1.2 Drehung der Polarisationsebene, Faradayeffekt, Doppelbrechung

1 Drehung der Polarisationsebene

Durch einige Kristalle, z.B. Quarz wird bei Durchstrahlung in Richtung der optischen Achse die Schwingungsrichtung von linear polarisiertem Licht gedreht. Ein optisch aktiver Kristall kann rechts- oder linksdrehend sein. Rechtsdrehende Kristalle drehen die Polarisationsebene im Uhrzeigersinn, wenn man dem Licht entgegen blickt. Der Drehwinkel β ist dabei der Dicke d des Kristalls proportional:

$$\beta = \sigma \cdot d \tag{1}$$

Der Proportionalitätsfaktor σ heißt *spezifisches Drehvermögen* und wird in Grad pro mm angegeben. In diesem Versuch soll das spezifische Drehvermögen von Quarz bestimmt werden. σ ist im Allgemeinen eine Funktion der Wellenlänge (Rotationsdispersion).
Bringt man eine Quarzplatte der Dicke d zwischen zwei gekreuzte Polarisatoren (zueinander senkrechte Schwingungsebenen), so tritt Aufhellung ein. Der Analysator muss um einen Winkel β z.B. nach links gedreht werden, damit wieder Dunkelheit herrscht. Der Kristall kann dann linksdrehend sein mit dem spezifischen Drehvermögen

$$(\beta + n \cdot 180^\circ)/d$$

für eine natürliche Zahl n oder rechtsdrehend mit dem spezifischen Drehvermögen

$$(-\beta + (n+1) \cdot 180^\circ)/d$$

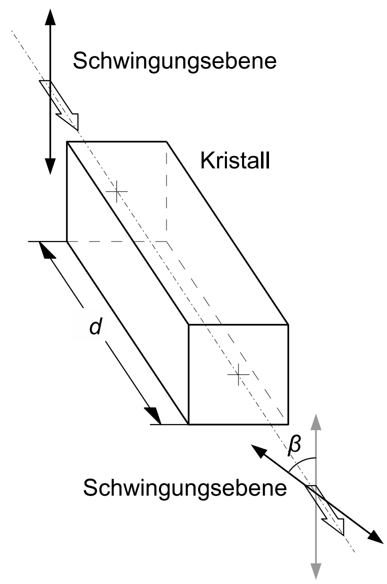
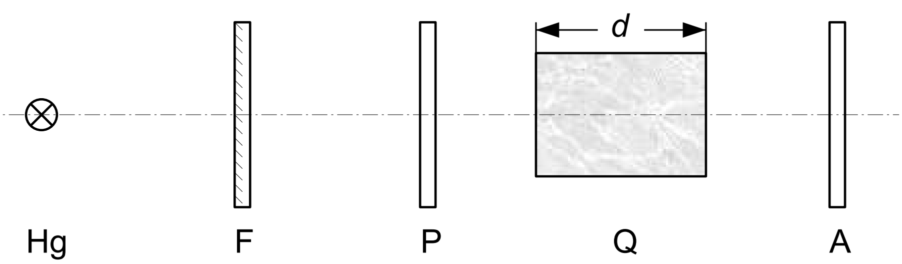


Abbildung 1: Drehung der Polarisationsebene

Eine Entscheidung, ob es sich um einen rechts- oder linksdrehenden Kristall handelt, ist nicht möglich. Hierzu benötigt man zwei Quarzplatten verschiedener Dicke.



Hg	–	Hg-Lampe
F	–	Filter
P	–	Polarisator
Q	–	Quarz
A	–	Analysator

Abbildung 2: Aufbau zur Messung des spezifischen Drehvermögens

Aufgaben:

1. Bestimmen Sie für zwei der zur Verfügung stehenden Filter das spezifische Drehvermögen von Quarz. Bauen Sie dazu den Versuch wie in Abbildung 2 dargestellt auf und stellen Sie die Polarisatoren so ein, dass Auslöschung vorliegt. Bringen Sie nun nacheinander dünnen, dicken und dann beide Kristalle in den Strahlengang und bestimmen Sie die Winkel β. Schätzen Sie den Fehler $\Delta\beta$ ab. Die Wellenlängen des von den Filtern durchgelassen Lichtes sind

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{Blau}} &= 404{,}7\ \text{nm}\\ \lambda_{\text{Orange}} &= 589{,}0\ \text{nm}\\ \lambda_{\text{Grün}} &= 546{,}1\ \text{nm}\end{aligned}$$

   Die Dicken der beiden stehenden Quarzplatten sind

$$d_1 = 1{,}5\,\text{mm} \qquad \text{und} \qquad d_2 = 4{,}75\,\text{mm}$$

   Die dicke Quarzplatte weist eine horizontale Verwachsung auf. Nur in der unteren Hälfte ist der Quarz senkrecht zur optischen Achse geschnitten.

2. Tragen Sie β über d mit den zugehörigen Fehlern auf und bestimmen Sie aus dem Diagramm das spezifische Drehvermögen σ, sowie $\Delta\sigma$.

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

$$\beta = \omega \int_0^l H_l \,\mathrm{d}\,l \tag{2}$$

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

$$\beta = \omega \cdot H \cdot l\,. \tag{3}$$

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 Polarisationsebene 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.

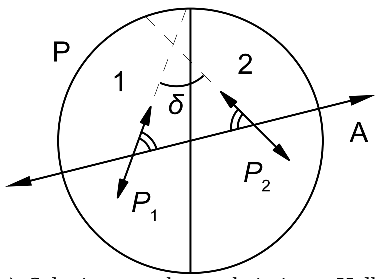
Der zu untersuchende Plexiglasstab ist bereits in das Gerät eingebaut. Er hat eine Länge l von $12{,}5\,\text{cm}$ und befindet sich auf der Achse der Feldspule. Außerdem ist ein Grünfilter in das Gerät eingebaut, so dass die Messung von $\beta\,(H)$ bei einer definierten Wellenlänge vorgenommen wird (sieh Abb. 3).

Aufgaben:

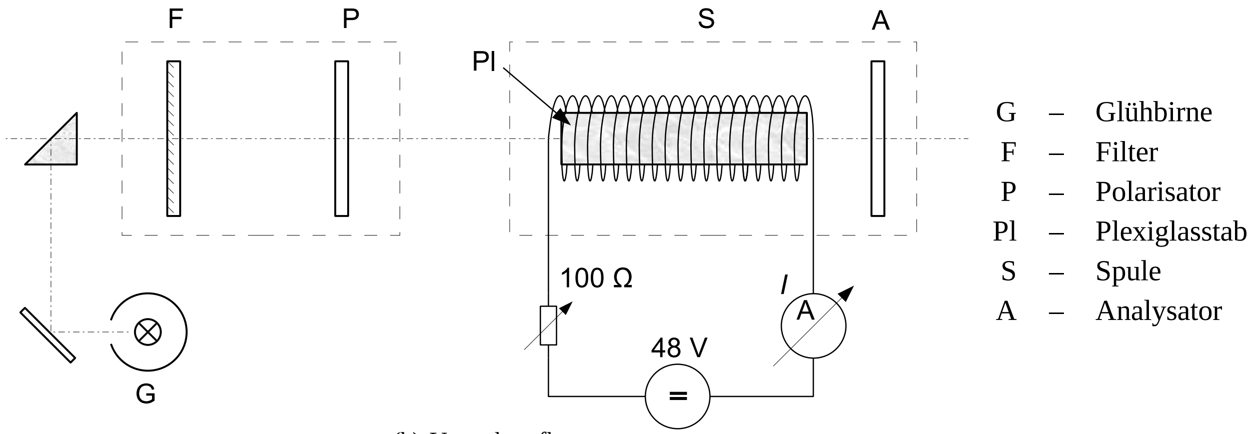
1. Bestimmen Sie für die Ströme $I = 500\,\text{mA}$ bis $I = 4000\,\text{mA}$ in $500\,\text{mA}$-Schritten jeweils die Analysatorwinkel gleicher Helligkeit. Polen Sie dann die Magnetfeldrichtungen durch Vertauschen der Batterieanschlüsse um und wiederholen Sie die Messung. **Stellen Sie vor dem Umpolen den Strom auf Null!**. Die Differenz der beiden gemessenen Werte ist gleich $2 \cdot \beta$.

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 3: Messungen zum Faradayeffekt

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 Ableseungenauigkeit und der Fehlerklasse des Amperemeters, die Fehler von β sínd abzuschätzen. Für das Magnetfeld H gilt bei einem Strom I

$$\frac{H}{\mathrm{Oe}} = 141 \cdot \frac{I}{\mathrm{A}}. \tag{4}$$

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.

3 Doppelbrechung

Wir betrachten die Doppelbrechung an einem natürlich gewachsenem Kalkspatrhomboeder (siehe Abb. 4). 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*

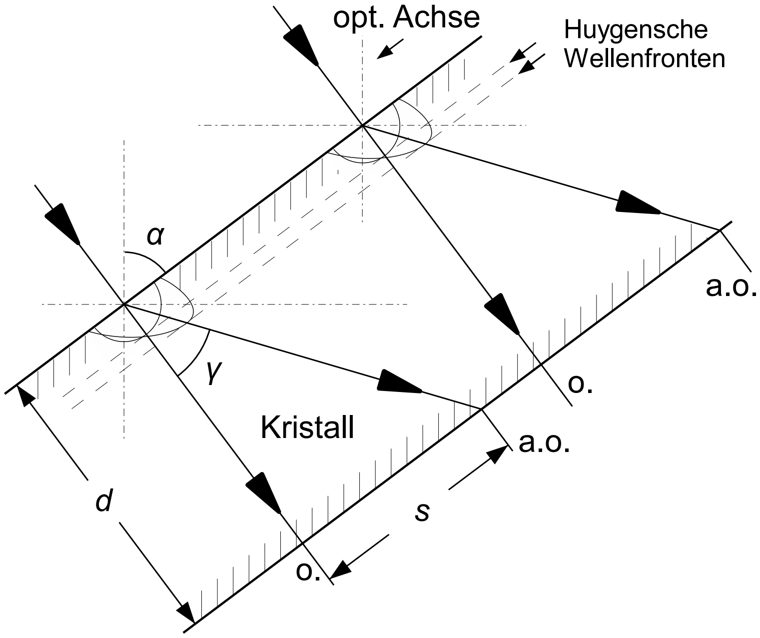


Abbildung 4: ordentlicher und außerordentlicher Strahl im Kalkspat

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 *einachsig-negativ*, was bedeutet, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit des a.o. Strahles größer ist als die des ordentlichen.

In diesem Teil des Versuches ist das Verhältnis $c_{\text{a.o.,max}}/c_{\text{o.}}$ 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. Strahles bestimmt werden nach

$$\tan\gamma = s/d\,. \tag{5}$$

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

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

Aufgaben:

1. Messen Sie mit Hilfe des Rasters (Abb. 5) 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.

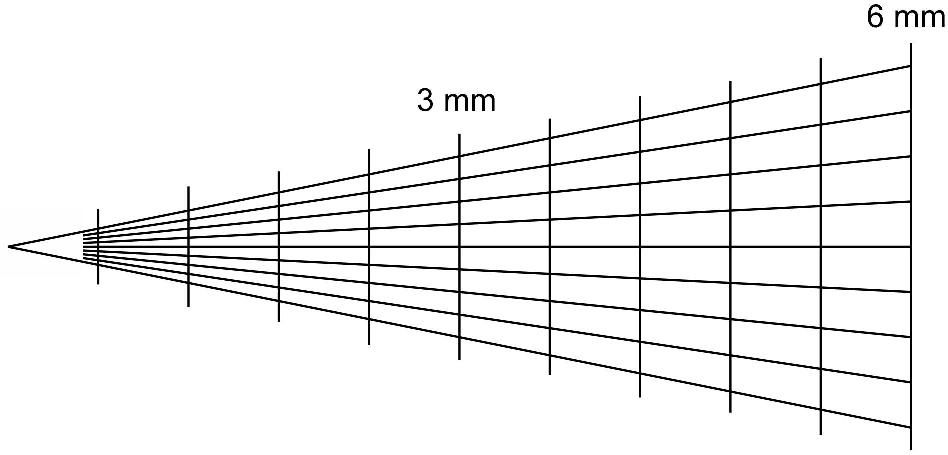


Abbildung 5: Raster zur Bestimmung der Strahlverschiebung s

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

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

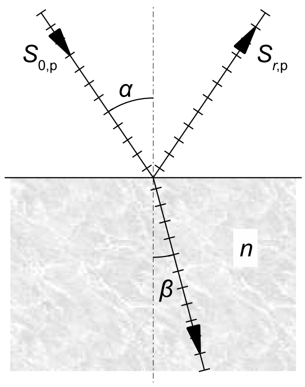


Abbildung 6: parallel zur Einfallsebene polarisiertes Licht

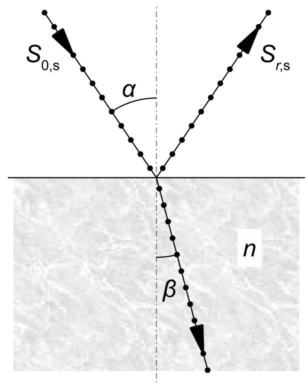


Abbildung 7: senkrecht zur Einfallsebene polarisiertes Licht

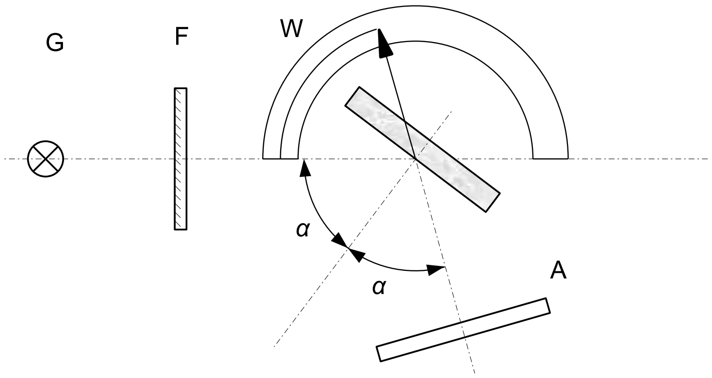
Schwingt der elektrische Vektor senkrecht zur Einfallsebene, so gilt

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

Einfalls- und Ausfallswinkel α bzw. β sind hierbei durch

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n \tag{9}$$

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



G	–	Glühbirne
F	–	Filter
W	–	Winkelskala
A	–	Analysator

Abbildung 8: Versuchsaufbau, Polarisation durch Reflexion

Anteil zum Teil polarisiert.

Aufgaben:

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

$$\tan\alpha_\mathrm{p} = n \tag{10}$$

   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 8 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.),
Gerthsen, Kap. 10.2.9 (16. Aufl.)

3.2012/Ra