

Low-Cost-Experimente mit 3D-Brillen

Torsten Franz*

*Technische Universität Braunschweig, IFdN, Abt. Physik & Physikdidaktik

torsten.franz@tu-braunschweig.de

Kurzfassung

Seit einigen Jahren ist die 3D-Technologie und die hierbei verwendeten 3D-Brillen fester Bestandteil des Kinos geworden. Diese Brillen können als kostengünstige Grundlage für eine Reihe von Experimenten zum Thema Polarisation verwendet werden. Hierbei ist es möglich, mit einfachen Methoden physikalische Effekte zu demonstrieren, die von Oberstufe bis in die Hochschule genutzt werden können. Wir stellen eine Reihe solcher Experimente vor und geben eine Idee der zugrundeliegenden Physik.

1. Einleitung

Um in der Natur räumlich sehen zu können und die Entfernung von Gegenständen abschätzen zu können, bedient sich der Mensch zweier Mechanismen: Zum einen besitzt der Mensch zwei Augen, die sich in einem gewissen Abstand voneinander befinden. Durch den hierbei entstehenden Unterschied in der Perspektive können Rückschlüsse auf die räumliche Lage von Objekten geschlossen werden. Zum anderen besitzt der Mensch eine Linse im Auge, welche durch Akkommodation in ihrer Brechkraft eingestellt werden kann. Ein normalsichtiger Mensch kann Gegenstände in großer Entfernung ohne Akkommodation scharf sehen und muss umso stärker akkommodieren, je näher sich der betrachtete Gegenstand befindet. Aus beiden Informationen entsteht so das Gefühl von räumlicher Tiefe und Abstand. Soll dieses Gefühl bei stehenden oder bewegten Bildern erzeugt werden, müssen Verfahren verwendet werden, bei denen jedes Auge des Betrachtenden ein unterschiedliches Bild wahrnimmt. Hierzu wurden verschiedene technische Verfahren entwickelt.

Die ersten Versuche, räumliches Sehen im Kino zu ermöglichen sind schon vergleichsweise alt; kommerzielle Versuche gab es bereits vor der Einführung des Tonfilms. Die erste größere Welle von 3D-Filmen in Kinos lief in den 1950er Jahren, wobei der 3D-Eindruck mithilfe von Farben erzeugt wurde: Bei dieser Technik bestehen die Brillengläser aus farbigen Folien [1], so dass ein Auge hauptsächlich grünes, das andere rotes Licht erreicht. Wenn nun der Film entsprechend eingefärbt ist, kann im Gehirn der Eindruck von Tiefe entstehen. Der Nachteil des Verfahrens ist jedoch, dass der Film in Falschfarben dargestellt wird und daher sehr unnatürlich wirkt. Diese Form des 3D-Sehens konnte sich daher kommerziell nie beim breiten Publikum durchsetzen, auch wenn heute noch entsprechende Brillen in verschiedenen Farbvarianten (z.B. Rot/Cyan) erhältlich sind.

Im kommerziellen Bereich haben sich momentan die Technik der Shutterbrille (meist bei Fernsehern) und der Polarisation (meist im Kino) durchgesetzt.

Eine Einführung in das Thema Film und Kino im Bezug zur Schule findet sich in [2], weitere Information zur Erstellung von 3D-Aufnahmen sowie zu weiteren Display-Techniken in [3]. Für eine Einführung in die Technik der polarisationsbasierten 3D-Technik sowie einfache Experimente für die Schule sind [4,5] empfehlenswert. In [6] ist ein praktischer Versuch zur LCD-Technik beschrieben, bei der auch 3D-Brillen zum Einsatz kommen. Zur Einführung in die Physik der Polarisation empfehlen wir die Lehrbücher [7 -11]. Ein phänomenologischer Zugang zur Polarisation ist in [12] beschrieben. Ein schönes Beispiel zur optischen Verzögerung in Plexiglas findet sich in [13], eine Untersuchung der spektralen Eigenschaften von Polarisationsfiltern für die Fotografie in [14].

Shutterbrille

Für Fernseher hat sich die Technik der Shutterbrille etabliert, bei der mit Frequenzen zwischen 50 Hz und 80 Hz die einzelnen Brillengläser abwechselnd abgedunkelt werden. Die Bilder werden auf dem Fernseher mit der doppelten Frequenz gewechselt, so dass immer das perspektivisch für das linke Auge bestimmte Bild dann angezeigt wird, wenn das linke Brillenglas der Shutterbrille offen und das rechte dunkel ist. Da das menschliche Auge den schnellen Wechsel der Bilder nicht wahrnehmen kann, entsteht der Eindruck, jedes Auge sähe stets nur die perspektivisch korrekten Bilder, obwohl immer abwechselnd ein Bild für das linke und das rechte Auge gezeigt wird.

Bei diesem Verfahren wird eine aktive Brille mit eigener Spannungsversorgung benötigt. Hierdurch werden die entsprechenden Brillen etwas schwerer und in der Herstellung aufwendiger und teurer. Gleichzeitig muss die Synchronisation der Brillen mit dem Fernseher gut funktionieren, um das Entstehen

von Doppelbildern zu unterbinden. Durch das Umschalten der Bilder reduziert sich die effektive Bildwiederholungsrate des Fernseherers entsprechend um die Hälfte, was dazu führen kann, dass die Bilder weniger flüssig wirken.

Polarisation

Im Kino wird ein anderes Verfahren verwendet, welches auf der Polarisation von Licht beruht. Die beiden Brillengläser wirken hier als Filter für Licht zweier orthogonaler Polarisationsrichtungen: Das Licht einer Richtung erreicht das eine Auge, das Licht der zur ersten orthogonalen Richtung das andere Auge. Bei dieser Technik kann entweder linear oder zirkular polarisiertes Licht verwendet werden. Der entscheidende Nachteil bei linear polarisiertem Licht ist jedoch, dass bei Neigen des Kopfes Doppelbilder entstehen, eine vernünftige Nutzung also nur dann gegeben ist, wenn alle Kinogäste während des Films aufrecht sitzen. Daher kommt heute in Kinos zirkular polarisiertes Licht zum Einsatz, bei dem die Technik unabhängig vom Betrachtungswinkel funktioniert.

Die bei diesem Verfahren verwendeten Brillen sind passiv, benötigen also keine Spannungsversorgung. Jedoch stellt die Technik besondere Herausforderungen an die Projektionstechnik, da die Leinwand, auf die projiziert wird, die Polarisationsrichtung des Lichtes erhalten muss. Hierzu werden Leinwände verwendet, die mit Aluminium beschichtet sind (die Fachbezeichnung ist Silberleinwand). Kinoprojektoren verwenden einen optoelektronischen Modulator (genannt ZScreen) mit denen die die Polarisation zwischen den Bildern gewechselt wird, es wird also weiterhin ein Projektor verwendet.

Wir beschäftigen uns im Folgenden jedoch weniger mit dem eigentlichen 3D-Sehen, als mit den für das 3D-Kino entwickelten Brillen. Diese Brillen (und die entsprechenden Folien) sind durch die massenhafte Verbreitung der Technologie heute sehr günstig erhältlich und ermöglichen eine Reihe an Experimenten zur Polarisation und der Wellennatur des Lichtes.

Einordnung der Versuche

Das Thema Polarisation von transversalen Wellen ist ein übliches Thema an Schule (meist Oberstufe) und Universität, wobei die Polarisation von Licht entweder im Bereich Optik oder Wellenlehre diskutiert wird. Wir stellen im Folgenden sieben Versuche vor, die mit einfachen Mitteln durchführbar sind und verschiedene physikalische Phänomene beinhalten: In den Versuchen 3.1 bis 3.4 wird die Funktionsweise einer 3D-Brille als Filter für linear bzw. zirkular polarisiertes Licht behandelt. Versuch 3.4 benötigt als zusätzliches Vorwissen die Brewsterreflexion. Diese Versuche sind in ähnlicher Form auch bereits in der Literatur beschrieben (vgl. [4],[5]) uns könnten so in der Oberstufe eingesetzt werden. Die Versuche 3.5 bis 3.7 behandeln die Abhängigkeit der Polarisation von der Wellenlänge

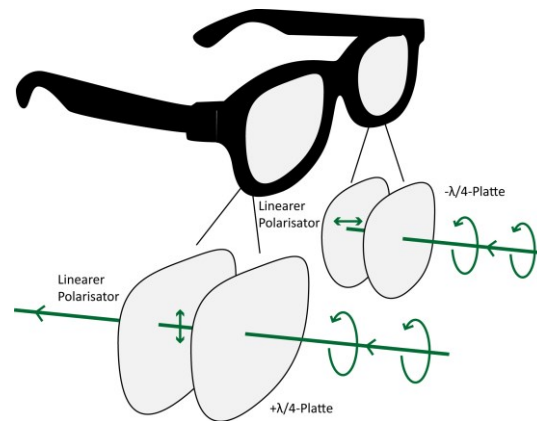


Abb. 1 Modell der Brille. Unten ist der Strahlengang bei einfallendem links-zirkular polarisiertem Licht gezeigt (Erklärung im Text). Die grünen Pfeile symbolisieren die momentane Polarisation des Lichts.

bei den Folien der 3D-Brille. Sie zielen auf die Ausbildung an der Hochschule. Um die Polarisation zu visualisieren verwenden wir hierbei die Darstellung mittels der Poincaré-Kugel (vgl. z.B. Kap. 17 in [7]). Der Versuch 3.7 beinhaltet zusätzlich die Abhängigkeit des Brechungsindex (auch Brechzahl genannt) von der Richtung des einfallenden Lichtes bei. Dies ist zwar kein typisches Thema universitärer Optik-Kurse, da sich der Effekt mit den 3D-Brillen aber einfach zeigen lässt und recht beeindruckend ist, stellen wir hier die zugrundeliegenden physikalischen Prozesse dar. Um die Theorie mit der realen Situation zu verknüpfen vergleichen wir mit Messungen, die wir mit einer handelsüblichen 3D-Brille gemacht haben.

Tipp: wir empfehlen, beim Lesen dieser Arbeit zwei 3D-Brillen zur Hand zu nehmen um die Experimente gleich nachstellen zu können.

2. Aufbau einer 3D-Brille

Wir beschreiben hier den prinzipiellen Aufbau einer 3D-Brille sowie die zugrundeliegenden physikalischen Effekte, soweit diese zur Erklärung der in den Versuchen gemachten Beobachtungen notwendig sind. Für eine umfassende Einführung in das Thema, insbesondere der Beschreibung von beliebigen Stoffen, verweisen wir auf die Lehrbücher [7-11].

Eine 3D-Brille besteht, neben dem haltenden Gestell, aus den beiden Polarisations-Folien vor dem jeweiligen Auge. Diese sind Polarisatoren für rechts- bzw. links-zirkulares Licht und bestehen wieder aus je zwei aufeinander geklebten Folien: einem linearen Polarisator und einer $\lambda/4$ -Verzögerungsplatte (manchmal auch Phasenplatte genannt) (siehe Abb. 1). Die Folien sind aus transparentem Kunststoff hergestellt. Die linearen Polarisatoren sind für beide Augen parallel ausgerichtet (im Fall der betrachteten Brille vertikal) wohingegen die Verzögerungsplatte für die beiden Augen

unterschiedlich ausgerichtet sind. Es ist prinzipiell möglich, die beiden Folien mechanisch voneinander zu lösen, bei unseren Versuchen mit 3D-Brillen aus dem Kino stellte sich dies jedoch als nicht praktikabel heraus, da die Folien beim Trennen brüchig und matt wurden.

Eine Verzögerungsplatte verzögert die Polarisations-Komponenten des Lichtes beim Durchgang durch das Medium unterschiedlich stark: Je nach Polarisationsrichtung erfährt das Licht einen anderen Brechungsindex. Die Richtung mit größtem Brechungsindex wird auch als die schnelle Achse, die mit kleinstem Brechungsindex als langsame Achse bezeichnet. Um aus linear polarisiertem Licht zirkular polarisiertes Licht zu machen müssen die langsame und schnelle Achse der Verzögerungsplatte im 45° -Winkel zur Eingangspolarisation stehen. Wir haben in Abb. 2 die verschiedenen Achsen einer 3D-Brille zur Orientierung eingezeichnet. Die grüne Achse in Abb.2 entspricht der Richtung der schnellen (bzw. langsamen) Achse der Verzögerungsfolie (gerade unterschiedlich für das linke und rechte Auge).

Wir haben den Durchgang von Licht durch eine Verzögerungsplatte in Abb. 3 skizziert: -45° polarisiertes Licht (die Richtung der Polarisation ist durch den blauen Doppelpfeil dargestellt, Winkel wurde zur besseren Sichtbarkeit in der Abbildung gewählt) trifft auf eine Verzögerungsplatte der Dicke d . Dieses Licht entspricht einer Überlagerung von horizontal polarisiertem (x -Richtung, grün) und vertikal polarisiertem Licht (y -Richtung, rot) ohne relative Phasenverschiebung. Im Medium wirken nun unterschiedliche Brechungsindizes auf die Komponenten des Lichts. Demnach ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes für horizontal und vertikal polarisiertes Licht unterschiedlich. In der Abbildung ist dargestellt, dass die vertikale Komponente gerade zwei Schwingungen durchführt, während die horizontale Komponente ein-dreiviertel Schwingungen durchführt. Hierdurch wird die horizontale Komponente gegenüber der Vertikalen um eine Viertel-Wellenlänge (daher $\lambda/4$ -Platte) verzögert und das linear polarisierte Eingangslight in zirkular polarisiertes überführt (angedeutet durch den blauen Kreispfleil). Hierbei ist zu bemerken, dass die Verzögerung nur für Licht einer Wellenlänge genau

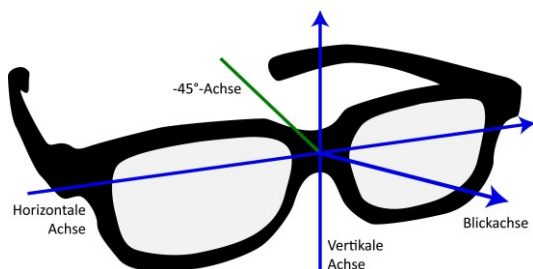


Abb. 2 Bezeichnung der Achsen der Brille. Die -45° -Achse liegt in einer Ebene mit der horizontalen und der vertikalen Achse.

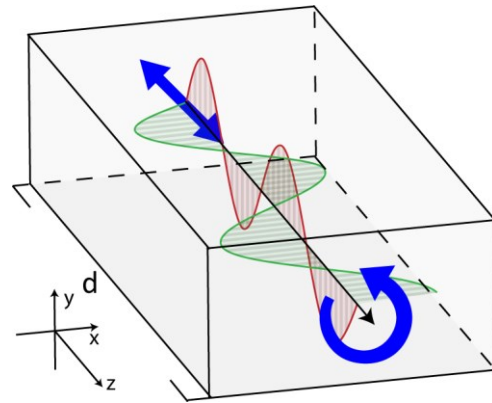


Abb. 3 Schema zum Durchgang durch eine $\lambda/4$ -Platte. Linear (hier -45°) polarisiertes Licht trifft auf die $\lambda/4$ -Platte (kräftiger blauer Doppelpfeil). Ausbreitungsrichtung ist entlang der z -Achse. Da das Material unterschiedliche Brechungsindizes in x - und y -Richtung besitzt, hat das Licht in beide Richtungen unterschiedliche Geschwindigkeiten. Hier ist skizziert, dass die x -Komponente gegenüber der y -Komponente um eine Viertelwellenlänge verzögert ist. Demnach wird aus dem linearen Licht rechts-zirkulares Licht (kräftiger blauer Kreispfleil). Die Phasendifferenz ist abhängig von der Dicke d der Platte und der betrachteten Wellenlänge.

$\lambda/4$ entspricht und Licht anderer Wellenlänge eine andere Verzögerung erfährt. Im Falle der Betrachteten 3D-Brillen wird Licht der Wellenlänge $\lambda=513\text{nm}$ um $\lambda/4$ verzögert (siehe Messung zu Versuch 3.5). Die Abb. 3 ist hierbei schematisch zu verstehen, da in einer realistischen Verzögerungsfolie einer 3D-Brille die Foliendicke deutlich größer und der Unterschied der Brechungsindizes deutlich kleiner ist.

Die nach dem Durchgang durch einen Kristall der Dicke d entstehende Phasendifferenz, hängt von der Wellenlänge des Lichtes λ ab. Für senkrecht auf die Folie auftreffendes Licht ergibt sich der Phasenunterschied zu

$$\Delta\varphi = (2\pi)/\lambda \cdot d \cdot (n_L - n_S), \quad (I)$$

wobei n_L der Brechungsindex der langsamen und n_S der Brechungsindex der schnellen Achse ist. Diese geometrisch an Abb. 3 nachvollziehbare Beziehung wird uns im Folgenden zur Erklärung der beobachteten Effekte ausreichen.

Wir stellen nun eine Reihe von Versuchen vor, die sich allein mit zwei 3D-Brillen durchführen lassen. Die Versuche 3.1 bis 3.3 sind grundlegend, 3.4 benötigt zusätzliches Vorwissen (Brewsterwinkel) während 3.5 bis 3.7 zunehmend komplexere Effekte beinhalten.

3. Versuche

3.1 Zwei Brillen im Standardausrichtung

i) Wir beginnen mit der grundlegenden Funktionsweise der Brille: Zwei Lernende setzen sich

je eine Brille auf und betrachten sich gegenseitig (siehe Abb. 4). Wenn einer der Partner nun ein Auge schließt, so kann er bei dem anderen Partner das entsprechende Auge verdunkelt sehen: Wird das rechte Auge geschlossen, so ist auch das Brillenglas des Partners auf derselben Seite dunkel (also vom Betrachtenden aus auf der linken und vom Partner oder der Partnerin aus auf der rechten Seite).



Abb. 4 Skizze zu Versuch 3.1

ii) Im zweiten Teil des Versuchs werden die Partner aufgefordert ihre Köpfe zu drehen um sich zu vergewissern, dass die Kopfhaltung bei der Betrachtung keinen Unterschied macht. Dies ist für den Einsatz im Kino wichtig damit beim Neigen des Kopfes keine Doppelbilder entstehen.

Aus diesen beiden Versuchsteilen folgt, dass sich die Brillengläser wie Polarisatoren für zirkular polarisiertes Licht verhalten – ein Auge für links-zirkulares und ein Auge für rechts-zirkulares Licht.

3.2 Zwei Brillen invers

Als Nächstes werden zwei Brillen in „umgekehrter“ Weise betrachtet, dass also die Bügel der Brillen zueinander zeigen (siehe Abb. 5). Wenn die Stirnseiten der Brillen parallel zueinander sind, tritt maximal viel Licht durch beide Brillen. Wird jedoch eine der Brillen relativ zu der anderen gedreht,

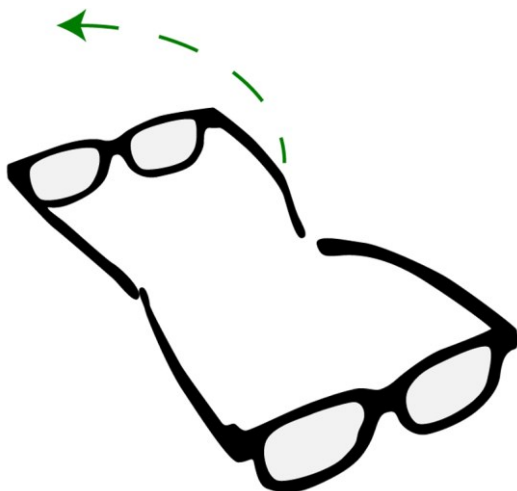


Abb. 5 Skizze zu Versuch 3.2: Der grüne Pfeil deutet an, wie die hintere Brille gedreht wird.

verdunkelt sich das Bild immer weiter, bis bei einem Winkel von 90° maximale Dunkelheit erreicht ist. Für einen beliebigen Winkel α verhält sich die Intensität wie $\cos^2 \alpha$ (Gesetz von Malus). Mit diesem Versuchsteil kann verdeutlicht werden, dass auf der Innenseite der Brille jeweils ein linearer Polarisator wirkt und dass die linearen Polarisatoren in beiden Brillengläsern gleich ausgerichtet sind.

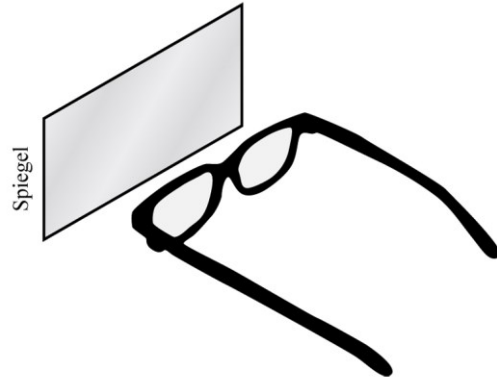


Abb. 6 Skizze zu Versuch 3.3

3.3 Eine Brille im Spiegel

Für den nächsten Versuch setzt sich ein Lernender eine 3D-Brille auf und betrachtet sich selber in einem Spiegel (Abb. 6). Wird nun wieder ein Auge geschlossen, kann der Lernende das geschlossene Auge im Spiegelbild sehen, während das offene Auge abgedunkelt ist. Diese Beobachtung zeigt (wie auch der Versuch 3.1), dass die Brille mit zirkular polarisiertem Licht arbeitet, denn dieses ändert seine Polarisationsrichtung bei der Reflexion im Spiegel so, dass links-zirkular polarisiertes Licht reflektiert rechts-zirkular polarisiertes Licht ergibt und umgekehrt. Bei linear polarisiertem Licht tritt ein entsprechender Effekt nicht auf (was einfach geprüft werden kann, indem die Brille wie im zweiten Versuch umgekehrt verwendet wird).

Der Grund, warum sich die Polarisation ändert, ist hierbei derselbe, warum eine rechte Hand im Spiegel wie eine Linke aussieht: Durch die Umkehrung der Ausbreitungsrichtung (ohne die anderen Richtungen zu ändern) wird der Drehsinn im System geändert.

3.4 Bestimmung der linearen Achse

Als Ergänzung zum Versuch 3.2 lässt sich noch die Ausrichtung des verwendeten linearen Polarisators mit Hilfe der Brewster-Reflexion bestimmen. Hierzu wird die Reflexion einer Lichtquelle auf eine Glasplatte betrachtet. Unter schrägem Lichteinfall wird die parallel zur reflektierenden Fläche stehende Komponente des Lichts stärker reflektiert. Entspricht der Reflexionswinkel gerade dem Brewsterwinkel des Materials, wird ausschließlich zur reflektierenden Fläche parallel polarisiertes Licht reflektiert. Wird das reflektierte Licht durch die 3D-Brille in umgekehrter Konfiguration (d.h. Bügel zeigen zur reflektierenden Fläche) betrachtet, kann die Stellung

des linearen Polarisators bestimmt werden. Hierzu bestimme man den Winkel minimaler Transmission. Der Polarisator der Brille steht dann senkrecht zu dieser Richtung (vgl. hierzu Abb. 7).

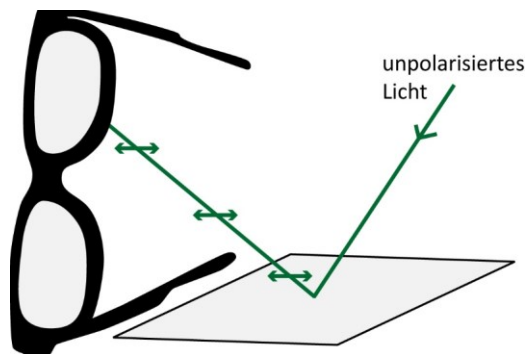


Abb. 7 Schema der Reflexion unter Brewster-Winkel: Das reflektierte Licht ist linear parallel zur Reflexionsebene polarisiert. Wenn die Brille so gestellt ist, dass die Absorption an der Brille maximal ist, kann die lineare Polarisationsrichtung bestimmt werden.

3.5 Addition von Phasen und der Einfluss der Wellenlänge

Einen schönen Farbeffekt können wir beobachten, wenn wir zwei Brillen direkt übereinanderlegen und durch die zwei nun hintereinander liegenden Brillengläser in eine weiße Lichtquelle schauen. Die Ausrichtung der Brillen soll hierbei so sein, dass sich die Vorderseiten (also die der Kinoleinwand zugewandten Seiten) berühren (siehe Abb.8 für eine Skizze und Abb. 9 für eine Photographie). In Abb. 9 wurden zwei Brillen gegeneinander gelegt und in dieser Position mit Büroklammern fixiert. Das Licht der Lampe wird bei Betrachtung durch beide Brillen in der Intensität deutlich abgeschwächt und erscheint magenta.

Um diesen Effekt zu erklären, vollziehen wir den Weg des Lichtes von der Quelle bis zum Auge (oder in diesem Fall der Kamera) nach: Zunächst ist das Licht der Lampe unpolarisiert. Dann trifft es im ersten Schritt auf den linearen Polarisator der der Lampe zugewandte Brille, dabei wird die Intensität auf die Hälfte reduziert. Dann folgen zunächst die $\lambda/4$ -Platte der „lampenseitigen“ Brille und dann die $\lambda/4$ -Platte der „augenseitigen“ Brille.

Hierbei ist zu beachten, dass das Licht die beiden Brillen in unterschiedlicher Richtung durchläuft, also für die eine Brille von innen nach außen und für die andere umgekehrt. Weiterhin durchtritt Licht die unterschiedlichen Brillengläser, also beispielsweise das linke Brillenglas der ersten und dann das rechte Brillenglas der zweiten Brille. Insgesamt addieren sich die Phasendifferenzen betragsmäßig zu $\lambda/2$. Wenn die Brille so gehalten wird, dass der lampenseitige Polarisator vertikal polarisiert, dreht sich das Licht durch die Phasendifferenz zu

horizontal und wird dann am augenseitigen Polarisator - der ja parallel zu dem lampenseitigen steht (siehe Versuch 2) - absorbiert. Dies erklärt die Abnahme der Lichtintensität.

Um die Färbung des Licht zu verstehen, betrachten wir noch einmal die Funktionsweise der Verzögerungsplatte: Die entstehende Phasendifferenz wird durch die Dicke der Schicht, die Differenz der Brechungsindizes (in schnelle und



Abb. 8 Skizze zu Versuch 3.5



Abb. 9 Licht einer weißen Lampe erscheint beim Durchgang durch zwei Brillen magenta. Die beiden Brillen werden durch Büroklammern zusammengehalten.

langsame Richtung) und die Wellenlänge des verwendeten Lichts gemäß Formel (I) bestimmt.

Das bedeutet, dass nur Licht einer bestimmten Wellenlänge exakt um $\lambda/2$ verzögert wird. Licht anderer Wellenlänge erfährt eine leicht andere Phasendifferenz. Dieses Licht wird demnach nicht exakt Richtung horizontal gedreht und am Polarisator nicht vollständig absorbiert. Bei den betrachteten Brillen sind die Brillengläser so eingestellt, dass die Phasendifferenz für türkis-grünes Licht (etwa 513nm) gerade $\lambda/4$ entspricht. Dadurch wirken die beiden 3D-Brillen wie ein Filter für türkis-grünes Licht. Das nicht gefilterte Licht erscheint magenta, da dies die Komplementärfarbe zu grün ist.

Darstellung in der Poincaré-Kugel

Eine mögliche Visualisierung dieses Vorgangs bietet die Poincaré-Kugel (Abb. 10). Die reinen polarisierten Zustände befinden sich hierbei auf der Oberfläche der Kugel und die linearen Polarisationsrichtungen auf dem Äquator. Ein Phasenschub um $\lambda/4$ entspricht gerade einer Drehung des Zustandsvektors um 90° in der Poincaré-Kugel – im betrachteten Fall gerade um die Achse, welche die

+45° und -45° polarisierten Zustände enthält. Hierbei haben wir unser lineares Koordinatensystem bezüglich der in Versuch 3.4 bestimmten Achse gewählt. Wir bezeichnen Licht als rechts-zirkular, wenn sich der zugehörige Vektor des elektrischen Feldes in Ausbreitungsrichtung mit der rechten Hand dreht. In den Abbildungen zeichnen wir immer so, als würde sich das Licht vom Blatt zum Betrachtenden ausbreiten.

Wie wir wissen, ist der Drehwinkel aber nun abhängig von der Wellenlänge des Lichts. Durch die erste Drehung (der lampenseitigen $\lambda/4$ -Platte, Drehung I in Abb. 10) wird das Licht in Richtung rechts-zirkular polarisiertes Licht gedreht, wobei nur für das grüne Licht die Phasenbedingung perfekt passt. Die anderen Farben werden etwas zu weit oder zu kurz gedreht und somit elliptisch polarisiert. In der Abbildung haben wir dies beispielhaft für rotes und blaues Licht skizziert. Durch die zweite Drehung (II) wird das grüne Licht nun Richtung vertikal gedreht und die anderen Farben Richtung elliptisch polarisiertes Licht. Bei der abschließenden Messung in vertikaler Richtung wird das grüne Licht vollständig absorbiert, während die anderen Farben zu einem kleinen Teil (in der Skizze etwa 10%) transmittiert werden.

Messergebnisse

Um die Wirkung der Brillen auch quantitativ untersuchen zu können, haben wir die Transmission durch die Brillen für verschiedene Wellenlängen bestimmt. Hierfür haben wir eine Lichtquelle mit möglichst breitem Spektrum (Lampe eines

Diaprojektors) verwendet und relative Intensität des transmittierten Lichtes mit einem Spektrometer der Firma Pasco (PS-2600) vermessen. In Abb. 11 sehen wir den Verlauf der Transmissionskurve im Vergleich zur Vorhersage der Kurve basierend auf

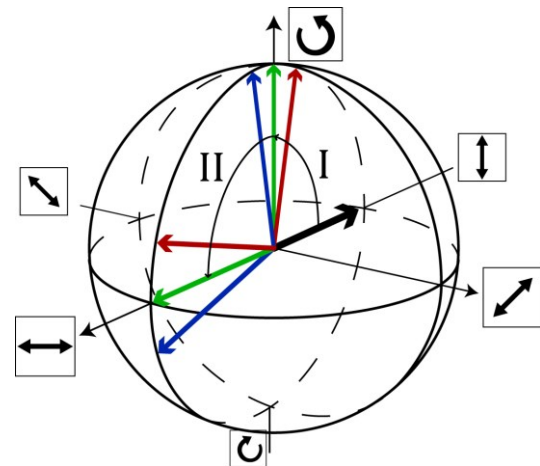


Abb. 10 Visualisierung des farbabhängigen Phasenschubs mit Hilfe der Poincaré-Kugel: Das vertikal polarisierte Licht (dicker Pfeil) wird zuerst in Richtung rechts-zirkular polarisiertem Licht gedreht (I), wobei die Bedingung nur für grünes Licht exakt erfüllt ist. Durch die zweite Phasenverschiebung (II) wird das Licht in Richtung horizontal polarisiertes Licht gedreht. Für alle Farben außer grün ergibt sich so elliptisch polarisiertes Licht, welches am Polarisator nicht vollständig absorbiert wird.

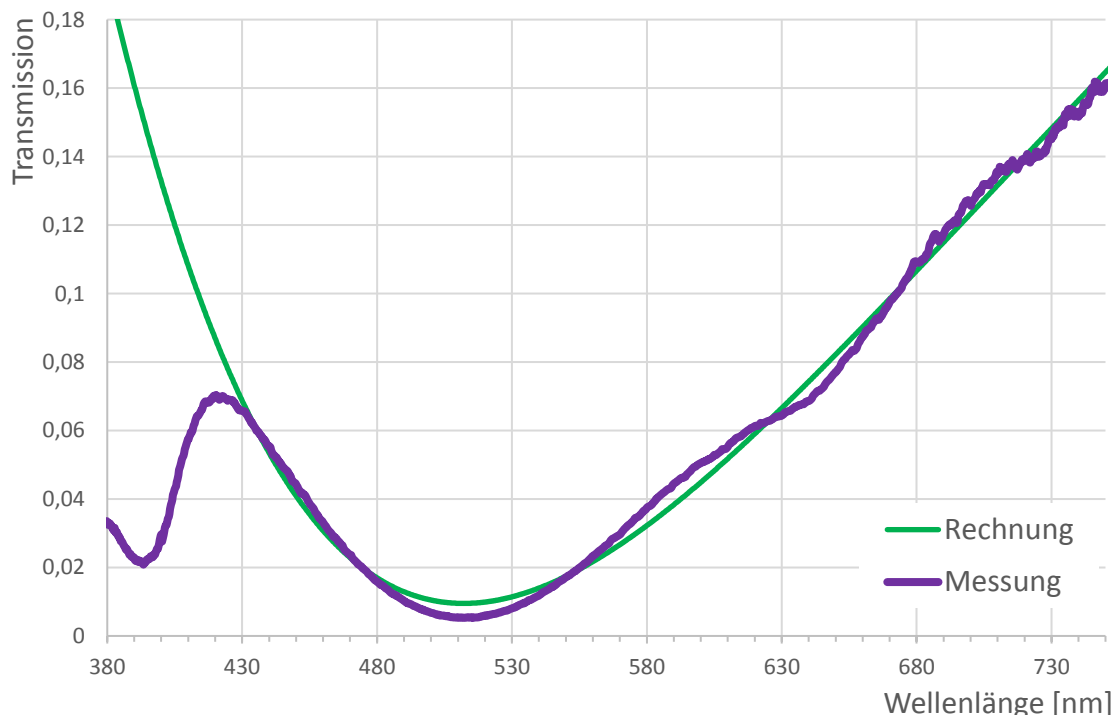


Abb.11 Verlauf der Transmissionskurve bei zwei hintereinander liegenden Brillen. Gezeigt ist der Vergleich der Messung (violett) mit der nach Gleichung (I) bestimmten Vorhersage.

dem aus Gleichung (I) berechneten Phasenverschubs. Hierbei wurde die Transmission auf die Gesamtintensität des Lichtes normiert.



Abb. 12 Skizze zu Versuch 3.6 (i)

Unsere Messung ergab ein Minimum der Transmission bei einer Wellenlänge von ca. 513nm. Die Messung wurde bei Tageslicht durchgeführt, daher führen wir den Offset auf Streulicht zurück. Dies haben wir in der Rechnung (grüne Kurve) durch einen zusätzlichen Summanden berücksichtigt. Aus dem Vergleich der gemessenen und modellierten Transmission ergibt sich, dass es einen weiteren Absorptionsmechanismus bei kurzen Wellenlängen geben muss. Wir vermuten hier eine Absorption des Lichtes in der Folie unabhängig von der Polarisation des Lichtes. Solch ein Verhalten ist für transparente Kunststoffe unterhalb von 400 nm nicht unüblich (vgl. z.B. [7] Kap. 3 & 17).

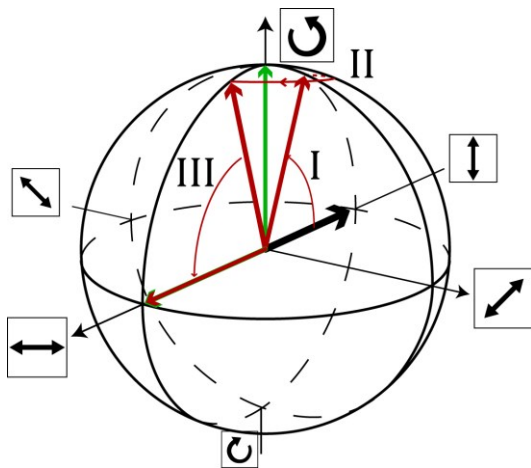


Abb. 13 Visualisierung der Situation bei zusätzlicher Drehung einer Brille um 90°. Exemplarisch ist die Bewegung des roten Anteils des Lichtes dargestellt. Nach der ersten Drehung (I) ergibt sich eine zusätzliche Drehung um 90° im Raum – entspricht einer 180°-Drehung um die z-Achse der Poincare-Kugel (II), die Abschließende Drehung (III) dreht dann jede Farbe in horizontale Richtung.

3.6 Phasenanpassung durch zusätzliche Drehung i) Farbänderung bei Absorption

Die Beobachtungen des letzten Versuchs können noch verfeinert werden. Hierzu werden zunächst zwei Brillen (siehe Abb. 12) mit der Stirnseite gegeneinander gehalten, jedoch ohne sie gegeneinander zu fixieren, und eine weiße Lichtquelle beobachtet. Durch Drehung einer der Brillen um 90° um die Blickachse, wird das transmittierte Bild lichtschwächer und verliert seine Färbung.

Dieser Effekt beruht darauf, dass nur Licht einer bestimmten Wellenlänge exakt auf zirkular polarisiertes Licht verzögert wird. Licht anderer Wellenlänge wird zu elliptisch polarisiertem Licht transformiert und dies wird durch eine räumliche Drehung beeinflusst.

Darstellung in der Poincaré-Kugel

Eine Möglichkeit, den Effekt zu visualisieren ist im Ruhesystem der ersten Brille: In diesem Fall wirkt die zweite Brille wie eine Drehung um denselben Winkel, aber in die entgegengesetzte Richtung (da die Achsen relativ zur ersten Brille vertauscht sind) und eine Projektion in die orthogonale Richtung. Nehmen wir an, die erste Projektion erfolgt in vertikale Richtung, erfolgt die abschließende Projektion in horizontale Richtung. Damit heben sich die beiden Drehungen für alle Wellenlängen gerade auf und alle Farben werden gleich stark absorbiert. Hierdurch erscheint das Bild grau.

Die zweite Möglichkeit zur Darstellung ist im mitgedrehten Koordinatensystem: Hier entspricht die Drehung der zweiten Achse im 90° im Raum gerade einer Drehung des Zustandsvektors um 180° um die z-Achse. In dieser Sichtweise erfolgen die Drehungen bei den Verzögerungsplatten in dieselbe Richtung – jedoch mit der zusätzlichen Drehung um die z-Achse, so dass sich auch hier für alle Farben die Drehungen genau zu $\lambda/2$ ergeben (Abb. 13).

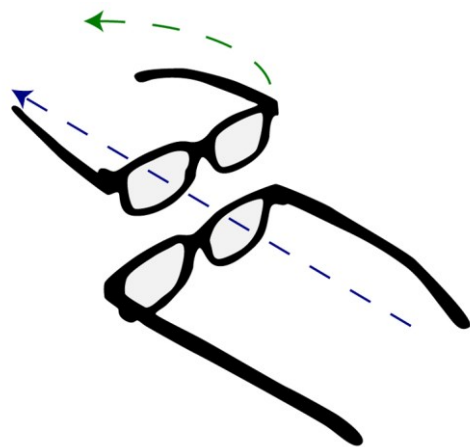


Abb. 14 Skizze zu Versuch 3.6 (ii)

ii) Farbänderung bei Transmission

Ein ähnlicher aber optisch deutlich schwächerer Effekt ist zu beobachten, wenn durch zwei hintereinander stehende Brillen in Transmission geschaut wird. Hierbei zeigen die Stirnseiten der Brillen gegeneinander, aber im Vergleich zum ersten Teil des Experiments wird durch zwei gleiche Brillenseiten, z.B. zwei linke, geschaut (siehe Abb. 14). Wird nun eine der Brillen gegen die andere um 90° (um die Richtung der Lichtausbreitung) gedreht, so ergibt sich je nach Winkel ein leicht grünlicher Farbstich.

Grund hierfür ist, dass in dieser Konfiguration die Verzögerungsplatten einmal in Richtung $+\lambda/2$ und einmal Richtung $-\lambda/2$ durchtreten werden. Ohne eine Drehung der Brillen gegeneinander werden so alle Farben wieder auf den Ursprungspunkt abgebildet. Bei Drehung einer Brille stimmt die Bedingung aber nur noch für das grüne Licht perfekt und die anderen Farben des Lichts werden ein wenig absorbiert. Dies nehmen wir als leichten Grünstich wahr (da alle Farben immer noch mit relativ hoher Intensität transmittiert werden, stellt sich aber kein starker Farbeindruck ein).

3.7 Kippen um die schnelle und langsame Achse

Für den letzten Versuch werden wieder wie in Versuch 3.5 zwei Brillen gegeneinander gelegt und eine weiße Lichtquelle durch beide Brillen betrachtet. Nun werden beide Brillen um die -45° -Achse gekippt. Wir verwenden den Begriff „Kippen“ um ihn von den verschiedenen „Drehungen“ der letzten Versuchsteile abzugrenzen. Die Lage der hier gemeinten Kipp-Achse haben wir in Abb. 2, die Bewegung in Abb. 15

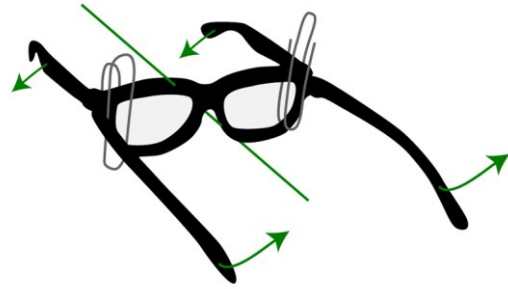


Abb. 15 Skizze zu Versuch 3.7: Die grünen Pfeile deuten die Bewegung der Brillenbügel beim Kippen um die grüne Achse an.



Abb. 16 Nach dem Kippen ist das Licht der weißen Lampe in einem Brillenglas blau und im anderen gelb gefärbt.

skizziert. In Abb. 16 kann man in der Fotografie zusätzlich die Ausrichtung der Brillen erkennen.

In Abb. 16 sehen wir einmal den Durchgang von Licht nach Kippen um die -45° Achse. Das Licht ist nach Durchgang durch die gekippten Brillen in einem Brillenglas blau und im anderen Brillenglas gelb

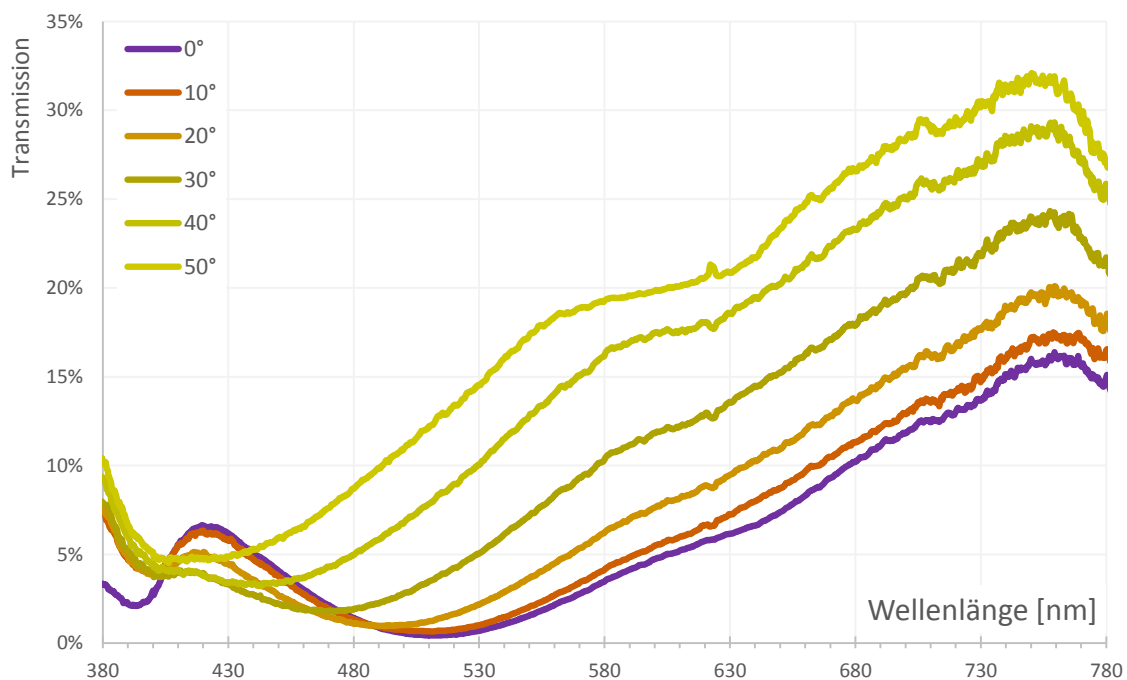


Abb. 17 Verlauf der Transmissionskurve bei Kippung um die langsame Achse.

gefärbt. Die Färbung hängt hierbei nicht von der Richtung ab, in die gekippt wird, sondern von der Achse. Wird statt um -45° um $+45^\circ$ gekippt, so vertauschen sich die Blau- und Gelbfärbung.

Dieser recht spektakuläre Effekt ist jedoch nicht so einfach zu erklären. Zunächst können wir aber festhalten, warum sich überhaupt unterschiedliches Verhalten beim Kippen um die $+45^\circ$ und -45° Achse einstellen sollte. Hierzu betrachten wir noch einmal die Funktionsweise der Verzögerungsplatte: In Abhängigkeit der Polarisation zeigt sie unterschiedliche Brechungsindizes, wobei die Richtungen mit größtem und niedrigstem Brechungsindex senkrecht zueinander stehen (schnelle und langsame Achse). Damit aus linear polarisiertem Licht zirkular polarisiertes Licht entstehen kann (und umgekehrt), müssen die schnelle und die langsame Achse der Verzögerungsplatte in 45° -Winkel gegenüber dem einfallenden linear polarisierten Licht stehen. Wir hatten im Versuchsteil 3.4 die Achse des linearen Polarisators bestimmt. Die schnelle und langsame Achse der Verzögerungsplatte stehen hierzu im 45° -Winkel (vgl. Abschnitt 2). Weiterhin haben wir gesehen, dass die Richtung des Phasenverschiebs für das linke und rechte Brillenglas unterschiedlich ist. Dies bedeutet aber auch effektiv, dass für beide Brillengläser die schnelle und langsame Achsen vertauscht sind und sie sich beim Kippen um die jeweiligen Achsen entgegengesetzt verhalten.

Veränderung beim Kippen

Der unterschiedliche Farbeindruck beim Kippen um die Achsen kommt zustande, da sich die Wellenlänge optimaler Auslöschung mit steigendem Kippwinkel verschiebt. Um den Effekt zu untersuchen, haben wir

wieder die Transmission durch die Folien in Abhängigkeit des Kippwinkels für Kippen um beide Achsen bestimmt. In Abb. 17 sehen wir, dass sich die Wellenlänge minimaler Transmission beim Kippen um die Achse, die wir im Folgenden mit G bezeichnen, mit steigendem Winkel in Richtung kurzer Wellenlängen verschiebt. Das bedeutet auch, dass mehr Licht längerer Wellenlängen transmittiert wird und das resultierende Licht dann gelblich erscheint. Ebenso ist in Abb. 18 zu erkennen, wie sich bei der Kippung um die andere Achse, die wir mit B bezeichnen, die Wellenlänge minimaler Transmission in Richtung langer Wellenlängen verschiebt. Somit wird mehr Licht kurzer Wellenlänge transmittiert und das resultierende Licht erscheint bläulich.

Wenn wir weiterhin annehmen, dass die Absorption des Lichtes hauptsächlich von Gleichung (I) bestimmt ist, so müssen wir zwei Effekte berücksichtigen: Zum einen, wie sich die optische Weglänge d bei Änderung des Winkels verändert und wie sich die Differenz der effektiven Brechungsindizes ändern, wenn das Licht nicht mehr senkrecht auf die Folie trifft.

Der optische Weg wird beim Kippen unabhängig von der Kippsachse vergrößert. Bei Kippen um den Winkel α ergibt sich die optische Weglänge zu

$$d' = d / \sqrt{1 - \sin^2(\alpha)/n^2}, \quad (II)$$

wobei d die Schichtdicke und n der Brechungsindex für die betrachtete Achse und Richtung ist. Nach Gleichung (I) führt eine effektive Vergrößerung der optischen Dicke d dazu, dass sich die Phasenverschiebung vergrößert und sich das

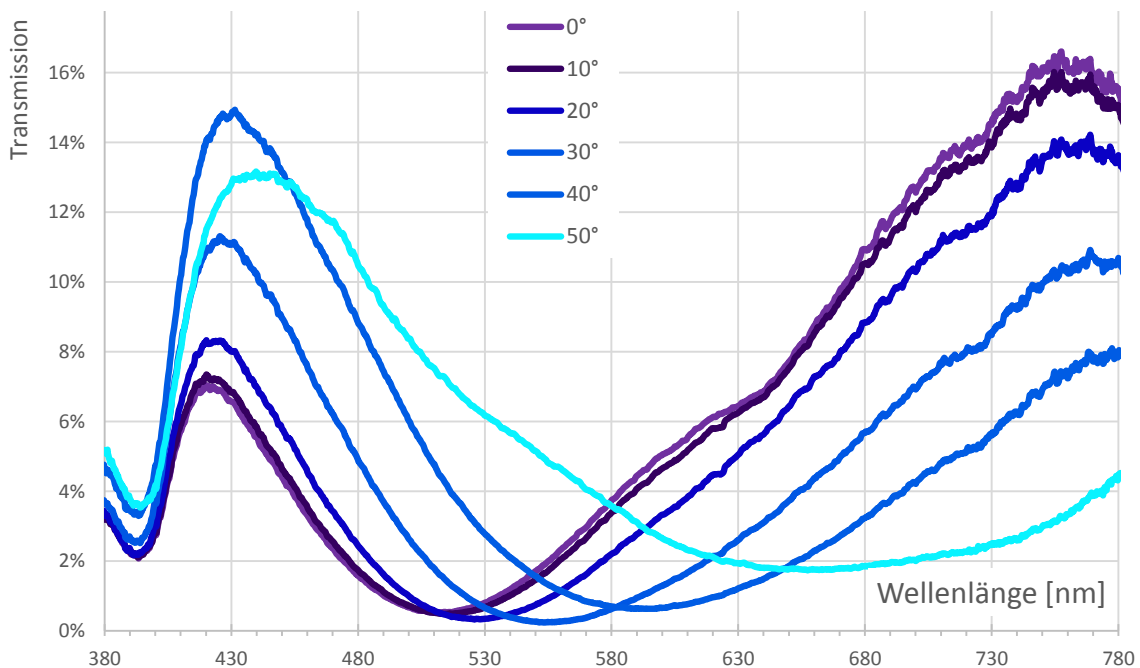


Abb. 18 Verlauf der Transmissionskurve bei Kippen um die schnelle Achse.

Minimum der Transmission in Richtung großer Wellenlängen verschiebt. Die Anteile des Lichts im gelben und roten Spektralbereich werden so stärker absorbiert und das resultierende Licht ist blau.

Einfluss der Kippachse

Die Veränderung der Differenz der Brechungsindizes wird durch die Änderung der Brechungsindizes bestimmt, wenn das Licht nicht senkrecht, sondern unter einem Winkel auf die Folie trifft. In diesem Fall kann der Wert der Brechungsindizes entlang der gekippten Achsen aus dem Indexellipsoid (auch Ellipsoid der Wellennormalen oder optische Indikatrix genannt) abgelesen werden (vgl. 14.2.3 in [8]).

In Abb. 19 haben wir die Situation schematisch dargestellt (wir bezeichnen die Achsen im Indexellipsoid entsprechend der zugehörigen räumlichen Achsen): Im ungekippten Fall sind die Achsen gerade so gewählt, dass die schnelle und die langsame Achse möglichst unterschiedlich sind. Dies soll durch die beiden senkrechten magentafarbenen Pfeile (entlang der G- und B-Achse) in der Abbildung dargestellt werden. Der Abstand des Ursprungs zur Oberfläche des Ellipsoids entspricht gerade dem Brechungsindex in die jeweilige Richtung (in Abb. 18 durch die Länge der Pfeile dargestellt). Daher ist die lange Achse des Ellipsoids (B) die langsame optische Achse und die kurze Achse des Ellipsoids (G) die schnelle optische Achse.

Werden nun ausgehend von dieser Situation die Brillen so gekippt, dass das Licht nicht mehr senkrecht auf die Brillengläser trifft, so entspricht dies im Modell einer Drehung der Pfeile im Indexellipsoid. Bei einer Kippung um die langsame Achse (B) bleibt die in diese Richtung zeigende Komponente unberührt und die vorher in Richtung G zeigende Komponente wird um die B-Achse gedreht (auf Position (1)). Da der Ellipsoid zwei kurze und eine lange Achse hat, ändert sich bei dieser Drehung die Differenz der Brechungsindizes entlang der beiden Achsen kaum. Laut Gleichung (I) bedeutet das, dass sich bei dieser Kippung um die B Achse hauptsächlich die Vergrößerung der effektiven Schichtdicke d' von Bedeutung ist und sich somit das Minimum der Absorption Richtung langer Wellenlängen verschiebt und das Bild bläulich erscheint.

Wird andererseits um die schnelle Achse gekippt, so bleibt die in Richtung G im Indexellipsoid zeigende Komponente gleich, während sich die vorher in Richtung B zeigende Komponente um die Achse G dreht (auf Position (2)). Hierdurch ändert sich aber die Differenz der Brechungsindizes. Sie wird nämlich mit steigendem Winkel immer kleiner. Nach Gleichung (I) ergeben sich nun zwei gegenläufige Effekte: beim Kippen um die G-Achse vergrößert sich wieder die effektive Schichtdicke d' , wobei gleichzeitig die Differenz der Brechungsindizes kleiner wird. In der Praxis überwiegt aber der zweite

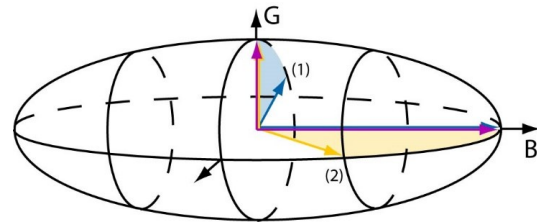


Abb. 19 Darstellung des Fresnel-Ellipsoids: Angedeutet sind die Drehung um die Achse B (1) und G (2). Eine Drehung um die B-Achse resultiert in einer Verschiebung der Lichtfarbe in Richtung blau, eine Drehung um die G-Achse in einer Verschiebung Richtung gelb.

Effekt, so dass sich das Minimum der Absorption in Richtung kurzer Wellenlängen verschiebt und das Bild dadurch gelblich erscheint.

Vergleich mit den Ergebnissen der Messung

Um für eine gegebene Situation die Parameter zu bestimmen, haben wir die im letzten Abschnitt beschriebenen Effekte modelliert um die Daten der Messungen aus Abb. 17 und Abb. 18 zu reproduzieren. Da unsere Messung aber noch einige Freiheiten zulässt, schwanken die sich hierbei ergebenden Werte für die Brechungsindizes im Bereich 1,57 – 1,59. Es gibt verschiedene transparente Kunststoffe, deren Brechungsindex diesem Bereich liegt (vgl. z.B. Kap 3 in [7]). Die Differenz der schnellen und langsamen Achse liegt bei etwa 0,0006.

Bei der numerischen Bestimmung der Parameter zeigt sich jedoch, dass die optimalen Werte empfindlich von Messungenauigkeiten der Eingangsparameter abhängen. Mit unseren experimentellen Mitteln können wir plausibel machen, dass die Größenordnungen der Parameter stimmen, aber um die Verlässlichkeit der Daten zu bewerten wären weitere Messungen nötig. Weiterhin

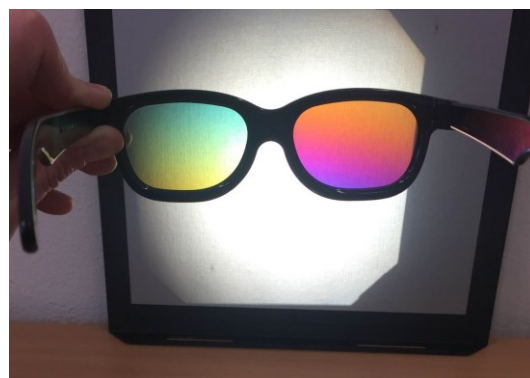


Abb. 20 Beispiel für einen mit der 3D-Brille sichtbaren Farbeffekt: Licht, welches durch einen linearen Polarisator und ein Glimmerplättchen tritt, wird an einem polarisationserhaltenden Schirm reflektiert. Durch die 3D-Brille betrachtet, wird das reflektierte Licht farbig.

sind wir in unserem Modell von einem homogenen Material ausgegangen. Ob diese Annahme gerechtfertigt ist, ließ sich nicht überprüfen. Leider war es uns auch nicht möglich, genauere Angaben zu den optischen Eigenschaften der Folie von einem Hersteller zu erfahren.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die einfache Verfügbarkeit und die geringen Kosten von polarisierenden Folien aus 3D-Brillen ermöglichen einen vielfältigen Einsatz dieser Folien im Rahmen des Unterrichts. Wir haben eine Reihe von möglichen Experimenten gezeigt, mit denen sich Eigenschaften der linearen und zirkularen Polarisation von Licht demonstrieren lassen. Uns war hierbei insbesondere wichtig zu zeigen, dass auch mit diesen einfachen Geräten bereits interessante Effekte (wie der Einfluss der Wellenlänge) dargestellt werden können.

Neben den hier vorgestellten Versuchen bieten die 3D-Brillen noch eine Reihe weiterer Einsatzmöglichkeiten. So können sie auch vergleichsweise bequem zur Untersuchung von Spannungspolarisation oder der Wirkung dünner Glimmerplatten verwendet werden. In Abb. 20 zeigen wir als Beispiel ein Foto, bei dem eine mit Licht, welches durch einen Polarisator und ein schräggehendes Glimmerplättchen auf einen polarisationserhaltenden Schirm trifft, durch eine 3D-Brille betrachtet wird. Hier erscheint das Licht ohne Brille farblos, durch die Brillen gesehen jedoch farbig, wobei die Farben jeweils komplementär zueinander sind.

5. Literatur und Kommentare

- [1] Wir verwenden den Begriff „Brillenglas“ in dieser Arbeit umgangssprachlich auch dann, wenn die „Gläser“ eigentlich aus Kunststofffolien bestehen.
- [2] Trendel, Georg (2007) Kino - ein sinnliches Vergnügen. Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule (Themenheft: Physik im Film), 56 (7), S. 5-13
- [3] Kauff, P.; Müller, K.; Schäfer, R.; Zilly, F. (2012) Dreidimensional fernsehen : 3D-TV von der Aufnahme bis zum Zuschauer, Physik in unserer Zeit, 43 (3), S. 116-123
- [4] van Lück, J. (2013) 3D-Kino im Klassenraum, Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht, 66 (5), S. 269-273
- [5] Bergmann, A; Küchenmeister, J; Langendörfer, A; Lang, C; Hasenohr, A; Quast, G. (2015) 3D-Kino im Schülerversuch. Stereoskopie und Verfahren zur Erzeugung von 3D-Projektionen, Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule, 64 (6), S. 32-41
- [6] Richtberg, S.; Girwidz, R.; Kunz, J.M. (2016) Experimente für einen kontextorientierten Physikunterricht: Zur Funktion und zum Aufbau einer LCD-Zelle, PhyDid B (Beiträge zur DPG Frühjahrstagung 2016 in Hannover), DD 05.38 (Online:<http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/706>)
- [7] Naumann, H.; Schröder, G.; Löffler-Mang, M.; (2014) Handbuch Bauelemente der Optik: Grundlagen, Werkstoffe, Geräte, Messtechnik (7. Auflage), Karl Hanser Verlag (München, Wien)
- [8] Born, M.; Wolf, E. (1980) Principles of optics (6. Auflage), Pergamon Press (Oxford, New York, Kronberg)
- [9] Niedrig, H. (Hrsg.) (2004) Bergmann, Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik: Optik: Wellen- und Teilchenoptik (10. Auflage), Verlag Walter de Gruyter (Berlin)
- [10] Hecht, E. (2009) Optik (5. Auflage), Oldenbourg Wissenschaftsverlag (München)
- [11] Goldstein, D.H. (2011) Polarized Light (3. Auflage), CRC Press (Boca Raton, London, New York)
- [12] Grebe-Ellis, J. (2005). Grundzüge einer Phänomenologie der Polarisation., In: Phänomenologie in der Naturwissenschaft. 3., Logos-Verlag (Berlin)
- [13] Schneider, W.B. (1998) Eine überraschende Eigenschaft von Plexiglas, Physikalische Blätter, 54 (4), S. 349
- [14] Shaw, J.A., Vollmer, M. (2017) Blue sun glints on water viewed through a polarizer, Applied Optics, 56/19, G36