



Physikalisches Praktikum II

Bachelor Physikalische Technik: Lasertechnik
Prof. Dr. H.-Ch. Mertins, MSc. M. Gilbert

O08 Polarisation

(Pr_PhII_O08_Polarisation_7, 25.10.2015)

Name	Matr. Nr.	Gruppe	Team
1.			
2.			
Protokoll ist ok	<input type="radio"/>	Datum	Abtestat
Folgende Korrekturen nötig	<input type="radio"/>		

Hinweis

Lesen Sie die Versuchsanleitung (inkl. Versuchsdurchführung & Auswertung!) gründlich durch und machen sich mit den Begrifflichkeiten vertraut. Die Teilnahme am Praktikum erfordert das erfolgreiche Beantworten der Zulassungsfragen am Versuchstag (siehe Anleitung) oder alternativ eine kurze Vorstellung eines Themengebietes an der Tafel.

1. Ziel

Die Polarisation ist neben der Intensität und der Wellenlänge λ (Farbe) die dritte grundlegende Eigenschaft des Lichtes. Ihr Nachweis zeigt, dass Licht eine transversale Welle ist. Viele spektroskopische Methoden der Materialanalyse nutzen die Polarisation des Lichtes, so z.B. die Bestimmung des Zuckergehaltes einer Lösung. LCD-Displays verwenden die Polarisation von Licht, um zwischen Hell und Dunkel umzuschalten. Außerdem werden mit Polarisation Materialeigenschaften wie Doppelbrechung erklärt. Aus doppelbrechenden Materialien werden u.a. schnelle optische Schalter hergestellt, die für die Erzeugung kurzer Pulse in Lasern verwendet werden.

In diesem Praktikum werden grundlegenden Phänomene der Lichtpolarisation untersucht.

2 Theorie**2.1 Polarisiertes Licht**

Licht ist eine transversale elektromagnetische Welle bei der ein elektrisches E-Feld, gekoppelt mit einem magnetischen B-Feld mit gleicher Frequenz f schwingen. Licht kann sich daher auch ohne Materie im Vakuum ausbreiten. Die Vektoren E und H stehen senkrecht aufeinander und jeweils senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, gegeben durch den Wellenvektor \vec{k} . Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum beträgt $c = 299792459$ m/s und ist entsprechend der speziellen Relativitätstheorie unabhängig von der Geschwindigkeit des Beobachters. Im Folgenden betrachten wir nur das E-Feld der Welle:

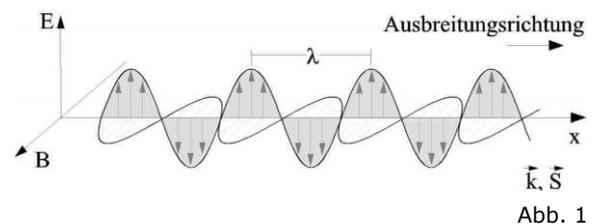


Abb. 1

$$(1) \quad E(x, t) = E_0 \sin(kx - \omega t), \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \omega = 2\pi f$$

Der zeitliche Verlauf $E(t)$ kann aufgrund der hohen Frequenz von einigen 10^{14} Hz nicht gemessen werden, sondern nur eine zeitlich gemittelte Größe wie die Intensität:

$$(2) \quad I = \frac{P}{A} \sim E_0^2$$

Die Intensität ist definiert als die pro Fläche A auftreffende Leistung P (auch Bestrahlungsstärke genannt).

Linear polarisiertes Licht zeichnet sich dadurch aus, dass das E-Feld an jedem Ort in die selbe Schwingungsrichtung zeigt. Die meisten Lichtquellen liefern unpolarisiertes Licht, d.h. es ist ein statistisches Gemisch aus Lichtwellenzügen mit allen möglichen Schwingungsrichtungen des E-Feldes existieren (Abb. 2).

2.2 Polarisatoren

Mittels Polarisator kann aus unpolarisiertem Licht linear polarisiertes Licht erzeugt, genauer, herausgefiltert werden. Jede Polarisation, d.h. das entsprechende E-Feld, kann vektoriell durch 2 zueinander orthogonale E-Feld-Komponenten erzeugt werden. Der Polarisator lässt eine dieser Komponenten durch, die dazu orthogonale wird absorbiert. Durch Drehen des Polarisators um die Lichtrichtung kann jede gewünschte Polarisationsrichtung eingestellt werden. Umgekehrt kann der Polarisationszustand von Licht untersucht werden, indem der Polarisator um die Lichtrichtung gedreht wird. In dieser Anwendung heißt er

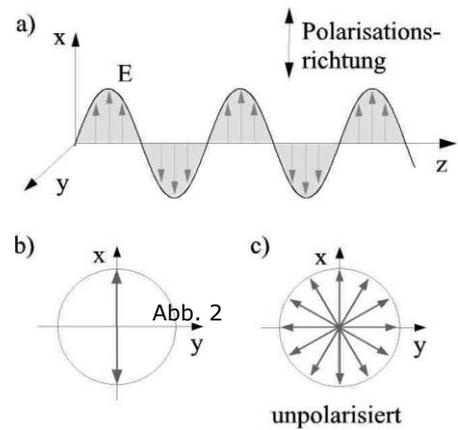


Abb. 2

Analysator. Stehen Lichtpolarisation und Durchlassrichtung des Analysators im Winkel $\theta = 0^\circ$ zueinander, so tritt maximale Lichtintensität ein. Für einen beliebigen Winkel θ wird nur die parallele Komponente ($E \cos \theta$) durchgelassen, so dass mit Gl. 2 für die Intensität folgt

$$(3) \quad I = I_0 \cos^2 \theta.$$

Die Messung der Winkelabhängigkeit der Intensität erlaubt daher die Bestimmung des Grades der linearen Polarisation.

Ein Polarisationsfilter (Polaroidfolie) basiert auf einem „Gitter“ aus langgezogenen, parallelen Molekülketten in einer dünnen, halbtransparenten Kunststoffolie. Schwingt das E-Feld des Lichtes parallel zur Molekülkette, so regt es dessen Elektronen zu Schwingungen längs der Kette an. Dabei wird Energie aus der Lichtwelle absorbiert, im Idealfall vollständig. Steht das E-Feld senkrecht zu den Molekülketten, so können die Elektronen des Moleküls kaum angeregt werden. Entsprechend wird nur wenig Energie aus der Welle absorbiert und ein Großteil der Welle kann das Filter passieren.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass es neben der linearen Polarisation auch zirkulare und elliptische Polarisationszustände des Lichtes gibt, die in diesem Praktikum aber nicht behandelt werden können.

2.3 Brewsterwinkel

Trifft unpolarisiertes Licht auf eine Glasplatte, so ist das reflektierte Licht teilweise linear polarisiert (Abb. 3). Der Grad der Polarisation hängt vom Einfallswinkel θ ab. Vollständig lineare Polarisation des reflektierten Lichtes tritt ein, wenn der gebrochene und der reflektierte Strahl einen rechten Winkel bilden. Nach dem Snelliusschen Brechungsgesetz hängt dieser Fall vom Brechungsindex n des Materials ab. Der entsprechende Einfallswinkel θ_B heißt Brewsterwinkel und es gilt:

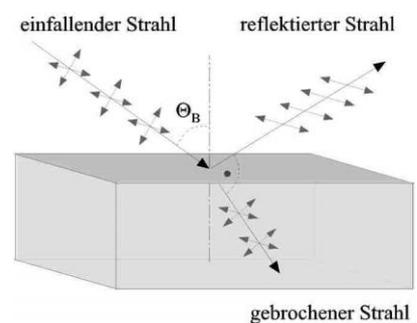


Abb. 3

$$(4) \quad \tan \theta_B = n$$

Zur Deutung des Brewsterphänomens betrachten wir den Prozess im atomaren Bild. Die Moleküle des Glases werden durch das elektrische Feld der einfallenden Lichtwelle zu Schwingungen angeregt. Sie

wirken dadurch wie kleine Antennen (Hertzscher Dipol), die selbst wieder Lichtwellen abstrahlen und zwar in das Glas hinein und aus dem Glas hinaus (reflektiertes Licht). Dabei unterscheiden wir zwei Schwingungsrichtungen der vom Licht angeregten Moleküle, d.h. wir teilen das einfallende unpolarisierte Licht in 2 Komponenten auf: 1) E-Feld senkrecht zur Einfallsebene 2) E-Feld parallel zur Einfallsebene. Die Einfallsebene wird aufgespannt durch den einfallenden und den reflektierten Lichtstrahl. Wichtig ist nun die Tatsache, dass ein Dipol (schwingendes Molekül) nicht in seine Längsrichtung abstrahlen kann. Stehen also gebrochener und reflektierter Strahl im rechten Winkel, so zeigt die Schwingungsrichtung der Moleküle, welche durch Licht mit dem E-Feld in der Einfallsebene angeregt werden, exakt in Richtung des reflektierten Strahls. Aber in diese Richtung kann der Dipol nicht abstrahlen. Nur solche Dipole können in die Reflexionsrichtung abstrahlen, die von senkrecht zur Einfallsebene polarisiertem Licht angeregt wurden. Deshalb besitzt das reflektierte Licht nur eine E-Feldkomponente senkrecht zur Einfallsebene und ist damit linear polarisiert. Die Materialabhängigkeit aus Gl. 4 erlaubt eine präzise Bestimmung des Brechungsindex durch Messung des Brewsterwinkels. Bei genauerer Betrachtung stellt man fest, dass ebenso wie n , auch θ_B von der Lichtwellenlänge abhängt. Bei Reflexion an Metallen ist, im Gegensatz zu Glas, das im Brewsterwinkel reflektierte Licht nie vollständig, sondern nur teilweise polarisiert.

2.4 Optische Aktivität

Einige Stoffe wie Quarz, Rohrzucker oder magnetische Materialien sind optisch aktiv. Dies bedeutet, dass beim Durchstrahlen dieser Materialien mit linear polarisiertem Licht sich die Polarisationssebene dreht (Abb.4). Der Drehwinkel α hängt von dem spezifischen Drehvermögen $\alpha_0(\lambda, T)$, der Wellenlänge des Lichtes, der Temperatur und der Dicke d des durchstrahlten Materials ab:

$$(5) \quad \alpha = \alpha_0(\lambda, T) d$$

Es gibt rechts- und auch links-drehende Substanzen. Die Ursache ist eine Unsymmetrie im Kristall (z.B. Quarz) bzw. in den Molekülen (z.B. Zuckerlösung). Durch Polarisationsmessungen des Lichtes nach der Wechselwirkung mit diesen Materialien können somit Information über die Bindungsstruktur der Atome gewonnen werden. In Lösungen ist der Drehwinkel zudem proportional zur Konzentration c

$$(6) \quad \alpha = \alpha_0(\lambda, T) c d$$

Für Lösungen von Rohrzucker bei 20° C findet man typischerweise $\alpha_0 = 66,5 \frac{\text{grad} \cdot \text{cm}^3}{\text{m} \cdot \text{g}}$ für gelbes

Licht. Damit kann aus der Messung des Drehwinkels der Polarisationssebene die Konzentration des Zuckers bestimmt werden, ein Standardverfahren zur medizinischen Blut- oder Harn-Untersuchung.

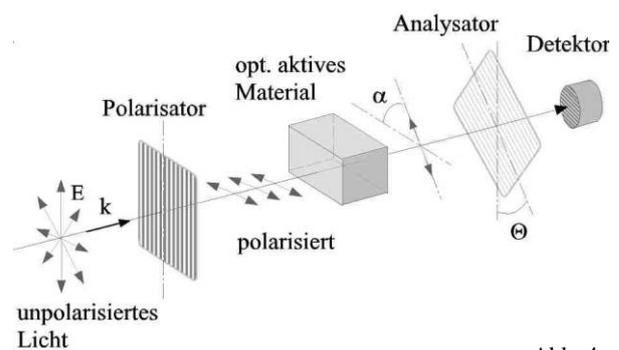


Abb. 4

2.5 Streuung

Trifft Licht auf kleine Partikel, z.B. Staub in der Luft oder die Luftmoleküle selbst, oder Nanopartikel in Kolloidlösungen, so wird ein Teil des Lichtes seitlich gestreut. Die Winkelverteilung der Streuintensität hängt im wesentlichen von der Größe d der Partikel im Vergleich zur Lichtwellenlänge λ ab. Wir betrachten nur den Fall der Rayleigh-Streuung mit $d \ll \lambda$. Wird weißes, unpolarisiertes Licht an kleinen Partikeln gestreut, so hat das gestreute Licht folgende Eigenschaften:

- 1) Streulicht ist linear polarisiert, wenn es im rechten Winkel zum einfallenden Strahl betrachtet wird, für andere Streuwinkel ist es teilweise polarisiert
- 2) das seitlich gestreute Licht ist bläulich gefärbt
- 3) das durchgehende Licht ist rötlich gefärbt

Zur Deutung der Polarisierungseigenschaften betrachten wir wieder die Partikel als Hertzsche Dipole. Das E-Feld der einfallenden Lichtwelle regt die Teilchen zu Schwingungen längs des E-Feldes an. Wie eine kleine Antenne emittieren die Partikel dann das Streulicht mit gleicher Frequenz in alle Richtungen, außer in Richtung der Schwingung (Längsrichtung der Antenne). Damit ist das quer zur Richtung des einfallenden Strahls gestreute Licht linear polarisiert. Zur Deutung der Farbabhängigkeit der Streuung müssen wir die Intensität der gestreuten Strahlung als Funktion der Lichtwellenlänge betrachten: $I_{\text{streu}} \sim 1/\lambda^4$. Das bedeutet, dass blaues Licht ($\lambda \sim 450$ nm) stärker gestreut wird als rotes Licht ($\lambda \sim 700$ nm). Deswegen erscheinen der Himmel blau und die Abendsonne rot.

Fragen

- Was ist die Polarisierung des Lichtes?
- Wie funktioniert ein Polarisationsfilter?
- Wie funktioniert eine Polarisationsmessung?
- Was ist der Brewsterwinkel? Wie kann aus ihm der Brechungsindex bestimmt werden?
- Was ist optische Aktivität?
- Wie kann man durch eine Polarisationsmessung den Blutzuckergehalt ermitteln?

3. Durchführung

- 3.1 **Polarisationsmessung:** Bauen Sie Lampe, Polarisator, Analysator und Photodiode auf der optischen Bank auf. Messen Sie den Photostrom $I(\theta)$ als Funktion des Winkels θ zwischen Polarisator und Analysator in 10° -Schritten für $-20^\circ < \theta < 200^\circ$ ($\theta = 0^\circ$ Durchlassrichtung). Der Photostrom ist proportional zur Bestrahlungsstärke.
- 3.2 **Brewsterwinkel:** Bauen Sie den Goniometer Tisch mit der Glasplatte hinter dem Polarisator auf. Der Analysator wird mit dem reflektierten Strahl mitgeführt (ohne Photodiode). Bestimmen Sie den Brewsterwinkel, indem Sie den Einfallswinkel des Lichtes suchen, für welchen sich das reflektierte Licht durch geeignete Drehung des Analysators auslöschen lässt.
- 3.3 **Optische Aktivität:** Bauen Sie Lampe, Polarisator, Zuckerlösung, Analysator und Photodiode in einem Strahlengang auf. Messen Sie die Weglänge des Lichtes in der Zuckerlösung. Stellen Sie den Analysatorwinkel θ_1 so ein, dass das durchgehende Licht ausgelöscht wird. Notieren Sie den Analysatorwinkel. Entfernen Sie die Zuckerlösung aus dem Strahlengang und korrigieren Sie den Analysatorwinkel, bis das Licht ausgelöscht wird (neuen Winkel θ_2 notieren). Die Differenz $\alpha = \Theta_2 - \Theta_1$ ergibt direkt den Drehwinkel der Zuckerlösung (Gl. 5).
- 3.4 **Streuung:** Setzen Sie den Polarisator vor die Zuckerlösung in den Strahlengang.
- Stellen Sie die einfallende Polarisation horizontal ein. Beobachten Sie die Lichtintensität quer zur Strahlrichtung (oben, links, rechts) qualitativ mit dem Auge.
 - Stellen Sie die Licht-Polarisation vertikal ein und beobachten Sie wieder wie in a).
 - Notieren Sie die Farbe des gestreuten und des durchgehenden Lichtes.
 - Entfernen Sie den Polarisator und bestimmen Sie den Streuwinkel, für welchen das gestreute Licht maximal polarisiert ist.

4. Auswertung

- 4.1 Stellen sie die Messung $I(\theta)$ aus 3.1 graphisch dar. Markieren Sie die Winkel γ , für Durchlass- und Sperrrichtung (gekreuzte Polarisatoren). Welche Periodizität hat $I(\theta)$?
- 4.2 Geben Sie den gemessenen Brewsterwinkel für das untersuchte Glas und berechnen Sie den effektiven Brechungsindex des Glases für das weiße Licht nach Gl. 4.
- 4.3 Bestimmen Sie aus dem Drehwinkel der Polarisation den Zuckergehalt der untersuchten Lösung (Rohrzucker bei 20°C : $\alpha_0 = 66,5 \text{ grad} \times \text{m}^{-1} \times \text{g}^{-1} \times \text{cm}^3$). Machen Sie hierzu die Fehlerrechnung.
- 4.5 Beschreiben Sie die Beobachtungen von 3.4 a) , b) und erklären Sie unter Verwendung des Modells des Hertzschen Dipols Ihre Beobachtung. Erklären Sie warum das Himmelslicht teilweise polarisiert ist. Unter welchem Streuwinkel (bzgl. zur Sonne) ist das Himmelslicht maximal polarisiert?