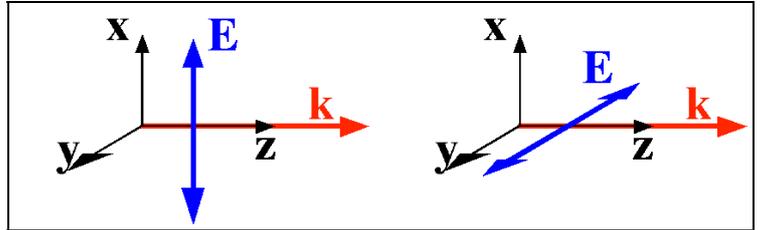


6.4. Polarisation und Doppelbrechung

6.4.1. Polarisation

Wie andere elektromagnetische Wellen ist Licht eine Transversalwelle. Es existieren deshalb zwei orthogonale Polarisationsrichtungen. Licht mit unterschiedlicher Polarisation kann in vielen Fällen ein unterschiedliches Verhalten zeigen. Polarisierungseffekte spielen deshalb in der Optik eine wesentliche Rolle.



In einem Laser wird Licht direkt polarisiert erzeugt. In einer Glühbirne hingegen ist die Polarisation der einzelnen Photonen voneinander unabhängig und das Licht insgesamt nicht polarisiert. Man kann in diesem Fall nachträglich polarisiertes Licht herstellen indem man es entweder in die beiden unterschiedlichen Polarisierungen trennt oder eine Polarisationsrichtung herausfiltert.

- Man legt einen doppelbrechenden Kristall auf eine Unterlage

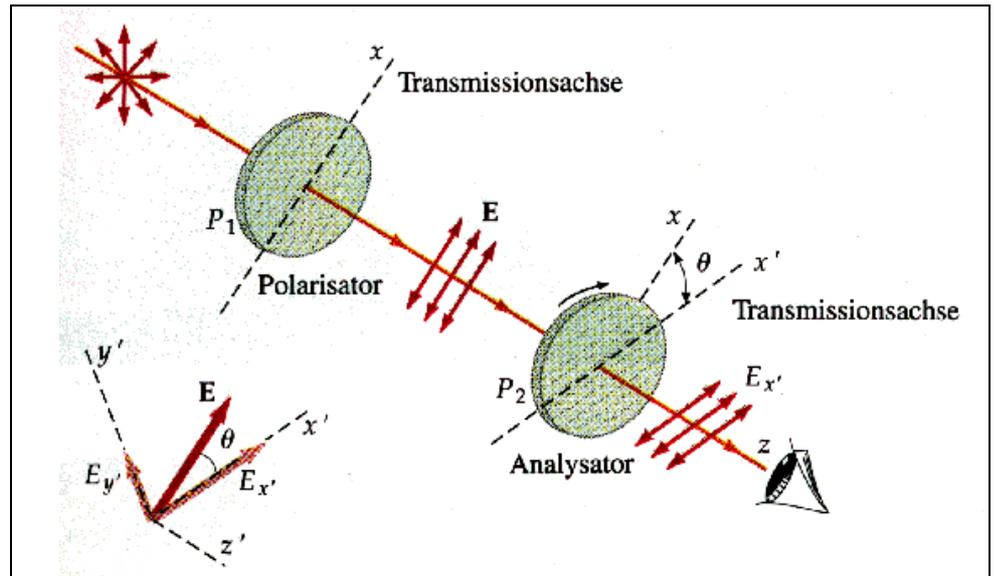


Exp. 51: Doppelbrechung am Kalkspat

Im Experiment verwenden wir dafür einen Kristall aus Kalkspat. Man sieht dass die darunterliegende Schrift doppelt sichtbar ist. Den gleichen Effekt kann man auch zeigen indem man einen Laserstrahl durch den Kristall laufen lässt. Auf dem Schirm sieht man dann zwei dazugehörige Punkte. Mit dem Polarisationsfilterer kann man feststellen, dass die Polarisationsrichtung der beiden Strahlen sich um 90 Grad unterscheidet.

- Man verwendet zwei Polarisatoren. Je nach Winkel zwischen den beiden kann Licht durch die Kombination hindurch oder nicht. Man findet eine sinusförmige Abhängigkeit der Intensität vom Winkel zwischen den beiden Polarisatoren:

$$I_t = I_0 \cos^2(\alpha).$$



Stellt man einen dritten Polarisator zwischen zwei gekreuzte Polarisatoren, so erhöht man damit die Transmission, falls dieser nicht die gleiche Stellung hat wie einer der beiden anderen. Beträgt der Winkel zwischen zwei aufeinanderfolgenden Polarisatoren z.B. 45 Grad, so wird jeweils $\cos^2(45^\circ) = 1/2$, insgesamt somit $1/4$ transmittiert.

Wie bereits bei der Diskussion von transversalen Schallwellen und Seilwellen diskutiert gibt es zu jedem Wellenvektor zwei linear unabhängige Transversalwellen, welche unterschiedlichen Richtungen der Auslenkung entsprechen. Bei den elektromagnetischen Wellen werden diese als unterschiedliche Polarisierungen bezeichnet. Allgemein kann man eine Basis von solchen Polarisationszuständen wählen und die allgemeine Welle als Superpositionszustand schreiben. Wir bezeichnen die beiden Polarisierungen als \vec{e}_1 , \vec{e}_2 , und deren Superposition als

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = (\vec{e}_1 E_1 + \vec{e}_2 E_2) \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r} - i\omega t).$$

Dabei sind E_1 und E_2 komplexe Zahlen: der Imaginärteil bezeichnet den Phasenunterschied zwischen den beiden Wellen.

Als ein Beispiel wählen wir die Polarisationszustände \vec{e}_1 und \vec{e}_2 entlang der x- und y-Achse. Für $E_1 = 1$, $E_2 = 1$

Z: lineare Polarisation

erhalten wir lineare Polarisation entlang der Winkelhalbierenden. Allgemein erhält man linear polarisiertes Licht wenn E_1 und E_2 die selbe Phase aufweisen, also z.B. beide reell oder beide rein imaginär sind. Das Verhältnis der Amplituden gibt den Winkel der Polarisations Ebene an.

6.4.2. Zirkular polarisiertes Licht

Als zweites Beispiel wählen wir $E_1 = 1$, $E_2 = \pm i$. Damit erhalten wir für die physikalische Lösung, also die wirklichen elektrischen Felder in x- und y-Richtung

$$E_x(r, t) = \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) \quad E_y(r, t) = -\pm \sin(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$$

Der elektrische Feldvektor an einer bestimmten Stelle rotiert somit um die z-Achse. Diese Lösungen werden als zirkulare Polarisationen bezeichnet, wobei die beiden Vorzeichen einer links-, resp. rechts zirkularen Polarisation entsprechen.

Z: zirkulare Polarisation

Ein interessanter Unterschied zwischen linearer und zirkularer Polarisation ist die Abhängigkeit der Energiedichte von Ort und Zeit: Im Falle der linearen Polarisation hatten wir gesehen, daß sie mit der doppelten Feldfrequenz zwischen null und einem Maximalwert oszilliert. Im Fall der zirkularen Polarisation sind die beiden Beiträge der beiden linearen Polarisationen jeweils $\cos^2(kz - \omega t)$ und $\sin^2(kz - \omega t)$ und addieren sich somit zu einer konstanten Größe.

Z: $\vec{S}(kz - \omega t)$

Man kann Polarisationszustände aber nicht nur in einer kartesischen Basis beschreiben. Die Basisvektoren \vec{e}_1 und \vec{e}_2 können ebenso zirkulare Polarisationszustände beschreiben. In einer zirkularen Basis können die linearen Polarisationszustände dann wiederum als Superposition geschrieben werden. Wählen wir

$$\vec{e}_1 = \{E_x = 1, E_y = i, 0\}$$

für rechts zirkular polarisiertes Licht und

$$\vec{e}_2 = \{E_x = 1, E_y = -i, 0\}$$

für links zirkular polarisiertes Licht, so ist z.B. ein Zustand

$$(1, -i) = \vec{e}_1 - i \vec{e}_2 = \{1, i, 0\} - i \{1, -i, 0\} = \{1-i, i-1, 0\} = (1-i) \{1, -1, 0\},$$

d.h. linear polarisiertes Licht, deren Polarisationssebene bei 45 Grad liegt.

Die Polarisationszustände werden auch mit Hilfe der Poincaré Kugel dargestellt. Die Pole bezeichnen zirkulare Polarisationszustände, der Äquator lineare Polarisation und die Zustände dazwischen elliptische Polarisationszustände. Die meisten möglichen Polarisierungen sind somit elliptisch.

Z: Poincaré Kugel

6.4.3. Erzeugung und Umwandlung

Es existieren viele optische Elemente, die dafür konstruiert wurden, um unterschiedliche Polarisationszustände zu erzeugen, resp. ineinander umzuwandeln.

Am bekanntesten ist sicher der Polarisator, welcher auch in Sonnenbrillen Verwendung findet. Er erzeugt linear polarisiertes Licht, indem die Anteile des Lichtes, welche die orthogonale Polarisation aufweisen, abgelenkt oder absorbiert werden. Daß solche optischen Elemente in der Fotografie oder in Sonnenbrillen verwendet werden ist nur deshalb wesentlich, weil das Licht in der Natur polarisiert ist. So ist Licht, welches auf einer Wasseroberfläche reflektiert ist, horizontal polarisiert. Auch das blaue Licht des Himmels, welches durch Streuung von Sonnenlicht entsteht, ist polarisiert, wobei die Polarisationsrichtung von der Richtung bezüglich der Sonne abhängt. Dies kann man einfach überprüfen, wenn man durch einen Polarisator, also z.B. eine polarisierende Sonnenbrille den Himmel betrachtet: Die Helligkeit ist richtungsabhängig, auch wenn der Himmel ohne Sonnenbrille keine Helligkeitsunterschiede zeigt.

Z: Polarisator

Eine wichtige Möglichkeit für die Erzeugung von polarisiertem Licht ist die Reflexion: Ist Licht parallel zur Einfallsebene polarisiert, so verschwindet die Reflexion bei einem Winkel

Z: Brewster Winkel

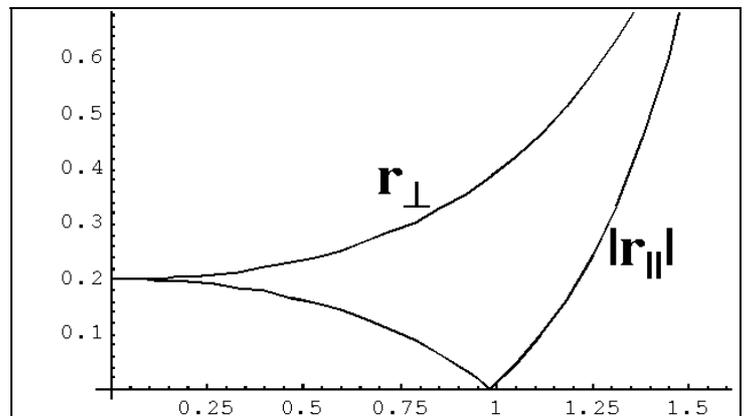
$$\theta_B = \tan^{-1} n .$$

Z.B. Kronglas: $n = 1.51 \rightarrow \theta_B = 56.5^\circ$. Dieser Winkel wird als Brewsterwinkel bezeichnet.

Exp. 49: Polarisation nach Reflexion am Brewsterwinkel

Ist der einfallende Strahl nicht polarisiert so wird nur die senkrecht polarisierte Komponente reflektiert, so dass der reflektierte Strahl vollständig polarisiert ist.

Polarisiert man das Licht in der Einfallsebene so verschwindet die Intensität des reflektierten Strahls am Brewsterwinkel. Für senkrechte Polarisation variiert die Intensität deutlich weniger stark.



6.4.4. Doppelbrechung

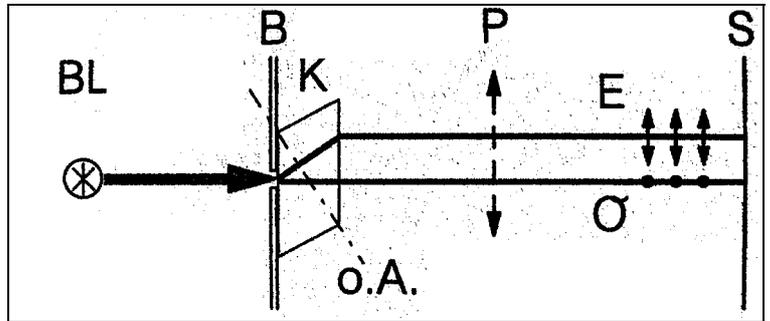
Eine andere Möglichkeit ist die Doppelbrechung: Kristalle mit niedriger Symmetrie besitzen für unterschiedliche Polarisation des Lichtes unterschiedliche Brechungsindizes. Man kann sich das so vorstellen, dass die schwingenden Dipole in einem Kristall bezüglich der Kristallachsen fest orientiert sind. Die Stärke der Wechselwirkung zwischen der opti-

schen Welle und den schwingenden Dipolen hängt deshalb davon ab, ob die Polarisation der Welle parallel oder senkrecht zum Dipol orientiert ist.

Das Phänomen kann z.B. an einem Kalkspat-Kristall beobachtet werden.

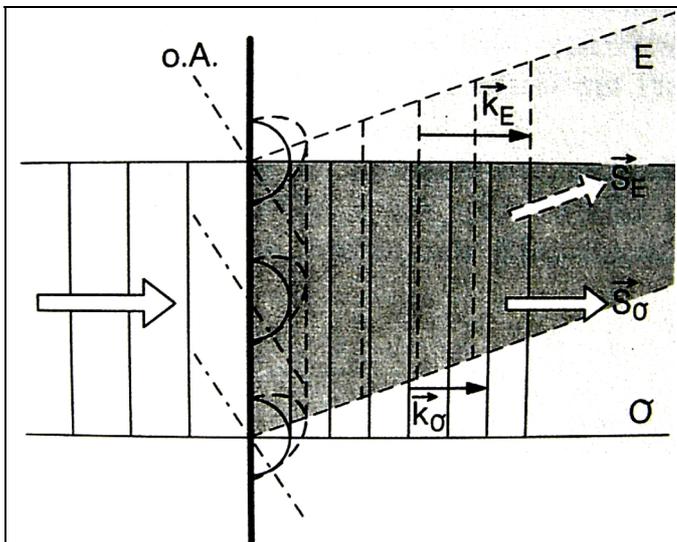
Exp. 51: Doppelbrechung an Kalkspat

Dadurch werden Strahlen je nach Polarisation unterschiedlich gebrochen. Man unterscheidet die beiden Polarisationen danach ob der Brechungsindex von der Ausbreitungsrichtung abhängt. Bei einer Polarisation ist der Brechungsindex unabhängig von der Ausbreitungsrichtung; diese Komponente wird als ordentlicher Strahl bezeichnet. Bei der anderen Komponente, welche senkrecht zum ordentlichen Strahl polarisiert ist, variiert der Brechungsindex mit der Ausbreitungsrichtung. Dieser Strahl wird als außerordentlich bezeichnet. Die beiden Brechungsindizes werden als n_e und n_o bezeichnet. Die Unterschiede zwischen den beiden können sich im Bereich < 0.3 bewegen.



Beispiele:

Material	n_o	n_e
Kalkspat	1.6584	1.4864
Turmalin	1.6425	1.6220
Quarz	1.5442	1.5533
Rutil	2.6158	2.9029



Die unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit für die beiden senkrechten Polarisationen führt auch dazu, dass der außerordentliche Strahl beim Auftreffen auf eine ebene Fläche gebrochen wird – dies ist ein qualitativ anderes Verhalten als bei Materialien ohne Doppelbrechung. Es kann mit Hilfe des Bildes der Huygens'schen Elementarwellen erklärt werden. Licht, das senkrecht zur optischen Achse des Kristalls polarisiert ist, breitet sich

in alle Richtungen gleich schnell aus. Es bildet den ordentlichen Strahl. Licht, dessen Polarisation eine Komponente parallel zur optischen Achse enthält, "sieht" einen Brechungsindex, der von der Ausbreitungsrichtung abhängt. Die zugehörigen Elementarwellen sind deshalb keine Kugelwellen, sondern Ellipsoide. Die zugehörige Wellenfront ist parallel zur Wellenfront des ordentlichen Strahls, sie wird aber seitwärts versetzt. Die Richtung der Energieausbreitung des außerordentlichen Strahls, gegeben durch \vec{S}_E , weist deshalb in eine andere

Richtung als der Wellenvektor \vec{k}_E , der senkrecht auf den Wellenfronten steht und deshalb parallel zu \vec{k}_O , dem Wellenvektor für den ordentlichen Strahl steht.

Doppelbrechende Materialien werden z.B. in einem Glan-Thomson Polarisator verwendet. Man kann solche Polarisatoren dazu verwenden, die beiden Polarisierungen zu trennen, oder der eine Strahl wird geblockt, so dass damit lediglich polarisiertes Licht erzeugt wird.

Z: Glan-Thomson Pol.

Hier ...

Exp. 50a : Nicolprisma

Außerdem gibt es optische Elemente, welche verschiedene Polarisierungen ineinander umwandeln. Die wichtigsten sind sogenannte Verzögerungsplatten. Dabei handelt es sich um sogenannte doppelbrechende Kristalle, bei denen der Brechungsindex von der Polarisierung des Lichtes abhängt. Dadurch erscheint der Kristall für unterschiedliche Polarisierungen unterschiedlich dick. Wählt man die Dicke eines Kristalls z.B. so, daß orthogonale Polarisierungen einen Weglängenunterschied von $\lambda/4$ "sehen", so ist die eine Polarisierung gegenüber der anderen um $\pi/2$ verzögert. Schicken wir linear polarisiertes Licht, dessen Polarisierungsebene gegenüber den Hauptachsen des Kristalls um 45 Grad gedreht ist, das also in der Hauptachsenbasis des Kristalls als

Z: Verzögerungsplatten

$$\vec{E}(0) = \{E_1 = 1, E_2 = 1\}$$

geschrieben wird, so wird es hinter dem Kristall zu

$$\vec{E}(L) = \{E_1 = 1, E_2 = i\},$$

also zu zirkular polarisiertem Licht.

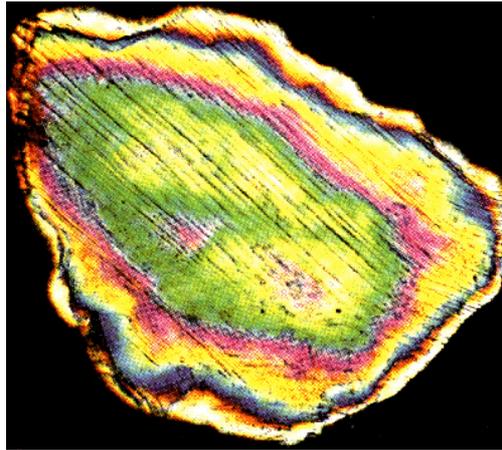
Man kann die Verzögerung einstellen ..

Exp. 48, 48a: $\lambda/4$, $\lambda/2$ Verzögerung

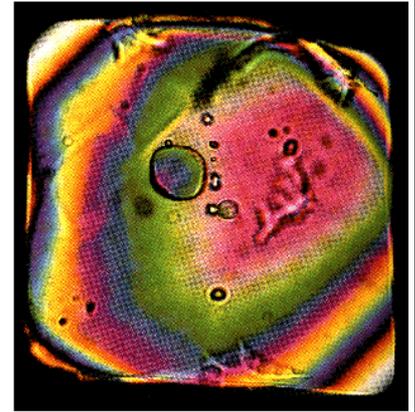
Die Doppelbrechung kann von äußeren Parametern abhängen. Insbesondere mechanische Spannungen können die optische Weglänge verändern. Man kann diesen Effekt nachweisen indem man das Material zwischen zwei gekreuzte Polarisatoren (lineare oder zirkulare) bringt. Ist eine Spannungsdoppelbrechung vorhanden so wird die Polarisierung in der Probe gedreht und es kommt zu einer Transmission durch den zweiten Polarisator. Der Effekt ist wellenlängenabhängig, so dass bei der Bestrahlung mit weißem Licht unterschiedliche Farben beobachtet werden. Man kann diesen Effekt u.a. zur Untersuchung der Spannungsverteilung benutzen.

Exp. Spannungspolarisation

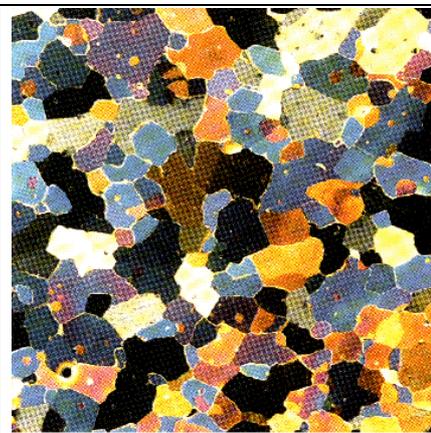
Viele Mineralien zeigen Doppelbrechung. Bringt man sie zwischen gekreuzte Polarisatoren wird deshalb ein Teil des Lichtes transmittiert. Die Verzögerung ist wellenlängenabhängig, so dass dabei farbige Muster entstehen.



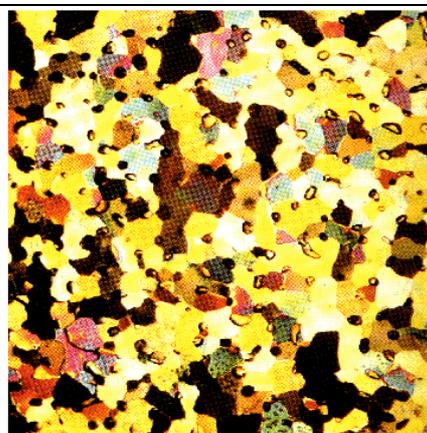
Quarz aus Meteorit; Schichtstruktur als Resultat der Schockwellen



Quarz aus vulkanischem Gestein



Unterschiedlich orientierte Eiskristalle mit eingeschlossenen Luftblasen



In diesem Fall sind Eiskristalle dargestellt, welche ähnliche Effekte zeigen.

6.4.5. Optische Aktivität

Viele organische Substanzen zeigen optische Aktivität, d.h. sie besitzen unterschiedlichen Brechungsindex für die beiden entgegengesetzten zirkularen Polarisierungen. Dies ist auf ihre molekulare Struktur zurückzuführen.

Diese Eigenschaft findet man z.B. in Quarz; sie ist allerdings ca. 100 mal kleiner als die lineare Doppelbrechung.

Schickt man linear polarisiertes Licht durch eine Zuckerlösung wird die Polarisationsebene gedreht. Diesen Effekt findet man bei allen Molekülen, die keine Inversionssymmetrie aufweisen.

Exp. 54, 54a, 55, 56: Optische Aktivität von Zuckerlösungen