

Versuche mit polarisiertem Licht

Ziele

- Beschreibung und Erzeugung von polarisiertem Licht
- Optische Aktivität von Quarz und Rohrzucker
- Sichtbarmachung von mechanischen Spannungen in Werkstücken

1 Grundlagen

1.1 Beschreibung der Polarisationsarten des Lichts

Bei einer unpolarisierten ebenen Welle sind im zeitlichen Mittel alle Richtungen des \vec{E} -Vektors (elektrische Feldstärke) senkrecht zur Ausbreitungsrichtung gleich wahrscheinlich vertreten. Der Erwartungswert seines Betrages bleibt zeitlich konstant. Es liegt axiale Symmetrie vor, wobei die Ausbreitungsrichtung die Achse darstellt.

Eine **linear polarisierte ebene Welle** wird durch einen reellen Polarisations-Einheitsvektor \vec{e} beschrieben, der senkrecht zur Ausbreitungsrichtung $\vec{k}/|\vec{k}|$ steht. Dabei ist \vec{k} der **Wellenvektor**.

$$\vec{E}_0 = E_0 \vec{e} \exp(i\varphi_0) \quad (1)$$

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \exp(i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)) \quad (2)$$

Das elektrische Feld schwingt in der Richtung von \vec{e} . $k = |\vec{k}|$ ist die **Wellenzahl**.

Eine **zirkular polarisierte Welle** wird durch **zwei** Einheitsvektoren \vec{e}_x und \vec{e}_y beschrieben, die mit der Ausbreitungsrichtung ein orthonormales Rechts-Dreibein bilden ($z \parallel \vec{r}$).

$$\vec{E}_0^+ = \frac{E_0}{\sqrt{2}} (\vec{e}_x + i\vec{e}_y) \exp(i\varphi_0) \quad \text{linkszirkular polarisiert} \quad (3)$$

$$\vec{E}_0^- = \frac{E_0}{\sqrt{2}} (\vec{e}_x - i\vec{e}_y) \exp(i\varphi_0) \quad \text{rechtzirkular polarisiert} \quad (4)$$

E_0 ist reell.

Warum diese Wellen „links-“ bzw. „rechtzirkular polarisiert“ heißen, kann man sehen, wenn man

den Realteil betrachtet (denn dies ist physikalisch messbar). Der Einfachheit halber wählt man $\varphi_0 = 0$ und erhält

$$\Re \vec{E} = \Re \frac{E_0}{\sqrt{2}} (\vec{e}_x \pm i\vec{e}_y) \exp(i(kz - \omega t)) = \frac{E_0}{\sqrt{2}} [\vec{e}_x \cos(kz - \omega t) \mp \vec{e}_y \sin(kz - \omega t)] .$$

Verfolgt man die Bewegung des \vec{E} -Vektors am festen Ort $z = 0$, so erhält man

$$\Re \vec{E} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} [\vec{e}_x \cos(\omega t) \pm \vec{e}_y \sin(\omega t)] . \quad (5)$$

Blickt man in Ausbreitungsrichtung, also nach $+z$, so zeigt $+x$ nach rechts und $+y$ nach oben. Dann steht das obere Vorzeichen für eine Kreisbewegung gegen den Uhrzeigersinn, das untere für eine im Uhrzeigersinn, was man auch als Links- bzw. Rechtsdrehung bezeichnet. Dies ist die Konvention der Physiker, Chemiker schauen dem Licht entgegen.

Fotografiert man die Feldvektoren, die an der z -Achse angeheftet zu denken sind, zur Zeit $t = 0$, so ergibt sich

$$\Re \vec{E}(z, t = 0) = \frac{E_0}{\sqrt{2}} [\vec{e}_x \cos(kz) \mp \vec{e}_y \sin(kz)] . \quad (6)$$

Man sieht eine Links- bzw. Rechtsspirale, wie sie in Abbildung (1) dargestellt ist (aus dem Lehrbuch **Metzler, Physik**).

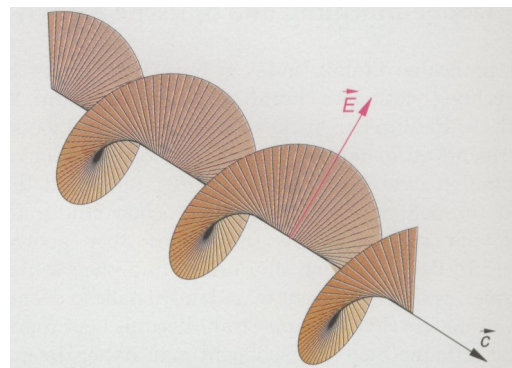


Abbildung 1: Momentaufnahme einer zirkular polarisierten Welle.

Man muss den x - und y -Komponenten lediglich unterschiedliche Amplituden zuordnen, um elliptisch polarisiertes Licht zu beschreiben. Dieses kann man wiederum in einen linearen und einen zirkularen Anteil zerlegen.

Die allgemeinen Polarisierungseigenschaften von Licht werden durch Vektor-Matrix-Formalismen beschrieben, dem Jones- oder dem Müller-Formalismus. Das Fachgebiet heißt **Ellipsometrie**.

1.2 Erzeugung polarisierten Lichts

1.2.1 Linear polarisiertes Licht

Am einfachsten zu handhaben sind polarisierende Folien, sogenannte **Polarisationsfilter**. Diese werden im Versuch verwendet. Sie bestehen aus kleinen Kristallnadeln, die orientiert in einen Zellulosefilm eingelagert sind. Es tritt in den Nadeln ein sogenannter linearer **Dichroismus** auf, der bedeutet, dass eine Polarisationsrichtung des Lichtes durchgelassen, die andere aber absorbiert wird. Eine weitere Möglichkeit bietet das Ausrichten dichroitischer Moleküle in einer Kunststoffolie

durch deren Dehnung (näheres: **Bergmann-Schaefer**).

Auch mit doppelbrechenden Kristallen kann linear polarisiertes Licht erzeugt werden. Aus ihnen werden besonders hochwertige Polarisatoren geschliffen, die allerdings häufig nur für einen recht engen Bereich des Einfallswinkels funktionieren (näheres: **Bergmann-Schaefer**).

1.2.2 Polarisation von reflektiertem Licht

Die einfachste Art der Erzeugung von linear polarisiertem Licht ist die Reflexion an einer Glasplatte. Schwingt nämlich der \vec{E} -Vektor des einfallenden Lichtes in der Einfallsebene, so werden im Glas Schwingungen der Elektronen in dieser Richtung angeregt. Schwingende Elektronen strahlen nach der klassischen Strahlungstheorie senkrecht zur Schwingungsrichtung am stärksten, parallel dazu überhaupt nicht, siehe Abbildung (2). Stehen nun reflektierter und gebrochener Strahl senkrecht aufeinander, so ist klar, dass kein Licht reflektiert wird, siehe Abbildung (3).

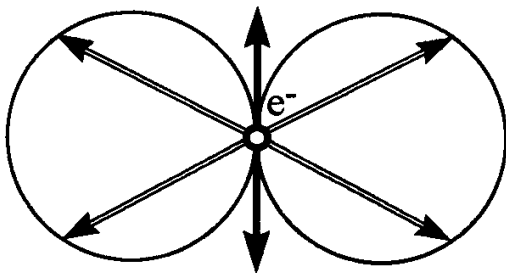


Abbildung 2: Abstrahlcharakteristik. Das Elektron schwingt senkrecht. Die Länge der Doppelpfeile ist ein Maß für die abgestrahlte Intensität (Polardiagramm).

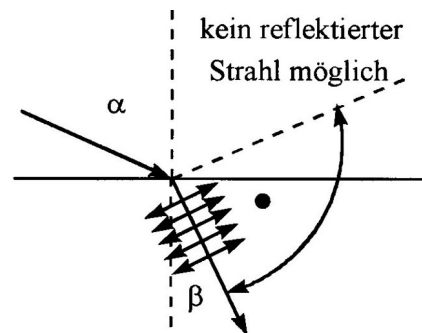


Abbildung 3: Licht, das in der Einfallsebene schwingt, kann nicht reflektiert werden, wenn gebrochener und reflektierter Strahl aufeinander senkrecht stehen.

Der dazugehörige Winkel α heißt **Brewsterscher Winkel**. Für diesen Winkel α_B gilt

$$\frac{\sin \alpha_B}{\sin \beta_B} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{und} \quad \alpha_B + \beta_B = 90^\circ .$$

Daraus folgt

$$\frac{\sin \alpha_B}{\sin (90 - \alpha_B)} = \tan \alpha_B = \frac{n_2}{n_1} , \tag{7}$$

womit sich wieder eine Möglichkeit der Messung von Brechungsindizes ergibt.

Fällt unpolarisiertes Licht unter α_B auf, so fehlt im reflektierten Licht die in Abbildung (3) dargestellte Schwingungsebene. Lässt man polarisiertes Licht einfallen, so hängt es von dessen Ebene ab ob etwas reflektiert wird oder nicht. Die Reflexion an der Platte dient dann als Analysator.

Für andere Einfallswinkel als α_B unterscheiden sich die reflektierten Intensitäten für senkrecht (I_s) und parallel (I_p) zur Einfallsebene polarisiertes Licht ebenfalls. Der Verlauf von $I_s(\alpha)$ und $I_p(\alpha)$ wird durch die sogenannten **Fresnelschen Gleichungen** wiedergegeben. Abbildung (4) aus Demtröder, Band 2, zeigt die dazugehörigen Graphen, genau genommen ist dort der Reflexionskoeffizient $R = I_{s,p}(\alpha)/I_0$ aufgetragen (I_0 ist die einfallenden Intensität).

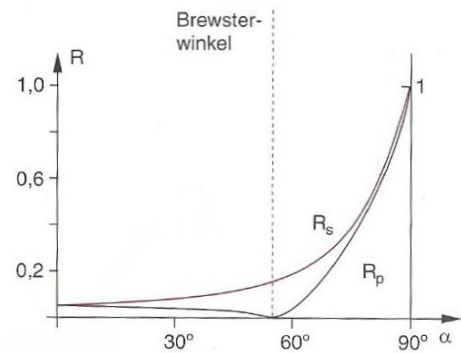


Abbildung 4: Graph der Fresnelschen Formeln (oder Gleichungen). Aus Demtröder, Band 2.

Aus Abbildung (4) folgt, dass reflektiertes Licht für fast alle Winkel zu einem gewissen Grad polarisiert ist.

1.2.3 Erzeugung zirkular polarisierten Lichts

Welche Forderungen muss ein Material erfüllen, das für die Erzeugung zirkular polarisierten Lichts geeignet ist? Dazu betrachtet man Gleichung (5). Das Material muss offenbar beim Durchgang linear polarisierten Lichts eine Phasendifferenz von $\pi/2$ zwischen zwei zueinander senkrechten Komponenten erzeugen.

Solche Phasendifferenzen erzeugt man leicht mit doppelbrechenden Materialien. Diese weisen für Polarisationen in zueinander senkrechten Richtungen unterschiedliche Brechungsindizes auf. Da der Brechungsindex mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit im Material zusammenhängt, entsteht zwischen x- und y-Komponente ein Phasenunterschied. Die Dicke d des Materials ist so zu wählen, dass gilt

$$\Delta \varphi = \varphi_a - \varphi_o = 2 \frac{\pi}{\lambda} (n_a - n_o) d = \frac{\pi}{2}. \quad (8)$$

Dabei bezeichnen n_a den außerordentlichen und n_o den ordentlichen Brechungsindex.

Die Differenz des **optischen Weges** ist dann offenbar

$$(n_a - n_o) d = \frac{\lambda}{4}, \quad (9)$$

womit sofort der Name $\lambda/4$ -Plättchen klar wird. Es ist klar, dass man die Bedingung (9) nur für einen engen Wellenlängenbereich einhalten kann.

Damit zirkular (und nicht elliptisch) polarisiertes Licht entsteht, müssen die Komponenten des \vec{E} -Vektors in den Richtungen mit unterschiedlichem Brechungsindex gleich groß sein.

Da bei zirkular polarisiertem Licht ebenso eine axiale Symmetrie wie beim unpolarisierten Licht vorliegt, ist die Unterscheidung beider Polarisationsarten durch einen Linearpolarisator (dann Linearanalysator genannt) nicht möglich. Zur Analyse lässt man vielmehr das Licht ein $\lambda/4$ -Plättchen durchlaufen. Lag unpolarisiertes Licht vor, so bleibt die axiale Symmetrie erhalten. Handelt es sich jedoch um zirkular polarisiertes Licht, so wird die vorhandene Phasendifferenz von $\pi/2$ entweder rückgängig gemacht oder auf π vergrößert. In beiden Fällen entsteht linear polarisiertes Licht, das leicht mit einem Linearanalysator nachzuweisen ist. Die Kombination aus $\lambda/4$ -Plättchen und Linearanalysator wird Zirkularanalysator genannt.

1.3 Optische Aktivität

Zahlreiche organische Stoffe in Lösung und einige Kristalle haben die Eigenschaft, die Schwingungsebene von linear polarisiertem Licht zu drehen, Abbildung (5). Diese Erscheinung rührt von der Asymmetrie des molekularen Aufbaus, z. B. bei Rohrzucker, oder von der schraubenförmigen Anordnung der Atome im kristallinen Aufbau, z. B. bei Quarz, her.

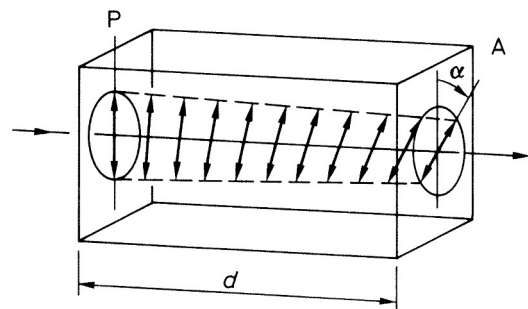


Abbildung 5: Optische Aktivität (aus Bergmann-Schaefer). P soll einen Polarisator, A einen Analysator in Durchlassstellung bezeichnen.

Die Drehung der Polarisationssebene wird durch die unterschiedlichen Brechungsindizes $n_+(\lambda), n_-(\lambda)$ für links- bzw. rechtszirkular polarisiertes Licht verursacht (zirkuläre Doppelbrechung). Der Drehwinkel je durchlaufener Strecke des aktiven Materials wird spezifisches Dreh-

vermögen genannt und ist durch $\rho = \frac{\pi(n_+ - n_-)}{\lambda}$ gegeben. Weshalb

kann die unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit für links- und rechtszirkulares Licht zu einer Drehung der Polarisationssebene von linear polarisiertem Licht führen? Diese Frage wird durch Betrachtung von Abbildung (6) beantwortet. In (a) wird links hinten der lineare Feldvektor E in zwei gleich lange gegenläufige Vektoren E^+ und E^- zerlegt. Man fasst also die lineare Welle als synchrone Überlagerung von einer links- und einer rechtszirkular polarisierten Welle auf. Beide laufen in (a) mit der gleichen Geschwindigkeit nach rechts vorne. Beide Pfeile von E^+ und E^- haben dann vorne den gleichen, aber größeren Winkel zu E , addieren sich also zu einem Vektor, der kleiner als E aber parallel zu diesem ist.

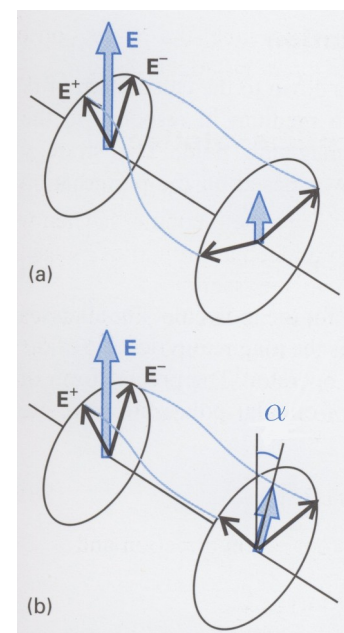


Abbildung 6: Optische Aktivität.

In (b) läuft die E^+ -Welle langsamer, sodass sich vorne die gezeichnete Stellung ergibt. Es resultiert ein um α gedrehter Feldvektor. Dieser behält seine Richtung zu allen Zeiten bei, da der *Unterschied* der Zeigerstellungen konstant bleibt. In der Praxis wird für Kristalle das spezifische Drehvermögen ρ in Grad/mm, für reine Flüssigkeiten in Grad/dm angegeben, und es gilt für den Drehwinkel $\alpha = \rho d$. Dabei ist d die Länge des vom Licht im Medium zurückgelegten Weges.

Bei Lösungen ist die Konzentration c zu berücksichtigen. Hier gilt die Beziehung

$$\alpha = \rho c d, \quad (10)$$

wobei ρ traditionell in der praktischen Einheit $\frac{\text{Grad}}{\text{g cm}^{-3} \text{dm}}$ angegeben wird. Es ist klar, dass man damit elegant, nämlich optisch, Konzentrationen messen kann.

Der Betrag der zirkularen Doppelbrechung $|n_+ - n_-|$ ist in der Regel deutlich kleiner (zwei bis drei Zehnerpotenzen) als der der linearen Doppelbrechung $|n_a - n_o|$. Zum Beispiel findet man für Quarz für die Natrium D-Linie $|n_+ - n_-| = 0,000071$ und für $|n_a - n_o| = 0,0111$.

1.4 Spannungsdoppelbrechung

Werden feste Stoffe elastisch verformt, so können die mechanischen Spannungen auch bei optisch isotropen Materialien lineare Doppelbrechung erzeugen. Dadurch wird aus linear oder zirkular polarisiertem Licht im allgemeinen **elliptisch polarisiertes Licht** entstehen. Man nutzt dies zur Sichtbarmachung der Spannungen, indem man ein Plexiglasmodell des zu untersuchenden Werkstücks zwischen Polarisationsfilter stellt, die auf Auslöschung eingestellt sind. Dies können Linearpolarisatoren sein, man bevorzugt aber Zirkularpolarisatoren (siehe **Bergmann-Schaefer**). Herrscht nun im Plexiglasmodell mechanische Spannung, so bewirkt die dadurch lokal entstehende Doppelbrechung, dass in diesen Bereichen die Auslöschung nicht mehr (vollständig) funktioniert. Ein Streifenmuster entsteht, das die Spannungsverläufe zeigt.

Abbildung (7) zeigt das Prinzip. Der gebogene Stab wird von hinten mit zirkularem Licht beleuchtet. Es sind zur Vereinfachung nur drei „Fasern“ dargestellt, eine gedehnte, eine gestauchte und die neutrale Faser (siehe Demtröder, Band 1, Kapitel 6). Die neutrale Faser besitzt keine Spannungsdoppelbrechung, sodass zirkuläres Licht sie verlässt. Das aus den anderen beiden Fasern austretende Licht ist i. A. elliptisch polarisiert und wird daher durch den

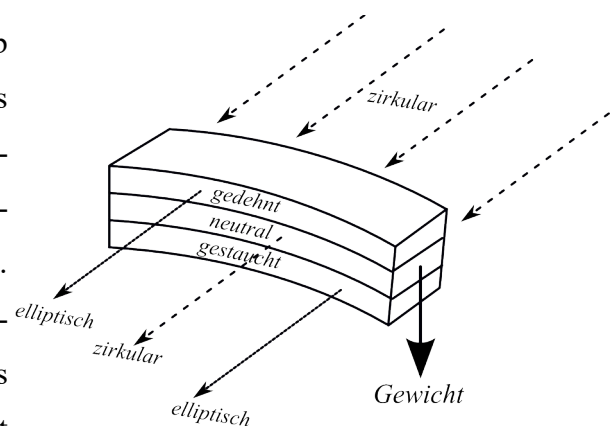


Abbildung 7: Prinzip der Spannungsdarstellung am Beispiel eines gebogenen Stabes.

folgenden auf Auslöschung eingestellten Zirkularanalysator nicht mehr vollständig ausgelöscht.

Die Ortslinien gleicher Spannung, also die Linien entlang der Fasern, haben die gleiche Doppelbrechung und daher die gleiche Helligkeit. Früher war dies der einzige gangbare Weg, die Spannungslinien zu erkunden. Natürlich mussten dazu durchsichtige Modelle der zu untersuchenden Konstruktion angefertigt werden. Dieses Fachgebiet der Spannungsoptik hat aber durch numerische Simulationsprogramme (Finite Elemente) heute an Bedeutung verloren.

Da die Doppelbrechung sehr stark wellenlängenabhängig ist, wird bei Verwendung von weißem Licht das Streifensystem farbig modifiziert.

Im **Bergmann-Schaefer**, *Optik*, oder im **Demtröder**, Band 2, finden Sie gute Aufnahmen von Spannungsdoppelbrechung. Dabei werden erstens enorme Spannungen verwendet und zweitens Tricks zur Kontrasterhöhung der Bilder, weshalb es Sie nicht verwundern sollte, dass die hier im Praktikum zu erreichenden Ergebnisse weniger kontrastreich sind.

2 Aufgaben und Hinweise

- 1) Beschreiben Sie die Erzeugung von linear polarisiertem Licht mit doppelbrechenden Kristallen.
- 2) Nennen Sie ein Beispiel für ein Polarisationsprisma. Fertigen Sie für diese Beispiel eine skizzenhafte Handzeichnung an, die den Verlauf der Lichtstrahlen und die Polarisation erkennen lässt (Kopien aus Wikipedia etc. werden nicht akzeptiert!).

Beide Aufgaben lösen Sie am einfachsten, indem Sie den Optik-Band des Bergmann-Schaefer zu Rate ziehen.

2.1 Erzeugung und Analyse von polarisiertem Licht

2.1.1 Vorversuche

Auf einer optischen Bank werden eine Leuchtdiode (LED) und eine $f = 5$ cm- oder $f = 8$ cm-Linse als Kondensator aufgebaut. Die Mitte der Linse soll um $D = 17$ - 20 cm über dem oberen Ende der Dreikantschiene liegen.

Die Verwendung einer LED hat gegenüber einer Glühlampe den Vorteil, dass eine kleinere räumliche Ausdehnung der Lichtquelle vorliegt. Mit der Kondensatorlinse kann dann ein näherungsweise paralleles Lichtbündel eingestellt werden. Wie erreichen Sie dies? Denken Sie an die Abbildungsgesetze. Notieren Sie Ihre Idee zu dieser Justage im Messprotokoll.

Eine LED besitzt einen relativ geringen spektralen Emissionsbereich. Man kann sie näherungsweise als monochromatisch bezeichnen. Dies kann vorteilhaft sein, wenn die Eigenschaften der optischen Bauelemente von der Wellenlänge abhängen.

Verwenden Sie die rote LED, da die vorhandenen Polarisationsfolien im Roten besser funktionieren als bei kürzeren Wellenlängen. Hinter der LED und dem Kondensator ordnen Sie die Polarisatoren zur Erzeugung und Analyse linear polarisierten Lichts an.

- 1) Überprüfen Sie das **Malus-Gesetz**. Halten Sie einen Polarisator fest und drehen den anderen. Messen Sie mit dem Passport-Lichtsensor die transmittierte Lichtintensität als Funktion des Drehwinkels θ . Können Sie das Malus-Gesetz (jedes beliebige Lehrbuch) bestätigen?

Hinweis: Am Sensor sind Druckknöpfe zur Einstellung der Empfindlichkeit angebracht. Es findet keine automatische Bereichsumschaltung statt. Bei Überlast blinkt die Leuchtdiode, die den eingestellten Empfindlichkeitsbereich kennzeichnet.

- 2) Entfernen Sie den ersten Polarisator und prüfen Sie, ob die LED unpolarisiertes Licht aussendet.

2.1.2 Beobachtung der Fresnelschen Reflexionsgesetze, Bestimmung des Brewster-Winkels

Der Aufbau erfolgt wie in Abbildung (8) dargestellt.

Da die Eintrittsfläche des Lichtsensors relativ klein ist, muss eine andere Kondensorlinse verwendet werden. Mit einer $f = 150$ mm-Linse kann in 20-30 cm Abstand von der Glasplatte ein ausreichend kleines Bild der LED erzeugt werden. Die Strahlen verlaufen jetzt nur noch „beinahe parallel“, für die folgende qualitative Bestätigung der Fresnel-Gleichungen, siehe Abbildung (4), ist das jedoch gut genug. Stellen Sie die Null des Winkeldrehtisches durch Beobachtung des Rückreflexes ein.

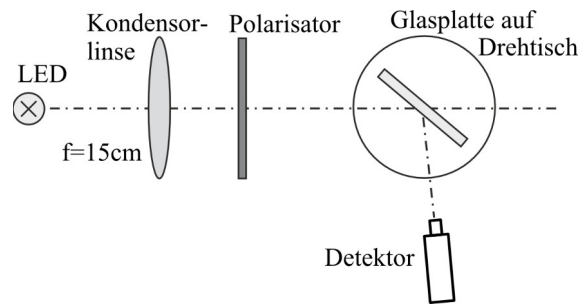


Abbildung 8: Aufbau zur Messung der reflektierten Intensität.

Die Aufnahme der Lichtintensität erfolgt mit einem Lichtsensor, der sich über „Bluetooth“ mit einem Endgerät verbinden lässt. Dies kann nach Installation der „measureApp“ entweder ein Smartphone oder ein Tablet (wird bei Bedarf zur Verfügung gestellt) sein. Eine Übersicht der wichtigsten Funktionen der App sowie der QR-Code zum Download befinden sich am Messplatz.

Für die Intensitätsmessung muss der Sensor zunächst vorbereitet werden. Halten Sie dazu den Schalter des Sensors solange gedrückt, bis er im Eingabemenü der App erscheint und aktivieren Sie ihn durch Anklicken. Nun kann die Intensität durch Aktivierung des roten Buttons aufgenommen werden. Dessen erneute Aktivierung beendet die Messung.

Messen Sie für α , Abbildung (3), von 20° bis 75° (5° -Schritte) die reflektierten Intensitäten $I_s(\alpha)$ und $I_p(\alpha)$. Richten Sie den Sensor richtig aus, indem Sie ihn durch die Glasplatte „anpeilen“.

Stellen Sie zur Auswertung Ihre Messpunkte $I_{s,p}(\alpha)$ in einem Diagramm graphisch dar und vergleichen Sie qualitativ mit dem Bild aus dem **Demtröder**, siehe Abbildung (4).

2.1.3 Untersuchungen mit Viertelwellenlängenplättchen

Bauen Sie eine Anordnung gemäß Abbildung (9) auf, wobei die Polarisationsfilter in einem möglichst parallelen Lichtbündel stehen sollen.

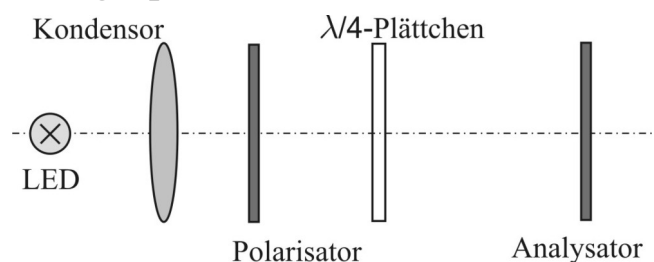


Abbildung 9: Anordnung zu Versuchen mit dem $\lambda/4$ -Plättchen, kurzbrennweitiger Kondensator.

Nochmals: Wie erreichen Sie dies? Denken Sie an die Abbildungsgesetze.

1) Verwendung eines Viertelwellenlängenplättchens

Messen Sie mit dem Sensor $I(\theta_{\text{Analysator}})$ für folgende relative Stellungen von Polarisator und $\lambda/4$ -Achse: 0° , 20° und 45° . Vergleichen Sie mit dem zu Erwartenden.

2) Verwendung von zwei Viertelwellenlängenplättchen

Stellen Sie nun ein weiteres $\lambda/4$ -Plättchen zwischen das erste $\lambda/4$ -Plättchen und den Analysator. Geben Sie für folgende Stellungen der $\lambda/4$ -Plättchen an, bei welcher Analysatorstellung Auslöschung vorliegt. Also an dieser Stelle messen Sie nicht die Intensitätsverteilungen durch, sondern geben nur die Stellung für Auslöschung an. Fassen Sie die Ergebnisse in einer Tabelle zusammen und erklären Sie die Resultate.

- a) beide Drehhebel der $\lambda/4$ -Plättchen vertikal
- b) beide Drehhebel der $\lambda/4$ -Plättchen horizontal
- c) beide Drehhebel der $\lambda/4$ -Plättchen um 45° gedreht
- d) erster Drehhebel um 45° zweiter um -45° gedreht
- e) erster Drehhebel um 45° zweiter Drehhebel vertikal

2.2 Optische Aktivität von Campher und Quarz

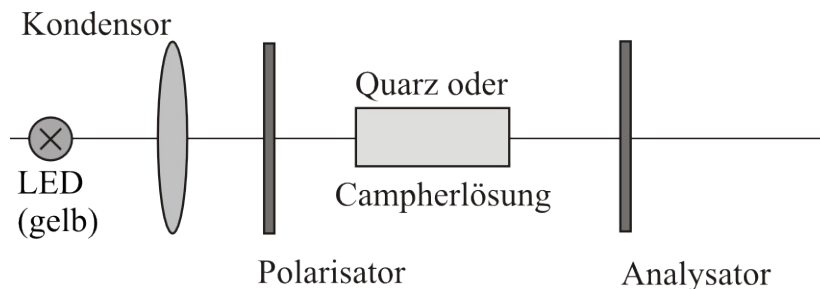


Abbildung 10: Messung der optischen Aktivität. Die Küvette bzw. das Quarzplättchen soll am Ort des vergrößerten Bildes der LED-Austrittsöffnung stehen.

Traditionell wird die optische Aktivität für die Wellenlänge der Na-D-Linien (589 und 589,6 nm) angegeben¹. Statt einer Na-Spektrallampe wird hier jedoch eine gelbe LED, welche ein 20 nm breites Spektrum mit Maximum bei 590 nm besitzt, verwendet (Spektrum ähnelt einer Gaußkurve).

Die Drehung der Schwingungsebene linear polarisierten Lichts wird mit einer Anordnung entsprechend Abbildung (10) gemessen. Als Kondensator ist wieder die Linse mit $f = 150$ mm zu

¹ Der Grund dafür ist die „spektrale Reinheit“ einer Na-Lampe. Es treten praktisch nur die beiden nah beieinanderliegenden D-Linien auf und es bedarf keiner spektroskopischen Wellenlängentrennung.

verwenden, wobei das Lichtaustrittsfenster der LED durch diese Linse zunächst auf einen etwa 70 cm entfernten Schirm abgebildet werden soll. Dann stellen Sie ungefähr an den Ort des Schirms die Küvette und verschieben den Schirm entsprechend. Durch diese Anordnung ist im Bereich der Küvette der Strahlquerschnitt so klein, dass Reflexe an der Innenwand der rohrförmigen Küvette vermieden werden. Dieses reflektierte Licht würde eine veränderte Polarisierung aufweisen, sodass keine völlige Auslöschung durch Drehen des Analysators erreicht werden könnte. Den entsprechenden Effekt können Sie leicht verifizieren, indem Sie die Küvette in Richtung der Linse verschieben, wo ein größerer Strahlquerschnitt vorliegt.

Eigentliche Messung: Entfernen Sie die Küvette und bringen den Polarisator P und den Analysator A in gekreuzte Stellung. Stellen Sie dann die Küvette mit der Campherlösung oder das Quarzplättchen in den Strahlengang. Jetzt durchdringt Licht den Analysator. Drehen Sie den Analysator, bis erneut Auslöschung eintritt. Bestimmen Sie den zugehörigen Drehwinkel.

Das klingt ganz einfach, muss aber nicht zu richtigen Ergebnissen führen. Das Problem besteht darin, dass Sie nicht wissen, ob um x° oder $180^\circ - x^\circ$, also entgegengesetzt, gedreht wurde ($180^\circ + x^\circ$ und größere Drehungen sollen von vornherein ausgeschlossen werden). Lösungswege stellen die Messung der Drehung bei unterschiedlicher Dicke oder die Betrachtung der Farbverläufe bei Verwendung von weißem Licht dar (siehe hierzu die Praktikumsbücher von **Walcher** oder von **Geschke**).

2.2.1 Drehvermögen von Campher gelöst in Ethanol

Die Analyse der optischen Aktivität von gelösten Molekülen hat große Bedeutung in der Chemie und in der Biochemie, da die Enantiomere eines Moleküls häufig unterschiedliche chemische Reaktionen zeigen. Interessantes über Campher finden Sie bei **Wikipedia**. Hier wird synthetischer rechtsdrehender Campher verwendet.

Bestimmen Sie den Drehwinkel für zwei Küvetten unterschiedlicher Länge. Für die Länge $2d$ sei die Drehung x° oder $180^\circ - x^\circ$, für die Küvette der Länge d erwartet man $x^\circ/2$ oder $(180^\circ - x^\circ)/2$, was nur für x° gleich 90° keine Entscheidung erlaubt.

Das spezifische Drehvermögen der Campherlösung beträgt bei D-Licht

$$\rho \approx 44 \frac{\text{Grad}}{\text{g cm}^{-3} \cdot \text{dm}} .$$

Geben Sie den Drehwinkel mit Fehler und die Konzentration (einschließlich Fehler) der Campherlösung in g cm^{-3} an.

2.2.2 Drehvermögen von Quarz

Die Dicke des Quarzplättchens ist $d = 1,5$ mm. Messen Sie das spezifische Drehvermögen für die zwei Quarzplättchen (rechts, links) für die Na-D-Linie.

Hinweis: Beim rechts- und linksdrehenden Quarzplättchen müssen die Drehwinkel der Polarisations Ebene in entgegengesetzten Richtungen gemessen werden. Rechtsdrehender Quarz dreht die Polarisations Ebene im Uhrzeigersinn, wenn man dem Licht entgegenblickt (Konvention der Chemiker), linksdrehender entgegen dem Uhrzeigersinn. Versuchen Sie, im Internet Vergleichswerte zu finden. Geben Sie im Protokoll die Quellen an.

2.2.3 Spannungsoptische Untersuchungen

Die spannungsoptischen Untersuchungen werden mit einem Aufbau entsprechend Abbildung (11) durchgeführt. Dabei soll die grüne LED verwendet werden.

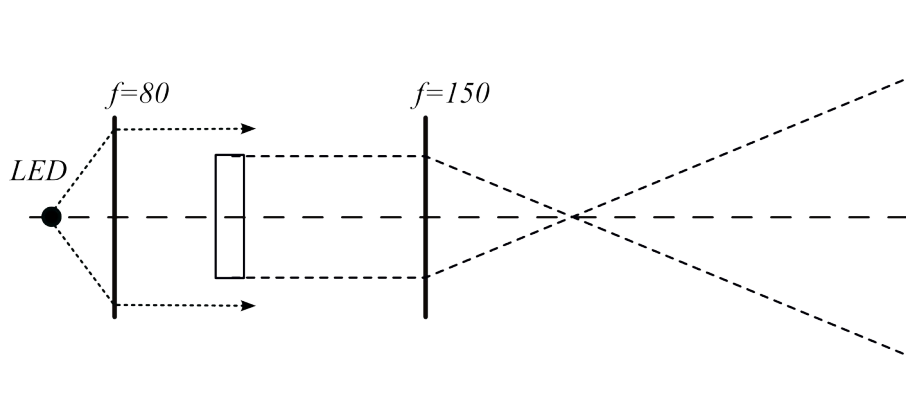


Abbildung 11: Strahlengang zur Spannungsoptik. Links ist der Beleuchtungsstrahlengang dargestellt, die Kondensatorlinse dient der Beleuchtung des Plexiglaswinkels mit leicht divergentem Licht. Rechts ist der Abbildungsstrahlengang dargestellt, ausgehend vom Objekt und endend auf dem Schirm. Die Polarisationsfilter-Paare sind links und rechts vom Objekt aufzustellen.

Abbildung (12) zeigt den Plexiglaswinkel mit Biegegewicht rechts von einem $\lambda/4$ -Plättchen.

Um einigermaßen schöne Bilder zu erhalten, muss der zu untersuchende Bereich des Plexiglaswinkels mit nahezu parallelem Licht beleuchtet werden. Gehen Sie beim Aufbau wie folgt vor:

Setzen Sie die LED in einer Höhe von ca. 18,5 cm über der Oberkante der Dreikantschiene an ein Ende und den Schirm an das andere (noch ein paar cm zum Ende jeweils Platz lassen). Nun justieren Sie die $f = 80$ mm-Linse so ein, dass auf dem Schirm ein möglichst gleichmäßig beleuchteter Fleck, etwa mit dem Durchmesser der Linse, entsteht. Bei den gegebenen Abmessungen bedeutet dies, dass leicht divergentes Licht die Linse verlässt. Dies ist so gewünscht, weil die unter Spannung stehenden „Fasern“, Abbildung (7), nicht schräg durchleuchtet werden dürfen. Natürlich soll der Fleck in der Mitte des Schirms in 18,5 cm Höhe liegen.



Abbildung 12: Plexiglaswinkel mit Biegegewicht. Nur ein kleiner Teil des Winkels wird beleuchtet.

Platzieren Sie nun den Winkel mit Bohrung im Knick wie in Abbildung (12), jedoch ohne Gewicht, in etwa 13 cm Entfernung von der Kondensorlinse. Der senkrechte Schenkel soll zunächst im Strahl liegen. Nun bilden Sie mit der 150 mm-Linse den beleuchteten Teil des Winkels auf dem Schirm (vergrößert) ab. Kratzer helfen beim Scharfstellen.

Nun kommen die Polarisatoren zum Einsatz. Linearpolarisatoren und $\lambda/4$ -Plättchen sind so einzurichten, dass zirkular polarisiertes Licht auf das Objekt fällt. Das zweite Paar von Polarisatoren hinter dem Objekt muss als Zirkularanalysator mit Auslöschung eingestellt werden. Beachten Sie die korrekte Reihenfolge und erwähnen Sie diese im Protokoll.

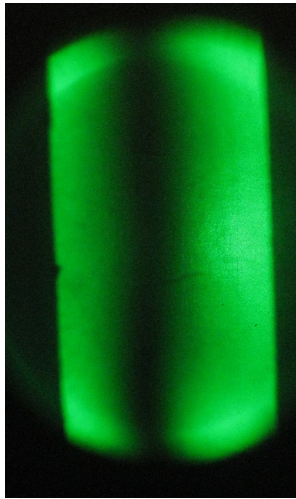
Hängen Sie nun das 2 kg-Gewicht an den Plexiglaswinkel und fotografieren Sie das Schirmbild. Der senkrechte Schenkel stellt den gebogenen Stab nach Abbildung (7) dar. Wenn Sie die neutrale Faser nicht erkennen können, haben Sie einen Fehler beim Aufbau gemacht. Anschließend bringen Sie den Bereich des Knicks in die Objektebene. Fotografieren Sie zur Dokumentation. Beispielaufnahmen zeigen die Abbildungen (13) und (14).

Vergleichen Sie das Muster im Knickbereich der Winkel mit und ohne Bohrung bei gleicher Belastung.

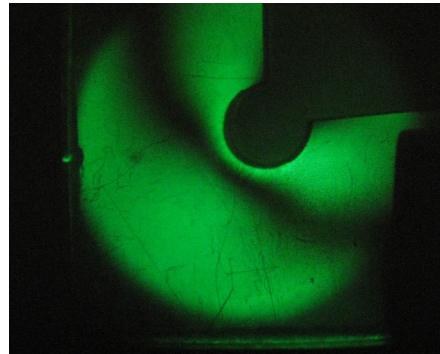
Der Abstand zwischen dunklen und hellen Bereichen ist ein Maß für den Gradienten der Spannung. Er sollte beim Winkel mit Bohrung geringer sein als bei demjenigen ohne. Wechselt die Spannung in einem Material über kurze Distanzen, so können leichter Brüche entstehen, als wenn dies über größere Abstände geschieht. Tatsächlich sind in der Geschichte des Praktikums fast immer nur die

Plexiglaswinkel ohne Bohrung im Knick gebrochen.

Beschreiben Sie Ihre Beobachtungen.



*Abbildung 13: Neutrale
Faser im Schenkel
(Beispielaufnahme)*



*Abbildung 14: Knickbereich
(Beispielaufnahme)*