

## 8. Polarisation

Elektromagnetische Wellen sind transversale Wellen, d.h. die schwingenden Feldvektoren von  $\vec{E}$  – und  $\vec{B}$  – Feld stehen  $\perp$  auf der Ausbreitungsrichtung der Welle. Wir sprechen von

- linear polarisiertem Licht, wenn der elektrische Feldvektor immer in einer Ebene liegt,
- zirkular polarisiertem Licht, wenn die elektrische Feldstärke auf einem Kreis um die Ausbreitungsrichtung umläuft,
- elliptisch polarisiertem Licht, wenn die Spitze des elektrischen Feldvektors auf einer Ellipse um die Ausbreitungsrichtung umläuft.

Alle drei Fälle kann man sich als Überlagerung von zwei linear polarisierten Wellen vorstellen, die senkrecht zueinander schwingen und eine gegenseitige Phasenverschiebung  $j$  zwischen 0 und  $\frac{\pi}{2}$  haben:

$j = 0$ : linear polarisiertes Licht,

$j = \frac{\pi}{2}$ : zirkular polarisiertes Licht, wenn die Amplituden gleich sind,

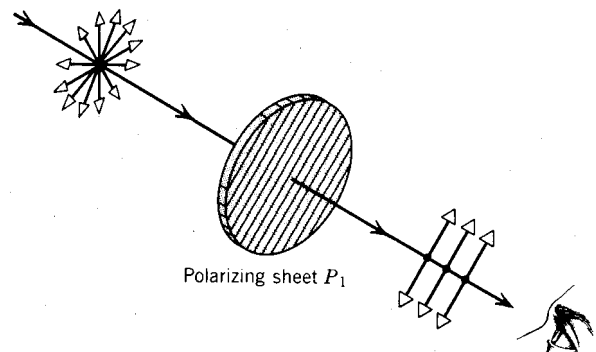
$0 < j < \frac{\pi}{2}$ : elliptisch polarisiertes Licht.

Natürliches Licht ist i. A. unpolarisiert; die emittierenden Atome und Moleküle schwingen völlig unabhängig voneinander.

Erzeugung von

- linear polarisiertem Licht:

- **Polarisationsfolien:** Langkettige Moleküle werden beim Herstellungsprozess in eine Plastikfolie eingebettet. Beim anschließenden Strecken der Folie werden diese Moleküle parallel zueinander ausgerichtet. Beim Durchtritt von Strahlung werden nur die Wellen durchgelassen, deren el. Feldvektor parallel zu den langen Molekülen liegt. Die anderen Wellen werden absorbiert.



Zwei um  $90^\circ$  gegeneinander verdrehte (gekreuzte) Folien lassen kein Licht hindurchtreten. Werden die beiden Folien  $P_1$  und  $P_2$  um den Winkel  $\Theta$  gegeneinander verdreht, so wird von der von  $P_1$  durchgelassenen Amplitude  $E_{P_1}$  noch der Anteil  $E_{P_2} = E_{P_1} \cos \Theta$  hindurchgelassen. Für die durchgelassene Gesamtintensität gilt also

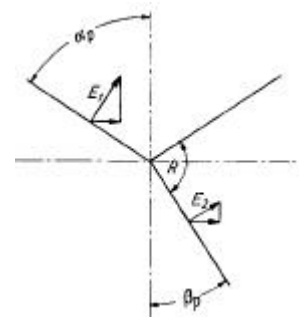
$$I = I_{P_1} \cos^2 \Theta.^1$$

Bsp.: Wie stark muß man Polarisator und Analysator gegeneinander verdrehen, damit genau die Hälfte der maximal möglichen Intensität hindurchtritt?

$$I = \frac{1}{2} I_{P_1} = I_{P_1} \cos^2 \Theta$$

$$\cos^2 \Theta = \frac{1}{2} \Rightarrow \underline{\underline{\Theta = 45^\circ}}.$$

- **Reflexion:** Bei der Reflexion an der Grenzfläche zweier dielektrischer Medien mit den Brechungsindizes  $n_1$  bzw.  $n_2$  gibt es einen bestimmten Winkel, den „Brewster-Winkel“, für den das reflektierte Licht vollständig linear polarisiert ist, und



<sup>1</sup> Die Intensität ist proportional zum Quadrat der Amplitude! S. Kap. 4.1 Doppelspalt.

zwar senkrecht zur Einfallsebene. Dies ist genau dann der Fall, wenn reflektierter und gebrochener Strahl einen Winkel von  $90^\circ$  einschließen. Plausible Erklärung: Ein elektrischer Dipol gibt parallel zu seiner Schwingungsrichtung keine Energie ab! → In der Einfallsebene polarisiertes Licht wird unter dem Brewster-Winkel vollständig in das andere Medium hineingebrochen, die reflektierte Intensität ist null! Senkrecht zur Einfallsebene polarisiertes Licht wird immer teilweise reflektiert, teilweise gebrochen. Durch Hintereinanderschalten mehrerer solcher Übergänge (Stapel von Glasplatten mit Luftspalten dazwischen) läßt sich also ein unpolarisierter Lichtstrahl in zwei linear polarisierte Anteile zerlegen: Die reflektierten Strahlen sind vollständig senkrecht zur Einfallsebene polarisiert, die transmittierten nahezu vollständig in der Einfallsebene.

Herleitung des Brewster-Winkels  $\mathbf{a_p}$ :

$$\mathbf{a_p} + \mathbf{b_p} = 90^\circ,$$

$$\frac{\sin \mathbf{a_p}}{\sin \mathbf{b_p}} = \frac{n_2}{n_1},$$

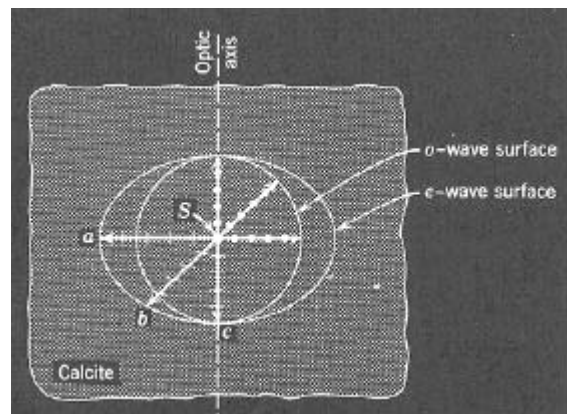
$$\frac{\sin \mathbf{a_p}}{\sin(90^\circ - \mathbf{a_p})} = \frac{\sin \mathbf{a_p}}{\cos \mathbf{a_p}} = \tan \mathbf{a_p} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Für Glas ist  $\mathbf{a_p} = 56,5^\circ$ .

- Doppelbrechung: In Gasen, Flüssigkeiten, amorphen Festkörpern wie z.B. Gläsern und Kristallen mit kubischer Symmetrie hängt die Ausbreitungsgeschwindigkeit von elektromagnetischen Wellen in der Regel nicht von der Ausbreitungsrichtung oder dem Polarisationszustand des Lichtes ab. Solche Substanzen heißen „optisch isotrop“. Doppelbrechende Kristalle sind optisch anisotrop. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von e.m. Wellen hängt in diesen Substanzen von der Polarisationsrichtung der Welle ab. Klassisches Beispiel ist Kalkspat.<sup>2</sup>

Man definiert in solchen Substanzen eine optische Achse derart, daß in der Ebene senkrecht zu dieser Achse die Ausbreitungsgeschwindigkeit unabhängig ist von der Ausbreitungsrichtung (aber abhängig von der Polarisationsebene!):

Strahlen, deren elektrischer Feldvektor senkrecht zur optischen Achse schwingt, haben unabhängig von ihrer Richtung immer dieselbe Geschwindigkeit  $c_o$ . Diese sind die „ordentlichen“ Strahlen. Wellen, deren  $\vec{E}$ -Vektor parallel zur optischen Achse schwingt, sind die „außerordentlichen“ Strahlen und haben in doppelbrechenden Kristallen eine Geschwindigkeit  $c_{ao} \neq c_o$ . In Kalkspat ist  $c_{ao} = 1,116 \cdot c_o$ . Es gibt auch doppelbre-



chende Kristalle, für die  $c_{ao} < c_o$  ist. Strahlen, deren  $\vec{E}$ -Vektor weder parallel noch senkrecht zur opt. Achse steht, haben Geschwindigkeiten zwischen  $c_o$  und  $c_{ao}$  und Richtungen außerhalb der Ebene  $\perp$  opt. Achse.<sup>3</sup> (In den Abbildungen ist „e“ (extraordinary) der außerordentliche Strahl.)

<sup>2</sup> Doppelbrechung tritt auch auf in Stoffen, die einem einseitig gerichteten Zug unterworfen sind oder in strömenden Flüssigkeiten.

<sup>3</sup> Es gibt außer einachsigen Kristallen (mit einer optischen Achse) auch zweiachsige Kristalle, für die dann 3 ausgezeichnete Ausbreitungsgeschwindigkeiten gelten (die des ordentlichen und die der beiden außerordentlichen Strahlen)!

Untenstehende Abbildung zeigt die unterschiedlichen möglichen relativen Lagen zwischen einfallendem unpolarisiertem Strahl und optischer Achse des doppelbrechenden Kristalls.

a) Einfallender Strahl  $\parallel$  opt. Achse: Sowohl ordentlicher als auch außerordentlicher Strahl breiten sich in gleicher Richtung mit gleicher Geschwindigkeit aus. Austretender und einfallender Strahl haben dieselben Eigenschaften. (Wie optisch isotropes Material!)

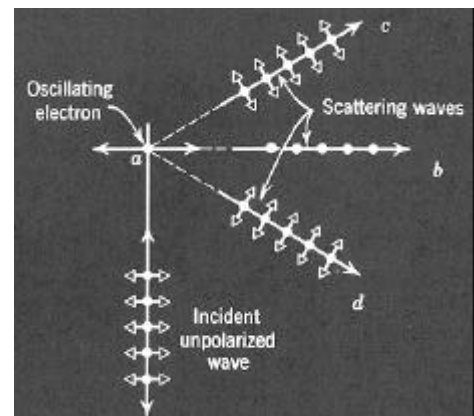
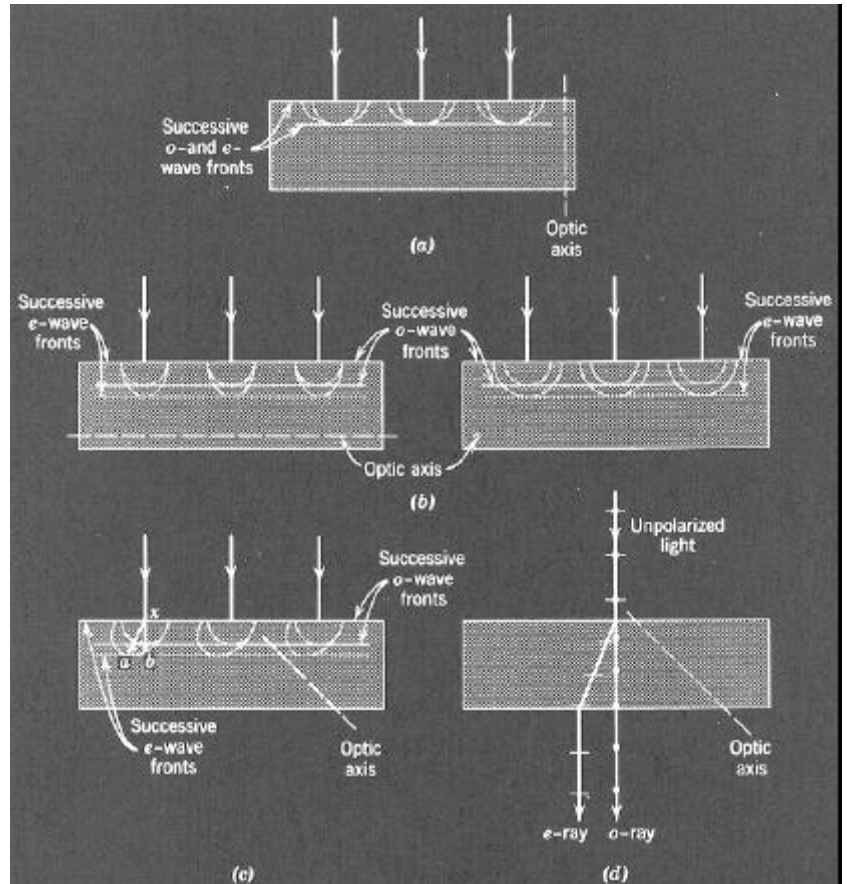
b) Einfallender Strahl  $\perp$  opt. Achse: Auch hier haben die beiden Komponenten die gleiche Richtung, aber unterschiedliche Geschwindigkeiten.

Anwendung: Einige doppelbrechende Kristalle zeigen „Dichroismus“. D.h. in dieser Anordnung wird eine der beiden Komponenten stark absorbiert, die andere wird nur gering geschwächt, so daß nach Durchtritt fast nur noch (je nach Dicke der Schicht) eine Polarisationsebene austritt (z.B. Turmalin).  $\rightarrow$  Polarisationsfolien.

c) + d) Winkel zwischen einfallendem Strahl und opt. Achse zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$ :

Die beiden Komponenten trennen sich nach Richtung und Geschwindigkeit. Die beiden austretenden Strahlen sind senkrecht zueinander linear polarisiert.

- Streuung: d.h. die Ablenkung von e.m. Wellen nach Auftreffen auf ein einzelnes Atom oder Molekül. In durchsichtigen Festkörpern tritt der Effekt kaum auf, da die zu erzwungenen Schwingungen angeregten Elektronen in den betroffenen Teilchen kohärentes Licht aussenden, das sich in Seitwärtsrichtung auslöscht.<sup>4</sup> In Gasen sind die Teilchen voneinander entkoppelt, es kommt zur Abstrahlung in alle Richtungen  $\rightarrow$  Streuung. (Sonst wäre der Himmel nicht hell!) Ist der einfallende Strahl unpolarisiert und schließen einfallender und gestreuter Strahl einen Winkel von  $90^\circ$  ein, so ist der gestreute Strahl vollständig linear polarisiert. (Wiederum Argument: Dipole strahlen in Schwingungsrichtung nicht ab!)



<sup>4</sup> Wie bei der Beugung.

- zirkular polarisiertem Licht: Man verwendet einen doppelbrechenden Kristall in der Anordnung b) obiger Abbildung und linear polarisiertes Licht. Die beiden unterschiedlich schnellen Komponenten ordentlicher und außerordentlicher Strahl haben nach Durchlaufen einer Dicke  $x$  eine Phasenverschiebung  $g$ :

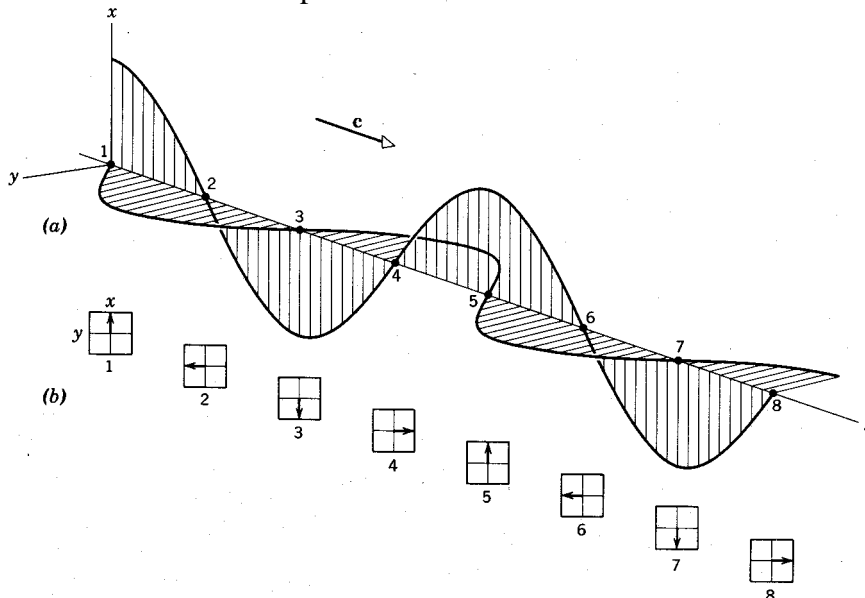
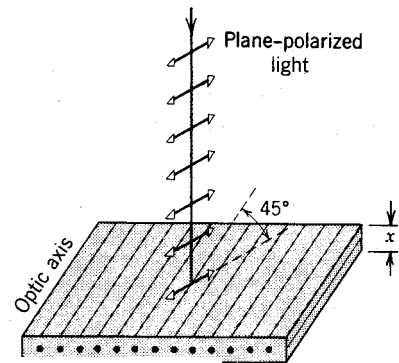
$$g = (\text{opt. Weglänge})_o - (\text{opt. Weglänge})_{ao} = n_o \cdot x - n_{ao} \cdot x = (n_o - n_{ao}) \cdot x.$$

Für eine gegebene Wellenlänge  $\lambda$  läßt sich diese Dicke  $x$  so einstellen, daß der Gangunterschied  $g$  gerade  $\lambda/4$  beträgt:

$$x_{\lambda/4} = \frac{\lambda}{4(n_o - n_{ao})}.$$

Eine solche Schicht heißt „ $\lambda/4$ -Plättchen“.

Dann tritt hinter dem Kristall eine elliptisch polarisierte Welle aus. Für den Fall, daß beide Komponenten (o und ao-Strahl) auch gleiche Amplitude haben (wenn die Polarisationsebene des einfallenden Lichts mit der optischen Achse einen Winkel von  $45^\circ$  einschließt), ergibt sich dann eine zirkular polarisierte Welle.



Bsp.: Wie weisen Sie nach, ob ein Lichtstrahl zirkular polarisiert ist?

Bringe ein  $\lambda/4$ -Plättchen in den Strahlengang. Handelt es sich vorher um zirkular polarisiertes Licht, so ist die Phasenverschiebung der austretenden Komponenten  $0^\circ$  oder  $180^\circ$ . In beiden Fällen ergibt sich bei der Überlagerung der beiden Komponenten (parallel und senkrecht zur optischen Achse linear polarisiert) linear polarisiertes Licht. Dieses kann mit einem Analysator bei geeigneter Stellung ausgelöscht werden. Handelte es sich um unpolarisiertes Licht, so tritt eine Mischung aus linear, elliptisch und zirkular polarisiertem Licht aus. Dieses kann mit einem Analysator nicht ausgelöscht werden.<sup>5</sup> Handelte es sich um linear polarisiertes Licht, so kann das mit einem Analysator alleine festgestellt werden!

<sup>5</sup> Ein Analysator alleine liefert kein unterschiedliches Ergebnis für unpolarisiertes oder zirkular polarisiertes Licht. In beiden Fällen schrumpft die durchgelassene Lichtintensität auf die Hälfte!

Durch die Untersuchung der Polarisations-eigenschaften von reflektiertem, gestreutem, emittiertem ... Licht gewinnen wir heute wertvolle Informationen über so unterschiedliche Objekte wie kosmische (Staub)teilchen, Viren, Atomkerne ....