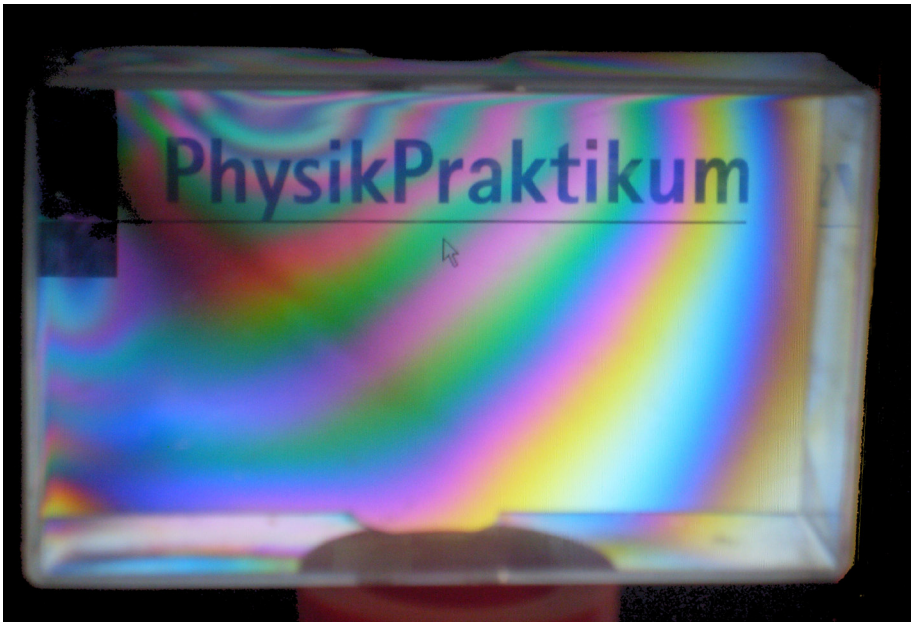


Polarisation von Licht

Ziele und Hintergründe

„This velocity is so nearly that of light that it seems we have strong reason to conclude that light itself (including radiant heat and other radiations) is an electromagnetic disturbance in the form of waves propagated through the electromagnetic field according to electromagnetic laws.“
(J. C. Maxwell, *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London **155**, (459) 1865

In der klassischen Maxwell-Theorie wird Licht als elektromagnetische Welle beschrieben. Die Gleichung für eine ebene Welle lautet

$$\vec{\mathcal{E}}(\vec{r},t) = \vec{e}\,\mathcal{E}_0 \cdot \sin\left(\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r}\right).$$

Die Ausbreitungsrichtung ist durch den Wellenvektor $\vec{k}$ gegeben ($\vec{k}$ steht senkrecht auf den Wellenfronten), $\omega = 2\pi \cdot f$ ist die Kreisfrequenz der Welle. Die Wellenlänge λ ist mit der Frequenz über die Phasengeschwindigkeit verknüpft: $c = f \cdot \lambda$. $\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r} = \varphi(\vec{r},t)$ stellt die Phase der Welle dar. Der Einheitsvektor $\vec{e}$ zeigt in Richtung der elektrischen Feldstärke (Kraftrichtung auf eine Probeladung), $\vec{e}$ gibt also gleichsam die Schwingungsrichtung der elektrischen Feldstärke im Strahlungsfeld an. $\mathcal{E}_0$ ist die Amplitude dieser Schwingung. Unterschiedliche Amplituden führen zu unterschiedlicher Helligkeit des Lichts, unterschiedliche Wellenlängen erzeugen unterschiedliche Farbeindrücke. Auch die Ausbreitungsrichtung ist eindeutig sichtbar. Für die Schwingungsrichtung dagegen fehlt dem menschlichen Wahrnehmungsapparat ein Organ. Unterschiedliche $\vec{e}$-Richtungen können wir ohne zusätzliche Hilfsmittel nicht erkennen. Man bezeichnet $\vec{e}$ als die *Polarisationsrichtung* des Lichts.

In diesem Experiment werden Sie nun untersuchen, wie man die Polarisationsrichtung bestimmt, welchen Einfluss diese Schwingungsrichtung des $\mathcal{E}$-Feldes auf Reflexion und Brechung hat. Sie lernen Materialien kennen, mit denen sich die Schwingungsrichtung gezielt drehen lässt.

Ist die Wahl des Koordinatensystems frei, können Sie den Polarisationsvektor $\vec{e}$ in die x-y-Ebene legen, die Ausbreitungsrichtung ist dann die z-Richtung. Eine beliebig polarisierte Welle kann dann in eine x- und eine y-Komponente zerleg werden:

$$\mathcal{E}(z,t) = \vec{e}_x \mathcal{E}_{0x} \sin(\omega t - kz) + \vec{e}_y \mathcal{E}_{0y} \sin(\omega t - kz + \delta)$$

Weil reflektiertes Licht zumindest teilweise polarisiert ist, lassen sich leicht störende Reflexe durch Polarisationsfilter unterdrücken. Davon macht man beim Fotografieren Gebrauch. Aber auch Polaroid-Brillen funktionieren so (Abb. 1).

Technisch angewandt werden Polarisationseffekte auch in jeder LCD (Liquid Crystal Display)-Anzeige. Abb. 2 demonstriert, dass ein LCD-Bildschirm polarisiertes Licht abgibt. Für den unteren Bildteil wurde der Bildschirm ohne Filter fotografiert. Für den oberen Bildteil wurde ein Polfilter vor die Kamera gesetzt, das das Licht vom Bildschirm nicht durchließ. Dort allerdings, wo eine Plastikschachtel im Wege steht, geschieht Überraschendes (Stichwort: Spannungspolarisation).

1 Polaroidbrillen filtern störende Reflexe heraus

Aufgabe: Erklären Sie das in Abb. 2 dargestellte Polarisationsphänomen.

2 Spannungspolarisation durch eine Plastikschachtel; oben mit Polarisator, unten ohne.
Quelle: Archiv DRS

Literatur

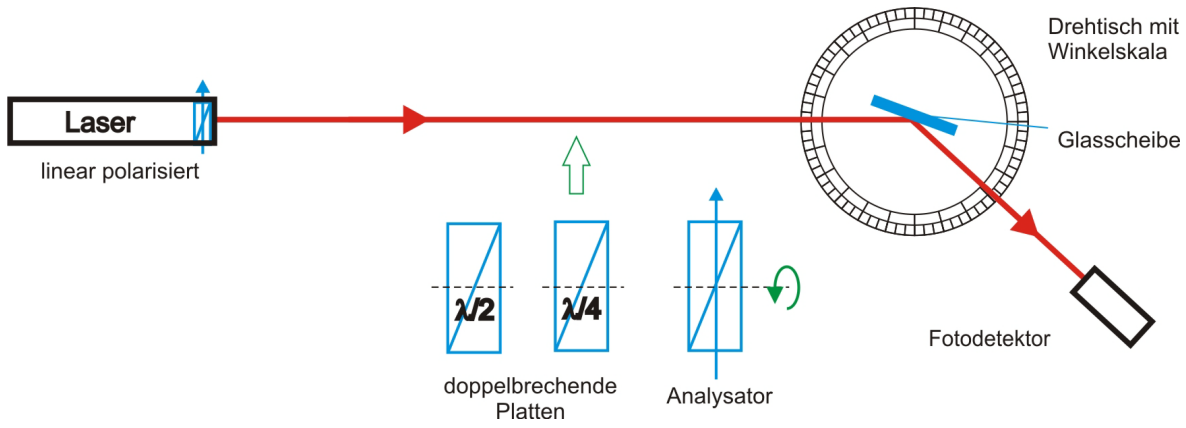
Demtröder, *Experimentalphysik* 2; Springer
Bergmann/Schäfer, *Bd. III Optik;* de Gruyter
Hecht, *Optics;* Addison-Wesley
Hering/Martin/Stohrer, *Physik für Ingenieure*; VDI
Scholz, *Optik,* LUH

Das sollten Sie wissen

- Die elektromagnetische Welle als Modellvorstellung für das Licht;
- Eigenschaften der Welle; was davon kann man sehen?
- Was ist linear polarisiertes, zirkular polarisiertes, elliptisch polarisiertes, unpolarisiertes Licht? Wie legt man die Polarisationsrichtung fest?
- Wodurch wird die Einfallsebene festgelegt? Skizze anfertigen! Was gilt bei senkrechtem Einfall?
- Was ist der physikalische Grund dafür, dass man bei der Reflexion zwischen parallel und senkrecht zur Einfallsebene polarisiertem Licht unterscheiden muss?

1 Grundlagen zum Versuch

1.1 Der Aufbau



3 Laser und Drehtisch stehen auf einer optischen Bank. Der Laser ist linear polarisiert, die Schwingungsrichtung willkürlich. Die optischen Elemente werden einfach in den Strahlengang gestellt und lassen sich um ihre horizontale Achse drehen. Die Lichtintensität I wird mit der Fotospannung U eines Fotodetektors gemessen: $I \sim U$.

1.2 Polarisation durch Reflexion: Die Fresnel-Formeln

Aus der geometrischen Optik sind grundlegende Formeln für die Reflexion und Brechung bekannt:

- Die Wellenvektoren des einfallenden, reflektierten und gebrochenen Strahls liegen in einer Ebene. Zur Unterscheidung werden Indizes verteilt: „e“ für den einfallenden, „r“ für den reflektierten und „t“ für den transmittierten Strahl.
- Es gelten das Reflexionsgesetz $\alpha_e = \alpha_r$ und das Brechungsgesetz $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}$, wobei n_1 und n_2 die Brechungsindizes der beiden Materialien 1 und 2 sind.

Der Reflexionskoeffizient ρ gibt das Verhältnis von reflektierter zu einfallender Amplitude A an. Mit diesen Koeffizienten lassen sich die Verhältnisse gut beschreiben. Man berechnet dazu ρ_P, für den parallel zur Einfallsebene polarisierten Anteil und ρ_S für den dazu senkrechten Anteil.

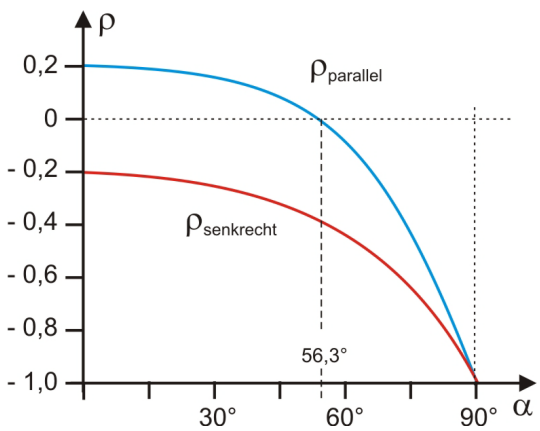
$$\rho_P = \frac{A_{\text{reflektiert/parallel}}}{A_{\text{einfallend/parallel}}} = \frac{\tan(\alpha-\beta)}{\tan(\alpha+\beta)}$$

$$\rho_S = \frac{A_{\text{reflektiert/senkrecht}}}{A_{\text{einfallend/senkrecht}}} = -\frac{\sin(\alpha-\beta)}{\sin(\alpha+\beta)}.$$

Aufgabe (nur für A-Kurse):
Leiten Sie die Fresnel-Formeln her.

Üblicherweise misst man die *Intensität* I des Lichts, die sich aus dem zeitlichen Mittelwert des Quadrates der Wellenamplitude ergibt:

$$I = c\varepsilon_0\varepsilon_r \left\langle \mathcal{E}^2(\vec{r},t) \right\rangle_{\text{eine Perioden}} .$$



4 Die Reflexionskoeffizienten ρ_P und ρ_S für eine Luft-Glas-Grenzfläche mit $n_2/n_1 = 1{,}5$

Bezogen auf die Intensitäten werden Reflexion und Transmission durch das Reflexionsvermögen R bzw. Transmissionsvermögen T beschrieben.

Aufgaben

(1) Wie verlaufen die Graphen $R_{\parallel}(\alpha)$; $T_{\parallel}(\alpha)$; $R_{\perp}(\alpha)$; $T_{\perp}(\alpha)$ qualitativ? Skizze!

(2) Bei senkrechtem Einfall lässt sich keine Unterscheidung zwischen parallel und senkrecht zur Einfallsebene polarisiertem Licht mehr treffen. Wie viel Prozent der einfallenden Intensität wird bei senkrechtem Einfall auf eine Glasfläche reflektiert? Berechnen Sie dazu das Reflexionsvermögen: $R(\alpha = 0)$ und setzen Sie den Brechungsindex von Luft $n_{\text{Luft}} = 1$ und den für Glas $n_{\text{Glas}} = 1{,}5$.

(3) Durch welche Eigenschaft wird der *Brewsterwinkel* α_B definiert? Berechnen Sie den Brewsterwinkel als Funktion von n. Wie groß ist er für Kronglas $n = 1{,}51$? Skizzieren Sie die Strahlengänge parallel und senkrecht zur Einfallsebene polarisierten Lichts für $\alpha = \alpha_B$.

(4) Bei schrägem Lichteinfall ist die Polarisationsrichtung des reflektierten Lichts von der Einfallsebene weg gedreht. Wie kommt's? (Lit: Demtröder)

(5) Die senkrechte Komponente macht bei Reflexion am dichteren Medium einen Phasensprung von π, wie verhält es sich bei der parallelen Komponente?

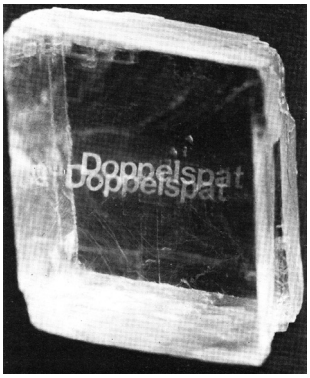
(6) Begründen Sie das Gesetz von Malus: Fällt linear polarisiertes Licht der Intensität I_0 auf einen Polarisator, dessen Transmissionsachse mit der Polarisationsrichtung des Lichtes den Winkel φ bildet, gilt für die nach dem Polarisator austretende Intensität $I(\varphi) = I_0 \cdot \cos^2\varphi$.

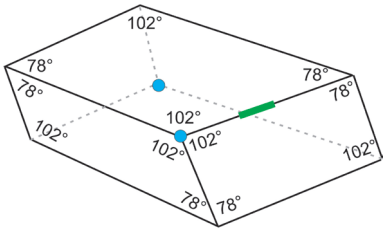
Doppelbrechung

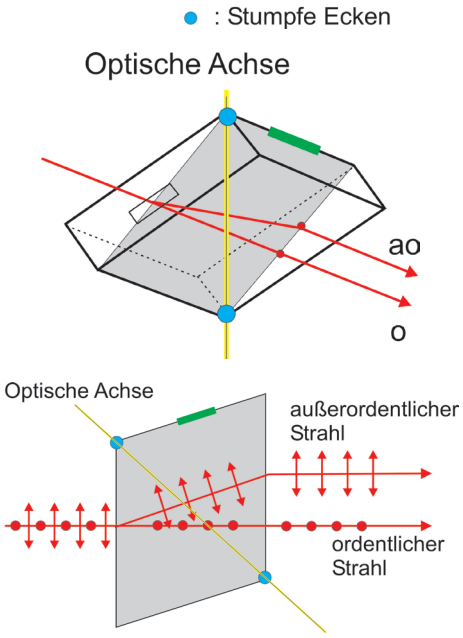
Anisotrope Kristalle sind solche, bei denen unterschiedliche Richtungen durch einen Kristallpunkt physikalisch nicht gleichwertig sind. Eine Anisotropie kann auch den Brechungsindex betreffen. Dabei hängt n von der Polarisationsrichtung ab. Bei doppelbrechenden Kristallen gibt es zwei zueinander senkrechte Polarisationsrichtungen mit zwei unterschiedlichen Phasengeschwindigkeiten des Lichts.

Aufgabe

Die folgenden Abb. 6 bis 9 aus der o. g. Literatur beschreiben das Phänomen der Doppelbrechung und stellen Experimente zu diesem Phänomen dar. Schreiben Sie auf, was die Abbildungen zeigen. Klären Sie die dort genannten Fachbegriffe (kursiv gesetzt).



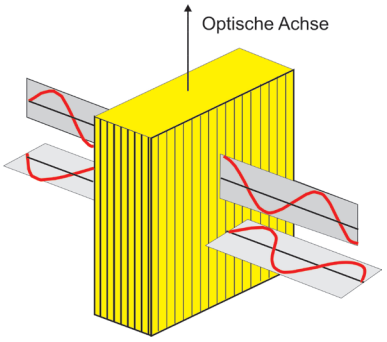




5 Die natürlichen Spaltflächen eines Kalkspats bilden ein Rhomboeder. Die *optische Achse* verläuft durch die beiden stumpfen Ecken des Kristalls, an denen drei 102° Winkel zusammenstoßen. Ein Strahl *unpolarisierten Lichts*, der auf eine Spaltfläche auftrifft, wird in zwei senkrecht zueinander polarisierte Teilstrahlen geteilt. Nur der *ordentliche Strahl* gehorcht dem Brechungsgesetz. Er ist senkrecht zur optischen Achse polarisiert.

Ein Wellenverzögerer

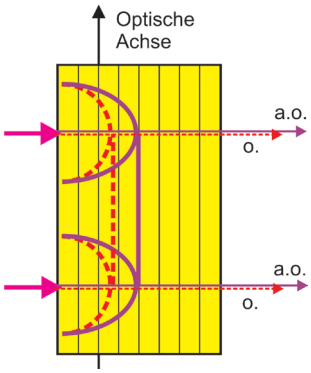
Schneidet man eine Platte parallel zur optischen Achse aus dem Kristall, so durchlaufen Lichtwellen, die parallel bzw. *senkrecht zur optischen Achse polarisiert* sind, den Kristall mit unterschiedlichen *Phasengeschwindigkeiten*.



6 *Quelle:* Roman Sexl

Außerordentlicher/ordentlicher Strahl

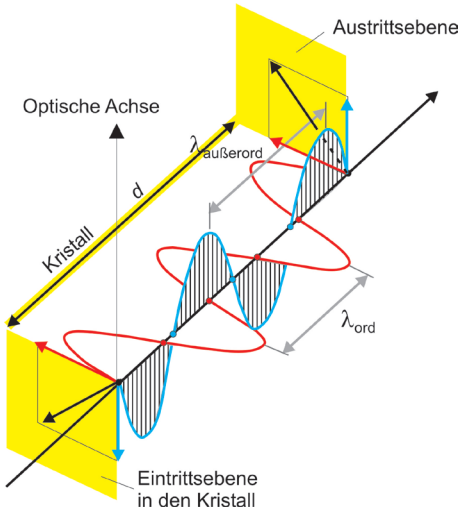
Bei senkrechtem Einfall auf die optische Achse werden *ordentlicher und außerordentlicher Strahl* nicht räumlich versetzt sondern nur phasenverschoben. Sie laufen parallel durch den Kristall – der außerordentliche dabei mit größerer Phasengeschwindigkeit als der ordentliche.



7 *Quelle:* Roman Sexl

$\lambda/2$-Plättchen drehen die Polarisation

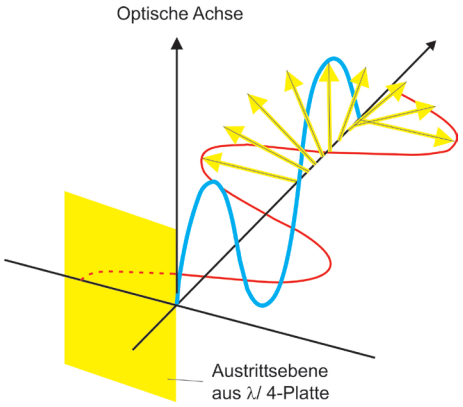
Details einer $\lambda/2$-Platte: Die Dicke d des Kristalls ist hier gerade so groß, dass der *Gangunterschied* $\Delta = d\cdot(n_o - n_{ao}) = \lambda/2$ beträgt. Bei einem Einfallspolarisationswinkel von 45° zur optischen Achse wird die *Polarisationsrichtung* um 90° gedreht.



8 *Quelle*: Hecht/Zajak

$\lambda/4$-Plättchen erzeugen zirkulare Pol.

Details einer $\lambda/4$–Platte: *Zirkular polarisiertes* Licht entsteht, wenn sich ordentlicher und außerordentlicher Strahl mit gleicher Amplitude um $\lambda/4$ phasenverschoben überlagern.



9 *Quelle*: Hecht/Zajak

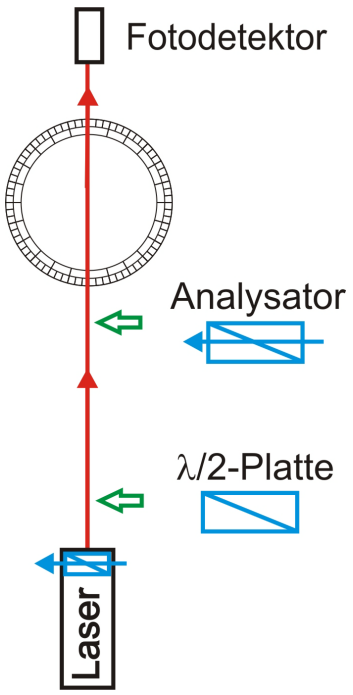
Messungen

Reflexionsvermögen einer Glasplatte

1. Der Laserstrahl im Versuch ist linear polarisiert. Sie können sich davon überzeugen, wenn Sie beim Drehen des Analysators die Intensitätsänderungen auf einem Blatt Papier beobachten.

2. Dreht man die optische Achse einer $\lambda/2$-Platte um einen Winkel φ, so wird die Polarisationsrichtung des Strahls um 2φ gedreht (s. z. B. Demtröder). Mit einer $\lambda/2$-Platte kann man daher die Polarisationsrichtung linear polarisierten Lichts in jede Richtung drehen. Sie sollten dies mit dem Analysator kontrollieren.

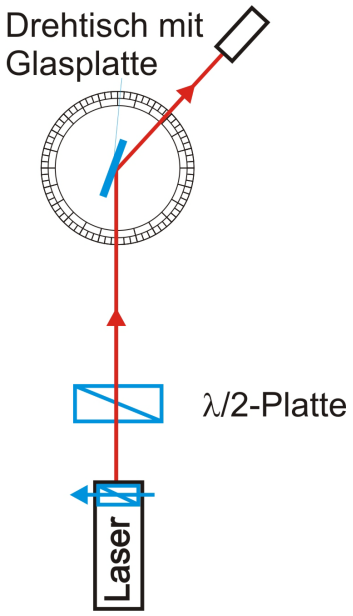
3. Die Spannung, die der Fotodetektor angezeigt, lässt sich über einen Verstärker einstellen. Justieren Sie die Anzeige mit der $\lambda/2$-Platte im Strahlengang aber ohne Analysator auf $U_0 \approx 5$ V; $U_0 \sim I_0$ (maximale Intensität) notieren.



10

4. Justieren Sie mit der $\lambda/2$-Platte die Schwingungsebene horizontal, also parallel zur Einfallsebene (Stichpunkte: Glasplatte und *Brewsterwinkel*; Kronglas: $n = 1{,}51$).

5. Bestimmen Sie für diese parallele Komponente die Reflexion an der Glasplatte. Messen Sie dazu die Intensität $I_{\parallel}$ über die Fotospannung des Detektors in Abhängigkeit vom Einfallswinkel in Schritten von 5°, in der Umgebung des Brewsterwinkels in 1°-Schritten. Achten Sie darauf, dass der Laserstrahl den Drehtisch genau in der Mitte und den Fotodetektor in der richtigen Höhe trifft. Der Laser lässt sich vorne sowohl horizontal als auch vertikal justieren.



11

6. Um die Reflexion für die Schwingungsrichtung senkrecht zur Einfallsebene zu bestimmen, müssen Sie die $\lambda/2$-Platte etwas verdrehen. Wie muss sie eingestellt werden und wie kontrollieren Sie das? Messen Sie wie oben für diese senkrechte Komponente $I_{\perp}$ die Reflexion an der Glasplatte.

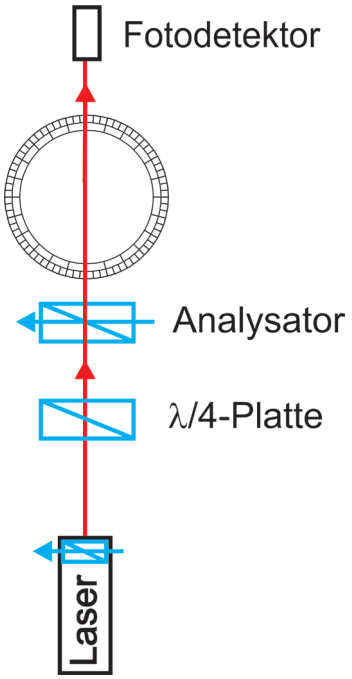
7. Prüfen Sie nach 5. und 6. jeweils, ob sich die Intensität I_e des Lasers geändert hat (I_e wird für die Auswertung benötigt).

Auswertung: Tragen Sie für beide Messreihen das Reflexionsvermögen $R = I/I_e$ graphisch über dem Einfallswinkel auf. Extrapolieren Sie die Messkurven bis auf 0° und auf 90°. Wie hoch ist danach das gemessene Reflexionsvermögen bei senkrechtem Lichteinfall? Vergleichen Sie Ihren Wert mit dem aus der Fresnelschen Formel berechneten.

Zirkular polarisiertes Licht

Erzeugen Sie mit der $\lambda/4$-Platte aus linear polarisiertem Licht zirkular polarisiertes. Bei zirkular polarisiertem Licht sollte die Intensität nach dem Analysator unabhängig von dessen Richtung überall gleich groß sein. Wenn Sie die $\lambda/4$-Platte einfügen, werden Sie feststellen, dass es leicht ist, elliptisch polarisiertes Licht zu erzeugen. Um zirkular polarisiertes Licht zu erreichen, müssen Sie die $\lambda/4$-Platte genau unter …° zur optischen Achse treffen und justieren. Das gelingt nur, wenn Sie die $\lambda/4$-Platte feinfühlig verdrehen und die Intensität am Detektor bei Rotation des Analysators verfolgen.

Messen Sie einmal für extrem elliptisches und einmal für möglichst zirkulares Licht die Intensität in Abhängigkeit vom Drehwinkel des Analysators in Schritten von 15°.



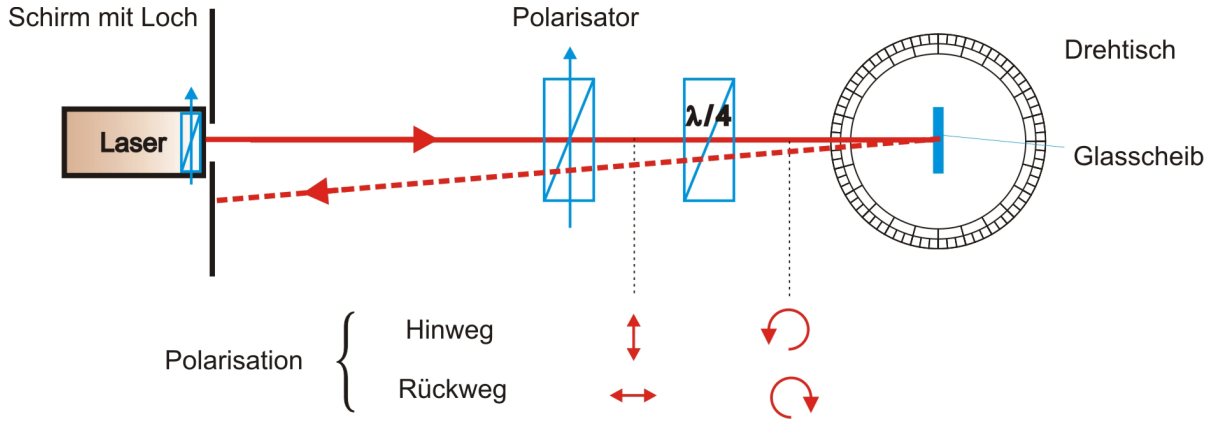
12

Auswertung:

Graphische Darstellung auf Polarkoordinatenpapier (im Netz als pdf-file herunterladen!).

Optische Rückwegsperre

In optischen Versuchsaufbauten wird Licht oft durch Reflexion auf demselben Weg zurückgeschickt auf dem es gekommen ist. Das ist bei Lichtleitern für Signalübertragungen unerwünscht und bei starker Rückkopplung in den Laser mitunter katastrophal. Mit zirkular polarisiertem Licht können Sie den Rückweg des Lichts sperren!



13 Versuchsaufbau. Die Glasscheibe wird etwas verdreht, so dass der Rückreflex auf dem Schirm dicht neben dem Loch erscheint. Zunächst den Polarisator auf maximale Durchlässigkeit justieren, dann die $\lambda/4$-Platte einsetzen und ganz langsam drehen. Achten Sie darauf, dass der zurücklaufende Strahl wieder beide optische Bauteile durchlaufen kann.

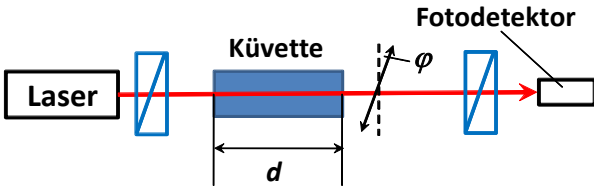
Messungen: keine, aber Beschreibung und Erklärung.

Polarisiertes Licht durch Streuung

Dieser Versuch gelingt bei klarem Wetter am eindrucksvollsten. Betrachten Sie den Himmel in verschiedenen Richtungen durch eine Polarisationsfolie. Bei fester Blickrichtung wird der Polarisator vor dem Auge gedreht. In welcher Himmelsrichtung ist der Polarisationsgrad am größten? Erklärung?

Natürliche optische Aktivität

Manche Materialien, sog. chirale, also händige Verbindungen, drehen die Polarisationsrichtung beim Durchgang des Lichts um einen Winkel φ. Die Chiralität kann durch spiralig angeordnete Moleküle erreicht werden (in festen Körpern) oder auch durch schraubenförrmige Moleküle. Dann tritt der Effekt auch in Lösungen auf. Hier soll eine Lösung einfacher Saccharose, $C_{12}H_{22}O_{11}$, untersucht werden.

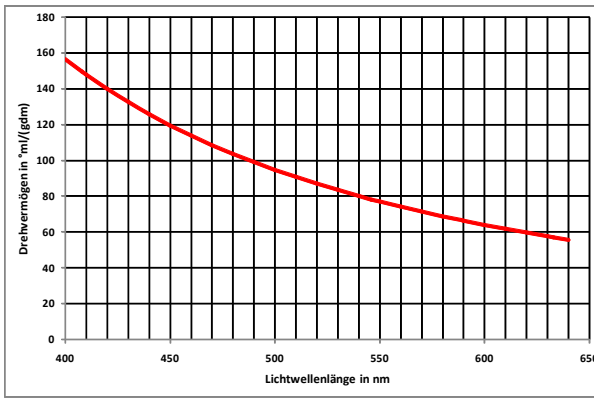


14 Versuchsanordnung zur Messung der optischen Aktivität einer Saccharose-Lösung

Die Winkelgröße der Drehung ist dabei proportional zur Dicke d des durchstrahlten Substrates und der Konzentration C (in kg/m³) des optischen aktiven Materialbestandteils.

$$\varphi = [\varphi]_{\lambda;T} \cdot d \cdot C.$$

Die Größe $[\varphi]_{\lambda;T}$ ist das spezifische Drehvermögen des Materials. Der Wert hängt von der Wellenlänge des Lichts und von der Temperatur ab. Dieser Effekt wird als *optische Rotationsdispersion* bezeichnet. Für Saccharose ist der Literaturwert $[\varphi]_{\lambda,T} = 66{,}5°\text{ml}/(\text{g}\cdot\text{dm})$ für $\lambda = 589$ nm. Die etwas gewöhnungsbedürftige Einheit hat ihren Grund in den Dimensionen der traditionellen Messgeräte.



15 Optische Rotationsdispersion von Saccharose; Fitparameter $\varphi_0 = 12{,}85°$; $\lambda_0 = 146{,}73$ nm

Abb. 15 zeigt das Ergebnis einer Anpassung, wie sie in der Sacchimetrie verwendet wird:

$$[\varphi]_{\lambda,20°C} = \varphi_0 \cdot \frac{\lambda_0^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2}$$

Dabei wurden folgende drei Litertaturwerte verwendet[1] $[\varphi]_{407{,}9\text{nm};20°C} = 149{,}38\ °\text{ml}/(\text{g}\cdot\text{dm})$, $[\varphi]_{546{,}1\text{nm};20°C} = 78{,}20°\text{ml}/(\text{g}\cdot\text{dm})$ und $[\varphi]_{633\text{nm};20°C} = 57{,}07°\text{ml}/(\text{g}\cdot\text{dm})$.

Mit dem Versuchsaufbau nach Abb. 14 messen Sie das Drehvermögen von Saccharose. Dazu verwenden Sie die vorgefertigte Normallösung mit 26 g/100 cm³.

(1) Nur Lösungsmittel und Gefäß:
Bestimmen Sie den Einfluss des Lösungsmittels und der Gefäßwandung und messen Sie die Drehung des Polarisationswinkels φ_0 ohne Zucker, nur mit destilliertem Wasser. Bestimmen Sie d (nicht vergessen!).

(2) Zuckerlösung und Gefäß
Nun messen Sie die Drehung φ_m der Polarisationsrichtung mit der Zuckerlösung.

(3) Aus (1) und (2) erhalten Sie Ihren Messwert $\varphi = \varphi_m - \varphi_0$

Führen Sie Schritte (1) bis (3) 5mal durch und bestimmen Sie φ als Mittelwert. Führen Sie eine komplette Fehlerrechnung durch. Vergleichen Sie Ihren Messwert mit dem Literaturwert (nach Abb. 15).

[1] vgl. Kohlrauch; Praktische Physik, Bd.1 ,580