

1.2 Polarisation des Lichts und Doppelbrechung

Stichwörter: Gesetz von Malus, Polarisation, Polarisationsebene, Faradayeffekt, Doppelbrechung, Photodiode, Farbfilter, Reflexion, Brechungsindex, Brewsterwinkel.

1 Gesetz von Malus

Trifft linearpolarisiertes Licht mit der Intensität I_0 auf einen perfekten Linearpolarisator (Analysator), wird die Intensität I nach dem Gesetz vom Malus beschrieben:

$$I = I_0 \cdot \cos^2 \alpha \quad (1)$$

wo α der Winkel zwischen der Polarisationsebene des Analysators und des eintreffenden Lichts ist (siehe Abb.1).

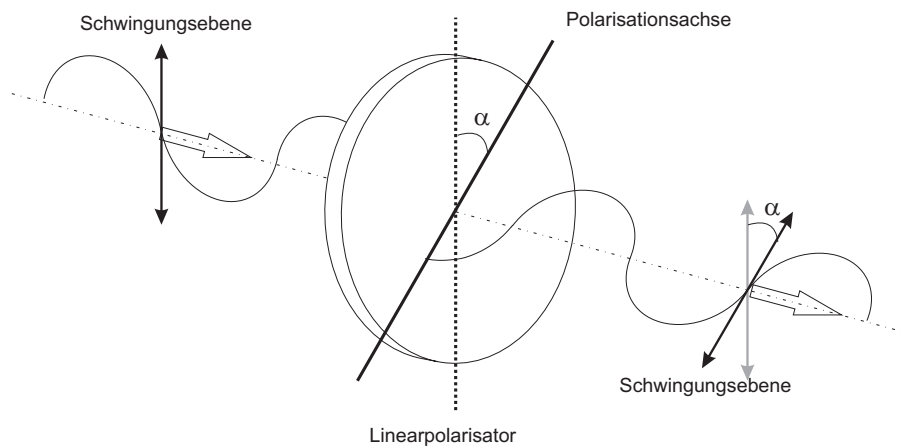


Abbildung 1: Drehung der Polarisationsebene durch einen Linearpolarisationsfilter

Aufgaben:

1. Ein Bündel nichtpolarisiertes Licht mit der Intensität I_0 trifft auf einen Linearpolarisator. Bestimmen Sie die Intensität des austretenden polarisierten Strahls.
2. Sie haben eine Glühbirne (als schwarzer Strahler anzunehmen), einen Farbfilter, zwei Linearpolarisatoren, eine Linse, eine Si-Photodiode und einen Multimeter zur Verfügung. Skizzieren Sie den Aufbau, um das Gesetz von Malus experimentell zu beweisen.
3. Da die Polarisatoren eine wellenlängenabhängige Polarisationsebene durchlassen, müssen Sie einen Farbfilter verwenden. Wählen Sie aus den drei verfügbaren Filtern (Grün, Orange und Blau) den geeignetsten aus, um das Messsignal in der Photodiode zu maximieren. Begründen Sie ihre Wahl.
4. Bauen Sie Ihren Aufbau auf.

5. Messen Sie für 36 Werte von α den Photostrom der Photodiode (Widerstand in Reihe, 100 k Ω) und tragen Sie Ihre Ergebnisse auf Polarkoordinatenpapier auf.
6. Zeichnen Sie auf demselben Papier mit einer anderen Stiftfarbe, den theoretischen Verlauf des Photostromes und Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse.

2 Faradayeffekt

Jeder in ein magnetisches Feld gebrachte Körper wird infolge zirkularer Doppelbrechung optisch aktiv. Bei diamagnetischen Stoffen ist der Winkel β der Polarisationsrichtungen proportional zur Komponente H_l des Magnetfeldes in Richtung der Lichtausbreitung und zur Dicke l der durchsetzten Schicht, d.h. es gilt

$$\beta = \omega \int_0^l H_l dl \quad (2)$$

Der Proportionalitätsfaktor ω heißt *Verdetsche Konstante*. Ist die Ausbreitungsrichtung des Lichtes parallel zur Magnetfeldrichtung und seine Stärke ortsunabhängig (z.B. homogenes Feld in Achsenmitte einer Spule), so gilt

$$\beta = \omega \cdot H \cdot l. \quad (3)$$

Gibt man β in Winkelminuten, H in Oersted und l in cm an, so ergibt sich ω in CGS-Einheiten. ω heißt „positiv“, wenn die Drehung der Polarisationssebene mit dem Uhrzeigersinn erfolgt, wenn man dem Magnetfeld entgegenschaut. Im allgemeinen ist ω wellenlängenabhängig. In diesem Versuch soll die Verdetsche Konstante eines Plexiglasstabes bestimmt werden.

Der zu untersuchende Plexiglasstab ist bereits in das Gerät eingebaut. Er hat eine Länge l von 12,5 cm und befindet sich auf der Achse der Feldspule. Außerdem ist ein Grünfilter in das Gerät eingebaut, so dass die Messung von $\beta(H)$ bei einer definierten Wellenlänge vorgenommen wird (siehe Abb. 2).

Aufgaben:

1. Bestimmen Sie für die Ströme $I = 500\text{mA}$ bis $I = 4000\text{mA}$ in 500mA-Schritten jeweils die Analysatorwinkel gleicher Helligkeit. Polen Sie dann die Magnetfeldrichtungen durch Vertauschen der Batterieanschlüsse um und wiederholen Sie die Messung. **Stellen Sie vor dem Umpolen den Strom auf Null!** Die Differenz der beiden gemessenen Werte ist gleich $2 \cdot \beta$.
2. Berechnen Sie die Magnetfeldstärke $H(I)$ und tragen Sie β gegen H auf. Versehen Sie jeden Messpunkt mit einem Fehlerbalken. Die Fehler für H ergeben sich aus der Ablesungenauigkeit und der Fehlerklasse des Amperemeters, die Fehler von β sind abzuschätzen. Für das Magnetfeld H gilt bei einem Strom I

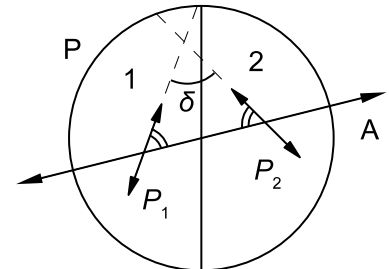
$$\frac{H}{\text{Oe}} = 141 \cdot \frac{I}{\text{A}}. \quad (4)$$

Der Strom darf 4 A nicht überschreiten!

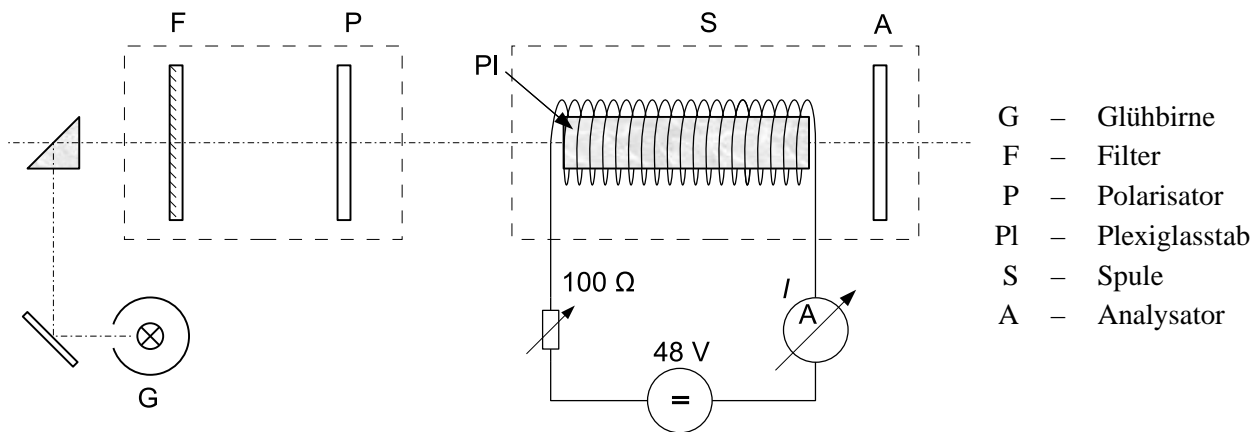
3. Tragen Sie in das Diagramm die Ausgleichsgerade sowie die Geraden maximaler und minimaler Steigung ein und bestimmen Sie aus deren Steigungen die Verdetsche Konstante ω .

Das Halbschattenpolarimeter

Die Messung wird an dem in Abbildung (b) dargestellten Aufbau durchgeführt. Zur genaueren Messung der Drehwinkel β wird ein *Halbschattenpolarimeter* verwendet. Hierbei besteht der Polarisator aus zwei Bereichen, deren Schwingungsrichtungen um den Winkel δ gegeneinander verschoben sind (δ heißt „Halbschatten“). Die entsprechenden Gesichtsfeldhälften 1 und 2 zeigen gleiche Helligkeit, wenn der Analysator A unter gleichem Winkel gegen P_1 und P_2 steht. Der Winkel δ erscheint als Winkel zwischen den beiden Stellungen völliger Dunkelheit je einer Gesichtshälfte. Halbschattengeräte erreichen eine viel höhere Einstellgenauigkeit als einfache Polarimeter, da für das Auge der Winkel gleicher Helligkeit besser erkennbar ist als der Winkel größter Dunkelheit.



(a) Schwingungsebenen bei einem Halbschattenpolarimeter



(b) Versuchsaufbau

Abbildung 2: Messungen zum Faradayeffekt

3 Doppelbrechung

Wir betrachten die Doppelbrechung an einem natürlich gewachsenem Kalkspatrhomboeder (siehe Abb. 3). Seine optische Achse tritt unter dem Winkel $\alpha = 45,39^\circ$ aus der Rhomboederfläche aus. Fällt Licht, das nicht polarisiert ist auf den Kristall, so tritt Doppelbrechung ein. Der *ordentliche Strahl* (o.) gehorcht dem *Snelliusschen Brechungsgesetz*; er breitet sich kugelförmig im Kristall aus. Der *außerordentliche Strahl* (a.o.) gehorcht dem Brechungsgesetz nicht. Seine Ausbreitungsgeschwindigkeit ist abhängig vom Winkel zwischen betrachteter Richtung und der *optischen Achse*. Sie ist dadurch definiert, dass in ihre Richtung die Ausbreitungsgeschwindigkeit beider Strahlen gleich sind. Senkrecht zu ihr ist der Unterschied der Geschwindigkeiten am größten. Kalkspat ist *einachsigenegativ*, was bedeutet, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit des a.o. Strahles größer ist als die des ordentlichen.

In diesem Teil des Versuches ist das Verhältnis $c_{a.o.,max}/c_o.$ zu messen. Das kann bei bekanntem Winkel α durch Messung der Strahlversetzung des a.o. Strahles bei senkrechtem Einfall des Lichtes auf die Rhomboederfläche geschehen. Aus der Strahlversetzung s und der Kristalldicke d kann der Ablenkwinkel γ des a.o.

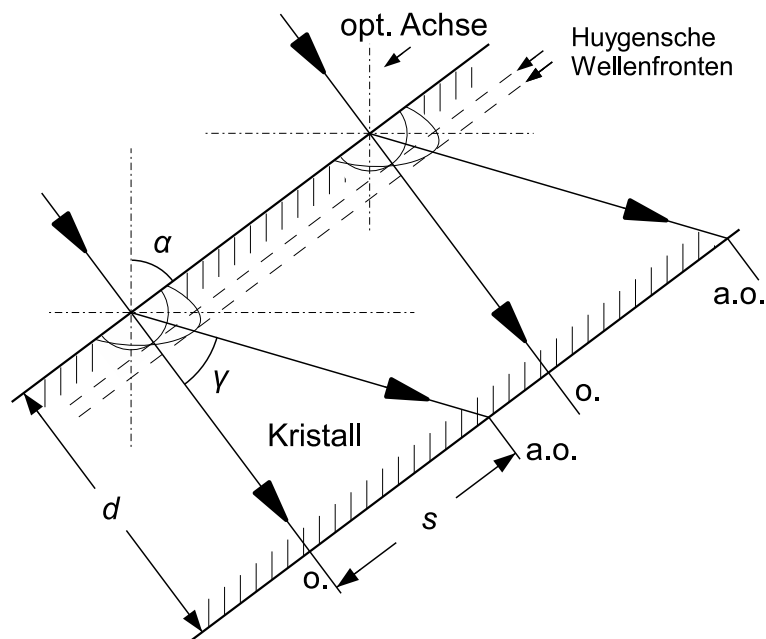


Abbildung 3: ordentlicher und außerordentlicher Strahl im Kalkspat

Strahles bestimmt werden nach

$$\tan \gamma = s/d. \quad (5)$$

s kann einfach gemessen werden, indem man den Kristall auf ein Raster konvergenter äquidistanter Linien legt und feststellt, an welcher Stelle des Rasters die Versetzung gerade dem Linienabstand gleich ist. Das gesuchte Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeiten ist gleich dem Verhältnis der Achsen der Ausbreitungsellipse des a.o. Strahles. Unter Zugrundelegung des Huygensschen Prinzips findet man

$$\frac{c_{\text{a.o.,max}}}{c_{\text{o.}}} = \sqrt{\frac{\tan \alpha}{\tan(\alpha - \gamma)}} \quad (6)$$

Aufgaben:

1. Messen Sie mit Hilfe des Rasters (Abb. 4) die Strahlverschiebung s und ermitteln Sie den Fehler Δs durch Wiederholungsmessungen. Messen Sie die Dicke d des Kalkspates, und geben Sie den Fehler an. Berechnen Sie $c_{\text{a.o.,max}}/c_{\text{o.}}$. Bestimmen Sie anschliessend den Fehler $\Delta(c_{\text{a.o.,max}}/c_{\text{o.}})$ unter Berücksichtigung von Δd und Δs , wobei die Näherung $c_{\text{a.o.,max}}/c_{\text{o.}} = 1 + \frac{s}{d}$ verwendet werden kann.
2. Untersuchen Sie mit Hilfe der Polarisationsfolie den Polarisationszustand von ordentlichem und außerordentlichem Strahl und geben Sie die Lage der elektrischen Vektoren an.

4 Polarisation durch Reflexion

Fällt Licht unter einem Einfallswinkel α auf eine Oberfläche, so wird es zum Teil reflektiert und zum Teil unter dem Ausfallswinkel β gebrochen. Der Anteil des reflektierten Lichtes hängt nicht nur vom Einfallswinkel, sondern auch vom Polarisationszustand des Lichtes ab. Schwingt der elektrische Vektor in der Einfallsebene,

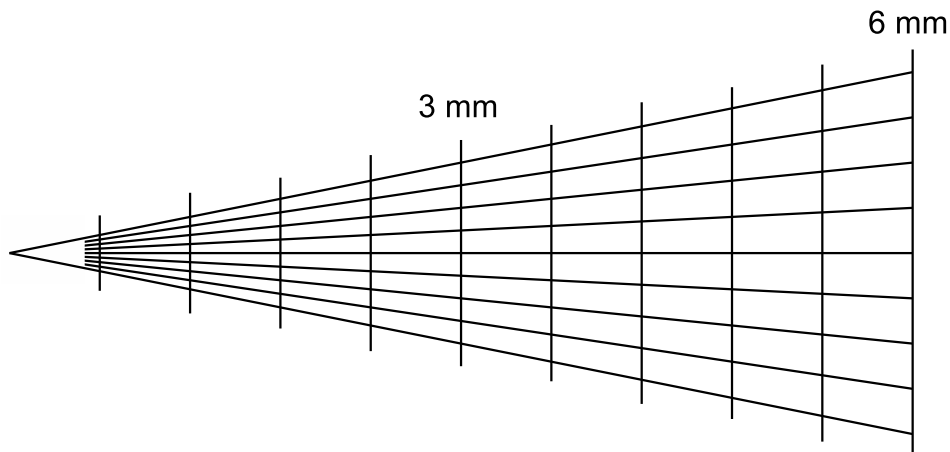


Abbildung 4: Raster zur Bestimmung der Strahlverschiebung s

so gilt für die Intensität des reflektierten Lichtes (*Poynting-Vektor*)

$$S_{r,p} = S_{0,p} \cdot \frac{\tan^2(\alpha - \beta)}{\tan^2(\alpha + \beta)} \quad (7)$$

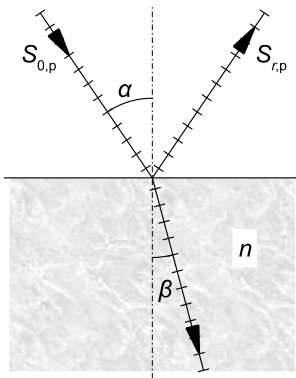


Abbildung 5: parallel zur Einfallsebene polarisiertes Licht

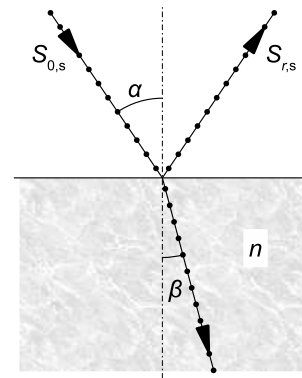


Abbildung 6: senkrecht zur Einfallsebene polarisiertes Licht

Schwingt der elektrische Vektor senkrecht zur Einfallsebene, so gilt

$$S_{r,s} = S_{0,s} \cdot \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \quad (8)$$

Einfalls- und Ausfallswinkel α bzw. β sind hierbei durch

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n \quad (9)$$

miteinander verknüpft, wobei n der Brechungsindex des Materials ist. Ähnliche Gleichungen wie (7) und (8) gelten für die Intensität des gebrochenen Lichtes. Strahlt man unpolarisiertes Licht ein, so wird der reflektierte Anteil zum Teil polarisiert.

Aufgaben:

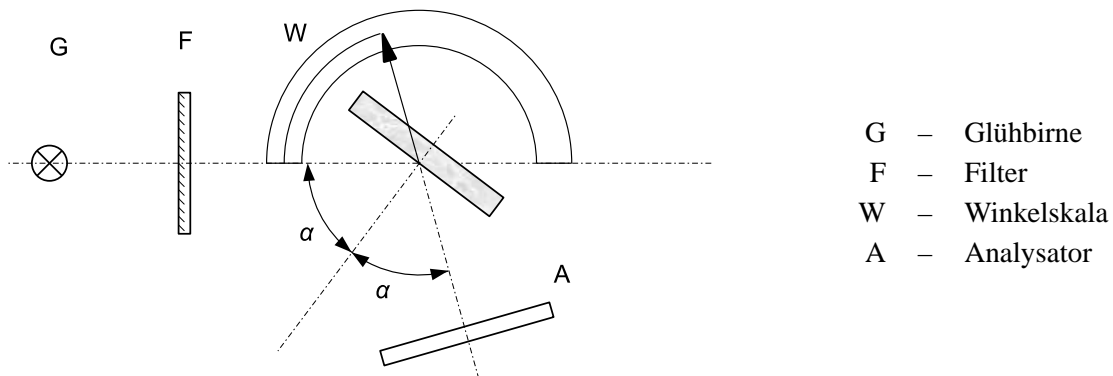


Abbildung 7: Versuchsaufbau, Polarisierung durch Reflexion

1. Leiten Sie aus Gleichungen (7), (8) und (9) her, dass es einen Einfallswinkel α_p gibt, für den die Polarisierung vollständig ist und folgende Beziehung gilt:

$$\tan \alpha_p = n \quad (10)$$

Dieser Winkel α_p heißt *Brewsterscher Winkel*.

2. In welcher Weise ist das reflektierte Licht beim Brewsterwinkel polarisiert?
3. Bestimmen Sie α_p experimentell für ein Grauglas. Bauen Sie dazu den Versuch nach Abbildung 7 auf. Die Wellenlänge des Filters λ beträgt 546,1 nm. Stellen Sie den Polarisationsfilter so ein, dass der beim Brewsterwinkel reflektierte Strahl vollständig ausgelöscht wird. Bestimmen Sie den Brewsterwinkel, indem Sie das reflektierte Licht für verschiedene Einfallswinkel durch den Polarisator beobachten. Schätzen Sie den Fehler des Brewsterwinkels durch mehrmaliges Messen ab. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem Literaturwert.

Literatur:

Bergmann-Schaefer, Band III Optik, §§ 4.1, 4.5, 4.8 und 4.13 (8. Aufl.),
 D. Meschede, *Gerthsen Physik*, Kap. 11.2, 25. Aufl., (2015)