

Versuchsanleitung 0 5 : Polarisation

1 Einleitung

Lichtwellen als elektromagnetische Wellen sind Transversalwellen und somit polarisierbar.

Man unterscheidet linear polarisiertes, elliptisch (speziell auch zirkular) polarisiertes und unpolarisiertes Licht.

Bei linearer Polarisation schwingen die Vektoren der elektrischen und magnetischen Feldstärke in raumfesten Ebenen.

Elliptische (oder zirkulare) Polarisation entsteht durch die Überlagerung linear polarisierter Wellen. In Abhängigkeit von Amplitudenverhältnis und Phasendifferenz der Wellen bewegen sich hier die Spitzen der Feldstärkevektoren (rechts- oder linksdrehend) auf elliptischen (oder Kreis-) Spiralen um die Ausbreitungsrichtung.

Unpolarisiertes Licht besteht aus linear polarisierten Wellenzügen sehr kurzer Dauer und statistisch wechselnder Lage der Schwingungsebene. Im Zeitmittel ist keine Vorzugsrichtung festzustellen.

Die meisten Lichtquellen (z. B. Glühlampen, Gasentladungslampen, Leuchtstofflampen) emittieren unpolarisiertes Licht. Von bestimmten Lasertypen (z. B. Festkörperlasern, Gaslasern, Laserdioden) hingegen wird bereits polarisiertes Licht ausgestrahlt.

Unpolarisiert emittiertes Licht kann nachträglich polarisiert werden. Dazu sind folgende Effekte geeignet:

Doppelbrechung

In optisch anisotropen Kristallen (Kalkspat, Quarz, Glimmer) ist die Lichtgeschwindigkeit richtungsabhängig.

Ein eintretendes Lichtbündel wird dadurch in zwei senkrecht zueinander polarisierte Bündel mit (i. Allg.) unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen aufgeteilt.

Wird eines der Bündel durch Ausreflektieren (NICOLSches Prisma, GLAN-THOMPSON-Prisma) oder Absorption (Dichroismus bei Turmalin, Herapathit, ...) entfernt, so ist das austretende Licht linear polarisiert - die Anordnung wirkt als "Polarisator" (Prisma, Folie, Filter). Zur Untersuchung der Polarisation benutzte Polarisatoren nennt man Analysatoren.

Optische Anisotropien können auch in optisch isotropen Materialien durch mechanische Spannungen (Spannungsdoppelbrechung) oder durch elektrische Felder (KERR-Effekt, POCKELS-Effekt, Flüssigkristalle) hervorgerufen werden.

Streuung

Die Streuung des Lichtes an Kolloid- und Schwebeteilchen bewirkt eine (teilweise) Polarisation des Streulichtes (z. B. des blauen Himmelslichtes).

Reflexion und Brechung

Die dabei auftretenden Erscheinungen sind im vorliegenden Experiment zu untersuchen.

2 Grundlagen

In der Lichtwelle schwingen die Vektoren der elektrischen Feldstärke \vec{E} und der magnetischen Feldstärke \vec{H} sowohl senkrecht zueinander als auch senkrecht zur Richtung der Wellenausbreitung, die der sogenannte POYNTING-Vektor $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ (nach J. H. POYNTING, 1852-1914) angibt. Die Vektoren \vec{E} und \vec{S} spannen die Schwingungsebene des Lichtes auf, dazu senkrecht liegt die von \vec{H} und \vec{S} aufgespannte Polarisationsebene.

Der Betrag $S = E \cdot H$ des POYNTINGvektors ist die Energiestromdichte der Welle und gibt an, wieviel Leistung (Energie pro Zeit) die Welle durch ein senkrecht bestrahltes Flächenelement transportiert.

Auf die Grenzfläche zweier Medien mit den Brechzahlen n_1 und n_2 (Brechzahlverhältnis $\frac{n_2}{n_1} = n$) möge eine

Lichtwelle der Energiestromdichte S_e unter dem Einfallswinkel α treffen. Der Lichtstrahl (e) in Bild 1 entspricht ihrer Wellennormalen, er bildet mit dem Einfallslot die Einfallsebene. Die einfallende Welle bestehe sowohl aus einem parallel (p) als auch einem senkrecht (s) polarisierten Anteil. Bei paralleler Polarisation schwingt der \vec{E} -Vektor in der Einfallsebene. Bei senkrechter Polarisation schwingt der \vec{E} -Vektor senkrecht zur Einfallsebene.

Die Energiestromdichte S_e ist die Summe der Energiestromdichten $S_{e,p}$ und $S_{e,s}$. Beide erfahren an der Grenzfläche eine Aufspaltung in jeweils einen reflektierten ($S_{r,p} = R_p S_{e,p}$ bzw. $S_{r,s} = R_s S_{e,s}$) und einen eindringenden ($S_{d,p} = D_p S_{e,p}$ bzw. $S_{d,s} = D_s S_{e,s}$) Anteil. Die Größen R_p und R_s nennt man Reflexionskoeffizienten, D_p und D_s heißen Durchlasskoeffizienten. Die Reflexion erfolgt unter dem Winkel α , die

eindringenden Wellen laufen unter dem Winkel β und befolgen das SNELLIUS'sche Brechungsgesetz (nach W. SNELL VAN ROIJEN oder SNELLIUS, 1591-1626)

$$\sin \alpha = n \sin \beta \quad (2-1)$$

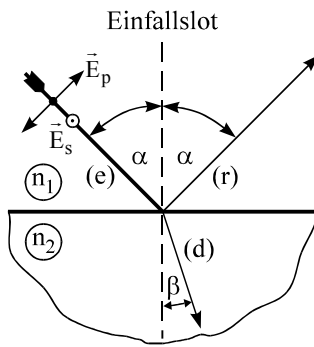


Bild 1 Reflexion und Brechung

Ihr weiteres Schicksal (Absorption, Reflexion oder Transmission) soll hier nicht betrachtet werden.

Wegen der Energieerhaltung muss $S_{e,p} = S_{r,p} + S_{d,p}$ und $S_{e,s} = S_{r,s} + S_{d,s}$ gelten. Folglich sind die Summen aus Reflexionskoeffizient und Durchlasskoeffizient gleich 1. Für R_p und R_s gelten (ohne Beweis) in Abhängigkeit vom Einfallswinkel α und vom Brechzahlverhältnis n die nachstehenden FRESNELSchen Formeln (nach A. J. FRESNEL, 1788-1827).

$$R_p = 1 - D_p = \frac{\tan^2(\alpha - \beta)}{\tan^2(\alpha + \beta)} \quad (2-2)$$

$$R_s = 1 - D_s = \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \quad (2-3)$$

Unpolarisiertes Licht besitzt das Reflexionsvermögen

$$R = \frac{R_s + R_p}{2} \quad (2-4)$$

Nach Gleichung (2-2) wird die Funktion $R_p(\alpha)$ beim sogenannten Polarisations- oder BREWSTER-Winkel α_p (nach Sir D. BREWSTER, 1781-1868) gleich Null, wenn $\alpha_p + \beta_p = \frac{\pi}{2}$ ist, d. h. reflektierter und einfallender Strahl aufeinander senkrecht stehen.

Für den BREWSTER-Winkel α_p folgt aus (2-1)

$$\sin \alpha_p = n \sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_p \right) = n \cos \alpha_p \quad \text{bzw.} \quad \tan \alpha_p = n \quad (2-5)$$

Unter diesem Winkel einfallendes parallel polarisiertes Licht wird nicht reflektiert. Fällt unpolarisiertes Licht ein, so ist der reflektierte Anteil senkrecht polarisiert.

Fällt unpolarisiertes Licht bei einem Winkel $\alpha \neq \alpha_p$ ein, so wird es mit dem (sogenannten) Polarisationsgrad

$$A = \frac{R_s - R_p}{R_s + R_p} \quad (2-6)$$

(teilweise) polarisiert.

Beim Einfallswinkel $\alpha = 0$ erhält man für

$$R(0) = R_s(0) = R_p(0) = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (2-7)$$

Die Herleitung von (2-7) ist aus (2-1) bis (2-4) leicht zu vollziehen, wenn für kleine Winkel α , β die Winkelfunktionen durch ihre Argumente ersetzt werden.

3 Versuchsanordnung

Die Versuchsanordnung ist an einem (im Bild 2 nicht gezeigten) Gestell befestigt.

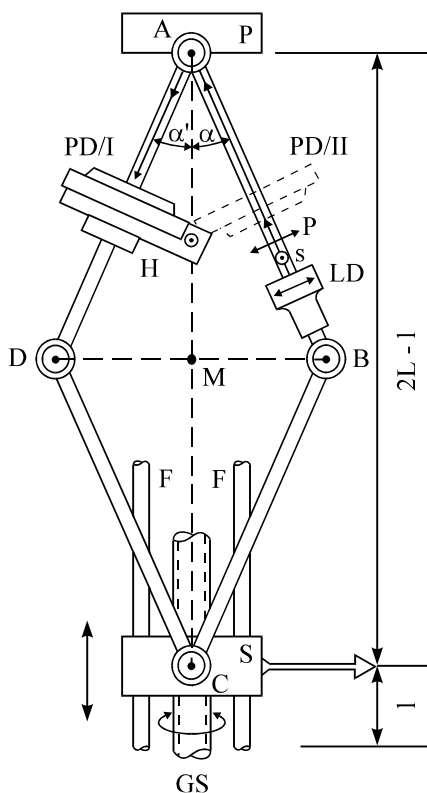


Bild 2 Versuchsanordnung (schematisch)

Ihr Kernstück ist das vertikal angeordnete Gelenkviereck ABCD, ein gleichseitiges Parallelogramm der Seitenlänge $L = 200 \text{ mm}$. Die Drehachse A ist mit dem Gestell fest verbunden und verläuft genau durch die Messfläche an der Unterseite der Probe P. Die Proben sind absorbierende oder rückseitig streuende Gläser, somit sind Störungen durch Rückseitenreflexe ausgeschlossen. Die Streuung des Lichtes an der Messfläche hingegen (auf Grund von Unebenheiten, Staub, Fingerabdrücken etc.) verursacht systematische Fehler. Es gelangt dann nicht das gesamte reflektierte Licht in die Photodiode.

Die Drehachse C ist am Schlitten S befestigt, der von der motorgetriebenen Gewindespindel GS an den beiden Führungen F nach oben oder unten bewegt werden kann. Am rechten oberen Arm sitzt die Laserdiode LD und am linken der Lichtempfänger, die Photodiode PD auf ihrer Halterung H. Diese Anordnung gewährleistet, dass der Laserstrahl bei allen einstellbaren Einfallswinkeln ($10^\circ < \alpha < 80^\circ$) nach der (in Bild 2 nicht sichtbaren) Reflexion an der Messfläche zwangsläufig auf die in Position I befindliche Photodiode trifft.

Klappt man (bei einem ganz bestimmten Winkel α') die Photodiode an ihrer Halterung in Position II, so kann die zur Normierung der Messwerte erforderliche Messung eines Bezugswertes am einfallenden Strahl vorgenommen werden.

Das rote Laserlicht (670 nm) ist mit 800 Hz moduliert, damit durch Wechsellichtmessung der Einfluss des Umgebungslichtes unterdrückt werden kann.

Die Laserdiode kann so um ihre Längsachse gedreht werden, dass sowohl parallele als auch senkrechte Polarisation des einfallenden Laserstrahls einstellbar ist.

Den Einfallswinkel α kann man nicht direkt ablesen. Vielmehr liest man die Position l des Schlittens auf einer vertikalen mm-Teilung der Länge $2L = 400 \text{ mm}$ ab und berechnet α aus dem Dreieck ABM in Bild 2 wie folgt:

$$\cos \alpha = \frac{\overline{AM}}{\overline{AB}} = \frac{\frac{1}{2}(2L-l)}{L} = \frac{2L-l}{2L} = 1 - \frac{l}{2L} = 1 - \frac{l}{400 \text{ mm}} \quad (3-1)$$

Die gesamte Stromversorgung sowie der Lasermodulator und der Vorverstärker für die Photodiode sind in das Gerät integriert. Das Ausgangssignal des Vorverstärkers wird über das Messinterface CASSY einem PC zugeführt. Zur Aufnahme eines Messwertes ist der Schlitten in die gewünschte Position l zu bringen, sodann wird l (in mm) über die Tastatur eingegeben und der zugehörige R -Messwert übernommen. Die Umrechnung von l in α nimmt der PC vor. Die Messdateien werden gespeichert, nach Aufgabenstellung bearbeitet und ggf. als Kurven ausgedruckt.

4 Aufgaben

- 4.1 Die Reflexionskoeffizienten R_s und R_p einer Probe sind zu messen und als Funktionen des Einfallswinkels graphisch darzustellen.
- 4.2 Für einen vorgegebenen Einfallswinkel berechne man Reflexionsvermögen R und Polarisationsgrad A .
- 4.3 Der Reflexionskoeffizient R_p ist in der Umgebung des BREWSTER-Winkels mit höherer Verstärkung und kleinerer Winkelschrittweite erneut zu messen. Daraus bestimme man α_p und n einschließlich ihrer Fehler.
- 4.4 Man schätze $R(0) \pm \Delta R(0)$ aus den Anfangspunkten der Messkurven $R_s(\alpha)$ und $R_p(\alpha)$ (siehe 4.1) ab und vergleiche mit dem Wert aus 4.3.

5 Fragen

- 5.1 Geben Sie eine Maßeinheit für die Energiestromdichte S an.
- 5.2 Fertigen sie eine Skizze der Vektoren \vec{E} , \vec{H} und \vec{S} an und kennzeichnen Sie in dieser die Schwingungsebene und die Polarisationssebene.
- 5.3 Berechnen Sie den BREWSTER-Winkel für $n = 1,6$.
- 5.4 Erklären Sie die Begriffe "isotrop" und "anisotrop".
- 5.5 Formulieren Sie das Brechungsgesetz von SNELLIUS und erläutern Sie die verwendeten Größen in einer Skizze.
- 5.6 Leiten Sie die Beziehung $R(0) = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}$ her.
- 5.7 Fertigen Sie eine Skizze des Strahlenganges für Reflexion und Brechung unter dem BREWSTER-Winkel und kennzeichnen Sie darin die Polarisationsrichtungen senkrecht und parallel.
- 5.8 Für senkrechten Lichteinfall sei das Reflexionsvermögen $R(0) = 0,05$. Man berechne daraus n .
- 5.9 Bei einem Einfallswinkel von 45° besitzt eine Probe die Reflexionskoeffizienten $R_s = 0,09201$ und $R_p = 0,00847$. Berechnen Sie den Polarisationsgrad des reflektierten Lichtes, wenn unpolarisiertes Licht eingestrahlt wird.
- 5.10 Man berechnet n aus dem BREWSTER-Winkel ($\alpha_p \pm \Delta\alpha_p$). Entwickeln Sie dazu eine Fehlerformel für Δn .

Literatur

- [1] Geschke, D. (Hrsg.) : Physikalisches Praktikum
 Teubner-Verlag, Leipzig, 2001
 ISBN 3-519-10206-4
- [2] Schneider, H. u. Zimmer, H. : Physik für Ingenieure, Bd. 2
 Fachbuchverlag, Leipzig, 1991
 ISBN 3-343-00174-0
- [3] Paul, H. (Hrsg.) : Lexikon der Optik, Bd. 1 u. 2
 Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg · Berlin, 2003
 ISBN 3-8274-1422-9