

Vorbereitung

3D-Kino

1. Allgemeines zur Polarisation

1.1 Lineare Polarisation

Gehen wir von einer ebenen Welle aus, die sich in z-Richtung ausbreitet:

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

Wenn nun der Vektor $\mathbf{E}_0$ immer in die gleiche Richtung zeigt, also diese Form hat

$$\mathbf{E}_0 = E_{0x} \hat{\mathbf{e}}_x + E_{0y} \hat{\mathbf{e}}_y \quad (2)$$

dann nennen wir das Lichtfeld *linear polarisiert*. Beide Komponenten der Welle

$$E_x = E_{0x} e^{(ikz - i\omega t)}, \quad E_y = E_{0y} e^{(ikz - i\omega t)} \quad (3)$$

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

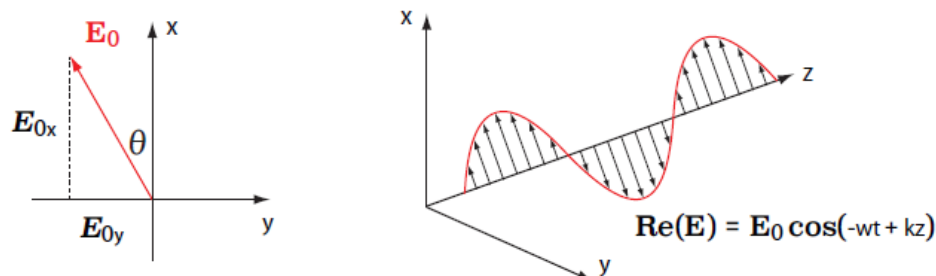


Abbildung 1: Momentaufnahme des elektrischen Feldvektors bei linear polarisiertem Licht

1.2 Zirkulare Polarisation

Im Falle von zirkular polarisiertem Licht sind E_{0x} und E_{0y} gleich groß, aber die x- und die y-Komponente des Feldes sind zueinander um $\pi/2$, also eine viertel Wellenlänge, verschoben¹.

$$\begin{aligned} E_x &= E_0 e^{(ikz - i\omega t)}, \\ E_y &= E_0 (\pm i) e^{(ikz - i\omega t)} \end{aligned} \quad (4)$$

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 $+i$ in Formel (4) im Uhrzeigersinn. Dies wird als *linkszirkular* oder σ^+ definiert. Entsprechend

¹ Hier sei kurz erinnert: verschiebt man eine Komponente um $\pi/2$, dann multipliziert man mit dem Phasenfaktor $e^{\pm(i\pi/2)} = \cos(\pm\frac{\pi}{2}) + i \sin(\pm\frac{\pi}{2}) = \pm i$.

ist dreht sich eine *rechtszirkular* polarisierte Welle dann gegen den Uhrzeigersinn (bei Blickrichtung in Ausbreitungsrichtung)².

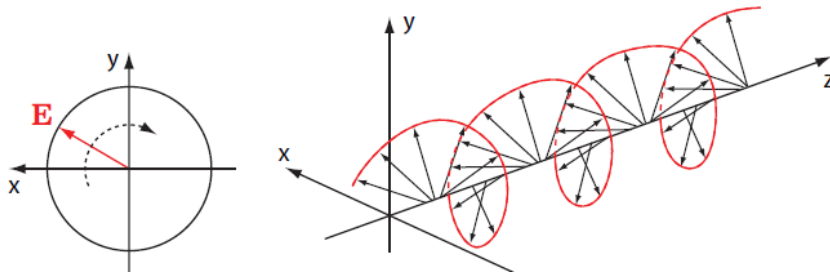


Abbildung 2: Momentaufnahme des elektrischen Feldvektors bei linkszirkular polarisiertem Licht

1.3 $\lambda/4$ -Plättchen

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

$$\Delta\phi = \frac{2\pi d(n_1 - n_2)}{\lambda} \quad (5)$$

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° -Orientierung dazu steht (die Polarisationsrichtung ist also genau zwischen langsamer und schneller Achse), dann ist das transmittierte Licht zirkular polarisiert³. Dies soll im Folgenden genauer betrachtet werden:

Wie in Abbildung 3 dargestellt, zerlegen wir den Vektor des einfallenden Feldes in seine Komponenten parallel (also hier $\mathbf{E}_{0x}$) und senkrecht (hier $\mathbf{E}_{0y}$) zur Durchlassrichtung des Polarisators.

² Vorsicht bei der Definition von links- und rechtszirkular: Je nach Quelle wird entweder entlang der Ausbreitungsrichtung „geschaut“ oder man schaut der Welle entgegen.

³ Umgekehrt kann aus zirkular polarisiertem Licht so auch wieder linear polarisiertes Licht erzeugt werden.

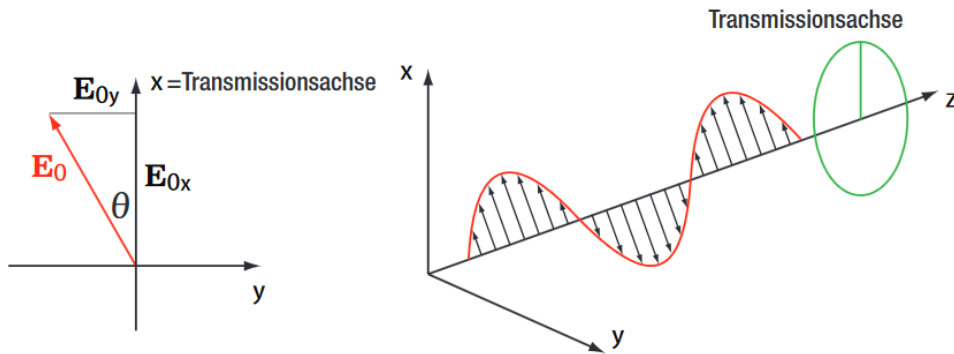


Abbildung 3: Aufteilung des elektrischen Feldes einer linear polarisierten Welle an einem Polarisator

Wir haben also unseren Gesamtfeldvektor zerlegt:

$$\mathbf{E}_0 = \mathbf{E}_{0x} + \mathbf{E}_{0y} \quad (6)$$

Als nächstes schicken wir das linear polarisierte Licht durch ein $\lambda/4$ -Plättchen. Die beiden Teilwellen $\mathbf{E}_{0x}$ und $\mathbf{E}_{0y}$ sind senkrecht zueinander polarisiert, weshalb ihre Ausbreitungsgeschwindigkeiten im $\lambda/4$ -Plättchen unterschiedlich sind. Wegen dieser unterschiedlichen Geschwindigkeiten laufen also die Phasen beider Teilwellen innerhalb des $\lambda/4$ -Plättchens immer weiter auseinander. Wählt man nun die Dicke des $\lambda/4$ -Plättchens so, dass die Phasenverschiebung nach Durchlauf durch das Plättchen gerade eine Viertel-Wellenlänge beträgt (also $\pi/2$), so kreist der E-Feld-Vektor des resultierenden Feldes nach Austritt gleichförmig um die Ausbreitungsrichtung. Sind die Amplituden der beiden Teilwellen gleich, so erhält man schließlich **zirkulare Polarisation**, sind sie nicht gleich, **elliptische Polarisation**. Schematisch ist das in Abbildung 4 dargestellt. Gleiche Amplituden erhält man, wenn der Einfallswinkel θ der linear polarisierten Welle zur Achse des $\lambda/4$ -Plättchens genau 45° (oder -45°) beträgt.

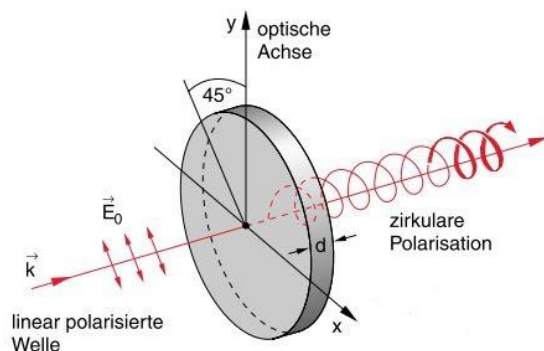


Abbildung 4: Erzeugung zirkularer Polarisation

An dieser Stelle soll noch ein wichtiger Aspekt betont werden: Wie aus Gleichung (5) 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.

2. 3D-Kino mit dem Polarisationsverfahren

2.1 Stereoskopie

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 verschiedenen Perspektiven 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.

2.2 Polarisationsverfahren

Ein älteres Verfahren funktioniert mit Hilfe von linearen Polarisationsfiltern: Vor die beiden Projektoren, die die unterschiedlichen Informationen tragen, werden zueinander senkrechte Polarisatorfolien platziert. Das Licht fällt von dort auf die metallische Leinwand. Setzt man nun vor beide Augen ebenfalls zwei zueinander senkrechte Polarisatoren (die natürlich senkrecht/parallel zu denen vor den Projektoren sind), dann lässt jeder Filter nur jeweils ein Bild zum Auge passieren – das Licht vom jeweils anderen Bild wird vom Polarisator absorbiert. Abbildung 5 zeigt schematisch den Strahlengang einer solchen Projektion.

Der Nachteil dieses Ansatzes wird offenkundig, wenn man den Kopf zur Seite neigt – die Polarisatoren der Brille sind dann nicht mehr senkrecht/parallel zu denen vor den Projektoren, wodurch beide Bilder in jedes Auge fallen und der Tiefeneindruck verschwindet.

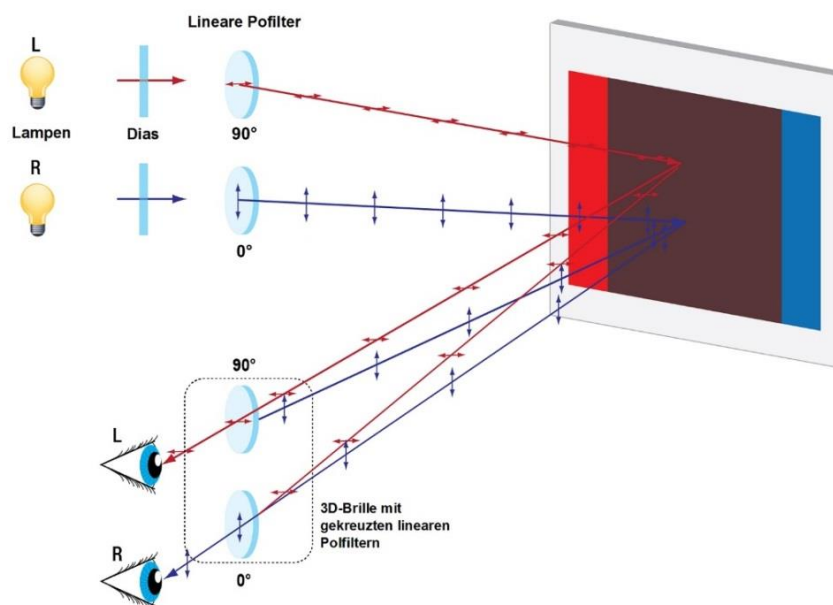


Abbildung 5: 3D-Projektion mit linearen Polarisatoren

Dies kann nun mit dem Einsatz von zirkularer Polarisation umgangen werden. Dieses lizenzierte sog. realD 3D-Verfahren wird heute typischerweise im 3D-Kino genutzt. Zirkular polarisiertes Licht kann sehr einfach erzeugt werden, nämlich mit der richtigen Kombination eines Polarisators und eines $\lambda/4$ -Plättchens. Wählen wir die richtige Winkeleinstellung zwischen Polarisator und $\lambda/4$ -Plättchen, so können wir links- bzw. rechtszirkular polarisiertes Licht erzeugen.

Das 3D-System funktioniert dann folgendermaßen: Betrachten wir zunächst das Licht ausgehend von der linken Lampe, siehe Abb. 2. Das Licht der Lampe fällt durch das Dia und wird dann durch den Polarisator linear polarisiert. Danach fällt es auf ein $\lambda/4$ -Plättchen, das im 45° -Winkel zum Polarisator steht, wodurch das Licht linkszirkular polarisiert wird. Nun trifft es auf den Metallschirm – dort wird das Licht reflektiert, allerdings erfährt es wie an jedem Spiegel einen **Phasensprung**. Dieser Sprung resultiert in einer Änderung der Drehrichtung: Das Licht vom linken Projektor ist nach der Reflektion rechtszirkular polarisiert. Das Licht trifft nun auf die Brille, in der jeweils $\lambda/4$ -Plättchen und Polarisator hintereinander geklebt sind – sie wirken als Analysator für links- bzw. rechtszirkular polarisiertes Licht und sind so eingestellt, dass die Kombination vor dem rechten Auge das rechtszirkulare Licht absorbiert, wohingegen das rechtszirkulare Licht am linken Auge durchgelassen wird. Insgesamt wurde also über die zirkuläre Polarisation sichergestellt, dass das Licht aus dem linken Projektor nur in das linke Auge fällt. Analog verhält es sich mit dem rechten Auge – hier kommt nur das Licht aus dem rechten Projektor an.

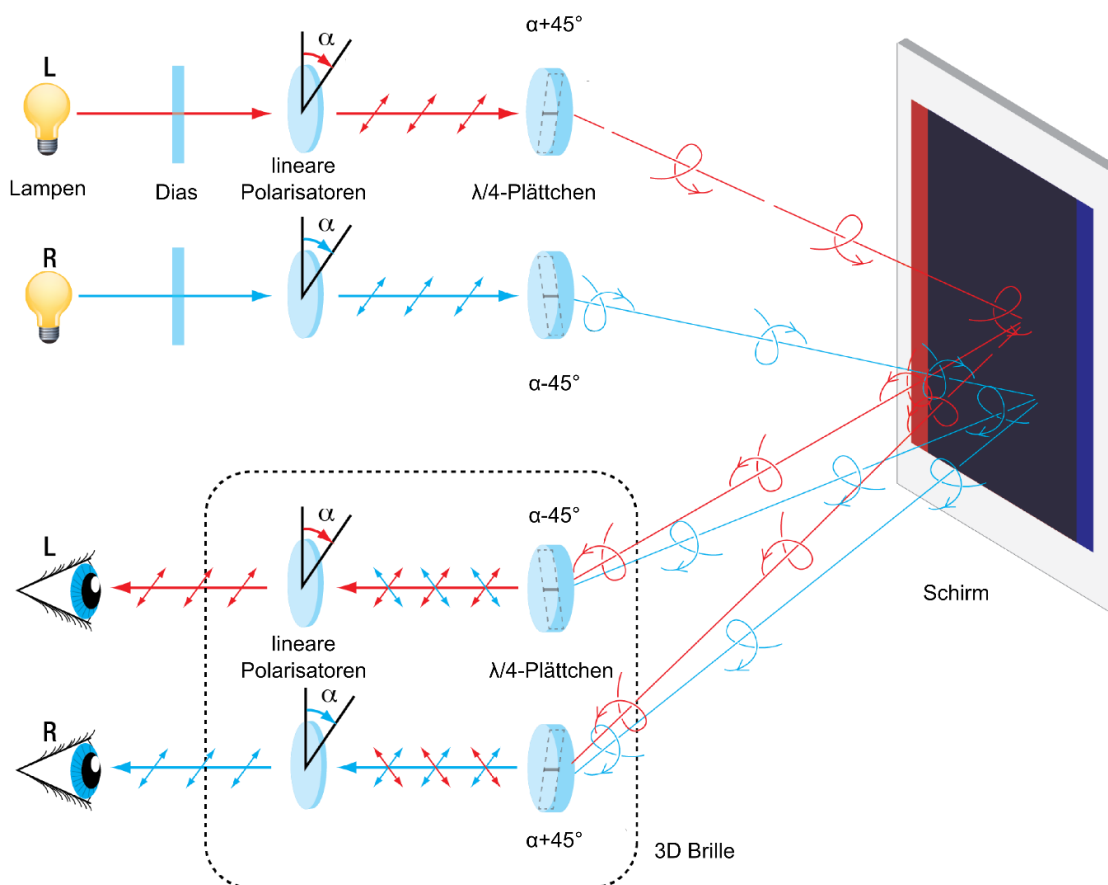


Abbildung 6: Prinzipskizze der 3D-Projektion mit zirkularer Polarisation („realD-Verfahren“)

2.3 Aufbau der Kinobrille

Abbildung 7 zeigt ein Foto einer realD Kinobrille:



Abbildung 7: Kinobrille

Wie aus theoretischer Sicht erwartet, besteht die Brille aus zwei aufeinander geklebten Materialien. Auf der Rückseite, also der Seite des Auges, befindet sich eine lineare Polarisatorfolie, auf der Vorderseite ein Verzögerungsplättchen, also ein $\lambda/4$ -Plättchen in Folienform. Die beiden Folien sind im linken und rechten Glas im $\pm 45^\circ$ Winkel zueinander orientiert.

Aufgaben (zu Hause zu bearbeiten und mitzubringen):

1. Warum hat man in einer realD-Brille beim Film-Ansehen niemals perfekte Auslöschung eines Bildes bzw. immer eine Rest-Helligkeit?
2. Welchen großen Nachteil hat das lineare Polarisationsverfahren gegenüber dem zirkularen?
3. Aufbau der realD-Brille: Müssen die linearen Polarisationsfilter des linken und rechten Brillenglases parallel oder senkrecht zueinander orientiert sein oder ist es egal?
4. Stellen Sie sich vor, Sie setzen die realD-Kinobrille auf, machen ein Auge zu und schauen so in einen Spiegel. Sie beobachten: Das Auge, das Sie geschlossen haben, sehen Sie im Spiegel transparent durch die Brille, Ihr geöffnetes Auge ist hinter einem dunklen Brillenglas nicht sichtbar (im Praktikum unbedingt ausprobieren!). Wie erklären Sie sich das?