung
Quarz	1,5442	1,5533	positiv
Kalkspat	1,6584	1,4864	negativ

**Tab. 2:** Brechzahlen für optisch einachsige Kristalle für Na-Licht.

## Fragen

1. Wie beschreibt man mathematisch eine ebene linear polarisierte elektromagnetische Welle bezüglich des E- und H-Feldes?
2. Wie kann man Licht polarisieren? Wozu benötigt man Kanadabalsam im Nicolschen Prisma?
3. Was sind die Einfallsebene und die Schwingungsebene? Herleitung des Brechungsgesetzes mit Hilfe des Modells der Elementarwellen!
4. Wie verlaufen Lichtwellen im anisotropen Kristall (Kalkspat, Quarz)?
5. Was versteht man unter dem Faraday- und dem Kerr-Effekt? Worauf beruhen die LCD-Anzeigen?
6. Welche wesentlichen Bestandteile hat ein Polarimeter?
7. Was ist Dispersion und Rotationsdispersion?
8. Wie funktioniert eine  $\frac{\lambda}{4}$ -Platte zur Erzeugung von zirkular polarisiertem Licht?
9. Skizzieren Sie im rechtwinkligen Koordinatensystem für eine Ausbreitung in  $z$ -Richtung: die Schwingungsebene von linear polarisiertem Licht; eine rechts- und links drehende zirkular polarisierte Welle; den Durchgang einer linear polarisierten Welle durch eine  $\frac{\lambda}{4}$ -Platte.
11. Was versteht man unter elliptisch polarisiertem Licht?
12. Warum ist bei Lichtwellen in Nichtleitern das E-Feld maßgebend?

## Literatur

- [1] Bergmann, Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik III - Optik, de Gruyter, Berlin, New York, 1993
- [2] H.-J. Paus, Physik in Experimenten und Beispielen, V. C.-Hanser, München, 1995
- [3] E. Hecht, Optik, Add. Wesley, 1989
- [4] W. Ilberg, M. Krötsch, D. Geschke, P. Kirsten, W. Schenk, A. Schneider, H. Schulze, Physikalisches Praktikum für Anfänger, Leipzig, 1994
- [5] Recknagel, Physik - Optik, Verlag Technik Berlin, 1990
- [6] W. Walcher, Praktikum der Physik, V. Teubner, Stuttgart, 1989
- [7] Absorption und Komplementärfarben, <https://wiki.pruefungshefte.de/de/physik/lichtfarbwahrnehmung/absorption-komplementaerfarben>, Zugriff am 16.04.2026