

Eine überraschende Eigenschaft von Plexiglas

Elliptisch polarisiertes Licht sichtbar gemacht – optische Verzögerungsplatten von der Stange

W. B. Schneider

Zu einer der vielfältigen Aufgaben der Fachdidaktik Physik gehört es, neue Materialien für die Lehre zu erschließen. Hierzu sind in den letzten Jahren viele interessante Vorschläge gemacht worden, die aber, da sie meistens nur in Lehrerzeitschriften veröffentlicht worden sind, wenig Akzeptanz in der Physikergemeinde gefunden haben. Im folgenden soll daher an einem Beispiel an diese Fundgrube erinnert werden, und zwar wird ein Demonstrationsexperiment aus der Optik vorgestellt, bei dem Plexiglas eine entscheidende Rolle spielt. Viele Eigenschaften von Plexiglas sind wohlbekannt. Daneben gibt es zwei weniger beachtete, überraschende Eigenschaften: Plexiglas¹⁾ ist schwach linear doppelbrechend, und es streut Licht, was bei Verwendung eines intensiven Laserstrahls gut zu beobachten ist. Beide Eigenschaften zusammen gestatten die eindrucksvolle, direkte Demonstration von elliptisch polarisiertem Licht in einem Medium und die einfache Herstellung von „zero order“-Verzögerungsplatten mit gewünschter Verzögerung für eine vorgegebene Wellenlänge.

Elliptisch polarisiertes Licht in einem Medium sichtbar gemacht

Schickt man einen Laserstrahl durch einen Körper aus handelsüblichem Plexiglas mit polierten Außenflächen, so wird der Verlauf des Laserstrahls im Plexiglas aufgrund der Lichtstreuung an kleinsten Inhomogenitäten sichtbar (Abb. 1). Aufgrund der hohen Energiedichte im Laserstrahl ist das Streulicht so

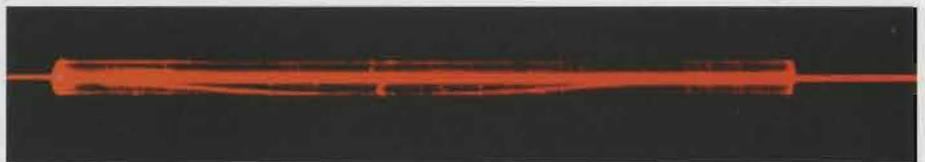


Abb. 1: Laserstrahl in einem Plexiglasrundstab ($d \approx 10$ mm) mit polierten Außenflächen. Der Laserstrahl verläuft von links nach rechts. Außerhalb des Stabs wird der Strahl durch Streuung an Rauch, innerhalb durch Streuung an kleinsten Inhomogenitäten des Materials sichtbar.

intensiv, daß es in einem dunklen Raum auch von einer größeren Zuschauerzahl beobachtet werden kann [2]. Verwendet man linear polarisiertes Laserlicht, so ist das Streulicht am besten sichtbar, wenn Polarisations- und Beobachtungsrichtung senkrecht zueinander stehen. Bei fester Beobachtungsrichtung ist damit die Strahlungsleistung des Streulichts ein Maß für die jeweils senkrecht zur Beobachtungsrichtung stehende Komponente des E -Feldes.

Die handelsüblichen Rund- und Vierkantstäbe aus Plexiglas haben ferner die Eigenschaft, schwach doppelbrechend zu sein. Die optische Achse liegt dabei in einer senkrecht zur Längsachse verlaufenden Schnittfläche. Diese Anisotropie ist nach Auskunft der Firma Röhm nicht zufällig, sondern herstellungsbedingt. Die Rund- und Vierkantstäbe (Typ GS) werden aus kammergegossenen Plexiglasplatten parallel zu einer Plattenlängskante herausgeschnitten und entsprechend bearbeitet.

Die Anisotropie entsteht durch den in der Kammer ablaufenden Polymerisationsprozeß. Die Polymerisation des Methyl-

methacrylats, dem Ausgangsmaterial für Plexiglas, ist mit einer Volumenabnahme verbunden, die zu einer Dichtezunahme von ursprünglich ca. 1 g/cm^3 auf ca. $1,2 \text{ g/cm}^3$ führt. Die Volumenabnahme kann in der Kammer nur über eine Dickenänderung erfolgen und bedingt das optisch einachsige Verhalten (einachsig positiv) mit der optischen Achse parallel zur Flächennormale.

Bei einem senkrecht zur Längsachse geschnittenen Rundstab findet man die optisch ausgezeichneten Achsen, indem man ihn in Längsrichtung mit linear polarisiertem Laserlicht durchstrahlt, senkrecht zur Polarisationsrichtung und Stablängsachse beobachtet und den Stab solange um seine Längsachse dreht, bis im Plexiglas ein durchgehend gleich heller Streulichtstrahl zu beobachten ist (Abb. 1). In diesem Fall ist die Polarisationsrichtung parallel zu einer der Achsen gerichtet. Dreht man den Stab um 45° weiter, so wird das Laserlicht in zwei, zur Haupt- bzw. Nebenachse parallel schwingende Anteile gleicher Amplitude zerlegt, was zu der in Abb. 2 unten gezeigten Streulichterscheinung führt.

Dreht man die Beobachtungsrichtung um 90° , so erhält man Abb. 2 oben (ein entsprechend aufgestellter Spiegel ermöglicht die gleichzeitige Aufzeichnung beider Streulichterscheinungen). In beiden Fällen ergeben sich breite, helle und schmale, dunkle Bereiche, die das Auftreten bzw. das Verschwinden des senkrecht zur Beobachtungsrichtung polarisierten Streulichts andeuten.

Prof. Dr. Werner B. Schneider, Physikalisches Institut – Didaktik der Physik Erlangen, Staudtstr. 7, 91058 Erlangen, e-mail: werner.schneider@physik.uni-erlangen.de

¹⁾ Wir beziehen uns auf Acrylglas der Firma Röhm, Darmstadt (Typ GS 222 oder GS 233) und verwenden im folgenden den Handelsnamen Plexiglas.

Aufgrund der Doppelbrechung erfahren die zur Haupt- bzw. Nebenachse parallel schwingenden Wellen eine mit dem Weg d im Plexiglas linear anwachsende Phasenverschiebung [1].

$$\delta = 2\pi d(n_1 - n_2)/\lambda \quad (1)$$

(n_1, n_2 : Hauptbrechzahlen; λ : Vakuumwellenlänge des Laserlichts). Die Phasenverschiebung δ führt dazu, daß bei der Überlagerung der zueinander senkrecht schwingenden Anteile längs der Stabachse eine für δ charakteristische Schwingungsellipse auftritt (Abb. 3). Die Intensität des Streulichts läßt einen Rückschluß auf die Schwingungsamplituden der Komponenten des E -Feldes zu, die den Ellipsenachsen zugeordnet sind.

Mit der beschriebenen Anordnung ist es somit im optischen Fall möglich, die Überlagerung von senkrecht zueinander schwingenden Wellen gleicher Frequenz für kontinuierlich anwachsende Phasenverschiebung einfach zu demonstrieren.

In einer anderen Sichtweise kann dieses Experiment auch als Interferenz im polarisierten Licht gedeutet werden: Die Komponenten des einfallenden polarisierten Lichts, parallel und senkrecht zur optischen Achse, erfahren eine Phasenverschiebung, die über die Weglänge im Plexiglas gegeben ist. Interferenz ist jedoch nur zwischen den Komponenten der beiden Teilstrahlen möglich, deren E -Vektoren parallel ausgerichtet sind. Die Aufgabe des Analysators, diese interferenzfähigen Anteile herauszufiltern, wird im vorliegenden Fall von der Streuverteilung der Rayleigh-Streuung erfüllt. Sie entspricht der Abstrahlcharakteristik eines schwingenden Dipols (d. h. in Schwingungsrichtung wird kein Licht abgestrahlt, senkrecht dazu ist die Intensität maximal) und ist daher mit der „Filterkurve“ eines Analysators vergleichbar.

Bestimmung des Brechzahlunterschieds $n_1 - n_2$

Wie in Abb. 3 gezeigt ist, entspricht einem Knotenabstand in Abb. 2 eine Phasenverschiebung um 2π . Mit der vorgegebenen Laserwellenlänge und der gemessenen Plattendicke d_λ (Weglänge im doppelbrechenden Material, nach der die Phasenverschiebung 2π beträgt) kann man über Gleichung (1) den Unterschied der Hauptbrechzahlen Δn bestimmen. Für die in Abb. 2 gezeigte Probe erhielten wir $d_\lambda = 34$ mm und damit $\Delta n = 1,86 \cdot 10^{-5}$ (für $\lambda = 632,8$ nm). Dieser Wert ist innerhalb eines Stabs konstant, kann aber von einer Probe zur anderen etwas schwanken (von ca. $1 \cdot 10^{-5}$ bis $3 \cdot 10^{-5}$). Für Kalkspat gilt zum Vergleich $\Delta n = 0,172$ (für $\lambda = 589$ nm), was zu dem relativ kleinen Wert $d_\lambda = 3,42 \cdot 10^{-3}$ mm führt. Mit Kalkspat oder



Abb. 2, untere Hälfte: Laserstrahl in einem Plexiglasrundstab ($d \approx 10$ mm, wie in Abb. 1) mit polierten Außenflächen für folgende Bedingungen: Der Laserstrahl tritt von links in den Stab senkrecht zur Schnittfläche ein und verläuft parallel zur Längsachse des Stabs; die Schwingungsebene des Lichts liegt parallel zur Bildebene; die optische Achse des Stabs ist dazu um 45° geneigt; beobachtet wird senkrecht zur Schwingungsebene des Lichts und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung; Lichtquelle: He-Ne-Laser mit $P = 2,0$ mW und $\lambda = 632,8$ nm; gemessener Knotenabstand: $d_\lambda = 34$ mm. Im Außenraum wurde kein Rauch mehr verwendet. Obere Hälfte: gleiche Bedingungen mit der Ausnahme, daß jetzt parallel zur Schwingungsebene des Laserlichts beobachtet wird. Zur gleichzeitigen Registrierung wurde die Beobachtungsrichtung mit einem Spiegel um ca. 90° entsprechend gedreht.

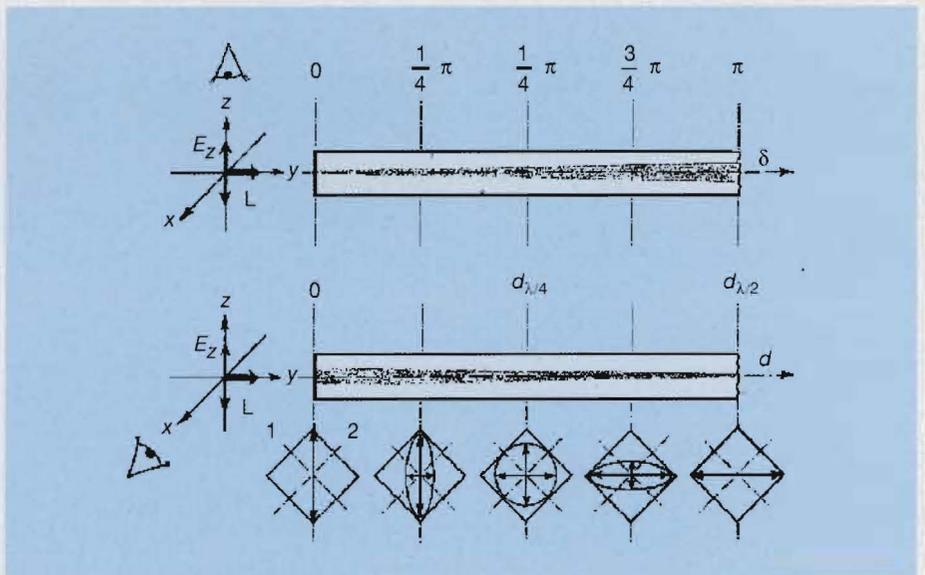


Abb. 3: Schema zur Deutung der in Abb. 2 gezeigten Streulichterscheinungen; die Anregungs- und Beobachtungsbedingungen sind wie in Abb. 2 gewählt. Der untere Teil zeigt – in die Zeichenebene gedreht – die jeweilige Schwingungsellipse für einige charakteristische Phasenverschiebungen δ bzw. Plattendicken d (zur Berechnung der Lage der Ellipsenachsen und des Achsenverhältnisses siehe [1], S. 21–25). Die Fortsetzung der Darstellung für $\pi \leq \delta \leq 2\pi$ erhält man durch Spiegelung an der Senkrechten durch $\delta = \pi$. Mit 1 und 2 sind die optisch ausgezeichneten Achsen bezeichnet. Da im Experiment nicht zwischen beiden Achsen unterschieden werden konnte, fehlt die Angabe des Umlaufsinn auf der Ellipse. Die Intensität des Streulichts wird durch die Länge der jeweiligen Ellipsenachsen bestimmt. Die transversale Ausdehnung des Streulichts wird grob durch die Punktierung angedeutet; L : Laserstrahl; E_z : z -Komponente des E -Feldes des eintretenden Laserlichts.

ähnlichen Kristallen ist die beschriebene Demonstration aufgrund des kleinen d_λ -Werts nicht möglich. Damit wird deutlich, daß gerade die sehr geringe Doppelbrechung beim Plexiglas das Anwachsen der Phasenverschiebung um z. B. π auf einer Strecke von einigen Zentimetern bewirkt und damit den Schauversuch ermöglicht.

Optische Verzögerungsplatten und weitere Anwendungen

Gleichung (1) und die Abbildungen 2 und 3 legen es nahe, durch einfaches Absägen von Plexiglasstücken entsprechender Länge, Verzögerungsplatten mit einer jeweils ge-

wünschten Phasenverschiebung herzustellen. Besonders interessant sind die in der Polarisationsoptik häufig benötigten Halb- und Viertelwellenplatten [1]. Besonders hervorzuheben ist, daß es sich hier um sogenannte „zero order“ Platten handelt, bei denen nur einmal die gewünschte Phasenverschiebung auftritt. Platten dieser Art lassen einen großen Öffnungswinkel des einfallenden Lichtstrahls zu.

Nach dem Heraussägen der Platten müssen die Schnittflächen noch geschliffen und poliert werden. An die Planheit der Endflächen wird wegen der relativ großen Plattendicke d von einigen Zentimetern bei der Herstellung der Verzögerungsplatten keine hohe Anforderung

derung gestellt. Ferner spielt sie bei der Verwendung eines nur schwach aufgeweiteten Laserstrahls keine entscheidende Rolle. Es reicht ein rechtwinkliges Absägen, ein einfaches Schleifen (steigende Körnungszahl, zum Schluß empfiehlt sich die Verwendung von Ölschleifpapier) und die abschließende Politur mit einer Spezialpaste der Firma Röhm. Fräst man die Endflächen, so erübrigt sich meistens das Schleifen. In Abb. 4 sind zwei Viertel- und eine Halbwellenplatte gezeigt, wie man sie sich selbst aus Plexiglasstäben herstellen kann.

Die Wirkung dieser Verzögerungsplatten läßt sich am einfachsten auf einem Overheadprojektor vorführen, indem man mit einem großflächigen Polarisator das Licht des Projektors polarisiert, durch die Platten schickt und mit einem darüber gehaltenen Analysator die Wirkung der Verzögerungsplatten bei verschiedener Orientierung, sowohl der Platten als auch des Analysators, demonstriert.

Es bieten sich noch weitere Anwendungen an: Die Demonstration der Wellenlängenabhängigkeit des Knotenabstands nach Gleichung (1) ist möglich, wenn man zwei Laserstrahlen mit unterschiedlicher Wellenlänge durch den gleichen Plexiglasstab schickt. Für einen Ar^+ -Laser mit $\lambda = 514,5 \text{ nm}$ erwartet man z. B. für den Plexiglasstab in Abb. 2 nach Gleichung (1) eine Plattendicke von $d_\lambda = 2,77 \text{ cm}$ gegenüber einem Wert von $3,40 \text{ cm}$ für den He-Ne-Laser, so daß der Unterschied leicht zu beobachten und auszumessen ist.

Den Grad der Doppelbrechung im Plexiglasstab kann man durch eine Druckspannung auf die Außenwand senkrecht zur Längsachse beeinflussen. Es genügt z. B., den Stab in eine Schraubzwinde einzuspannen, um eine örtliche Änderung von Δn zu erreichen. Im Streulicht ist durch das lokale Anwachsen des Drucks ein Wandern der Knoten nach der Druckstelle zu beobachten. Mit dem beschriebenen Verfahren ist damit eine weitere Möglichkeit gegeben, die Spannungsdoppelbrechung einfach nachzuweisen.

Abb. 4: Selbst hergestellte Verzögerungsplatten (eine Halb- und zwei Viertelwellenplatten; Material: Plexiglasvierkantstab mit der Querschnittsfläche $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$).

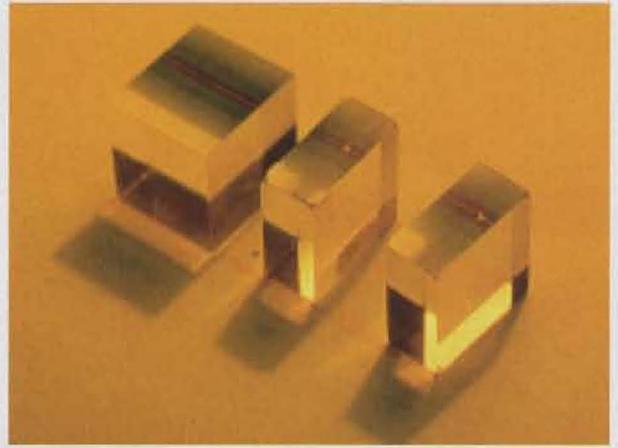
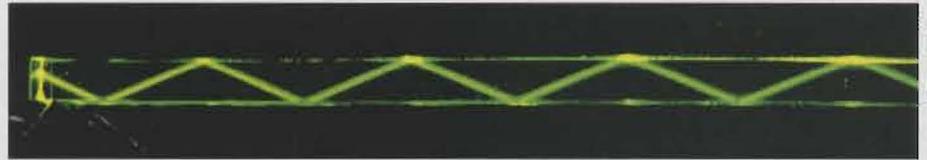


Abb. 5: Demonstration des Lichtleitereffekts in einem Plexiglasvierkantstab mit der Abmessung $10 \times 10 \times 150 \text{ mm}$ im Fall eines Ar^+ -Lasers.



Der Streueffekt von Laserlicht im Plexiglas ermöglicht es, den Strahlverlauf in einem Medium sichtbar zu machen und kann z. B. unhandliche Versuche zur Lichtstreuung in getrübbten Flüssigkeiten ersetzen. So läßt sich das Verhalten von Licht an Grenzflächen besonders eindrucksvoll anhand des „Lichtleitereffekts“ in einem Vierkantstab demonstrieren (Abb. 5).

Anmerkungen

Aufgrund der sehr guten optischen Eigenschaften von Plexiglas lassen sich die Verzögerungsplatten auch im Forschungsbereich einsetzen. Werden in einem Experiment Verzögerungen benötigt, die von den handelsüblichen Werten abweichen, können diese über die Dicke der Plexiglasscheiben individuell eingestellt werden.

In der Lehre kann man dieses Experiment je nach angestrebtem Lernziel unterschiedlich einsetzen. Der größte Lernerfolg ergibt sich nach unserer Erfahrung dann, wenn man die

Studenten in eine Art Forschungssituation versetzt, indem man nur die Beobachtung der geschilderten Erscheinungen anregt, zu den Eigenschaften des Materials zunächst keine weiteren Informationen gibt und die Sammlung von Informationen den Studenten überläßt. Die von dem Experiment ausgehende Motivation zur Deutung der Beobachtungen, die intensive Eigenätigkeit zusammen mit der Selbsterstellung der Verzögerungsplatten und die Suche nach weiteren Anwendungen bewirken Lernprozesse, durch die das sonst schwierige Gebiet der Polarisationsoptik leichter zugänglich wird.

Literatur

- [1] *M. Born*, Optik, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Nachdruck 1972.
- [2] *W. B. Schneider*, Physik und Didaktik **4**, 325 (1980)