

Technische Optik 07

1 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Entdeckt wurde polarisiertes Licht durch Étienne Louis Malus (1775 – 1812), einen französischer Ingenieur und Physiker. Er fand, dass Licht, das von einer Glasoberfläche reflektiert wurde, verändert ist:

„Licht, das an der Grenzfläche zwischen zwei optisch transparenten Stoffen reflektiert wird, ist teilweise polarisiert.“

Vier technisch wichtige Vorgänge liefern polarisiertes Licht:

1. **Reflexion** an Oberflächen von durchsichtigen Medien,
2. **Dichroismus** (selektive Absorption),
3. **Streuung** an kleinen Teilchen und
4. **Doppelbrechung** in einigen Kristallen.

Wir untersuchen im folgenden, wie ein bestimmter Polarisationszustand gezeichnet wird, wie man ihn herstellt und wie er theoretisch zu behandeln ist; anschließend folgen Beispiele mit Anwendungen.



Technische Optik 07

2 von 61

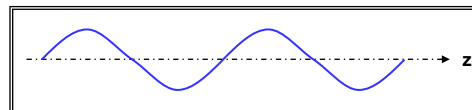
Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

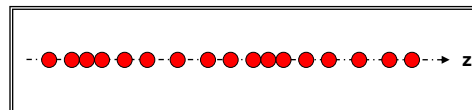
Licht verhält sich in vielen Versuchen wie eine Welle. Es gibt zwei bekannte **Modelle** für Wellen. (Merkwürdig: Die schönen Wellen auf der Kieler Förde sind von diesen **beiden** verschieden!)

Die beiden Bedingungen für eine Welle:

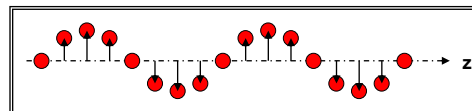
*Es muss etwas schwingen,
und die Energie muss sich im Raum
ausbreiten.*



Schall bildet eine **Longitudinalwelle** aus: **Schwingung** und **Ausbreitung** geschehen in gleicher Richtung.



Eine **Transversalwelle** zeichnet sich dadurch aus, dass die Richtung der Schwingung und die Ausbreitung der Welle **senkrecht** zueinander geschehen.



Elektromagnetische Wellen sind Transversalwellen: Der Vektor der elektrischen Feldstärke schwingt senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Daher kann Licht die Eigenschaft der Polarisation zeigen. Für eine Longitudinalwelle ist Polarisation unvorstellbar, weil quer zur Ausbreitung keine Richtung ausgezeichnet ist.

Technische Optik 07

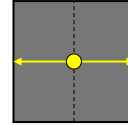
3 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

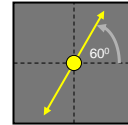
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Betrachten wir Lichtstrahlen, die sich auf unsere Augen zu bewegen.

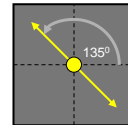
Für den ersten schwingt der Vektor der elektrischen Feldstärke in einer festen Richtung (hier: x-Richtung). So muss es bei einer Transversalwelle sein.



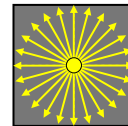
Der zweite Lichtstrahl hat eine andere Richtung (hier um $+60^\circ$ gegen die x-Achse gedreht), in der sein Vektor der elektrischen Feldstärke schwingt.



Ein dritter Lichtstrahl (-45° oder $+135^\circ$ gedreht) besitzt noch eine andere Richtung. Er ist wie die beiden vorherigen Beispiele vollständig linear polarisiert, denn sein E-Vektor schwingt nur in einer Richtung.



Licht aus einer gewöhnlichen Lampe hat viele Einzelstrahlen mit allen möglichen Schwingungsrichtungen. Das nennt man unpolarisiertes Licht.



Technische Optik 07

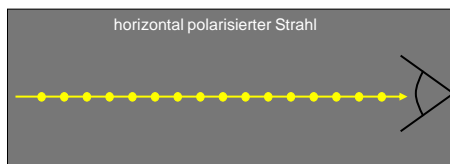
4 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

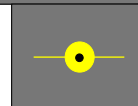
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Wie zeichnet man linear polarisiertes Licht?

In der seitlichen Ansicht zeichnet man den E-Vektor als kleinen, ausgefüllten Kreis für die Schwingungsrichtung von vorn nach hinten.



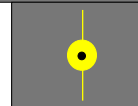
Richtung der Schwingung des E-Vektors, wenn der Strahl auf den Beobachter zukommt: horizontal.



In der seitlichen Ansicht zeichnet man eine senkrechte Linie auf dem Strahl, wenn der E-Vektor von oben nach unten schwingt.



Richtung der Schwingung des E-Vektors, wenn der Strahl auf den Beobachter zukommt: vertikal.



Technische Optik 07

5 von 61

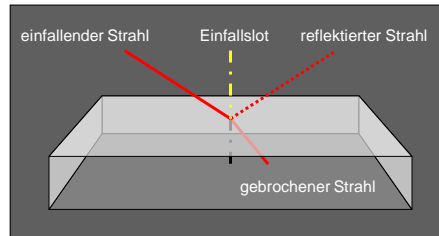
Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

1 Reflexion

Herstellung von linear polarisiertem Licht durch Reflexion (Malus)

Licht, das auf die Grenzfläche zwischen zwei Medien von unterschiedlichem Brechungsindex (z. B. Luft und Glas) trifft, wird zum Teil reflektiert. Dieser reflektierte Strahl ist teilweise linear polarisiert. Die Einfallsebene wird vom einfallenden Strahl und dem Einfallslot aufgespannt.



Die Leistung des reflektierten Strahls I_R wird durch das Produkt aus der Stärke des einfallenden Strahls I_0 und dem Reflexionsgrad R ($0 < R < 1$) berechnet:

$$I_R = I_0 * R$$

Der Reflexionsgrad R ist verschieden für die beiden Haupt-Polarisationsrichtungen, senkrecht und parallel zur Einfallsebene (R_s , R_p).

Technische Optik 07

6 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

2 Dichroismus

Herstellung von linear polarisiertem Licht durch Dichroismus

Wenn in einer Folie die Absorption des Lichts von der Polarisationsrichtung abhängt (das nennt man Dichroismus), wird unpolarisiertes Licht beim Durchgang in polarisiertes überführt. Dazu benutzt man eine Polarisationsfolie (Polaroid-Folie, benannt nach der Firma, die das Patent zur Herstellung besaß).

Die Herstellung derartiger Folien ist in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts Edwin Land (1909 – 1991, amerikanischer Chemiker und Erfinder) gelungen.

Dadurch sind erstmals Polarisations-Versuche mit Strahlbündeln von großem Querschnitt einfach möglich.



Technische Optik 07

7 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

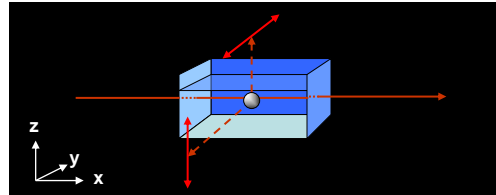
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

3 Streuung

Herstellung von linear polarisiertem Licht durch Streuung (Rayleigh)

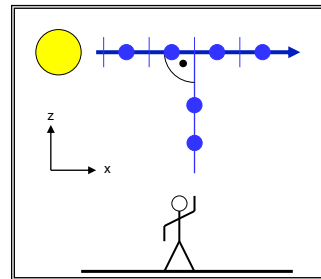
Licht strahlt in x-Richtung durch ein Glasgefäß, in dem ein Tropfen Milch im Wasser verrührt ist. Ein solches Glasgefäß nennt man *Küvette*.

Unter 90° zur Ausbreitungsrichtung (also nach vorne oder nach oben) kann man den Verlauf des Strahls in der Mischung verfolgen. Dafür sind die Fett-Tröpfchen der Milch verantwortlich, die den Lichtstrahl streuen (= in viele Richtungen verteilen).



Beim Vorgang der Streuung wird die Schwingungsrichtung des E-Vektors nicht verändert. In einem Strahl, der sich in x-Richtung ausbreitet, schwingt der E-Vektor in y- oder z-Richtung. Für den in z-Richtung gestreuten Strahl bleibt als Schwingungsrichtung nur die y-Richtung. Daher ist das Blau des Himmels linear polarisiert, wenn wir unter 90° zur Ausbreitungsrichtung des primären Strahls sehen!

Sollte der primäre Strahl in z-Richtung linear polarisiert sein, dann wird in z-Richtung gar kein Streulicht zu sehen sein. Diese Eigenschaften sind mit Polarisationsfiltern zu messen.



Technische Optik 07

8 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

4 Doppelbrechung

Herstellung von polarisiertem Licht durch Doppelbrechung (Erasmus Bartholinus)

1669 berichtete der dänische Arzt und Gelehrte Erasmus Bartholinus (1625 – 1698) von den optischen Eigenschaften eines Kristalls, den er auf Island gefunden hatte (damals gehörte Island zum dänischen Königreich).

Die ausführliche Beschreibung der optischen Eigenschaften brachten die größten Physiker der Zeit (Isaac Newton und Christiaan Huygens) dazu, sich mit der Erklärung der an diesem Material angestellten Beobachtungen zu befassen.

Newton hatte dabei keinen Erfolg, weil er das falsche Modell für Licht (Teilchenmodell) bevorzugte. Die Erklärung von Huygens auf der Grundlage des Wellenmodells wird heute allgemein akzeptiert, wenn Licht gebrochen, gebeugt oder reflektiert wird. Die Absorption ist demgegenüber im Wellenmodell nicht zuverlässig zu erklären.

Erasmus Bartholinus, Gemälde im Schloss Frederiksborg, Hillerød, Seeland, Dänemark



Technische Optik 07

9 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

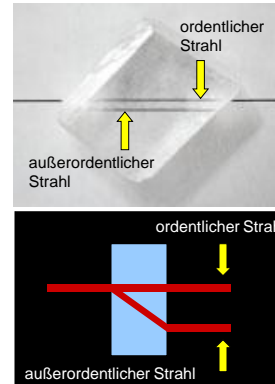
4 Doppelbrechung

Liegt ein Kristall aus Calciumcarbonat auf einer Paperoberfläche mit einer dunklen Linie, bekommt man eine doppelte Linie zu sehen. Daher spricht man von „Doppelbrechung“. Die Wellen der beiden Bilder sind senkrecht zueinander linear polarisiert.

Die Erklärung dafür lautet (Christiaan Huygens, 1629 - 1695):

Die Brechzahl des Mediums hängt vom Winkel zwischen der Schwingungsrichtung des E-Vektors und der Kristallachse ab.

Wenn der E-Vektor senkrecht zur Kristallachse schwingt, nennen wir das den ordentlichen Strahl, wenn er in Richtung der Kristallachse schwingt, spricht man vom außerordentlichen Strahl.



Die Brechungsindizes für diese beiden Richtungen des E-Vektors sind für Kalkspat verschieden:

$$n_o = 1,658; n_{ao} = 1,486$$

Um den Strahlengang im Kristall auf obigem Bild zu erklären, muss angenommen werden, dass die Kristallachse nicht parallel zur Eintrittsfläche liegt.

Technische Optik 07

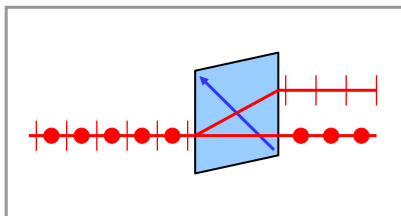
10 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

4 Doppelbrechung

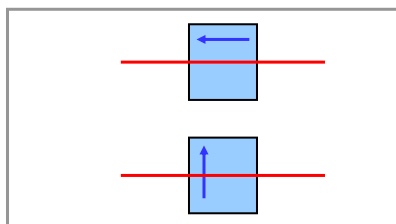
Ein Lichtstrahlbündel, das durch einen natürlichen Kristall aus Kalkspat geführt wird, wird in zwei Strahlen aufgespalten, einen ordentlichen und einen außerordentlichen Strahl. Woher kommt der Name „außerordentlicher Strahl“?



Obwohl für den Eintritt der Einfallswinkel für beide Polarisationsrichtungen gleich Null ist, ergibt sich für den einen der beiden Strahlen ein Brechungswinkel ungleich Null. Das ist doch außerordentlich!!! (Daher kommt der Name.)

Wenn der einfallende Strahl unpolarisiert ist, verlaufen die beiden den Kristall verlassenden Strahlen parallel zueinander und sind senkrecht zueinander polarisiert.

Heute schleift man den Kristall meistens so ab, dass die Kristallachse parallel zur vorderen Ebene liegt (unten). Vor 150 Jahren hat man ein Bauteil benutzt, wo das nicht gemacht wurde. Dieses Bauteil war sehr erfolgreich (nicolsches Prisma, benannt nach William Nicol, 1768 – 1851, einem schottischen Physiker).



Technische Optik 07

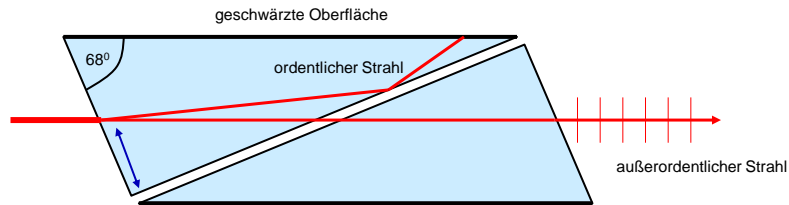
11 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Das **nicolsche Prisma** besteht aus zwei verkitteten Hälften mit senkrecht zueinander liegenden optischen Achsen. Der Einfallswinkel an der ersten Oberfläche beträgt 22° . Dadurch wird der außerordentliche Strahl nicht abgelenkt.

An der Fügestelle der beiden Teilprismen wird der ordentliche Strahl im linken Prisma zum außerordentlichen Strahl im zweiten. Weil der Unterschied der Brechzahlen sehr groß ist, findet für die eine Komponente (ordentlicher Strahl) Totalreflexion statt.



Dieses Prisma hat Vorteile, die für Versuche sehr angenehm sind: Es ist „geradsichtig“, d. h. der austretende Strahl hat dieselbe Richtung wie der einfallende Strahl; es kann in einer Drehfassung gefasst sein, wodurch man einfach auf andere Polarisationsrichtungen umstellen kann; wenn man ein Bild überträgt, gibt es keine oben-unten- oder rechts-links-Vertauschung.

Technische Optik 07

12 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Die Unterschiede in den Werten für die beiden Brechungsindizes sind vom Material abhängig. Es gibt Materialien, in denen der außerordentliche Strahl einen größeren Brechungsindex hat (Rutil), in anderen ist er kleiner (Kalkspat).

Material	n_o	n_{ao}
Kalkspat (CaCO_3)	1,6584	1,4864
Turmalin	1,6425	1,6220
Quarz (kristallin)	1,5442	1,5533
Rutil (TiO_2)	2,6158	2,9029
Lithiumniobat (LiNbO_3)	2,28647	2,20240

Turmalin ist ein natürliches Mineral von komplizierter Zusammensetzung. Aus ihm werden Edelsteine gefertigt; sie können farblos sein, sind aber oft rosa, rot, gelb-braun oder grün. Fachleute unterscheiden 11 verschiedene Arten (... ein weites Feld ...). Bei Quarz muss beachtet werden, dass es amorph, synthetischen Quarz gibt, der nicht doppelbrechend ist. Lithiumniobat ist in vielen Bereichen der Technischen Optik von Bedeutung (Elektro-Optik).

Technische Optik 07

13 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

1 Reflexion

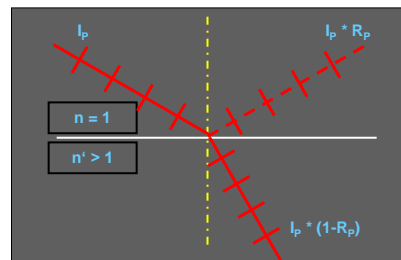
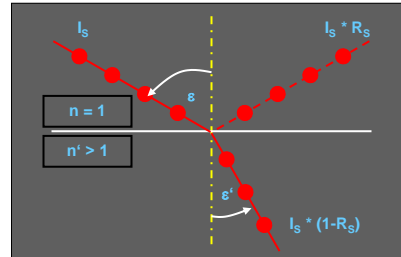
Beispiel: Polarisation durch Reflexion und fresnelsche Reflexionsformeln

Wenn die Polarisationssebene senkrecht auf der Ebene steht, die von einfallendem Strahl und Einfallslot aufgespannt wird, liegt s-Polarisation vor. Dann gilt für den Reflexionsgrad:

$$R_s = \left(\frac{\sin(\varepsilon - \varepsilon')}{\sin(\varepsilon + \varepsilon')} \right)^2$$

Wenn die Polarisationssebene parallel zur Ebene steht, die von einfallendem Strahl und Einfallslot aufgespannt wird, liegt p-Polarisation vor. Dann gilt für den Reflexionsgrad:

$$R_p = \left(\frac{\tan(\varepsilon - \varepsilon')}{\tan(\varepsilon + \varepsilon')} \right)^2$$



Technische Optik 07

14 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

1 Reflexion

Beispiel:

Untersuchen wir den Einfall eines Lichtstrahls aus Luft auf eine Glasoberfläche mit dem Brechungsindex n' . Wenn der Einfallswinkel ε gegen Null geht, streben R_s und R_p einem gemeinsamen Grenzwert R_g zu (keine Einfallsebene mehr!). Wie groß ist R_g ?

Wir betrachten die Fresnelsche Reflexionsformel für R_s :

$$R_s = \left(\frac{\sin(\varepsilon - \varepsilon')}{\sin(\varepsilon + \varepsilon')} \right)^2$$

Wenn der Einfallswinkel ε gegen Null geht, wird auch der Brechungswinkel sehr klein. Dann muss im Zähler wie auch im Nenner der Sinus von sehr kleinen Winkeln gebildet werden. Wenn die Winkel ε und ε' im Bogenmaß (rad) ausgedrückt wird, gilt die paraxiale Näherung:

$$\sin(\varepsilon - \varepsilon') \approx \varepsilon - \varepsilon' \quad \sin(\varepsilon + \varepsilon') \approx \varepsilon + \varepsilon'$$

Der Reflexionsgrad strebt also dem Wert zu:

$$R_s = \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon'}{\varepsilon + \varepsilon'} \right)^2$$

Anstatt des snelliusschen Brechungsgesetzes gilt für kleine Winkel das paraxiale Brechungsgesetz:

$$n' \cdot \varepsilon' = \varepsilon$$

Wenn wir das einsetzen, bekommen wir:

$$R_s = \left(\frac{n' \cdot \varepsilon' - \varepsilon'}{n' \cdot \varepsilon' + \varepsilon'} \right) = \left(\frac{n' - 1}{n' + 1} \right)^2$$

Beispielsweise $n' = 1,5$: $R_g = 0,04$. Das ist der Grenzwert für gegen Null strebenden Einfallswinkel.

Technische Optik 07

15 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

1 Reflexion

Weil $\tan(90^\circ) = \infty$, wird der Reflexionsgrad R_p für einen bestimmten Einfallswinkel ε_B gleich Null. Diesen Winkel nennt man „Brewster-Winkel“. Wie berechnet man den Einfallswinkel ε_B ?

Einfallswinkel ε_B plus Brechungswinkel ε' sollen 90 Grad sein. Aus dem Brechungsgesetz folgt für einen Strahl, der unter dem Brewster-Winkel ε_B aus Luft ($n = 1$) auf das Glas (n') einfällt:

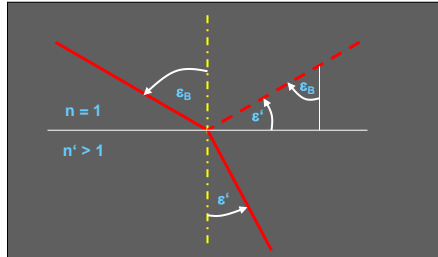
$$n' \cdot \sin(\varepsilon') = \sin(\varepsilon_B) \quad (1)$$

Außerdem gilt für diesen Fall ($\varepsilon_B + \varepsilon' = 90^\circ$):

$$\sin(\varepsilon') = \cos(\varepsilon_B) \quad (2)$$

Wenn wir Gleichung (1) durch Gleichung (2) dividieren, erhalten wir:

$$\tan(\varepsilon_B) = n'$$



Für einen gegebenen Wert der Brechzahl n' können wir damit den Brewster-Winkel ε_B berechnen.

Technische Optik 07

16 von 61

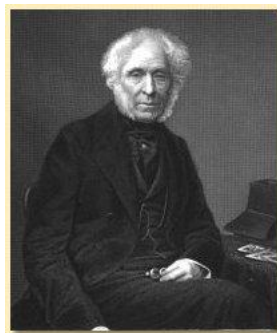
Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

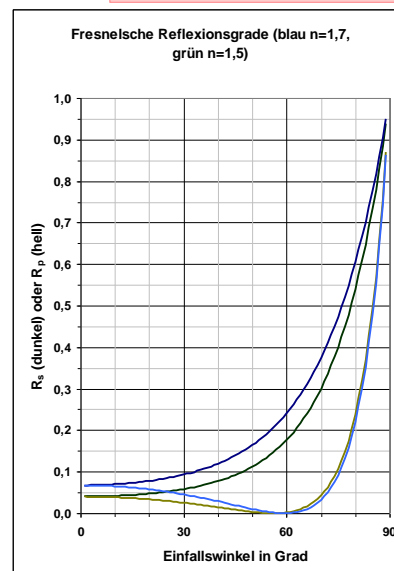
1 Reflexion

Die Reflexionsgrade R_s und R_p lassen sich mit Excel leicht berechnen und grafisch anzeigen.

Die Kurven wurden mit Brechzahlen von 1,5 (grün) und 1,7 (blau) berechnet. Für alle Werte des Einfallswinkels ist R_s größer als R_p . Während R_s mit dem Einfallswinkel monoton wächst, hat R_p für einen bestimmten Winkel in der Nähe von 60° ein Minimum mit $R_p = 0$. Das ist der Brewster-Winkel.



Sir David Brewster,
1781 – 1868,
schottischer
Physiker



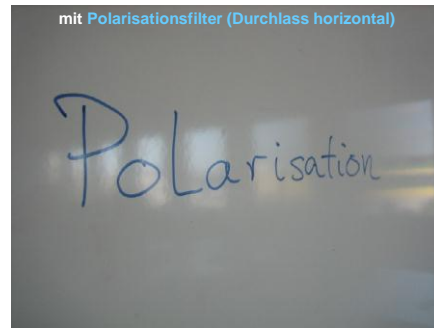
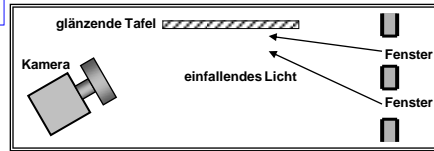
Technische Optik 07

17 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Licht ist nach Reflexion unter einem Winkel an einer glänzenden, weißen Tafel teilweise polarisiert. Das kann man abbilden.



Beim linken Foto hat die Digitalkamera wegen der größeren Leistung des reflektierten Lichts die Belichtungszeit reduziert. Daher ist die Tafel etwas dunkler geworden. Im Bild rechts sind die Reflexe in der Nähe von „ti“ fast völlig verschwunden. Das dort reflektierte Licht ist vollständig s-polarisiert, weil $R_p = 0$ ist. Es wird bei der gewählten Stellung des Filters (Durchlass horizontal = p) ausgelöscht: Die Reflexion bei „ti“ geschieht unter dem Brewster-Winkel.

Technische Optik 07

18 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

1 Reflexion

Beispiel: Diskutieren Sie die Wirkung dieses speziellen Prismas.

Das Prisma besteht aus zwei Teilen, einem aus Quarz ($n = 1,46$) und einem anderen aus SF 10 ($n = 1,732$), mit Luftspalt dazwischen. Der Winkel α wird zu 30° eingestellt.

Der Einfallswinkel an der ersten Grenzfläche beträgt $\varepsilon_1 = 60^\circ$.

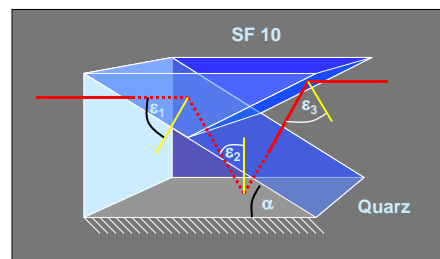
Unter diesen Bedingungen findet Totalreflexion statt ($\varepsilon_1 < \varepsilon_{gr}$).

An der nächsten Oberfläche beträgt der Einfallswinkel $\varepsilon_2 = 30^\circ$. Das ist kleiner als der Grenzwinkel für Totalreflexion. Daher muss diese Oberfläche verspiegelt werden.

Der Einfallswinkel ε_3 beträgt 60° . Das ist für den hier gültigen Wert von n gleich dem Wert des Brewsterschen Winkels ε_B für dieses Glasmaterial:

$$\varepsilon_B = \arctan(n) = 59,999^\circ$$

Der hier reflektierte Strahl ist vollständig s-polarisiert, weil hier $R_p = 0$. Wenn dieses Prisma um die horizontale Achse gedreht wird, kann eine bestimmte Polarisationsrichtung selektiert werden: Das Prisma ist „geradsichtig“.



Technische Optik 07

19 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

1 Reflexion

Beispiel:

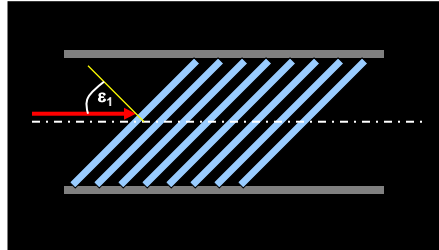
Ein Stapel aus planparallelen Glasplatten ($n' = 1,5$) wird in einem Rohr montiert (s. Abbildung).

Der Einfallswinkel an der ersten Oberfläche soll $\varepsilon_1 = 55^\circ$ betragen.

Wie groß ist der Polarisationsgrad

$$P = (I_s - I_p) / (I_s + I_p)$$

für den durchgelassenen Strahl, wenn 8 Platten verwendet werden?



Der Brechungswinkel beträgt nach dem Snelliusschen Brechungsgesetz: $\varepsilon_1' = 33,1^\circ$. Für R_s und R_p bekommen wir:

$$R_s = 0,139$$

$$R_p = 0,0002$$

Dass R_p so klein ist, liegt am Wert des Einfallswinkels ε_1 , der sehr dicht am Brewsterwinkel für dieses Glasmaterial liegt.

Betrachten wir zunächst die s-Komponente und stellen wir eine Tabelle auf.

Technische Optik 07

20 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

1 Reflexion

Leistungen der s-Komponente an jeder Oberfläche:

Nr.	einfallend	reflektiert	transmittiert
1	$I_{0,s}$	$I_{0,s} * R_s$	$I_{0,s} * (1 - R_s)$
2	$I_{0,s} * (1 - R_s)$	$I_{0,s} * (1 - R_s) * R_s$	$I_{0,s} * ((1 - R_s) - (1 - R_s) * R_s)$
3	$I_{0,s} * (1 - R_s) * (1 - R_s)$	$I_{0,s} * (1 - R_s)^2 * R_s$	$I_{0,s} * (1 - R_s)^3$

Nun ist deutlich zu erkennen, wie die durchgelassenen Leistungswerte nach der n-ten Oberfläche zu berechnen sind:

$$I_{n,s} = I_{0,s} * (1 - R_s)^n$$

Für 8 Glasplatten (= 16 Oberflächen) bekommen wir (P = Polarisationsgrad):

$$I_{16,s} = 0,091 * I_{0,s} \quad I_{16,p} = 0,997 * I_{0,p} \quad P = \frac{I_s - I_p}{I_s + I_p} = \frac{0,091 - 0,997}{0,091 + 0,997} = -0,833$$

Das durchgelassene Licht wird von der s-Komponente fast völlig befreit, ohne die andere merklich geschwächt zu haben. Dafür ist der geringe Reflexionsgrad R_p bei einem Einfallswinkel dicht am Brewster-Winkel verantwortlich.

Technische Optik 07

21 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

1 Reflexion

Beispiel:

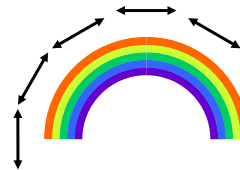
Ist das Licht vom Regenbogen linear polarisiert? In welcher Richtung? Wie groß ist der Polarisationsgrad $P = (I_s - I_p)/(I_s + I_p)$?

Hinweis: Der Brechungsindex von Wasser bei 550 nm beträgt $n = 1,33560$.

Bei der Entstehung des primären Regenbogens haben wir den symmetrischen Strahldurchgang durch einen kugelförmigen Wassertropfen betrachtet. Dabei geschehen zwei Brechungen (und als Verlust jeweils eine teilweise Reflexion) und eine teilweise Reflexion. Für jeden der drei Vorgänge gilt dieselbe Einfallsebene. Für einen Einfallswinkel von $\varepsilon_1 = 60^\circ$ bekommen wir $\varepsilon_1' = 40,4^\circ$. Damit können wir die Fresnelschen Reflexionsgrade berechnen:

$$R_s = \left(\frac{\sin(60^\circ - 40,4^\circ)}{\sin(60^\circ + 40,4^\circ)} \right)^2 = 0,116 \quad R_p = \left(\frac{\tan(60^\circ - 40,4^\circ)}{\tan(60^\circ + 40,4^\circ)} \right)^2 = 0,004$$

Der in den Tropfen eindringende Lichtstrahl hat in s-Richtung noch 0,884 (= 88,4%) seiner anfänglichen Leistung, in p-Richtung 0,996 (99,6%). Die teilweise Reflexion führt zu einer Leistung der s-Komponente von $0,116 \cdot 0,884 = 0,103$, aber von der p-Polarisation bleibt kaum etwas übrig: $0,004 \cdot 0,996 = 0,004$. Bei der weiteren Brechung wird zwar p-Polarisation etwas bevorzugt ($0,004 \cdot 0,996 = 0,004$), aber von der s-Komponente bleiben fast 10 % übrig: $(1 - 0,116) \cdot 0,103 = 0,091$. Daher ist das Licht des Regenbogens fast vollständig in tangentialer Richtung des Bogens linear polarisiert.



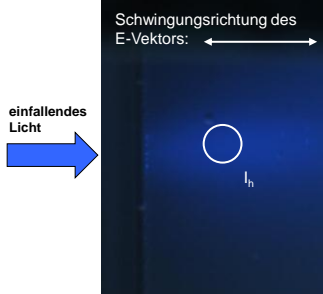
Technische Optik 07

22 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

2 Streuung



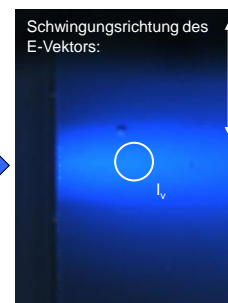
Wir lassen Licht aus einer blau leuchtenden LED in eine Kuvette einfallen und beobachten das unter 90 Grad gestreute Licht mit einer Kamera durch einen Polarisationsfilter. In der Kuvette ist Leitungswasser mit einem Tropfen Milch.

Bei horizontaler Durchlassrichtung des Polarisationsfilters sieht man schwach leuchtendes Streulicht (I_h).

Wenn die Durchlassrichtung des Polarisationsfilters vertikal liegt, sieht man den Lichtstrahl viel stärker leuchten ($I_v > I_h$). Das Streulicht unter 90° zur Ausbreitungsrichtung ist linear polarisiert.

In diesem Fall liegt keine vollständige Linearpolarisation vor. Der Polarisationsgrad P des Streulichts ist aber von Null verschieden:

$$P = \frac{I_v - I_h}{I_v + I_h} \neq 0$$



Technische Optik 07

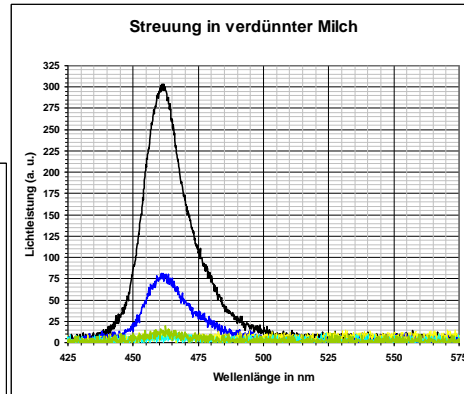
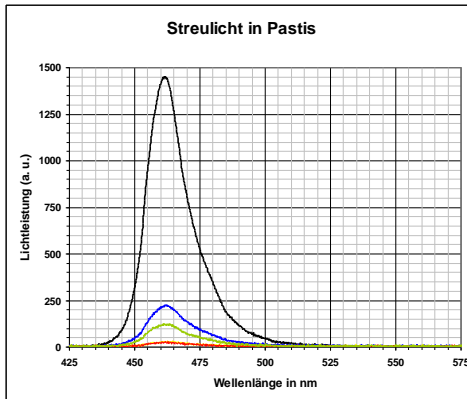
23 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

2 Streuung

Das Streulicht unter 90 Grad für stark verdünnte Milch zeigt die schwarze Kurve (Anregung durch blaue LED, daher der Wellenlängenbereich). Die Stärke dieses Signals ändert sich bei polarisierter Anregung und polarisierter Messung. Farbe blau: vertikal – vertikal; grün: horizontal – vertikal.



Die streuenden Tröpfchen in verdünntem Pastis-Schnaps sind größer; das beeinflusst die Stärke der Streuung von Licht für verschiedene Polarisationsrichtungen. (Messungen im Labor für Technische Optik).

Technische Optik 07

24 von 61

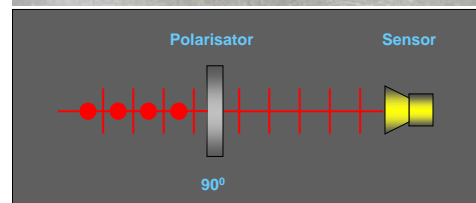
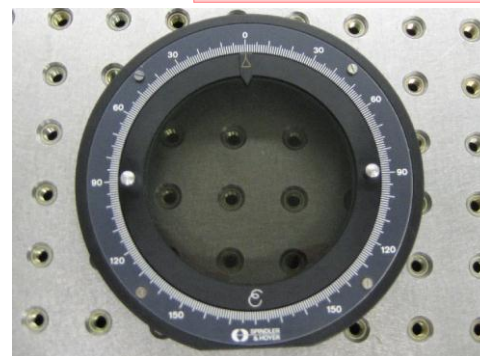
Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

3 Dichroismus

In der Technischen Optik werden meistens Polarisationsfolien zur Herstellung von linear polarisiertem Licht verwendet (Polaroid-Folien nach dem Patent von Edwin Land). Sie sehen dunkelgrau aus, weil eine Polarisationsrichtung absorbiert wird und die andere nicht völlig ungeschwächt übertragen wird, aber beides unabhängig von der Wellenlänge.

In ihnen wird eine Schwingungsrichtung des E-Vektors nach dem Lambert-Beerschen Gesetz durch Absorption stark abgeschwächt, die andere („Durchlass-Richtung“, durch Pfeil angedeutet) nur wenig. Das E-Feld des durchgelassenen Lichts besitzt praktisch nur noch eine Schwingungsrichtung. Die absorbierte Leistung des Lichtstrahls führt zur Erwärmung der Polarisationsfolie.



Technische Optik 07

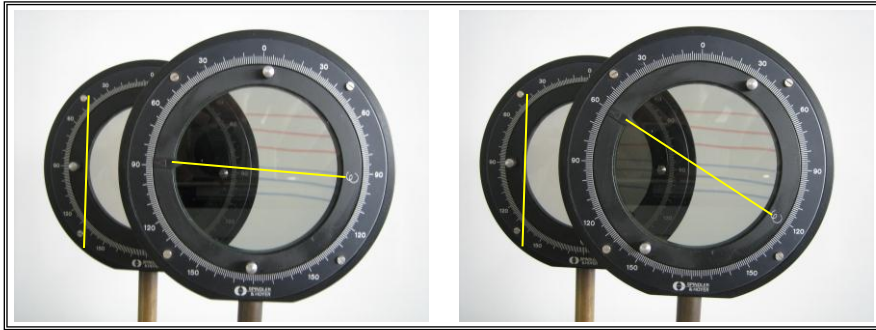
25 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

3 Dichroismus

Beispiel: Wie weist man nach, dass ein Strahlbündel aus linear polarisiertem Licht besteht?



Stellt man zwei Filter mit gegeneinander verdrehter Durchlassrichtung hintereinander vor eine helle Tafel, so wird das durchgelassene Licht je nach Drehung mehr oder weniger stark abgeschwächt. Der hintere Filter lässt vertikal schwingendes Licht durch, der vordere ist im linken Bild um 90° und im rechten um 60° dagegen verdreht. Dadurch wird im rechten Bild im Überlappbereich der Filter Licht geschwächt durchgelassen, links jedoch vollständig blockiert.

Technische Optik 07

26 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

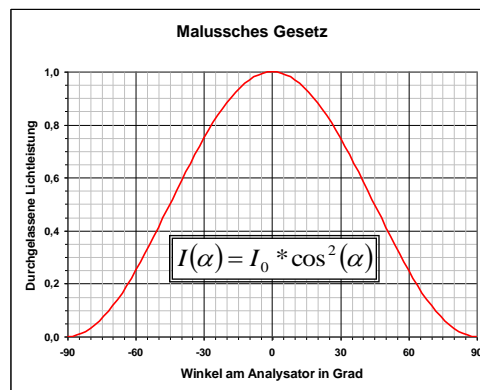
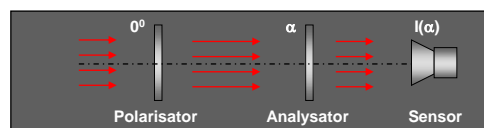
3 Dichroismus

Lassen wir zunächst unpolarisiertes Licht auf eine Polarisationsfolie einfallen, deren Durchlassrichtung bei einem Winkel von 0° steht (x-Richtung). Hinter diesem Filter liegt linear polarisiertes Licht vor, und deshalb nennt man ihn „**Polarisator**“. Die Komponente mit Schwingungsrichtung bei 90° wird vollständig ausgelöscht.

Das Licht, das der Polarisator durchlässt, wird wir durch einen zweiten Polarisationsfilter geschickt, genannt „**Analysator**“, dessen Winkel α der Durchlassrichtung um die optische Achse gedreht werden kann.

Die Lichtleistung $I(\alpha)$ wird als Funktion des Drehwinkels α zwischen -90° und 90° mit einem Sensor gemessen.

Das Ergebnis zeigt in der grafischen Darstellung einen charakteristischen Verlauf mit einem Maximum bei 0° , also wenn die Durchlassrichtungen von Polarisator und Analysator parallel liegen. Dieses Gesetz wurde von Malus entdeckt.



Technische Optik 07

27 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

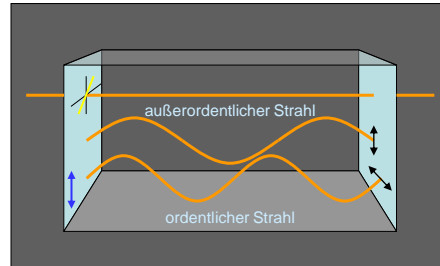
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

4 Doppelbrechung

Wenn zwei Wellen phasengleich starten, aber im Material unterschiedliche Brechungsindizes haben, entstehen Teilstrahlen mit definierter Phasenverschiebung. Um die Wirkung zu verstehen, soll die Kristallachse parallel zur Einfallsebene liegen, angedeutet durch den blauen Doppelpfeil.

Von links fällt unter $\varepsilon = 0^\circ$ ein Strahl ein, der unter 45° zur Kristallachse linear polarisiert sein soll (gelbe Linie). Dann können wir ihn in zwei zueinander senkrecht schwingende Komponenten gleicher Stärke zerlegen.

Weil für die Komponente, deren E-Vektor parallel zur Kristallachse schwingt, ein anderer Brechungsindex gilt (n_{ao}) als für die Richtung senkrecht zur Kristallachse (n_o), sind die Wellenlängen verschieden. Daher passt für jede Polarisationsrichtung eine andere Zahl von Wellenzügen in den Kristall (abgebildet ist $n_o > n_{ao}$, wie bei Kalkspat).



Die beiden im Bild untereinander gezeichneten Wellenzüge sind Komponenten einer einzigen Welle, also kohärent. Daher setzen sie sich beim Austreten aus dem Kristall wieder zusammen. Gezeigt ist der Fall, dass außerordentlicher und ordentlicher Strahl beim Eintritt in den Kristall keinen Unterschied in der Phase haben. Wenn die Teilstrahlen wieder aus dem Kristall austreten, beträgt der Phasenunterschied in diesem Fall: $\delta = \pi$

Technische Optik 07

28 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

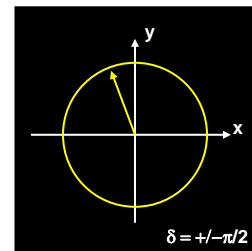
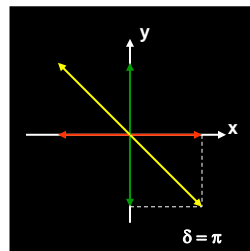
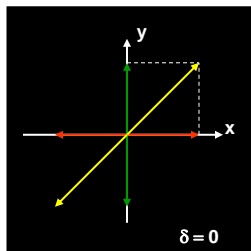
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

4 Doppelbrechung

Wir sehen dem Strahl entgegen. Er hat eine horizontale und eine vertikale Komponente, die sich zum E-Vektor zusammensetzen. Die Amplituden sind gleich groß. Eine lineare Polarisation unter 45° entsteht, wenn der einfallende Strahl den Phasenunterschied Null ($\delta = 0$) zwischen der x- und y-Richtung hat.

$$x(t) = e^{j\omega t}$$

$$y(t) = e^{j(\omega t + \delta)}$$



Wenn die Phasenverschiebung δ zwischen beiden Komponenten beim Austritt aus dem Kristall gleich π ist (180°), setzen sie sich zu einer linearen Polarisation zusammen, die um 90° gedreht ist.

Bei einer Phasenverschiebung von $\delta = \pi/2$ entsteht ein resultierender Vektor, dessen Spitze auf einem Kreis umläuft. Das nennt man zirkular polarisiertes Licht.

Start Programm

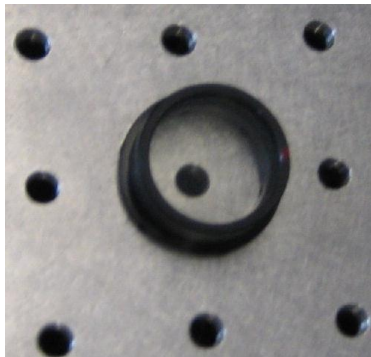
Technische Optik 07

29 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Eine optische Komponente, die für die beiden Hauptschwingungsrichtungen (parallel oder senkrecht zur Kristallachse) eine **Phasenverschiebung von $\pi/2$** bewirkt, nennt man **Viertel-Wellenlängen-Plättchen**. Ein solches Plättchen sieht im unpolarisierten Licht wie eine einfache Glasplatte aus; im Foto sieht man ein Exemplar in runder Fassung.



Zwischen einem Polarisator mit Durchlass bei 0° und einem Analysator mit Durchlass bei 90° bewirkt es Dunkelheit, wenn die Achse des Plättchens parallel oder unter 90° zur Durchlassrichtung liegt. Es entsteht aber Helligkeit, wenn die Achse des Viertel-Wellenlängen-Plättchens unter 45° zur Durchlassrichtung des Polarisators liegt.



Dabei entsteht **zirkular polarisiertes Licht**, das auch eine horizontale Komponente hat und dadurch vom Analysator nicht völlig absorbiert wird.

Technische Optik 07

30 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Wie wird der Durchgang polarisierten Lichts durch ein optisches System mathematisch behandelt?

JULY, 1941

J. O. S. A.

VOLUME 31

A New Calculus for the Treatment of Optical Systems

I. Description and Discussion of the Calculus

R. CLARK JONES*

Research Laboratory, Polaroid Corporation, Cambridge, Massachusetts, and Research Laboratory of Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts

(Received April 23, 1941)

The effect of a plate of anisotropic material, such as a crystal, on a collimated beam of polarized light may always be represented mathematically as a linear transformation of the components of the electric vector of the light. The effect of a retardation plate, of an anisotropic absorber (plate of tourmaline; Polaroid sheeting), or of a crystal or solution possessing optical activity, may therefore be represented as a matrix which operates on the electric vector of the incident light. Since a plane wave of light is characterized by the phases and amplitudes of the two transverse components of the electric vector, the matrices involved are two-by-two matrices, with matrix elements which are in general complex. A general theory of optical systems containing plates of the type mentioned is developed from this point of view.

Erläuterungen: J. O. S. A.: Journal of the Optical Society of America; VOLUME 31: 31. Jahrgang; tourmaline = kristallines, doppelbrechendes Mineral; Polaroid sheeting: Polarisations-Folie; retardation plate: Halb- oder Viertel-Wellenlängen-Plättchen; optical activity: optische Aktivität (Drehung der Polarisationssebene beim Durchgang).

Technische Optik 07

31 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

In einer einzelnen Lichtwelle schwingen die Vektoren der elektrischen Feldstärke E und der magnetischen Induktionsflussdichte B . Weil diese beiden immer senkrecht zueinander und senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung liegen, brauchen wir uns neben der Ausbreitung nur um die Richtung des elektrischen Feldvektors E zu kümmern.

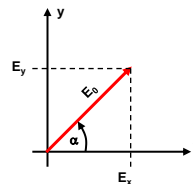
Sinnvollerweise wird mathematisch die Welle mit einer komplexwertigen e-Funktion angesetzt:

$$\vec{E}(z, t) = \begin{pmatrix} E_x * e^{j\omega(\alpha z - t)} \\ E_y * e^{j\omega(\alpha z - t)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} * e^{j\omega(\alpha z - t)} = \vec{J} * E_0 * e^{j\omega(\alpha z - t)}$$

Dies ist eine Welle, die sich zeitlich in positiver z-Richtung ausbreitet; der E-Vektor hat also nur Komponenten in x- oder y-Richtung und kann als ein zweidimensionaler Vektor angesetzt werden. In dieser Formulierung verlaufen die Schwingungen in x- und y-Richtung phasengleich:

$$E_x = E_0 * \cos(\alpha)$$

$$E_y = E_0 * \sin(\alpha)$$



Technische Optik 07

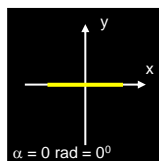
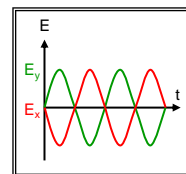
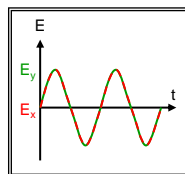
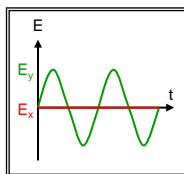
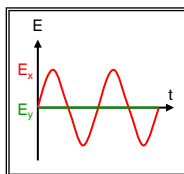
32 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

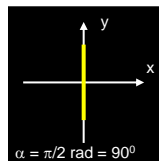
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Der Winkel α liegt zwischen der x-Richtung (= horizontal) und der Polarisationsebene (gelb) ($0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$). Dann lautet der Jones-Vektor einfach:

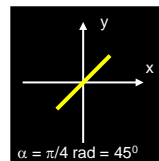
$$\vec{J}_\alpha = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \end{pmatrix}$$



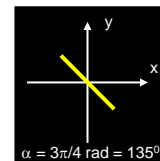
$$\vec{J}_{0^\circ} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$



$$\vec{J}_{90^\circ} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$



$$\vec{J}_{45^\circ} = \frac{1}{\sqrt{2}} * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$



$$\vec{J}_{135^\circ} = \frac{1}{\sqrt{2}} * \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Technische Optik 07

33 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Ein sich in der positiven z-Richtung ausbreitender Strahl linear polarisierten Lichts besitzt einen E-Vektor in der x-y-Ebene.

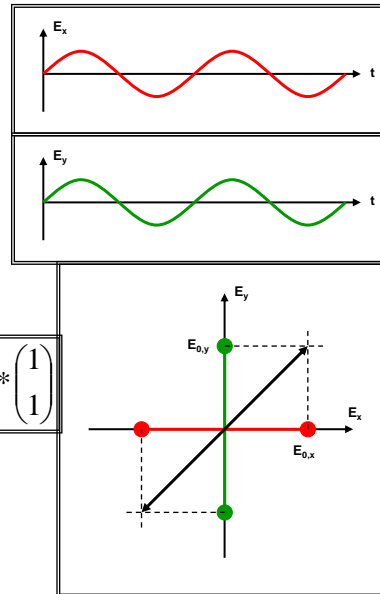
Ein einfacher Fall liegt vor, wenn die beiden Komponenten in x- und y-Richtung einer Sinus-Schwingung geschehen (linear polarisiertes Licht unter 45 Grad); das kann durch den Jones-Vektor J (Leistung $P = 1$) dargestellt werden:

$$E_x = E_{0,x} * e^{j(\omega t - kz)}$$

$$E_y = E_{0,y} * e^{j(\omega t - kz)}$$

$$J_{45} = \frac{1}{\sqrt{2}} * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Wenn die Amplituden $E_{0,x}$ und $E_{0,y}$ gleich sind, schwingt der resultierende Vektor entlang der Winkelhalbierenden im ersten und dritten Quadranten.



Technische Optik 07

34 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Eine andere Richtung der resultierenden Schwingung des durch Summation entstehenden E-Vektors entsteht, wenn bei gleicher Schwingung der x-Komponente die y-Komponente negativ erfolgt.

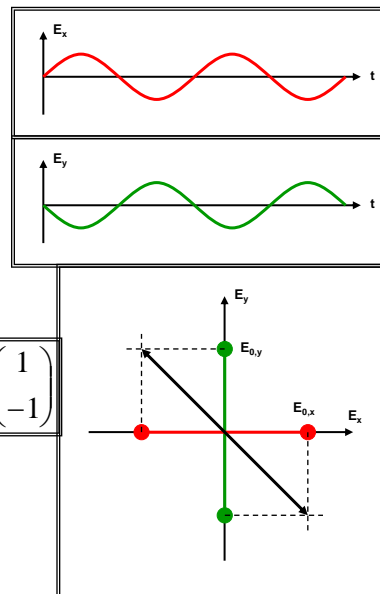
Dann kann man sich vorstellen, dass eine Schwingung in positiver x-Richtung gleichzeitig begleitet wird von einer Schwingung in negativer y-Richtung; der Jones-Vektor J sieht ähnlich aus:

$$E_x = E_{0,x} * e^{j(\omega t - kz)}$$

$$E_y = E_{0,y} * e^{-j(\omega t - kz)}$$

$$J_{-45} = \frac{1}{\sqrt{2}} * \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Wenn die Amplituden $E_{0,x}$ und $E_{0,y}$ gleich sind, schwingt der resultierende Vektor entlang der Winkelhalbierenden im zweiten und vierten Quadranten.



Technische Optik 07

35 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Wenn die y-Schwingung in anderer Richtung gegen die x-Schwingung verschoben wird, entsteht eine andere Überlagerung.

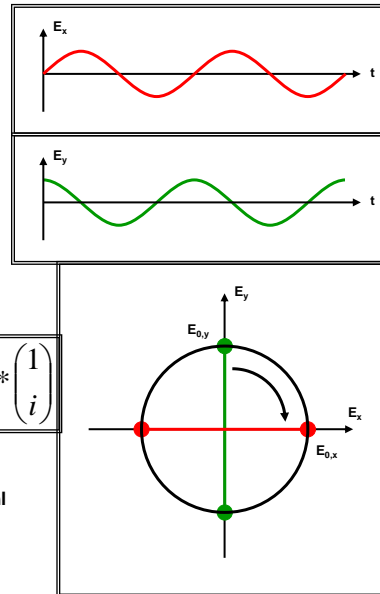
Das Vorzeichen für die Phasenverschiebung in der komplexen e-Funktion wird umgedreht. Zu gleichem Zeitpunkt ist die Schwingung bereits um $\frac{1}{4}$ Wellenlänge fortgeschritten:

$$E_x = E_{0,x} * e^{j(\omega t - kz)}$$

$$E_y = E_{0,y} * e^{j\left(\omega t - kz + \frac{\pi}{2}\right)}$$

$$J_R = \frac{1}{\sqrt{2}} * \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$$

Es entsteht bei der Überlagerung beider Komponenten rechts zirkular polarisiertes Licht. Wenn man dem Strahl entgegensieht, läuft das elektrische Feld rechts herum. Die Länge des Vektors ist konstant, d. h. die elektrische Feldstärke ändert sich nicht.



Technische Optik 07

36 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Besonders interessant wird die resultierende Schwingung, wenn die Phasenverschiebung $\pi/2$ (entsprechend einem Viertel einer Wellenlänge) beträgt. Dann fallen die Nulldurchgänge der beiden Komponenten nicht mehr zeitlich zusammen.

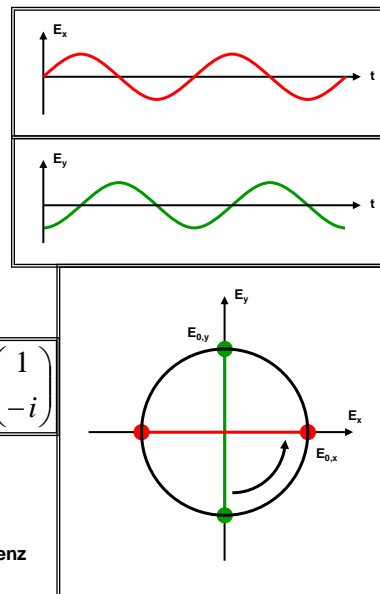
Während die Schwingung in x-Richtung unverändert bleibt, ist das Argument der Sinus-Funktion für die y-Komponente um $\pi/2$ verändert, und der Jones-Vektor J bekommt eine imaginäre Komponente:

$$E_x = E_{0,x} * e^{j(\omega t - kz)}$$

$$E_y = E_{0,y} * e^{j\left(\omega t - kz - \frac{\pi}{2}\right)}$$

$$J_L = \frac{1}{\sqrt{2}} * \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$$

Es entsteht bei der Überlagerung beider Komponenten links zirkular polarisiertes Licht. Der E-Vektor läuft auf einer Kreisbahn links herum, wenn man dem Strahl entgegensieht. Die Umlauffrequenz ist gleich der Frequenz der Lichtschwingung.



Technische Optik 07

37 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Die mathematische Beschreibung der Wirkung einer optischen Komponente wie z. B. einer Polarisationsfolie auf einen Strahl wird durch Anwendung einer Matrix M auf den Jones-Vektor J ausgedrückt:

$$\vec{J}' = M \otimes \vec{J} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} \\ a_{2,1} & a_{2,2} \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \boxed{a_{1,1} \quad a_{1,2}} \\ \boxed{a_{2,1} \quad a_{2,2}} \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} \boxed{x} \\ \boxed{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{1,1} * x + a_{1,2} * y \\ a_{2,1} * x + a_{2,2} * y \end{pmatrix}$$

Beispiel: Der Jones-Vektor repräsentiert einen Strahl mit einer Polarisationssebene unter 45° . Die Matrix soll die Wirkung einer Folie mit Durchlass in x-Richtung darstellen. Bei der Anwendung wird die y-Komponente ausgelöscht, die x-Komponente bleibt unverändert:

$$\vec{J}' = M_x \bullet \vec{J} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \bullet \frac{1}{\sqrt{2}} * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} * \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Technische Optik 07

38 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Eine optische Komponente, repräsentiert durch M , wirkt gedreht um den Winkel φ auf einen einfallenden Strahl. Um den durchgelassenen Strahl zu berechnen, transformieren wir den Strahl mit einer Drehung um $-\varphi$, wenden den Filter an und drehen anschließend zurück (um φ):

$$\vec{J}_{nachher} = R_\varphi \otimes M \otimes R_{-\varphi} \otimes \vec{J}_{vorher}$$

Die Rotationsmatrizen R_φ und $R_{-\varphi}$, die Drehungen um φ oder $-\varphi$ bewirken, unterscheiden sich durch das Vorzeichen von φ :

$$R_\varphi = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix}$$

$$R_{-\varphi} = \begin{pmatrix} \cos(-\varphi) & -\sin(-\varphi) \\ \sin(-\varphi) & \cos(-\varphi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix}$$

Bekanntlich gelten für die trigonometrischen Funktionen die Gleichungen:

$$\sin(-\varphi) = -\sin(\varphi) \qquad \cos(-\varphi) = \cos(\varphi)$$

Technische Optik 07

39 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Beispiel:

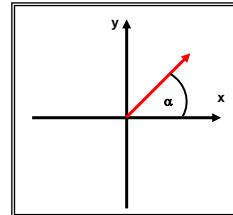
Wir lassen einen Lichtstrahl, der in x-Richtung polarisiert sein soll, auf einen Polarisationsfilter einfallen, dessen Durchlassrichtung gegen die x-Richtung um den Winkel α gedreht ist. Wie ist der Polarisationszustand des durchgelassenen Lichtstrahls, und wie groß ist seine Leistung?

Wir setzen den Jones-Algorithmus an:

$$\vec{J}_{\text{nachher}} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{J}_{\text{nachher}} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \\ -\sin(\alpha) \end{pmatrix}$$

$$\vec{J}_{\text{nachher}} = \begin{pmatrix} \cos^2(\alpha) \\ \sin(\alpha) * \cos(\alpha) \end{pmatrix} = \cos(\alpha) * \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \end{pmatrix}$$



Das ist ein Vektor der Länge $\cos(\alpha)$, der gegen die x-Achse um α gedreht ist. Das Skalarprodukt mit seinem konjugiert komplexen Partner ergibt $\cos^2(\alpha)$, wie es das Gesetz von Malus verlangt. Die Richtung des Jones-Vektors ist gleich der Schwingung des E-Vektors, das Quadrat seiner Länge proportional zur Leistung.

Technische Optik 07

40 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Die Herstellung von polarisiertem Licht oder die Veränderung des Polarisations-Zustandes erzielt man durch spezielle optische Komponenten (Polarisationsfilter oder -Prismen, Viertel- oder Halb-Wellenlängen-Plättchen). Dabei hängt das Ergebnis von der Reihenfolge der eingesetzten Komponenten ab. Die Multiplikation von Matrizen ist nicht kommutativ; daher sind Matrizen geeignet für die Beschreibung der Wirkung optischer Komponenten auf die Polarisation.

Beispiel 1:

Ausgangspunkt: vertikal linear polarisiertes Licht.



Polarisationsfilter unter 45° gegen die x-Achse geneigt.



Ergebnis: linear polarisiertes Licht, unter 45° gegen die x-Achse geneigt.



Viertel-Wellenlängen-Plättchen, schnelle Achse unter 90° .



Ergebnis: links zirkular-polarisiertes Licht.

**Beispiel 2:**

Ausgangspunkt: vertikal linear polarisiertes Licht.



Viertel-Wellenlängen-Plättchen, schnelle Achse unter 90° .



Ergebnis: vertikal linear polarisiertes Licht (90°).



Polarisationsfilter unter 45° gegen die x-Achse geneigt.



Ergebnis: linear polarisiertes Licht, 45° .



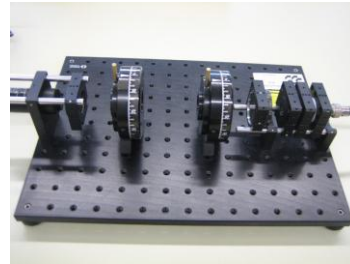
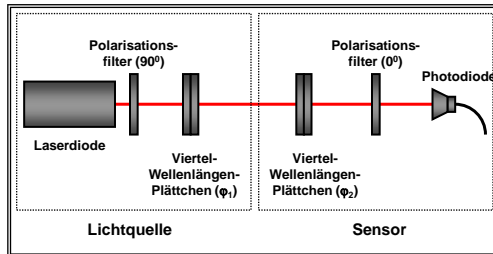
Technische Optik 07

41 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Im Labor ist ein Versuch aufgebaut, in dem die Wirkung eines Sensors, bestehend aus Viertel-Wellenlängen-Plättchen, Polarisationsfilter und Photodiode, studiert werden kann.



Je nach Einstellung des Viertel-Wellenlängen-Plättchens der Lichtquelle (ϕ_1) lassen sich verschiedene Polarisations-Zustände einstellen: linear, elliptisch oder zirkular polarisiertes Licht.

Die an der Photodiode ankommende Lichtleistung als Funktion des Winkels am Viertel-Wellenlängen-Plättchen des Sensors (ϕ_2) ist charakteristisch für den Polarisationszustand, der aus der Quelle kommt.

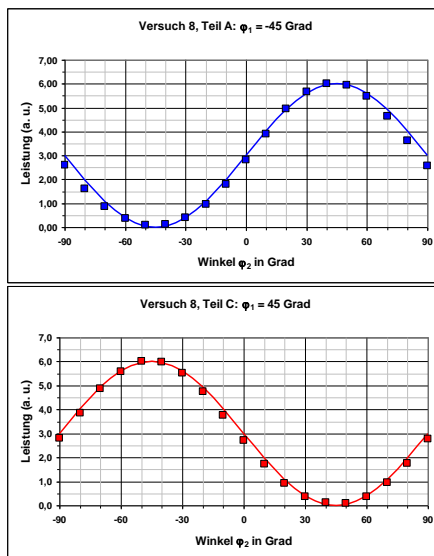
Für die genaue Ausrichtung („Justage“) der Winkel ist die Wahl Stellungen der Polarisationsfilter (90° in der Quelle und 0° im Sensor) besonders vorteilhaft.

Technische Optik 07

42 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

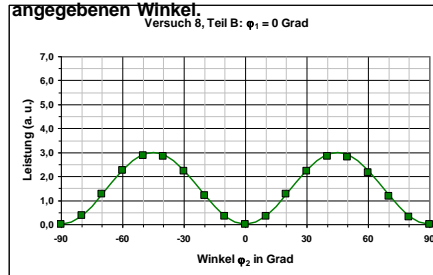
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	



Bei einem Winkel für $\phi_1 = 45^\circ$ oder -45° liefert die Quelle zirkular polarisiertes Licht. Eine Stellung von $\phi_2 = 45^\circ$ oder -45° im Sensor lässt linear polarisiertes Licht unter 0° (oder 90°) entstehen, was zu einem Maximum (Minimum) führt.

Wenn $\phi_1 = 0^\circ$, bleibt es bei linear polarisiertem Licht unter 90° , und das zweite Viertel-Wellenlängen-Plättchen erzeugt die Kurve mit zwei Höckern.

Zu sehen sind Messwerte (als Symbole) und theoretische Verläufe (als Kurven) für die angegebenen Winkel.



Technische Optik 07

43 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

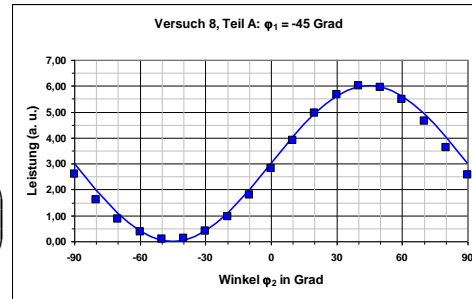
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Bei einem Winkel für $\varphi_1 = -45^\circ$ wird aus Licht, das in y-Richtung polarisiert ist, zirkular polarisiertes Licht gebildet. Eine Stellung von $\varphi_2 = 45^\circ$ oder -45° im Sensor lässt linear polarisiertes Licht unter 0° (oder 90°) entstehen, was zu einem Maximum (Minimum) führt.

Zu sehen sind Messwerte (als Symbole) und theoretische Verläufe (als Kurven) für die angegebenen Winkel.

$$\vec{J}_{Quelle} = \mathbf{R}_{-45^\circ} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & j \end{pmatrix} \cdot \mathbf{R}_{45^\circ} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\vec{J}_{nachher} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \mathbf{R}_{\varphi_2} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & j \end{pmatrix} \cdot \mathbf{R}_{-\varphi_2} \cdot \vec{J}_{Quelle}$$



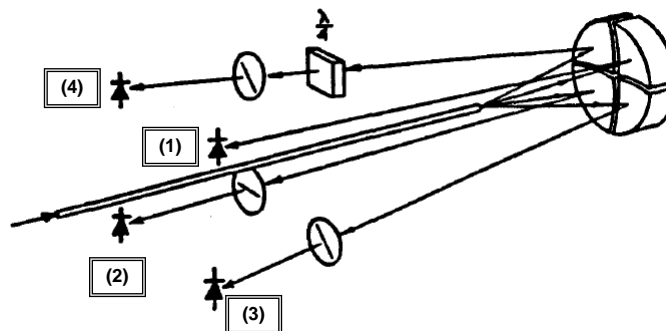
Technische Optik 07

44 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Der Polarisationszustand eines einfallenden Lichtstrahls lässt sich nicht allein mit einem Polarisationsfilter und einem Sensor ermitteln: Denn sowohl vollständig unpolarisiertes Licht als auch zirkular polarisiertes Licht liefern konstante Leistung, wenn der Polarisationsfilter („Analysator“) gedreht wird. Um diese beiden Formen voneinander unterscheiden zu können, muss eine Kombination aus Viertel-Wellenlängen-Plättchen und Polarisationsfilter zum Einsatz kommen. Entweder wird das Viertel-Wellenlängen-Plättchen oder der Polarisationsfilter gedreht. Alternativ wird der einfallende Lichtstrahl in vier Komponenten aufgeteilt und die Gesamtleistung (1), lineare Polarisation unter 0° (2) und 45° (3) und ein elliptisch polarisierter Anteil (4) bestimmt.



Technische Optik 07

45 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Beim Durchgang durch optische Materialien bleibt normalerweise die Polarisationssebene des Lichts erhalten.

Drehungen der Polarisationssebene beim Durchgang geschehen durch zwei Vorgänge:

1. Optische Aktivität
2. Faraday-Effekt

Diese beiden Vorgänge lassen sich mit einer Lichtquelle, die unpolarisiertes Licht aussendet, unter Verwendung von zwei Polarisationsfiltern studieren.

Technische Optik 07

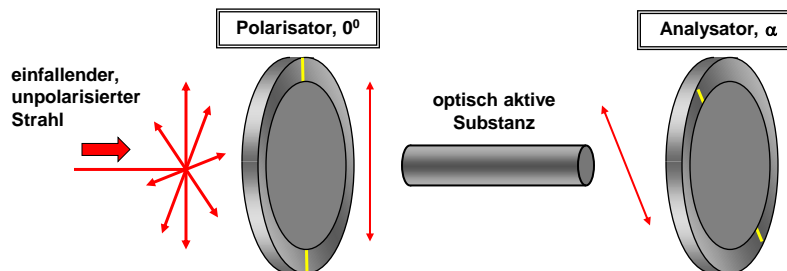
46 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

1. Optische Aktivität:

Ein Material mit der Eigenschaft, dass die Polarisationssebene eines durchgehenden Strahls gedreht wird, nennt man optisch aktiv. Eine Lösung von Zucker in Wasser ist optisch aktiv.



Gemessen werden soll durch Drehung des Analysators, um welchen Winkel α die Ebene der Polarisation in der Substanz gedreht wurde. Ein Winkel $\alpha = 0^\circ$ bedeutet keine optische Aktivität.

Angedeutet ist eine linksdrehende Substanz: Wenn man dem Strahl entgegen sieht, ist seine Polarisationssebene durch die Wirkung der optisch aktiven Substanz nach links gedreht. (Wenn man dem Strahl hinterher sieht, ist er unsichtbar, denn er macht sich schnell davon!)

Technische Optik 07

47 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

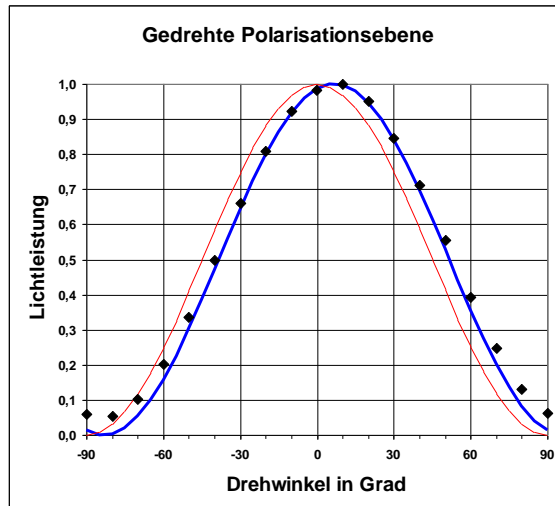
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Wenn der einfallende Strahl linear polarisiert ist und die Polarisationssebene um den Winkel α_0 gedreht worden ist, tritt die folgende Abhängigkeit der durchgelassenen Leistung als Funktion des Winkels am Analysator auf:

$$I(\alpha) = I_0 * \cos^2(\alpha - \alpha_0)$$

Gezeigt sind Messergebnisse, die Kurve von Folie 5 (rot) und eine Kurve (blau) mit $\alpha_0 = +6,7^\circ$.

Die Verschiebung erkennt man daran, dass der 50%-Punkt nicht bei 45° , sondern bei über 50° liegt. Am 50%-Punkt kann man eine Drehung leichter ablesen als am 0%- oder 100%-Punkt; denn beim 50%-Punkt ist die 1. Ableitung der Kurve maximal.



Technische Optik 07

48 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

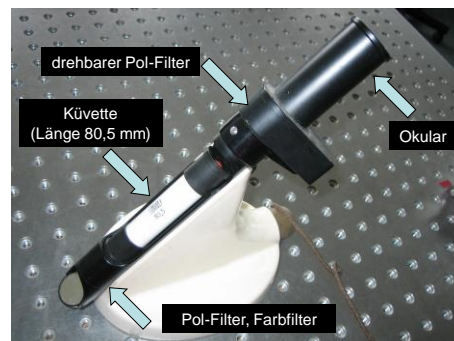
Eine wässrige Lösung von Zucker ist optisch aktiv. Der Drehwinkel α_0 hängt von der Konzentration c des Zuckers ab:

$$\alpha_0 = \alpha_x * c * L$$

Hier ist c die Konzentration (meist ausgedrückt in Gramm pro 100 cm^3) und L die Länge des Lichtweges in der Lösung (meist ausgedrückt in Dezimeter; $1 \text{ dm} = 10 \text{ cm}$); die spezifische Drehung α_x ist von dem gelösten Material, vom Lösungsmittel und der Temperatur abhängig.

Weil sie auch mit der Wellenlänge des verwendeten Lichts variiert, werden die Messungen meist mit der Wellenlänge der Natrium D-Linie durchgeführt (589 nm). Für Glühlampen gibt es geeignete Filter.

Diese Messung besitzt keine signifikante Querempfindlichkeit; daher kann sie gut zur Messung des Zuckergehalts im Urin angewendet werden. Das Messgerät nennt man Saccharimeter (Bild: Gerät von Zeiss-Winkel, Göttingen).



Technische Optik 07

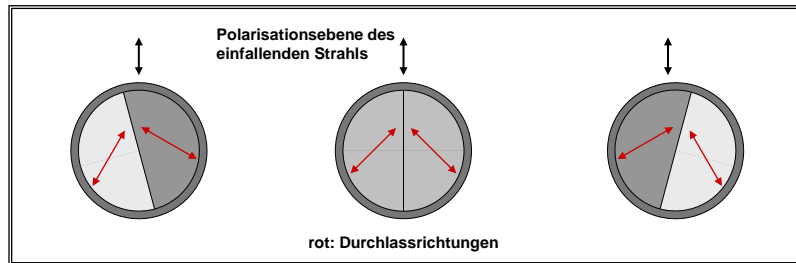
49 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Dieses Gerät ist zur visuellen Messung des Drehwinkels eingerichtet. Dazu wird das einfallende Licht durch einen Polarisator linear polarisiert und durch die Flüssigkeit geleitet. Die Helligkeit wird durch einen drehbaren **Analysator mit zwei Hälften** beobachtet, deren Flächen unter 90° zueinander und unter 45° gegen den Polarisator liegende Durchlassrichtungen haben.

Wenn die Flüssigkeit im Messgefäß keine Drehung ausführt, wird bei paralleler Stellung der Trennlinie zur einfallenden Polarisationsrichtung bei beiden Hälften 50% durchgelassen.



Bei Drehung nach links wird die eine Hälfte heller und die andere dunkler; bei Drehung nach rechts ändern sich die Helligkeiten gerade anders herum. Das ist sehr gut zu beobachten; man sieht der Helligkeitsverteilung an, wie man drehen muss, damit beide Hälften gleich hell sind. Dann kann an der Drehung des Analysators der Drehwinkel der Probe α_D abgelesen werden.

Technische Optik 07

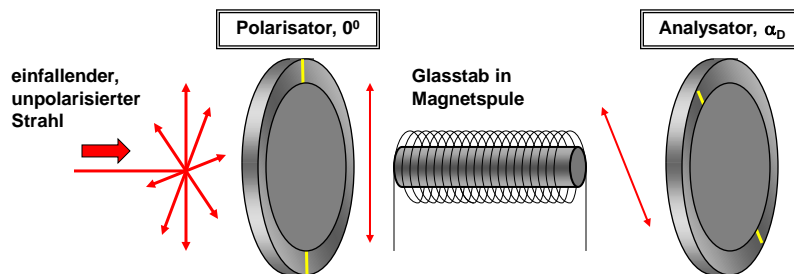
50 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

2. Faraday-Effekt:

Michael Faraday (1791 – 1867) entdeckte 1845, dass optisch transparente Substanzen in einem longitudinalen Magnetfeld **optisch aktiv** werden; das nennt man den Faraday-Effekt.



Die Gleichung, nach der der Drehwinkel zu berechnen ist, lautet:

$$\alpha_D = V * \vec{B} \bullet \vec{L}$$

Hier ist V die Verdet-Konstante (von der Wellenlänge λ und dem Material abhängig), B die Induktionsflussdichte und L die Länge des Glasstabs im Magnetfeld, gemessen in Ausbreitungsrichtung. Das Produkt zwischen den beiden Vektoren ist das Skalarprodukt. Es ändert sein Vorzeichen, wenn die Ausbreitungsrichtung des Strahls umgedreht wird.

Technische Optik 07

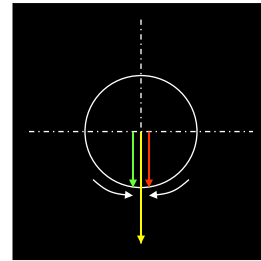
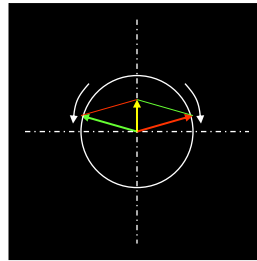
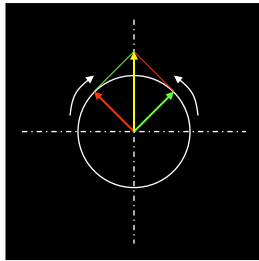
51 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Um zu verstehen, wie die Drehung durch das Magnetfeld geschieht, betrachten wir eine Zerlegung von linear polarisiertem Licht in zwei zueinander orthogonale Komponenten, wofür zwei gegensinnig umlaufende zirkular polarisierte Wellen gewählt werden.

Gezeigt ist eine links (grün) und eine rechts (rot) umlaufende, zirkular polarisierte Welle. Beide addieren sich zu einer linear polarisierten Welle, wenn sie gleiche Umlaufzeiten (= Schwingungsdauern) haben.



Ein longitudinales Magnetfeld ändert die Winkelgeschwindigkeiten; die eine wird um $\Delta\omega$ vergrößert die andere verkleinert:

$$\Delta\omega = \pm \frac{1}{2} * \frac{e}{m} * B$$

Start Programm

Technische Optik 07

52 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

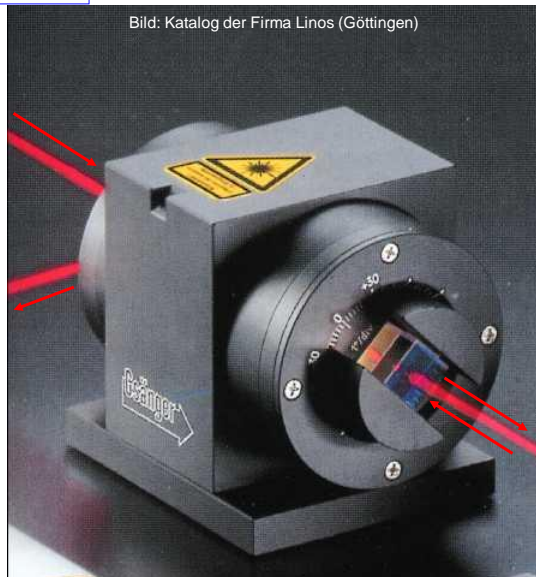
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Gezeigt ist ein Gerät, das man als **optische Diode** oder **optisches Ventil** bezeichnen kann. Es bietet Schutz gegen rückreflektiertes Licht.

Ein roter Lichtstrahl durchdringt einen polarisierenden Teilerwürfel und tritt von links hinten in einen Glasstab mit quadratischem Querschnitt ein, der in einem permanenten Magnetfeld gehalten wird. Rechts vorn tritt er aus.

Wenn verhindert werden soll, dass der Rückreflex in die Lichtquelle zurückkehrt, dann ist dieses Gerät („Faraday-Isolator“) genau richtig. Nach zweifachem Durchgang ist die Polarisationsebene um 90° gedreht, und der Strahl wird vom polarisierenden Teilerwürfel links ausgeworfen. Das Bauteil wirkt wie ein Ventil für Licht!

Bild: Katalog der Firma Linos (Göttingen)



Technische Optik 07

53 von 61

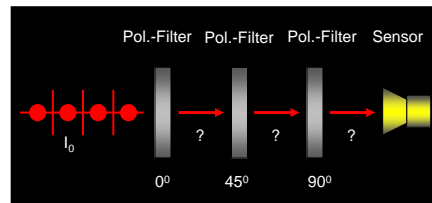
Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Bei der Verwendung von drei Polarisationsfiltern macht man eine interessante Beobachtung.

Ein paralleles Lichtstrahlbündel aus unpolarisiertem Licht trifft nacheinander auf drei Polarisationsfilter. Die Durchlassrichtung des ersten liegt bei 0° , des zweiten bei 45° , des dritten bei 90° . Wie groß ist die Leistung, wenn die einfallende Strahlung den Wert I_0 hat?

Hinweis: Die Absorption eines in Durchlassrichtung schwingenden Strahls soll als verschwindend klein angenommen werden.



Der erste Filter lässt die Hälfte der einfallenden Strahlung durch, weil von dem unpolarisierten Licht die nicht durchgelassene Richtung ausgelöscht wird: Es bleibt $I_0 / 2$.

Der zweite Filter lässt nochmals die Hälfte des auf ihn einfallenden Lichts durch: Es bleibt $I_0 / 4$.

Der dritte Filter lässt ebenfalls die Hälfte des auf ihn einfallenden Lichts durch: $I_0 / 8$.

Wenn der zweite Filter nicht wäre, würde der dritte Filter gar nichts durchlassen, denn $\cos^2(90^\circ) = 0$. Durch die lineare Polarisation unter 45° nach dem zweiten Filter tritt nach dem letzten Filter Helligkeit auf.

Technische Optik 07

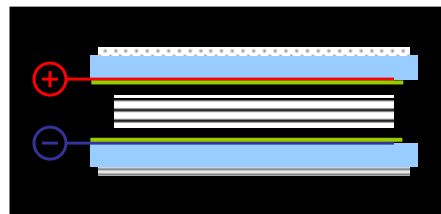
54 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Dieser Mechanismus wird bei Flüssigkristall-Anzeigen (englisch: "liquid crystal displays", LCD) angewendet. Der Aufbau besteht aus mehreren Schichten.

Zwischen zwei Glasplatten befindet sich eine dünne Schicht aus der Substanz, die aus langen Kettenmolekülen mit einem permanenten Dipolmoment besteht.



Auf der Glasoberfläche sind durchsichtige Elektroden (ITO = Indium-Zinnoxid) angebracht, die durch eine Spannung U ein elektrisches Feld erzeugen können.

Damit kein Strom durch den Flüssigkristall fließt, der durch Elektrolyse das Material zersetzen könnte, ist eine Isolationsschicht angebracht.

Diese beiden Schichten sind behandelt (im trockenen Zustand gerieben), damit sich die LCD-Moleküle gerichtet parallel anlegen, an der oberen Schicht um 90° gegen die untere gedreht. Die Moleküle dazwischen bilden eine Schraube; der englische Fachbegriff lautet "twisted nematic liquid crystal".

Außen sind gekreuzte Polarisationsfilter auf den Glasplatten angebracht.

Technische Optik 07

55 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

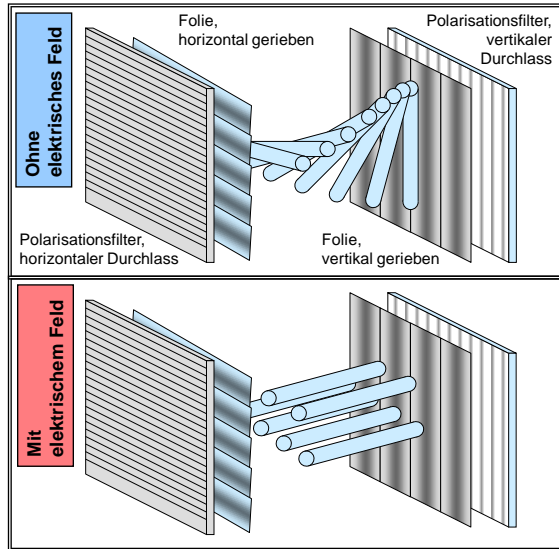
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Die länglichen Moleküle wirken als dichroitische Filter, solange sie quer zum Licht liegen. Sie lassen nur Licht einer bestimmten Schwingungsrichtung durch.

Ohne angelegte elektrische Spannung sind die Moleküle schraubenförmig verdreht. Das Licht wird trotz der gekreuzten Polarisationsfilter durchgelassen.

Mit angelegter elektrischer Spannung werden die Moleküle in Feldrichtung gedreht, und die Polarisationssebene des Lichts bleibt erhalten. Wegen der gekreuzten Polarisationsfilter kommt kein Licht durch.

Für jeden Bildpunkt (picture element = pixel) werden drei der gezeigten Bereiche mit je einem roten, einem grünen und einem blauen Filter hergestellt.



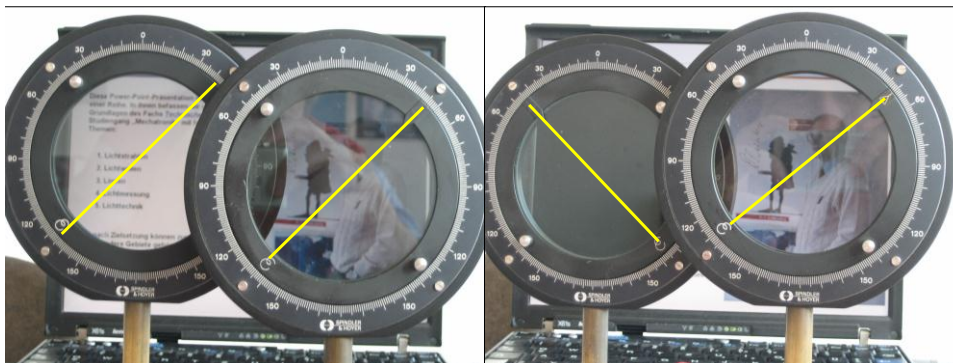
Technische Optik 07

56 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Hält man vor die Flüssigkristall-Anzeige z. B. eines Notebooks einen Polarisationsfilter und dreht ihn, so kann man erkennen, dass tatsächlich die Funktion der Flüssigkristall-Anzeige (LCD) auf polarisiertem Licht beruht.



Hier ist zu erkennen, dass die Schwingungsrichtung des Lichts gegen die horizontale Richtung um 45° gedreht ist; bei einer Stellung von 135° lässt der Polarisationsfilter nichts mehr durch.

Technische Optik 07

57 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Je nach Dicke der durchstrahlten Schicht entsteht entweder gedrehtes linear polarisiertes Licht (Komponente: Halb-Wellenlängen-Plättchen) oder zirkular polarisiertes Licht (Viertel-Wellenlängen-Plättchen). Als Zwischenzustand entsteht elliptisch polarisiertes Licht.

Zirkular polarisiertes Licht hat die Eigenschaft, unabhängig von der Winkelstellung eines Polarisators immer die gleiche durchgelassene Intensität zu zeigen; darin ähnelt es unpolarisiertem Licht. Es unterscheidet sich davon, wenn ein weiteres Viertel-Wellenlängen-Plättchen benutzt wird; dann entsteht wieder linear polarisiertes Licht, das beim Durchgang durch einen Polarisator Leistungsvariation nach dem Malusschen Gesetz zeigt.

Die Qualität von zirkular polarisiertem Licht ist also anders als die von unpolarisiertem Licht, denn es lässt sich ohne Intensitätsverlust in linear polarisiertes Licht umwandeln.

Technische Optik 07

58 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Es gibt einige Kristalle, die in einem elektrischen Feld doppelbrechend werden oder die Doppelbrechung verstärkt ausbilden. Es gibt zwei Abhängigkeiten:

$$\Delta n \propto E \quad \text{Pockels-Effekt}$$

$$\Delta n \propto E^2 \quad \text{Kerr-Effekt}$$

Die technische Anwendung dieser Vorgänge wird beim RealD-Verfahren im Kino benutzt. Eine Version für Fernseh-Empfang zu Hause ist in Vorbereitung. Das RealD-Verfahren hat den Vorteil, dass die Qualität des Stereo-Empfangs nicht von der Kopfhaltung abhängt. (Sie dürfen der Nachbarin den Kopf schräg auf die Schulter legen! Mit linear polarisiertem Licht wäre das nicht möglich!)



Technische Optik 07

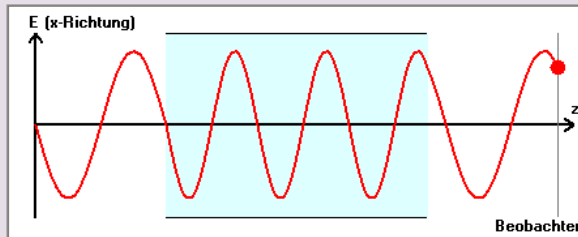
59 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

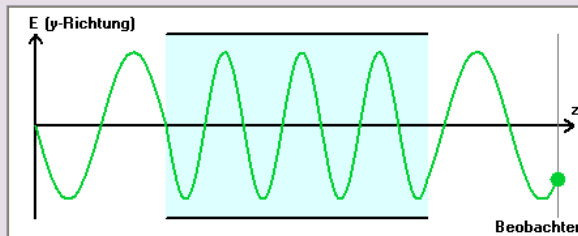
Bei der Projektion werden Kristalle verwendet, an die in y-Richtung ein elektrisches Feld angelegt werden kann. Dadurch ändert sich der Brechungsindex. Ein einfallender Lichtstrahl, der unter 45° linear polarisiert ist, besteht aus zwei kohärenten Teilschwingungen ohne Phasenverschiebung.

Schwingung des E-Vektors in x-Richtung



Durch ein elektrisches Feld in y-Richtung wird der Brechungsindex kleiner oder größer (wie im Bild). Dadurch erreichen die Teilschwingungen den Beobachter mit einer Phasenverschiebung.

Schwingung des E-Vektors in y-Richtung



Programm

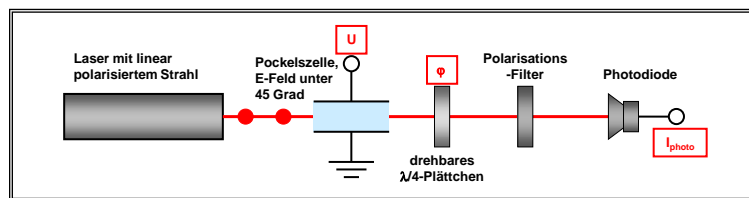
Technische Optik 07

60 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

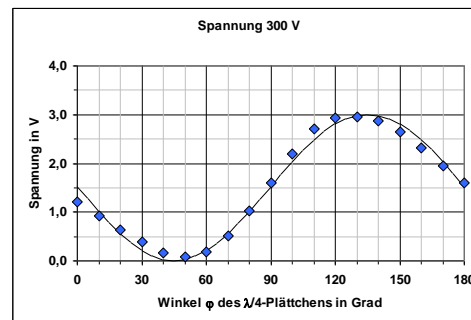
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Die Eigenschaften einer Pockelszelle wurde in folgendem Aufbau gemessen:



Der E-Vektor der einfallenden Laserstrahlung schwingt parallel zur x-Achse (0 Grad). Das elektrische Feld der Pockelszelle liegt unter 45 Grad. Der Polarisationsfilter steht unter 90 Grad. Bei fester Spannung U wird das Viertel-Wellenlängen Plättchen gedreht (φ) und die Lichtleistung am Sensor gemessen (I_{photo} , Symbole). Die Messergebnisse werden mit der Vorhersage nach dem Jones-Algorithmus verglichen (Kurve).

Die theoretische Kurve ist für eine Phasenverschiebung von -91 Grad gerechnet.



Technische Optik 07

61 von 61

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel



1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Für verschiedene Spannungen an der Pockelszelle wurden auf diese Weise folgende Phasenverschiebungen ermittelt:

Es ist zu erkennen: Die Phasenverschiebung beim Durchgang von Licht durch einen Lithium-Niobat-Kristall (LiNbO_3) ändert sich linear mit der angelegten Spannung.

Das ist das Verhalten, wie es der Pockelseffekt vorhersagt.

