

# Polarisation und 3D-Kino

## Stichworte zur Vorbereitung:

Elektromagnetische Wellen, Wellenvektor, Wellenlänge, elektrisches Feld, Polarisation, Polarisationsmanipulation, Doppelbrechung

## Hinweis

Diese Versuchsanleitung stellt eine verkürzte Version der Versuchsbeschreibung „Polarisation und 3D-Kino“ von Thorlabs GmbH dar [1]. Daher wird für weiterführende Erklärungen die Lektüre von [1] empfohlen.

## 1 Grundlagen

Elektromagnetische Wellen sind transversale Wellen, die senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung schwingen. Dabei ist die Richtung des elektrischen Feldes die Polarisationsrichtung. Es werden vier mögliche Fälle unterschieden:

- unpolarisiertes Licht: das Feld schwingt ungeordnet;
- linear polarisiertes Licht: die Welle schwingt immer nur in eine Richtung;
- zirkular polarisiertes Licht: der Vektor des elektrischen Feldes beschreibt eine kreisförmige Schraubenbewegung um die Ausbreitungsrichtung;
- elliptisch polarisiertes Licht: der Feldvektor beschreibt eine Ellipse um die Ausbreitungsrichtung.

Im Folgenden werden die Spezialfälle von linearer und zirkularer Polarisation genauer untersucht. Wir verwenden die komplexe Schreibweise.

### 1.1 Lineare Polarisation

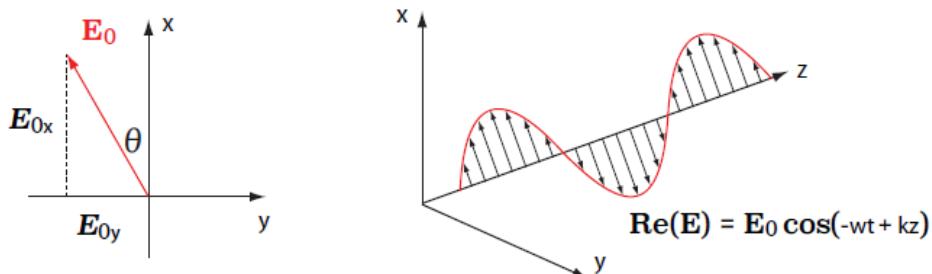
Eine ebene Welle, die sich in  $z$ -Richtung ausbreitet, kann beschrieben werden durch:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{(ikz-i\omega t)} \quad (1)$$

Wenn dabei der Vektor  $\mathbf{E}_0 = E_{0x}\hat{\mathbf{e}}_x + E_{0y}\hat{\mathbf{e}}_y$  immer in die gleiche Richtung zeigt, nennen wir das Lichtfeld linear polarisiert. Beide Komponenten der Welle

$$E_x = E_{0,x} e^{(ikz-i\omega t)}, E_y = E_{0,y} e^{(ikz-i\omega t)} \quad (2)$$

sind in Phase. Abbildung 1 zeigt den Realteil des elektrischen Feldes zu einem festen Zeitpunkt.



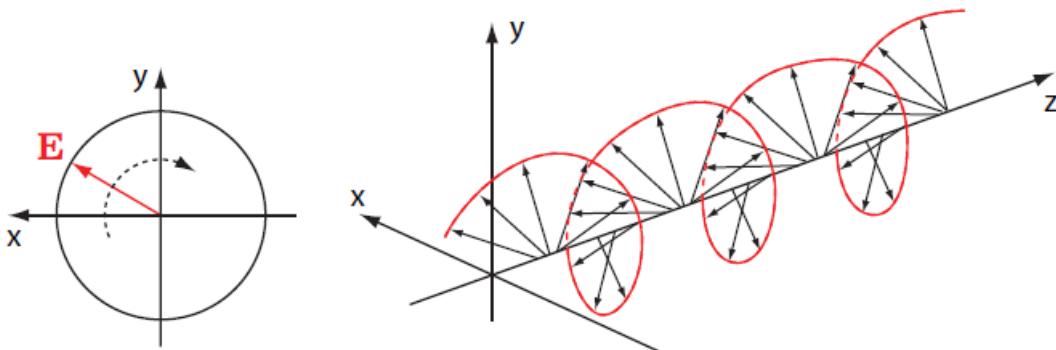
**Abb. 1** Momentaufnahme des elektrischen Feldvektors bei linear polarisiertem Licht (Abbildung entnommen aus [1])

## 1.2 Zirkulare Polarisation

Im Fall von zirkular polarisiertem Licht sind  $E_{0,x}$  und  $E_{0,y}$  gleich groß, aber die  $x$ - und die  $y$ -Komponente des Feldes sind zueinander um  $\pi/2$ , also eine viertel Wellenlänge, verschoben<sup>1</sup>.

$$E_x = E_0 e^{(ikz-i\omega t)}, E_y = E_0 (\pm i) e^{(ikz-i\omega t)} \quad (3)$$

Wie in Abbildung 2 dargestellt, beschreibt der Realteil des elektrischen Feldes einen Kreis in der  $xy$ -Ebene und damit eine Schraube in  $z$ -Richtung. Schaut man in Ausbreitungsrichtung, dann dreht sich der Vektor im Fall von  $+i$  [ $-i$ ] in Formel (3) im [gegen den] Uhrzeigersinn. Dies wird als linkszirkular oder  $\sigma^+$  [rechtszirkular,  $\sigma^-$ ] definiert.



**Abb. 2** Momentaufnahme des elektrischen Feldvektors bei zirkular polarisiertem Licht. Abbildung entnommen aus [1]

## 1.3 Polarisator und Gesetz von Malus

Oft bestehen Polarisationsfilterfolien aus gezogenen Folien, bei denen sich durch das Ziehen die enthaltenen langkettigen Moleküle parallel ausrichten. Entlang dieser Ketten finden sich dann bewegliche Ladungsträger, welche die parallele Komponente des elektrischen Feldes absorbieren. Polarisatoren haben damit eine Orientierung, in der sie stark absorbieren und eine Richtung, in der sie stark transmittieren. Wie wird nun eine linear polarisierte Welle transmittiert, wenn sie unter einem Winkel  $\theta$  auf einen Polarisator fällt?

Wie in Abbildung 3 dargestellt zerlegen wir den Vektor des einfallenden Feldes in seine Komponenten parallel und senkrecht zur Durchlassrichtung des Polarisators. Der Anteil, der durchgelassen wird, ist

$$\mathbf{E}_{trans} = E_{0x} \hat{\mathbf{e}}_x = |\mathbf{E}_0| \cos(\theta) \hat{\mathbf{e}}_x \quad (4)$$

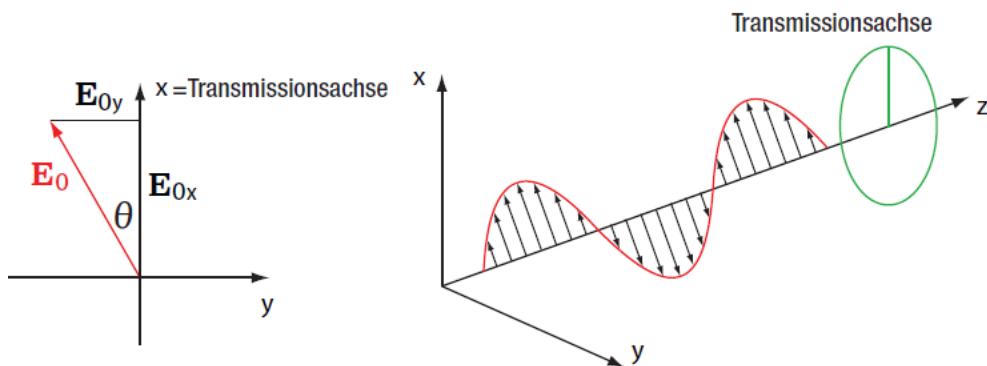
Da sich die Intensität als Betragsquadrat des Feldes ergibt, ergibt sich die folgende Intensitätsverteilung hinter dem Polarisator

$$I = |\mathbf{E}_{trans}|^2 = |\mathbf{E}_0|^2 \cos^2(\theta) = I_0 \cos^2(\theta) \quad (5)$$

wobei  $I_0$  die Intensität des Lichts vor dem Durchtritt durch den Polarisator ist. Gleichung (5) ist als das Gesetz von Malus bekannt.

---

<sup>1</sup> Hier sei kurz erinnert: verschiebt man eine Komponente um  $\pi/2$ , dann multipliziert man mit dem Phasenfaktor



**Abb. 3** Aufteilung des elektrischen Feldes einer linear polarisierten Welle durch einen Polarisator.

Abbildung entnommen aus [1]

## 1.4 Wellenplatten

Optische Verzögerungsplatten sind aus einem doppelbrechenden Material aufgebaut, was zu einer Phasendifferenz zwischen der schnellen und der langsamen Achse der Verzögerungsplatte führt. Durch die doppelbrechenden Eigenschaften des Materials haben beide Achsen einen unterschiedlichen Brechungsindex. Daraus resultiert wiederum eine unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit für diese beiden orthogonalen Achsen: Ist das einfallende Licht parallel zur langsamen Achse polarisiert, so erfährt es einen hohen Brechungsindex, breitet sich also langsam aus. Im Gegensatz dazu ist der Brechungsindex für Licht, das parallel zur schnellen Achse schwingt, klein, wodurch es sich im Vergleich schneller ausbreitet. Der resultierende Phasenunterschied  $\Delta\phi$  zwischen zwei Wellen, die jeweils parallel zu einer der beiden Achsen polarisiert sind, hängt vom gewählten Material, von der Dicke der Verzögerungsplatte und der Wellenlänge des einfallenden Lichts ab. Er ergibt sich als

$$\Delta\phi = \frac{2\pi d(n_1 - n_2)}{\lambda} \quad (6)$$

wobei  $n_1$  und  $n_2$  die Brechungsindizes und  $d$  die Dicke der Platte ist.

Bei einem  $\lambda/4$ -Plättchen (bzw. wie in diesem Kit einer  $\lambda/4$ -Folie) sind die Parameter nun so gewählt, dass die Verzögerung der einen gegenüber der anderen Achse genau eine viertel Wellenlänge, bzw. einer Phase von  $\pi/2$  entspricht.

Insbesondere ergibt sich dadurch folgende Eigenschaft: Trifft linear polarisiertes Licht auf ein  $\lambda/4$ -Plättchen, das in  $45^\circ$ -Orientierung dazu steht (die Polarisationsrichtung ist also genau zwischen langsamer und schneller Achse), dann ist das transmittierte Licht zirkular polarisiert. Die mathematische Beschreibung ist in allgemeiner Form im nächsten Unterkapitel diskutiert.

An dieser Stelle soll noch ein wichtiger Aspekt betont werden: Wie aus Gleichung (7) zu ersehen ist, ist der Effekt des  $\lambda/4$ -Plättchens stark wellenlängenabhängig. Insbesondere bedeutet dies, dass ein  $\lambda/4$ -Plättchen immer nur für eine Wellenlänge optimal funktioniert. Für alle anderen Wellenlängen ergibt sich keine zirkulare Polarisation mehr, sondern „nur“ noch elliptische Polarisation.

## 1.5 Optische Aktivität

Wie wir in diesem Versuchspaket experimentell zeigen, dreht eine Lösung aus Zucker und Wasser die Polarisierung des Lichts. Dies lässt sich verstehen, wenn man weiß, dass Zuckermoleküle in ihrer Struktur einen Drehsinn aufweisen. Diese Drehrichtung führt dazu,

dass links- und rechtszirkular polarisiertes Licht anders transmittiert wird. Es ist naheliegend, dass Licht, welches den gleichen Drehsinn (Chiralität) hat wie das Molekül, andere Transmissionseigenschaften (also einen anderen Brechungsindex) aufweist als Licht, das in der anderen Drehrichtung schwingt.

Der Drehwinkel ist proportional zur Länge  $L$ , die das Licht (durch die Zuckerlösung) durchläuft. Weiterhin ist der Drehwinkel auch proportional zur Konzentration  $c$ , denn diese bestimmt den Brechungsindex. Der Drehwinkel folgt also folgender Formel:

$$\varphi = \varphi_0 \cdot c \cdot L \quad (7)$$

Die Proportionalitätskonstante  $\varphi$  ist eine temperatur- und wellenlängenabhängige Größe, die natürlich auch von der Art des Zuckers abhängt.

Der Effekt dieser Polarisationsdrehung wird in der Industrie häufig dazu verwendet, die Zuckerkonzentration von verschiedenen Lösungen zu bestimmen. Die hierbei eingesetzten Geräte werden dann Durchflusspolarimeter oder Saccharimeter genannt.

Ein interessanter Aspekt ist, dass es unterschiedliche Zucker gibt – handelsüblicher Zucker und Sorbose drehen die Polarisation in unterschiedliche Richtungen!

## 1.6 Spannungsdoppelbrechung

Doppelbrechung ist eine Eigenschaft von Medien, bei denen Licht je nach Ausbreitungsrichtung unterschiedlich transmittiert wird. Diese Medien werden als *anisotrop* bezeichnet. Die Konsequenz sind unterschiedliche Brechungsindizes für unterschiedliche Ausbreitungsrichtungen und Polarisierungen. Ein typisches Beispiel hierfür ist Kalkspat.

Interessanterweise tritt dieser Effekt nicht nur bei anisotropen Stoffen auf: Belastet man manche Körper, die aus einem isotropen Material aufgebaut sind, setzt sie also Zug, Druck, einer Scherung oder einer sonstigen elastischen Verformung aus, so tritt der Effekt auch in diesen Medien auf.

Wird also beispielsweise ein Plastikstück an einer Stelle einem starken Druck ausgesetzt, so ergibt sich je nach Entfernung zu dieser Stelle eine unterschiedliche Verspannung im Material – und damit ein unterschiedlicher Brechungsindex und eine unterschiedlich starke Polarisationsdrehung. Beide Effekte sind wiederum wellenlängenabhängig. Stellt man besagtes Stück Plastik zwischen zwei senkrechte Polarisatoren, so sieht somit man je nach Verspannung im Material unterschiedliche Farben. Dieses Prinzip ermöglicht damit insbesondere berührungslose Materialanalyse.

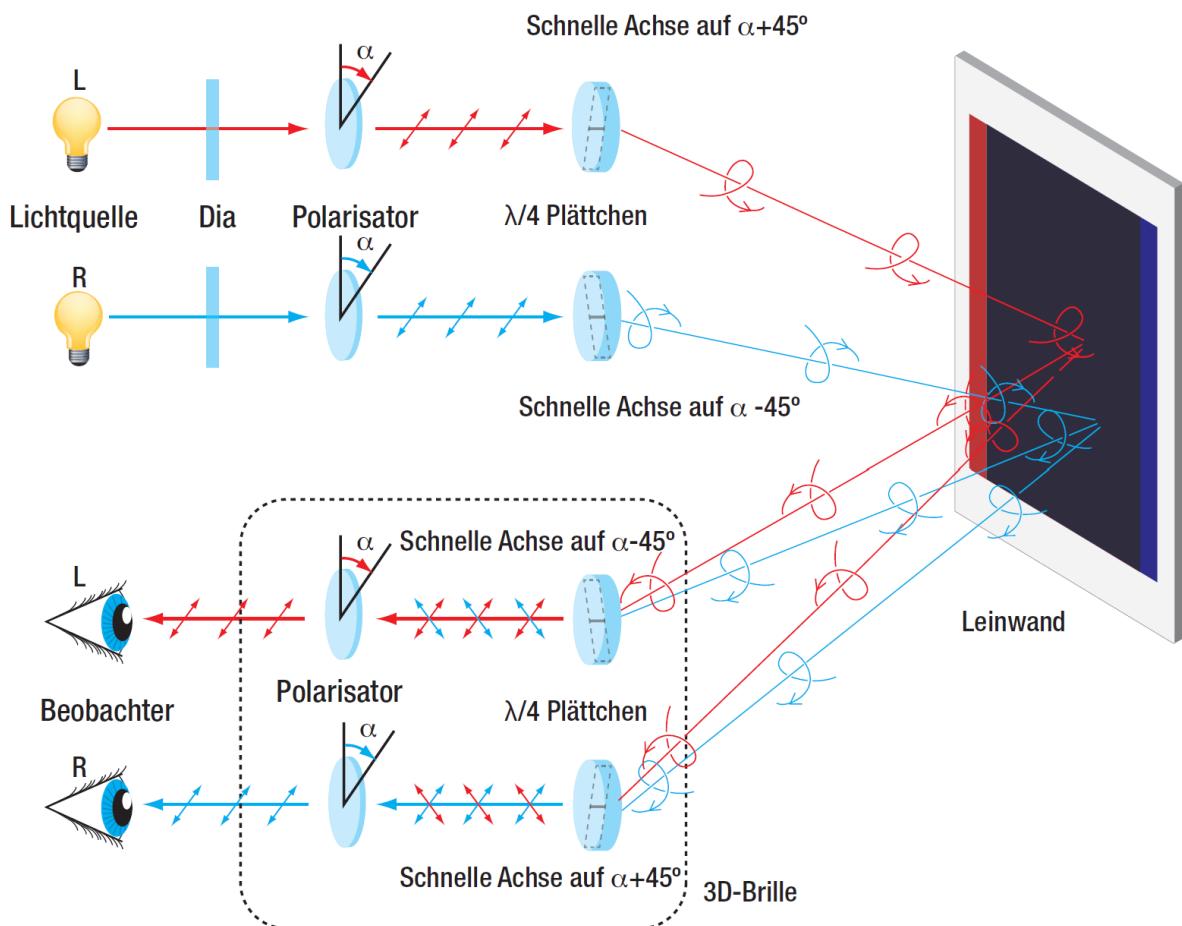
## 1.7 Stereoskopie und 3D-Darstellungen

Der Begriff „Stereoskopie“ bezeichnet den Effekt, dass die richtige Überlagerung von zwei Bildern zu einem Tiefeneindruck führen kann. Die Tiefenwahrnehmung des Menschen basiert darauf, dass beide Augen jeweils ein Bild der gleichen Umgebung wahrnehmen, jedoch aus einer leicht versetzten Perspektive. Aus den unterschiedlichen Perspektiven errechnet das Gehirn dann die dreidimensionale Position des Objekts in Bezug auf den Betrachter.

Das Grundprinzip von jeder 3D-Darstellung (Kino oder Bilder) ist es nun, zwei aus verschiedener Perspektive aufgenommene Bilder in die Augen des Betrachters zu leiten, wobei jeweils nur ein Bild in ein Auge fallen darf. Aus den beiden unterschiedlichen Bildern konstruiert das Gehirn dann analog zum normalen Sehen einen Tiefeneindruck. Im Folgenden werden wir nun verschiedene Verfahren diskutieren, wie man bei einer 3D-Projektion erreicht, dass wirklich nur ein Bild in ein Auge fällt und somit unterschiedliche Informationen an beiden Augen eintreffen.

Das Problem der linearen Polarisatoren führt nun schlussendlich zum RealD-Verfahren, welches das heute am weitesten verbreitete 3D-Kino-Projektionsverfahren darstellt und mit zirkularer Polarisation arbeitet. Hier werden zunächst vor jedes Dia jeweils ein linearer Polarisator und ein  $\lambda/4$ -Plättchen gestellt. Stellt man alle Elemente richtig zueinander ein, so erhält man für den Lichtweg des einen Dias rechtszirkulare Polarisation und entsprechend für den anderen Lichtweg linkszirkulare Polarisation, vgl. Abbildung 4. Auch bei dieser Technik ist ein polarisationserhaltender Schirm nötig. Trifft nun das rechtzirkular polarisierte Licht auf den Schirm, dann wird es reflektiert und ist durch den Phasensprung nach der Reflexion nun linkszirkular polarisiert. Analog ist der zunächst linkszirkulare Anteil nach der Reflexion rechtzirkular polarisiert.

An der Brille passiert der Prozess rückwärts: Das zirkular polarisierte Licht tritt durch ein  $\lambda/4$ -Plättchen und ist danach linear polarisiert. Danach trifft es wieder auf einen linearen Polarisator. Je nach Einstellung wird es dann dort entweder transmittiert oder absorbiert. *Beide Folien sind in der Brille aneinander geklebt!*



**Abb. 4** Prinzipskizze der RealD-3D-Technik. Das Licht aus den Dias wird über einen Polarisator erst linear und dann durch ein  $\lambda/4$ -Plättchen zirkular polarisiert. Nach der Reflexion an der Leinwand erlaubt die Brille, bestehend aus je einem  $\lambda/4$ -Plättchen und einem Polarisator, je nach Auge nur den Durchtritt von links- oder rechtszirkular polarisiertem Licht. Abb. entnommen aus [1].

Die Methode der 3D-Projektion mittels zirkular polarisierten Lichts umgeht also insbesondere das Problem der Kopfneigung sehr elegant, weil eine Neigung bei zirkular polarisiertem Licht nur einem Phasenversatz entspricht und sich nicht auf das wahrgenommene Bild auswirkt.

Nichtsdestotrotz gibt es auch bei diesem Verfahren kleine Nachteile: zum ersten muss das Licht durch insgesamt 4 Folien treten, die alle keine 100%ige Transmission aufweisen. Insgesamt wird das Bild also deutlich weniger hell, was leistungsstarke Projektoren nötig macht. Ein weiterer Aspekt sind die Transmissionseigenschaften des  $\lambda/4$ -Plättchens: Dieses optische Bauteil erzeugt immer nur für eine Wellenlänge einen perfekten Phasenversatz zwischen der langsamen und der schnellen Achse. Das heißt, dass nur für eine Wellenlänge das Licht perfekt zirkular polarisiert ist – alle anderen Wellenlängen werden also eine leicht elliptische Polarisation aufweisen. Dies führt dann ebenfalls dazu, dass die linkszirkularen Folien nicht perfekt den rechtszirkularen Teil absorbieren (zumindest für die meisten Wellenlängen).

## 2 Versuchsaufbau

Abbildung 5 gibt einen Überblick über die in diesem Versuch verwendeten Komponenten.



**Abb. 5** Foto der im Versuch verwendeten Komponenten. Abb. entnommen aus [1]. 1. Schirm, 2. Glascontainer für Zuckerlösung (leicht abgewandelt), 3. Grüner Laser, 4. Wellenplatten, 5. Linearpolarisatoren, 6. Linsen, 7. Halogenlampen, 8. 3D Brillen, 9. Brille, 10. Photodetektor

## 3 Kontrollfragen

- Ist Licht eine Transversal- oder Longitudinalwelle?
- Was versteht man unter polarisiertem Licht? Welche Arten gibt es?
- Wie kann man die Polarisationsrichtung ändern?
- Wie kann man die Polarisationsart wechseln?
- Ist das Licht von Sonne/Laser/Glühlampe polarisiert?
- Ist das Auge polarisationsempfindlich?

## 4 Aufgaben

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die durchzuführenden Aufgaben und ihre ungefähre Dauer an. Bitte denken Sie bei der Auswertung aller Teilversuche an die Unsicherheitsangaben bzw. -fortpflanzung (mittels Größtunsicherheitsmethode).

**Tabelle 1 Aufgabenüberblick mit geschätzter Durchführungsdauer**

Kapitel-nummer	Aufgabe	Dauer / Minuten
4.1	Gesetz von Malus	25
4.2	Saccharimetrie	20
4.3	Spannungs-doppelbrechung	20
4.4	Orientierung der Polarisator Folien	10
4.5	3D-Projektion	60

### 4.1 Gesetz von Malus

Zeigen Sie die Gültigkeit des Gesetzes von Malus.

**Durchführung:** Platzieren Sie einen Polarisator vor den Laser. Orientieren Sie ihn so, dass die dahinter beobachtete Helligkeit maximal ist (Augenmaß reicht). Messen Sie in  $10^\circ$ -Schritten die Spannung des Photodetektors.

**Wichtig:** Schließen Sie die Iris so weit, dass die Spannung am Photodetektor immer kleiner als 220 mV ist. Oberhalb dieser Spannung ist die Antwort des Detektors auf die einfallende Intensität nicht mehr linear. Stellen Sie nun einen weiteren Polarisator in den Strahlengang und platzieren Sie dahinter den Photodetektor, wie in Abbildung 6 gezeigt.



**Abb. 6** Aufbau zur Vermessung des Gesetzes von Malus: Laser, zwei lineare Polarisatoren und der Photodetektor [1]

## 4.2 Saccharimetrie

Tritt linear polarisiertes Licht durch eine Zuckerlösung, dann wird die Polarisation proportional zur Konzentration und zur Länge des Lichtwegs durch die Zuckerlösung gedreht. Nehmen Sie für den Versuch eine Proportionalitätskonstante von  $\varphi_0 = 6,65^\circ /(\text{cm g/cm}^3)$  an. Bestimmen Sie aus der Drehung der Polarisationsrichtung durch den Zuckertank und seiner Länge die Zuckerkonzentration.

**Durchführung:** Platzieren Sie zunächst einen Laser vor zwei senkrecht zueinander eingestellten Polarisatoren.

Stellen Sie nun das Glas-Bassin zwischen die Polarisatoren. Es wird nun wieder Licht durch den letzten Polarisator treten – drehen Sie ihn wieder so, dass kein Licht mehr hindurch fällt und notieren Sie den Winkel, um den Sie den Polarisator gedreht haben. Wiederholen Sie den Versuch fünfmal und Berechnen Sie den Mittelwert und die Standardabweichung für den Drehwinkel. Berechnen Sie nun gemäß Gleichung 7 die Konzentration der Zuckerlösung. Geben Sie die Unsicherheit für die Konzentration explizit über die Größtunsicherheitsmethode an.

## 4.3 Spannungsdoppelbrechung

Verwenden Sie den Plastik-Schraubenschlüssel, um Spannungsdoppelbrechung zu beobachten.

**Durchführung:** Für die Durchführung verwendet man im einfachsten Fall einen Handybildschirm, da dieser bereits linear polarisiertes Licht aussendet. Hat man keinen Bildschirm zu Hand, so stellt man einen Polarisator vor die Halogen-Lampe. Nun nimmt man den zweiten Polarisator und hält ihn sich so vor das Auge, dass die Polarisatoren senkrecht zueinanderstehen. Bringt man jetzt die Plastikbox zwischen die Polarisatoren, dann sieht man, dass an verschiedenen Orten Licht mit verschiedenen Wellenlängen eine Polarisationsänderung erfährt und damit durch den Filter vor dem Auge hindurchtritt. Nehmen Sie mit Ihrem zweiten Handy Ihrer Gruppe ein Foto von der Spannungsdoppelbrechung für das Protokoll auf.

## 4.4 Bestimmung der Orientierung der Polarisator Folien in der 3D-Brille

Ein Polarisator wird hinter die Brille (auf Augenseite) gestellt und von vorne polarisiertes Licht eingestrahlt. Durch Drehen des Polarisators kann der Winkel gefunden werden, bei dem minimale Transmission vorherrscht. Die Folie ist dann zu diesem Winkel um  $90^\circ$  verdreht. Alternativ kann man auch genauer vorgehen und den Polarisator in  $5^\circ$  oder  $10^\circ$ -Schritten durchfahren und die Transmission mit dem Photodetektor vermessen. Tragen Sie die Messwerte in einem Polardiagramm auf, und bestimmen Sie daraus die Polarisationsachse der 3D Brille.

Ein interessanter Aspekt ist hier, dass die Polarisator Folien in der Brille auch manchmal leichte Abweichungen aufweisen, also für beide Augen unterschiedlich sind. Die Abweichungen sind aber oft nicht groß und beeinflussen den 3D-Eindruck nur geringfügig.

## 4.5 3D-Projektion mit Hilfe des RealD-Verfahrens

Bauen Sie die 3D-Projektion mit dem RealD-Verfahren auf.

Drehen Sie leicht den Kopf und verifizieren Sie, dass der 3D-Effekt erhalten bleibt.

**Durchführung:** Die Aufbau- und Justieranleitung ist in den folgenden Unterkapiteln schrittweise beschrieben.

### 4.5.1 Richtige Einstellung der linearen Filter

Um den 3D-Effekt optimal zu erreichen, muss die Orientierung der Polarisatoren und der  $\lambda/4$ -Plättchen im Aufbau auf die Folien in der Brille abgestimmt sein. Die Brille selbst besteht aus zwei aneinander geklebten Folien, vorn eine  $\lambda/4$ -Folie und näher am Auge ein Polarisator. Die Polarisatoren vor beiden Augen sind gleich ausgerichtet, die  $\lambda/4$ -Folien sind gegeneinander um  $90^\circ$  verdreht.

Im ersten Schritt müssen wir nun unsere Polarisatoren im Aufbau auf die Polarisatoren in der Brille abstimmen. Hier nimmt man am besten einen Laser zur Hilfe und arrangiert Brille, Laser und Polarisator wie in Abbildung 7 gezeigt.

- Der Laser fällt durch die umgedrehte Brille, ist danach also linear polarisiert.
- Nun dreht man den linearen Polarisator dahinter bis kein Licht mehr am Schirm ankommt. Achten Sie dabei darauf, dass die Brille auch wirklich gerade im Halter sitzt.
- Jetzt liest man die Grad-Einstellung am Polarisator ab und dreht ihn danach um  $90^\circ$  in die eine oder andere Richtung.
- Ergebnis: Der Polarisator ist jetzt parallel zum linearen Polarisator in der Brille, d.h. die Transmission ist jetzt maximal. Dementsprechend sollte ein heller Punkt am Schirm sichtbar sein.
- Die gleiche Prozedur wird mit dem zweiten Polarisator wiederholt. Man kann es am gleichen „Brillenglas“ durchführen – die linearen Polarisator-Folien in der Brille haben die gleiche Orientierung.



**Abb. 7** Einstellen des Polarisators auf die Polarisator Folie der Brille.  
Abb. entnommen aus [1]

### 4.5.2 Platzierung der Lampen, Dias und Linsen

- Platzieren Sie den Schirm an der Position bei welcher Sie das Bild sehen möchten.
- Positionieren Sie die beiden Lampen an den vorgesehenen Positionen am Ende des Breadboards. Die beiden Lampen sollen leicht zueinander schauen, sodass sie in etwa die gleiche Fläche des Schirms ausleuchten.
- Positionieren Sie die Dias vor den Lampen, sodass das Licht das gesamte Bild ausleuchtet, ohne jedoch am Rand vorbei zu scheinen. Die Orientierung der Dias sollte so gewählt werden, dass nach einer Linse der rote Punkt links unten sichtbar ist.
- Platzieren Sie eine Linse im Strahlengang, sodass das Bild auf dem Schirm scharf aussieht.

#### 4.5.3 Platzierung der Filter und Einstellung der $\lambda/4$ -Plättchen

- Platzieren Sie nun alle Komponenten im Strahlengang, jeweils ein Polarisator und ein  $\lambda/4$ -Plättchen pro Lampe/Linse, wie in Abbildung 8 gezeigt. Die Reihenfolge lautet: Lampe, Dia, Linse, Polarisator,  $\lambda/4$ -Plättchen (vgl. Prinzipskizze in Abbildung 8).
- Einjustieren der  $\lambda/4$ -Plättchen: Setzen Sie die RealD-Brille auf, schließen Sie das linke Auge und schalten Sie die rechte Lampe aus. Drehen Sie nun so lange am  $\lambda/4$ -Plättchen bis das Bild am Schirm weitestgehend dunkel ist.
- Führen Sie das gleiche Prozedere für das andere Auge (bzw.  $\lambda/4$ -Plättchen) durch: Rechte Lampe wieder anschalten, rechtes Auge schließen, linke Lampe abschalten, an dem rechten  $\lambda/4$ -Plättchen so lange drehen, bis es weitestgehend dunkel ist.
- Wenn Sie den Schirm betrachten, sollten Sie das linke Bild mit dem linken Auge, das rechte Bild mit dem rechten Auge sehen.

#### 4.5.4 Finale Justierung

In den vorangegangenen Punkten wurden alle Polarisator Folien und  $\lambda/4$ -Plättchen richtig eingestellt, jetzt müssen noch die Bilder so überlagert werden, dass für den Betrachter wirklich ein 3D-Eindruck entsteht. Das Wichtige ist hier der Versatz zwischen den Bildern.

Setzen Sie für die Feineinstellung die Brille auf. Verschieben Sie nun leicht die Dias vor den Lampen – dadurch wird der Versatz der Bilder auf dem Schirm verändert. Beobachten Sie beim Verschieben der Dias den Schirm und verschieben Sie die Dias so lange, bis sich der Tiefeneindruck optimal einstellt.

Hinweis: Es ist natürlich auch möglich, die Dias fest vor der Lampe zu belassen und die Linsen zu verschieben. Hier sollte nach persönlichem Geschmack die Variante gewählt werden, die einem am besten erscheint. Beim Verschieben der Linsen sollte einem die zusätzliche Schwierigkeit bewusst sein, dass man neben dem Versatz der Bilder leicht auch deren Schärfe am Schirm verändert.

Nach unserer Erfahrung hängt die optimale, relative Position der Bilder am Schirm vom Betrachter ab. Dementsprechend gibt es also keine „richtige“ Justierung. Der Tiefeneindruck hängt immer von der individuellen Wahrnehmung der überlagerten Bilder ab.

Fotografieren Sie am Ende des Teilversuchs Ihren optimierten Aufbau als Dokumentation für das Protokoll. Beschreiben Sie im Protokoll besondere Aspekte oder Schwierigkeiten, die Ihnen bei der Versuchsdurchführung aufgefallen sind.

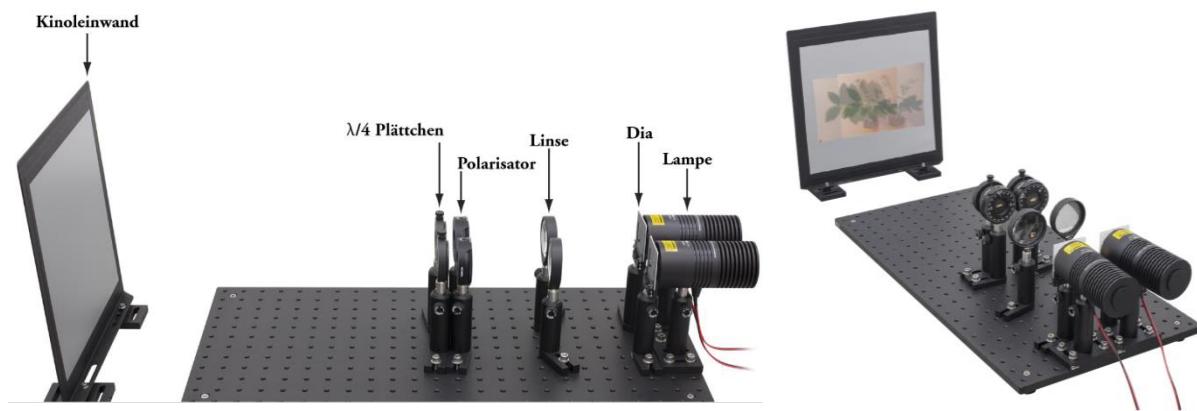


Abb. 8 Zwei Perspektiven des RealD-Versuchsaufbaus. Abb. entnommen aus [1].

## Literatur

[1] Thorlabs Discovery EDU-3D1/M Polarisation und 3D-Kino-Kit Handbuch [2023], Weblink:  
[Microsoft Word - EDU-3D1M Manual German Rev H \(fixed\) \(thorlabs.com\)](https://www.thorlabs.com/Portals/0/Products/Discovery%20EDU-3D1M%20Manual%20German%20Rev%20H%20(fixed).pdf)