

8.3 Die Polarisation von Licht

Licht ist eine elektromagnetische Welle, die von den schwingenden Elektronen der Atome ausgesandt wird. Nimmt man an, nur ein einziges Elektron schwingt in einer Ebene, dann breitet sich das elektrische Feld \vec{E} in der Schwingungsebene des Dipols aus, das Magnetfeld \vec{B} steht senkrecht dazu. Die maximale Intensität wird in Richtung \vec{s} senkrecht zum Dipol abgestrahlt, in Richtung der Dipolachse ist die Intensität null. Ist \vec{s} die Ausbreitungsrichtung, dann bezeichnet man die von \vec{B} und \vec{s} aufgespannte Ebene als die Polarisationsebene der Welle. Die vom Dipol abgestrahlte Welle ist linear polarisiert.

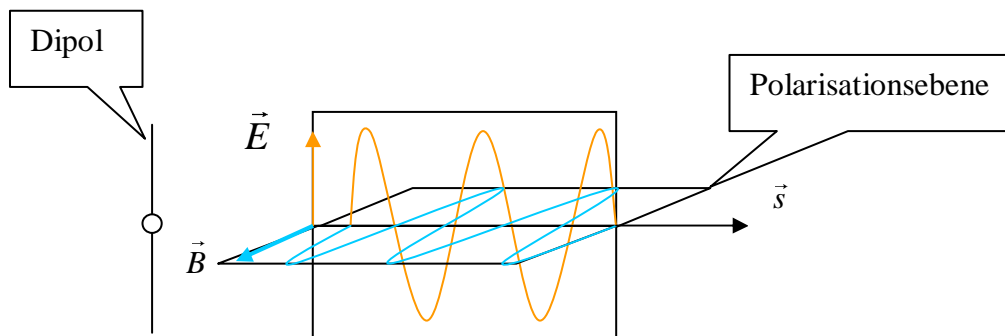


Abbildung 1 Definition der Polarisationsebene

Natürliches Licht wird von vielen in beliebigen Richtungen schwingenden Elektronen erzeugt, es ist deshalb unpolarisiert.

8.3.1 Erzeugung polarisierten Lichts

Geräte, die nur in einer Richtung polarisiertes Licht durchlassen, heißen Polarisatoren. Mit Analysatoren kann man die Polarisationsrichtung erkennen. Letztere sind um die Ausbreitungsrichtung drehbar. Ist der Analysator um den Winkel φ gegenüber der Polarisationsebene verdreht, dann ist die Feldstärke der durchgelassenen Strahlung

$$E = E_p \cdot \cos \varphi$$

Wegen $I \sim E$ gilt

$$I \sim \cos^2 \varphi$$

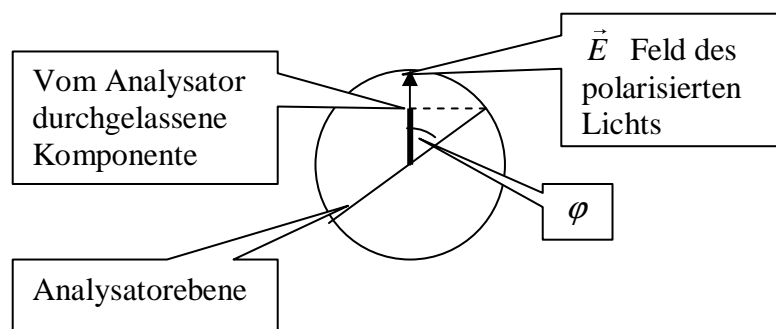


Abbildung 2 Intensität nach dem Analysator

8.3.1.1 Linear polarisiertes Licht Streuung

Fällt natürliches Licht auf eine Wanne mit trübem Wasser, dann wird an dessen suspendierten Teilchen das Licht gestreut. Die Teilchen verhalten sich wie Empfangsantennen, die von der elektromagnetischen Welle des einfallenden Lichts angeregt und dadurch selbst zum Sender werden. Der Vektor der Feldstärke steht aber immer *senkrecht zur Einfallrichtung* \vec{s} (el. mag. Wellen sind Transversalwellen). Deshalb ist es sinnvoll, jede der regellos verteilt liegenden Antennen in zwei Komponenten zu zerlegen. Die eine liege in Richtung von \vec{s} , die zweite in einer Ebene senkrecht dazu. Vom in Richtung von \vec{s} einfallenden Licht werden nur die Letzteren angeregt. Betrachtet man nun das von diesen Antennen ausgesandte Streulicht aus einer Richtung *senkrecht zu* \vec{s} und *senkrecht zur Richtung der Antenne*, dann beobachtet man nur noch eine linear polarisierte Komponente der Strahlung.

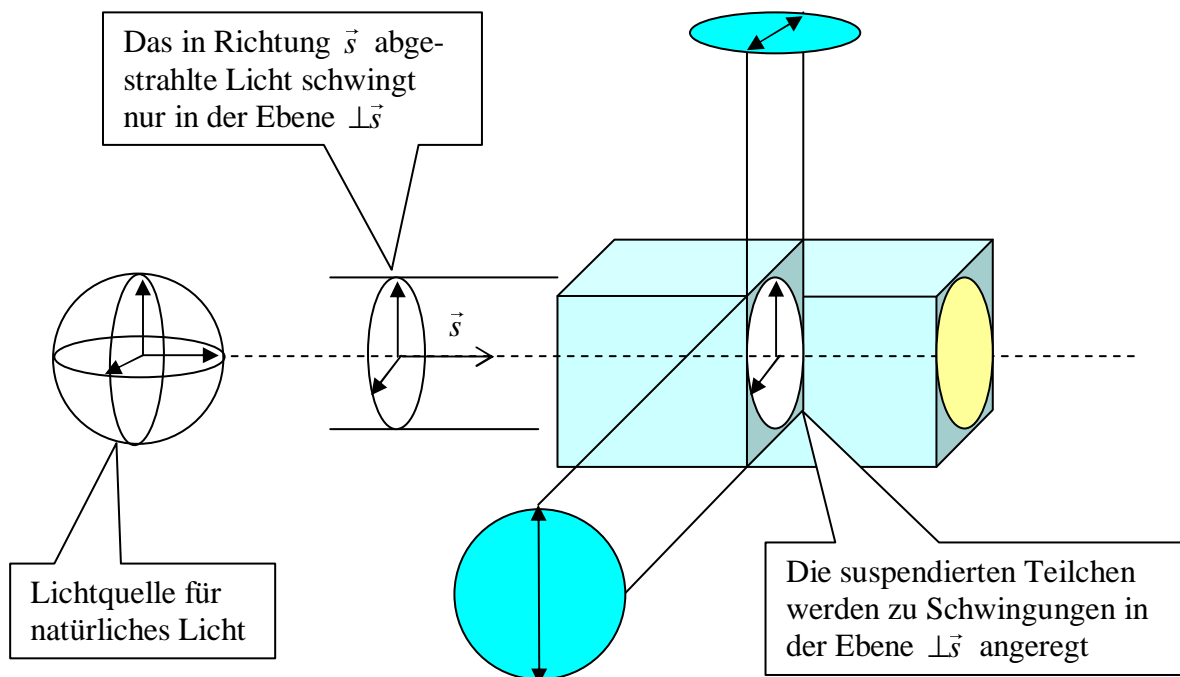


Abbildung 3 Schema zur Polarisation des von einer Suspension senkrecht zur Einfallrichtung \vec{s} gestreuten Lichts. Die Pfeile zeigen die Schwingungsrichtung der elektrischen Feldstärke. Aufgrund der Rayleigh Streuung ist das gestreute Licht bläulich, das durchgehende gelblich gefärbt.

Für die Intensität des durchgehenden Strahls in Abhängigkeit vom Weg x im Medium gilt das Rayleighsche Gesetz

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-h \cdot x}$$

Die Schwächungskonstante h hängt aber von der Wellenlänge bzw. der Frequenz ν der Strahlung ab:

$$h \sim \nu^4$$

Man erkennt, daß kurzwellige Strahlung stärker gestreut wird. Deshalb ist im durchgehenden Strahl der Blau Anteil geschwächt und es dominiert die Komplementärfarbe Gelb. Man denke z. B. an die Gelb bzw. Rotfärbung der Sonne, wenn ihr Licht morgens und abends unter flachem Winkel ausgedehnte Luftschichten mit suspendierten Staubeilchen durchquert. Dem-

entsprechend ist das Streulicht komplementär dazu Blau bzw. Grün, was man von der Färbung des Abendhimmels kennt

Versuch 1 *Streuung an einer Suspension.* In einer Wanne befindet sich mit Mastix getrübbtes Wasser. Mit einem Analysator erkennt man, daß das nach oben und das zur Seite gestreute Licht linear polarisiert ist.

- a) Wird die Suspension mit polarisiertem Licht beleuchtet, dann wird, je nach Stellung des Polarisators, nur nach oben oder nach vorn abgestrahlt
- b) Außerdem fällt auf, daß das gestreute Licht bläulich, das durchgehende Licht gelblich ist.

8.3.1.2 Polarisation durch Reflexion am Dielektrikum

Trifft ein Strahl von natürlichem Licht auf die Oberfläche einer Glasplatte, dann wird ein Teil der Strahlung reflektiert, ein anderer dringt in das Medium ein. Die Strahlung wird im Medium durch die Schwingung seiner Dipole fortgepflanzt. Steht die reflektierte Strahlung senkrecht zu der ins Medium gebrochenen, dann sind beide Anteile senkrecht zueinander linear polarisiert.

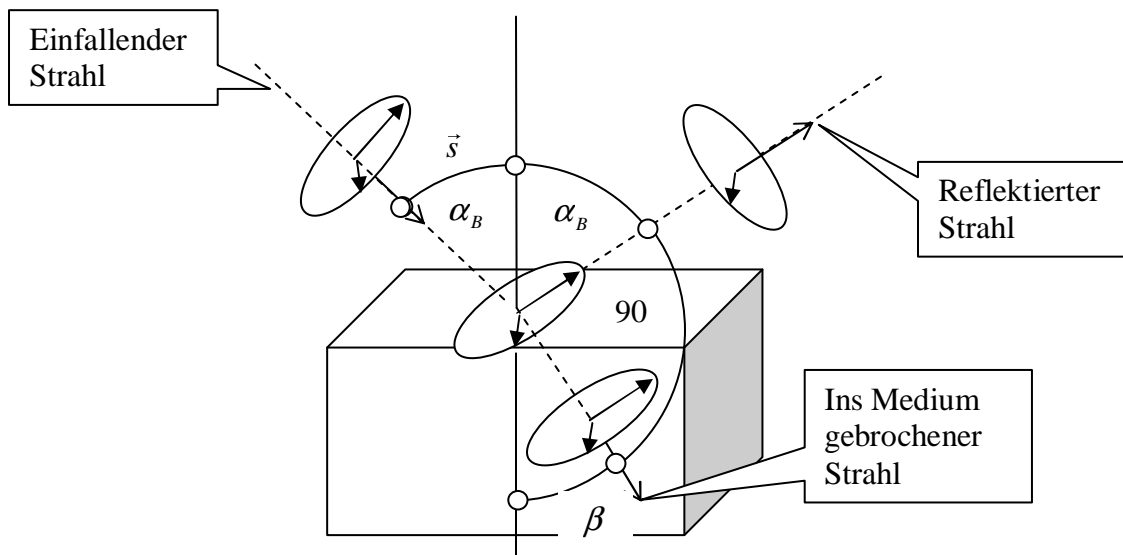


Abbildung 4 Lineare Polarisation des reflektierten Strahls bei Reflexion unter dem Brewster Winkel α_B

Steht der reflektierte Strahl senkrecht zu dem im Medium fortlaufenden, dann gilt das Brewstersche Gesetz:

$n = \tan \alpha_B$	Brewstersches Gesetz
$\alpha_B + \beta + 90 = 180$	Winkelsumme
$\beta = 90 - \alpha_B$	
$n = \frac{\sin \alpha_B}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha_B}{\sin(90 - \alpha_B)} = \frac{\sin \alpha_B}{\cos \alpha_B}$	Definition des Brechungsindex

Für Glas mit dem Brechungsindex $n=1,5$ beträgt der Brewster Winkel $56,3^\circ$. Durch Messung des Brewster Winkels kann der Brechungsindex bestimmt werden.

Versuch 2 Der Brewster Winkel wird mit Hilfe von zwei Spiegeln nachgewiesen. Der reflektierte Strahl verschwindet ganz, weil schon die einfallende Strahlung polarisiert ist. In der Figur oben entspricht das einem einfallenden Strahl mit nur einer Komponente, die in der Reflektionsebene liegt.

8.3.1.3 Linear polarisiertes Licht durch Doppelbrechung

Manche Kristalle, z. B. der Kalkspat, CaCO_3 , sind optisch anisotrop. In ihnen ist die Lichtgeschwindigkeit richtungsabhängig. Insbesondere gibt es in ihnen Richtungen, in denen sich unterschiedlich polarisierte Strahlung unterschiedlich schnell fortpflanzt.

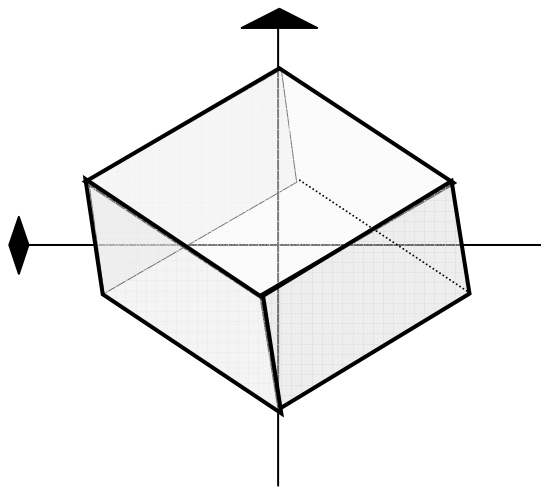


Abbildung 5 Schema eines Kalkspatkristalls mit rhomboedrischer Form. Die optische Achse steht senkrecht, sie ist die Achse mit 3-zähliger Symmetrie. Von den drei senkrecht dazu stehenden 2-zähligen Achsen ist eine als waagrechte Linie eingezeichnet.

Die Achse mit höchster Symmetrie heisst „optische Achse“. Strahlt Licht in dieser Richtung ein, dann ist die Lichtgeschwindigkeit für alle Polarisationsrichtungen konstant c_o . Strahlt man aber senkrecht zur optischen Achse ein, dann hängt die Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Polarisationsrichtung ab. Licht mit dem elektrischen Feldvektor senkrecht zur optischen Achse, als „ordentliches Licht“ bezeichnet, läuft mit c_o . Strahlung mit dem elektrischen Feldvektor in Richtung der optischen Achse, „außerordentliches Licht“, breitet sich mit c_{ao} aus.

Fällt unpolarisiertes, natürliches Licht in einer Richtung außerhalb der optischen Achse ein, dann wird die Wellenfront in zwei unterschiedlich polarisierte Wellenzüge aufgeteilt, deren Feldvektoren zueinander senkrecht stehen. Die Wellenzüge entsprechen dem ordentlichen und außerordentlichen Licht und breiten sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit aus. Im Kalkspat gilt $c_{ao} = 1,116 \cdot c_o$, man nennt Kristalle mit einer bevorzugten Richtung und $c_{ao} > c_o$ „einachsigen negativ“.

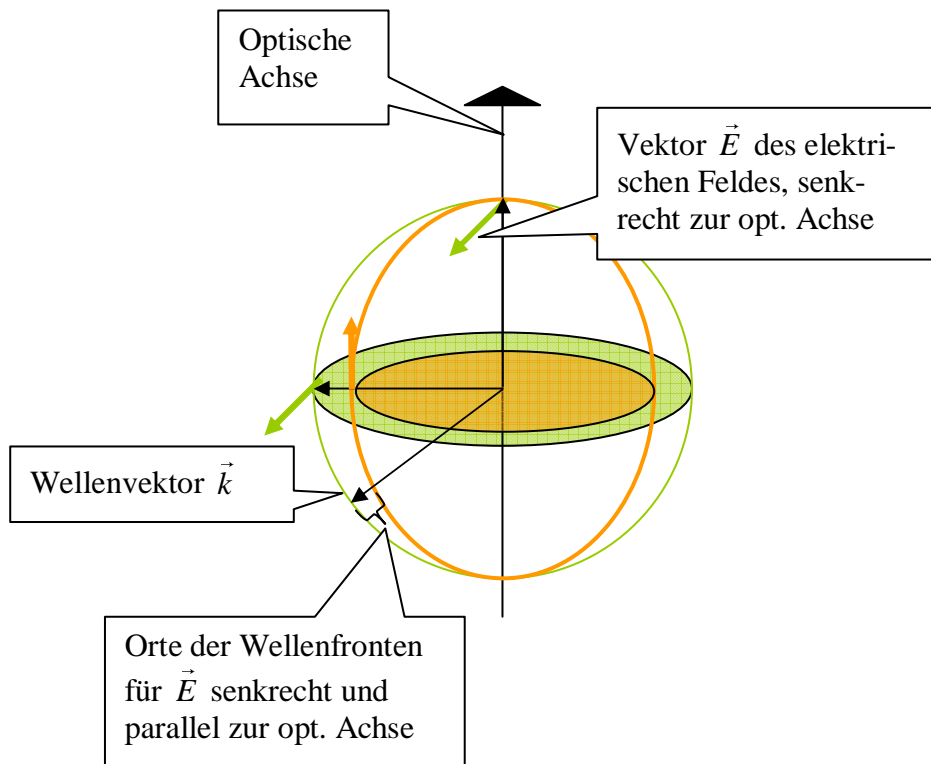


Abbildung 6 Ausbreitungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Einfallsrichtung für den außerordentlichen Strahl (orangefarbenes Ellipsoid, „Indikatrix“) zu einem optisch anisotropen, einachsigen positiven Kristall: Der Betrag eines Vektors vom Mittelpunkt bis zur Oberfläche des Ellipsoids zeigt die Geschwindigkeit des außerordentlichen Lichts, wenn es sich in Richtung des Vektors ausbreitet. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des ordentlichen Lichts ist für alle Richtungen gleich (grüne Kugel). Nähert sich die Ausbreitungsrichtung des außerordentlichen Lichts der optischen Achse, dann werden die Unterschiede zwischen beiden Strahlen kleiner.

Strahlt man mit unpolarisiertem Licht *senkrecht* auf eine *schräg* zur optischen Achse stehende Fläche eines Kalkspatkristalls, dann werden der ordentliche und außerordentliche Strahl auch räumlich aufgespalten: Der ordentliche Strahl läuft ungebrochen durch den Kristall, der außerordentliche Strahl wird- trotz senkrechten Einfalls- abgelenkt. Man bezeichnet diesen Effekt als „Doppelbrechung“. Im „*Nicolschen Prisma*“ wird einer der beiden Strahlen durch Totalreflektion ausgeblendet, es wird nur der polarisierte, ordentliche Strahl durchgelassen.

Die Anisotropie in der atomaren Anordnung ist die Voraussetzung für die Doppelbrechung. Deshalb beobachtet man in mechanisch gespannten Material, auch in z. B. Glas oder in Plastikfolien, „Spannungsdoppelbrechung“.

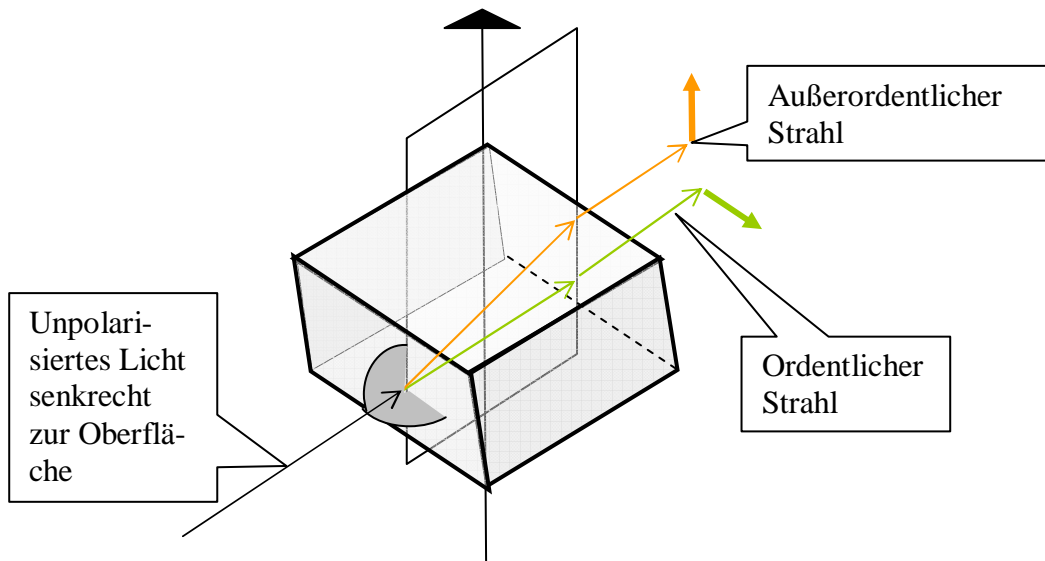


Abbildung 7 Doppelbrechung: Licht fällt senkrecht auf eine Fläche eines optisch einachsigen Kristalls. Steht die Fläche nicht senkrecht zur optischen Achse, dann wird das Licht in zwei Strahlen unterschiedlicher Polarisation und Ausbreitungsgeschwindigkeit aufgeteilt. Steht die Fläche auch nicht parallel zur optischen Achse, dann treten beide Strahlen an unterschiedlichen Stellen des Kristalls aus. Diese Erscheinung nennt man Doppelbrechung.

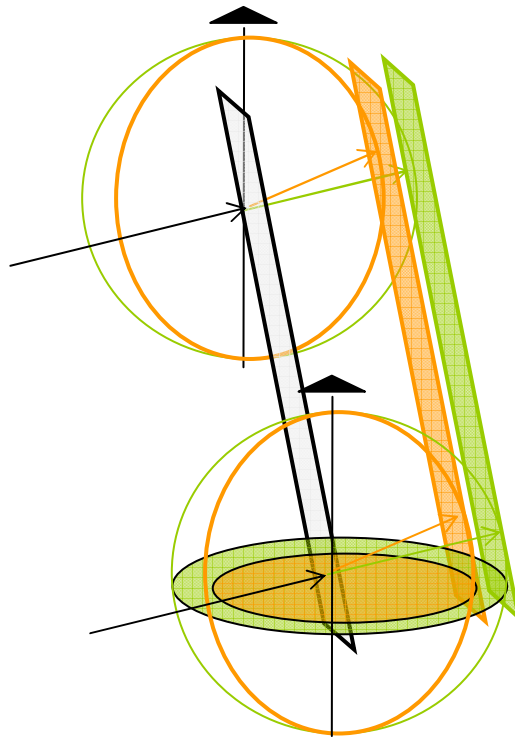


Abbildung 8 Qualitative Konstruktion nach dem Huygens-Fresnelschen Prinzip zur Veranschaulichung der beiden Wellenfelder mit unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit. Die Oberfläche (grau), auf die das Licht senkrecht einfällt, sei gegenüber der optischen Achse geneigt.

Manche doppelbrechenden Kristalle absorbieren das ordentliche und außerordentliche Licht unterschiedlich stark: Man nennt diesen Effekt *Dichroismus*. Polarisationsfolien enthalten anisotrope Einlagerungen dichroitischen Materials.

Versuch 3 a) Doppelbrechung am Kalkspat. b) Am Turmalin wird der Dichroismus gezeigt: Das grüne durchfallende Licht ist polarisiert.

Versuch 4 Spannungsdoppelbrechung wird am verspannten Glas gezeigt.

8.3.2 Zirkular polarisiertes Licht und „ $\lambda/4$ Plättchen“

Überlagert man zwei linear polarisierte Strahlen mit gleicher Ausbreitungsrichtung und gleicher Frequenz aber zueinander senkrechten Feldvektoren, so erhält man eine zirkular polarisierte Welle, wenn die beiden Wellenzüge $\pi/2$ zueinander phasenverschoben sind, die Komponenten der Amplitude verhalten sich also wie $\sin \omega t$ und $\cos \omega t$. Der Feldvektor läuft dann auf einer Schraubenlinie um die Ausbreitungsrichtung.

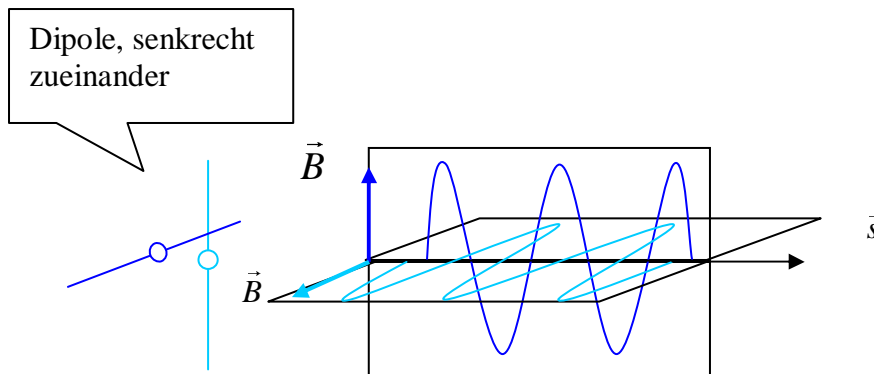


Abbildung 9 Schema der um $\pi/2$ gegeneinander phasenverschobenen Teilwellen, deren Summe zirkular polarisiertes Licht ergibt

Eine Phasendifferenz stellt sich zwischen dem ordentlichen und außerordentlichen Strahl beim Durchtritt durch ein doppelbrechendes Medium ein, weil wegen der unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit die eine Welle hinter der anderen herhinkt. Durch geeignete Dicke eines Plättchens kann man gerade die Phasendifferenz $\pi/2$ einstellen. Damit kann man aus natürlichem Licht zirkular polarisiertes Licht erzeugen. Die Phasendifferenz entspricht $\lambda/4$, man nennt diese Plättchen deshalb „ $\lambda/4$ Plättchen“.

Versuch 5 In einem Strahlengang mit Polarisator, „ $\lambda/4$ Plättchen“, Analysator und Blaufilter (weil das „ $\lambda/4$ Plättchen“ für Blau gilt) zeigt sich die zirkulare Polarisation dadurch, daß der Analysator in allen Stellungen durchlässig ist.

8.3.3 Optische Aktivität

Moleküle, die sich durch einen Drehsinn auszeichnen, werden als links- oder rechts-„händig“, oder, zusammenfassend, als „chiral“ (griechisch für händig) bezeichnet. Durchläuft monochromatisches, linear polarisiertes Licht ein Medium mit chiralen Molekülen oder molekularen Baugruppen, dann ist das Licht nach Durchtritt zwar linear polarisiert, aber mit gedrehter Polarisationsebene. Stoffe mit dieser Eigenschaft, z. B. eine Rohrzuckerlösung, aber auch ein Quarz Kristall, wenn er in geeigneter Richtung beleuchtet wird, nennt man optisch aktiv.

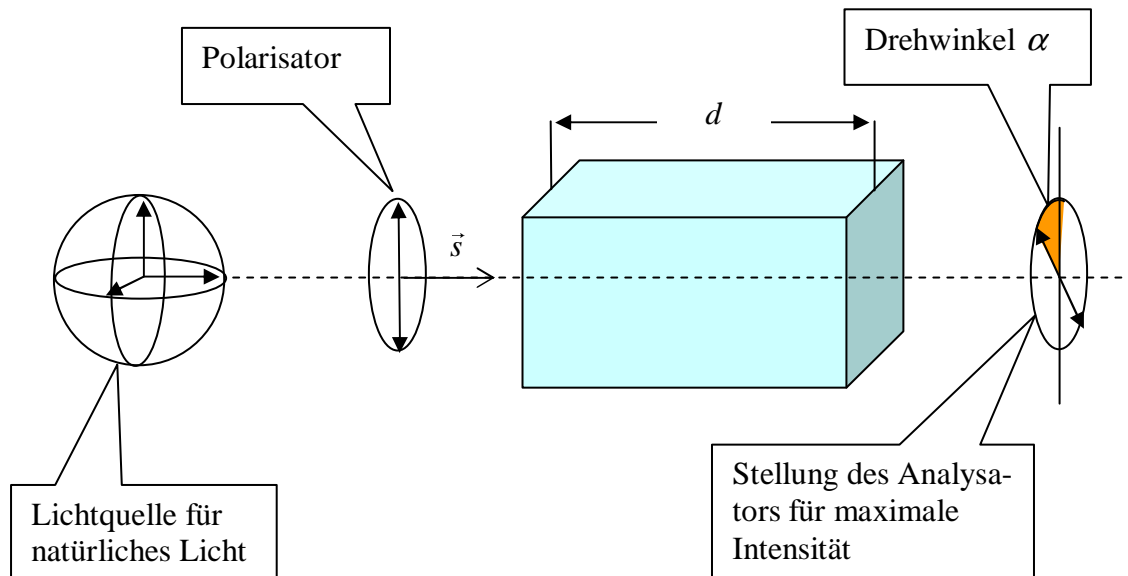


Abbildung 10 Polarimeter zur Messung der optischen Aktivität einer Lösung

	Einheit	
$\alpha = \alpha_0 \cdot C \cdot d$	deg	Drehwinkel der Polarisationsebene
$C = \frac{m}{V}$	$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	Konzentration: Masse des gelösten Stoffs in g/ Volumen des Lösungsmittels in cm^3
d	dm	Weg in der Küvette oder im Material, in Dezimeter
α_0	$\frac{\text{deg} \cdot \text{cm}^3}{\text{g} \cdot \text{dm}}$	Spezifische Drehung in Grad
Etwa 120	$\frac{\text{deg} \cdot \text{cm}^3}{\text{g} \cdot \text{dm}}$	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$
18	$\frac{\text{deg}}{\text{mm}}$	Quarz, für Rotlicht ($\alpha = \alpha_0 \cdot C \cdot d$, d in mm)

Tabelle 1 Drehwinkel der Polarisation durch optisch aktive Stoffe

Formal kann man sich die lineare Polarisation als Summe zweier gegenläufiger zirkular polarisierter Wellen vorstellen. Wird eine davon im Medium gebremst, dann ist sie beim Verlassen des Mediums in der Phase gegenüber der anderen versetzt. Addiert ergibt sich wieder eine

linear polarisierte Welle, aber mit gedrehter Polarisationssebene. Der Formalismus ist analog zu dem zur Wirkung des „ $\lambda/4$ Plättchens“, nur sind die Komponenten jetzt zirkular polarisiert.

Versuch 6 Drehung der Polarisationssebene durch eine Flüssigkeit mit chiralen Molekülen. Polarisator und Analysator werden zunächst - ohne Medium zwischen ihnen - auf Auslöschung gestellt. Wird zwischen beide eine Küvette mit Zuckerlösung gestellt, dann tritt Licht durch den Analysator, weil die Polarisationssebene gedreht wurde.

Versuch 7 Drehung der Polarisationssebene durch eine Quarz Scheibe. Anstelle der Flüssigkeit wird die Quarz Scheibe eingesetzt. Auch sie dreht die Polarisationssebene, so daß ein ohne Quarz auf Auslöschung gestellter Analysator Licht durchlässig wird.

Versuch 8 Die Polarisationssebene von Radarwellen wird durch Schraubenförmige Drahtstücke gedreht. Es wird zunächst die Polarisation durch Drehen des Empfängers gezeigt. a) Rechtsschraube eingesetzt: Die Polarisationssebene dreht entsprechend b) Linksschrauben eingesetzt: Die Polarisationssebene dreht in Gegenrichtung.

(Erläuterung zu diesem Versuch: http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten/V8_3_5AChiral.DOC)