

Polarisation

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	2
2	Allgemeine Grundlagen	2
2.1	Linear polarisiertes Licht	2
2.2	Natürliches und polarisiertes Licht	2
2.3	Zirkular polarisiertes Licht	2
2.4	Polarisatoren	3
2.4.1	Polarisatoren aus Prismen, Doppelbrechung	3
2.5	Optische Aktivität, Rotationsdispersion	4
2.6	FARADAY-Effekt	6
3	Experimente	6
3.1	Halbschatten-Polarimeter	6
3.2	Messung des FARADAY-Effekts	6
3.3	Messung der Drehrichtung	7
4	Anhang	7
4.1	Polarisation durch Reflexion, Brewstersches Gesetz	7
4.2	Polarisation durch Dichroismus	7
4.2.1	Polarisationsfolie	8
4.2.2	Streuung	8
4.3	LAURENT-Platte	8
4.4	Zum doppelbrechenden Kristall	9
4.5	Tabellen	9
5	Fragen	10

1 Aufgabenstellung

1. Mit einem Polarimeter wird der Drehwinkel der Polarisationssebene von monochromatischem Licht an einem Quarz-Kristall und einer Zuckerlösung bestimmt.
2. Bestimmung der Drehrichtung mit weißem Licht anhand der Rotations- Dispersion.
3. An einer Flüssigkeit ist die VERDET'sche Konstante zu messen.

2 Allgemeine 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 Dgl. für E_y genügt

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

Die Gl. (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 xy - Ebene schwingen.
- Die Schwingungsrichtung jeder natürlichen Teilwelle enthält Komponenten sowohl in x - als auch in y -Richtung.
- Durch einen Polarisator wird aus natürlichem Licht polarisiertes Licht hergestellt.
- Der Polarisationsgrad ($0 \leq V \leq 1$) gibt den Anteil der Intensität des polarisierten im Vergleich zum gesamten Licht an $[V = I_p / (I_p + I_u)]$.
- Polarisation ist das Ausfiltern einer Schwingungsrichtung (hier y -Richtung) durch Ausnutzung eines der folgenden Effekte:

Polarisatoren (1, 2, 3 hauptsächlich genutzt):

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).

2.3 Zirkular polarisiertes Licht

Beschreibt die Projektion des elektrischen Feldvektors eine Kreisbahn in der x - y -Ebene (Spiralbahn), so spricht man mit Blick gegen die Ausbreitungs- (z) -Richtung von **rechts- bzw. links zirkular polarisiertem Licht**, wenn neben

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

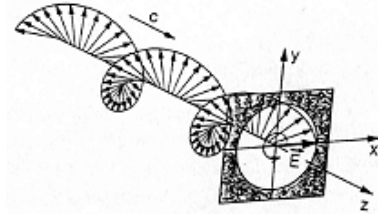


Abb. 1: Rechts zirkular polarisierte monochromatische Lichtwelle

$$E_x^r = \hat{E} \cdot e^{j(\omega t - kz + \pi/2)} \quad \text{bzw.} \quad E_x^l = \hat{E} \cdot e^{j(\omega t - kz - \pi/2)} \quad (2)$$

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

$$\vec{E}(t) = \hat{E}_y \vec{e}_y \cos \omega t + \hat{E}_x \vec{e}_x \cos(\omega t - \pi/2) ; \quad \text{bzw.} \quad E^2 = E_y^2 + E_x^2 = \hat{E}^2 (\cos^2 \omega t + \sin^2 \omega t) . \quad (3)$$

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 $\lambda/4$ -Plättchen (s. u.).

2.4 Polarisatoren

Mit einem **Polarisator P**, dessen Durchlaßrichtung im folgenden die y -Richtung sei, wird nur die y -Komponente durchgelassen.

Analogien: 1. Eine mechanische Analogie für einen P 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.

2. Im Gegensatz dazu läßt ein Rost aus Metall-Stäben von senkrecht auftreffenden Mikrowellen nur die Komponenten durch, die senkrecht zu den Stäben orientiert sind, da die Parallel-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 ϑ zwischen P und A betrachtet. Die Amplitude genügt im Vakuum der Beziehung $E(\vartheta) \sim \hat{E}_0 \cos \vartheta$. Daher gilt für die Intensität

$$E^2(\vartheta) \sim J(\vartheta) = J_0 \cos^2 \vartheta . \quad (4)$$

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 ($n_e = c_0/c_e$; $n_o = c_0/c_o$). Gilt $c_o < c_e$ (Quarz), d. h. $n_e > n_o$, so spricht man von einem positiv doppelbrechenden Kristall (s. Tab. 2). Der ordentliche (ordinäre) o-Strahl verhält sich scheinbar so, wie man es vom isotropen Glas kennt, wobei das Brechungsgesetz in bekannter Weise gilt.

Der extraordinäre e-Strahl verhält sich, bedingt durch die andere 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 (Abb. 2).

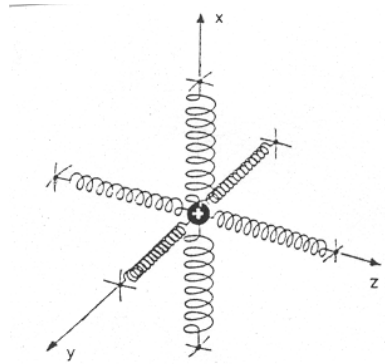


Abb. 2: Mechanisches Modell für die Anisotropie der DK

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 Kanadabalsams zwischen n_e und n_o für Kalkspat liegt ($n_o > n_k > n_e$).

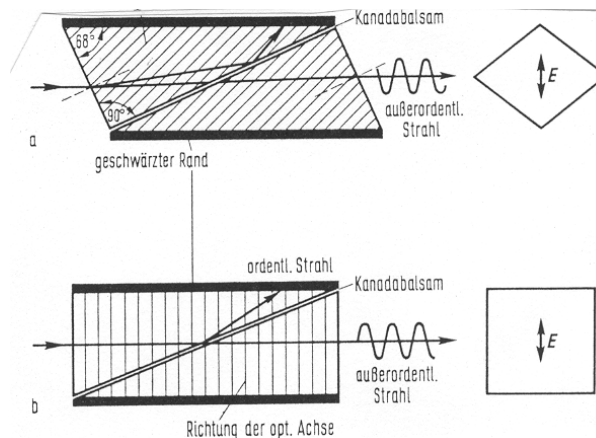


Abb. 3: Nicolsches (a) und GLAN-THOMPSON-Prisma (b)[6]

2.5 Optische Aktivität, Rotationsdispersion

Substanzen, die die SE drehen, heißen **optisch aktiv**. Wird ein solches Medium zwischen die gekreuzten P und A gebracht, so beobachtet man eine gewisse Aufhellung, die erst durch Weiterdrehen von A um den zu messenden Winkel α verschwindet. Der Drehwinkel α der Polarisationssebene

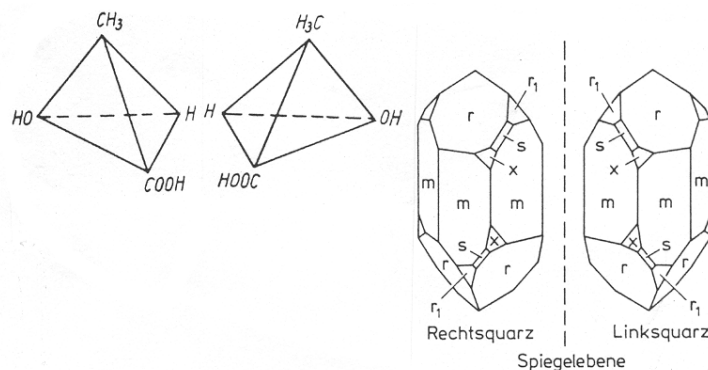


Abb. 4: Rechts-bzw. linksdrehende Milchsäure (a); rechts-bzw. linksdrehender Quarz (b)

hängt ab vom Lichtweg (Probenlänge d) und der spezifischen Drehung γ (inclusive Vorzeichen), als Eigenschaft der Substanz (s. Abb. 4):

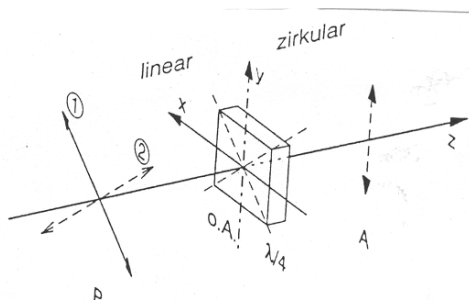
$$\alpha = \pm \gamma \cdot d \quad \text{mit} \quad \gamma \sim \frac{(n_r - n_l)}{\lambda} . \quad (5)$$

γ hängt auch von der Wellenlänge ab (**Rotationsdispersion**). Die optische Aktivität ist bedingt durch die Symmetrie-Eigenschaften der Kristalle bzw. der gelösten Moleküle bei Flüssigkeiten (Abb. 4), womit unterschiedliche Lichtgeschwindigkeiten bzw. Brechzahlen ($n_r \neq n_l$) für die links- und rechts-drehende zirkular polarisierten Wellen verbunden sind (**zirkulare Doppelbrechung**). Bei einem **razemischen Gemisch** kompensieren gleiche Anteile einer rechts- und einer links-drehenden Lösung die Drehung der SE.

Optische Aktivität im Kristall:

Wird ein doppelbrechender Kristall im HS senkrecht zur OA zwischen die gekreuzten P und A gebracht, so beobachtet man eine Drehung der SE.

Linear polarisiertes Licht kann aufgefaßt werden als Superposition einer rechts und einer links zirkular polarisierten Welle.

Abb. 5: $\lambda/4$ -Platte zur Erzeugung von (links, 1) zirkular polarisiertem Licht

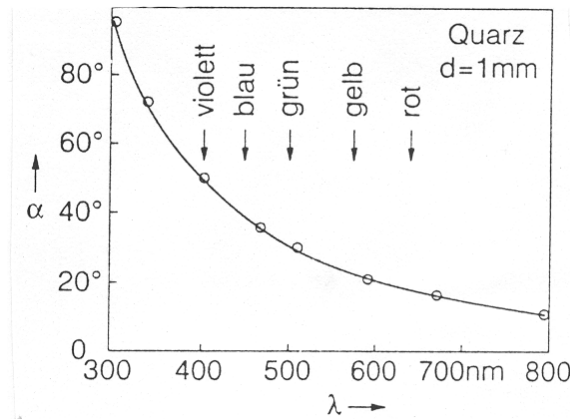
Im Kristall ist die Differenz der n -Werte ($n_l - n_r$) für rechts- und linksdrehende zirkular polarisierte Wellen unterschiedlich, jedoch um 2 Größenordnungen geringer als ($n_e - n_o$) und von der Wellenlänge abhängig (**Rotationsdispersion**, Abb. 6).

Herstellung von zirkular (aus linear) polarisiertem Licht:

Die Dicke d einer **Lambda/4 - Platte** ist gerade so bemessen, daß gilt $(n_e - n_o) d = \lambda/4$ (Abb. 5). Denn o- und e-Strahl erfahren in diesem Fall keine Richtungsänderungen, sondern nur unterschiedliche **Phasenverschiebungen**. Nach der $\lambda/4$ -Platte beträgt $\Delta\varphi$ gerade $\pi/2$ und eine zirkular polarisierte Welle läuft weiter.

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

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. Blaues Licht wird stärker gedreht als rotes Licht (Abb. 6).

Abb. 6: Rotationsdispersion von Quarz [2], $d = 1 \text{ mm}$

2.6 FARADAY-Effekt

Substanzen, die nicht optisch aktiv sind (z. B. Wasser, Benzol, Toluol, s. 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 (s. Tab. 1) beschreiben, wobei das Vorzeichen von α sich mit der Richtung von \vec{H} umkehrt. Ist das Feld in z -Richtung inhomogen ($H_z = H_z(z)$), so gilt

$$\alpha = V \cdot \int_0^d H_z(z) dz \quad ; \quad (\text{homogen : } \alpha = V \cdot d \cdot H_z) \quad . \quad (6)$$

3 Experimente

3.1 Halbschatten-Polarimeter

Die Messung des Drehwinkels erfolgt meist mit dem Halbschattenpolarimeter nach LIPPICH (Abb. 7). Es ermöglicht einen parallelen Strahlengang, der die beiden NICOLSchen Prismen als Polarisatoren (P,A)

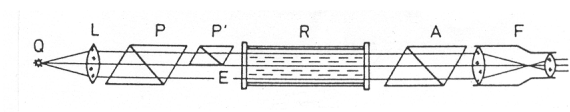


Abb. 7: Halbschatten-Polarimeter

sowie die Küvette durchsetzt und zum Meßfernrohr gelangt, das sich im Zentrum eines Winkelmeßers befindet. Zur Verbesserung der Winkel-Auflösung ist im Strahlengang ein Zusatz-Prisma P' (oder auch einer LAURENT-Platte, $\lambda/2$ -Quarzplatte) angebracht, das im oberen Teilstrahl eine zusätzliche Drehung der SE um den geringen Winkel 2δ bewirkt.

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

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 $H = NI/l$ (lange Spule), sondern

$$H \approx C \cdot I \quad . \quad (7)$$

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 α_x bzw. V_x anhand der Gln.(6;7) im Relativverfahren, bezogen auf den gleichen Stromanstieg ΔI , berechnet:

$$V_x = V_0 \frac{\alpha_x}{\alpha_0} \cdot \frac{d_0}{d_x} \quad . \quad (8)$$

3.3 Messung der Drehrichtung

Mißt man ausgehend von gekreuzten "NICOLS" (Dunkelstellung) mit monochromatischem Licht nach Einbringen der Probe mit konstanter Länge d den Drehwinkel α , 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 (Abb. 6) 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.

4 Anhang

4.1 Polarisation durch Reflexion, Brewstersches Gesetz

Fällt monochromatisches linear polarisiertes Licht unter dem Einfallswinkel α 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 α und von der SE der einfallenden Welle. Außerdem unterscheiden sich beide Strahlen in ihrer Polarisations-Richtung. Mit den FRESNELSCHEN Formeln (Gl. (9)) werden bezüglich der **Einfallebene** die Amplituden von gebrochenen (t) und reflektiertem (r) für beide Polarisationsrichtungen (\perp ; \parallel) theoretisch berechnet. In Abb. 9 ist ein Ergebnis für den reflektierten Anteil dargestellt.

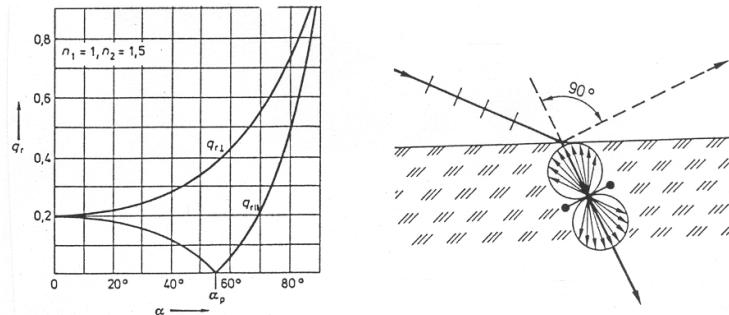


Abb. 8: Winkelabhängigkeit für die Amplitude des reflektierten Strahles (A, FRESNELSCHEN Formeln (9 a,b)); mikroskopisches Modell (B)

$$\begin{aligned} q_{\perp r} \frac{E_{\perp r}}{E_{e\perp}} &= -\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} & (a) \quad q_{\perp t} \frac{E_{\perp t}}{E_{e\perp}} &= \frac{2 \cos \alpha \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} & (b) \\ q_{\parallel r} \frac{E_{\parallel r}}{E_{e\parallel}} &= -\frac{\tan(\alpha - \beta)}{\tan(\alpha + \beta)} & (c) \quad q_{\parallel t} \frac{E_{\parallel t}}{E_{e\parallel}} &= \frac{2 \cos \alpha \sin \beta}{\cos(\alpha - \beta)} & (d) \end{aligned} \quad . \quad (9)$$

Beim Polarisationswinkel α_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 α_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 Hertz'sche Dipole nur senkrecht zu ihrer Schwingungsrichtung ab (Abb. 9 b).

4.2 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 (Abb. 10). Infolge dieser bezüglich der SE selektiven Absorption sind sie als Polarisatoren geeignet.

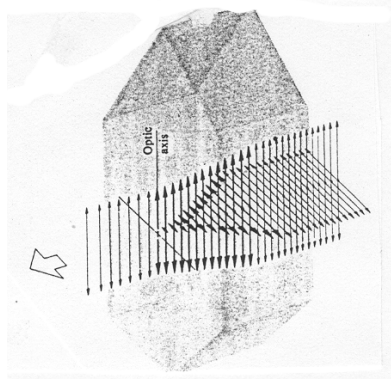


Abb. 9: Dichroismus im Turmalin-Kristall, Abhängigkeit der Absorption von der SE

4.2.1 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].

4.2.2 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 xy -Ebene schwingen, angesehen werden. Dabei kommt als Schwingungsrichtung des seitlichen in x beobachteten Streulichtes nur die y -Richtung in Frage, da keine z -Komponente existiert. Benachbarte Richtungen zeigen partielle Polarisation. Die Intensität ist sehr stark wellenlängenabhängig ($\sim 1/\lambda^4$; Rayleigh).

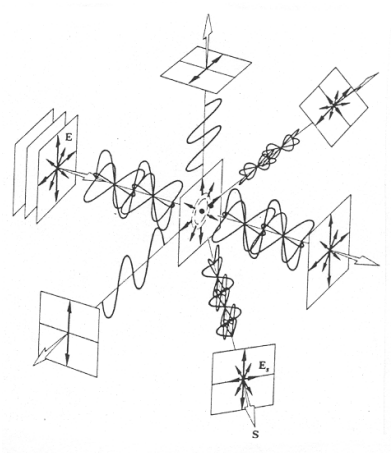
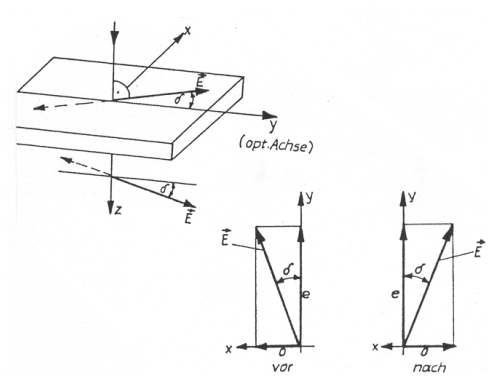


Abb. 10: Streuung von natürlichem Licht an Luftmolekülen

4.3 LAURENT-Platte

Die $\lambda/2$ -Quarz-Platte ist mit ihrer OA bezüglich der SE des einfallenden linear polarisierten Lichtes um den kleinen Winkel δ 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 2δ verdreht (eine Drehung der SE um π ist nicht nachzuweisen, Abb. 12).

Abb. 11: Drehung der SE durch die LAURENT-Platte Inizes: λ_0 Vakuum; n_o ordinär; n_e extraordinär.

4.4 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 OA bzw. \perp dazu) die Vektoren \vec{E} und \vec{D} nicht mehr parallel. Die Phasengeschwindigkeit wird abhängig von der Polarisationsrichtung.

Die Abb. 12 zeigt sogenannte Wellenflächen, in denen die Lichtgeschwindigkeit im Medium in Abhängigkeit von der Richtung dargestellt ist. Das linke Bild betrifft den optisch negativen Kristall ($c_o > c_e$; $n_e > n_o$; z. B. Kalkspat), das rechte den positiven ($c_o < c_e$; $n_o > n_e$; z.B. Quarz).

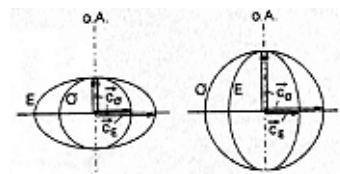


Abb. 12: Wellenflächen im negativ (a) und positiv (b) einachsigen Kristall

4.5 Tabellen

Tab. 1.: VERDET'sche Konstanten für Na-Licht ($V = \frac{\alpha}{dH}$; $[H]=A/m$).

Stoff	V/ Winkelminuten pro Ampere
Natriumchlorid	0,0467
Quarz	0,0209
Monobromnaphtalin	0,1029
Benzol	0,0380
Wasser	0,1083

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

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

5 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 Einfalls- und die Schwingungs-Ebene? 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 $\lambda/4$ -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 $\lambda/4$ -Platte.
10. Was versteht man unter elliptisch polarisiertem Licht?
11. Warum ist bei Lichtwellen in Nichtleitern das E-Feld maßgebend?

Literatur

- [1] Bergmann-Schaefer, Experimentalphysik, Bd. 3, Optik, Berlin 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] A. Recknagel, Physik, Optik, Verlag Technik, 1990
- [6] W. Walcher, Praktikum der Physik, V. Teubner, Stuttgart 1989