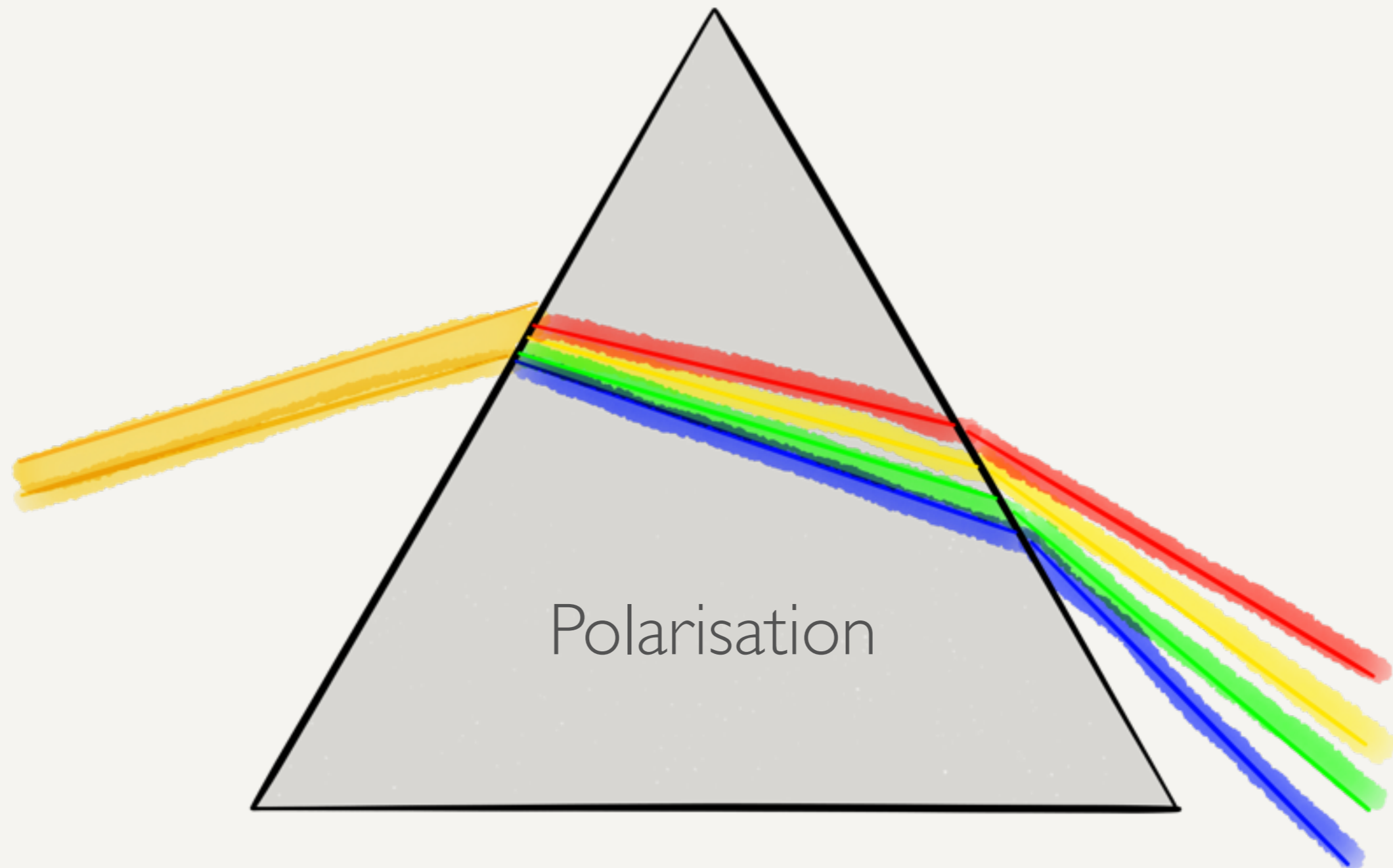


# Photonik

## Technische Nutzung von Licht



# Überblick

- Polarisation
- Fresnel'sche Formeln
- Brewster-Winkel
- Totalreflexion
- Regensensor
- Doppelbrechung
- LCD-Display
- 3D Fernsehen und Kino

# Polarisation

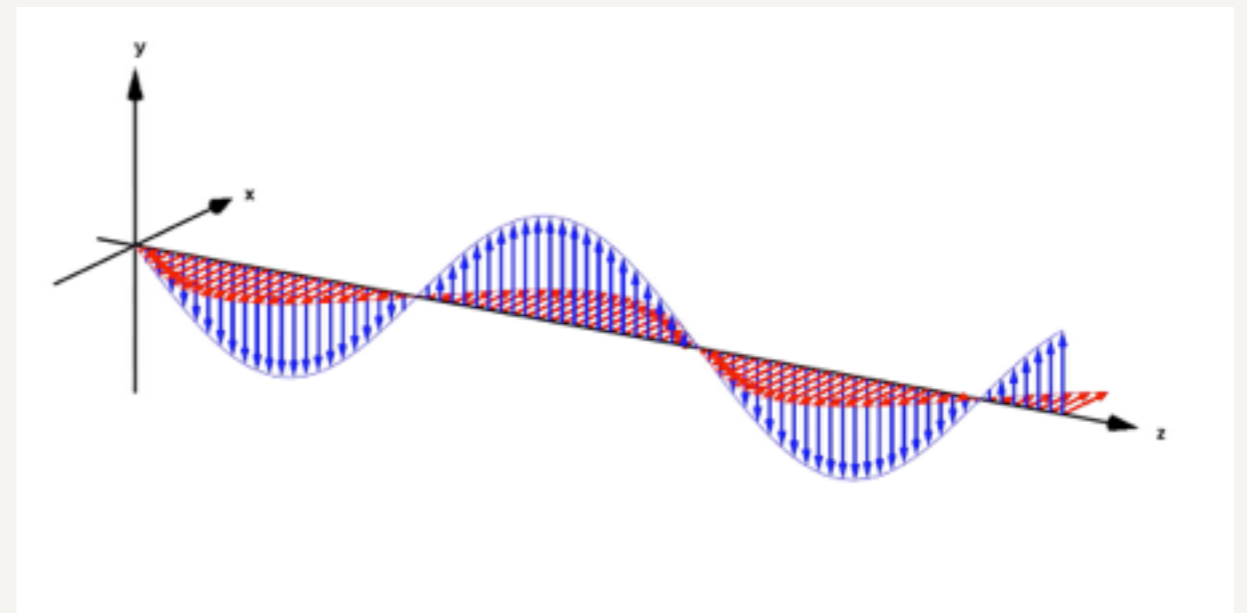
# Polarisation

$$\mathbf{E}(t, z) = E_x \mathbf{e}_x + E_y \mathbf{e}_y$$

$$E_x(t, z) = E_0^x \cdot \cos(\omega t - kz)$$

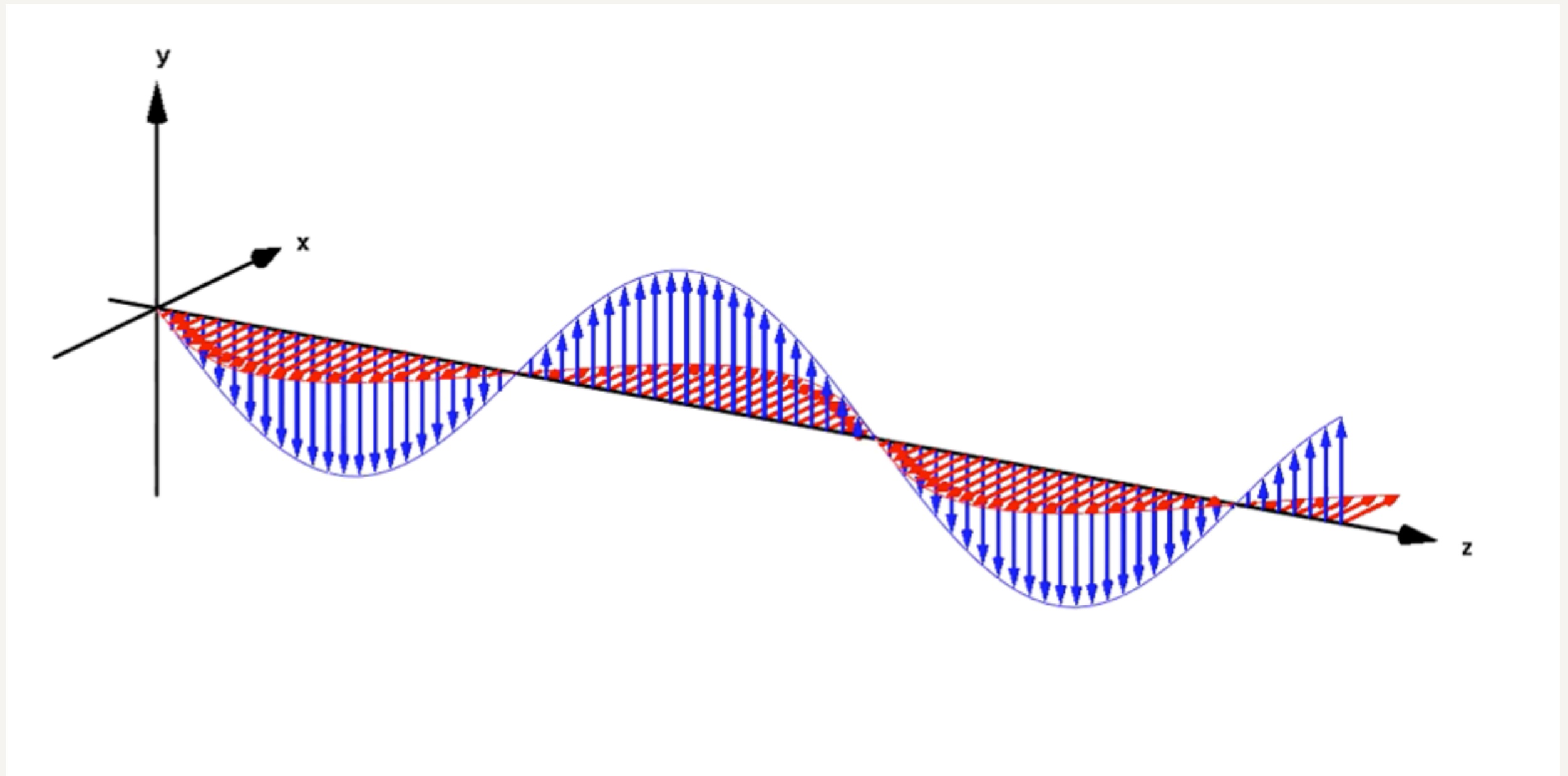
$$E_y(t, z) = E_0^y \cdot \cos(\omega t - kz + \varphi)$$

- Ebene Welle die sich in  $z$ -Richtung ausbreitet
- Zerlegung in  $x$ - und  $y$ -Komponenten
- Zunächst allgemeine Phase  $\varphi$



# Polarisation

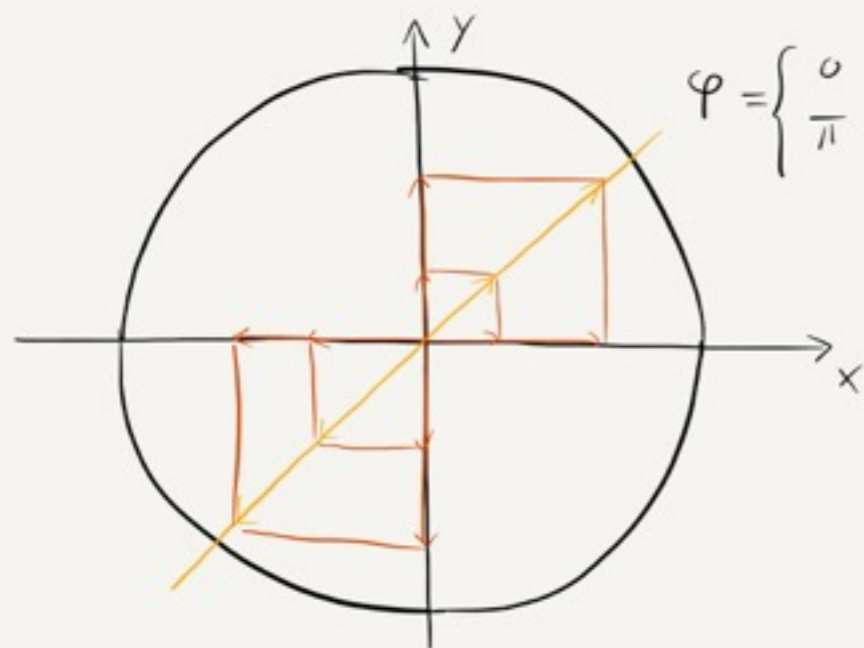
## Lineare Polarisation



# Polarisation

## Lineare Polarisation

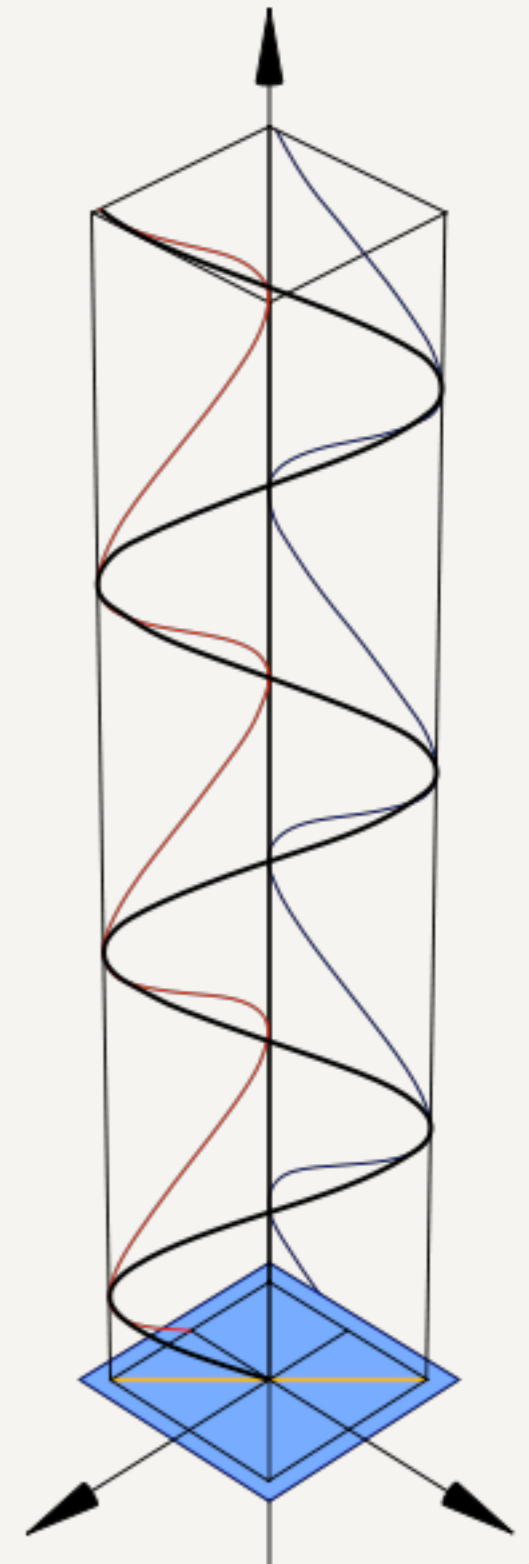
- Das elektrische Feld schwingt nur in einer festen Ebene
- Die Projektion in Blickrichtung ist eine Linie



$$E_x(t, z) = E_0^x \cdot \cos(\omega t - kz)$$

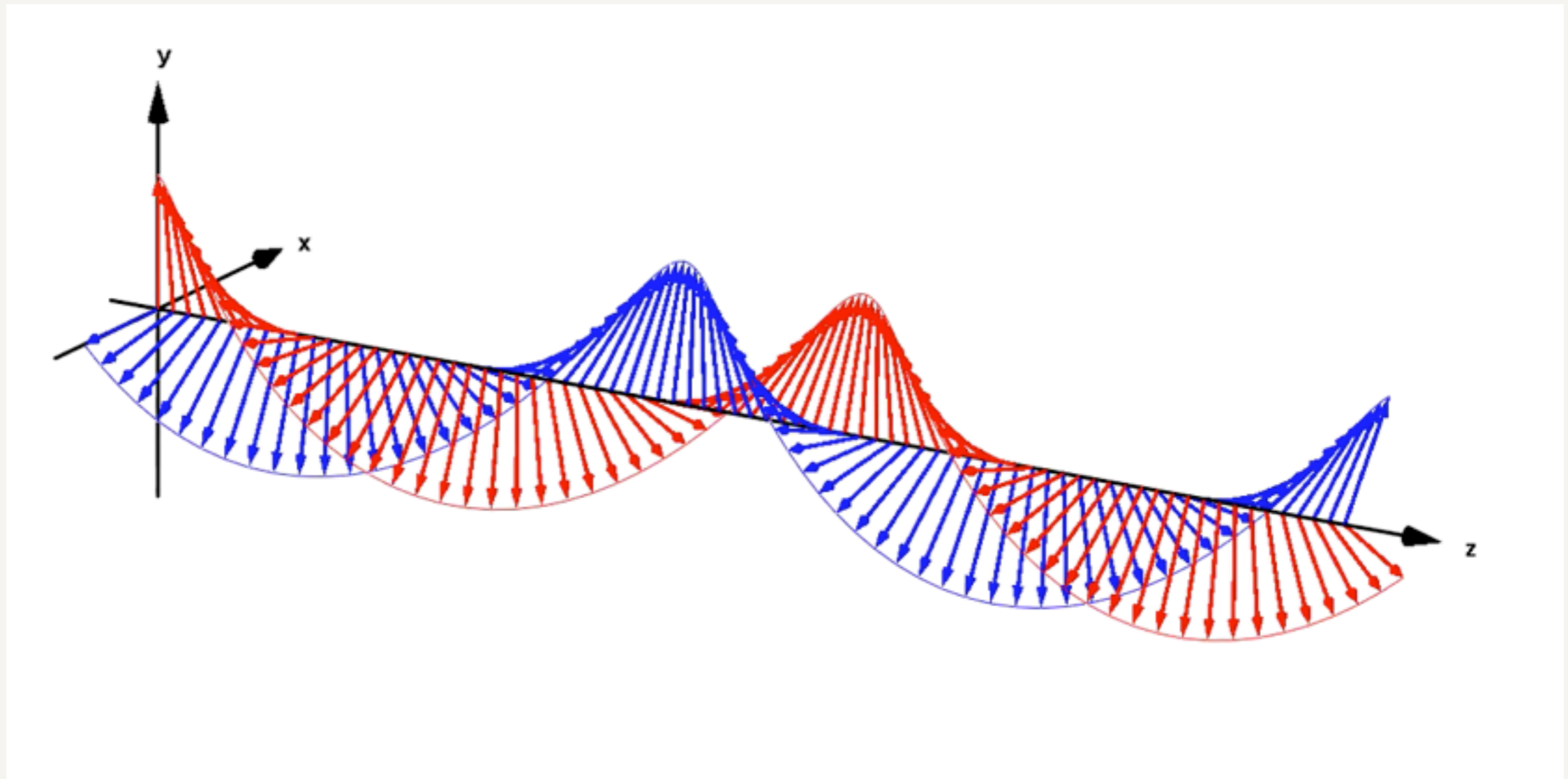
$$E_y(t, z) = E_0^y \cdot \cos(\omega t - kz + \varphi)$$

$$\varphi = \begin{cases} 0 \\ \pi \end{cases}$$



# Polarisation

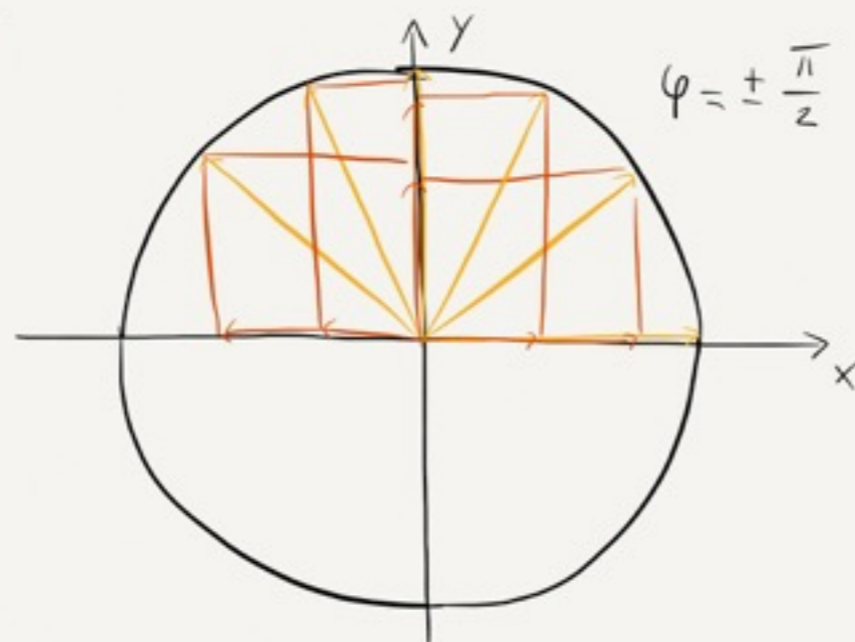
## Zirkulare Polarisation



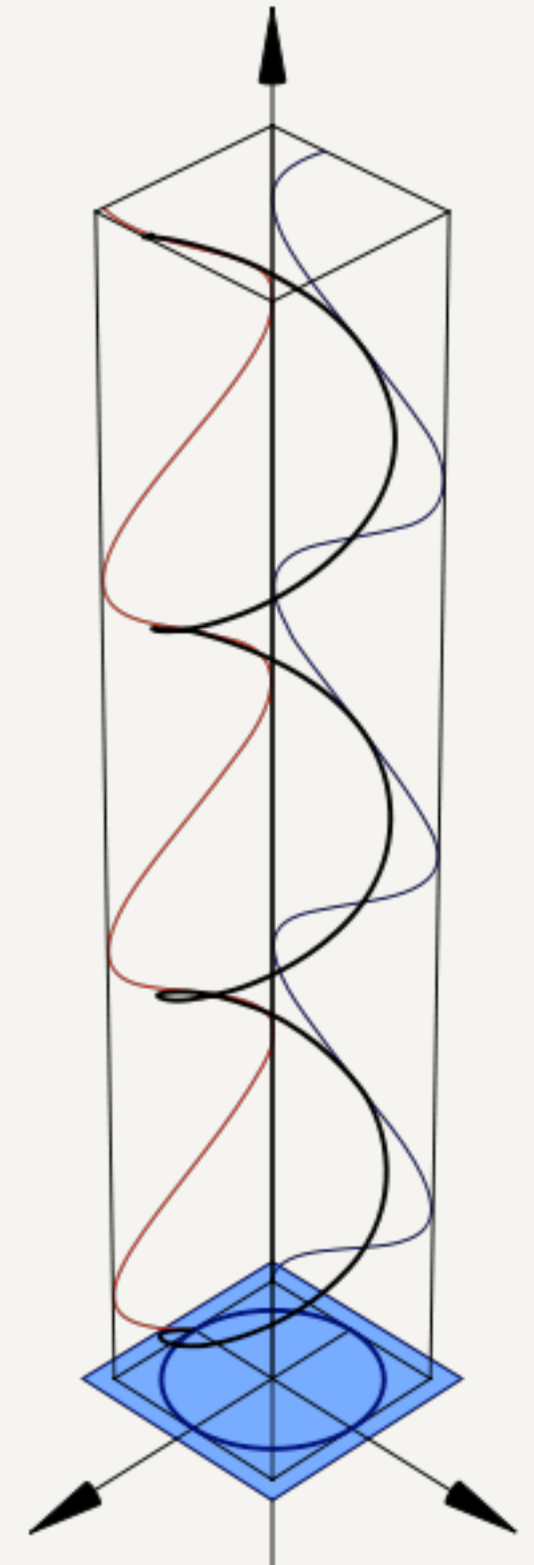
# Polarisation

## Zirkulare Polarisation

- Der elektrische Feldvektor rotiert konstant um die Ausbreitungsrichtung
- Die Projektion in Ausbreitungsrichtung ist ein Kreis



$$\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$$
$$E_x = E_y$$

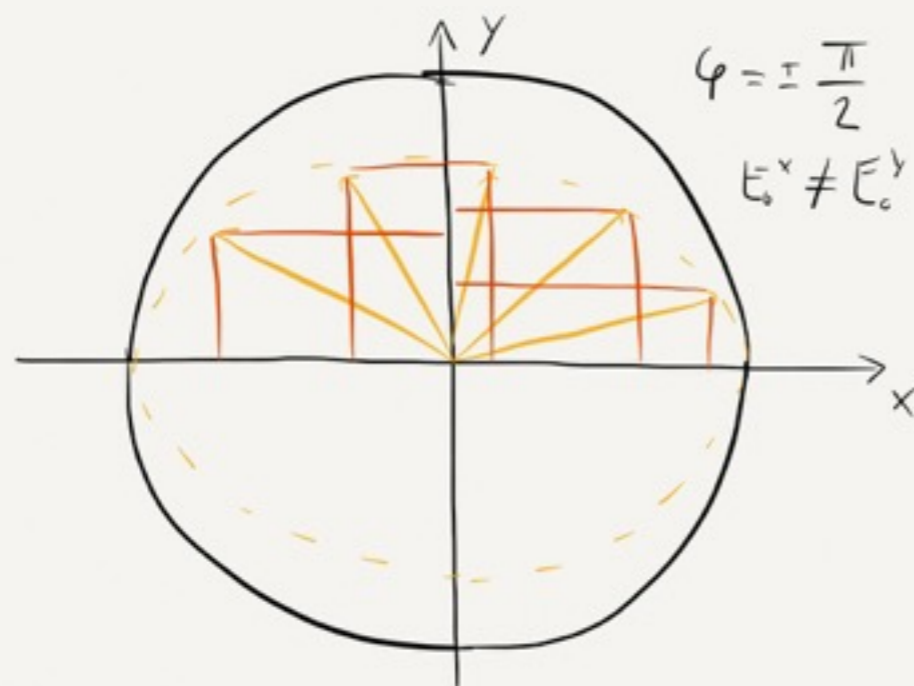




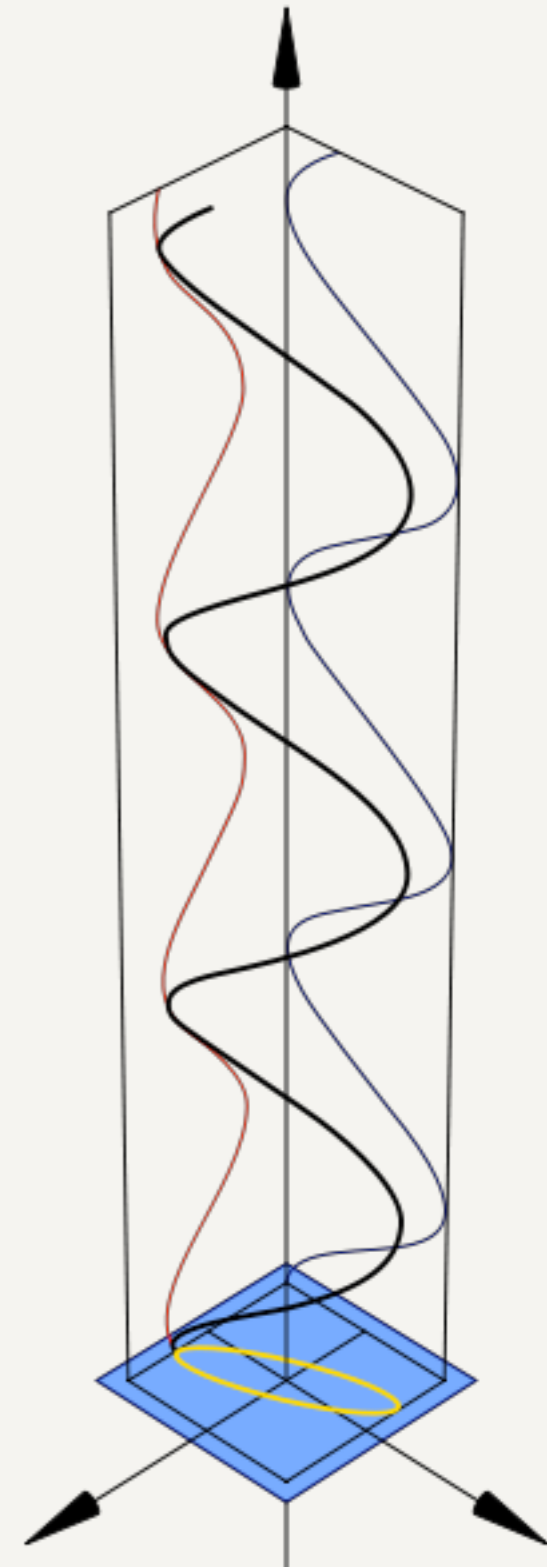
# Polarisation

## Elliptische Polarisation

- Der elektrische Feldvektor rotiert um die Ausbreitungsrichtung
- Die Amplitude verändert sich periodisch
- Die Projektion in Ausbreitungsrichtung ist eine Ellipse



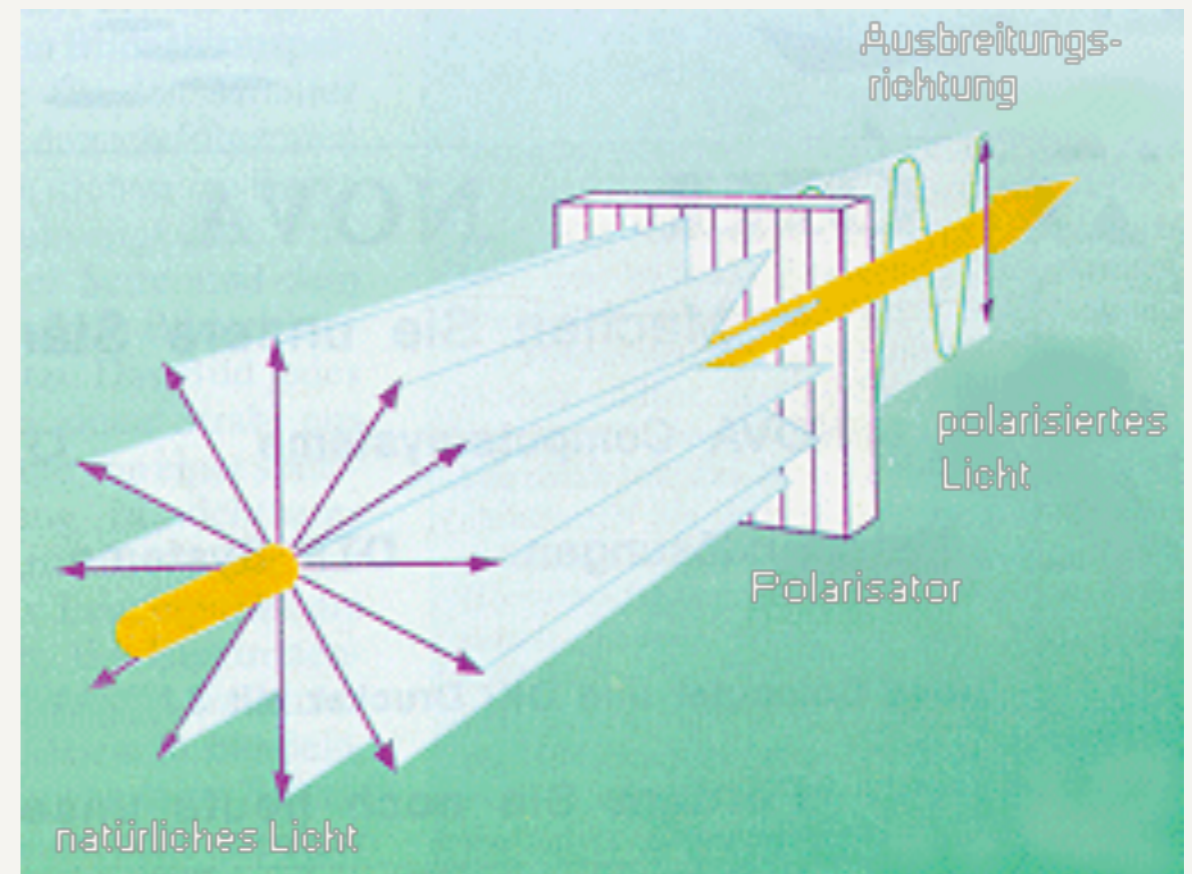
$$\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$$
$$E_x \neq E_y$$



# Polarisation

## Unpolarisiertes Licht

- Ein einzelnes Photon hat immer eine definierte Polarisation!
- Unpolarisiert heißt also die Überlagerung vieler Photonen, bei der die verschiedenen Polarisationen statistisch verteilt sind.
- Beispiel: Glühbirne. Jedes einzelne Atom strahlt in jede Richtung und mit jeder Polarisation, ohne Bezug zu den anderen Atomen.
- Gegenbeispiel: Laser. Alle Atome strahlen in Phase in die gleiche Richtung mit der gleichen Polarisation.



[http://www.tu-chemnitz.de/informatik/RA/news/stack/kompendium/vortraege\\_97/lcdisplay/index.htm](http://www.tu-chemnitz.de/informatik/RA/news/stack/kompendium/vortraege_97/lcdisplay/index.htm)

# Licht messen

Intensität = Amplitude<sup>2</sup>

# Intensität

- Alle Formeln heute leiten sich aus den Maxwell-Gleichungen her.
- Sie beziehen sich auf das elektrische (magnetische) Feld: die **Amplitude**.
- Das elektrische Feld oszilliert so schnell, dass nur der Mittelwert gemessen werden kann: die **Intensität**.
- Die Intensität ist proportional zum **Quadrat** der Amplitude.

## Poynting-Vektor

$$\vec{S} = c^2 \varepsilon_0 \vec{E} \times \vec{B}$$

Für ebene Wellen:

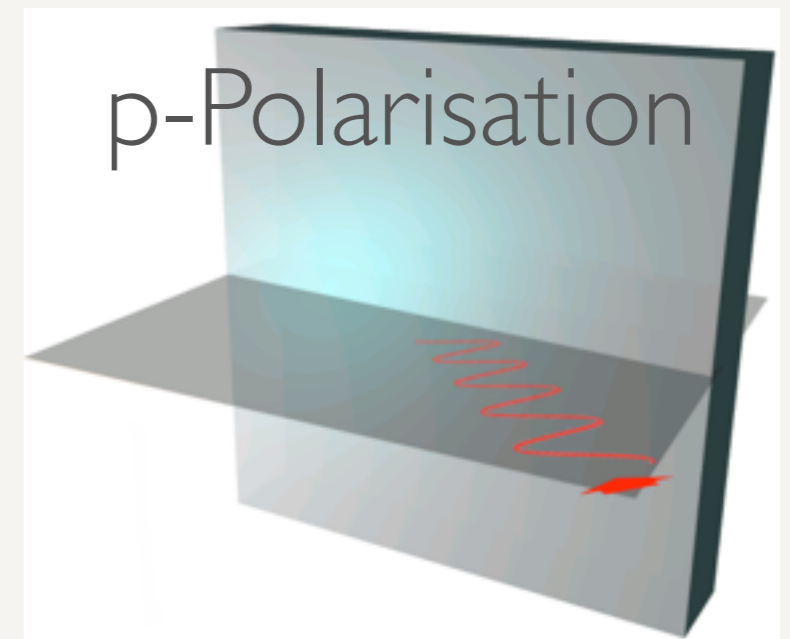
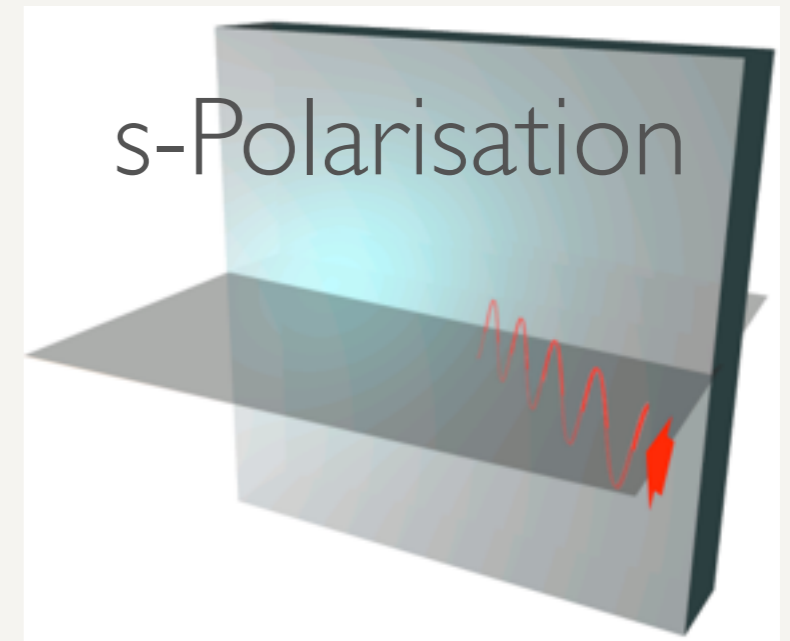
$$\langle \vec{S} \rangle = \frac{1}{2} c \varepsilon_0 E_0^2$$

# Fresnel'sche Formeln

# Fresnel'sche Formeln

## Überblick

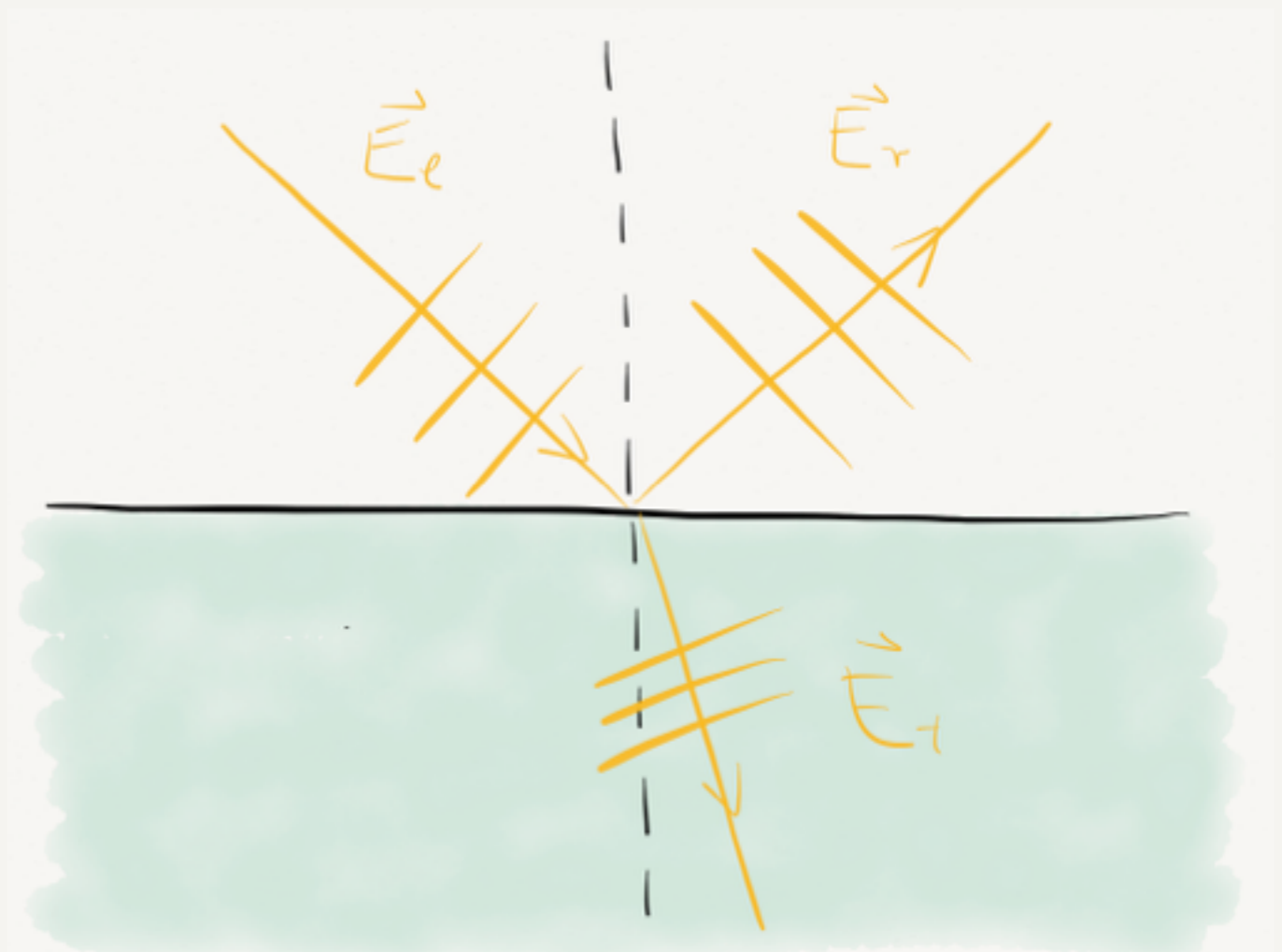
- Beschreiben das Verhalten von elektromagnetischen Wellen an Grenzflächen
- Trennung in senkrechte und parallele Polarisations-Komponente des Lichts
- Über die Stetigkeitsbedingung für das elektrische und magnetische Feld ergeben sich die Fresnel'schen Formeln für die Amplituden des elektromagnetischen Feldes.
- Die reflektierte oder transmittierte Licht-Intensität ist proportional zum Quadrat der Amplitude.
- Randbedingung: keine Absorption, nicht-magnetische Materialien.



# Fresnel'sche Formeln

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \cdot \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{x})$$
$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 \cdot \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{x})$$

- Elektromagnetische Welle
- Drei Wellen:
  - ➔ einlaufende Welle  $\mathbf{E}_e$
  - ➔ reflektierte Welle  $\mathbf{E}_r$
  - ➔ transmittierte Welle  $\mathbf{E}_t$



# Fresnel'sche Formeln

## Amplitudenkoeffizienten

- Maxwell-Gleichungen: die tangentialen Komponenten einer elektromagnetischen Welle müssen an Grenzflächen stetig sein.
- Vergleich der drei Wellen (einlaufende, reflektierte, transmittierte) erlaubt die allgemeine Lösung der **Amplitudenverhältnisse:**

$$r = E_r / E_e$$

$$t = E_t / E_e$$

- **Vier Formeln:** je zwei Formeln für die senkrechte und parallele Polarisierung, und für reflektierte und transmittierte Welle.

$$r_{\parallel} = \frac{n_2 \cos \alpha - n_1 \cos \beta}{n_2 \cos \alpha + n_1 \cos \beta}$$

$$r_{\perp} = \frac{n_1 \cos \alpha - n_2 \cos \beta}{n_1 \cos \alpha + n_2 \cos \beta}$$

$$t_{\parallel} = \frac{2n_1 \cos \alpha}{n_1 \cos \beta + n_2 \cos \alpha}$$

$$t_{\perp} = \frac{2n_1 \cos \alpha}{n_1 \cos \alpha + n_2 \cos \beta}$$



# Fresnel'schen Formeln

## Intensitätskoeffizienten

$$R_{\parallel} = r_{\parallel}^2 = \left( \frac{n_2 \cos \alpha - n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha\right)^2}}{n_2 \cos \alpha + n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha\right)^2}} \right)^2$$
$$R_{\perp} = r_{\perp}^2 = \left( \frac{n_1 \cos \alpha - n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha\right)^2}}{n_1 \cos \alpha + n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha\right)^2}} \right)^2$$

Energieerhaltung:

$$T_{\parallel} = 1 - R_{\parallel}$$

$$T_{\perp} = 1 - R_{\perp}$$

Eigentlich:

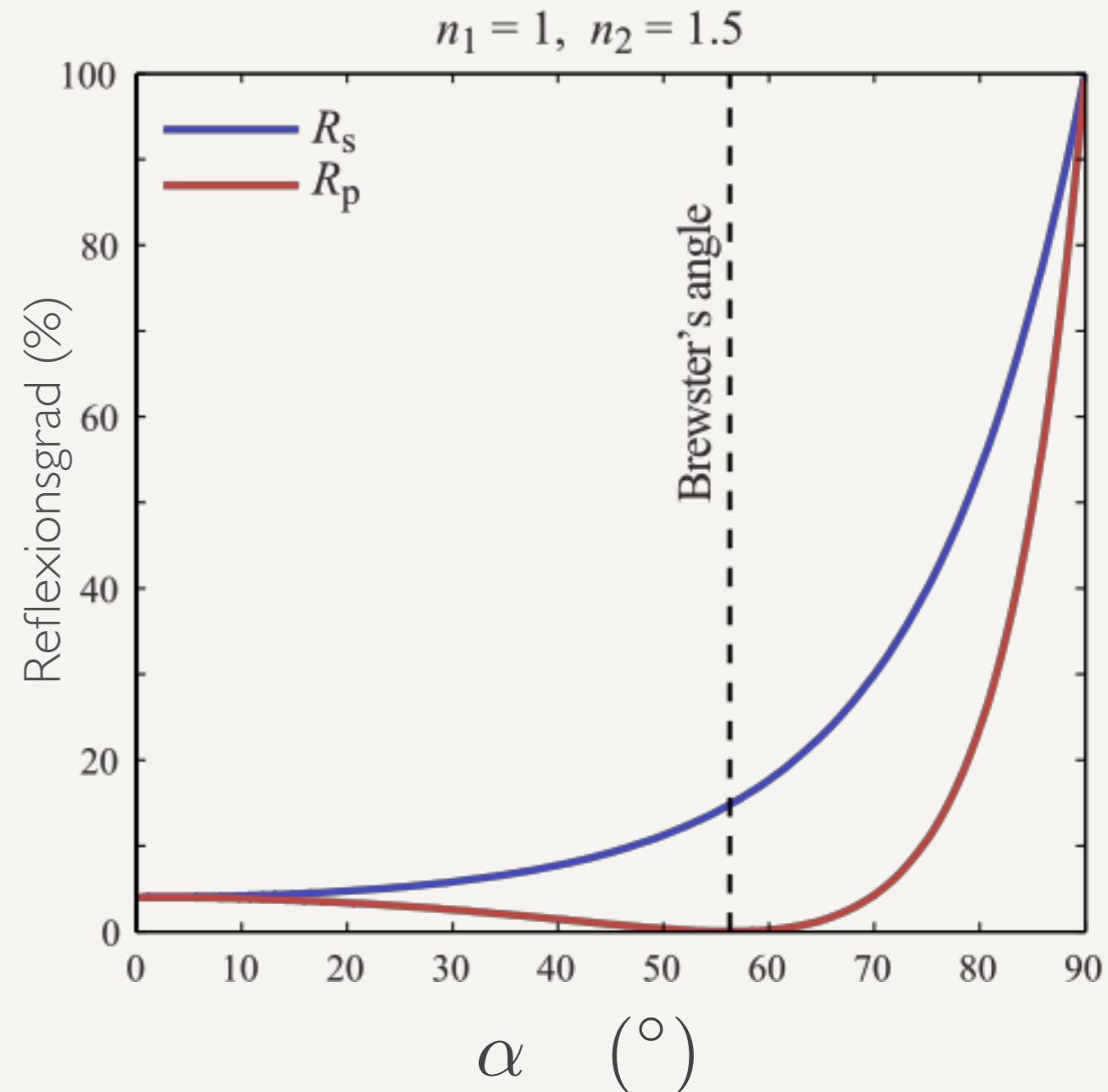
$$T_{\parallel, \perp} = \frac{n_2 \cos \beta}{n_1 \cos \alpha} \cdot t_{\parallel, \perp}^2$$

⇒ Zu kompliziert

# Reflexionsgrad I

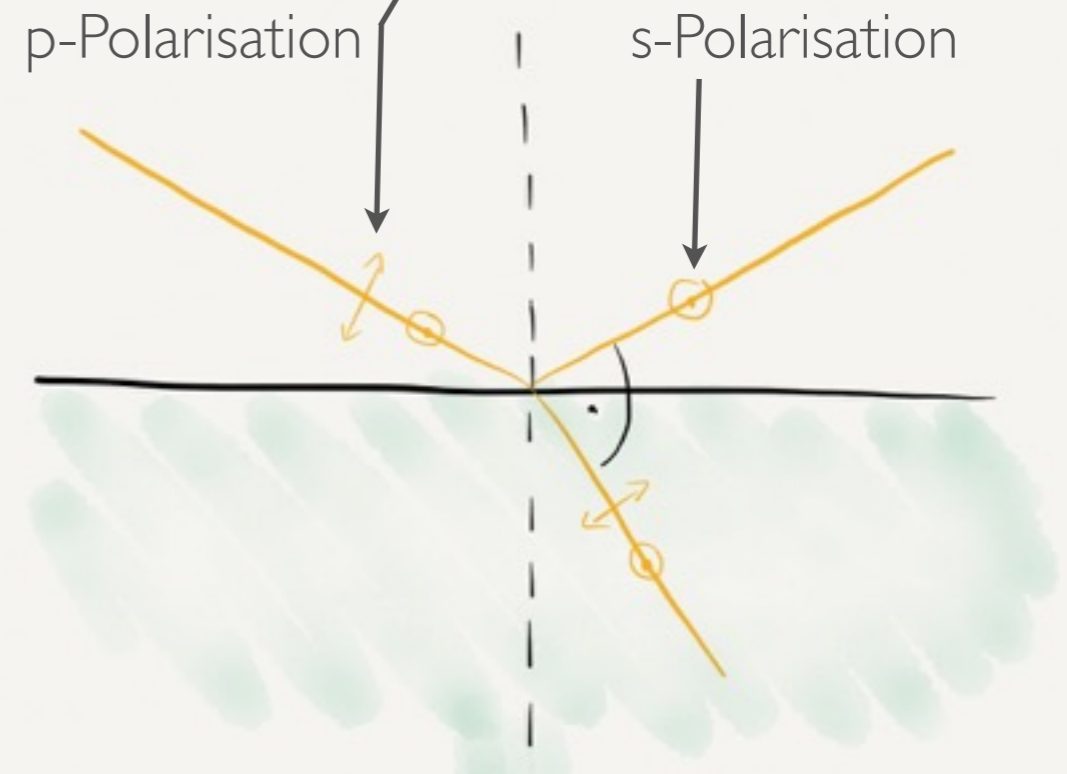
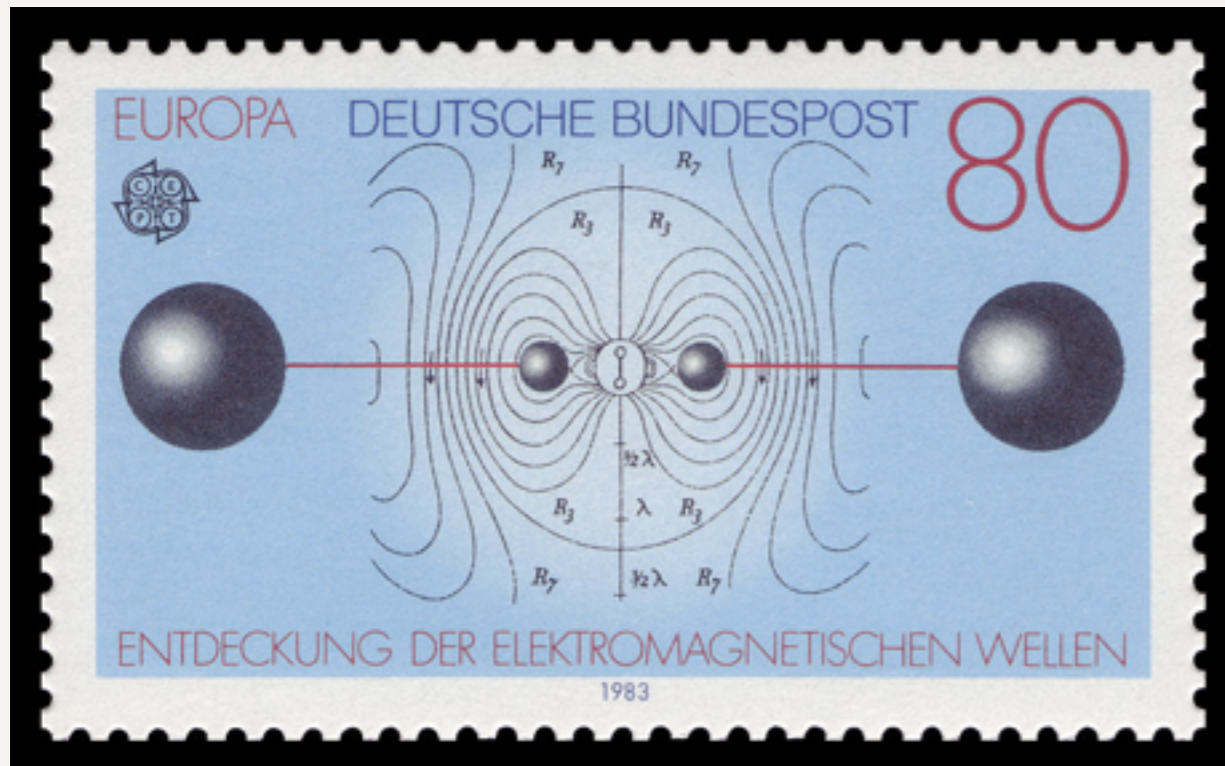
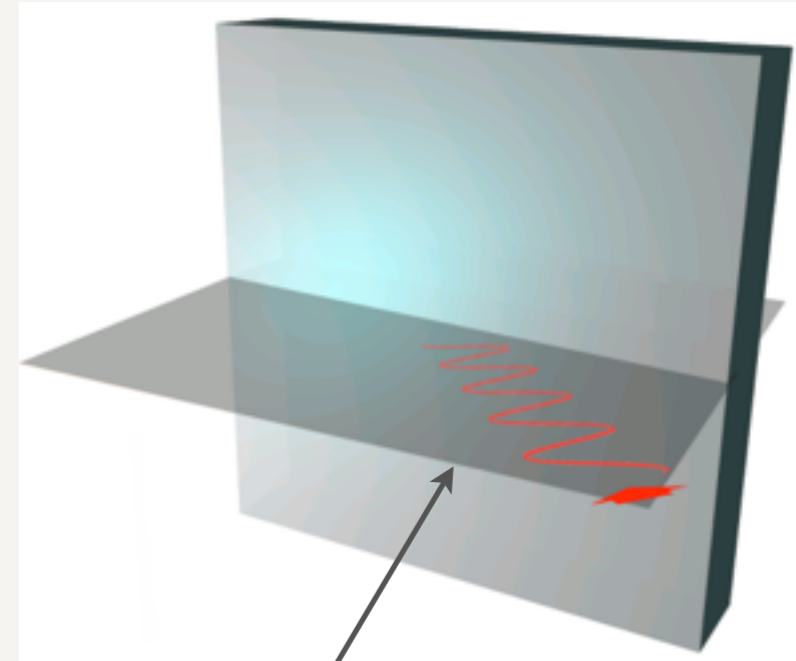
## Vom dünnen ins dichte Medium

- Reflexion nimmt stetig bis 100% zu großen Winkeln zu
- Bei „normalem“ Glas ca. 4% Reflexe
- „Alles“ reflektiert bei flachen Winkeln
- Brewster-Winkel: p-Polarisation verschwindet



# Brewster-Winkel

- Hertz'scher Dipol: strahlt nicht in Schwingungsrichtung



# Brewster-Winkel

Summe der Winkel:

$$180^\circ = 90^\circ + \alpha + \beta$$

$$\Rightarrow \beta = 90^\circ - \alpha$$

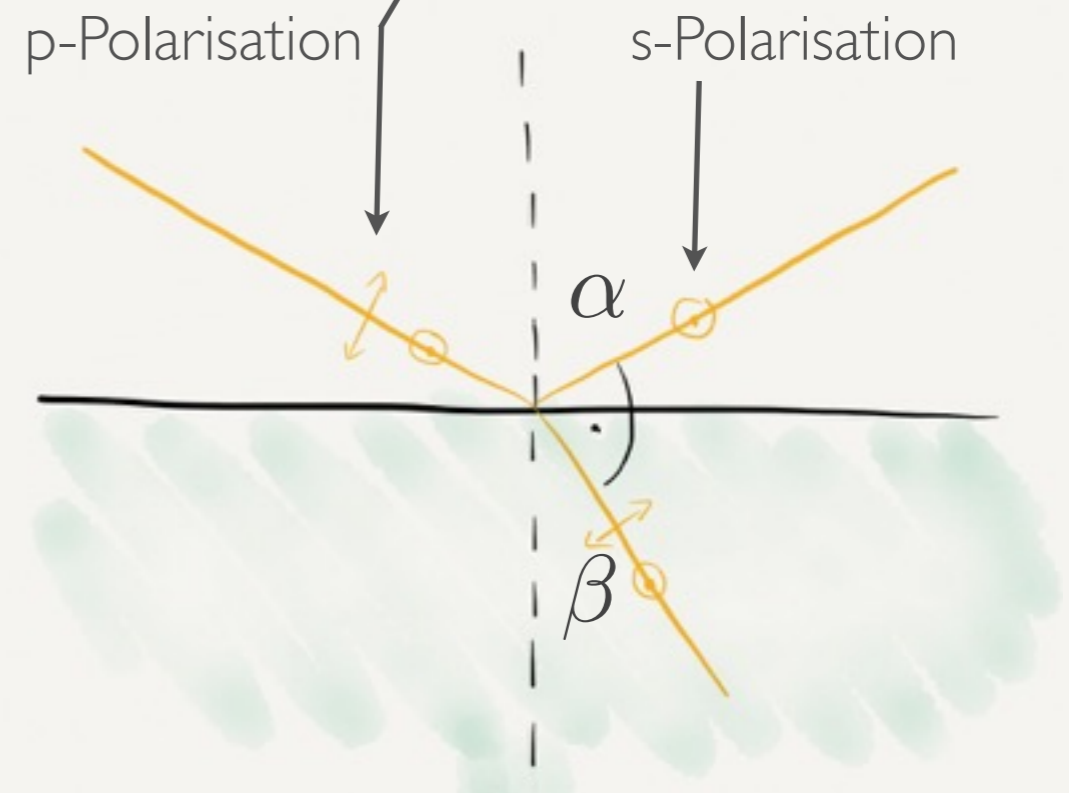
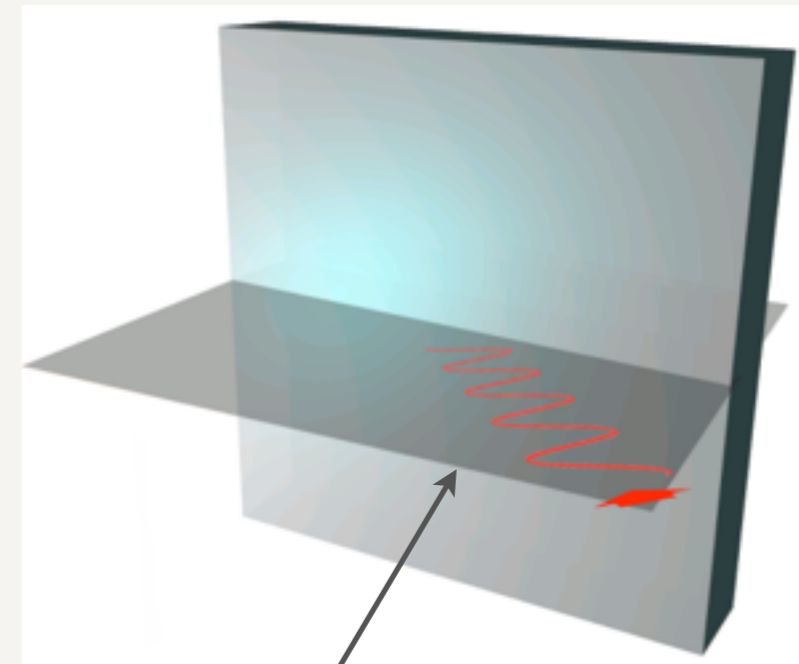
Also:

$$\sin \beta = \sin(90^\circ - \alpha) = \cos \alpha$$

Für den Brewster-Winkel  $\alpha_B$ :

$$n_1 \sin \alpha_B = n_2 \cos \alpha_B$$

$$\Rightarrow \tan \alpha_B = \frac{n_2}{n_1}$$

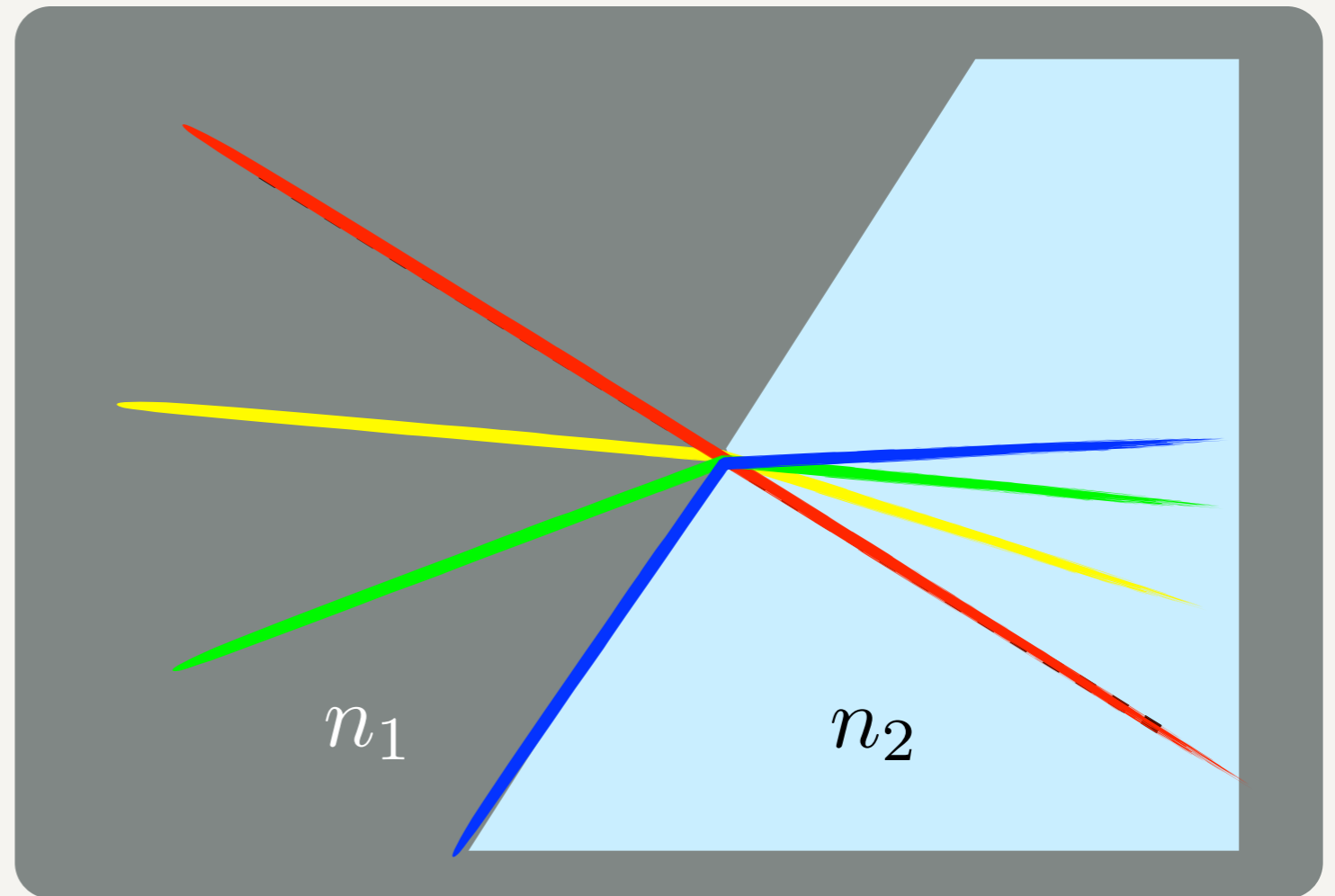


# Reflexionsgrad I

Vom dünnen ins dichte Medium

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta$$

Luft	Glas	Reflexionsgrad	
$\alpha$	$\beta$	s	p
0°	0°	4.3	4.3
30°	19.2°	6.1	2.7
60°	34.7°	18.3	1.5
89.9°	41.1°	99.3	98.6

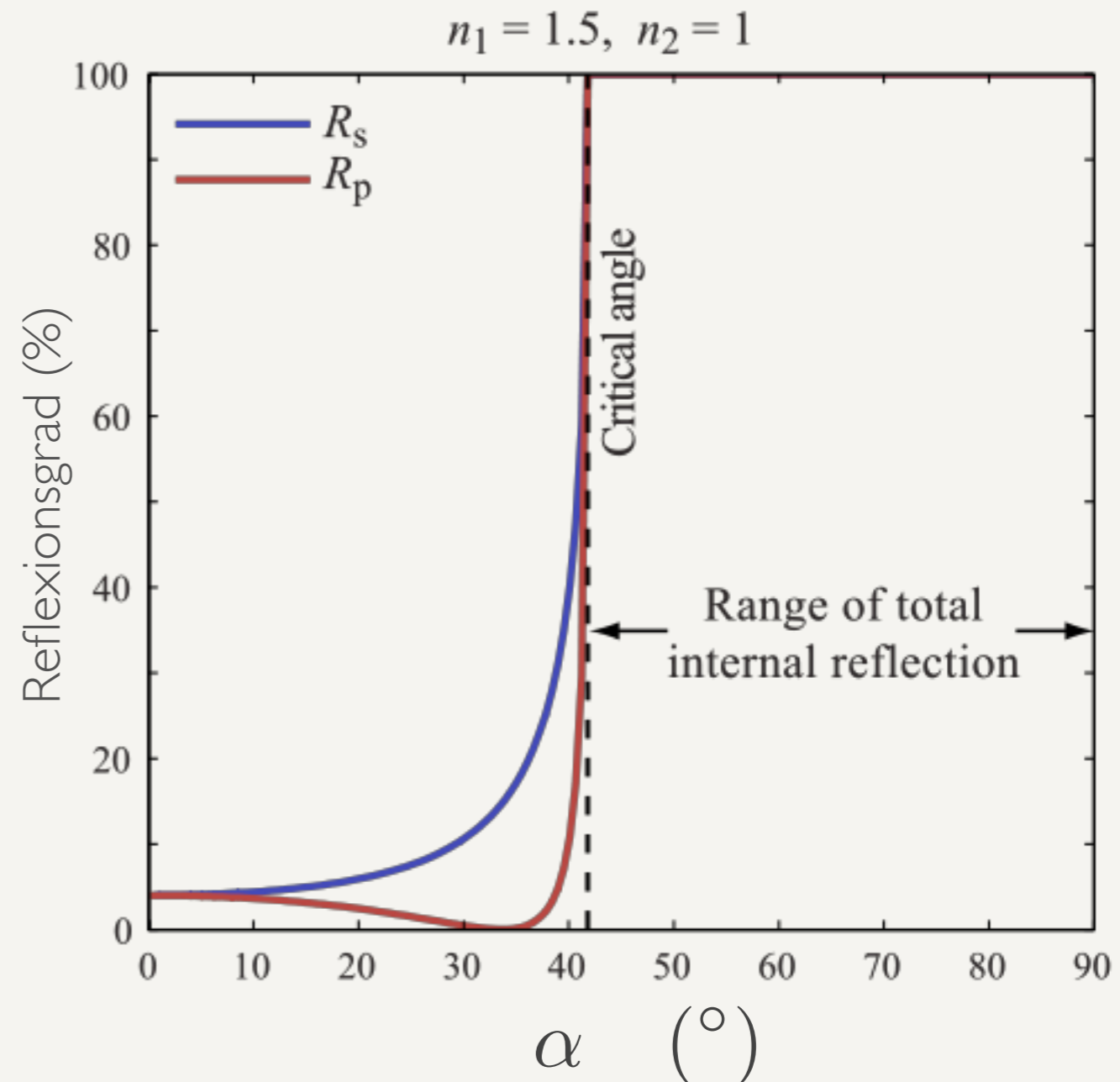


$$n_1 < n_2$$

# Reflexionsgrad II

## Vom dichten ins dünne Medium

- Reflexion nimmt stetig und schnell bis 100% beim Winkel der Totalreflexion zu.
- Für Winkel oberhalb des Grenzwinkels wird das Licht zu 100% (total-) reflektiert.
- Bei „normalem“ Glas ca. 4% Reflexe
- Brewster-Winkel: p-Polarisation verschwindet

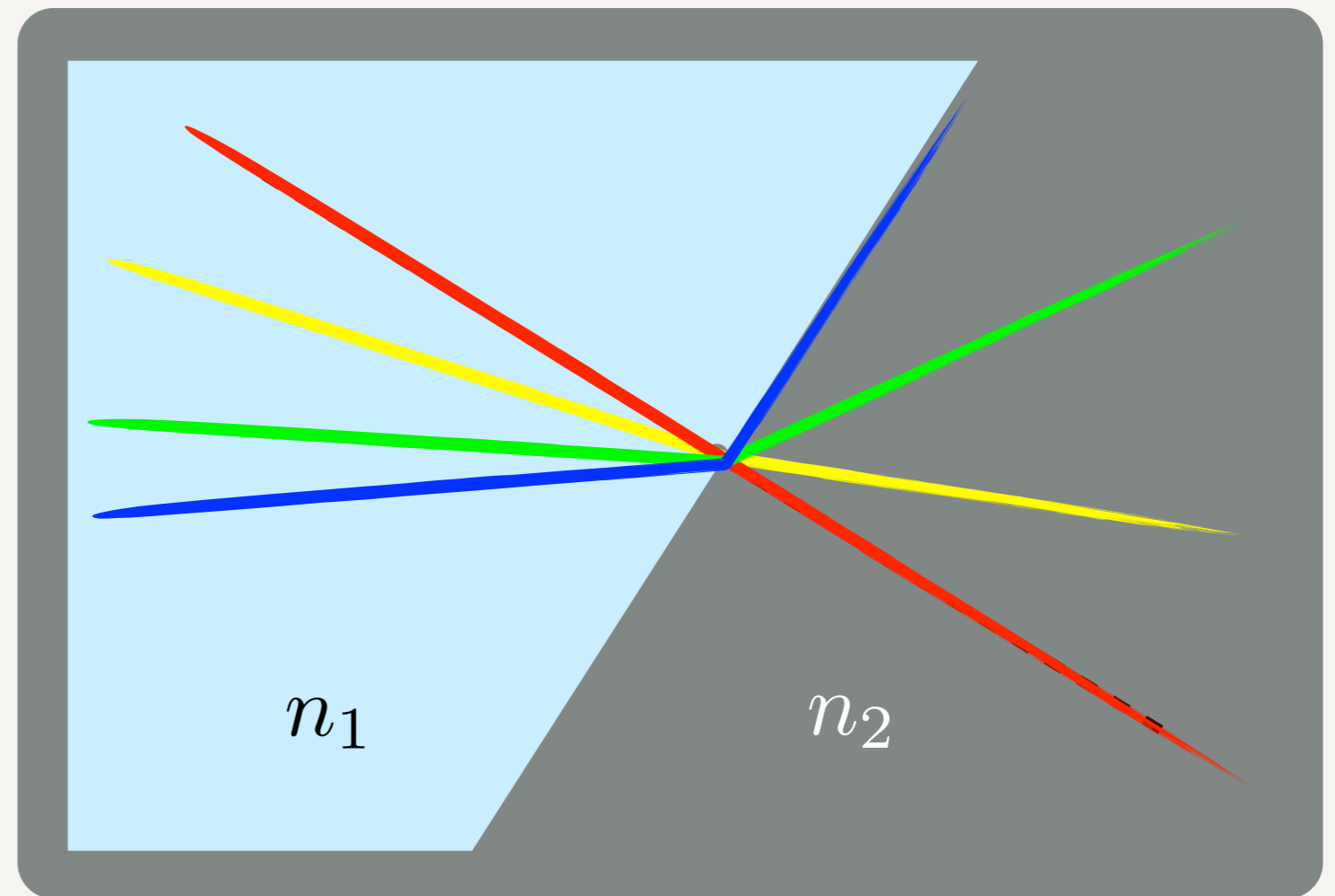


# Brechungsgesetz I

## Vom dünnen ins dichte Medium

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta$$

Glas	Luft	Reflexionsgrad	
$\alpha$	$\beta$	s	p
0°	0°	4.3	4.3
19.2°	30°	6.1	2.7
34.7°	60°	18.3	1.5
41.1°	89.9°	99.8	99.5



$$n_1 > n_2$$

# Fresnel'schen Formeln

## Zusammenfassung

- Zwei Polarisationsrichtungen: senkrecht und parallel zur Einfallsebene des Lichtes
- Vier Formeln für die Amplitudenverhältnisse
- Intensitätskoeffizienten berechnen sich als Quadrat der Amplituden und mit der Energieerhaltung
- Brewster-Winkel: p-Polarisation verschwindet in Reflexion
- Bei unpolarisiertem Licht kann der Mittelwert gebildet werden

### Amplituden

$$r = E_r / E_e \quad (|| \text{ und } \perp)$$

$$t = E_t / E_e \quad (|| \text{ und } \perp)$$

### Intensitäten

$$R = r^2 \quad (|| \text{ und } \perp)$$

$$T = 1 - R \quad (|| \text{ und } \perp)$$

### Unpolarisiert

$$R = (R_{||} + R_{\perp}) / 2$$

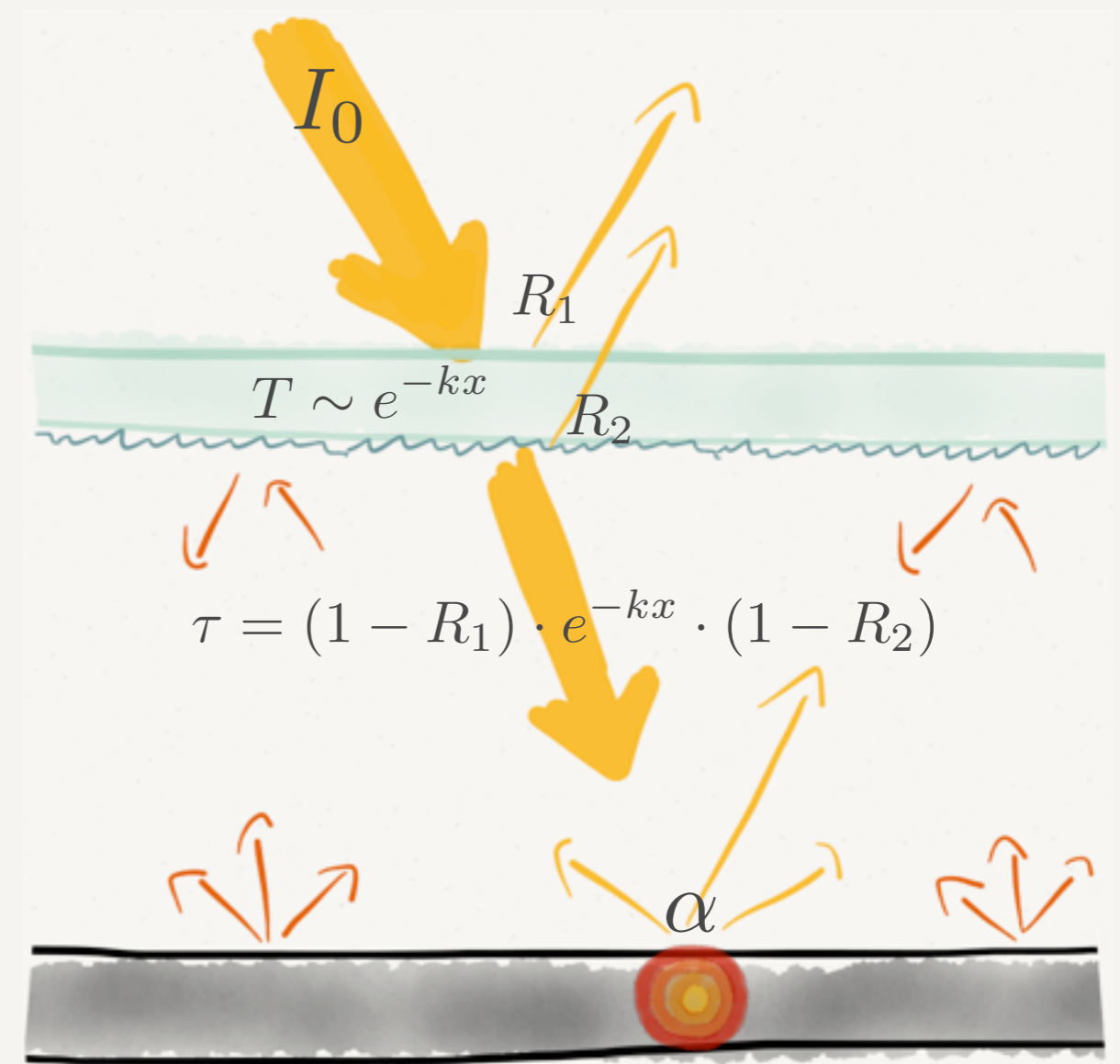
$$T = 1 - R$$



# Fresnel'sche Formeln: Anwendungen

# Strahlungsbilanz Solarkollektor

- Reflexions- und Transmissionsverluste am Deckglass.
- Teilweise Absorption, geringe Reflexion am Absorber.
- Wärmestrahlung vom Absorber.
- Produkt aus Gesamttransmission Deckglass und Absorption ist der **optische Wirkungsgrad**.
- Selektive Schicht auf dem Absorber reduziert Wärmestrahlung.
- Selektive AR-Schicht auf der Innenseite des Deckglases reflektiert Wärmestrahlung.



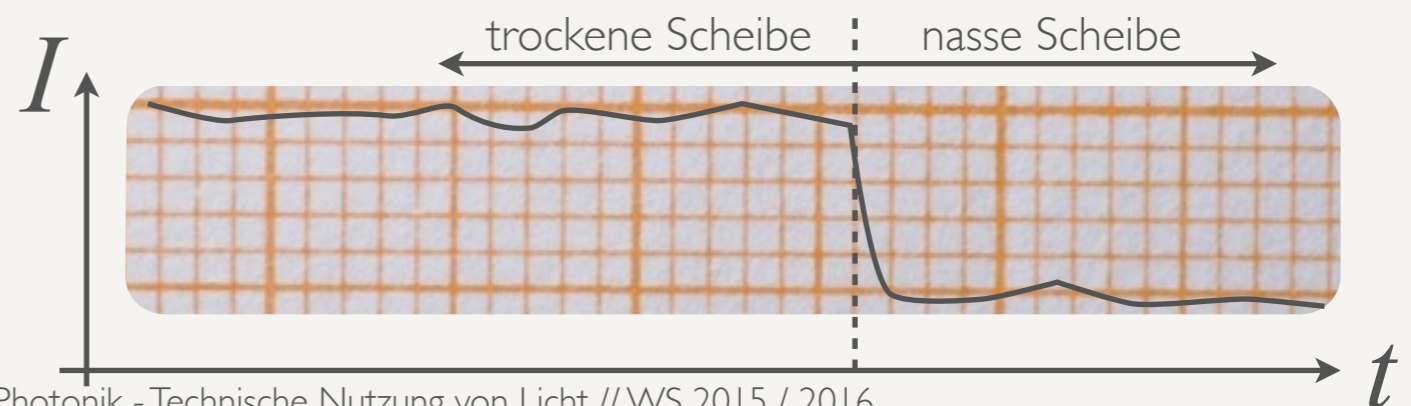
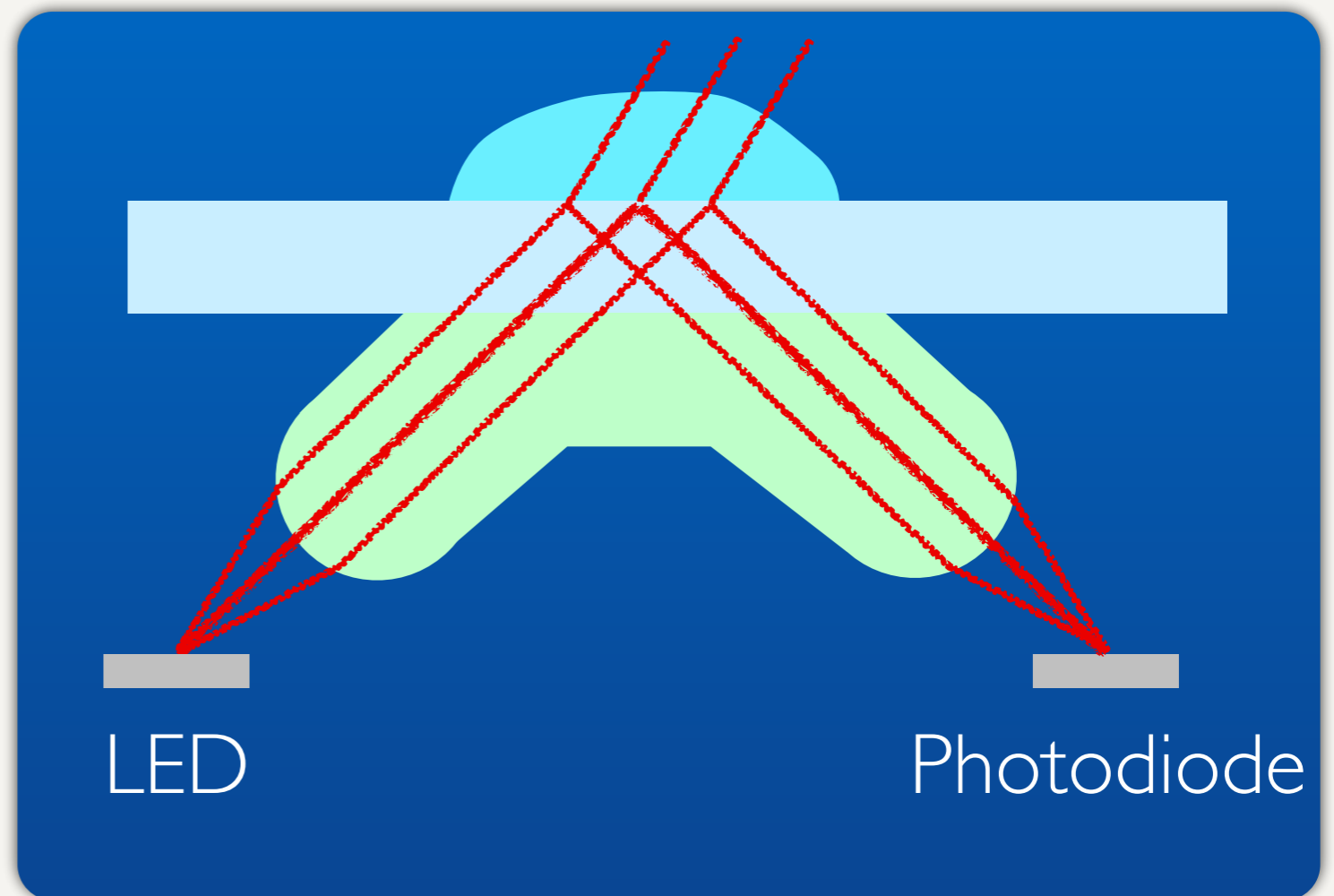
$\tau$  Gesamttransmission Deckglass  
 $\alpha \cdot \tau$  Optischer Wirkungsgrad

# Regensensor Funktionsprinzip

Im trockenen Zustand  
Totalreflexion an der  
Windschutzscheiben-  
Außenseite

Wassertropfen hebt die  
Bedingung für  
Totalreflexion durch  
höheren Brechungsindex  
( $n = 1.33$ ) auf.

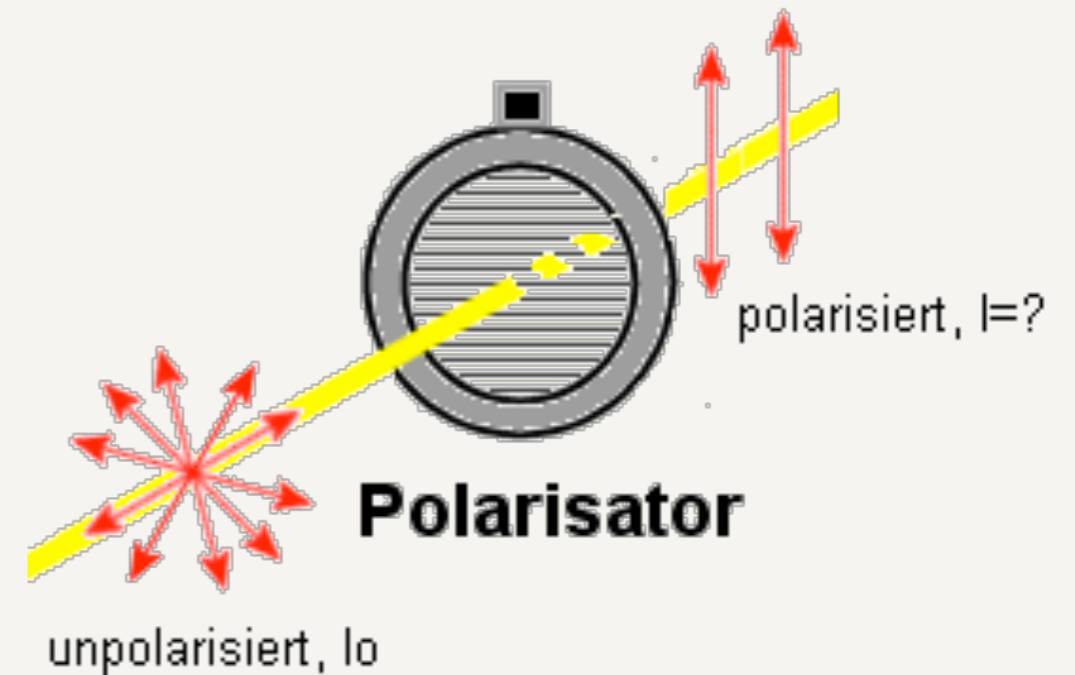
Das Signal der Photodiode  
verringert sich.



# Polarisation: Anwendungen

# Polarisator und Analysator

- Ein **Polarisator** lässt nur Licht einer bestimmten Polarisation durch.
- Gibt es sowohl für lineare als auch zirkulare Polarisation.
- Verschiedene Mechanismen möglich
- Wenn ein Polarisator eingesetzt wird um die Polarisation von Licht zu bestimmen nennt man ihn einen **Analysator**.



Quelle: [Chemgapedia](#)

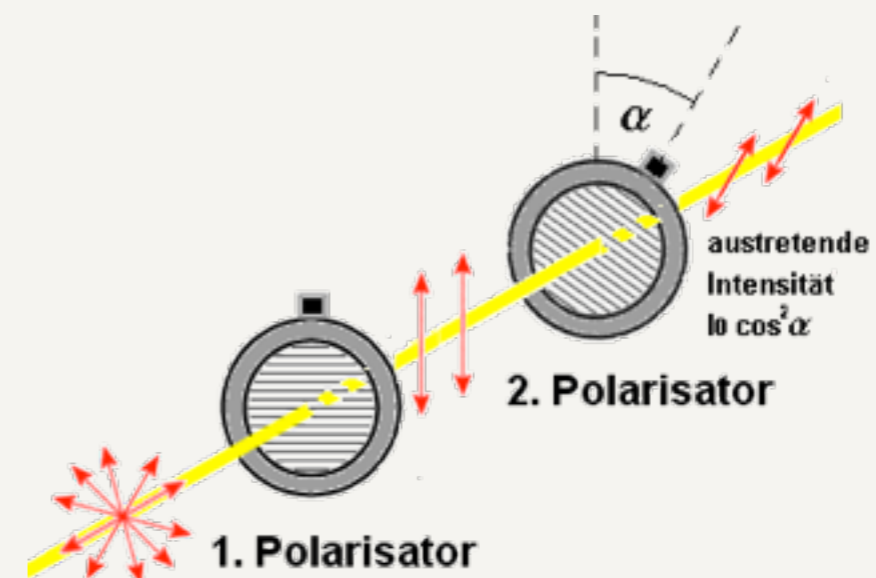
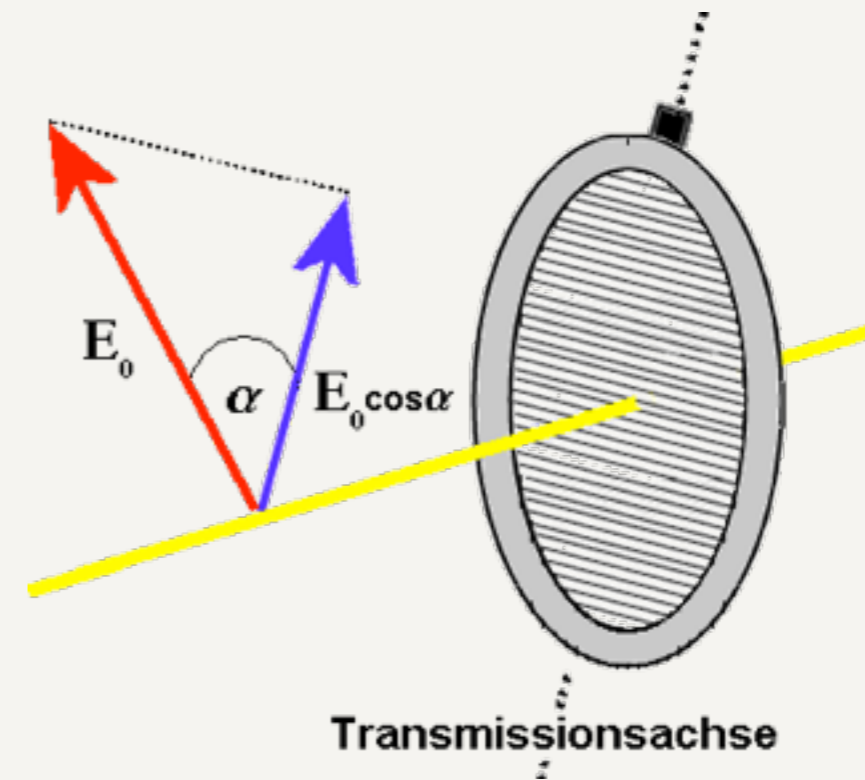
# Malus'sche Gesetz

- Trifft linear polarisiertes Licht auf den Analysator ist die Amplitude des transmittierten elektrischen Feldes

$$E = E_0 \cdot \cos \alpha$$

- Bei Licht wird die Intensität gemessen, das Quadrat der Amplitude. Also ist das Gesetz von Malus:

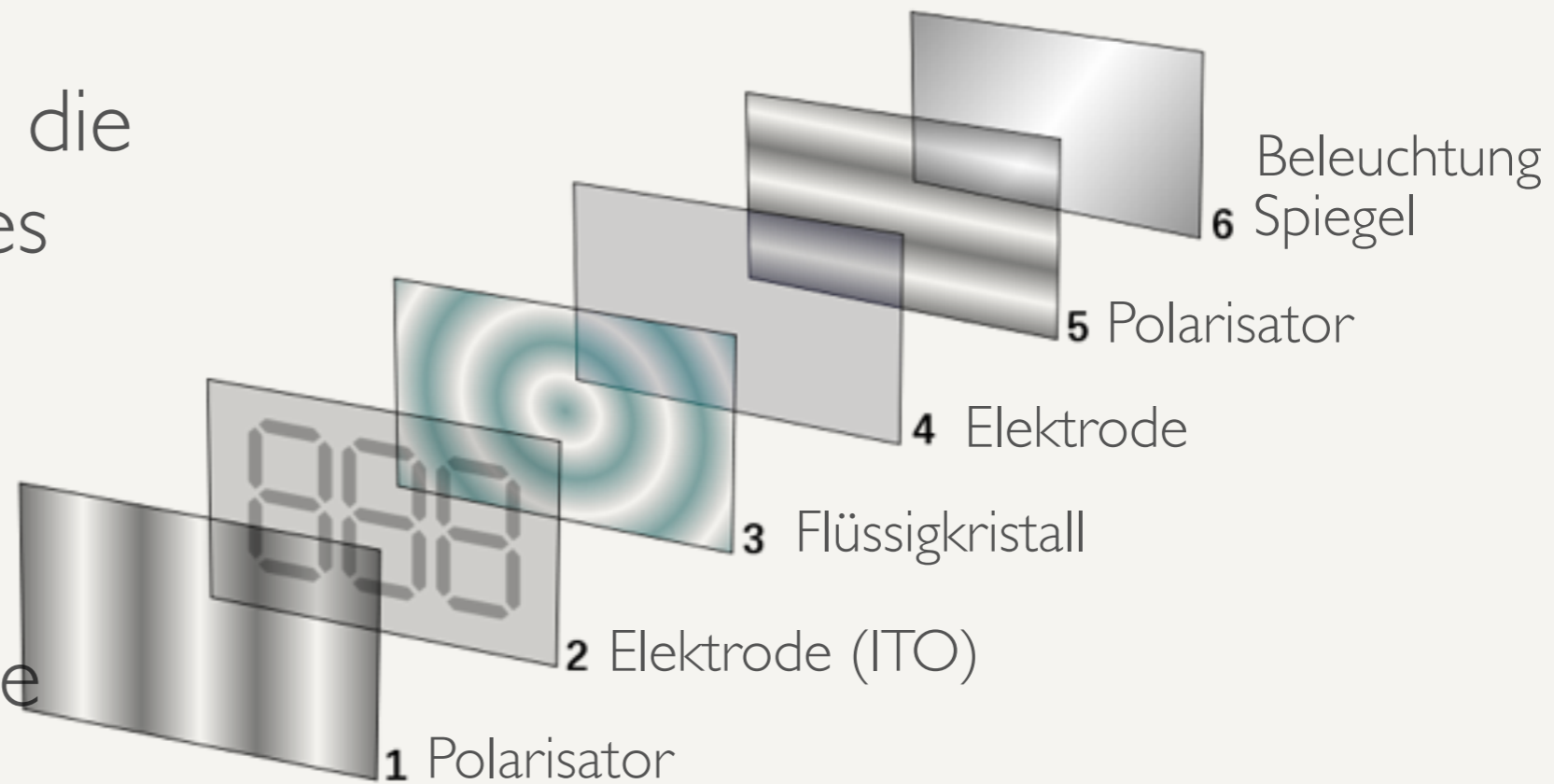
$$I = I_0 \cdot \cos^2 \alpha$$



Quelle: [Chemgapedia](#)

# Flüssigkristallanzeigen Liquid Crystal Display (LCD)

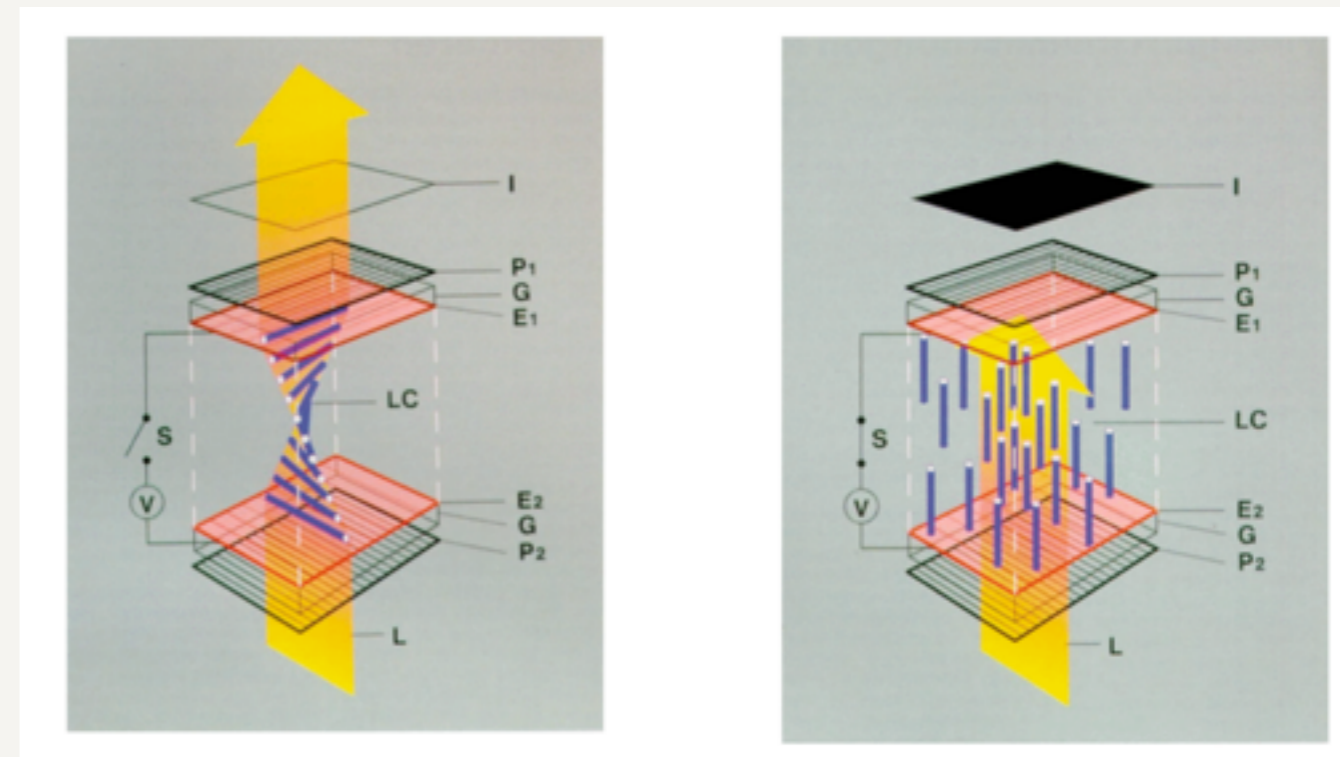
- Flüssigkristalle können die Polarisation des Lichtes beeinflussen.
- Im TN-LCD („twisted nematic“) dreht die Flüssigkristallschicht die Polarisation um  $90^\circ$ .
- Bei angelegter Spannung wird die Polarisation nicht gedreht, das Licht geht nicht



# Twisted-Nematic-Zelle

## Optische Funktionsweise

- Die Flüssigkristalle sind ohne Spannung („off“) in einer 90°-Spirale orientiert.
- Vielfache Anwendung des Malus'schen Gesetzes: die Polarisation wird um 90° gedreht.
- Das Licht geht durch die gekreuzten Polarisatoren (= „weiß“)
- Unter Spannung orientieren sich die Flüssigkristalle entlang des elektrischen Feldes.
- Ohne Drehung der Polarisation sind die beiden gekreuzten Polarisatoren dunkel (= „schwarz“)

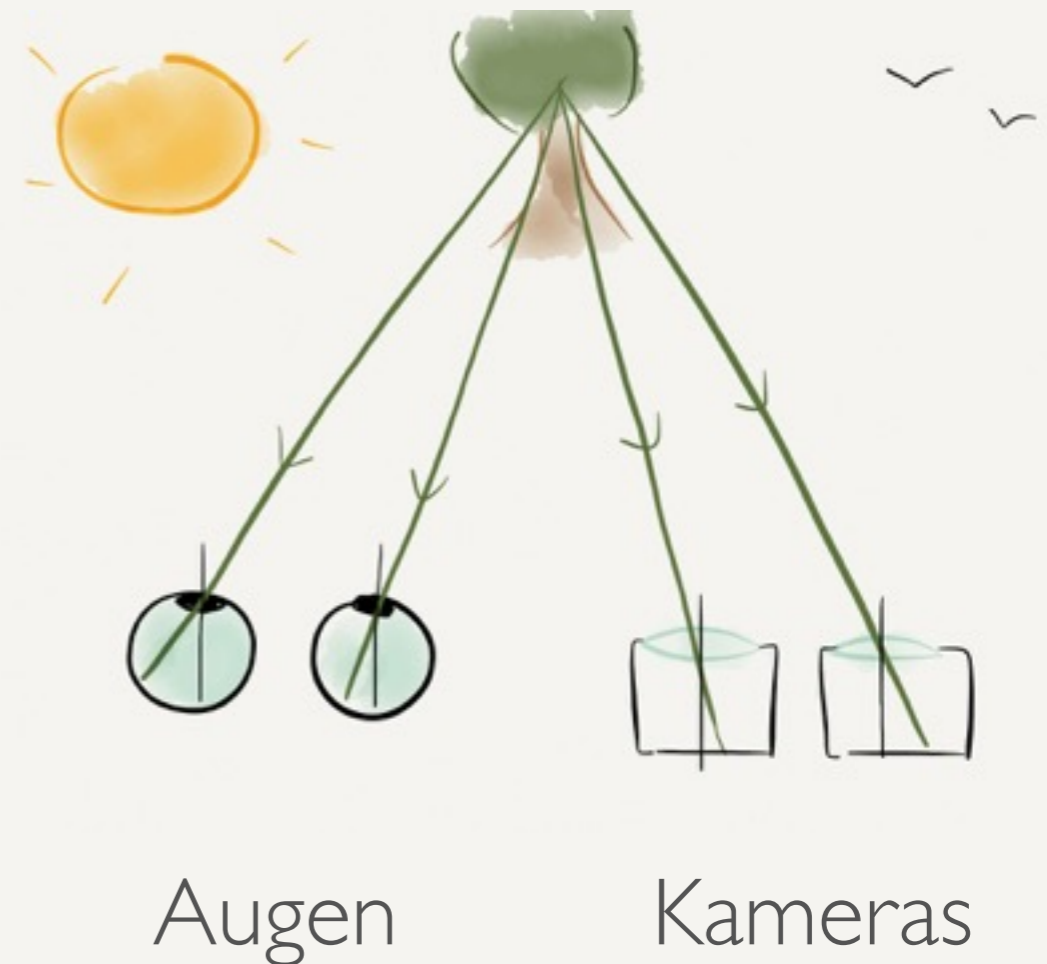




# Stereoskopisches Fernsehen und Kino

## Das ist kein 3D!

- Zwei 2D-Bilder sind nicht ein 3D-Bild!
- Je ein Bild für das linke und das rechte Auge
- Aufzeichnung mit zwei Kameras
- Wiedergabe mit zwei Projektoren



# Stereoskopie



# Stereoskopie mit Polarisation

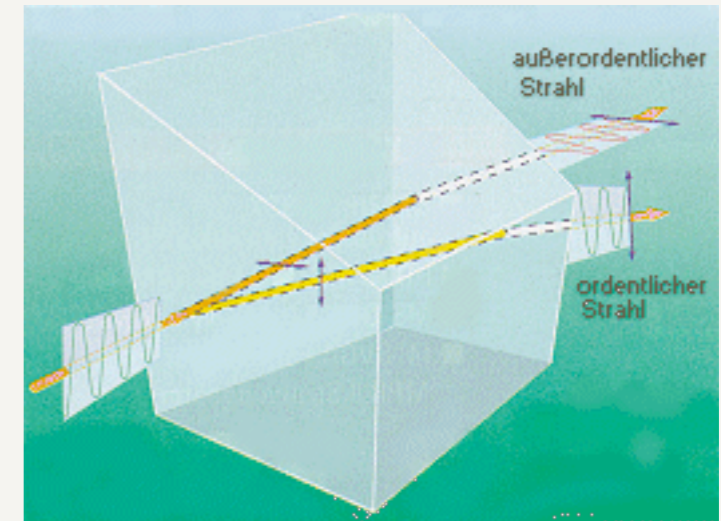
- Nutzung der Polarisation heute Stand der Technik wegen kostengünstiger Herstellung und Farbfilm möglich.
- Je ein Bild in horizontaler und vertikaler Polarisation
- Vor den Augen eine Brille mit einem horizontalen und einem vertikalen Polarisator.
- Fortentwicklung: mit zirkularer Polarisation ist das Bild stabil unter Drehung und Neigung des Kopfes.
- Benötigt metallische Leinwand zur Erhaltung der Polarisation bei Reflexion.



# Doppelbrechung

# Doppelbrechung

- Lichtgeschwindigkeit abhängig von der Polarisation des Lichtes
- Lichtgeschwindigkeit abhängig von der Orientierung des Kristallgitters (vergleiche Dispersion als Resonanz eines getriebenen Oszillators)



# Sonnenstein

- Die Wikinger sind nach aktuellem Kenntnisstand ohne Navigationsinstrumente über den Atlantik gesegelt.
- Es gibt aber schriftliche Berichte eines sagenhaften **Sonnensteins**.
- Vor kurzem entdeckten Wissenschaftler wie ein doppelbrechender Kristall genutzt werden kann um die Sonnenposition selbst unter Wolken zu bestimmen.
- Ein solcher Stein wurde in einem englischen Wrack von 1592 gefunden.
- Polarisation war zu diesem Zeitpunkt noch nicht bekannt!
- Dies ist kein Beweis! Es ist eine **Arbeitshypothese**.

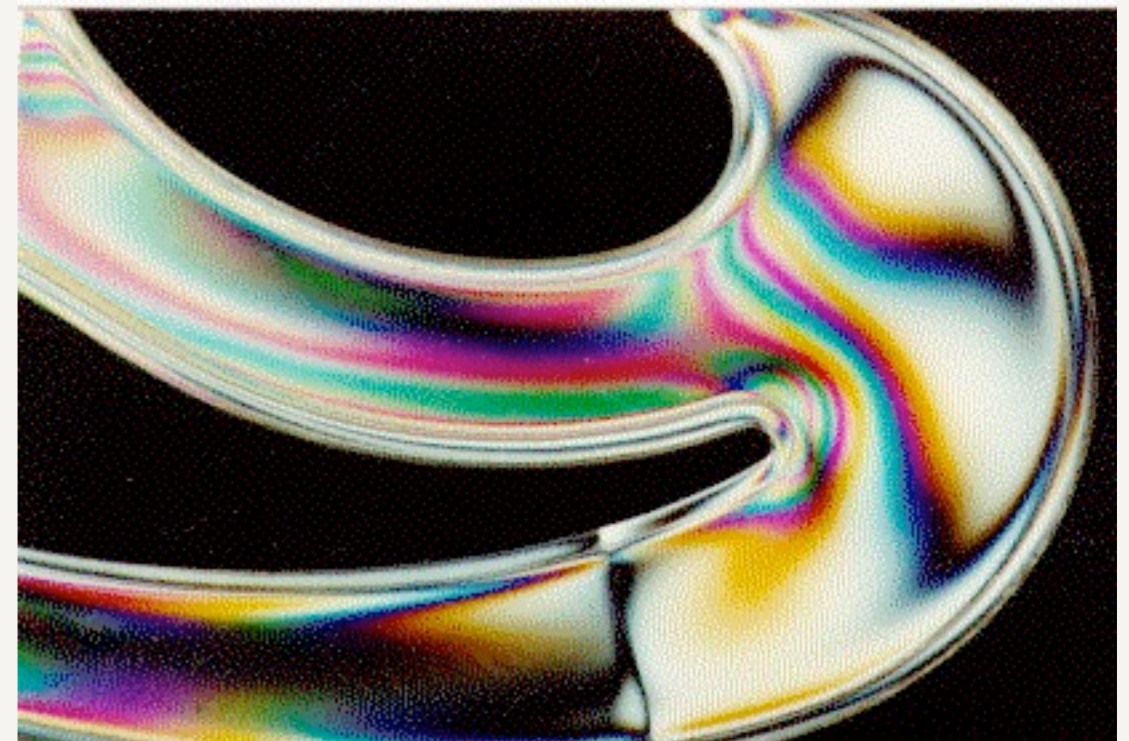


<http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/early/2011/10/28/rspa.2011.0369>

<http://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/navigation-sonnensteine-koennten-wikingern-den-seeweg-gewiesen-haben-a-795396.html>

# Spannungsdoppelbrechung

- Mechanischer Stress hebt die Isotropie eines Materials auf
- Das Material wird doppelbrechend
- Der Grad der Doppelbrechung hängt von der Stärke der mechanischen Belastung ab.
- Wird zur Material- und Prozessanalyse eingesetzt, z.B. Kunststoff-Spritz-Parameter



Quelle: [Chemgapedia](#)