

Versuch 423

Fresnelsche Formeln

1. Aufgaben

- 1.1 Untersuchen Sie die Reflexion von Licht an einer Glasplatte, und bestimmen Sie das Reflexionsvermögen R in Abhängigkeit vom Einfallswinkel α_i für senkrechte und parallele Polarisierung!
- 1.2 Stellen Sie $R_{\perp}(\alpha_i)$ und $R_{\parallel}(\alpha_i)$ grafisch dar. Vergleichen Sie Ihre Meßwerte mit den zu erwartenden Ergebnissen!
- 1.3 Bestimmen Sie den Polarisationswinkel α_p und die Brechzahl des Glases!

2. Grundlagen

Stichworte:

elektromagnetische Welle, Intensität, Reflexion, Transmission, Absorption, Einfallsebene, Polarisationszustand, Brewsterwinkel, Goniometer, Brechzahl von Glas

Die von MAXWELL im Jahre 1873 aufgestellten Gleichungen beschreiben vollständig die Entstehung und Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im freien Raum und in verschiedenen Medien. Das System der gekoppelten Differentialgleichungen für die Felder \vec{E} und \vec{B} läßt sich aus der Ladungserhaltung, der Erhaltung des magnetischen Flußes und der Lorentzkraft auf bewegte Ladungen herleiten, und kann damit auf experimentell beobachtbare Größen zurückgeführt werden. Breiten sich elektro-magnetische Wellen aus, müssen an der Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichen Brechzahlen die Übergangsbedingungen für die Felder \vec{E} und \vec{B} erfüllt sein (siehe Literatur). Es ist aber unabhängig davon klar, daß der Poyntingsche Satz (Erhaltung des Energieflusses) gelten muß. Dieser kann in der Optik ganz einfach geschrieben werden.

$$R + T + A + S = 1 \quad (1)$$

Dabei ist das Reflexionsvermögen R einer Grenzfläche definiert als das Verhältnis der reflektierten Lichtintensität zur einfallenden Lichtintensität.

$$R = \frac{\text{reflektierte Intensität}}{\text{einfallende Intensität}} = \left| \frac{I_r}{I_e} \right| \quad (2)$$

Analog dazu ist das Transmissionsvermögen T definiert als das Verhältnis der transmittierten Lichtintensität zur einfallenden Lichtintensität. Für die in der Regel verwendeten optischen Materialien sind die Absorption A und die Streuung S gegenüber der Reflexion und Transmission vernachlässigbar.

Für den Übergang von Licht vom Medium 1 in das Medium 2 hat FRESNEL aufgrund von experimentellen Ergebnissen bereits 1821 die nach ihm benannten Gesetze mit Hilfe seiner elastischen Lichttheorie formuliert.

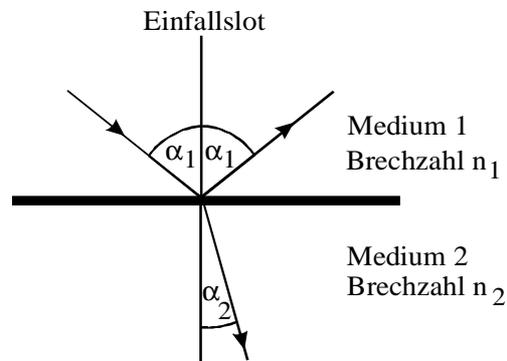


Bild 1: Verhältnisse an der Grenzfläche zweier Medien

Die folgenden Ausführungen sollen für nicht absorbierende und nicht leitende Materialien gelten. Im Versuch wird das Reflexionsvermögen einer Glasplatte bestimmt. Diese Größe ist abhängig vom Einfallswinkel α_1 und den beiden Brechzahlen n_1 und n_2 . Betrachtet man den nicht senkrechten Einfall der elektro-magnetischen Strahlung, muß die Polarisation dieser Strahlung zerlegt werden in die beiden linear unabhängigen Polarisationen senkrecht und parallel zur Einfallsebene. Für das Reflexionsvermögen gelten die FRESNEL'schen Formeln.

$$R_{\perp} = \left| \frac{n_1 \cdot \cos \alpha_1 - n_2 \cdot \cos \alpha_2}{n_1 \cdot \cos \alpha_1 + n_2 \cdot \cos \alpha_2} \right|^2 \quad (3)$$

$$R_{\parallel} = \left| \frac{n_2 \cdot \cos \alpha_1 - n_1 \cdot \cos \alpha_2}{n_2 \cdot \cos \alpha_1 + n_1 \cdot \cos \alpha_2} \right|^2 \quad (4)$$

Die Formeln für das Transmissionsvermögen können Sie der Literatur (z. B. /12/) entnehmen. Außerdem gilt das SNELLIUS'sche Brechungsgesetz.

$$n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \alpha_2 \quad (5)$$

Die oftmals in der Literatur angegebenen Formeln

$$R_{\perp} = \frac{\sin^2 (\alpha_2 - \alpha_1)}{\sin^2 (\alpha_2 + \alpha_1)} \quad (6)$$

$$R_{\parallel} = \frac{\tan^2 (\alpha_2 - \alpha_1)}{\tan^2 (\alpha_2 + \alpha_1)} \quad (7)$$

lassen sich mit Hilfe des Brechungsgesetzes und von Additionstheoremen einfach aus den Formeln (Gl. 3, 4) ableiten. Das Reflexionsvermögen für unpolarisiertes Licht berechnet sich aus dem arithmetischen Mittel von R_{\perp} und R_{\parallel} .

Als Spezialfall der FRESNELSchen Formeln soll noch das Reflexionsvermögen für den senkrechten Lichteinfall ($\alpha_1 = 0^\circ \rightarrow \alpha_2 = 0^\circ$) angegeben werden. In diesem Fall sind $R_{\perp}(\alpha_1)$ und $R_{\parallel}(\alpha_1)$ gleich groß.

$$R(\alpha_1 = 0) = \left| \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right|^2 \quad (8)$$

Das Reflexionsvermögen nimmt für senkrechte Polarisation von $\alpha_1 = 0^\circ$ bis $\alpha_1 = 90^\circ$ stetig zu. Im Falle paralleler Polarisation (\vec{E} liegt in der Einfallsebene) existiert ein Winkel, bei dem die Reflexion bis auf Null zurück geht. Dies passiert genau dort, wo gebrochener und reflektierter Strahl senkrecht aufeinander stehen. Da bei diesem Einfallswinkel die Komponente R_{\parallel} fehlt, ist das reflektierte Licht linear polarisiert. Der Polarisationswinkel α_p (BREWSTERwinkel) berechnet sich aus

$$\tan \alpha_p = \frac{n_2}{n_1} \quad (9)$$

Für Reflexion an Glas ($n_2 \approx 1,5$) findet man also α_p bei ca. 56° .

3. Versuchsdurchführung

3.1 Die Messungen werden mit einem Präzisions - Goniometer - Spektrometer (PGS) durchgeführt. Als Empfänger dient ein Phototransistor mit nachgeschaltetem Piko - Amperemeter. Lichtquelle ist eine Hg-Spektrallampe mit Interferenzfilter (grün oder gelb) und Polarisator.

3.1.1 Die Bedienung des PGS erfolgt entsprechend der Beschreibung im Anhang zur Versuchsanleitung 406. Die Justierung von Kollimator und Fernrohr muß nur grob nach Augenmaß erfolgen, so daß beim geraden Durchgang von der Lichtquelle durch Kollimator und Fernrohr eine möglichst hohe Lichtintensität gemessen werden kann. Beim Aufstellen der Glasplatte ist darauf zu achten, daß sie senkrecht zur optischen Achse steht und daß das Zentrum der Reflexion mit der Drehachse des Objektisches zusammenfällt. Das reflektierte Lichtbündel muß bei allen Winkelstellungen konzentrisch zur Fernrohrachse verlaufen, d.h. am Meßinstrument muß genau dann Maximalausschlag auftreten, wenn der Lichtfleck in der Eintrittsblende des Fernrohres verschwindet.

3.1.2 Die Einstellung des Reflexionswinkels geschieht in folgender Weise:

- Hohe Meßempfindlichkeit einschalten.
- Schwenken des Fernrohres mit dem Photoempfänger, bis Instrument einen Ausschlag zeigt.

- Mit dem Feintrieb Winkel exakt einstellen, dabei die Meßempfindlichkeit verringern.
- Ablesen des Winkels φ : Ist φ_0 die Winkelablesung für das aus dem Kollimator austretende Licht (bei entfernter Glasplatte), dann ist der Ablenkwinkel $\Delta\varphi = |\varphi - \varphi_0|$
Eine einfache geometrische Betrachtung liefert den Zusammenhang: $\Delta\varphi + 2\alpha_1 = 180^\circ$,
woraus folgt :

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} (180^\circ - \Delta\varphi) \quad (10)$$

Dabei ist zu beachten, daß beim Überschreiten von 360° anstelle $|\varphi - \varphi_0|$ für den Ablenkwinkel $360^\circ - |\varphi - \varphi_0|$ einzusetzen ist.

3.1.3 Die zunächst unbekanntere Durchlaßrichtung des Polarisators ist folgendermaßen zu bestimmen: Beachtet man, daß R_\perp stets größer ist als R_\parallel , dann erhält man die Polarisatorstellung für senkrechte Polarisation, indem man den Polarisator (bei beliebigem Einfallswinkel) so dreht, daß der Photostrom maximal wird.

Die Einstellung des Reflexionswinkels geschieht zweckmäßigerweise bei senkrechter Polarisation, da in der Nähe des Brewsterwinkels der Photostrom bei paralleler Polarisation sehr klein werden kann.

3.2 Zur Auswertung werden die bei den jeweiligen Winkeln α_1 gemessenen Photoströme I durch den Strom I_0 (bei geradem Durchgang, ohne Glasplatte) geteilt und die damit erhaltenen Werte für R_\perp und R_\parallel grafisch über α_1 dargestellt (auszumessender Winkelbereich etwa $20^\circ \dots 80^\circ$). Aus der Darstellung ist der Polarisationswinkel α_p abzulesen (in der Umgebung von α_p Abstand der Meßwerte enger wählen!) und aus α_p die Brechzahl der Glasplatte zu berechnen.

Versuchen Sie außerdem, durch Extrapolieren beider Kurven einen Wert für die Reflexion bei senkrechtem Einfall R ($\alpha_1 = 0$) zu finden und berechnen Sie auch daraus die Brechzahl. Um welche Glassorte könnte es sich handeln?

Fragen:

- Wieso wird zwischen der Lichtquelle und dem Versuchsaufbau ein Filter verwendet?
- Welchen Einfluß hat die Dicke der Glasplatte?
- Wie kann der Einfluß von Streulicht bestimmt werden?
- Schätzen Sie die Größenordnung ab!
- Wie kann man mikroskopisch die Verhältnisse am BREWSTERwinkel erklären?
- Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Brechzahlen und der dielektrischen Polarisation \vec{P} von Materialien?
- Kann die Messung auch mit absorbierenden Medien durchgeführt werden?

Literatur:

Born, M.: Optik-Lehrbuch der elektromagnetischen Lichttheorie,
Springer-Verlag, Berlin 1985