

Polarisation auf dem Schreibtisch

Eine Unterrichtsidee von Matthias Hauck

Die im Folgenden dargestellten Unterrichtsmaterialien wurden zur Einbindung des Artikels „Polarisation auf dem Schreibtisch“ aus der Zeitschrift „Physik in unserer Zeit“ [Tillmanns und Blachowicz (2010)] entwickelt. Sie können in der Einheit „elektromagnetische Wellen“ respektive der Wellenoptik in der Kursstufe eingesetzt werden. Die entsprechenden Materialien wurden im Unterricht bereits erfolgreich verwendet. Sie erheben keinen Anspruch darauf, das komplexe Thema der Polarisation in seiner Gesamtheit zu erfassen und sollen lediglich Anregungen bieten. Es werden hauptsächlich Hintergrundinformationen zur Polarisation gegeben und gezeigt, wie man die Vielfalt dieses Themas durch geeignete Experimente im Unterricht ein wenig ausleuchten kann.

Darüber hinaus bietet sich hier die Möglichkeit der Interaktion mit dem Fach Chemie. Chemiker verwenden in speziellen Analyseverfahren die Eigenschaft optisch aktiver Stoffe die Polarisationsrichtung von hindurchtretendem Licht zu drehen. Entsprechende Beispiele sind Rohrzucker oder Quarz. Man unterscheidet hierbei zwischen rechtsdrehenden und linksdrehenden Substanzen. Im ersten Fall wird die Schwingungsrichtung im Uhrzeigersinn gedreht, im zweiten gerade umgekehrt.

Fachgebiet	Physik
Bezug zu	Chemie, Naturwissenschaft und Technik (NwT)
Thema	Elektromagnetische Wellen, Optik
Stichwort	schiefer Wurf, senkrechter Wurf, waagrecht Wurf, Flugbahn, Superposition von Bewegungen
Klassenstufe	Kursstufe
Zeit	3-4 Stunden

Hintergrundinformationen

1. Einführung

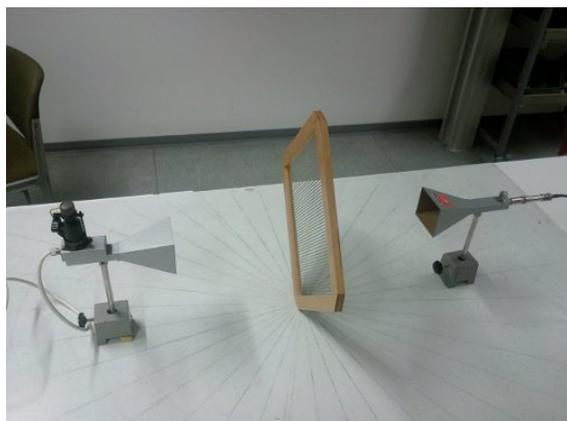
Polarisierte elektromagnetische Wellen und somit im Besonderen polarisiertes Licht sind ein faszinierendes Thema im Physikunterricht der gymnasialen Kursstufe, dessen vielfältige Anwendungen großen Raum für Experimente bieten. So werden beispielsweise in der Fotografie Polfilter verwendet, um störende Spiegelungen zu vermeiden oder das Himmelsblau abzuschwächen und die Wolken stärker herausgearbeitet werden können. Auch nehmen Bienen und andere Insekten polarisiertes Licht wahr, wodurch sie selbst bei bewölktem Himmel den Sonnenstand zur Orientierung bestimmen können. Als Alltagsbeispiel dienen im Unterricht Sonnenbrillen zur Demonstration. Reflektiertes Licht, wie zum Beispiel von einer Wasserfläche oder Glasscheibe, ist in der Regel polarisiert. Daher bestehen die Gläser der Brillen meist aus polarisierendem Material und schützen somit besonders gut vor grellem Licht. Dies lässt sich im Unterricht demonstrieren, indem entsprechende Brillengläser in einem polarisiertem Lichtstrahl um 360° gedreht werden. Dabei sollten sich je zwei Helligkeitsmaxima beziehungsweise -minima ergeben. Das Phänomen der Polarisation wurde 1808 von Étienne Louis Malus an einem Doppelspalt

beobachtet und fand durch Augustin Jean Fresnel 1820 eine vollständige theoretische Beschreibung [Hoppe (1967)]. Polarisiertes Licht kann nicht durch Partikel oder longitudinale Wellen erklärt werden, weswegen Newtons reine Korpuskulartheorie endgültig verworfen werden muss [Simanyi (1990)]. Somit ist es folgerichtig, an dieser Stelle in der Kursstufe Licht zunächst als elektromagnetische Welle zu beschreiben, deren elektrische und magnetische Feldvektoren senkrecht zueinander stehen. Dies kann mit Hilfe einiger Internetapplets¹ sehr anschaulich gezeigt werden.

Polarisiertes Licht lässt sich auf diverse Arten erzeugen. Diese werden nun im Folgenden betrachtet und es werden entsprechende Demonstrationsexperimente vorgestellt. Hierbei beschränken wir uns auf linear polarisiertes Licht. Dies sollte für Schülerinnen und Schüler der gymnasialen Kursstufe erfahrungsgemäß ausreichend sein.

2. Polarisation durch Polarisationsfilter

Polarisierte Lichtwellen können am einfachsten mit Hilfe von Polarisationsfiltern (kurz Polfilter) erzeugt werden. Diese sind aus Material gefertigt, das aus relativ langen, parallel angeordneten Molekülketten besteht. Ihre Atome schwingen somit lediglich in einer Richtung, wodurch es zur Polarisation hindurchtretender elektromagnetischer Wellen kommt. Zur Sicherstellung der Leitfähigkeit werden die Molekülketten meist mit einer Jodschiicht überzogen.



Diesen Effekt kann man zunächst recht elegant mit Hilfe von Mikrowellen demonstrieren. Bei Mikrowellen schwingt, bedingt durch ihre Erzeugung, der E-Feldvektor immer in derselben Richtung. Als Polarisationsfilter dient, wie in der nebenstehenden Abbildung² gezeigt, ein Gitter aus Metallstäben. Dreht man diese senkrecht zur Ausrichtung des Schwingquarzes, so kommen die Mikrowellen ungehindert hindurch. Befinden sich die Stäbe jedoch parallel zum Schwingquarz, so erhält der Mikrowellenempfänger offenbar kein Signal

mehr. Neben seiner großen Anschaulichkeit in Bezug auf Polarisationsfilter, zeigt dieser Versuch, dass die Polarisation eine allgemeine Eigenschaft elektromagnetischer Wellen darstellt und nicht auf Licht beschränkt ist. Die Erfahrung hat jedoch gezeigt, dass Schüler dieses Experiment oft so interpretieren, als „schlucken“ die Stäbe die Mikrowellen oder bilden für sie ein unüberwindliches Gitter. Dies ist jedoch nicht der Fall. Vielmehr entstehen in den Metallstäben vom Sender erzwungene Dipolschwingungen. Da die Stäbe aufgrund ihrer Länge eine viel geringere Eigenfrequenz als der Schwingquarz besitzen, kommt es zu einem Phasensprung um π wodurch sich hinter dem Drahtgestell destruktive Interferenz ergibt. Dieser Versuch kann leicht auf Lichtwellen übertragen werden, indem man im Anschluss an das Mikrowellenexperiment zwei Polarisationsfilter in den Strahlengang einer Experimentierleuchte stellt und deren Polarisationsachsen dreht. Die Analogie ist offensichtlich.

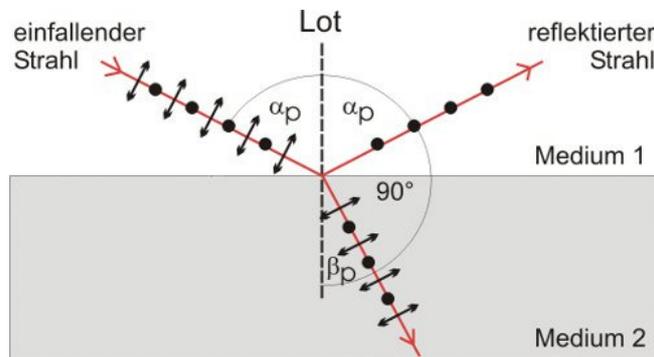
¹ zum Beispiel: <http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/index.php?topic=35> (zuletzt besucht am 02.08.2012)

² Dieses Foto wurde von Dr. Rudolf Löhken zur Verfügung gestellt.

3. Polarisation durch Reflexion

Lässt man einen Lichtstrahl unter einem Winkel von etwa $56,5^\circ$ auf eine Glasplatte fallen, so kann man mit Hilfe eines Polarisationsfilters im Strahlengang des reflektierten Lichts zeigen, dass dieses senkrecht zur Reflexionsebene polarisiert ist, da der Strahl vollständig herausgefiltert wird. Bei kleineren Winkeln zeigt sich eine Abschwächung der Lichtintensität. Das Licht ist dann lediglich zum Teil polarisiert.

Dieser Effekt ergibt sich für alle durchsichtigen, dielektrischen Medien. Zur Erklärung soll die nebenstehende Skizze dienen. Trifft Licht beispielweise auf eine Glasplatte, so wird das reflektierte Licht immer stärker polarisiert, bis es bei einem Einfallswinkel von etwa $56,5^\circ$ vollständig polarisiert ist. Dieser Einfallswinkel heißt Polarisationswinkel α_p . Werden



Polarisationswinkel und dazugehöriger Brechungswinkel β_p von verschiedenen durchsichtigen Stoffen bestimmt, so ist das Licht vollständig polarisiert, wenn die Ausbreitungsrichtungen von reflektiertem und gebrochenem Licht senkrecht aufeinander stehen:

$$\beta_p = 90^\circ - \alpha_p$$

Aus dem allgemeinen Brechungsgesetz kann der Polarisationswinkel beim Übergang von Medium 1 in Medium 2 mit den Brechzahlen n_1 und n_2 direkt berechnet werden

$$\begin{aligned} n_1 \cdot \sin(\alpha_p) &= n_2 \cdot \sin(\beta_p) \\ n_1 \cdot \sin(\alpha_p) &= n_2 \cdot \sin(90^\circ - \alpha_p) \\ n_1 \cdot \sin(\alpha_p) &= n_2 \cdot \cos(\alpha_p) \\ \alpha_p &= \arctan \frac{n_2}{n_1} \end{aligned}$$

Der entsprechende Polarisationswinkel wird als Brewster-Winkel bezeichnet. Wie oben bereits erwähnt, beträgt er bei Glas etwa $56,5^\circ$. Diese Herleitung ist recht einfach und kann in der Regel von den Schülerinnen und Schülern selbst durchgeführt werden (siehe Arbeitsblatt 1).

Anschaulich lässt sich dieses Phänomen im atomaren Bild deuten. Die einfallende Lichtwelle regt die Atome des lichtdurchlässigen Mediums zu erzwungenen Schwingungen zwischen der Elektronenhülle und dem Atomkern an. Die dadurch entstehenden Hertzchen Dipole senden Wellenzüge gleicher Frequenz aus und besitzen ihr charakteristisches Abstrahlverhalten. Dadurch kommt es zu keiner Emission in Richtung der Schwingungsachse. Die Summe aller Dipolschwingungen ergibt nun den reflektierten respektive gebrochenen Lichtstrahl. Aus obiger Skizze ist ersichtlich, dass in Reflexionsrichtung, die mit der Dipol-Schwingungsrichtung im Glas zusammenfällt, kein Licht in dieser Schwingungsrichtung reflektiert werden kann, wodurch das reflektierte Licht linear polarisiert ist.

4. Polarisation durch Streuung

Gestreutes Licht zeigt ebenfalls die Eigenschaft der Polarisation. Dieser Effekt ist recht ähnlich zu dem der Reflexion. Als Beispiel kann hierbei das an der Atmosphäre gestreute

Sonnenlicht dienen. Dieses ist teilweise polarisiert, ganz im Gegensatz zum unpolarisierten direkten Sonnenlicht. Hierbei dienen die Luftmoleküle, Staubpartikel oder Aerosole unserer Atmosphäre als Streuzentren, welche durch die auftreffenden Lichtwellen zum Schwingen angeregt werden. Sie wirken, wie die Atome des Glases bei der Reflexion, als Hertzsche Dipole, wodurch je nach Oszillationsebene das Licht in eine Richtung polarisiert wird.

Dieser Effekt lässt sich in einem recht einfachen Demonstrationsexperiment darstellen. Hierbei wird eine Küvette mit destilliertem Wasser gefüllt und ein wenig Milch hinzugegeben. Richtet man einen (in der Regel unpolarisierten) Laserstrahl auf die Küvette, so wird dieser je nach Blickwinkel sichtbar. Zur Erklärung dieses Effekts wird das einfallende Licht erneut in eine vertikale und horizontale Komponente aufgeteilt. Die Teilchen im Wasser werden durch den Laserstrahl in Schwingung versetzt und besitzen wieder die klassische Abstrahlcharakteristik eines elektrischen Dipols. Auf diese Weise wird das horizontal polarisierte Licht zum Großteil in Richtung der Wasseroberfläche und das vertikal polarisierte Licht seitlich abgestrahlt.

5. Polarisation durch Doppelbrechung

Fast allen nicht kubischen Kristalle besitzen unterschiedliche Brechzahlen für verschiedene Schwingungsrichtungen von Lichtwellen, bedingt durch die Abhängigkeit der Phasengeschwindigkeit von der Schwingungsrichtung. Auf diesem Effekt beruht beispielsweise die Doppelbrechung von Licht in einem Kalkspat (siehe Abbildung rechts).



Hierbei wird unpolarisiertes Licht beim Durchgang durch den Kristall in zwei polarisierte Teilbündel, den sogenannten ordentlichen und außerordentlichen Strahl aufgeteilt. Das Huygenssche Prinzip liefert eine Erklärung für die Doppelbrechung. Beim Auftreffen des Lichts auf den Kalkspat entstehen auf dessen Oberfläche Zentren von Elementarwellen. Diese sind in der Regel kreisförmig, sofern der Brechungsindex in alle Richtungen im Medium gleich ist. Bei doppelbrechenden Kristallen ist er allerdings richtungsabhängig. Die Kristalle besitzen eine optische Achse. Senkrecht zu dieser ist der Kristall vergleichbar mit normalbrechenden Medien, hier verläuft der ordentliche Strahl. Parallel zur optischen Achse hat man es mit einem anderen Brechungsindex und folglich einer anderen Phasengeschwindigkeit der Welle zu tun, wodurch die kreisförmigen Elementarwellen zu Ellipsen verzogen werden. Strahlen in dieser Richtung weichen folglich vom klassischen Brechungsgesetz ab und werden außerordentlich genannt. Hierdurch entstehen die „doppelten Bilder“ im Kalkspat.

Neben nicht kubischen Kristallen weisen auch amorphe Stoffe, wie beispielsweise mechanisch verspanntes Glas oder Plexiglas, Eigenschaften der Doppelbrechung auf. Gerade bei Plexiglas lässt sich diese Eigenschaft in Form von Experimenten zur Spannungsoptik hervorragend im Unterricht nutzen. Da dieses im Normalfall nicht doppelbrechend ist, ändert es zunächst nicht die Polarisationsrichtung des Lichts. Durch Druck oder Zug wird es doppelbrechend und kann die Polarisationsrichtung ändern. Beleuchtet man nun das Material zwischen zwei Polarisationsfiltern, so erkennt man die Spannungsstellen aufgrund

unterschiedlicher Färbungen, die unter anderem durch die Dispersionseigenschaften des Plexiglases entstehen. Für Schüler sind diese Versuche erfahrungsgemäß sehr beeindruckend³.

6. Flüssigkristalle und Funktionsweise eines LCD

Zum Verständnis der Funktionsweise eines LCD („liquid crystal display“) müssen zunächst Flüssigkristalle im Unterricht besprochen werden. Diese sind für Schülerinnen und Schüler etwas völlig neues und erzeugen zunächst einen kognitiven Konflikt, da sie in der Regel lediglich die drei Aggregatzustände fest, flüssig und gasförmig kennen. So geht ein Kristall beim Erhitzen normalerweise in den flüssigen Zustand über. Innere Bindungskräfte werden aufgebrochen, und bei genügend hoher Temperatur geht die Lageordnung sowie die Orientierungsordnung im Kristall verloren. In Flüssigkristallen bleibt jedoch eine Richtungsfernordnung erhalten. Im einfachsten Fall bestehen sie aus stabförmigen Molekülen, die sich mit ihrer Längsachse zum Beispiel vorzugsweise parallel anordnen, was zu richtungsabhängigen physikalischen Eigenschaften führt.

Mittlerweile sind etwa 50000 solcher organischen Verbindungen, wie beispielsweise Cyanobiphenyl 5CB oder Methoxybenzylidenbutylanilin (MBBA), bekannt, die flüssigkristalline Phasen durchlaufen. Sind deren Moleküle entsprechend ausgerichtet, so besitzt dazu parallel polarisiertes Licht eine größere Brechzahl als dazu senkrecht polarisiertes. Der Flüssigkristall ist folglich doppelbrechend. Durch Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes können die Moleküle in Feldrichtung gedreht werden, wodurch sich die Doppelbrechung ändert.

Hierauf beruht das Grundprinzip von LCD-Bildschirmen. Ihre genaue Funktionsweise wird in dem Artikel „Polarisation auf dem Schreibtisch“, der diesem Material zugrunde liegt, sehr schön beschrieben und grafisch aufbereitet. Daher werden an dieser Stelle keine weiteren theoretischen Betrachtungen angeführt. Vielmehr werden zum Abschluss zwei Demonstrationsexperimente vorgeschlagen, mit denen es gelingen sollte, den Artikel passgenau in den Unterrichtsgang einzubauen. Für zusätzliche Informationen bietet sich zum Beispiel die Internet-Seite www.fluessigkristalle.com an.

Versuch 1

Ein Laser wird, wie in nebenstehender Abbildung⁴ dargestellt, auf einen Keil aus Glas, der beispielsweise mit MBBA gefüllt ist, gerichtet. Durch die optische Anisotropie des doppelbrechenden Flüssigkristalls wird der Laserstrahl in zwei Teilstrahlen aufgespalten. Mit Hilfe von Polarisatoren kann die Polarisation dieser Teilstrahlen gezeigt werden.

Obwohl dieses Experiment recht einfach erscheint, sollte man unbedingt Folgendes beachten: Bereits leichte Erschütterungen des Glaskeils führen dazu, dass die kristalline Struktur des darin enthaltenen Flüssigkristalls verloren geht und er somit seine doppelbrechende Eigenschaft verliert. Daher sollte der Keil beziehungsweise der Flüssigkristall vor Beginn des Experiments zunächst eine Weile in Ruhe sein, bevor man den Laserstrahl darauf richtet.



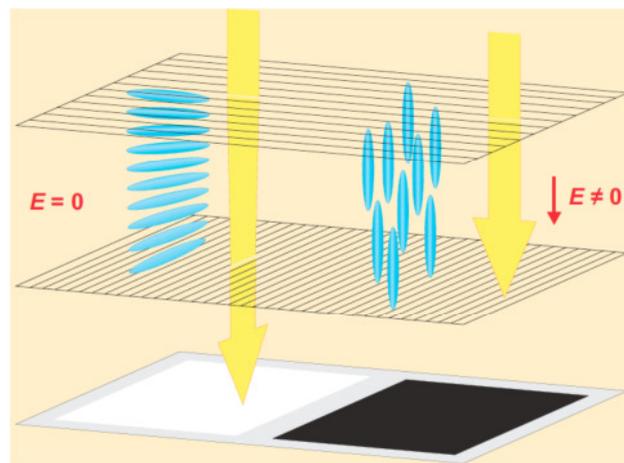
³ http://www.leifiphysik.de/web_ph12/versuche/06polarisation/spannungsoptik.htm (zuletzt besucht am 02.08.2012)

⁴ Abbildung von <http://fluessigkristalle.com/grundlagen.htm> (zuletzt besucht am 02.08.2012)

Versuch 2

Dieser Versuch zeigt die Funktionsweise eines LCD. Die nebenstehende Abbildung zeigt dessen Aufbau. An einem Overheadprojektor ist zwischen zwei Polarisationsfiltern ein LCD angebracht. Beide Filter sind orthogonal zueinander ausgerichtet. Das LCD besteht aus zwei Glasplatten zwischen denen ein durchsichtiger Flüssigkristall positioniert ist. Trotz der orthogonalen Anordnung der Polarisationsfilter gelangt Licht durch den Aufbau. Der Grund: Das LCD dreht die Polarisationsrichtung der einfallenden Lichtstrahlen um 90° .

Wie die Abbildung⁵ unten zeigt, richten sich die Moleküle im Flüssigkristall durch Anlegen einer Spannung an das LCD nun aber so aus, dass die Schwingungsrichtung des Lichts nicht mehr gedreht wird. Somit erfolgt an diesen Stellen eine Auslöschung durch den zweiten Polarisationsfilter, und sie erscheinen dunkel. Orientiert man im Anschluss die Polarisationsfilter parallel zueinander, so gelangt gerade an diesen Stellen, an denen die Spannung anliegt, das Licht hindurch, und man erhält das entsprechend negative Bild (siehe Arbeitsblatt 2).



Literatur

A. Tillmanns und T. Blachowicz (2010). *Polarisation auf dem Schreibtisch. Experimente mit TFT-Flachbildschirmen.* Physik in unserer Zeit, 41: 70–73.

E. Hoppe (1967). *Geschichte der Optik.* Dr. Martin Sändig oHG, Wiesbaden.

K. Simonyi (1990). *Kulturgeschichte der Physik.* Harri Deutsch, Frankfurt am Main.

⁵ Skizze aus: **A. Tillmanns und T. Blachowicz (2010).** *Polarisation auf dem Schreibtisch. Experimente mit TFT-Flachbildschirmen.* Physik in unserer Zeit, 41: 70–73.