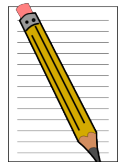


Polarisation

Polarisation ist eine wichtige Eigenschaft von elektromagnetischen Wellen und insbesondere auch dem sichtbaren Licht. In diesem Versuch untersuchen Sie die Auswirkungen des Polarisations-Zustands von Licht auf dessen Reflexionseigenschaften und lernen praktische Anwendungen der Polarisation kennen.

Schriftliche VORbereitung:

- (V1) Machen Sie sich mit dem Modell der *Elektromagnetischen Welle* zur Beschreibung von Licht vertraut.
- (V2) Was ist linear polarisiertes, zirkular polarisiertes, elliptisch polarisiertes, unpolarisiertes Licht?
- (V3) Erklären Sie Phänomene bzw. technische Anwendungen: 3D-Kino, Liquid Crystal Display (LCD), Spannungspolarisation und Polarisation des Taghimmels.
- (V4) Begründen Sie das Gesetz von Malus trigonometrisch: 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 $I(\varphi) = I_0 \cdot \cos^2(\varphi)$.
- (V5) Wie hängen die Graphen von $R_{||}(\alpha)$ und $R_{\perp}(\alpha)$ mit [Abbildung 3](#) und [Gleichung 5](#) zusammen? Erstellen Sie eine qualitative Skizze des Verlaufs von $R_{||}(\alpha)$; $R_{\perp}(\alpha)$; ($n_1 \approx 1$, $n_2 = 1,5$).
- (V6) Wodurch wird die Einfallsebene festgelegt? Erstellen Sie hierzu am besten eine Skizze.
- (V7) Beim Brewsterwinkel α_B stehen reflektierter und transmittierter Lichtstrahl senkrecht zueinander. Berechnen Sie den Brewsterwinkel als Funktion von n_1 und n_2 aus dem Snelliusschen Brechungsgesetz. Wie groß ist er für den Übergang von Luft $n_1 \approx 1$ zu Kronglas $n_2 = 1,5$?



1 Ziele und Hintergründe

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

$$\vec{\mathcal{E}}(\vec{r}, t) = \vec{e} \mathcal{E}_0 \cdot \sin(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}). \quad (1)$$

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 Elektrischen 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 zerlegt werden:

$$\xi(z, t) = \vec{e}_x \xi_0 \cdot \sin(\omega t - k \cdot z) + \vec{e}_y \xi_0 \cdot \sin(\omega t - k \cdot z + \delta) \quad (2)$$

Technisch angewandt werden Polarisierungseffekte auch in jeder LCD (Liquid Crystal Display)-Anzeige. Abb. 1 demonstriert, dass ein LCD polarisiertes Licht abgibt. Für den rechten Bildteil wurde der Bildschirm ohne Filter fotografiert. Für den linken Bildteil wurde ein Polfilter vor die Kamera gesetzt, das das Licht vom Bildschirm nicht durchließ. Dort allerdings, wo eine Plastiksachtel im Wege steht, geschieht Überraschendes (Stichwort: Spannungspolarisation).



Abb. 1: Spannungspolarisation durch eine Plastiksachtel; links mit Polarisator, rechts ohne Polarisator. *Quelle:* Archiv Rüdiger Scholz

2 Grundlagen zum Versuch

2.1 Der Aufbau

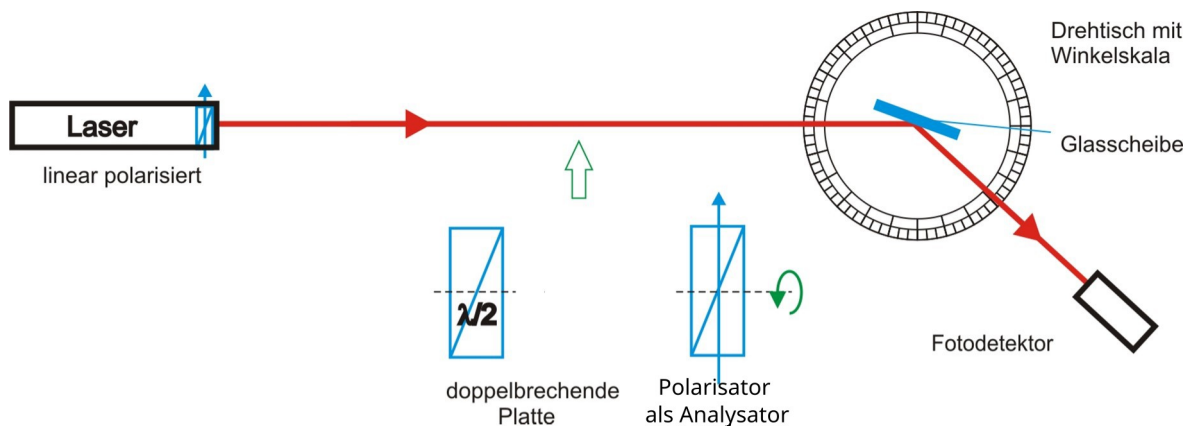


Abb. 2: Schematische Skizze des Versuchsaufbaus: Laser, Goniometertisch mit Glasscheibe und der Fotodetektor ermöglichen es die Wirkweisen verschiedener Polarisationsfilter zu analysieren.

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

2.2 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_{\parallel} , für den parallel zur Einfallsebene polarisierten Anteil und ρ_{\perp} für den dazu senkrechten Anteil:

$$\rho_{\parallel} = \frac{A_{r,\parallel}}{A_{e,\parallel}} = \frac{n_2 \cos(\alpha) - n_1 \cos(\beta)}{n_2 \cos(\alpha) + n_1 \cos(\beta)} = \frac{\tan(\alpha - \beta)}{\tan(\alpha + \beta)} \quad (3)$$

und

$$\rho_{\perp} = \frac{A_{r,\perp}}{A_{e,\perp}} = \frac{n_1 \cos(\alpha) - n_2 \cos(\beta)}{n_1 \cos(\alpha) + n_2 \cos(\beta)} = -\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (4)$$

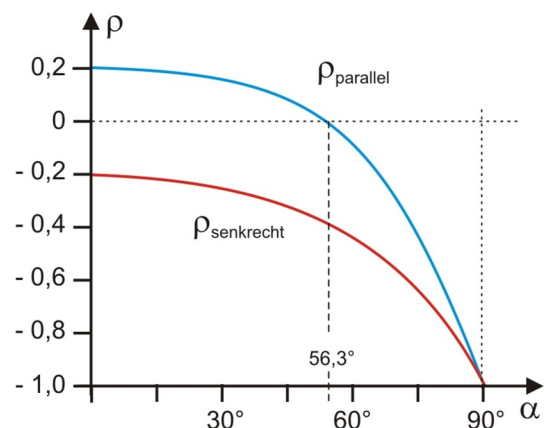


Abb. 3: Die Reflexionskoeffizienten ρ_{\parallel} und ρ_{\perp} für eine Luft-Glas-Grenzfläche mit $\frac{n_2}{n_1} = 1,5$

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

$$I = c \epsilon_0 \epsilon_r \langle \xi^2(\vec{r}, t) \rangle_{\text{eine Periode}} \tag{5}$$

Bezogen auf die Intensitäten werden Reflexion und Transmission durch das Reflexionsvermögen R bzw. Transmissionsvermögen T beschrieben. Die Reflexionsvermögen R_{\perp} und R_{\parallel} ergeben sich somit aus den Quadraten der Gleichungen (3) und (4). Wenn keine Absorption stattfindet, folgt T dann aus $R + T = 1$.

2.3 Brewsterwinkel

Wenn reflektierter und transmittierter Strahl orthogonal zueinander stehen $\alpha + \beta = \frac{\pi}{2}$ dann folgt aus Gleichung (3) $\rho_{\parallel} = 0$, vgl. Abbildung 3. Anschaulich: An der Grenzfläche werden Elektronen zum Schwingen in Polarisationsrichtung angeregt. Hierdurch werden Dipole induziert, deren Dipolachse parallel zur Polarisationsrichtung ausgerichtet ist. Die Abstrahlcharakteristik des Dipols ist proportional zu $\sin(\theta)^2$ wobei θ der Polariswinkel ist. Kurzum, in Richtung der Dipolachse beziehungsweise hier in Richtung des reflektierten Strahls wird keine Strahlung emittiert, während in Richtung des gebrochenen die maximale Energie emittiert wird. In den Vorbereitungsaufgaben leiten Sie die Formel für den Brewsterwinkel α_B aus dem Brechungsgesetz her.

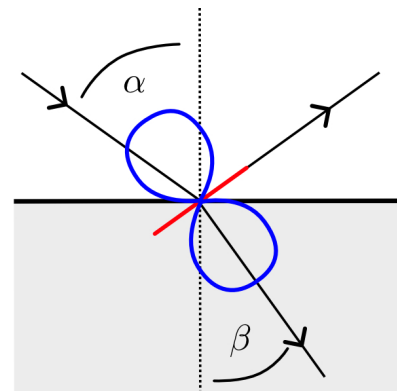
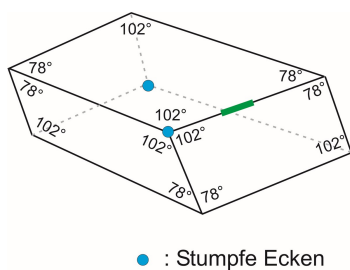
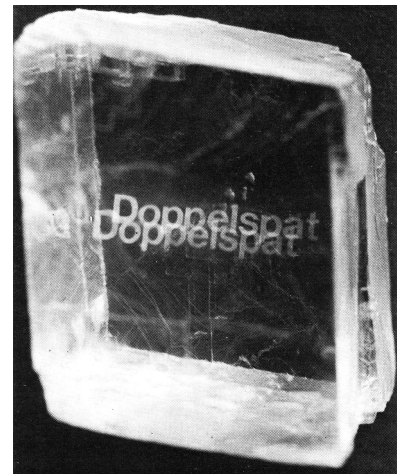


Abb. 4: Veranschaulichung des Brewsterwinkels mittels des Modells zum hertzschen Dipol

2.4 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.

Die natürlichen Spaltflächen eines Kalkspats bilden ein Rhomboeder (siehe Abb. 6). 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.



● : Stumpfe Ecken

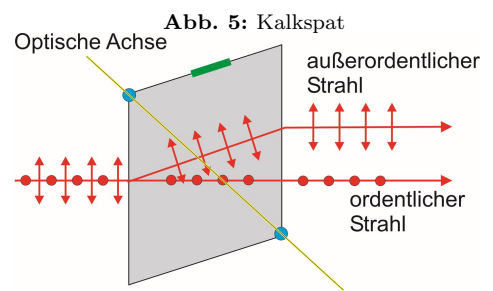
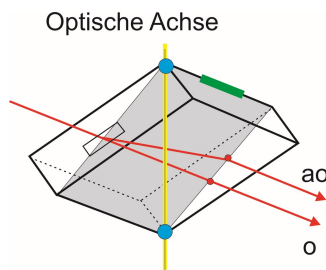


Abb. 5: Kalkspat
Abb. 6: Kalkspat als doppelbrechender Kristall, Abbildungen aus aufgeführten Quellen

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*.

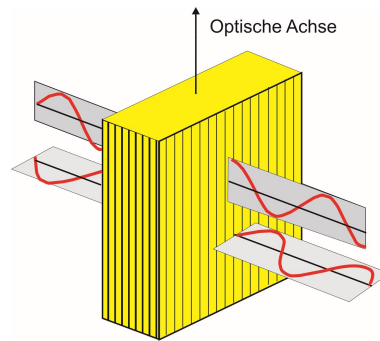


Abb. 7: Quelle: Roman Sexl

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.

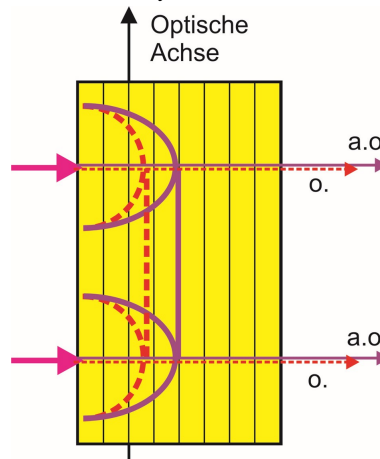


Abb. 8: Quelle: Roman Sexl

$\lambda/2$ -Plättchen drehen die Polarisation

Details einer $\lambda/2$ -Platte: Die Dicke d des Kristalls ist hier gerade so groß, dass der *Gangunterschied* zwischen ordentlichem und außerordentlichem Strahl $\Delta = \lambda/2$ beträgt. Bei einem Einfallspolarisationswinkel von 45° zur optischen Achse wird die *Polarisationsrichtung* um 90° gedreht. Bei einer beliebigen Polarisationsrichtung α relativ zur optischen Achse wird die Polarisationsrichtung um 2α gedreht.

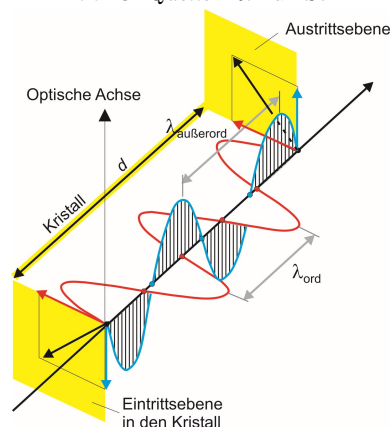


Abb. 9: Quelle: Hecht

Messungen

2.1 Das Polarisationsfilter

In dieser Messung analysieren Sie die Wirkung des Polarisationsfilters und überprüfen das Gesetz von Malus:

$$I(\varphi) = I_0 \cos(\varphi)^2. \quad (6)$$

Der verwendete Fotodetektor gibt eine Spannung U_D , welche proportional zur Irradianz I ist. Haltern Sie einen Polarisationsfilter vor dem Laser. Justieren Sie den Laser, Fotodetektor und das Polarisationsfilter, sodass der Laserstrahl den Fotodetektors optimal trifft und der Detektor nicht gesättigt ist ($U_D < 4,5 \text{ V}$). Letzteres erreichen Sie, in dem Sie die Intensität mit dem Polarisationsfilter verringern. Dieser Schritt ist im Versuch grundlegend. Sie müssen diesen Schritt auch bei den nächsten Messungen durchführen bzw. überprüfen.

- (M1) Fügen Sie einen weiteren Polarisationsfilter in den Aufbau als Analysator ein und stellen Sie den Analysator so ein, dass Sie eine maximale Irradianz $I_0 \propto U_0$ messen. Notieren Sie sich U_0 und den zugehörigen Winkel φ_0 .
- (M2) Drehen Sie den Analysator in 15° -Schritten und messen Sie jeweils die Spannung U_D für eine halbe Umdrehung des Analysators.
- (A1) Tragen Sie die relativen Spannungen $\frac{U_D}{U_0}$ gegen den Analysatorwinkel auf.
- (A2) Führen Sie ein Fit mit der Funktion $A \cdot \cos\left(\frac{\pi}{180} \cdot (x + B)\right)^2 + C$ durch.
- (A3) Welche physikalische Bedeutung und ggf. Einheiten haben die Parameter der Fitfunktion?

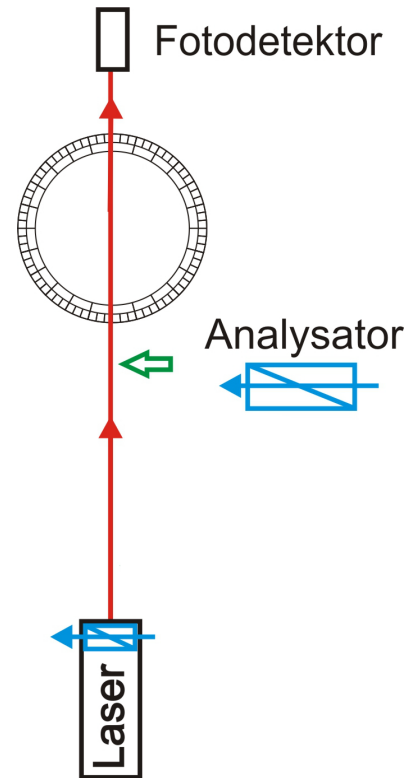


Abb. 10: Die Überprüfung des Gesetzes von Malus. Das Polarisationsfilter wird als Analysator genutzt, um die Polarisationsrichtung des Lasers zu bestimmen.

2.2 Polarisation als Phänomen

Fotografieren Sie eines dieser Polarisationsphänomene:

- Spannungspolarisation,
- Polarisation des Taghimmels oder
- Brewsterwinkel.

- (A4) Erklären Sie das Phänomen in eigenen Worten.

2.3 Reflexionsvermögen einer Glasplatte

Im folgenden werden Sie die Reflexion an einer optischen Grenzfläche (hier Prisma) untersuchen (Stichwort: Fresnel-Formeln). Um die lineare Polarisation des Lasers senkrecht bzw. parallel zur Einfallsebene auszurichten, nutzen Sie eine Halbwellenplatte. Achten Sie wieder im Vorfeld zu den Messungen darauf, dass der Fotodetektor nicht gesättigt ist ($U_D < 4,5 \text{ V}$). Nehmen Sie U_0 erneut auf.

- (M3) 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. Das Prisma sollten Sie hierzu aus dem Aufbau entfernen. Ohne Auswertung.
- (M4) Justieren Sie mit der $\lambda/2$ -Platte die Schwingungsebene horizontal, also parallel zur Einfallsebene (Stichpunkte: Brewsterwinkel; Vorbereitungsaufgabe 7).
- (M5) Bestimmen Sie für die parallele Komponente die Reflexion an der Glasplatte $R_{\parallel}(\alpha)$. 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, je 6 Messungen in jede Richtung. 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.
- (A5) Tragen Sie das Reflexionsvermögen $R = U/U_0$ graphisch gegen den Einfallswinkel auf.
- (A6) Vergleichen Sie qualitativ Ihre Messkurve mit dem theoretischem Verlauf aus der Vorbereitung.
- (A7) Bestimmen Sie den Brewsterwinkel und vergleichen diesen mit dem in der Vorbereitung berechneten Theoriewert. (Unsicherheit bestimmen!)

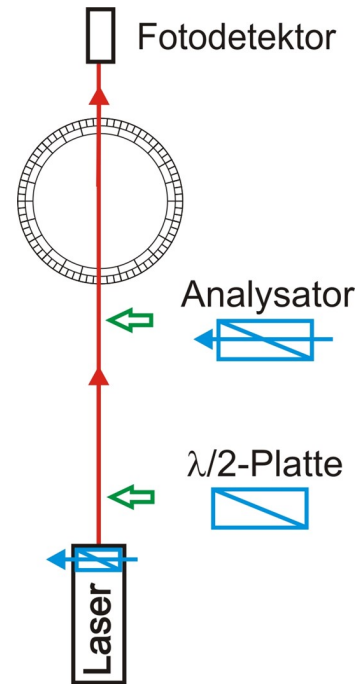


Abb. 11: Mit diesem Aufbau (Laser - Polarisationsfilter - Halbwellenplatte - Polarisationsfilter) überprüfen Sie die Wirkung der Halbwellenplatte (M3).

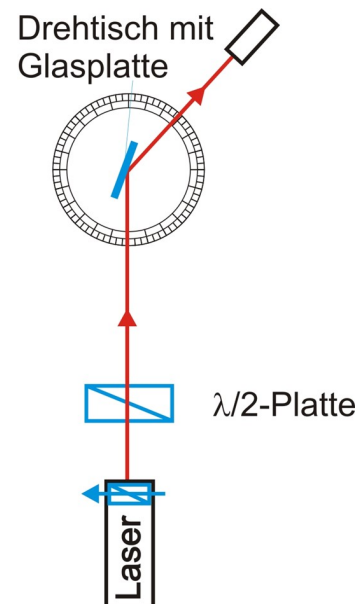


Abb. 12: Mittels des eingesetzten Prismas untersuchen Sie das Reflexionsvermögen an einer optischen Grenzfläche (ab (M4)). Das zweite Polarisationsfilter wurde entfernt.

2.4 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 schraubenförmige Moleküle. Dann tritt der Effekt auch in Lösungen auf. Hier soll eine Lösung einfacher Saccharose, $C_{12}H_{22}O_{11}$, untersucht werden.

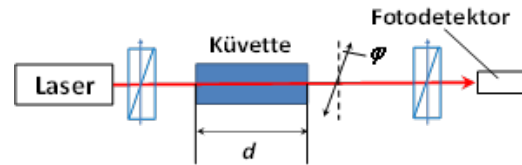


Abb. 13: Versuchsanordnung zur Messung der optischen Aktivität einer Saccharose-Lösung

Die Winkelgröße der Drehung ist dabei proportional zur Dicke d des durchstrahlten Substrates und der Konzentration C (in kg/m^3) des optischen aktiven Materialbestandteils.

$$\varphi = [\varphi]_{\lambda;T} \cdot d \cdot C \quad (7)$$

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 $[\varphi]_{\lambda;T} = 66,5^\circ ml/g \cdot dm$ für $\lambda = 589nm$. Die etwas gewöhnungsbedürftige Einheit hat ihren Grund in den Dimensionen der traditionellen Messgeräte.

Abbildung 14 zeigt das Ergebnis einer Anpassung, wie sie in der Sacchimetrie verwendet wird:

$$[\varphi]_{\lambda;20^\circ C} = \varphi \cdot \frac{\lambda_0^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2} \quad (8)$$

Dabei wurden die folgenden drei Literaturwerte verwendet:

$$[\varphi]_{407,9nm;20^\circ C} = 149,38^\circ ml/g \cdot dm,$$

$$[\varphi]_{546,1nm;20^\circ C} = 78,20^\circ ml/g \cdot dm \text{ und } [\varphi]_{633nm;20^\circ C} = 57,07^\circ ml/g \cdot dm.$$

Mit dem Versuchsaufbau nach [Abbildung 13](#) messen Sie das Drehvermögen von Saccharose. Dazu verwenden Sie die vorgefertigte Normallösung mit $C = \frac{26g}{100ml}$. Bestimmen Sie die Strecke d .

(M6) **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. Drehen Sie hierzu den 2. Polarisator bis die maximale Spannung erreicht wird und notieren Sie diesen Winkel.

(M7) **Zuckerlösung und Gefäß:** Nun messen Sie die Drehung φ_m der Polarisationsrichtung mit der Zuckerlösung.

(M8) Aus (M6) und (M7) erhalten Sie Ihren Messwert $\varphi = \varphi_m - \varphi_0$.

(M9) Wiederholen Sie die Schritte (M6) bis (M8) 5 mal.

(A8) Bestimmen Sie das mittlere spezifische Drehvermögen bezüglich der Laserwellenlänge $\langle [\varphi]_{633nm;20^\circ C} \rangle$ aus den 5 Messungen und führen Sie die Betrachtung der Unsicherheiten durch.

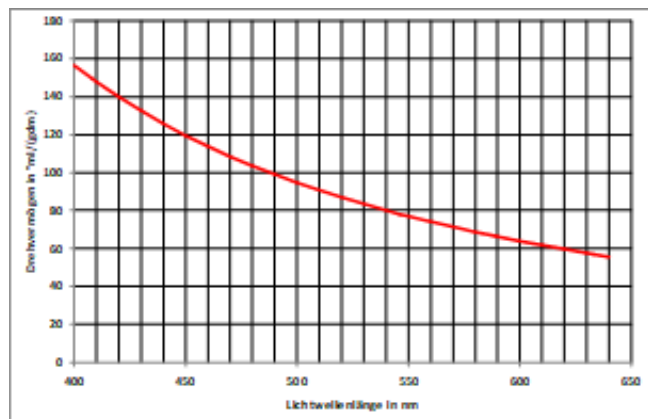


Abb. 14: Optische Rotationsdispersion von Saccharose; Fitparameter $\varphi_0 = 12,85^\circ$; $\lambda_0 = 146,73nm$ mit der Fitfunktion $[\varphi]_{\lambda;20^\circ C} = \varphi \cdot \frac{\lambda_0^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2}$

(A9) Vergleichen Sie das gemessene mittlere spezifische Drehvermögen mit dem Theoriewert bei 633 nm. Ist Ihre Messung konsistent?

Literatur

- [1] Demtröder: *Experimentalphysik 2 - Elektrizität und Optik*, DOI: 10.1007/978-3-642-29944-5
- [2] Gobrecht H, Eichler H, Bergmann L, Schäfer C (2019): *Optik*. Berlin, Boston: De Gruyter, DOI: 10.1515/978-3-111-71061-7
- [3] Hecht, E (2002): *Optics*. San Francisco.
- [4] Hering E, Martin R, Stroher, M (2019): *Physik für Ingenieure*. New York: Springer-Verlag, DOI: 10.1007/978-3-662-22291-1
- [5] Scholz, R (2014): *Analyse und Präsentation von Messdaten* Leibniz Universität Hannover, https://www.praktikumphysik.uni-hannover.de/fileadmin/praktikumphysik/Zusatzmaterial/Crash_Messunsicherheit.pdf