UNIVERSITÄT REGENSBURG

Naturwissenschaftliche Fakultät II - **Physik**

Anleitung zum Anfängerpraktikum B

Versuch „*pl*“: Polarisation des Lichts

7. Auflage 2025

Dr. Stephan Giglberger
Prof. Dr. Joe Zweck
Marten Scheuck
David Cyba

Inhaltsverzeichnis

pl Polarisation des Lichts

pl.1 Lernziele

Besitzt der Feldvektor $\vec{E}$ einer elektromagnetischen Welle eine wohldefinierte Richtung gegenüber dem Wellenvektor $\vec{k}$, so spricht man von *polarisierten* Wellen. Dieser Polarisationszustand des Lichtes ist jedoch eine Eigenschaft, die vom menschlichen Auge nicht wahrgenommen werden kann.

Mit Hilfe dieser Versuche sollen Sie Erzeugung, Nachweis und Eigenschaften von polarisiertem Licht kennen lernen.
Der Student soll

- die mathematische Beschreibung elektromagnetischer Wellen und die daraus entstehenden Polarisationszustände beherrschen
- den Effekt der Doppelbrechung in anisotropen Kristallen und Gegenständen nachvollziehen und untersuchen können
- den Umgang mit Polarisationsfiltern und die Polarisationseigenschaften von Alltagsgegenständen kennenlernen
- die Funktion von $\lambda/2$- und $\lambda/4$-Plättchen zur Erzeugung und Analyse verschiedener Polarisationszustände verstehen und anwenden können

pl.2 Vorbereitung

Durch das nachfolgende Kapitel und die angegebene Literatur sollen Ihre theoretischen Vorkenntnisse aufgefrischt und erweitert werden. Bei den Experimenten können Sie anschließend Ihre Kenntnisse vertiefen. Folgende Begriffe sollten zunächst jedoch klar sein:

- Longitudinal- und Transversalwellen [3]
- Maxwellsche Gleichungen in Materie [1, 3]
- Linear, zirkular und elliptisch polarisiertes Licht [1, 2, 4]

- Gesetz von Malus [1, 2, 5]
- Doppelbrechung [2, 3, 5]
- $\lambda/2$- und $\lambda/4$-Plättchen [1, 2, 4]
- optische Aktivität [3, 5, 6]

pl.2.1 Literatur

Fachliteratur

[1] D. Kühlke: Optik, Grundlagen und Anwendungen, 17 UH 5000 K95(2)

[2] F. S. Crawford, jr.: Berkeley Physik Kurs 3 S. 225 ff., UC 162 B512

[3] Bergmann/ Schaefer: Optics of Waves and Particles, Band 3, S. 439 ff., 84 UC 143 B499 E4-3

[4] R. W. Pohl: Optik und Atomphysik S. 114 ff., 84 UC 127 P748-3(12)

[5] W. Zinth/ U. Zinth: Optik, Lichtstrahlen-Wellen-Photonen S. 218 ff., 84 UH 5000 Z78

[6] Kohlrausch: Praktische Physik I S. 574 ff., 84 UC 100 K79 (22)-1

Internetquellen

[7] LibreTexts Physics: Polarization

[8] The Feynman Lectures: Polarization

pl.2.2 Elektromagnetische Wellen

Die Eigenschaften elektromagnetischer Wellen sind Folgerungen aus den **Maxwellschen Gleichungen**. Die Maxwellschen Gleichungen lauten im Fall ladungs- und stromfreier Materialien:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \qquad (pl.1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \qquad (pl.2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \qquad (pl.3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad (pl.4)$$

Durch Umformung erhält man die Wellengleichungen für elektromagnetische Wellen:

$$\Delta \vec{E} - \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \qquad (pl.5)$$

$$\Delta \vec{B} - \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0 \qquad (pl.6)$$

Dabei ist $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$ die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und die Brechzahl. Partikulare Lösungen der Wellengleichungen (*pl*.5) und (*pl*.6) sind ebene Wellen. Für das elektrische und magnetische Feld einer ebenen, harmonischen Welle, die sich in z-Richtung ausbreitet gilt:

$$\vec{E}(z,t) = \vec{E}_0 \cos(\omega t - kz + \varphi_0) \qquad (pl.7)$$

$$\vec{B}(z,t) = \vec{B}_0 \cos(\omega t - kz + \varphi_0) \qquad (pl.8)$$

$\vec{E}_0$ und $\vec{B}_0$ sind die Amplituden des elektrischen und magnetischen Feldes (sie stehen senkrecht auf der z-Richtung). $\omega = 2\pi f$ ist die Kreisfrequenz, $k = 2\pi/\lambda$ die Wellenzahl (mit $k = \frac{\omega}{c}$)und φ_0 die Anfangsphase der Welle.

Um die Wellenausbreitung in eine beliebige Richtung zu beschreiben, ordnet man der Wellenzahl einen Vektor $\vec{k}$ zu, dessen Richtung die Ausbreitungsrichtung ist. Den Raumpunkt, in dem die Phase betrachtet wird, gibt man durch seinen Ortsvektor $\vec{r}$ an.
Die Wellenflächen, die durch $\vec{k}\vec{r} = const.$ festgelegt sind, sind also Ebenen, die senkrecht auf dem Wellenvektor $\vec{k}$ stehen. Elektromagentische Wellen sind daher Transversalwellen, die keine Symmetrie um die Fortpflanzungsrichtung aufweisen.

pl.2.3 Polarisationszustände des Lichts

Für optisch isotrope Medien gilt, dass das elektrische Feld $\vec{E}$ senkrecht zum Wellenvektor $\vec{k}$ steht. Somit wird eine Ebene festgelegt, in der das $\vec{E}$- Feld schwingen kann. Um diese Schwingung beschreiben zu können zerlegt man das elektrische Feld (*pl*.7) in die x- und y-Komponente und erhält einen Vektor. Da dieser Vektor in z-Richtung zeigt, kann man eine beliebige ebene Welle schreiben als:

$$\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_y \tag{\textit{pl}.9}$$

mit

$$\vec{E}_x = E_{x0} \cos(\omega t - kz) \tag{\textit{pl}.10}$$

$$\vec{E}_y = E_{y0} \cos(\omega t - kz + \Psi) \tag{\textit{pl}.11}$$

$\vec{E}_x$ und $\vec{E}_y$ sind die Komponenten der Amplitude der elektrischen Feldstärke. Ψ ist die Phasendifferenz zwischen den beiden Komponenten.

1. **linear polarisiertes Licht**
   Man bezeichnet Licht als linear polarisiert, wenn die Schwingungsebene, also die Richtung des elektrischen Feldvektors, raumfest ist. Dies ist nach den Gleichungen (*pl*.10) und (*pl*.11) dann der Fall, wenn die Phasendifferenz zwischen beiden Komponenten $\Psi = 0$ oder $\Psi = \pi$ beträgt. Die Überlagerung zweier linear polarisierter Wellen mit senkrecht zueinander stehenden Schwingungsebenen, deren Phasendifferenz ein ganzzahliges Vielfaches von π beträgt, ergibt wieder eine linear polarisierte Welle.
   Jede Welle kann man sich aus der Überlagerung zweier beliebiger, linear polarisierter Wellen unterschiedlicher Phase entstanden denken.

2. **zirkular polarisiertes Licht**
   Man erhält zirkular polarisiertes Licht, wenn beide Komponenten die gleiche Amplitude $E_0 = E_{x0} = E_{y0}$ haben und die Phasendifferenz $\Psi = \pm\pi/2$ beträgt. Für $\Psi = +\pi/2$ erhält man rechtszirkular polarisiertes Licht (σ^+), da sich der $\vec{E}$- Feldvektor bei Beobachtung an einem festen Ort (z.B. $z = 0$) in Fortpflanzungsrichtung im Uhrzeigersinn dreht. Ist $\Psi = -\pi/2$, so bildet das elektrische Feld eine Linksschraube. Eine solche Welle bezeichnet man als linkszirkular polarisiert (σ^-).
   Hinweis: Die Definitionen für links- und rechtszirkular polarisiert werden in der Literatur nicht einheitlich verwendet.

3. **elliptisch polarisiertes Licht**
   Sowohl linear als auch zirkular polarisiertes Licht sind Spezialfälle des elliptisch polarisierten Lichts, dessen resultierender elektrischer Feldvektor $\vec{E}$ sowohl rotiert als auch seinen Betrag ändert. Elliptisch polarisiertes Licht entsteht speziell, wenn die senkrecht zueinander schwingenden Komponenten des elektrischen Feldes bei einer Phasendifferenz $\Psi = \pm\pi/2$ unterschiedliche Amplituden E_{x0} und E_{y0} haben oder wenn bei gleichen Amplituden die Phasendifferenz $0 < \Psi < \pi/2$ beträgt.

pl.2.4 Erzeugung von polarisiertem Licht

Natürliches Licht, auch z.B. das einer Spektrallinie, ist unpolarisiert. Im Elementarprozess wird das Licht zwar als Photon erzeugt, das einen Drehimpuls von $\pm h/2\pi$ besitzt, für sehr viele Photonen misst man aber die statistische Verteilung über alle Phasen, bekommt also unpolarisiertes Licht. Aus dem gleichen Grund ist dieses Licht auch inkohärent.

Im optischen Bereich kann man Polarisation durch Wechselwirkung mit Materie erhalten. Dazu gibt es folgende Möglichkeiten: richtungsselektive Absorption (Dichroismus), Reflexion, Streuung, Doppelbrechung und optische Aktivität. Näheres finden Sie im Abschnitt *pl*.2.5.
Bei all diesen Methoden geht natürlich ein Teil der Lichtintensität I_0 verloren. Fällt linear polarisiertes Licht auf einen „idealen“ Polarisator, so gilt:

$$I(\theta) = I_0 \cos^2\theta \qquad (pl.12)$$

Dies ist das **Malus'sche Gesetz**. Dabei ist θ der Winkel zwischen der Durchlasspolarisationsrichtung des Polarisators und der Polarisationsebene des einfallenden Lichts. Fällt unpolarisiertes Licht auf den Polarisator so hat man über alle Winkel θ zu ermitteln:

$$\frac{I(\theta)}{I_0} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{1\pi} \cos^2(\theta)\,\mathrm{d}\theta = \frac{1}{2} \qquad (pl.13)$$

pl.2.5 Polarisationsabhängige Effekte

Beim Durchgang von Licht durch dielektrische Medien gibt es eine Reihe von Erscheinungen, die von der Polarisation abhängig sind bzw. diese verändern.
Im Abschnitt *pl*.2.3 wurde vorausgesetzt, dass die optischen Medien isotrop sind. Bei einer Reihe von optischen Medien ist das nicht der Fall, man nennt solche Medien dann optisch anisotrop. Beim Durchgang von polarisiertem Licht durch anisotrope Materie ändert sich i.a. sein Polarisationszustand. Wir beschränken uns hier auf **lineare Doppelbrechung**:

Kristalle können entweder optisch isotrop, ein- oder zweiachsig sein. Die optischen Achsen sind

durch gleiche Brechzahl für alle Polarisationsrichtungen gekennzeichnet. Wir beschränken uns im Folgenden auf optisch einachsige Kristalle: die wichtigsten Vertreter sind Kalkspat und Quarz. Ihre optischen Eigenschaften können durch die Angabe von zwei Brechzahlen vollständig beschrieben werden.
Fällt unpolarisiertes Licht auf die natürliche Fläche eines Kalkspatrhomboeders, so teilt sich das Strahlenbündel im Inneren des Kristalls in zwei Strahlen verschiedener Richtung auf. Dabei liegt das elektrische Feld des ordentlichen Strahls (o) senkrecht und das Feld des außerordentlichen Strahls (e) parallel zum Hauptschnitt des Kristalls. In Richtung der optischen Achse entfällt die Aufspaltung. Das Licht pflanzt sich im **Kalkspat-Kristall** entsprechend dem ordentlichen Brechungsindex $n_o = 1,658$ fort. Senkrecht zur optischen Achse breitet sich das Licht entsprechend des außerordentlichen Brechungsindex $n_e = 1,486$ aus. In allen anderen Richtungen liegt die Brechzahl zwischen diesen beiden Grenzfällen. Für $n_o > n_e$ bezeichnet man den Kristall als einachsig negativ (Kalkspat).

$\lambda/4$- und $\lambda/2$- Plättchen

$\lambda/4$- und $\lambda/2$- Plättchen beruhen ebenfalls auf dem Prinzip der Doppelbrechung. Die Phasendifferenz der Verzögerungsplatten wird durch den Laufzeitunterschied zwischen den aufgespaltenen Strahlen aufgrund der unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten erreicht. Für physikalische Zwecke verwendet man aus der Gruppe optisch zweiachsiger Kristalle oft Spaltstücke aus klarem Glimmer. Glimmerplättchen haben mechanisch ausgezeichnete Richtungen. Legt man die Platte auf eine Schreibunterlage und sticht mit einer Stecknadel ein Loch in die Platte so entsteht eine „Schlagfigur“ (siehe Abb. *pl*.1). Sie besteht aus einem sechsstrahligen Stern mit zwei langen Armen. Diese zeigen die β- Richtung an. Die auf ihr senkrechte Plattenrichtung ist die γ-Richtung. Die beiden bei der Doppelbrechung entstehenden Strahlen schwingen parallel zur β- Richtung (das im Kristall schnellere) und zur γ- Richtung (das im Kristall langsamere).

Abbildung *pl*.1: *Schlagfigur auf einem Glimmerblatt*

Nach dem Austritt aus der Platte besteht zwischen den beiden Strahlen ein Gangunterschied (d.h.

Differenz der optischen Weglängen):

$$\Delta = d\left(n_\gamma - n_\beta\right) \qquad (pl.14)$$

Durch die Wahl der Dicke d können definierte Gangunterschiede eingestellt werden. Die Brechungsindizes für Licht der Wellenlänge $\lambda = 589$ m betragen bei Glimmer $n_\gamma = 1,5993$ und $n_\beta = 1,5944$.

Optische Aktivität

Ein weiteres Phänomen, das bei optisch anisotropen Medien auftritt, ist die „optische Aktivität", die allerdings auf die Richtung der optischen Achse beschränkt ist. Die optische Aktivität tritt aber auch bei makroskopisch isotropen Medien, wie z.B. Flüssigkeiten auf. Durchstrahlt man ein optisch aktives, planparallel begrenztes Medium mit linear polarisiertem, monochromatischen Licht, so wird die Polarisationsebene gedreht. Unter optischer Aktivität versteht man also die Fähigkeit einer Verbindung, die Ebene linear polarisierten Lichts um einen bestimmten Winkel α zu drehen. Sie wird in der Praxis u.a. zur schnellen Bestimmung der Konzentration von Zuckerlösungen verwendet. Zur Messung der Drehung dienen sog. Polarimeter. Die spezifische Drehung $[\alpha]$ ist der auf eine bestimmte Konzentration c und Schichtdicke d bezogene Drehwert. $[\alpha]_D$ bedeutet, dass als monochromatische Lichtquelle die Na-D-Linie ($\lambda = 589,3$ nm) verwendet wurde, $[\alpha]^{20}$, dass die spezifische Drehung bei 20°C gemessen wurde.

$$\alpha = [\alpha] \cdot c \cdot d \qquad (pl.15)$$

Der Mittelwert der spezifischen Drehung von in Wasser gelöster Saccharose ($C_{12}H_{22}O_{11}$) ist $[\alpha]_D^{20} = +66,526°$ ml dm^{-1} g^{-1}.

pl.3 Fragen und Aufgaben zur Vorbereitung

1. Unter welchen Voraussetzungen sind die Maxwellschen Gleichungen (*pl*.1) bis (*pl*.4) gültig?
2. Unter welchen Bedingungen sind ebene Wellen Lösungen der Maxwellschen Gleichungen? (Randbedingungen angeben)
3. Zeigen Sie, dass elektromagnetische Wellen Transversalwellen sind.
4. Warum ist das natürliche Licht unpolarisiert?
5. Nennen Sie die möglichen Polarisationszustände von Licht. Wie kann man diese mathematisch darstellen?
6. Wie kann man einen Linearpolarisator von einer Verzögerungsplatte unterscheiden?
7. Welche Eigenschaften haben Linearpolarisator, $\lambda/2$ und $\lambda/4$-Plättchen? Erklären sie, welche Polarisationszustände man aus lin. pol. Licht mit einem $\lambda/2$ bzw. $\lambda/4$ Plättchen erzeugen kann. Welchen Einfluss hat dabei die optische Achse (Vorzugsrichtung) des Plättchens?
8. Wie dick muss ein $\lambda/2$ oder $\lambda/4$-Plättchen aus Glimmer sein, wenn die Wellenlänge des einfallenden Lichtes 589nm ist?
9. Wann nennt man optische Medien isotrop bzw. anisotrop? Geben sie jeweils zwei Beispiele an.
10. Auf ein $\lambda/4$- Plättchen aus Quarz fällt Licht einer Natriumlampe ($\lambda = 589$nm). Wie dick ist die Quarzplatte? Welche Frequenz und Wellenlänge haben ordentlicher und außerordentlicher Strahl innerhalb des Kristalls?
11. Die Durchlassrichtung von zwei hintereinander stehenden, idealen Polarisatoren sind um den Winkel $\alpha_1 = 30°$ gegeneinander verdreht. Auf die Anordnung fällt Licht, dessen Schwingungsrichtung den Winkel $\alpha_2 = 15°$ zur Durchlassrichtung des ersten Polarisators bildet. Wie groß ist der Transmissionsgrad dieser Anordnung?
12. Was versteht man unter optischer Aktivität?
13. (**Nicht LA nv**) Beschreiben Sie den Strahlengang und die Funktionsweise des Nicol'schen Prismas.
14. Was versteht man unter Spannungsdoppelbrechung?
15. Wie kann man Licht eines bestimmten Polarisationstyps erzeugen und nachweisen?

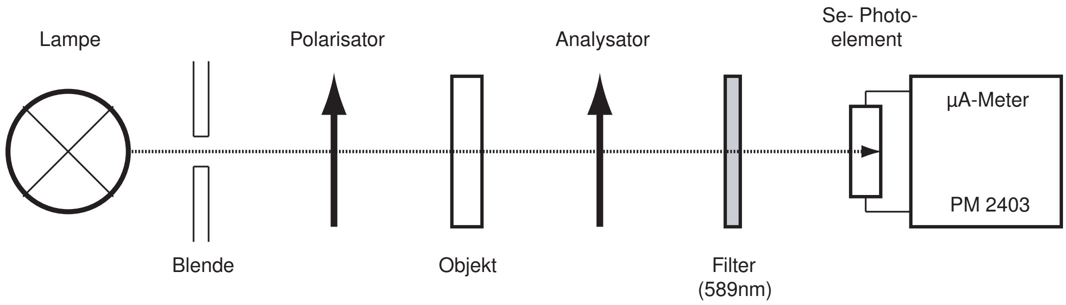

Abbildung *pl*.2: *Aufbau der Polarisationsmessungen*

pl.4 Durchführung

pl.4.1 Doppelbrechung

Legen Sie den Kalkspat-Kristall auf Millimeterpapier, auf das Sie zuvor ein farbiges Kreuz gezeichnet haben. Bestimmen Sie nun durch Drehen des Kristalls die Strahlverschiebung s. Fällt das Licht senkrecht auf die Oberfläche des Kristalls, so kann aus der Strahlverschiebung und der Kristalldicke d der Ablenkwinkel berechnet werden (siehe Abb. *pl*.3). Näheres zur korrekten Messung der Kristalldicke d finden Sie im *Anhang*.

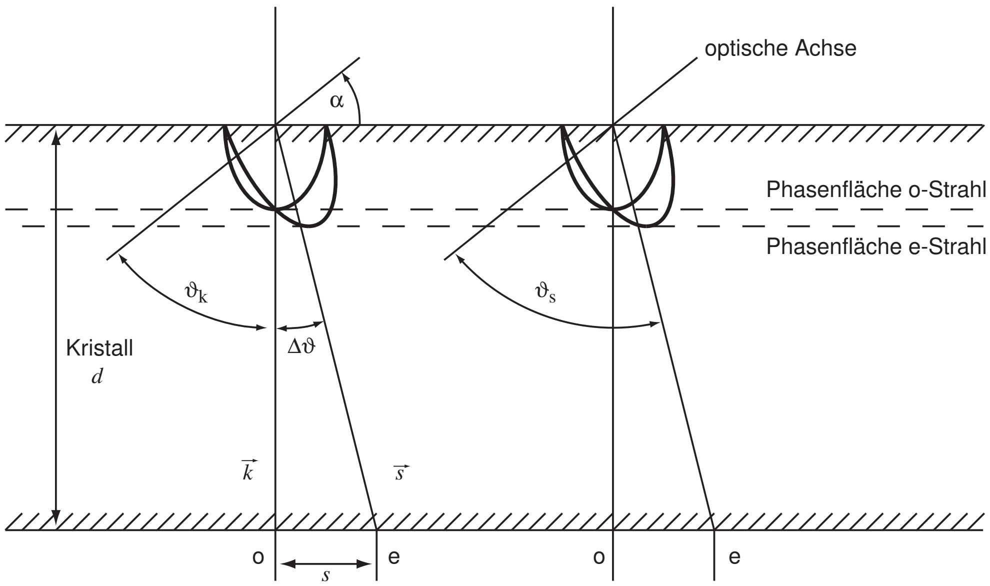

Abbildung *pl*.3: *ordentlicher und außerordentlicher Strahl im Kalkspat*

Die Formel zur Berechnung des Ablenkwinkels $\Delta\vartheta$ können Sie der Abb. *pl*.3 entnehmen. Vergleichen Sie die gemessene Strahlverschiebung s mit dem theoretischen Wert der Strahlverschiebung des

Kalkspats. Die Winkel ϑ_k und ϑ_s sind wie folgt verknüpft:

$$\frac{\tan \vartheta_s}{\tan \vartheta_k} = \frac{n_o^2}{n_e^2} \qquad (pl.16)$$

Die optische Achse tritt unter dem Winkel $\alpha = 45,39°$ aus der Kristalloberfläche aus. Setzen Sie ϑ_s aus Gleichung (*pl*.16) in ihre Gleichung für die Strahlverschiebung ein. Mit $\vartheta_k = 90° - \alpha$ können Sie den theoretischen Wert der Strahlverschiebung berechnen.

pl.4.2 Gesetz von Malus

Machen Sie sich zunächst mit dem Polarisator vertraut. Überprüfen Sie die Angabe der Durchlassrichtung (E-Vektor). Beobachten Sie die Polarisationseigenschaften von Gegenständen in ihrer Umgebung sowie der Atmosphäre und der Wolken und notieren Sie diese. Achten Sie auch auf Bildschirme oder Spiegelungen in Scheiben. Wie schwingt jeweils der E-Vektor des beobachteten Lichtes? Welche Anwendungsmöglichkeiten könnten Sie sich für ihre Entdeckungen vorstellen?

Für die Messungen stellen Sie einen Polarisator und einen Analysator mit Winkelmessvorrichtung in den Strahlengang (vgl Abb. *pl*.2). Machen Sie sich zunächst klar, wann deren Durchlassrichtungen parallel bzw. senkrecht zueinander stehen. Messen Sie nun die Winkelintensitätsverteilung von polarisiertem Licht, wobei Sie den Winkel zwischen Polarisator und Analysator kontinuierlich ändern. Überprüfen Sie das Gesetz von Malus durch eine geeignete graphische Darstellung ihrer Messwerte. Tragen Sie dann ihre Messwerte entweder analog in Polarkoordinatenpapier ein oder auch gerne digital mit einem Tool ihrer Wahl. Hier bietet sich z.B. eine Auswertung mit Matplotlib in Python, MATLAB oder Origin an. Was sagt die Graphik aus?

pl.4.3 $\lambda/4$-Plättchen

Stellen Sie nun ein $\lambda/4$-Plättchen zwischen den Polarisator und den Analysator in den Strahlengang. Orientieren Sie das Plättchen mit Hilfe der Polarisatoren.
Erzeugen Sie nun elliptisch polarisiertes Licht. Überlegen Sie sich wie das $\lambda/4$-Plättchen eingestellt werden muss! Messen Sie die Intensitätsverteilung wie unter *pl*.4.2 und tragen Sie ihre Messwerte in Polarkoordinatenpapier ein. Stellen Sie das $\lambda/4$-Plättchen nun so in den Strahlengang, dass es zirkular polarisiertes Licht erzeugt. Messen Sie erneut die Intensitätsverteilung wie unter *pl*.4.2 und tragen Sie ihre Messwerte in Polarkoordinatenpapier ein.

pl.4.4 $\lambda/2$-Plättchen

Tauschen Sie das $\lambda/4$-Plättchen durch ein $\lambda/2$-Plättchen aus und orientieren Sie dieses im Strahlengang. Drehen Sie es anschließend um 20° zur eingestellten Vorzugsrichtung. Messen Sie die Intensitätsverteilung und tragen Sie Ihre Messwerte in Polarkoordinatenpapier ein. Was schließen Sie aus dem Ergebnis?

pl.4.5 Selbstgebaute Verzögerungsplättchen

(Nicht LA nv) Wiederholen Sie die Aufgaben *pl*.4.3 und *pl*.4.4 mit „selbstgebauten“ Plättchen aus Glimmer. Erinnern Sie sich dabei an die Vorbereitungsaufgaben in *pl*.3 zurück.

pl.4.6 Beobachtungen

Betrachten Sie verschiedene transparente Medien unter gekreuzten Polarisatoren und schreiben Sie ihre Beobachtungen nieder. Was können Sie bei einem Linieal oder einer CD-Hülle aus Plastik feststellen? Bringen Sie ihre Beobachtungen mit Aufgabe 14 aus der Vorbereitung in Verbindung.

Anhang

Benutzung eines Messschiebers

Ein Messschieber ist ein Werkzeug zur präzisen Längenmessung, dessen Anwendung schon aus dem Anfängerpraktikum bekannt sein sollte. Nichtsdestotrotz wird hier kurz auf die korrekte Benutzung eingegangen.

Ein Messschieber besteht aus einem Stab mit festen Messschenkeln sowie einem beweglichen Schieber mit den jeweiligen Gegen-Messschenkeln. Für eine Längenmessung der Außenmaße eines Objekts wird dieses zwischen den beiden Außenmessschenkeln (1) platziert und anschließend der bewegliche Schieber mit wenig Kraft bis zum Widerstand zusammengeschoben. Dabei ist darauf zu achten, dass die Messschenkel möglichst eben an der Objektoberfläche anliegen, da sonst die Genauigkeit stark beeinflusst wird.

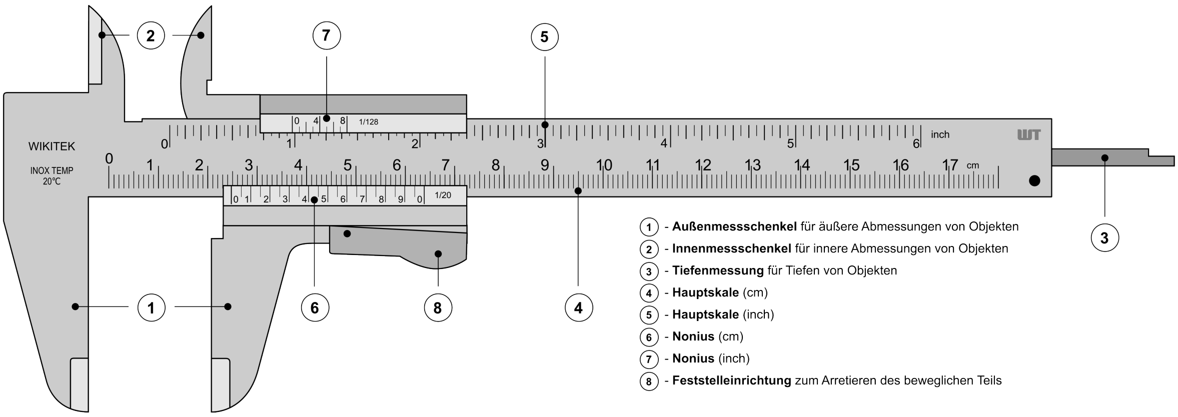

Abbildung *pl*.4: *Schematische Darstellung eines Messschiebers*

Am festen Stab des Messschiebers ist die Hauptskala (4) mit einer Einteilung in Zentimetern bzw. Millimetern angebracht. Am beweglichen Schieber befindet sich die Noniusskala (6) , welche uns die Zehntelmillimeter angibt.
Um nun den Wert der Messung zu bestimmen, lesen wir zuerst auf der Hauptskala den Millimeterwert ab, bei dem der Nonius die Stelle 0 zeigt. Hierbei ist es wichtig, gerade auf die Skala zu blicken, um Parallaxenfehler zu vermeiden. Um die Nachkommastellen zu bestimmen, betrachten Sie die Skala auf dem Nonius und suchen Sie einen Strich, der exakt mit einem der Striche auf der Hauptskala übereinstimmt. Diese Zahl bildet ihren Kommawert.

So erhalten wir in Abbildung *pl*.4 einen Millimeterwert von 24 mm, da sich die 0-Stelle des Nonius zwischen den 24 mm und 25 mm befindet. Bei genauer Betrachtung des Nonius sehen wir, dass der Strich der Stelle 7,5 nur mit genau einem der Striche auf der Hauptskala übereinstimmt. Somit beträgt der Kommawert $0,75$ mm. Unsere fertige Messung beträgt also 24 mm $+ 0,75$ mm $= 24,75$ mm.