

Versuche P2-11

Polarisation und Doppelbrechung

Versuchsvorbereitung

Thomas Keck und Marco A. Harrendorf, Gruppe: Mo-3
Karlsruhe Institut für Technologie, Bachelor Physik

Versuchstag: 18.04.2011

1 Licht

1.1 Licht im Vakuum

Im klassischen Bild besteht Licht aus einer **transversalen elektromagnetischen Welle**, welche als Lösungen der Maxwellgleichungen beschrieben werden können. Die nachfolgende Diskussion bezieht sich zunächst auf das Vakuum.

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2)$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4)$$

Da das elektrische $\vec{E}$ und magnetische $\vec{B}$ Feld dieser transversalen Welle orthogonal aufeinanderstehen, und beide Felder einander bedingen bzw. festlegen, beschränkt man sich in der Diskussion per Konvention meist auf die elektrische Feldkomponente des Lichtes. Die Ausbreitungsrichtung wird durch den Vektor $\vec{k}$ festgelegt, er steht orthogonal auf $\vec{E}$ und $\vec{B}$. Die allgemeine Lösung der Maxwellgleichungen kann etwa mit sin und cos Wellen erfüllt werden. Es handelt sich dann um Wellen die sich mit der Geschwindigkeit c in Richtung $\vec{k}$ ausbreiten.

$$\vec{k} = \vec{E} \times \vec{B} \quad (5)$$

$$|\vec{k}| = \frac{\omega}{c} \quad (6)$$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot f(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t) \quad (7)$$

Das E-Feld der transversalen elektromagnetischen Welle besitzt eine bestimmte Schwingungsrichtung im Raum, die **Polarisation**. Das normale in der Natur vorkommende Licht von thermischen Quellen besteht aus einer statistischen Mischung von Wellenzügen verschiedenster Polarisation, insgesamt ist dieses Licht damit unpolarisiert, besitzt das Licht dagegen eine einheitliche Polarisation, so spricht man von polarisiertem Licht.

Die Frequenz bzw. die Vakuumwellenlänge des Lichtes bestimmt seine Farbe, man unterscheidet zwischen monochromatischem und polychromatischem Licht, je nachdem ob die Welle aus nur einer Frequenzkomponente oder aus einer Mischung von verschiedenen Frequenzen aufgebaut ist.

1.2 Licht in Materie

Die Maxwellgleichungen in Materie lauten:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (8)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho_{\text{frei}} \quad (9)$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j}_{\text{frei}} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (10)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (11)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (12)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} + \vec{M} \quad (13)$$

Die neuen Felder D und H sind dabei unabhängig vom Medium, da die im Medium entstehende Polarisation $\vec{P}$, welche für die Doppelbrechung verantwortlich ist, und die Magnetisierung $\vec{M}$ mit einbezogen sind. $\vec{P}$ und $\vec{M}$ sind dabei im allgemeinen über Tensoren mit $\vec{E}$ und $\vec{B}$ verknüpft.

In Materie ändert sich die Wellenlänge des eintretenden Lichtes, die Frequenz bleibt konstant. Dies hat zur Folge, dass sich das Licht unterschiedlich schnell ausbreitet. Die Änderung der Wellenlänge wird durch den Brechungsindex n des Medium bestimmt. Er ist im allgemeinen sowohl abhängig von der Frequenz, wie auch von der Ausbreitungsrichtung und Polarisation des Lichtes, im zweiten Fall spricht man von einem anisotropen Medium.

Weiterhin ist der Brechungsindex komplex, der imaginäre Teil beschreibt dabei die Absorption des Mediums. Auch der imaginäre Teil kann abhängig von der Polarisation sein, man spricht dann von einem dichroitischen Kristall. Diese Abhängigkeit der Absorption von der Polarisation kann man sich zunutze machen um **Polarisationsfilter** herzustellen. In der Praxis wird hierbei eine Folie etwa aus Zellulosehydrat durch Streckung in eine Richtung dichroitisch gemacht.

Im nachfolgenden ist mit n jedoch stets nur der Realteil des Brechungsindex gemeint.

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (14)$$

$$c_m = \frac{c}{n} = \frac{\lambda}{n} \cdot f = \lambda_m \cdot f \quad (15)$$

Kristalle mit ausgezeichneten Achsen, besitzen in unterschiedlicher Richtung damit unterschiedliche Brechungsindizes. Der Übergang vom $E - Feld$ zum mediumsunabhängigen $D - Feld$

ist deshalb durch einen Tensor $\vec{\epsilon}$ gegeben:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{\epsilon} \vec{E} \quad (16)$$

$$\vec{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_3 \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$n_i = \sqrt{\epsilon_i} \quad (18)$$

In Hauptachsenform ergeben sich im allgemeinen 3 ausgezeichnete Achsen mit 3 unterschiedlichen Brechungszahlen n_i . Dies kann man mithilfe eines Ellipsoids veranschaulichen, dessen Hauptachsen gerade den optischen Achsen des Kristalls und deren Länge durch die Hauptbrechungsindizes gegeben sind. Die unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit beim Grenzübergang

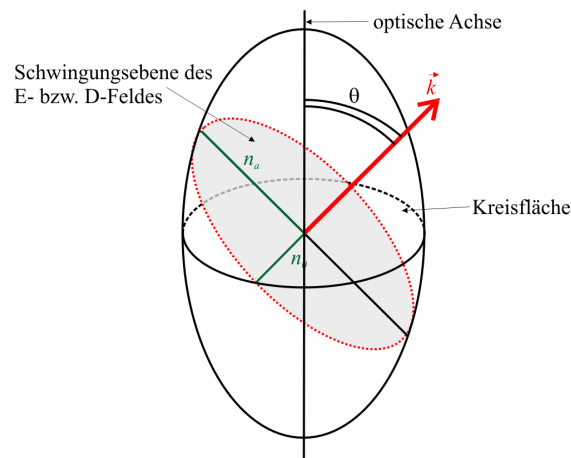


Abbildung 1: Der Indexellipsoid eines einachsigen Kristalls mit Schwingungsebene und dazugehörigen Brechungsindizes

zwischen Medien ist verantwortlich für die Brechung und Reflexion. Der Grenzübergang zwischen 2 Medien bietet außerdem eine weitere Möglichkeit zum Erzeugen polarisierten Lichtes. Fällt Licht auf eine Grenzfläche so ein, dass gebrochener und reflektierter Strahl senkrecht aufeinander stehen, so ist der reflektierte Strahl vollständig polarisiert.

Kehren wir zurück zu den anisotropen Materialien. Man kann verschiedene Arten von anisotropen Medien unterscheiden, dabei handelt es sich in der Anwendung meist um Kristalle.

Isotrope Kristalle Alle 3 Hauptbrechungsindizes sind identisch. Die Ausbreitung der Welle im Medium ist in alle Richtungen und für alle Polarisationen gleich. Der Indexellipsoid ist eine Kugel.

Einachsige Kristalle Das Medium besitzt eine ausgezeichnete Achse, parallel zu dieser ist der Brechungsindex ein anderer als senkrecht. Der einfallenden Strahl betrachtet man im **Haupt-**

schnitt, also in der Ebene in der der einfallende Strahl und die ausgezeichnete optische Achse liegen. In der Regel entstehen nun 2 Strahlen. Der ordentliche Strahl ist der Anteil der senkrecht zur Hauptebene polarisiert ist, er wird normal (ordentlich) nach dem snellius Brechungsgesetz gebrochen. Der zweite Strahl ist in der Hauptebene polarisiert, seine Wellenfront ist also ellip-tisch verzerrt, entsprechend den unterschiedlichen Brechungsindizes der Hauptebene. Die Wellen-normale $\vec{k}$, welche im Vakuum noch der Ausbreitungsrichtung der Welle entsprach, ist nun nicht mehr parallel zum Energiefluss $\vec{S}$ der Welle.

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (19)$$

$$\vec{k} = \vec{D} \times \vec{B} \quad (20)$$

Dieser außerordentliche Strahl wird also seitlich gebrochen, dieses Phänomen bezeichnet man als **Doppelbrechung**. In Richtung der optischen Achse, tritt keine Doppelbrechung auf.

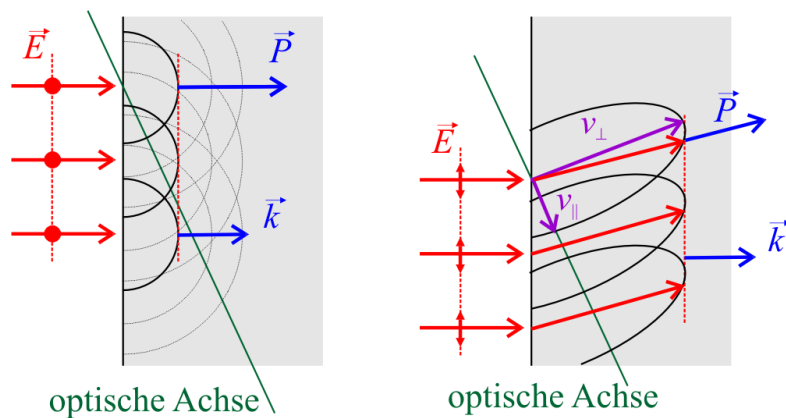


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Doppelbrechung $\vec{P} = \vec{S}$

Zweiachsige Kristalle Diese Kristalle sind durch den allgemeinen dreiachsigen Ellipsoid beschrieben, es entstehen dabei 2 außerordentliche Strahlen, nach dem gleichen Prinzip wie für den einachsigen Fall. Im Detail ist diese Art der Brechung jedoch nochmals deutlich komplizierter. In Richtung der Achse tritt wiederum keine Doppelbrechung auf, jedoch werden die beiden Polarisationsrichtungen aufgrund der unterschiedlichen Phasengeschwindigkeit senkrecht oder parallel zur 2. Achse des Kristalls phasenverschoben. Dies ist z.B. bei Glimmer der Fall. In Aufgabe 1 wird hiervon für die Erzeugung von elliptisch polarisiertem und zirkulär polarisiertem Licht gebrauch gemacht.

Mithilfe von anisotrope Medien steht eine weitere Methode zur Verfügung um polarisiertes Licht zu erzeugen. Da diese Medien die verschiedenen Polarisationen in unterschiedliche Richtungen brechen.

Optisch aktive Substanzen Eine besondere Form der Doppelbrechung liegt bei optisch aktiven Substanzen vor. Wird linear polarisiertes Licht durch diese Materialien (z.B eine Zuckerlösung) geschickt, so wird die Polarisationssebene gedreht. Dieser Vorgang ist proportional zur Konzentration bzw. Dichte des optisch aktiven Materials und der optischen Weglänge durch das Material.

Der Vorgang dieser zirkulären Doppelbrechung kann ebenfalls wieder durch die unterschiedlichen Phasengeschwindigkeiten der orthogonal zueinander links und rechtszirkulärpolarisierten Lichtwelle (welche als Superposition gerade linear polarisiertem Licht entspricht) verstanden werden.

2 Aufgabe 1: Licht mit besonderen Polarisationsseigenschaften

In diesem Versuch soll linear, elliptisch und zirkulär polarisiertes Licht erzeugt werden und deren Intensitätsverteilungen mithilfe eines Analysators bestimmt werden.

Eine elektromagnetische Welle habe die Polarisierung E_x in x-Richtung und E_y in y-Richtung. Die Amplituden der beiden Polarisierungen sind im Allgemeinen nicht gleich, und zwischen beiden Polarisierungen gibt es eine beliebige Phasenverschiebung. Realisierungsmöglichkeiten sind über Polarisationsfolien und Kristalle mit optischen Achsen, sodass je nach Dicke des Kristalls, aufgrund der unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Polarisierungen eine beliebige Phasendifferenz $\Delta\varphi$ eingebracht werden kann.

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |\vec{E}_x| \cdot \cos(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t) \\ |\vec{E}_y| \cdot \cos(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t - \Delta\varphi) \end{pmatrix} \quad (21)$$

$$= \begin{pmatrix} |\vec{E}_x| \cdot \cos(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t) \\ |\vec{E}_y| \cdot \left(\cos(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t) \cdot \cos(\Delta\varphi) + \sin(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t) \cdot \sin(\Delta\varphi) \right) \end{pmatrix} \quad (22)$$

Linear polarisiertes Licht Linear polarisiertes Licht erhält man, indem man einen Lichtstrahl durch einen Polarisator schickt, welcher nur eine Komponente des polarisierten Lichtes hindurchlässt. Realisierungsmöglichkeiten für einen solchen Polarisator wurden bereits weiter oben beschrieben. Die Phasendifferenz einer solchen linear polarisierten Welle beträgt ein Vielfaches von π , sodass Formel 22 sich zu einer Welle mit fester Schwingungsrichtung im Raum vereinfacht:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |\vec{E}_x| \cdot \cos(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t) \\ |\vec{E}_y| \cdot \cos(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t) \end{pmatrix} \quad (23)$$

Im Praktikum wird dieses Licht mithilfe von normalem Licht, welches durch eine Polarisationsfolie geschickt wird gewonnen. Je nach Analysatorstellung kommt dann kein Licht oder das

gesamte polarisierte Licht am Schirm an. Der Analysator ist dabei einfach ein weiterer Polarisator.

Elliptisch polarisiertes Licht Schickt man linear polarisiertes Licht durch ein Verzögerungsplättchen, welche eine Polarisationsrichtung um $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$ verzögert, so erhält man aus Formel 22 eine Welle deren Polarisationsrichtung sich auf einer elliptischen Bahn bewegt:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |\vec{E}_x| \cdot \cos(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t) \\ |\vec{E}_y| \cdot \sin(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t) \end{pmatrix} \quad (24)$$

Für eine beliebige Phase und gleiche Amplituden ergibt sich:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = |\vec{E}| \cdot \cos(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ \cos(\Delta\varphi) + \tan(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t) \cdot \sin(\Delta\varphi) \end{pmatrix} \quad (25)$$

Nicht ganz offensichtlich handelt es sich hier ebenfalls um eine elliptische Bahn. Alle weiteren Kombinationen von beliebigen Phasen und Amplituden ergeben ebenfalls elliptisch polarisiertes Licht, dabei erfährt die Ellipse jedoch eine Periheldrehung.

Das elliptische Licht wird im Versuch aus den beiden außerordentlichen Strahlen des Glimmerplättchens gewonnen. Aufgrund der unterschiedlichen Phasengeschwindigkeiten kommt es zu einer Phasendifferenz der beiden Strahlen und damit zu elliptisch polarisiertem Licht. Der Analysator wird dabei nie den kompletten Strahl absorbieren, weiterhin ist der Abstand L zwischen Quelle des elliptischen Lichtes und dem Analysator eine weitere Variable die bestimmt in welcher Stellung ϕ der Analysator mehr oder weniger Licht absorbiert.

Zirkulär polarisiertes Licht Sind beide Amplituden identisch und eine Phasenverschiebung von $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$ liegt vor, so erhält man als Spezialfall der Ellipse einen Kreis. Licht dessen Polarisationsrichtung sich auf einer Kreisbahn bewegt, immer als Funktion von $t = \vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t$ aufgefasst, nennt man zirkulär polarisiert. Im Versuch wird zirkulär polarisiertes Licht aus einem Glimmerplättchen der passenden Dicke gewonnen, sodass die Phasenverschiebungsbedingung erfüllt ist. Ein solches Plättchen nennt man auch $\frac{\lambda}{4}$ -Plättchen, da die beiden Polarisationsrichtungen einen Gangunterschied von $\frac{\lambda}{4}$ nach durchqueren des Plättchens besitzen. Der Analysator lässt in einem bestimmten Abstand jeweils nur in einer bestimmten Richtung das zirkulär polarisierte Licht vollständig passieren.

Für alle Teilversuch ist monochromatisches Licht die bessere Wahl, das sonst Dispersionseffekte auftreten können die nicht gewollt sind. Dies ist besonders wichtig für die Fälle in denen exakte Phasenbedingungen erfüllt sein müssen. Für linear polarisiertes Licht wäre auch normales Licht denkbar, falls die monochromatische Lichtquelle nicht hell genug für eine genaue Versuchsdurchführung ist.

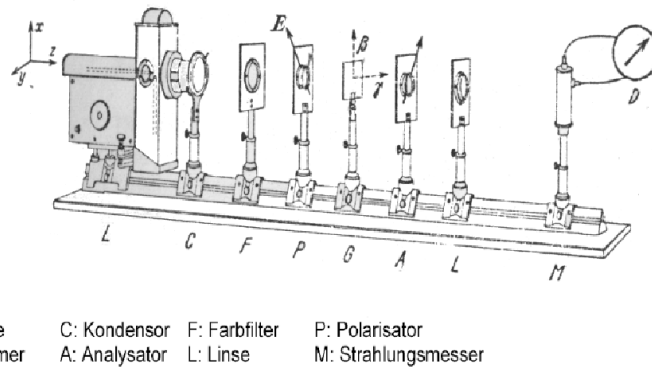


Abbildung 3: Möglicher Versuchsaufbau für die Erzeugung von Polarisiertem Licht

3 Aufgabe 2: Bestimmung der Differenz der Brechungsindizes

3.1 Für zirkulär polarisiertes Licht

Für das zirkulär polarisierte Licht ist die Phasenbedingung zwischen den beiden Polarisationen bekannt. Daraus ergibt sich der Gangunterschied zwischen den beiden Polarisationen:

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2} = (k_1 - k_2) \cdot d \quad (26)$$

$$k = \frac{\omega}{c_m} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{\lambda} \quad (27)$$

$$\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot (n_1 - n_2) \cdot d = \frac{\pi}{2} \quad (28)$$

$$(n_1 - n_2) = \Delta n = \frac{\lambda}{4 \cdot d} \quad (29)$$

Die Differenz der Brechungsindizes hängt also nur von der verwendeten Wellenlänge (hier ist monochromatisches Licht also unabdingbar) und der Dicke des Plättchens ab.

3.2 Für elliptisches Licht

Für den elliptischen Fall ist die genaue Phasenbeziehung nicht bekannt und muss bestimmt werden. Die Phasenverschiebung entspricht dabei, nach dem Musterprotokoll:

$$\Delta\varphi = \arcsin \left(\sqrt{\frac{L}{T}} \right) \quad (30)$$

$$\Delta n = \frac{\lambda}{2\pi \cdot d} \cdot \arcsin \left(\sqrt{\frac{L}{T}} \right) \quad (31)$$

L entspricht dabei der Länge der Ellipse und T der Tallenweite. Eine exakte Begründung der Formel erfolgt an dieser Stelle nicht.

4 Aufgabe 3: Demonstrationsversuch zur Farbänderung von Klebefilmbildern

In diesem Demonstrationsversuch wird ein Glimmerplättchen und Klebefilmbildern, etwa aus handelsüblichen Tesafilm, mit weißem polarisiertem Licht beleuchtet. Die verschiedenen Frequenzen des weißen Lichtes erfahren im Glimmerplättchen unterschiedliche Phasenverschiebungen. Es entsteht elliptisch polarisiertes Licht. Je nach Einstellung des Analysators werden daher unterschiedliche Farbkomponenten aus dem Bild entfernt. Man kann vermuten das die Reihenfolge der entfernten Farben proportional zur Wellenlänge der jeweiligen Farbe ist. Sollte wie in der Aufgabenstellung angedeutet Tesafilm die gleichen Eigenschaften wie das Glimmerplättchen aufweisen, so ist es ebenfalls doppelbrechend.

5 Aufgabe 4: Demonstrationsversuch zur Spannungsdoppelbrechung

Ähnlich wie bei Polarisationsfolien die in eine ausgezeichnete Richtung gezogen werden und dadurch doppelbrechend werden, wird auch Plexiglas unter Spannungseinwirkung doppelbrechend.

In vielen Materialien kann Doppelbrechung induziert werden, indem man diese einem mechanischen Druck (Torsion, Zug, Scherung, etc..) aussetzt. Hierdurch wird die Symmetrie des vorher isotropen Materials herabgesetzt und es kommt zur Doppelbrechung. Auch elektrische und magnetische Felder, sowie Temperaturänderungen können Doppelbrechung induzieren. In diesem Demonstrationsversuch beschränken wir uns jedoch auf mechanische Einwirkungen auf ein Modell aus Plexiglas.

Mithilfe eines Polarisationsfilters lassen sich die verschiedenen Spannungsstärken im Material anhand der Farbänderung beobachten. Dies funktioniert analog zum Demonstrationsversuch mit den Klebefilmbildern. Linien der gleichen Farbe bzw. Helligkeit bei monochromatischem Licht, entsprechen Linien gleicher mechanischer Spannung im Material.

6 Beantwortung der Fragen in der Vorbereitung

Ist Sonnenlicht polarisiert? Polarisationsfilter in der Fotografie? Das Sonnenlicht stammt aus einer thermischen Lichtquelle, der Sonne. Und ist damit erstmal nicht polarisiert. Das Licht wird jedoch in der Atmosphäre gestreut. Das blau des Himmels ist deswegen teilweise polarisiert. Ein entsprechendes Experiment wurde mithilfe eines Polarisationsfilters durchgeführt.

In der Fotografie verwendet man Polarisationsfilter um störende Reflexionen an glatten nicht-metallischen Oberflächen wie Wasser und Glas, welche polarisiertes Licht von sich geben, auszublenken. Weiterhin erscheint der Himmel durch das teilweise polarisierte blaue Licht beim Einsatz eines Polarisationsfilters dunkler. Wolken und Vordergrund treten so kräftiger hervor. Auch Regenbögen, welche ebenfalls polarisiert sind kann man so je nach Einstellung des Filters ausblenden oder (was öfters wünschenswert ist) stärker hervortreten lassen.

Literatur

[Aufgabenstellung] Aufgabenstellung zu den Versuchen P2-11

[Vorbereitungshilfe] Vorbereitungshilfe zu den Versuchen P2-11

[Literatur] Literatur zu den Versuchen P2-11

Abbildungsverzeichnis

1	http://de.wikipedia.org/wiki/Optische_Indikatrix	4
2	http://de.wikipedia.org/wiki/Doppelbrechung	5
3	Literatur	8