

Polarisiertes Licht

Dieser Bereich der Optik ist besonders interessant, weil die Entdeckung der Polarisation historisch die Vorstellung des Lichtes als elektromagnetische Welle etabliert hat.

Vorbereitung:

Licht als elektromagnetische Transversalwelle; Erzeugung und Nachweis von linear, elliptisch und zirkular polarisiertem Licht; Reflexion an Isolatoren und Metallen; qualitative Kenntnis der Fresnel-Formel; Doppelbrechung; optische Aktivität und Rotationsdispersion, Spannungsoptik; Grundkenntnisse der Funktionsweise einer Silizium-Photozelle.

1 Einleitung

1.1 Polarisation

Elektromagnetische Wellen sind Transversalwellen. E -Feldvektoren und magnetische Feldvektoren stehen senkrecht aufeinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung.

Der sichtbare Bereich des Spektrums liegt bei Wellenlängen zwischen 390 nm und 780 nm. Die Atome einer Lichtquelle werden durch zugeführte Energie zu Schwingungen angeregt. Es entsteht somit eine Vielzahl isotrop verteilter Hertz'scher Dipole, die senkrecht zu ihrer Achse maximal elektrische Strahlung abgeben, dagegen in Richtung ihrer Achse überhaupt nicht abstrahlen.

Für die Intensität der Strahlung gilt

$$I \propto \sin^2 \vartheta / r^2.$$

- ϑ : Winkel zwischen Dipolachse und Beobachter
 r : Abstand zwischen Dipol und Beobachter

Durch die isotrope Verteilung der Dipole schwingen die E -Feldvektoren der Lichtwellen daher in keiner Vorzugsrichtung. Von Polarisation spricht man, wenn sich die E -Feldvektoren in einer bestimmten Weise bewegen. Weißes Licht ist im allgemeinen unpolarisiert.

1.2 Linear polarisiertes Licht

Von linear polarisiertem Licht spricht man, wenn das elektrische Feld immer nur in einer Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung steht. Zu dieser polarisierten Welle lautet die Lösung der Wellengleichung

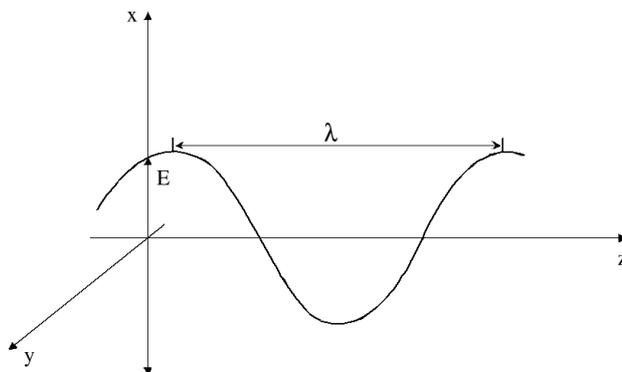


Abbildung 1: Darstellung einer linear polarisierten Welle zu einem festen Zeitpunkt

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{e} \operatorname{Re} \left\{ E_0 e^{i(kz - \omega t)} \right\} = \vec{e} E_0 \cos(kz - \omega t)$$

\vec{e} :	Einheitsvektor senkrecht zur Ausbreitungsrichtung
E_0 :	Amplitude des E-Feldes
k :	Richtung (= Ausbreitungsrichtung, $ k = 2\pi/\lambda$)
z :	Ort der Welle
ω	$= kc$

1.3 Elliptisch polarisiertes Licht

Licht heißt elliptisch polarisiert, wenn sich die Spitze des E -Feld-Vektors in einer Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung auf einer Ellipse bewegt. Diese Bewegung kommt durch Überlagerung zweier linear polarisierter Wellenzustände, die zueinander senkrecht mit einer Phasendifferenz zwischen 0 und $\pi/2$ schwingen. Man spricht von links- und rechtselliptisch polarisiertem Licht, je nachdem ob sich der E -Feld-Vektor im oder gegen den Uhrzeigersinn bewegt.

1.4 Zirkular polarisiertes Licht

Beträgt der Phasenunterschied zwischen den beiden Schwingungen gerade $\Delta\varphi = \pi/2$ und sind die Amplituden des E -Feldes gleich groß, so beschreibt die Spitze des E -Feld-Vektors einen Kreis. In diesem speziellen Fall erhält man zirkular polarisiertes Licht.

1.5 Doppelbrechung

Trifft ein Lichtstrahl auf ein isotropes Material, wird er einfach gebrochen. Der Brechungswinkel β ist dabei abhängig von der Brechzahl n und ist eine wellenabhängige Materialgröße. Das allgemeine Brechungsgesetz von Snellius lautet:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

α :	Einfallswinkel
β :	Brechungswinkel
n_1 :	Brechzahl Medium 1
n_2 :	Brechzahl Medium 2

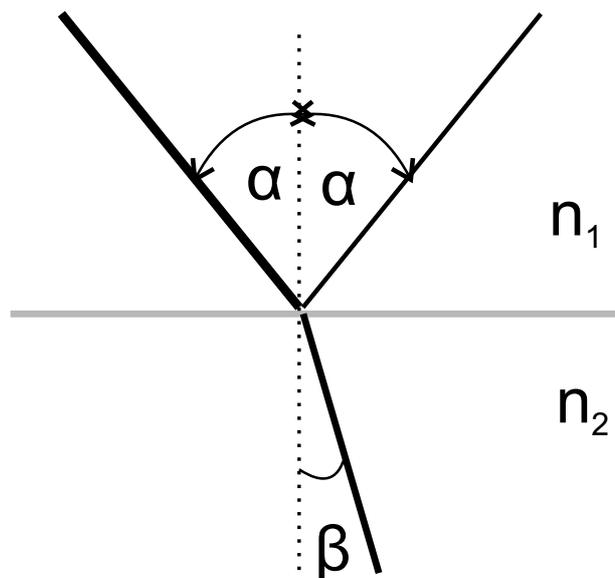


Abbildung 2: Brechungsgesetz

Trifft der Strahl dagegen auf einen Kristallspatkristall, wird er in zwei verschiedene Richtungen gebro-

chen, so daß aus dem Kristall 2 Strahlen austreten. Dieses Phänomen nennt man Doppelbrechung. Es tritt in allen anisotropen Materialien auf. Anisotrope Materialien sind solche, deren verschiedene Richtun-

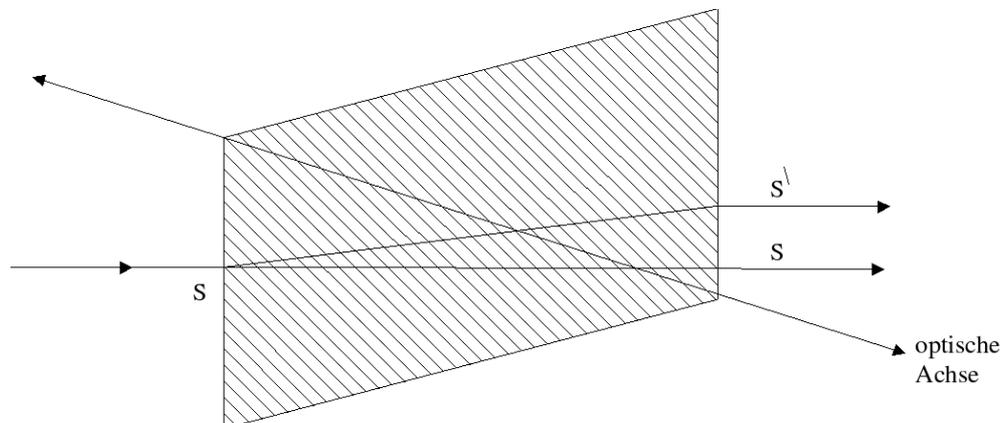


Abbildung 3: Aufspaltung der Welle bei Doppelbrechung

gen physikalisch nicht gleichwertig sind. Auch an sich isotrope Materialien können durch physikalische Veränderungen anisotrop gemacht werden (z.B. Druck, durch elektrische oder magnetische Felder). Im anisotropen, einachsigen Kristall zeichnet sich eine Achse, die sogenannte Hauptachse oder auch optische Achse, durch hohe Symmetrie in der Kristallstruktur aus.

In allen Ausbreitungsrichtungen, die nicht mit dieser optischen Achse zusammenfallen, ist die Lichtgeschwindigkeit von der Polarisationsrichtung des Lichtes abhängig. Unpolarisiertes Licht wird in diesem Fall in zwei vollständig linear polarisierte Wellen aufgespalten, deren Schwingungsebenen senkrecht aufeinander stehen.

1.6 Erzeugung von polarisiertem Licht

Linear polarisiertes Licht Lineare Polarisation erreicht man zum Beispiel durch Reflexion des Lichtstrahls an einem isolierenden Medium, durch Streuung oder durch spezielle Polarisationsfolien. Diese Dinge werden angewendet, weil normales Licht, welches durch einen thermischen bzw. statistischen Prozess entsteht (Glühfaden, Gasentladung, Sonne), keine feste Polarisationsrichtung der eigentlich endlichen Wellenzüge besitzt. Anders ist dies bei der Lichterzeugung im Laser. Dort wird Licht „verstärkt“ in dem ein vorhandenes Photon die Emission eines zweiten Photons stimuliert. Dieses Photon ist ein Klon des ersten, es hat die selbe Frequenz, Phase und auch Polarisation des elektromagnetischen Feldes. Diese Photonen werden in einem Resonator (also zwischen zwei Spiegeln) hin- und hergeschickt, so dass möglichst viele stimulierte Photonen entstehen. Die Reflexionseigenschaften des Resonators bestimmen dann die fast 100%-ige Polarisation des Laserlichts, z.B. —wie im Versuch— seine lineare Polarisation.

Polarisation durch Reflexion Ein Lichtstrahl der auf ein isolierendes Medium trifft, wird zum Teil in dieses hineingebrochen, zum anderen Teil reflektiert. Man beobachtet, daß die Intensität des reflektierten Lichtstrahls auch bei isotropen Materialien von der Polarisationsrichtung und vom Einfallswinkel α abhängt. Diese Abhängigkeit wird durch die Fresnel'schen Formeln ausgedrückt, durch die die quantitative Beschreibung der Polarisation durch Reflexion und Brechung exakt möglich ist. Parallel zur Einfallsebene (zur Ebene, die aus Ausbreitungsrichtung und dem Lot auf die reflektierende Fläche gebildet wird) linear polarisiertes Licht wird unter einem bestimmten Einfallswinkel, dem Brewsterwinkel α_{Br} , nicht reflektiert. Der reflektierte Strahl unpolarisierten Lichts ist unter diesem Reflexionswinkel vollständig senkrecht zur Einfallsebene linear polarisiert.

Der Brewster Winkel α_{Br} ist von der Brechzahl des reflektierenden Materials abhängig. Dabei wird angenommen, daß der Strahl von Luft auf dieses Material (Brechungsindex n_M) trifft. Für Luft kann man in guter Näherung einen Brechungsindex von $n \approx 1$ annehmen. Es gilt:

$$\tan \alpha_{Br} = n_M \quad (\text{Brewstersches Gesetz})$$

Der eintreffende, parallel zur Einfallsebene polarisierte Lichtstrahl regt die Atome des Materials zum Schwingen an. Es entsteht dadurch eine Ansammlung von atomaren Dipolen, die in Polarisationsrichtung schwingen und dadurch Sekundärwellen ausstrahlen. Nach dem optischen Reflexionsgesetz (Einfallswinkel = Ausfallswinkel) wird der Strahl unter dem Einfallswinkel reflektiert. Genau dann, wenn der gebrochene Strahl auf dem reflektierten senkrecht steht, findet keine Reflexion statt, da Dipole keine Strahlung parallel zu ihrer Schwingungsachse aussenden.

Mit den unten bezeichneten Winkeln und dem Brechungsgesetz gilt dann:

$$\alpha + 90^\circ + \beta = 180^\circ \Rightarrow \alpha + \beta = 90^\circ$$

und

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\sin(90^\circ - \alpha)} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha$$

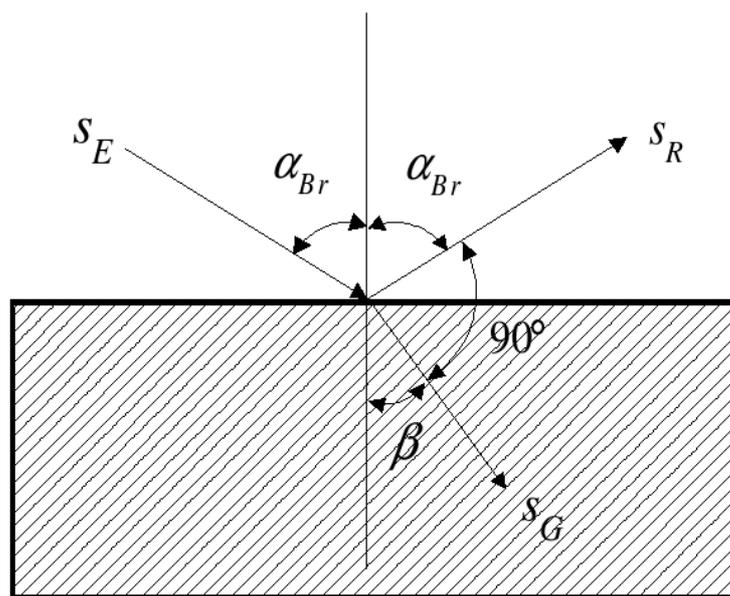


Abbildung 4: Brewstersches Gesetz

Polarisation durch Streuung Eine weitere Möglichkeit Licht zu polarisieren, ist die Streuung der Welle an kleinen Objekten (z.B. in wässrigen Lösungen). Die Teilchengröße muß dabei kleiner als die Lichtwellenlänge sein. Streuung an größeren Teilchen kann man als Reflexion betrachten. Trifft die Lichtwelle auf ein solches Streuteilchen (z.B. Molekül oder Atom) regt sie dieses zum Schwingen an. Es entsteht ein Hertzscher Dipol.

Polarisation durch spezielle Polarisationsfolien Zur Herstellung von Polarisationsfolien verwendet man Materialien, die aus Fadenmolekülen, d. h. langgezogenen Molekülen wie sie in organischen Kohlenstoffverbindungen vorkommen, besteht, die durch spezielle Verfahren parallel zueinander ausgerichtet werden. Im Modell kann man sich die Folien als feinmaschiges Gitter vorstellen, auf das eine Lichtwelle auftrifft (vgl. Polarisation von Mikrowellen).

1.7 Elliptisch und zirkular polarisiertes Licht

(Polarisierung durch Doppelbrechung)

Trifft Licht senkrecht auf eine planparallele Platte, die parallel zur optischen Achse geschnitten ist, werden die beiden Strahlen des ordentlichen und außerordentlichen Lichts nicht aufgespalten, sondern durchlaufen sie in der selben Richtung. Keiner von beiden wird gebrochen. Aber die Welle des außerordentlichen

Licht eilt der Ordentlichen voraus (oder umgekehrt). Es entsteht ein Phasenunterschied $\Delta\varphi$. Durch Überlagerung der beiden Teilwellen entsteht dann zirkular polarisiertes Licht, unter der Voraussetzung, daß die Amplitude dieser Wellen parallel zur Einfallsebene und senkrecht dazu gleich groß sind (Lichtwelle unter 45° linear polarisiert auf das Plättchen trifft). Bei allen anderen Winkeln und Phasenbeziehungen entsteht elliptisch polarisiertes Licht.

2 Versuchsbeschreibung:

Polarisation: Von linearer Polarisation des Lichtes spricht man, wenn das elektrische Feld immer nur in einer Ebene steht. Bei zirkularer Polarisation bewegt sich die Projektion der Spitze des E-Feldvektors auf einer Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung auf einem Kreis, bei elliptischer Polarisation auf einer Ellipse.

Brewsterwinkel: Wird Licht, das parallel zur Einfallsebene linear polarisiert ist, an einer Glasfläche reflektiert, so wird es unter einem bestimmten Reflexionswinkel, dem Brewsterwinkel, vollständig ausgelöscht. Für den Übergang von Luft ($n \approx 1$) auf die Reflexionsfläche gilt die Beziehung: $\tan \alpha_{Br} = n_M$, wobei n_M die Brechzahl des Materials ist.

$\lambda/4$ -Plättchen: Bei Eintritt in doppelbrechendes Material wird der Strahl i.a. in 2 Komponenten aufgespalten, d.h. es existieren verschiedene Brechungsindizes für die beiden Teilstrahlen, die ordentlicher und außerordentlicher Strahl genannt werden. Sie sind senkrecht zueinander linear polarisiert und haben im Medium unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten. Beim $\lambda/4$ -Plättchen ist dessen Dicke gerade so gewählt, daß nach dem Austritt ein Phasenunterschied der Teilwellen von $\lambda/4$ besteht. Die Überlagerung der Komponenten ergibt je nach Einfallswinkel und resultierender Komponentenamplitude dann Lichtwellen mit linearer, elliptischer oder zirkularer Polarisation.

Optische Aktivität: „optisch aktive“ Stoffe (z.B. Quarz, Zuckerlösungen, Kunststoffe) haben die Eigenschaft, dass sie die Polarisationsebene drehen. Der Drehwinkel α ist dabei proportional zur durchstrahlten Schichtdicke und Konzentration der Lösung. Außerdem ist er abhängig von der Wellenlänge des verwendeten Lichts.

3 Aufgaben:

Hinweis: im Versuch hantieren Sie mit einem Laser der Klasse 2. Diese Laser sind für die Augen ungefährlich solange der Lidschlussreflex das Auge schützt und man nicht absichtlich versucht, diesen zu unterdrücken. Nie direkt in das Laserlicht schauen! Vermeiden Sie, dass das Laserlicht an Bauelementen in Richtung anderer Personen reflektiert wird.

Zur Messung der Lichtintensität wird eine Photozelle mit angeschlossenem Multimeter verwendet. Die gemessene Stromstärke bzw. Spannung ist direkt proportional zur Intensität des Lichts.

3.1 Nachweis der Polarisation

1. Es soll die Intensität der Lichtquelle in Abhängigkeit vom Winkel φ zwischen den Durchlaßrichtungen der Polarisatoren gemessen werden. Dazu wird die Photozelle mit dem Multimeter verbunden und der Lichtstrahl mit Hilfe der Linse so justiert, daß die Photozelle optimal ausgeleuchtet ist. Die gemessene Stromstärke ist direkt proportional zur Intensität des Lichts. Die Messung soll durch Drehen des Analysators von -90° bis $+90^\circ$ in 15° -Schritten erfolgen. Der Polarisator muß dabei auf 0° stehen!
2. Zum Vergleich soll die theoretische Kurve nach der Formel $I = I_P \cdot \cos^2 \varphi$ aufgetragen werden, wobei I_P die Intensität bei Parallelstellung der Polarisationsfilter bedeutet.
3. Schieben Sie die Lampe auf der Schiene etwas zurück (Vorsicht! Sie könnte heiß sein!) und setzen Sie den Laser ein. Entfernen Sie den Polarisator und vermessen Sie nur mit Hilfe des Analysators (Filter vor der Solarzelle) den Polarisationsgrad des Laserlichts.

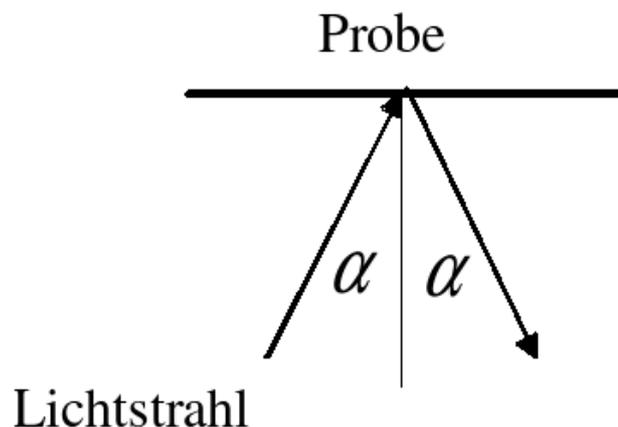
4. Man wähle die Analysatoreinstellung so, dass die gemessene Intensität des Laserlichts minimal ist und stelle (bei fester Analysatoreinstellung) vor die Laserdiode das $\lambda/4$ - Plättchen, welches nun so justiert wird, dass die Intensität wieder minimal ist. Weisen Sie nach, dass das Laserlicht hinter dem $\lambda/4$ - Plättchen weiterhin die gleichen Polarisations-eigenschaften hat, wie zuvor (Analysator verstellen und Maximal- bzw. Minimalwinkel und Intensität ablesen und notieren).

Stellen Sie den Analysator wieder auf minimale Intensität ein und justieren Sie nun das $\lambda/4$ - Plättchen auf maximale Intensität bei fester Analysatorstellung. Messen Sie die Intensität als Funktion des Analysatorwinkels. Bei dieser Einstellung des $\lambda/4$ - Plättchens ist das Laserlicht zirkular polarisiert. Verstellen Sie die Einstellung des $\lambda/4$ - Plättchens für die folgenden Versuche nicht mehr. Mit einem Polarisator können Sie nun wie unter dem ersten Punkt die Polarisations-ebene des Laserlichts drehen.

3.2 Polarisation durch Reflexion

1. Montieren Sie eine der Glasproben auf dem Drehteller und justieren Sie den Strahlengang auf 90° Einfallswinkel. (Das Laserlicht sollte das Glas gerade so streifen. Ggf. müssen Sie den Laserstrahl auch nachjustieren damit er entlang der optischen Achse verläuft. Je gewissenhafter Sie justieren, desto besser werden die Messungen.) Nun sollte die Drehachse des Drehtellers in der Ebene der Probe liegen. Sie können nun an der Laserseite den Einfallswinkel und an der Detektorseite (dem zweiten Arm) den Ausfallswinkel des reflektierten Strahls einstellen. Achten Sie darauf, dass Sie beim Verstellen des Detektorarms (um das Doppelte des Einfallswinkels) nicht den Einfallswinkel verstellen. Kontrollieren Sie bei jeder Einstellung, ob der reflektierte Lichtfleck auch den Detektor trifft. Bauen Sie hinter dem Laser mit $\lambda/4$ - Plättchen einen Polarisator in den Strahlengang ein, der es ihnen erlaubt, die Polarisationsrichtung des Laserlichts zu drehen. Zu jedem Einfallswinkel messen Sie die reflektierte Intensität in Abhängigkeit von der Polarisationsrichtung des Laserlichts in der Einfallsebene und senkrecht dazu. Messen Sie nun zunächst für Winkel von $\alpha = 90^\circ$ bis $\alpha = 30^\circ$ in 5° -Schritten. Das in der Ebene polarisierte Licht weist bei einer bestimmten Winkelstellung ein Minimum auf. Versuchen Sie den Winkel dieses Minimums möglichst genau zu bestimmen.

Tragen Sie die Ergebnisse in einem Diagramm auf. Ermitteln Sie daraus den Brechungsindex ihres Glases und vergleichen Sie diesen mit den Werten der anderen Gläser. Notieren Sie die Ergebnisse (auch die der anderen Gruppen) in ihrem Protokollheft.



2. Um die Reflexion am Metall zu untersuchen, tausche man die Glasprobe aus und justiere bei ansonsten gleichem Versuchsaufbau den Strahlengang neu. Als festen Einfallswinkel stelle man $\alpha = 70^\circ$ ein. Die Messung soll für die Konfiguration „P“ „S“ und „45“ durchgeführt werden, wobei die Bezeichnungen für parallel, senkrecht bzw. 45° zur Einfallsebene polarisiertes einfallendes Licht stehen. Messen Sie die Intensität des reflektierten Lichts als Funktion der Winkelstellung φ (von -90° bis 90°) des Analysators. Tragen Sie die Ergebnisse in einer Graphik auf, bei der Sie als x-Achse die Differenz (!) der Winkeleinstellung von Polarisator und Analysator auftragen. Schließen Sie daraus auf die Polarisation des reflektierten Strahls. Achten Sie insbesondere auf Position des Intensitätsminimums des 45° polarisierten Lichts.

3.3 Optische Aktivität

Verwenden Sie für diesen Versuchsteil den Laser und stellen Sie anfangs den Analysator so ein, dass minimale Intensität gemessen wird.

1. Die Drehung der Polarisationssebene von verschiedenen „optisch aktiven“ Stoffen soll für das Laserlicht bestimmt werden. Dazu stehen Küvetten mit wässrigen Zuckerlösungen bekannter Konzentration (A-C: Saccharose, D-F: Fructose) zur Verfügung sowie zwei Lösungen mit unbekannter Konzentration (G,H). Die Saccharoselösungen werden zwischen die gekreuzten Polarisationsfilter auf der optischen Bank gestellt. Dann dreht man solange am Analysator bis wieder Dunkelheit herrscht. Die verschiedenen Drehwinkel sollen in Abhängigkeit der Konzentration aufgenommen werden. Achtung: Der Zucker muß immer vollständig gelöst sein! Justieren Sie den Weg des Lichtstrahls so, dass er möglichst komplett in der Lösung verläuft!

Die gleiche Messung führe man nun für Fructose durch. Aus beiden Meßreihen bestimme man die spezifische Drehung der jeweiligen Lösung und diskutiere mögliche Fehler in der Messung. (Ergebnis der Fehlerdiskussion in das Protokollheft.)

2. Aus dem Drehwinkel α und der in a) gemessenen spezifischen Drehung $[\alpha]_{\lambda=589nm}$ soll die unbekannte Konzentration der Lösungen in den Plexiglasröhrchen G und H bestimmt werden. Dazu verwende man die Formel $\alpha = [\alpha]cd$ (wobei α : Drehwinkel der Polarisationssebene, $[\alpha]$: spezifische Drehung, c : Konzentration der Lösung, d : Schichtdicke)

3.4 Spannungsoptik

Einige Plexiglasmodelle sollen spannungsoptisch untersucht werden. Dazu bringt man sie zwischen die gekreuzten Polarisationsfilter und durchstrahlt sie mit Halogenlicht. Um ein größeres Bild zu erhalten, projiziert man es mit Hilfe zweier Linsen an die Wand oder auf einen Schirm. Dieses kann nun abfotografiert werden. Beschreiben Sie die Photos bzw. die erhaltenen Projektionen! Wodurch entstehen die Farben? Welche Erkenntnisse über die Verspannungen des Materials kann man gewinnen?