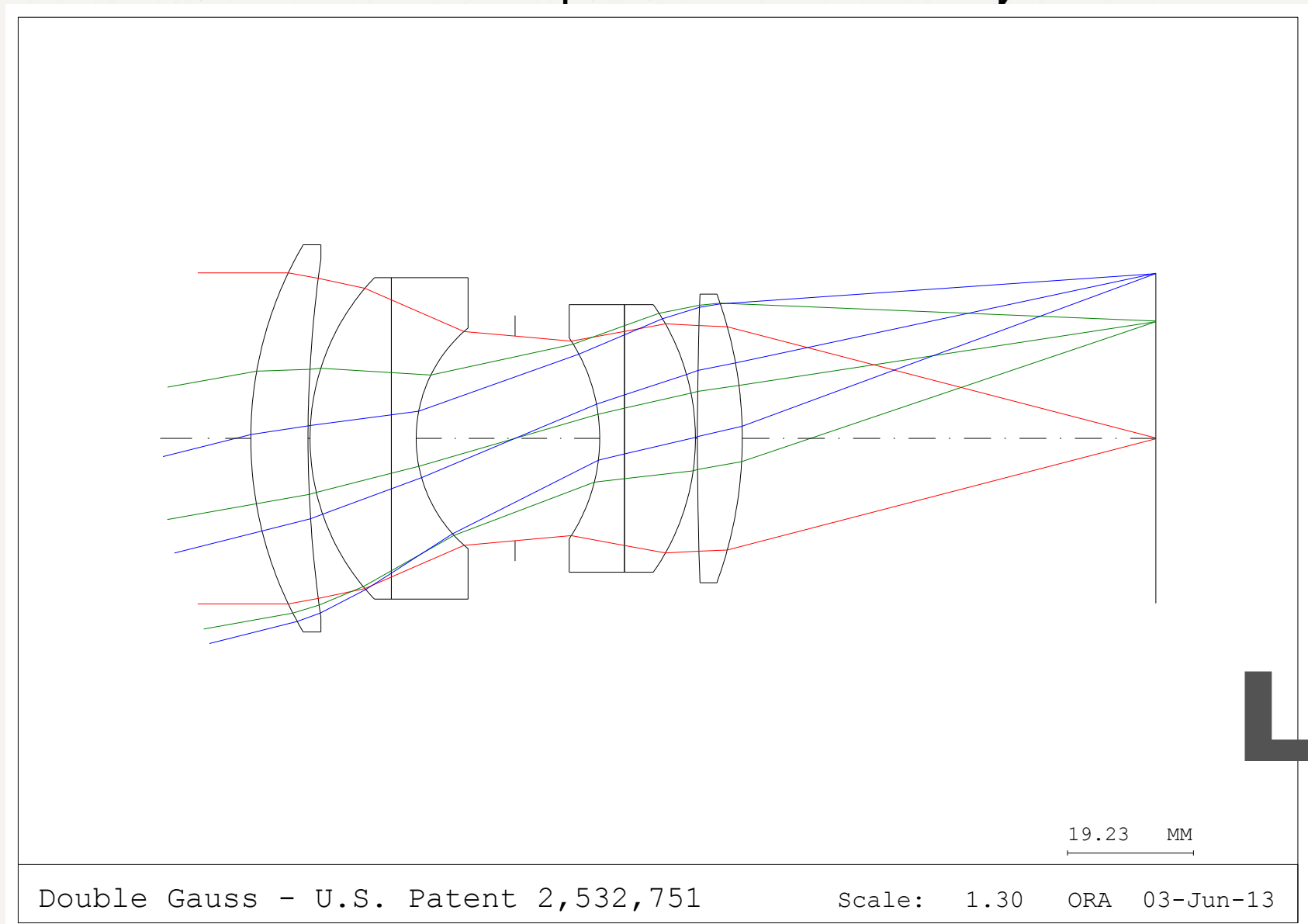
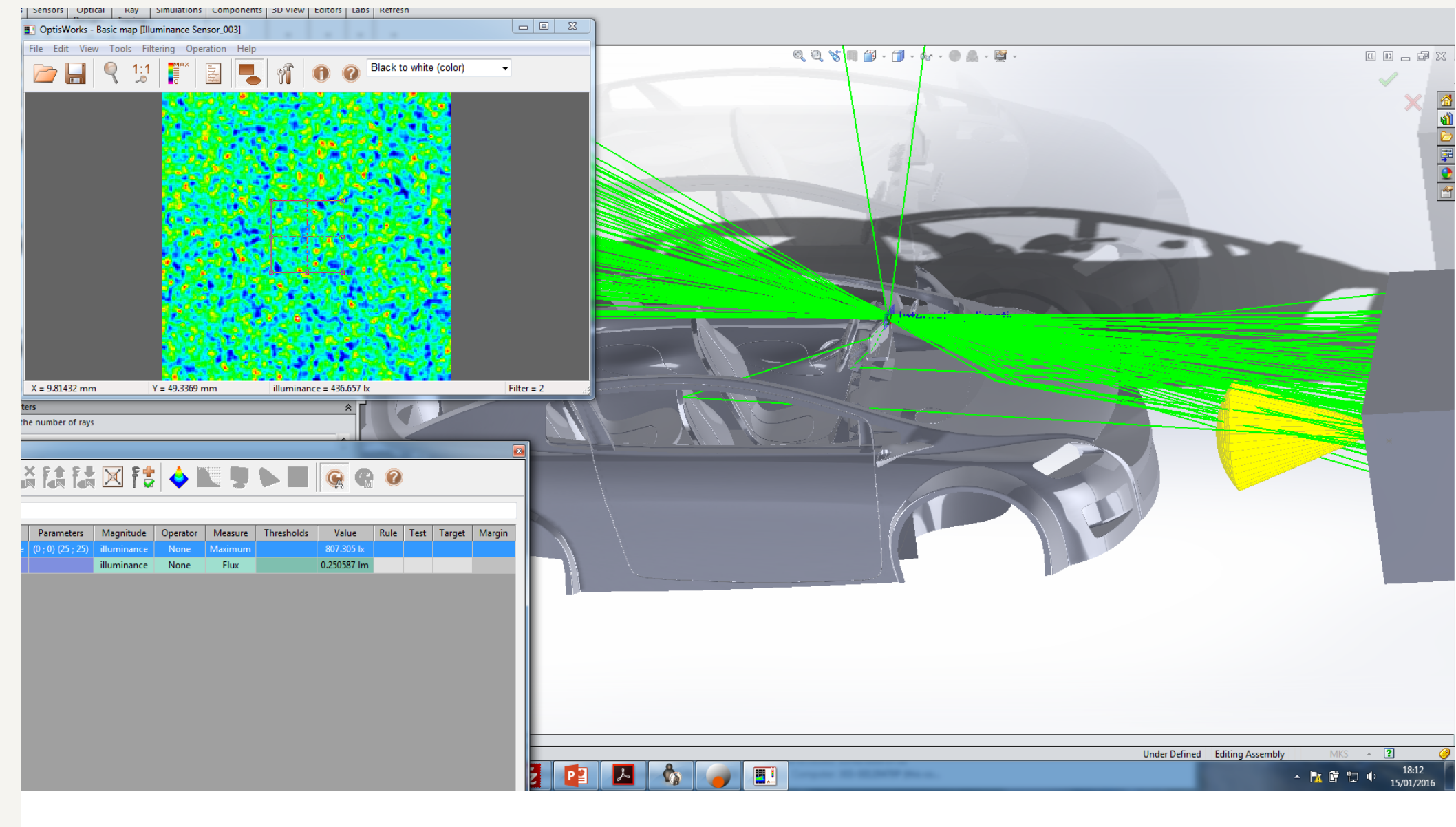
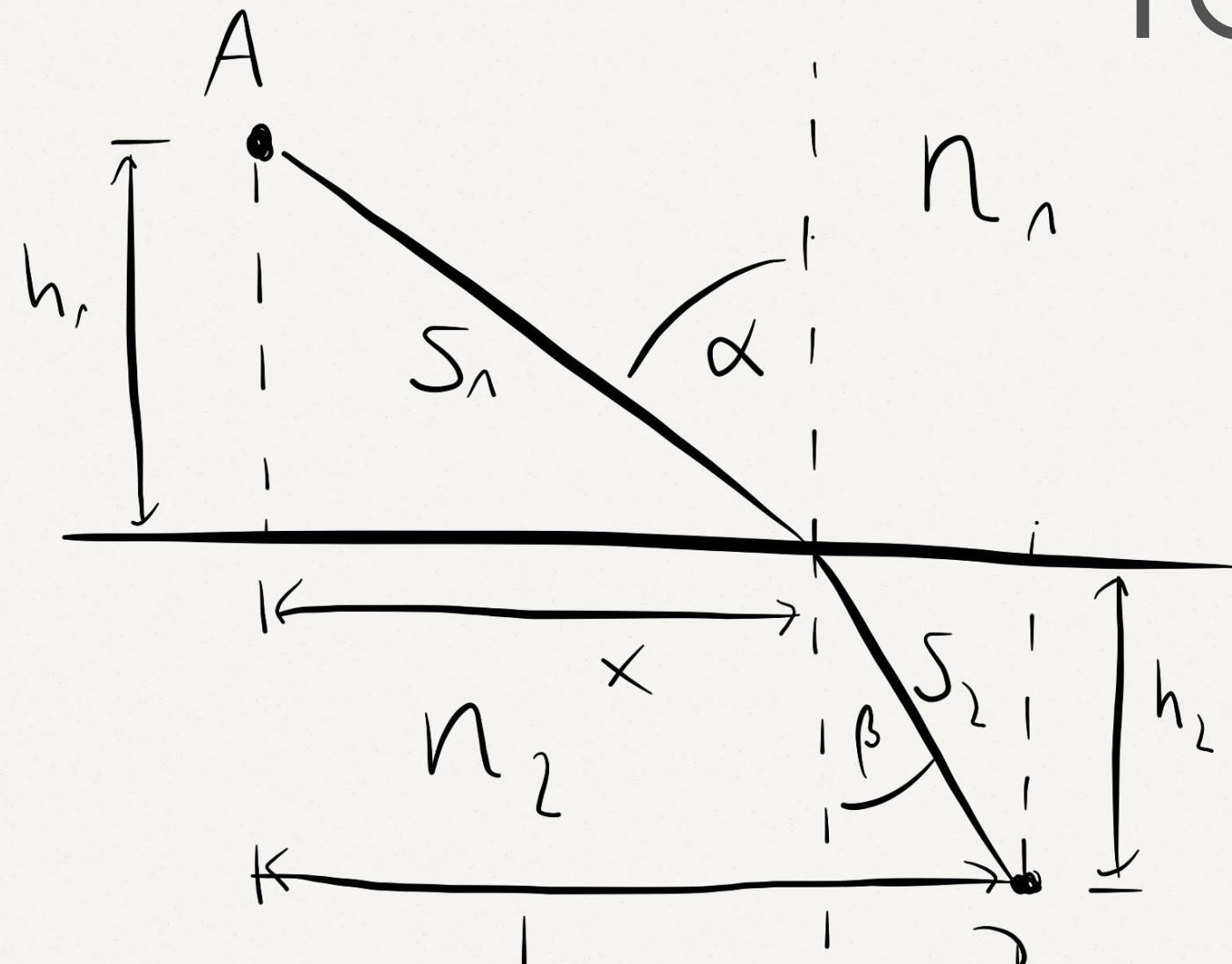


# Technische Raytracer



$$\mathbf{u}' = \frac{n_1}{n_2} \cdot \mathbf{u} - \mathbf{n} \left[ \frac{n_1}{n_2} \mathbf{n} \cdot \mathbf{u} - \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 (1 - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{u})^2)} \right]$$

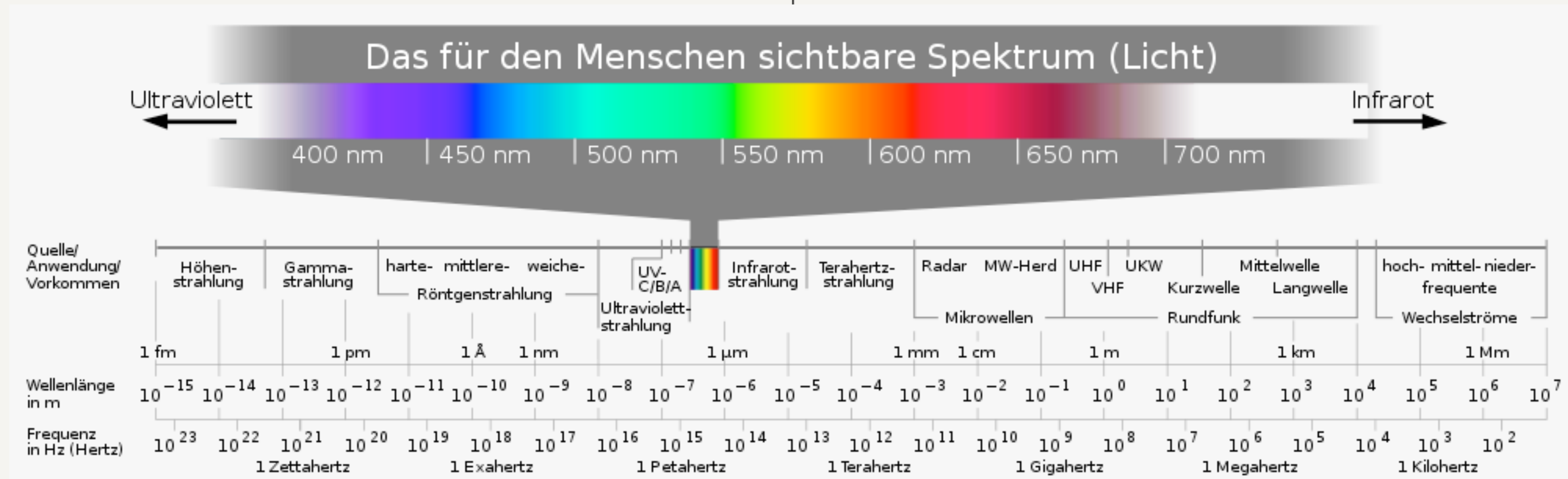
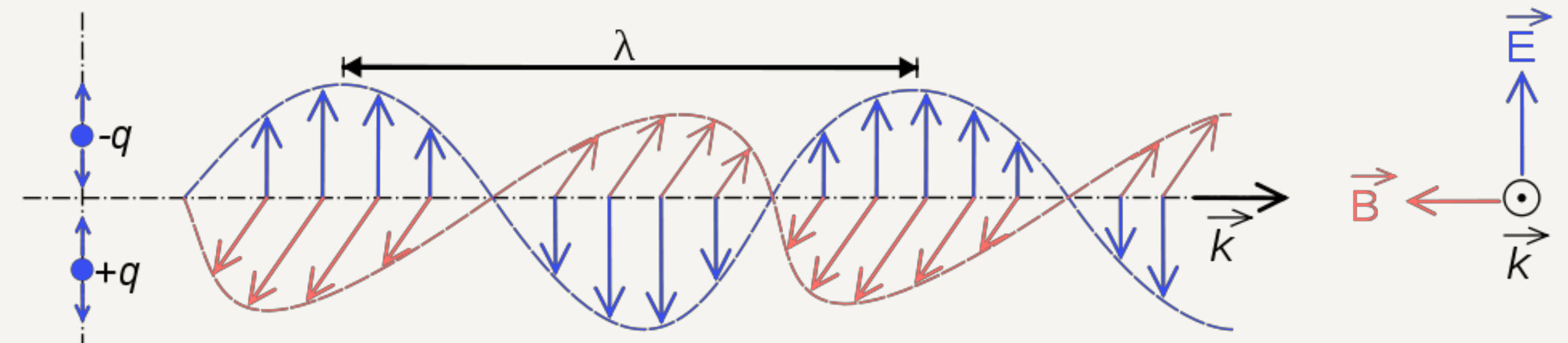
## Licht und Spektrum

# Was ist Licht?

# Was ist Licht?

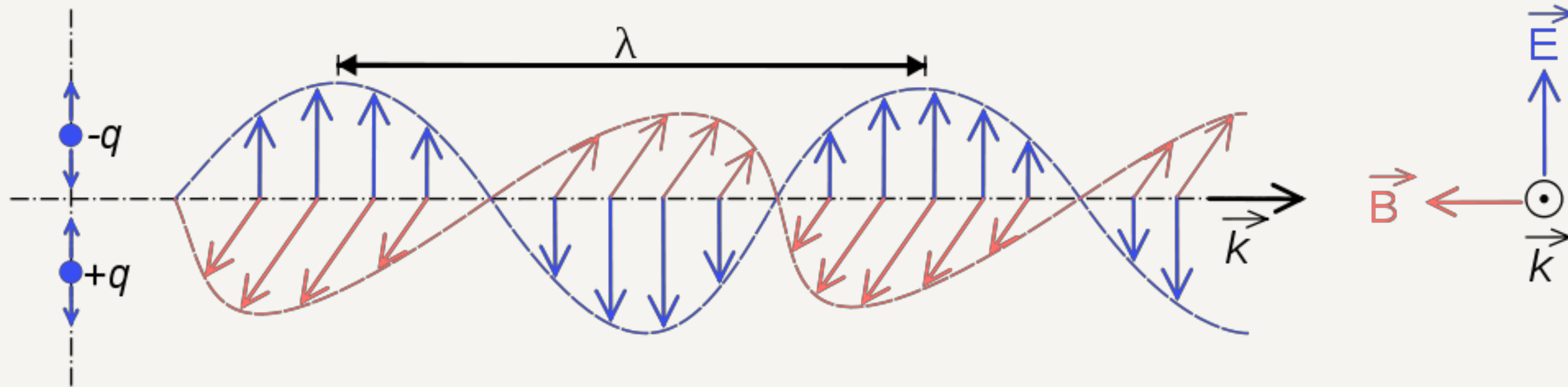
$$\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{E}_0 e^{-i\mathbf{k}\mathbf{x}} \cdot e^{i\omega t}$$

- Elektromagnetische Welle
- Transversalwelle
- Polarisation



# Was ist Licht?

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{E}_0 e^{-i\mathbf{k}\mathbf{x}} \cdot e^{i\omega t}$$





# Wellengleichung

Direkt aus Maxwell-Gleichungen:

$$\Delta \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{E} = 0$$

mit

$$\epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$$

und

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

# Ebene Welle

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{E}_0 e^{-i\mathbf{k}\mathbf{x}} \cdot e^{i\omega t}$$

- Einfachste Lösung: ebene Welle.
- Oszilliert periodisch im Raum mit der Frequenz  $k$ .
- Oszilliert periodisch in der Zeit mit Frequenz  $\omega$ .
- Breitet sich mit der Geschwindigkeit  $c$  aus.

$$\lambda = \frac{2\pi}{k}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

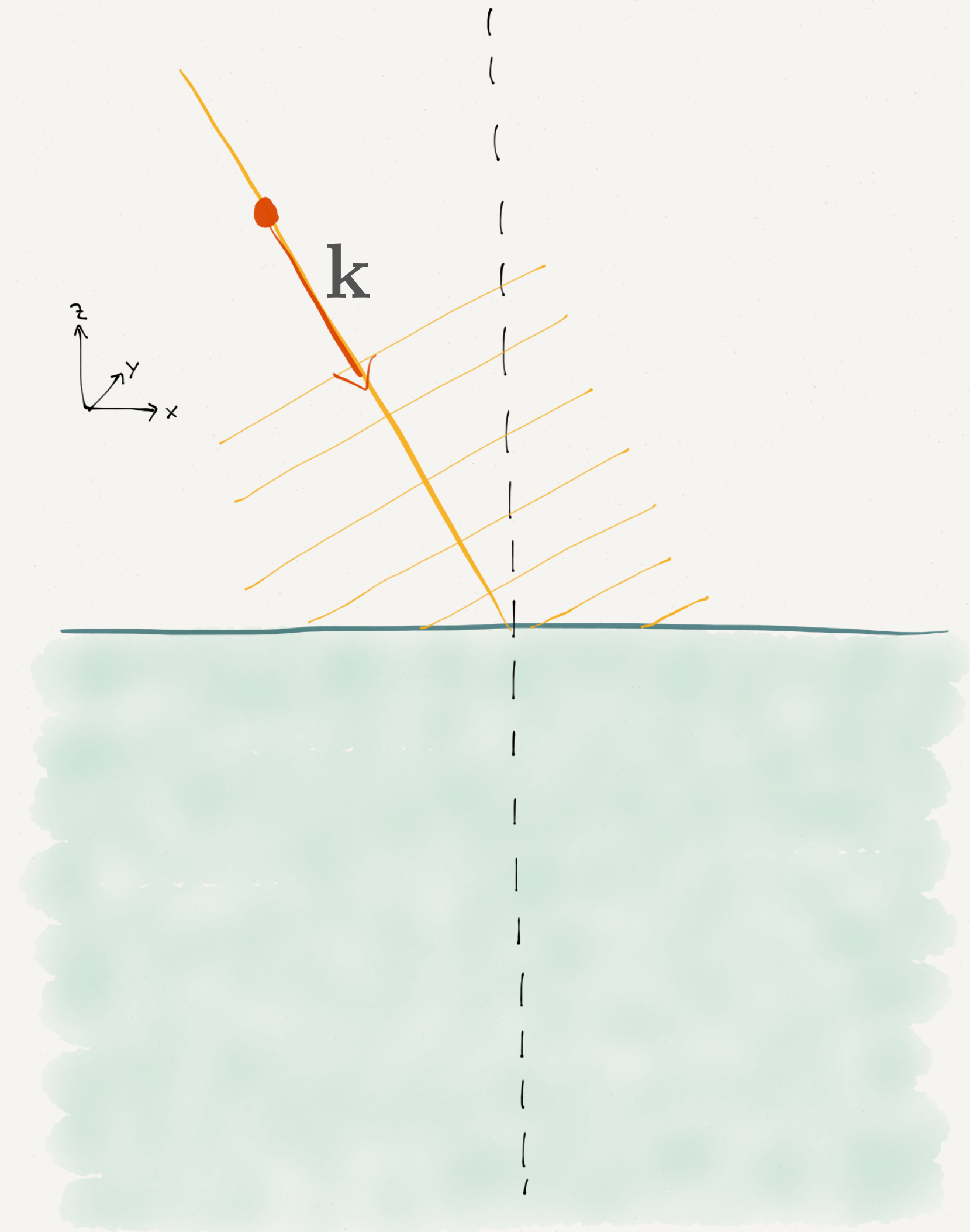
$$c = \lambda \cdot \nu$$

# Aufgabe Ebene Welle

- Welche geometrische Bedeutung hat der Faktor  $kx$  ?
- Fertigen Sie eine Skizze an.

**Hessesche Normalform!**

$$kx - d = 0$$



# Kugelwellen

- Einfache Lösung für die Wellengleichung in sphärischen Kugelkoordinaten.
- Fällt mit  $1/r$  ab.

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mathbf{E}_0}{r} e^{-i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)}$$



# Polarisation

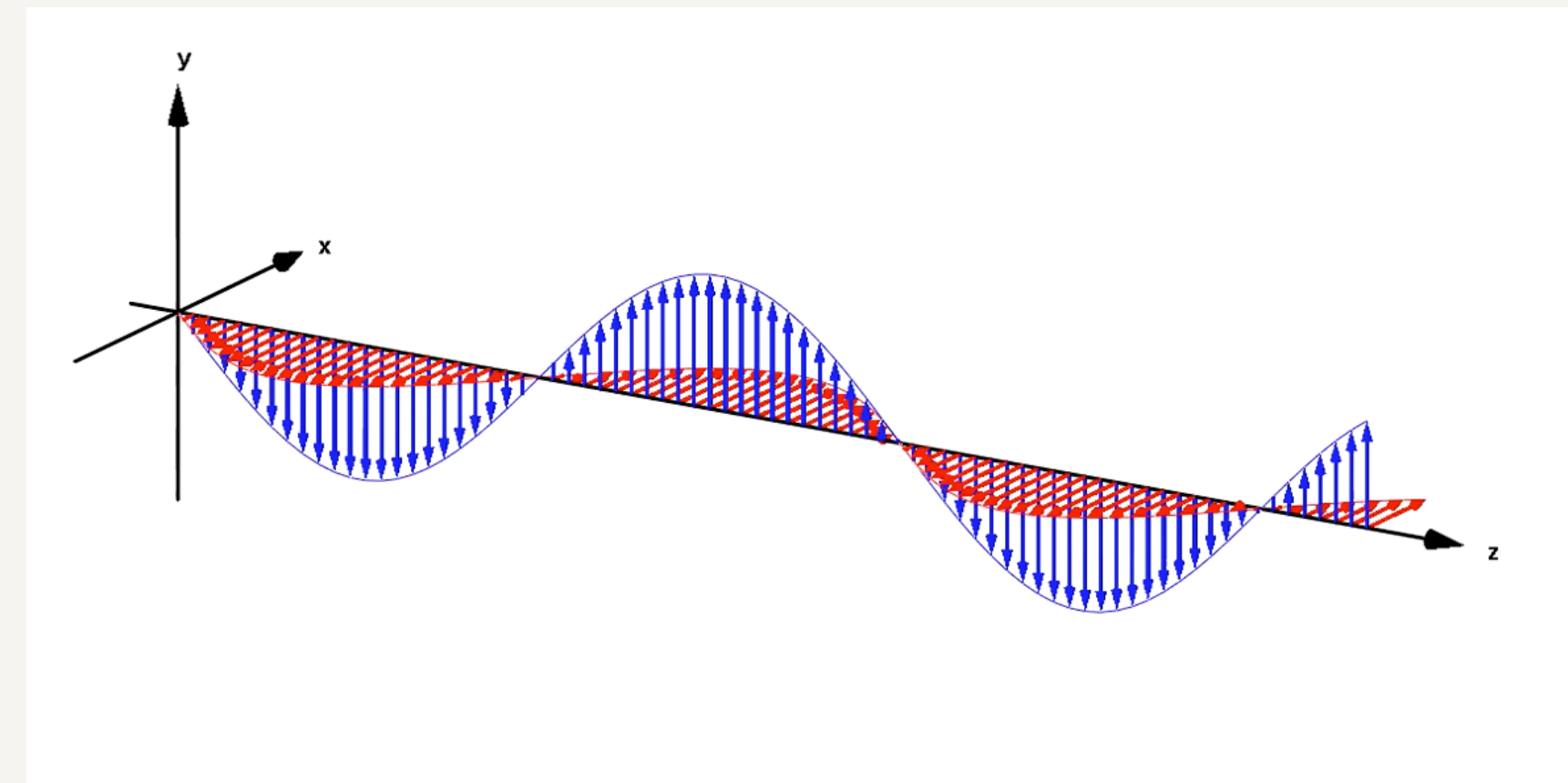
# Polarisation

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

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

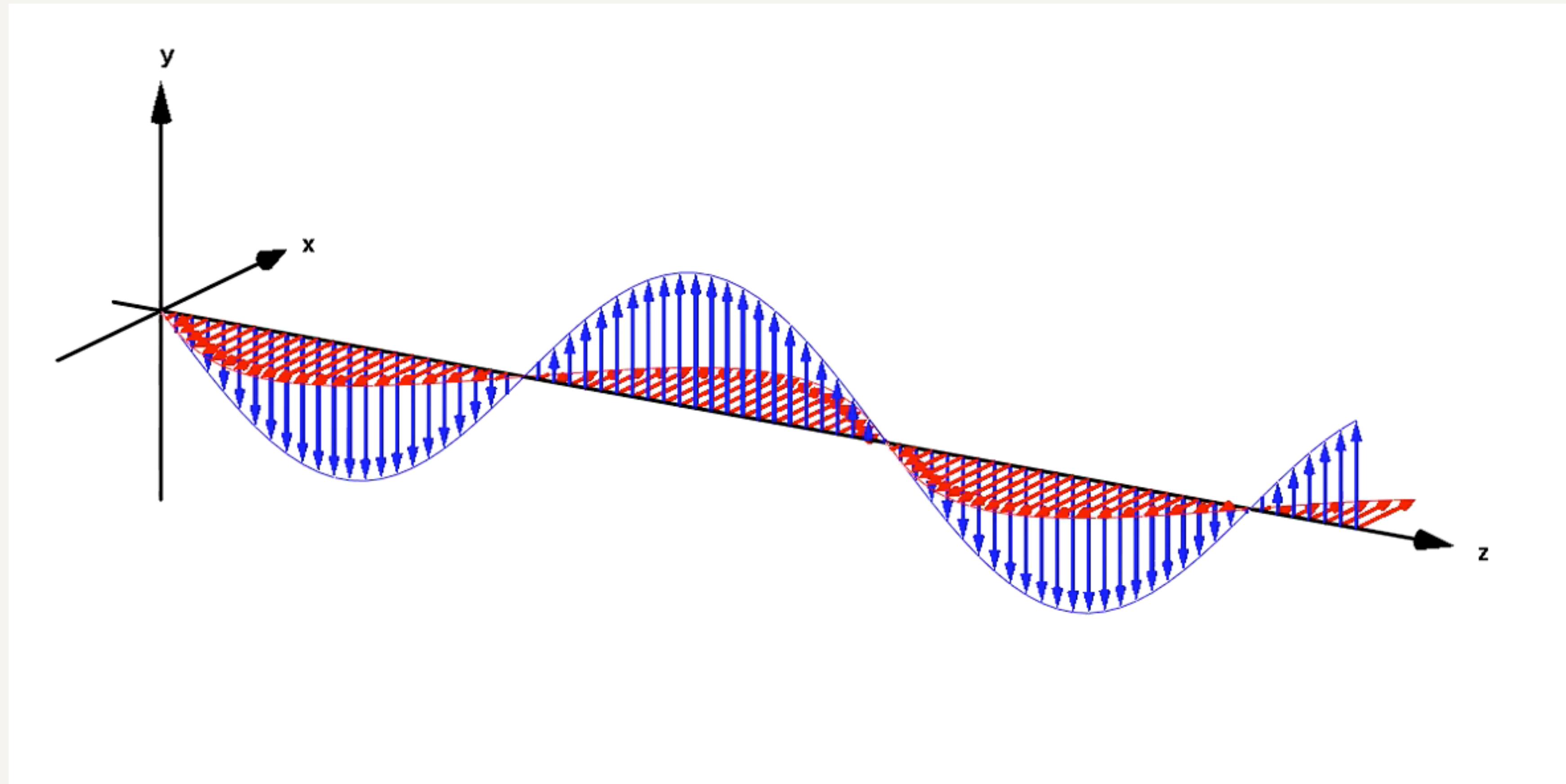
$$E_y(t, z) = E_0^y \cdot \cos(\omega t - kz + \varphi)$$

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



# Polarisation

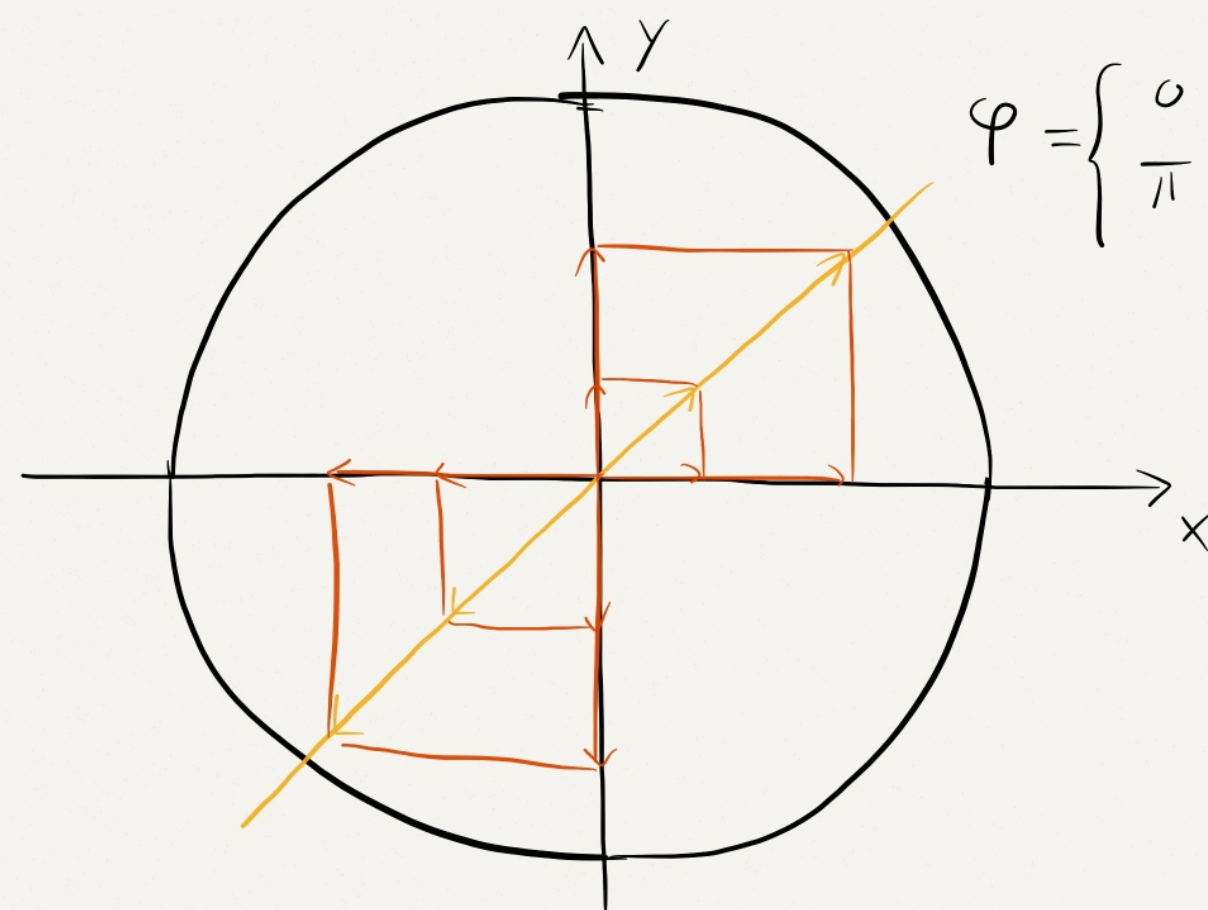
## Lineare Polarisation



# Polarisation

## Lineare Polarisation

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

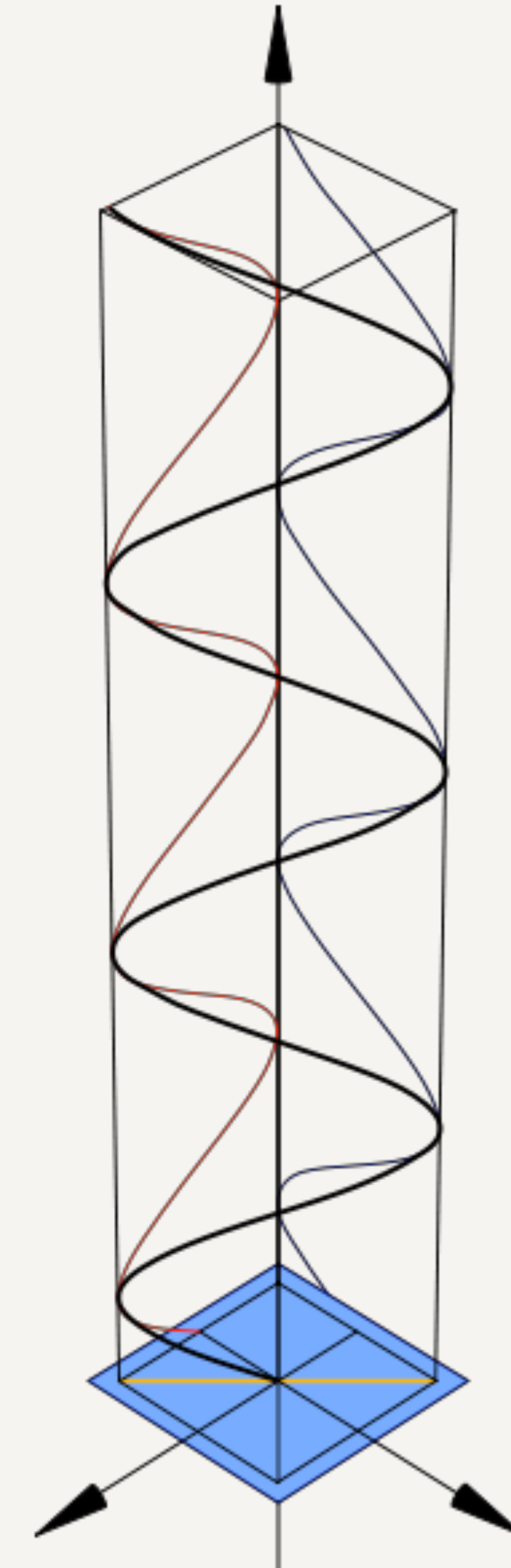


$$\varphi = \begin{cases} 0 \\ \pi \end{cases}$$

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

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

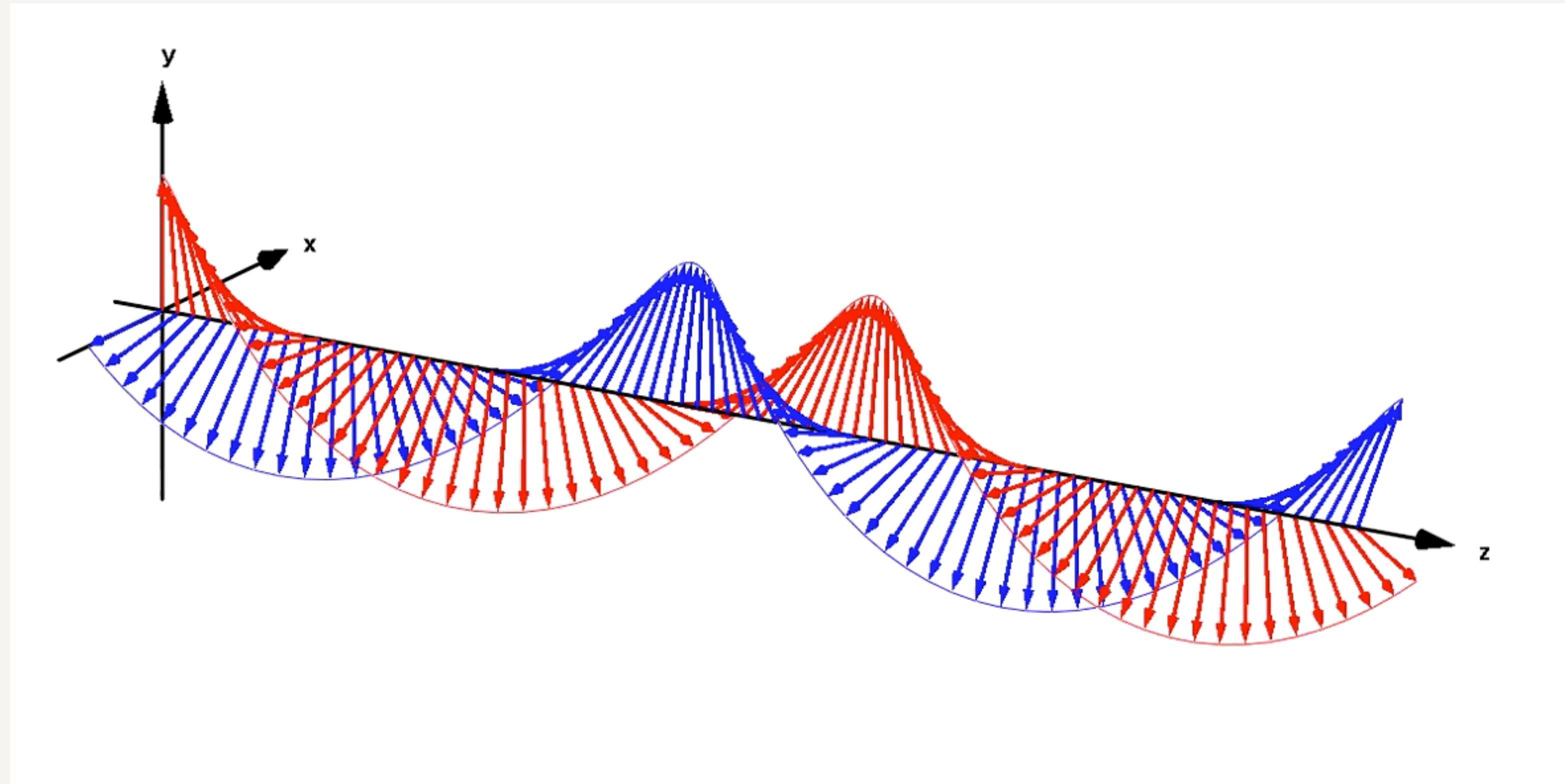
$$\varphi = \begin{cases} 0 \\ \pi \end{cases}$$





# Polarisation

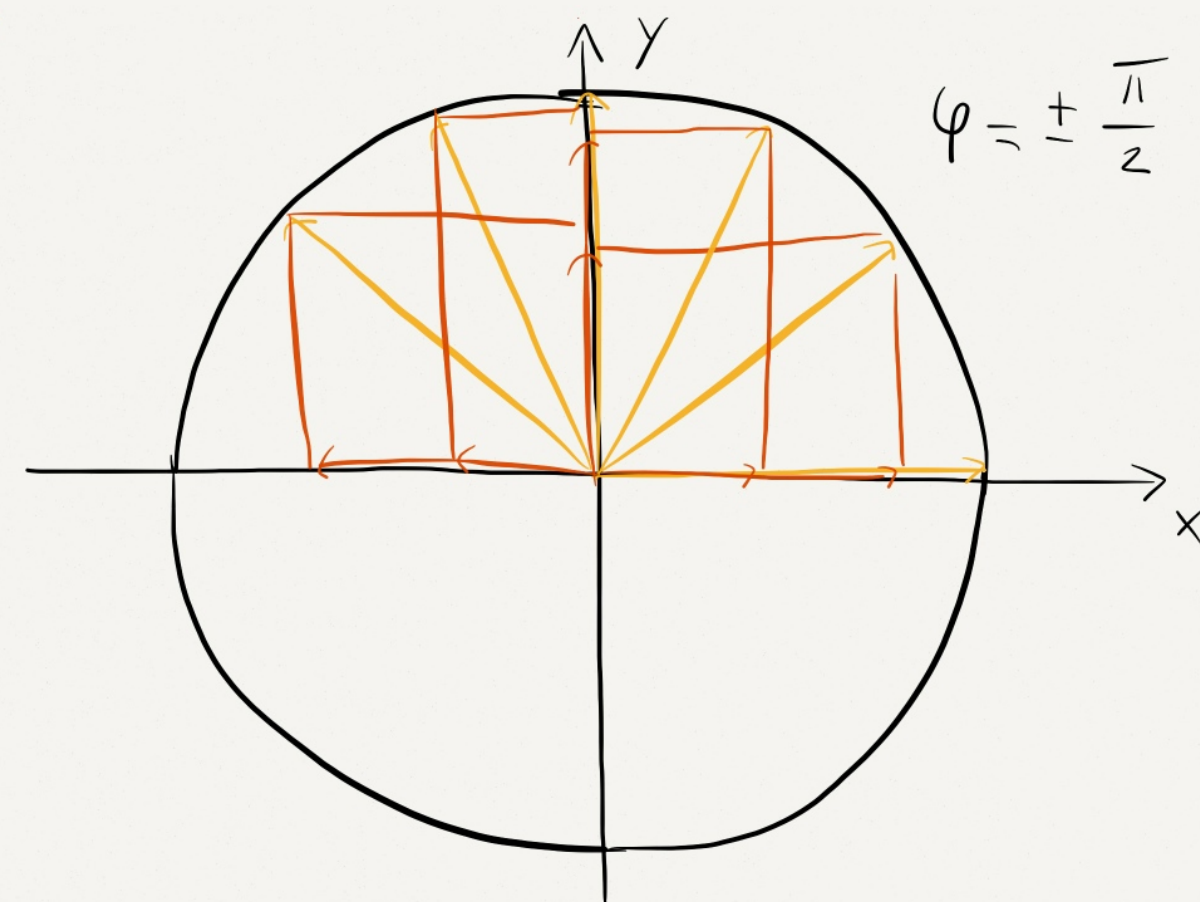
## Zirkulare Polarisation



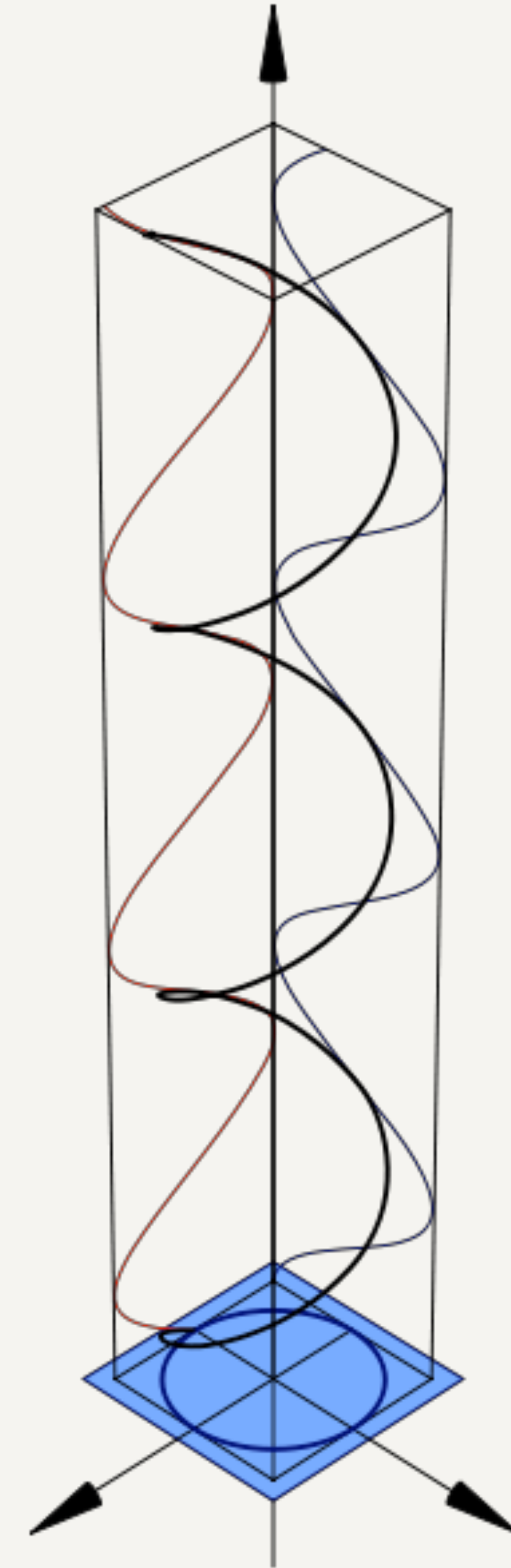
# Polarisation

## Zirkulare Polarisation

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



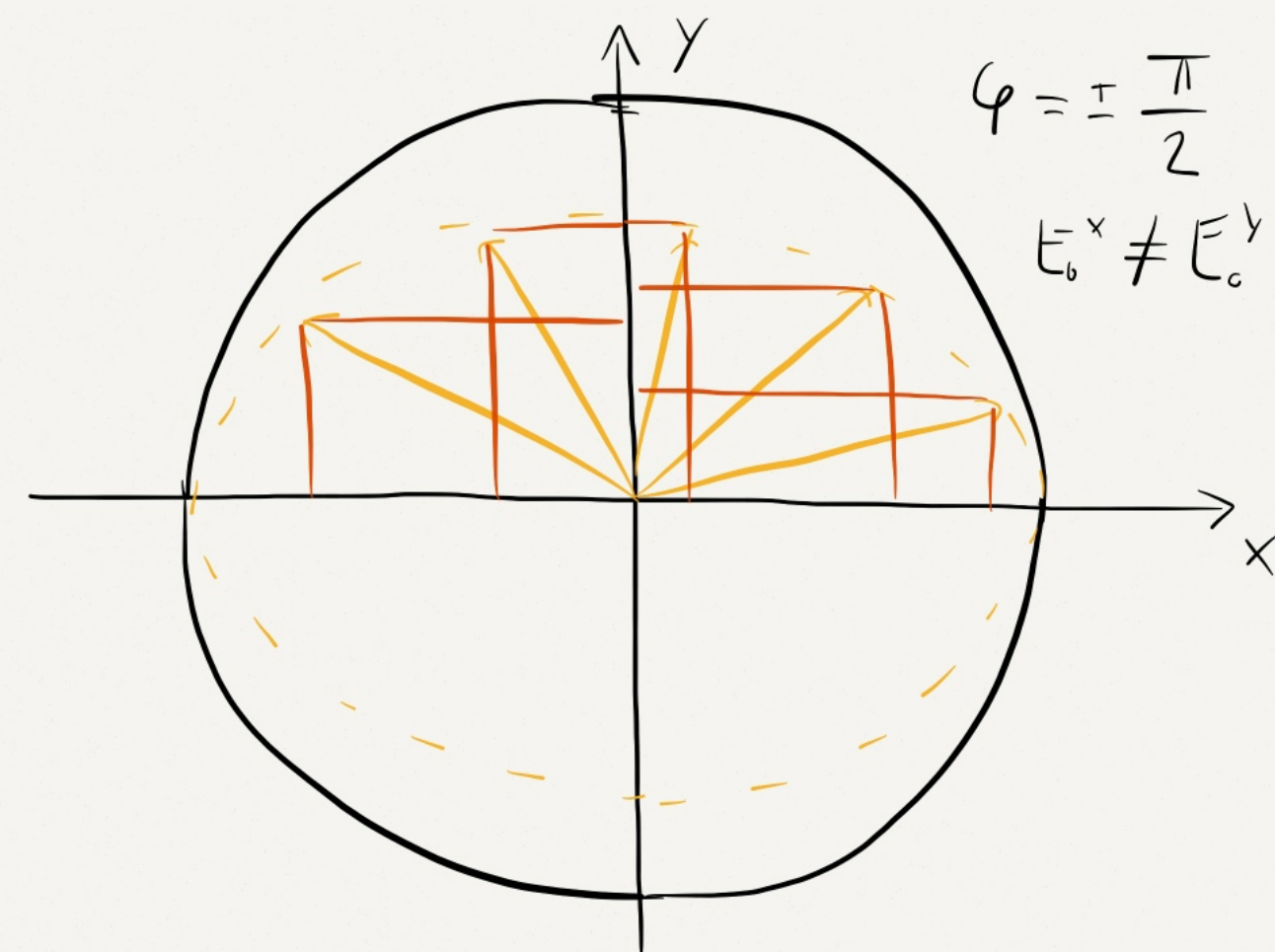
$$\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$$
$$E_x = E_y$$



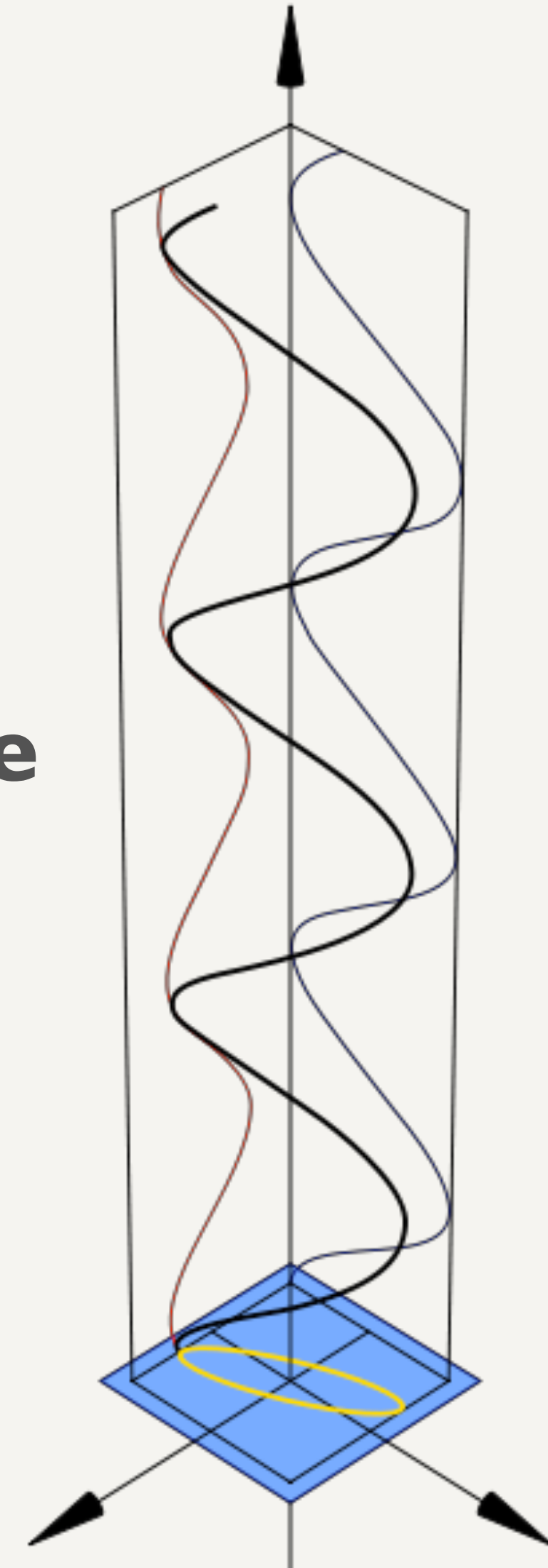
# Polarisation

## Elliptische Polarisation

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



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

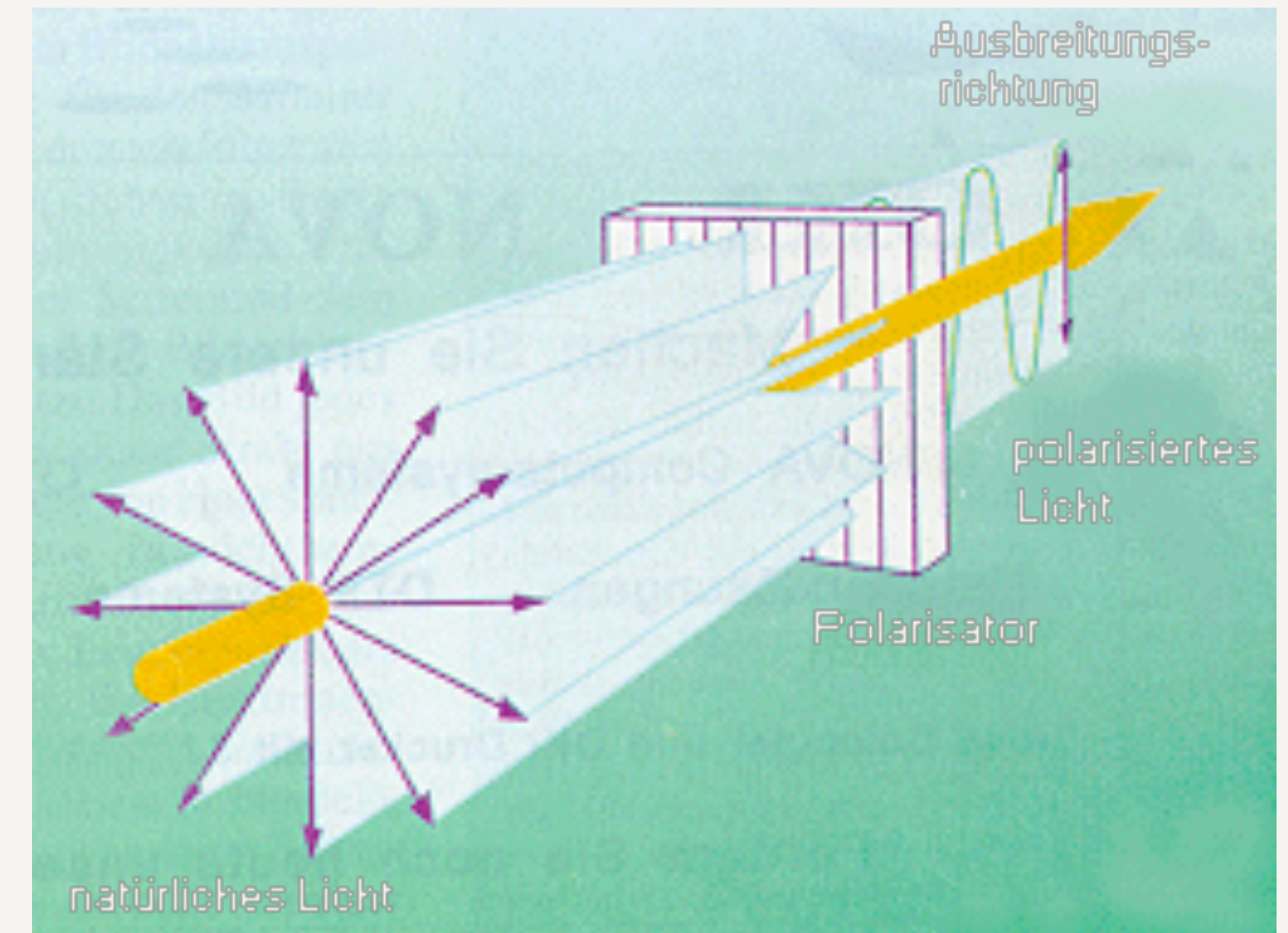




# Polarisation

## 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)

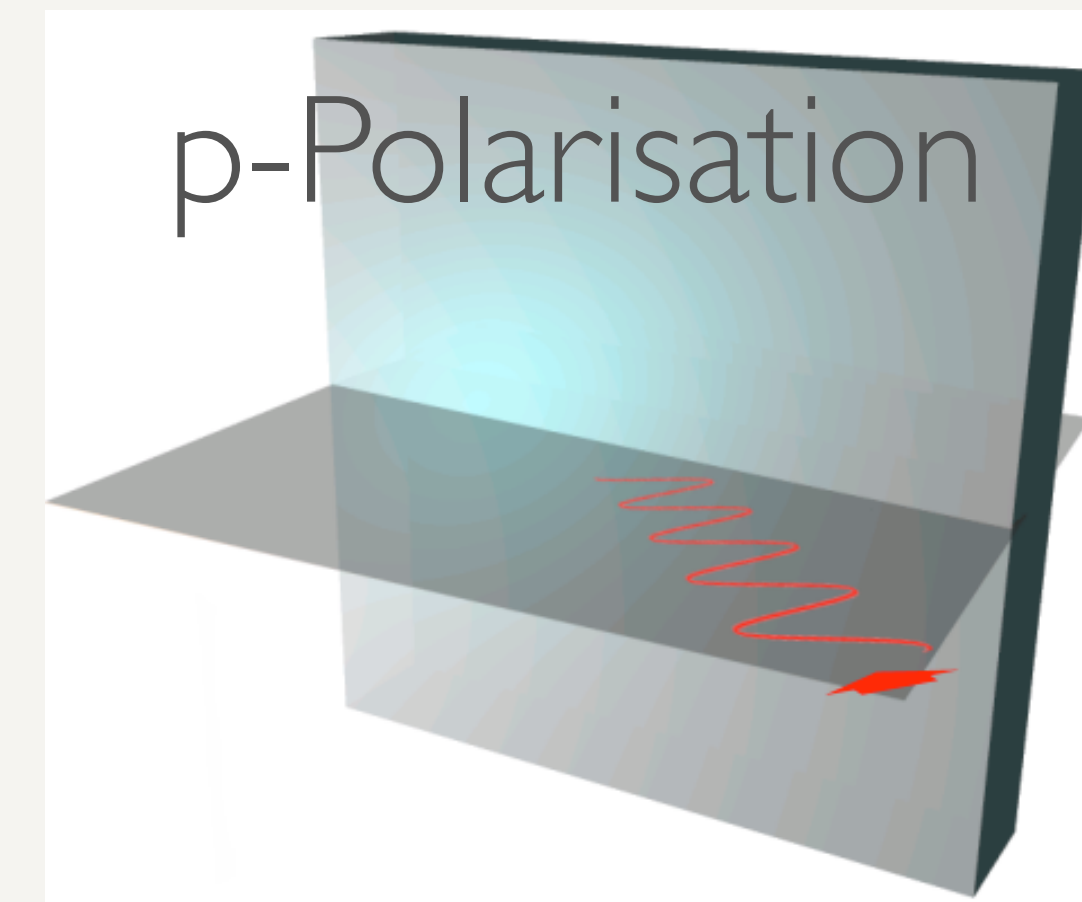
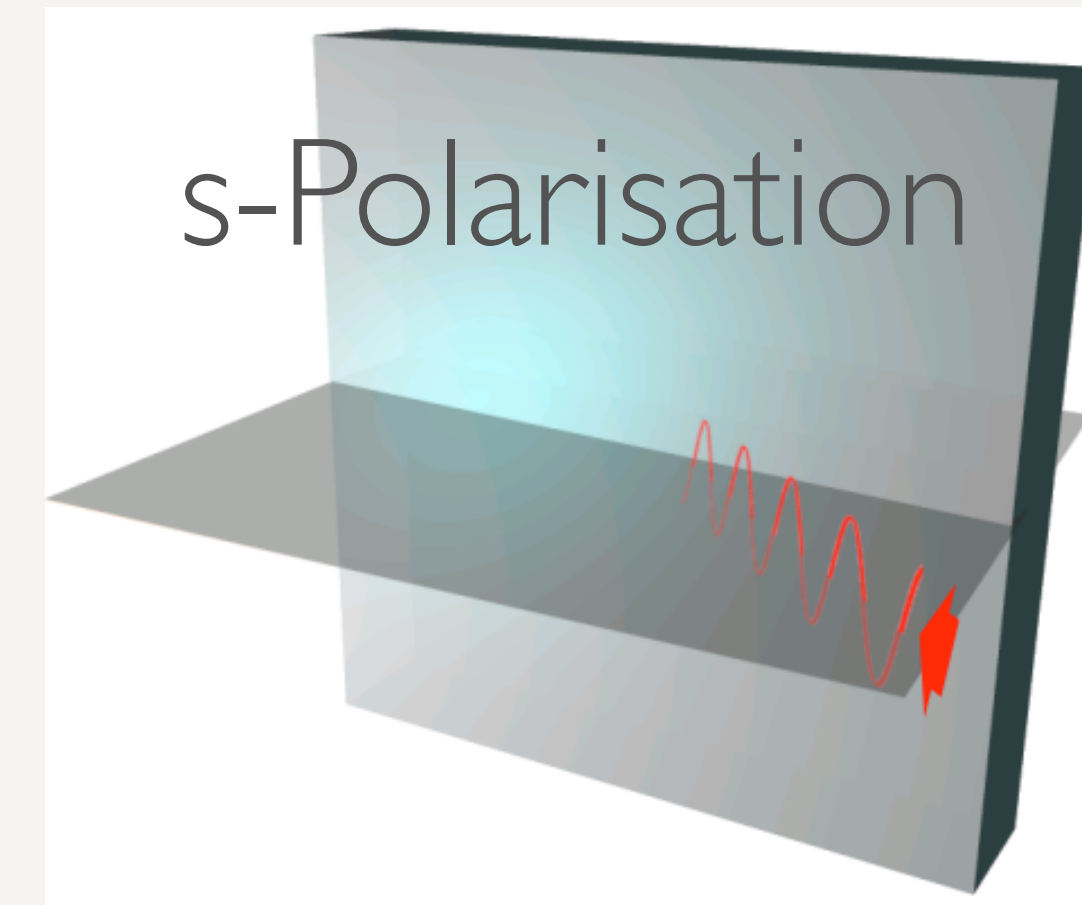


# Fresnel'sche Formeln

# Fresnel'sche Formeln

## Überblick

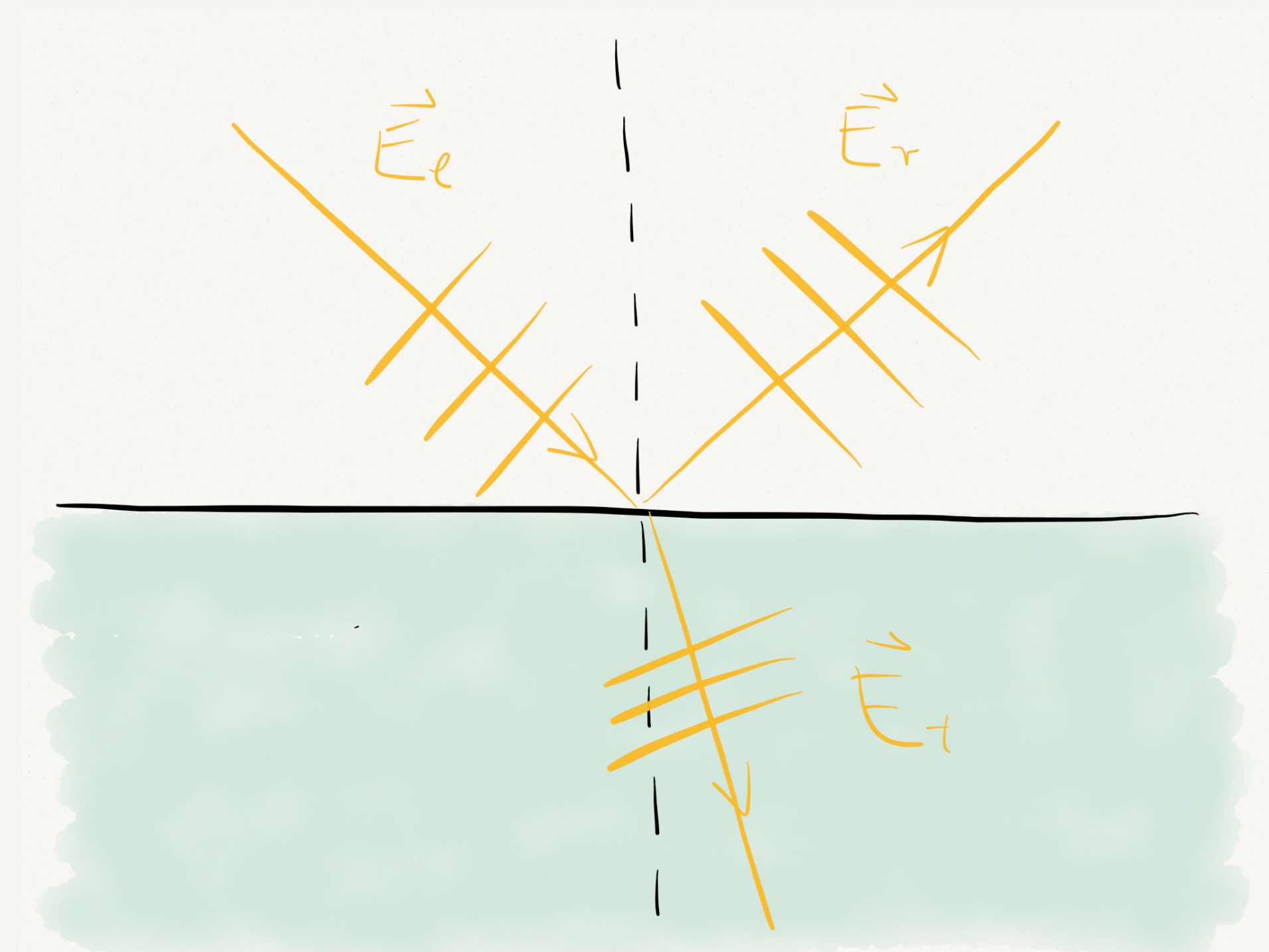
- Beschreiben das Verhalten von elektromagnetischen Wellen an Grenzflächen
- Trennung in senkrechte und parallele Polarisations-Komponente des Lichts
- Über die Stetigkeitsbedingung für das elektrische und magnetische Feld ergeben sich die Fresnel'schen Formeln für die Amplituden des elektromagnetischen 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 Polarisation, 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:

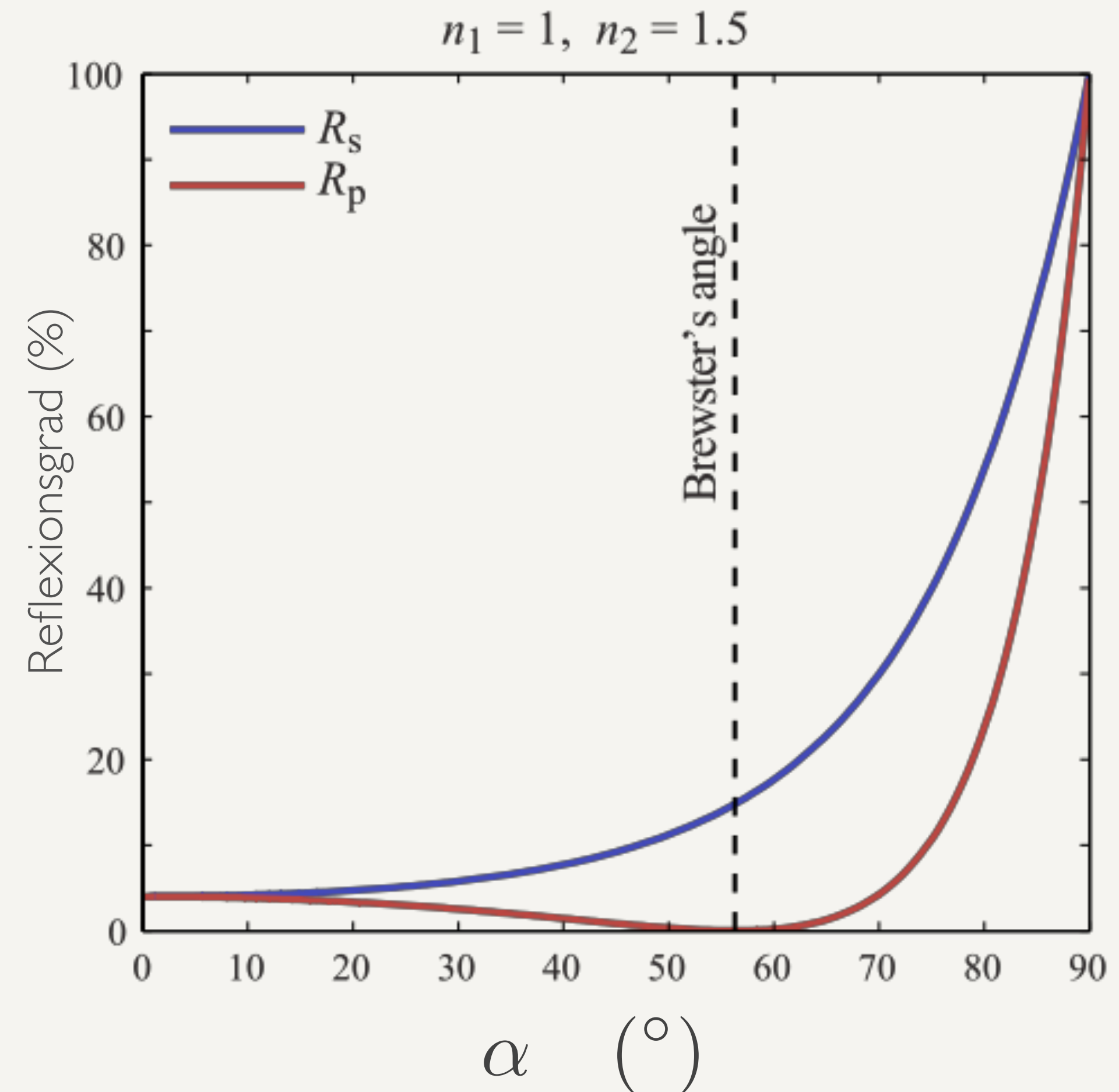
$$T_{\parallel, \perp} = \frac{n_2 \cos \beta}{n_1 \cos \alpha} \cdot t_{\parallel, \perp}^2$$

⇒ Zu kompliziert

# Reflexionsgrad I

## Vom dünnen ins dichte Medium

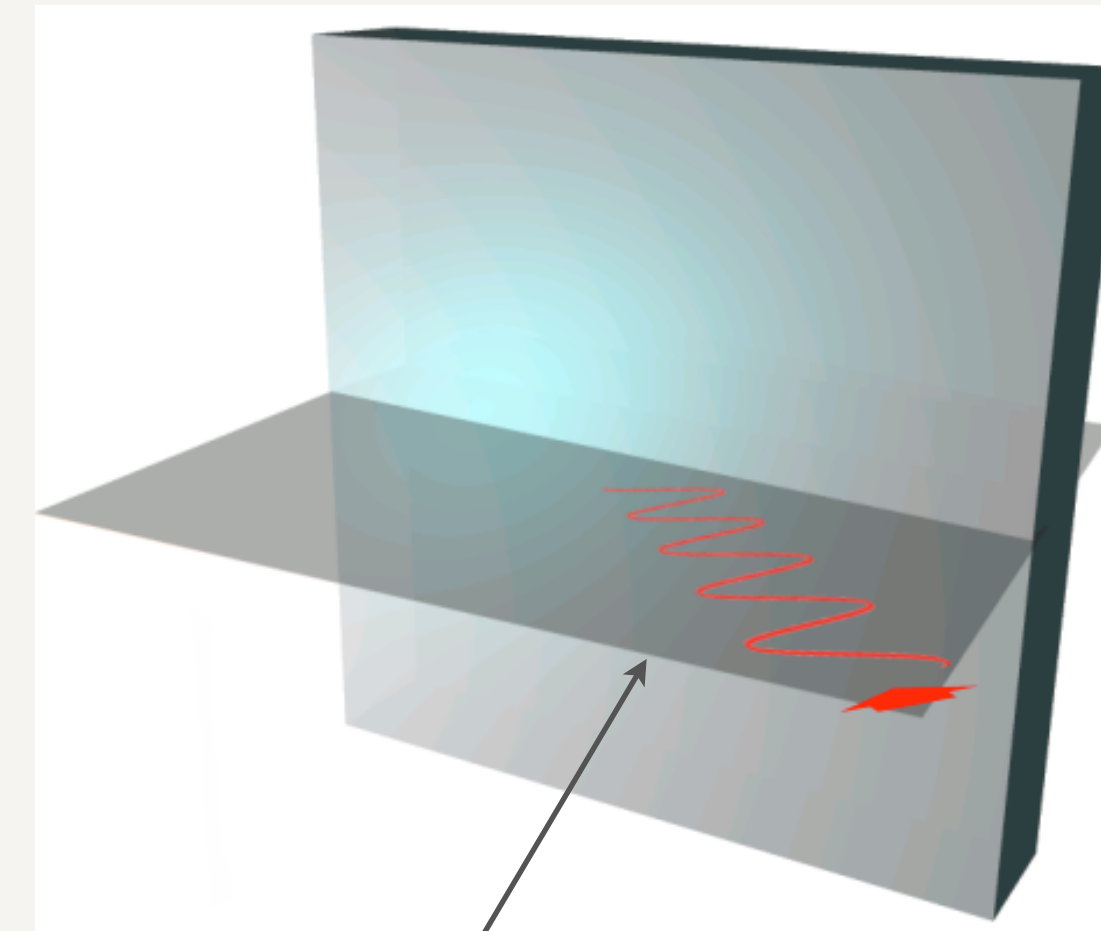
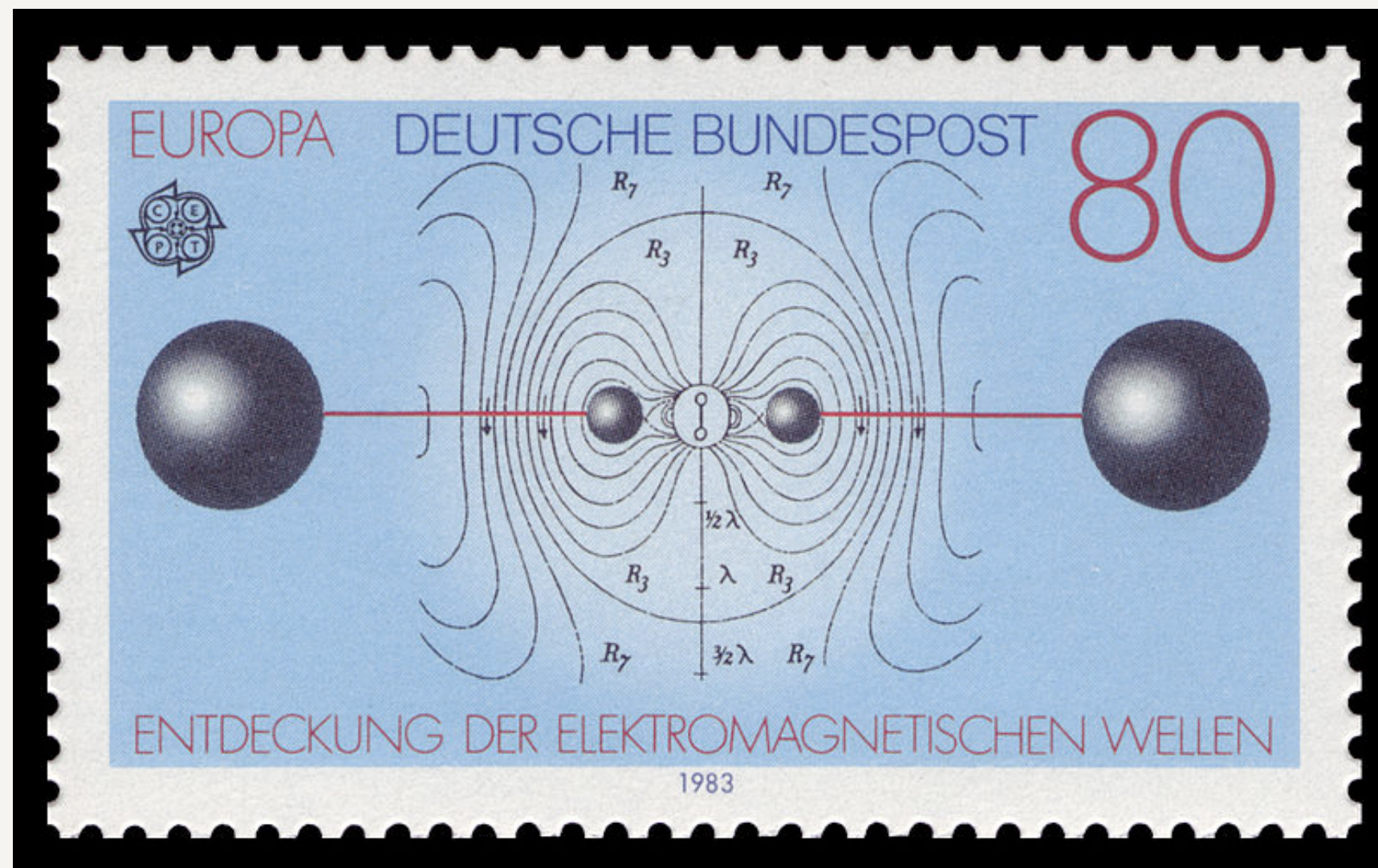
- Reflexion nimmt stetig bis 100% zu großen Winkeln zu
- Bei „normalem“ Glas ca. 4% Reflexe
- „Alles“ reflektiert bei flachen Winkeln
- Brewster-Winkel: p-Polarisation verschwindet





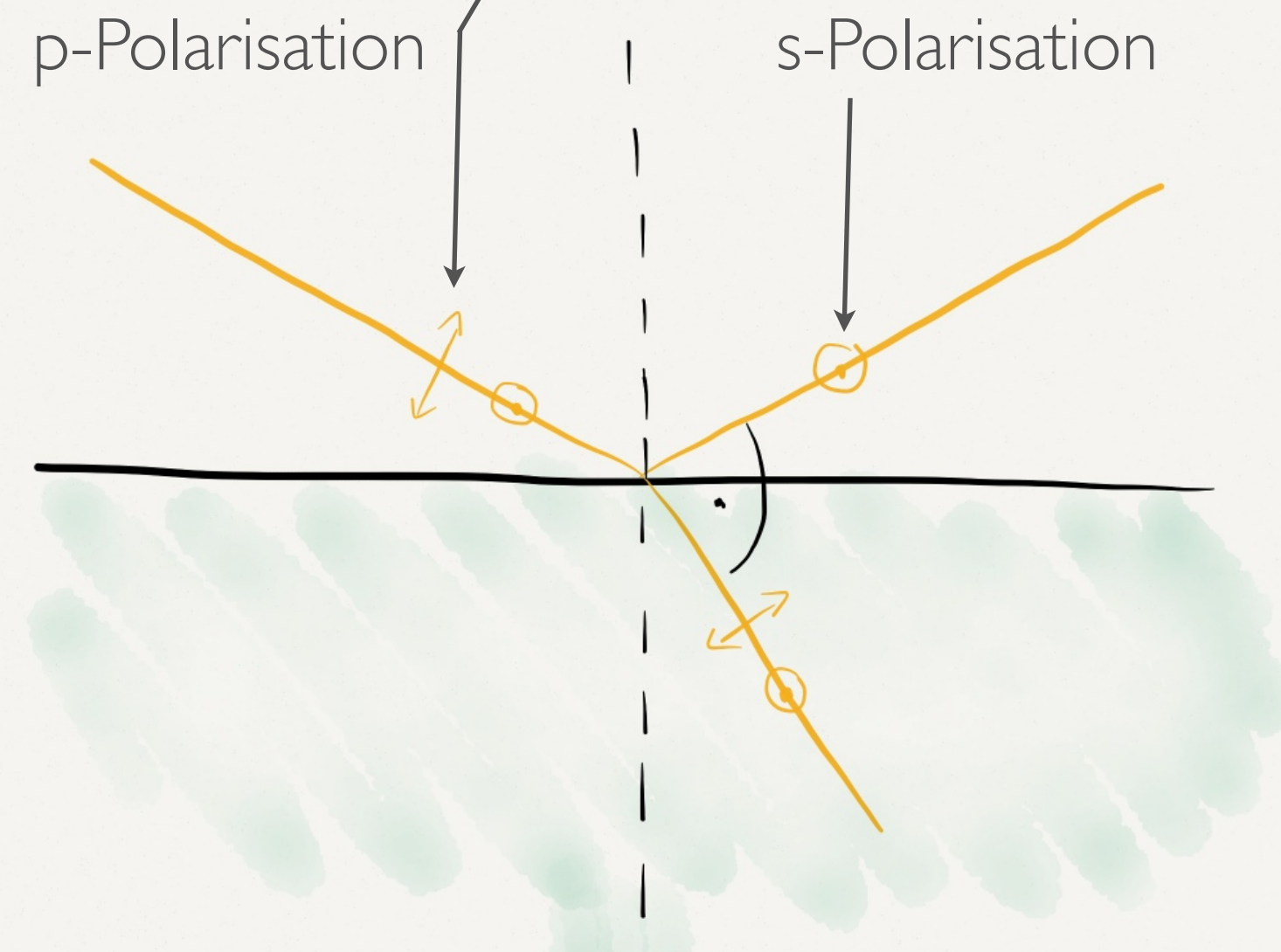
# Brewster-Winkel

- Hertz'scher Dipol: strahlt nicht in Schwingungsrichtung



p-Polarisation

s-Polarisation





# Brewster-Winkel

Summe der Winkel:

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

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

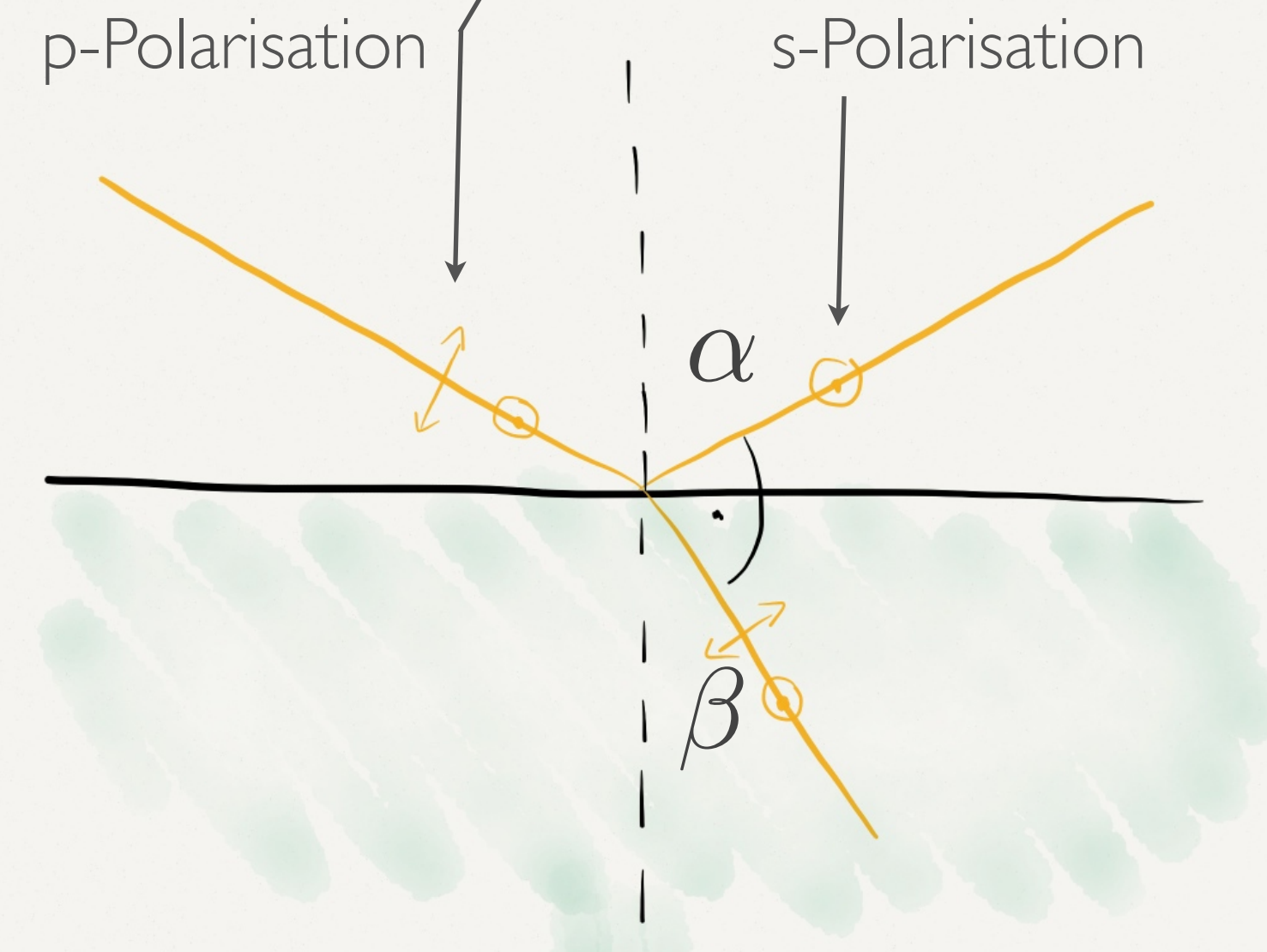
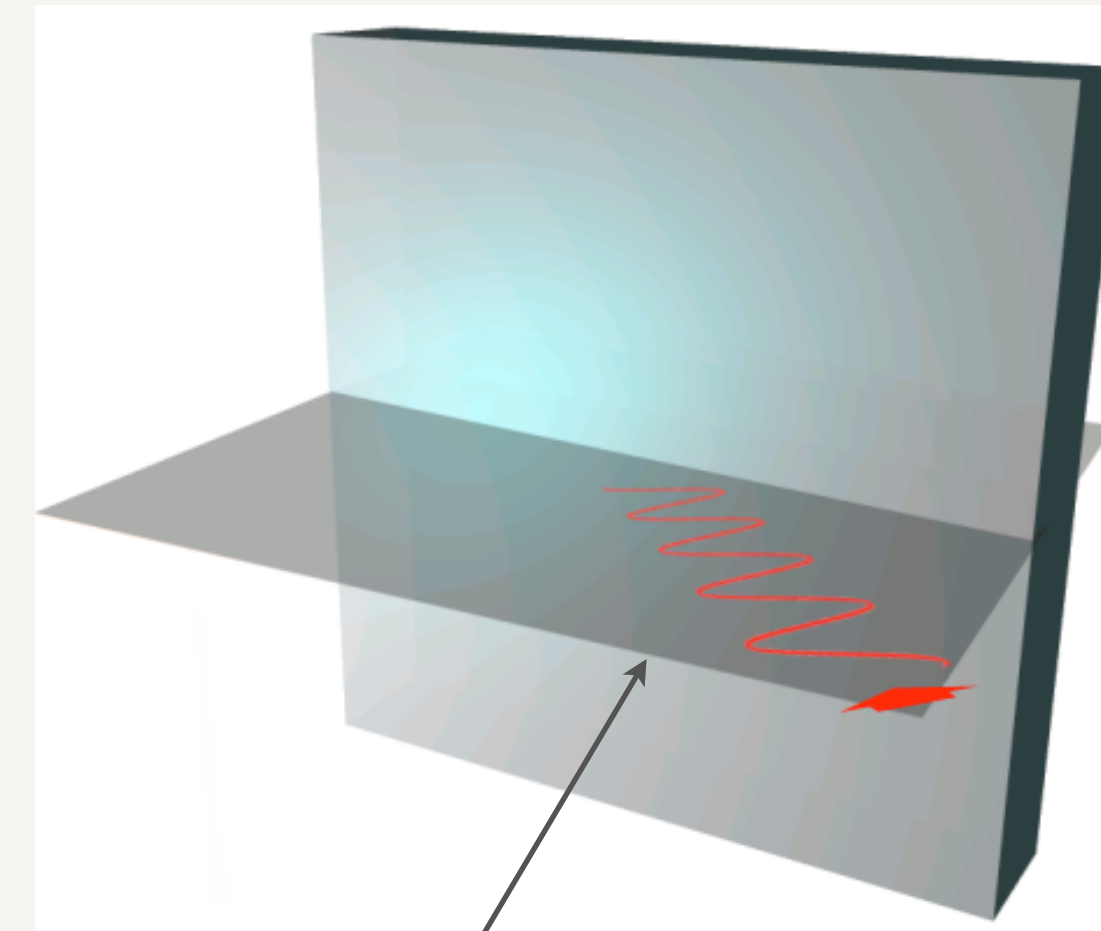
Also:

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

Für den Brewster-Winkel  $\alpha_B$ :

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

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





# Lichtentstehung und Spektrum

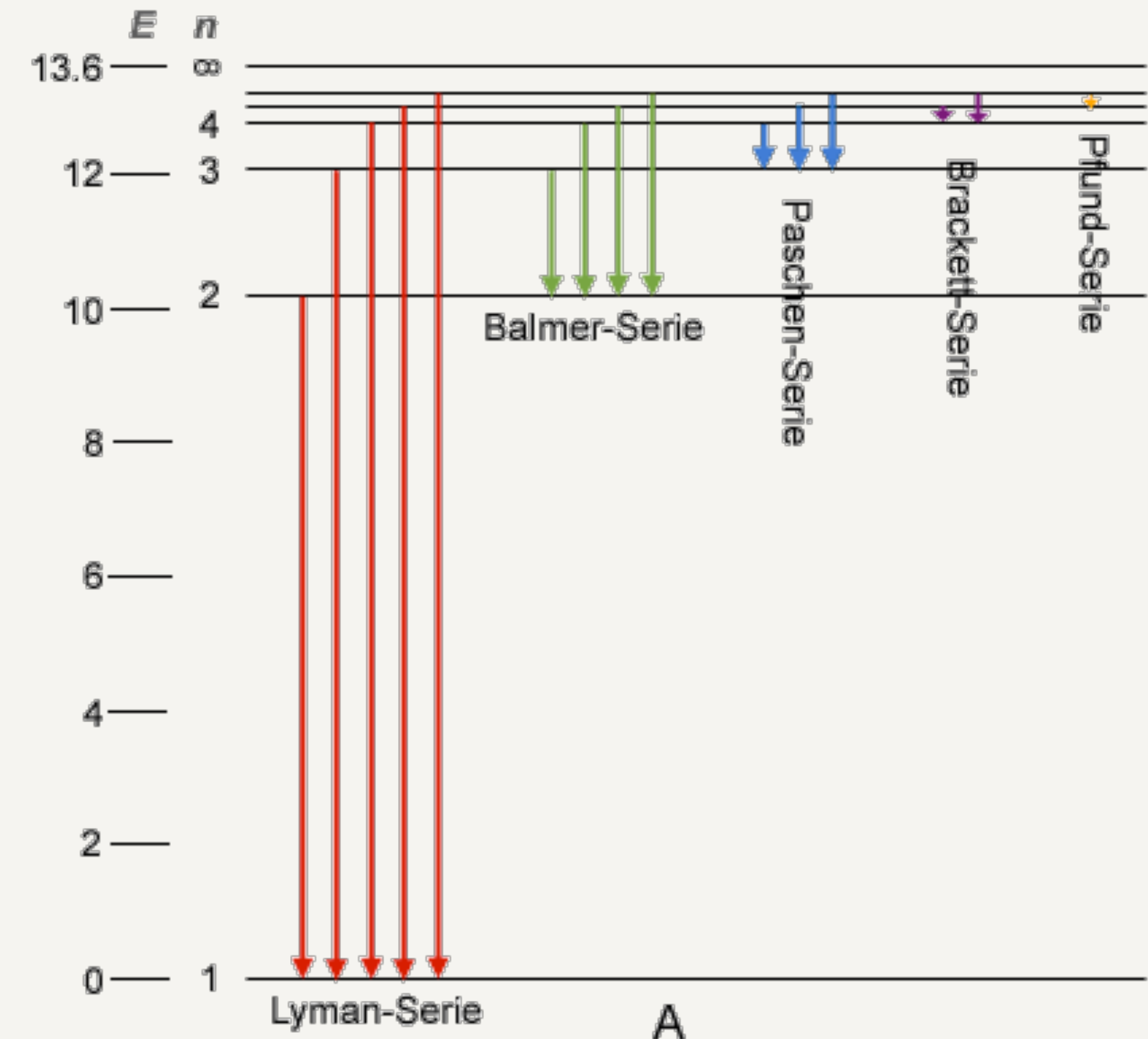
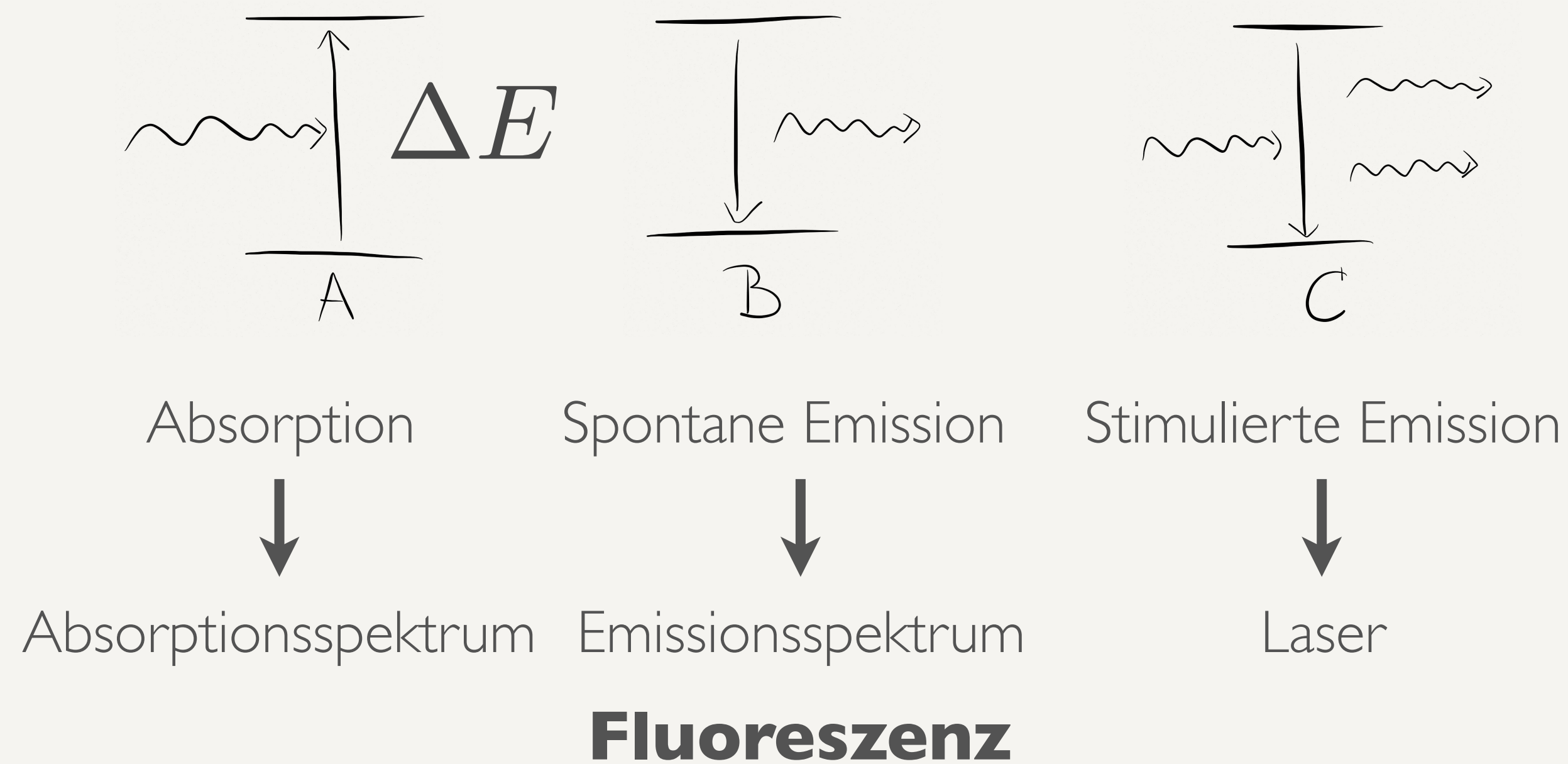
# Lichtentstehung

- Es gibt viele verschiedene Lichtquellen.
- Physikalisch kann man diese in zwei Gruppen einteilen:
  1. Elektronische Übergänge
  2. Wärmestrahlung

# Elektronische Übergänge

## Fluoreszenz

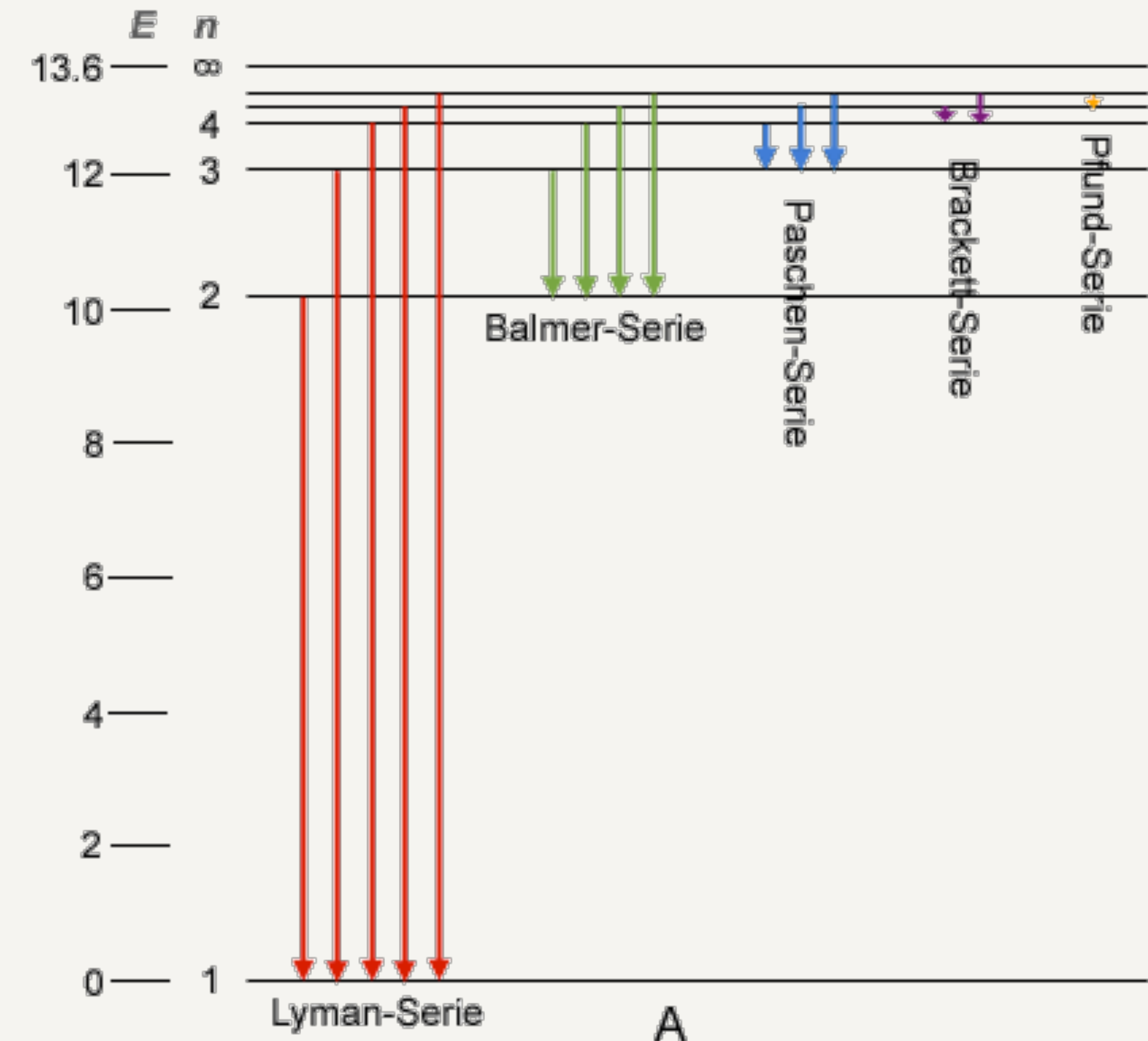
$$\Delta E = h\nu$$



# Aufgabe Photonenenergie

$$\Delta E = h\nu$$

Berechnen Sie die  
Wellenlänge der ersten  
Balmer-Linie ( $3 \Rightarrow 2$ )





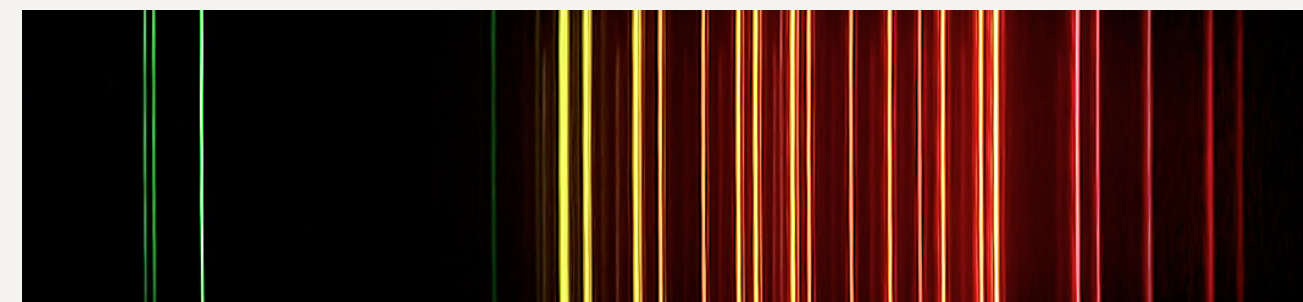
# Spektrum

- Die Menge aller möglichen Übergänge nennt man **Spektrum**
- Zur graphischen Veranschaulichung ordnet man die Übergänge (als Linie) über der Wellenlänge oder Energie an

## Wasserstoff-Fluoreszenzspektrum (Balmer-Serie)



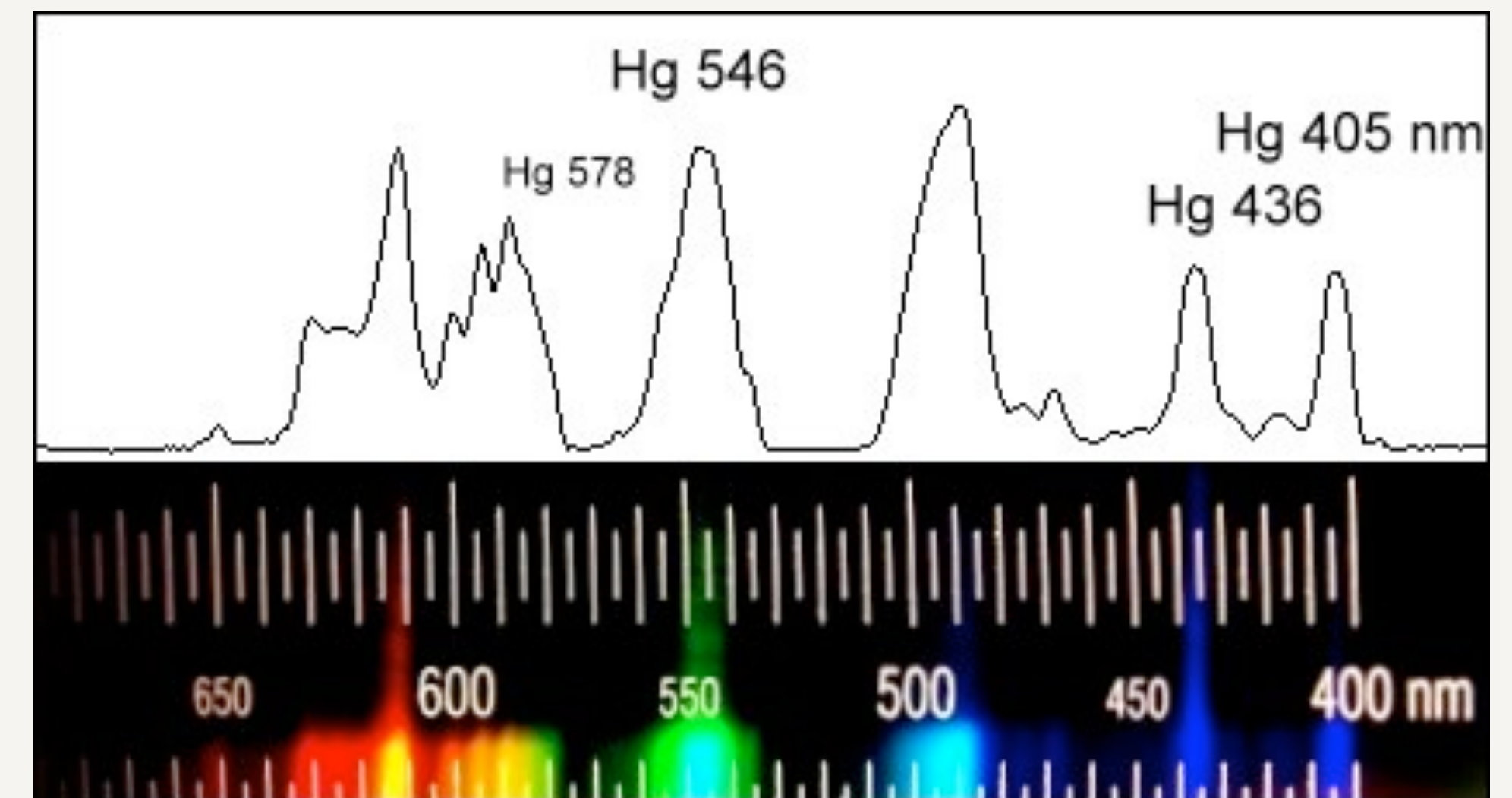
# Leuchtröhren





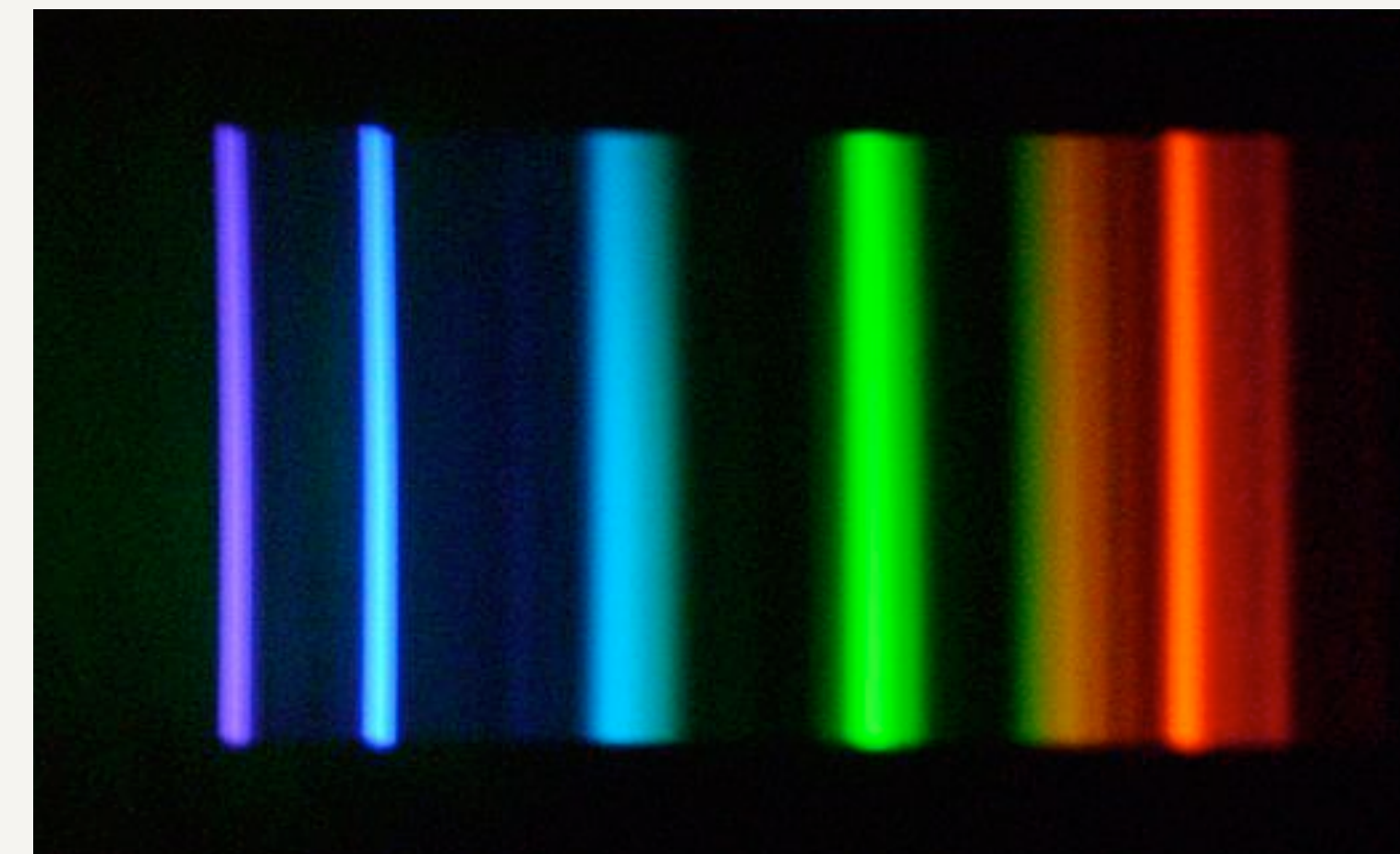
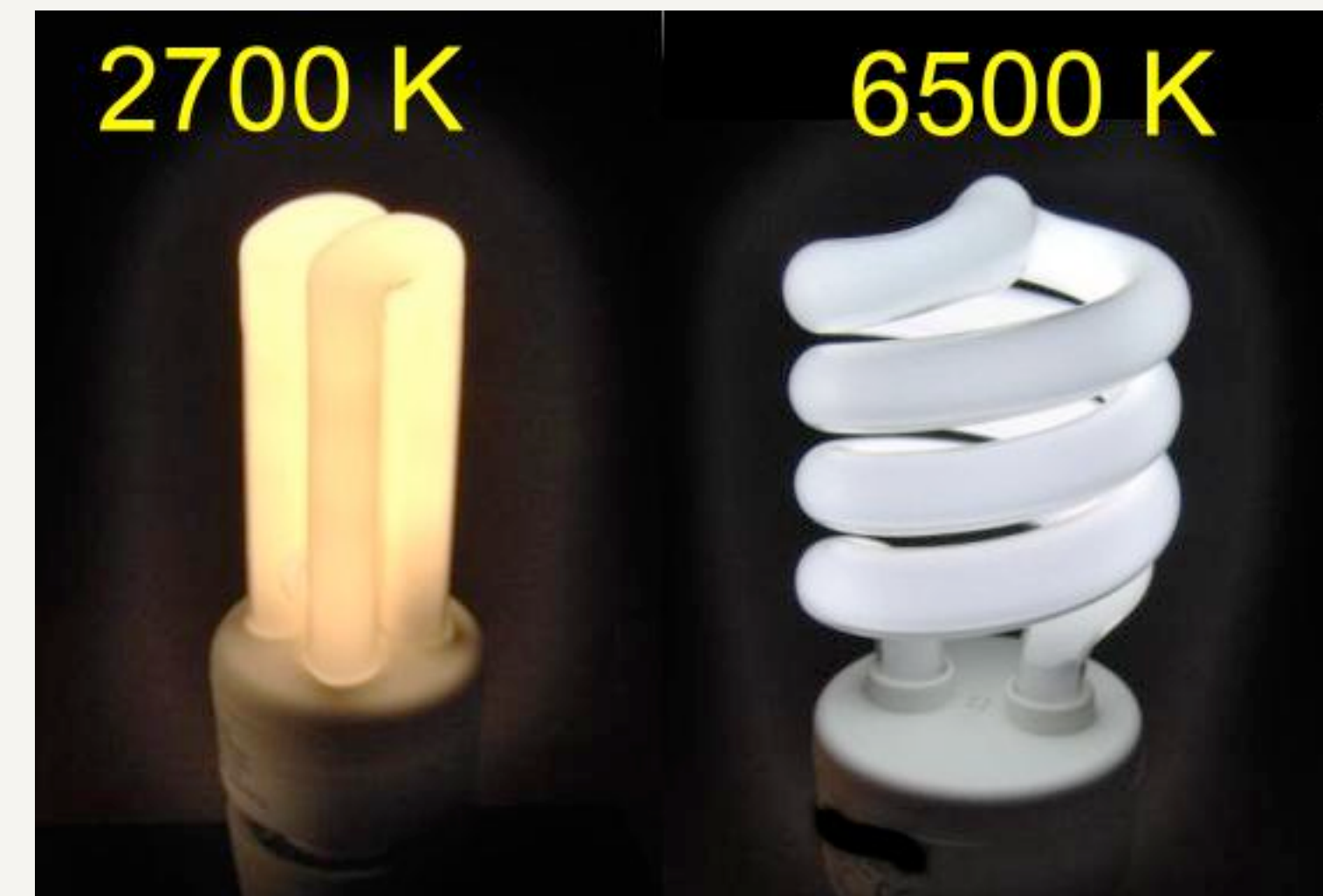
# Leuchtstoffröhren

- Enthält als Leuchtgas Quecksilber
- Ist auf der Innenseite der Glasröhre mit einem fluoreszierendem Farbstoff lackiert
- Ist eine Mischung aus dem Linienspektrum von Quecksilber und dem breiten Fluoreszenzspektrum des Leuchtmittels



# Energiesparlampen

- Quecksilber-Dampf-Niederdruck-Lampe
- Linienspektrum
- Geringer Energieverbrauch



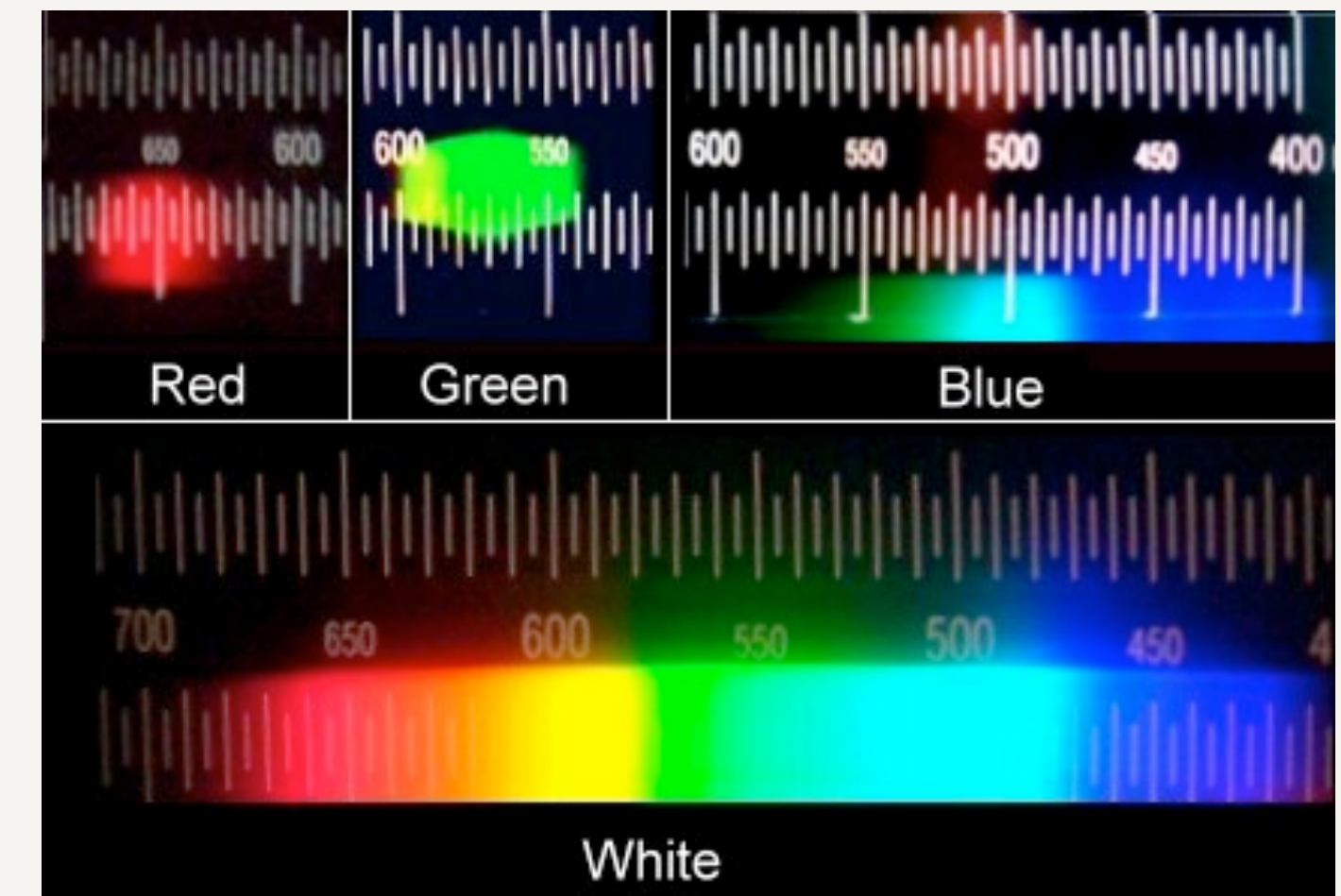
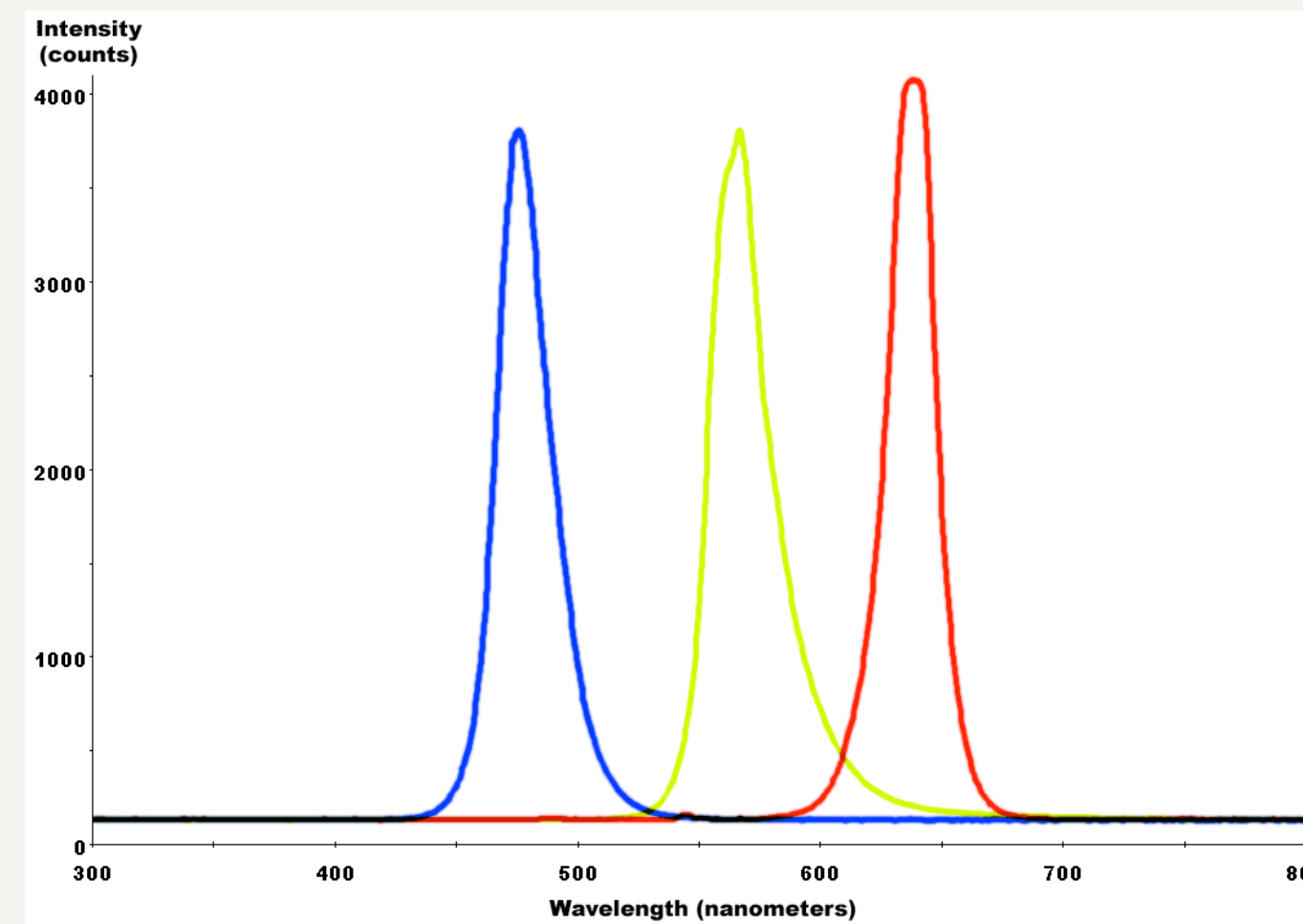
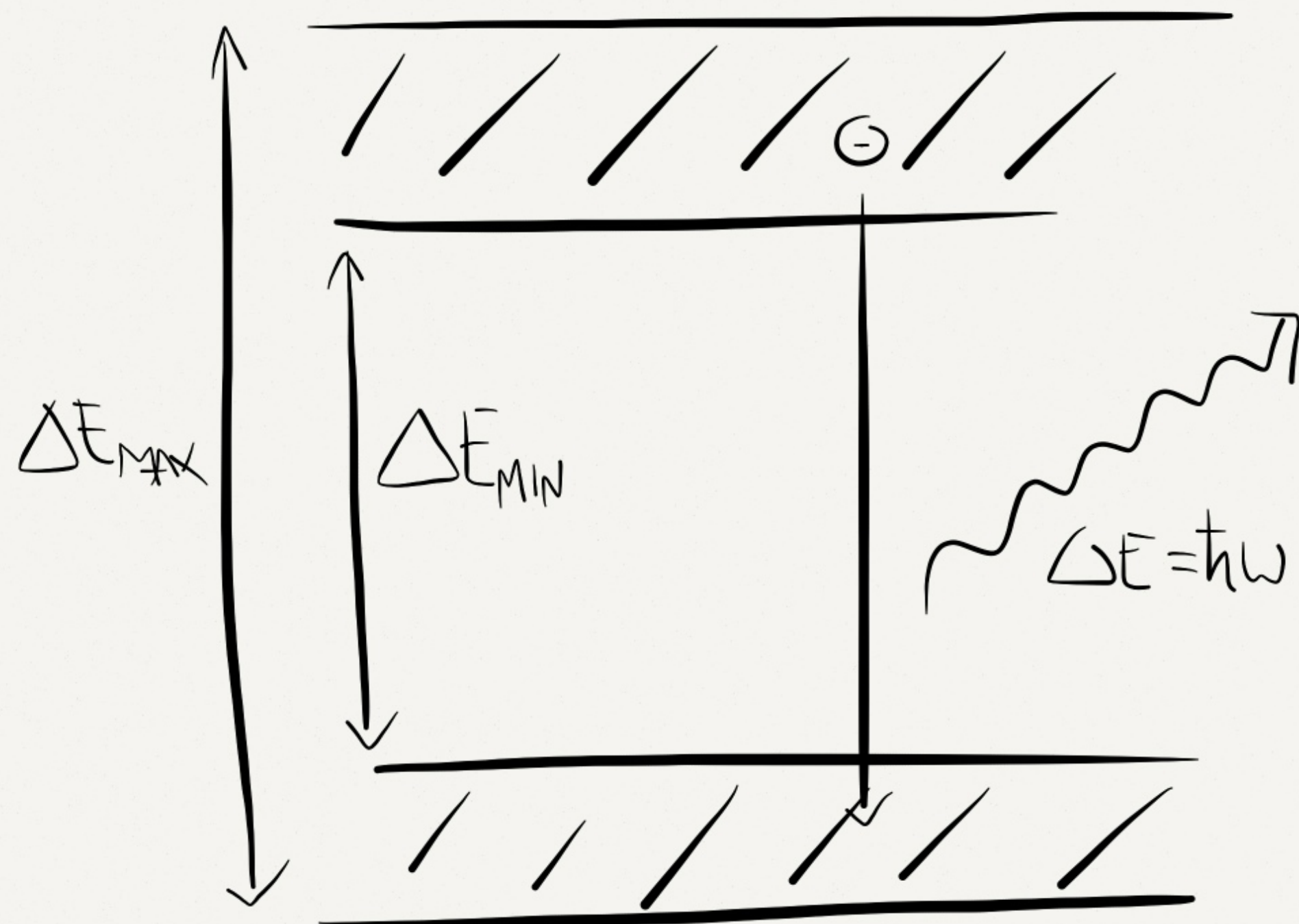


# Elektronische Übergänge Halbleiter

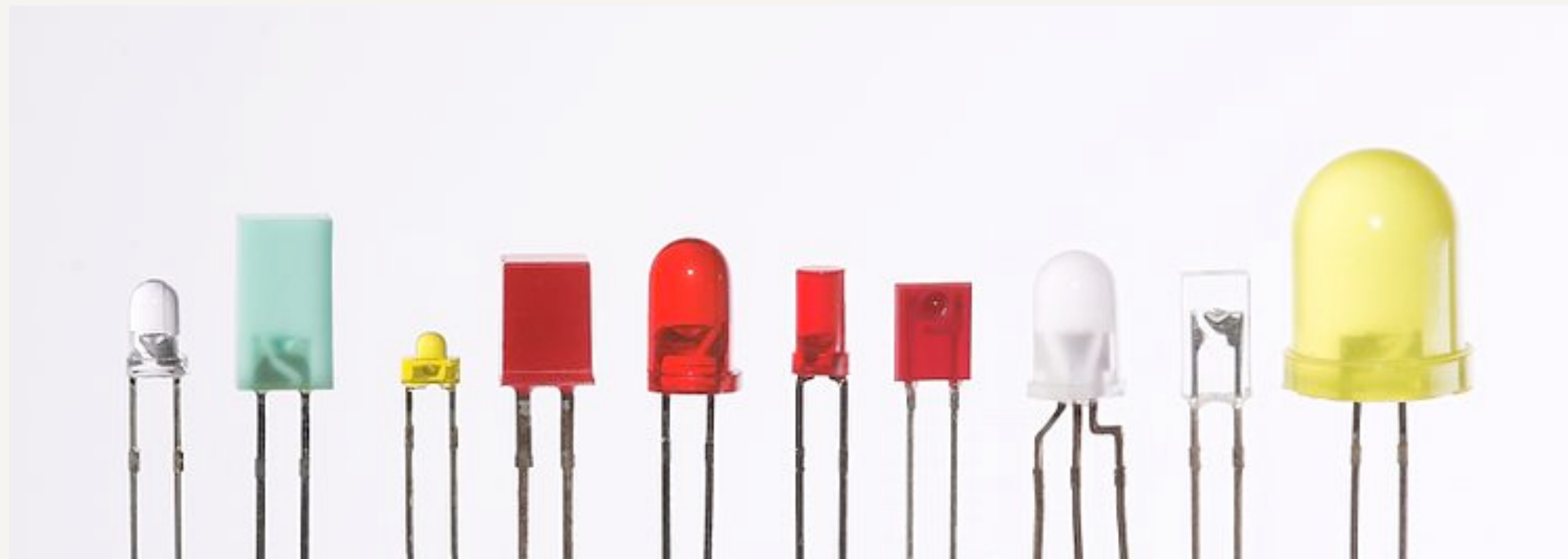
Bänder statt Niveaus



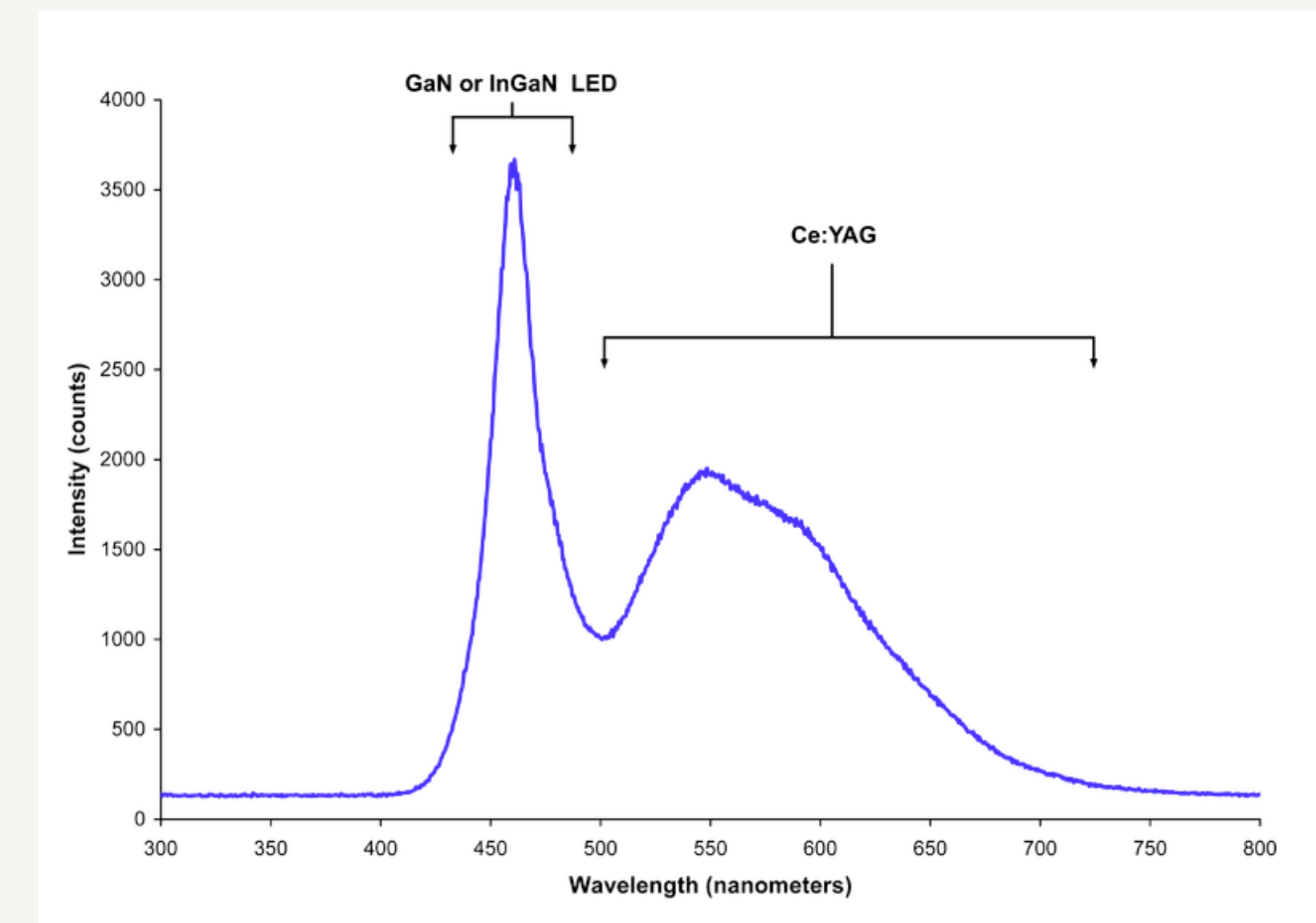
Breite Spektren



# LEDs



## „Weiße“ LED



Blaue LED + gelber Phosphor

# Wärmestrahlung

## Planck'sche Strahlungsformel

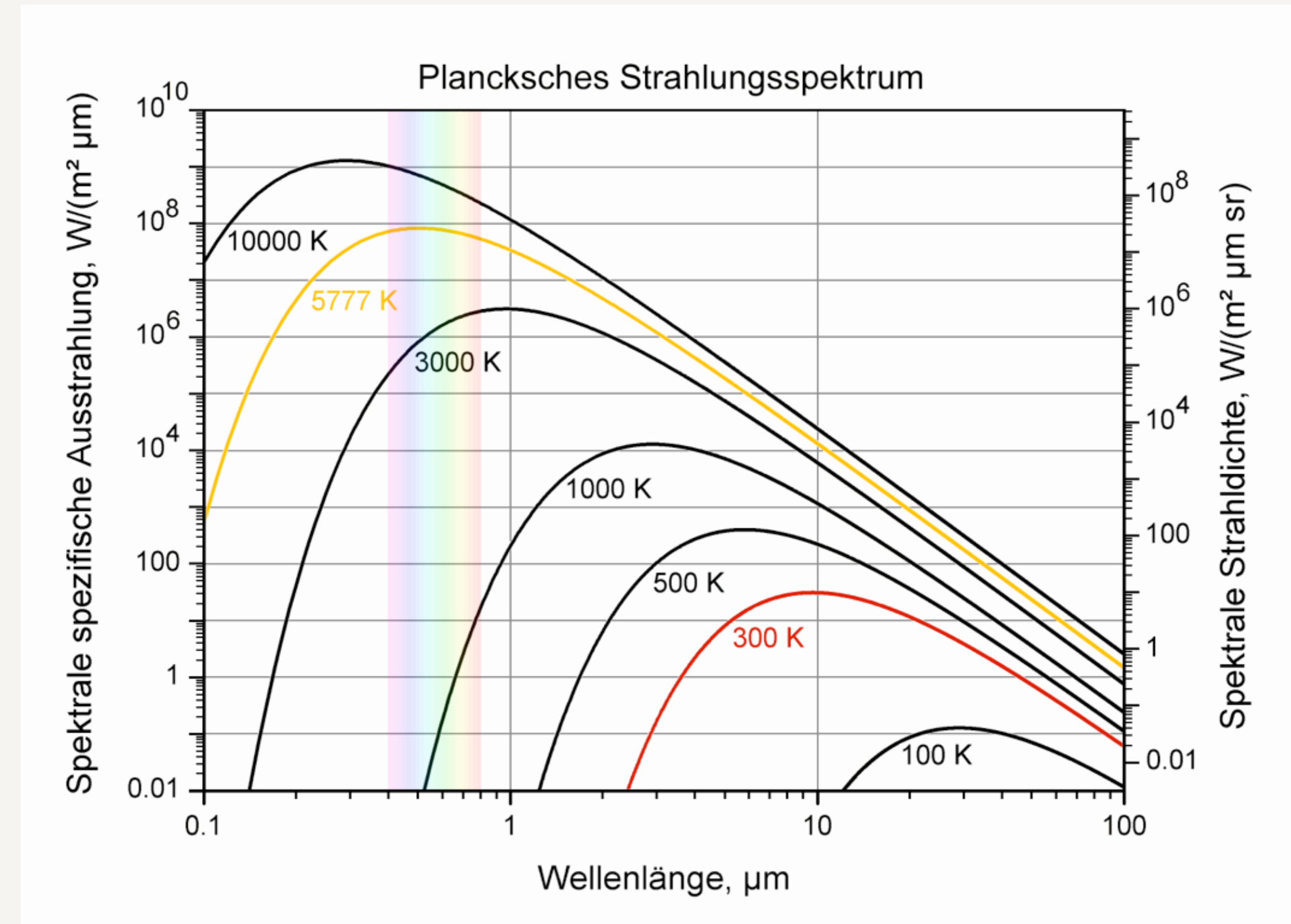
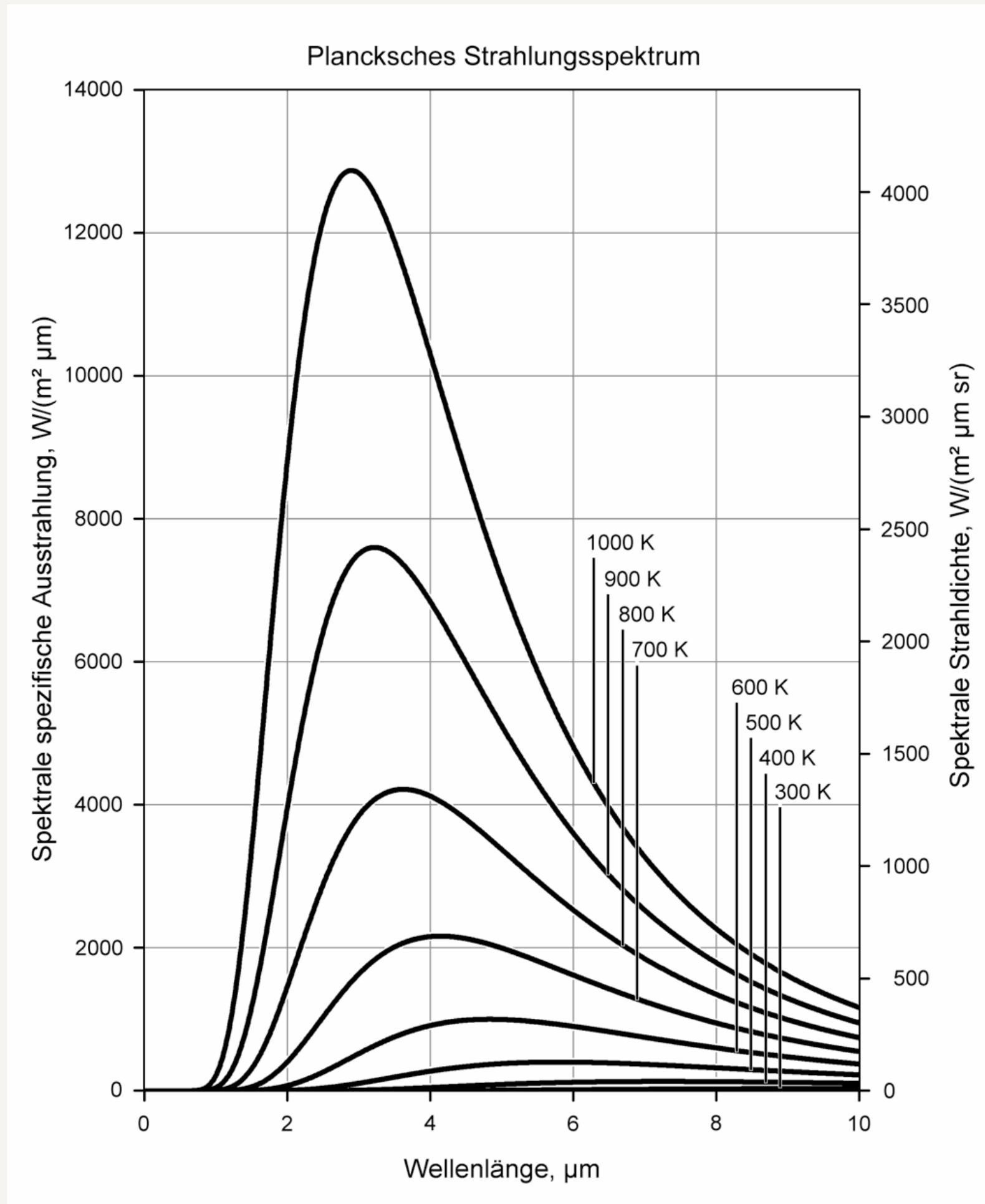
- Die Planck'sche Strahlungsformel beschreibt die spektrale Energiedichte eines schwarzen Strahlers, d.h. sein Spektrum:

$$U(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

- Das Spektrum eines schwarzen Strahlers hängt nur von dessen Temperatur ab!



# Wärmestrahlung Spektrum



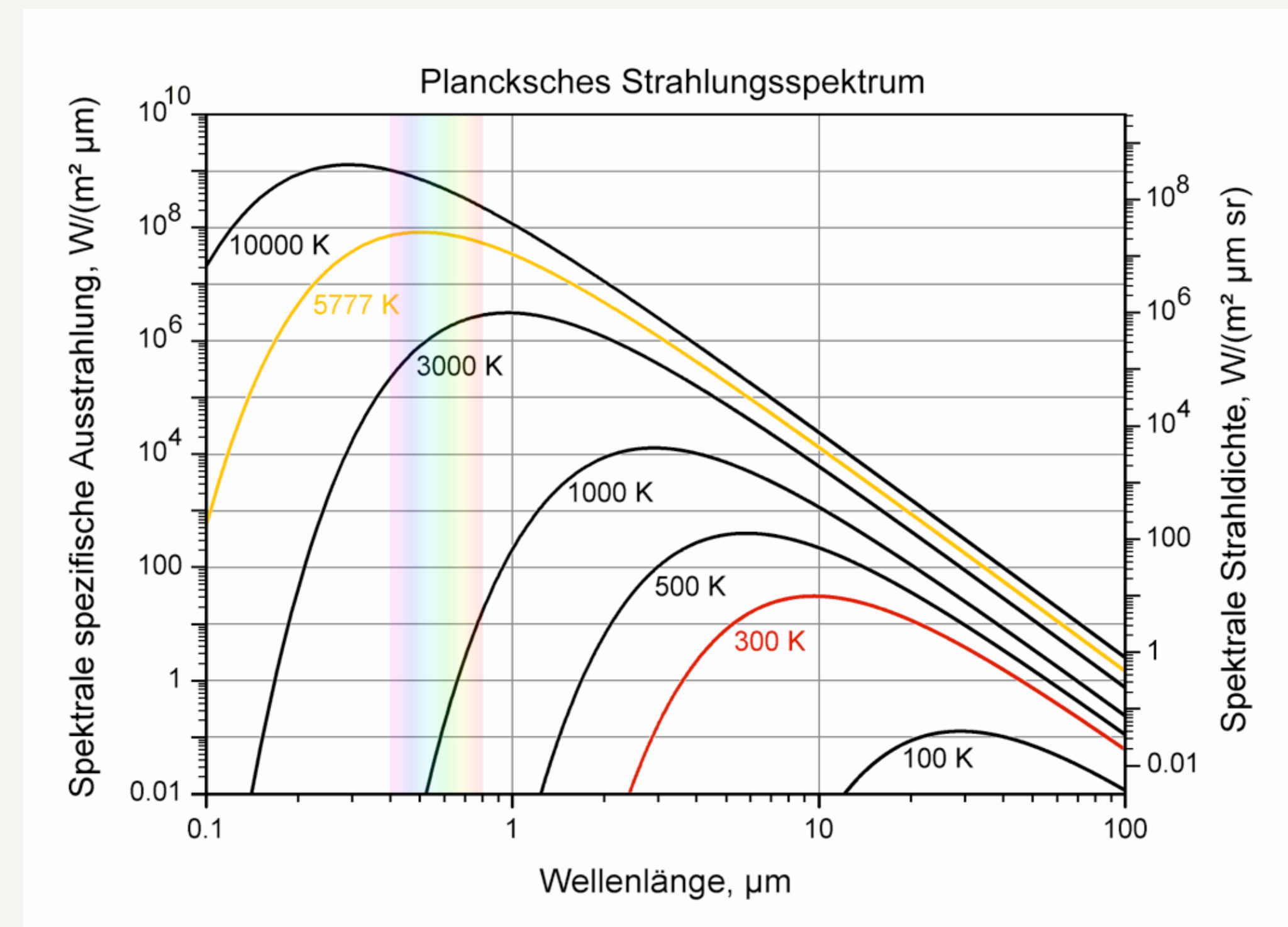


# Wärmestrahlung Strahlungsmaximum

- Das Wien'sche Verschiebungsgesetz beschreibt die Wellenlänge der Strahlungsmaximums:

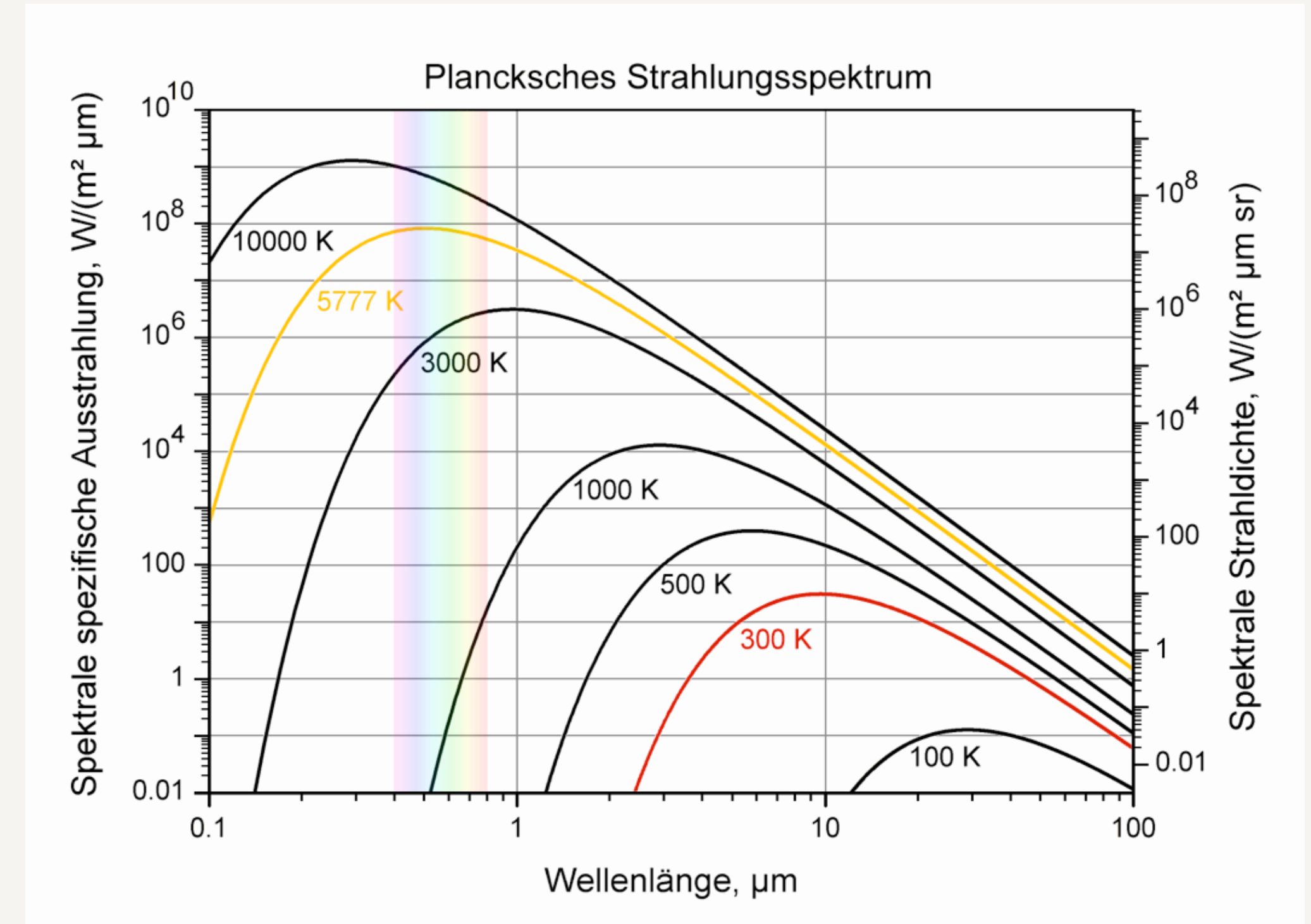
$$\lambda_{max} \cdot T = \text{konst.} = 2898 \mu\text{mK}$$

- Die Wellenlänge des Strahlungsmaximums verschiebt sich mit steigender Temperatur zu kürzeren Wellenlängen.



# Aufgabe Wärmestrahlung Strahlungsmaximum

- Welcher Wellenlänge entspricht Raumtemperatur?
- Welcher Wellenlänge entspricht Körpertemperatur?



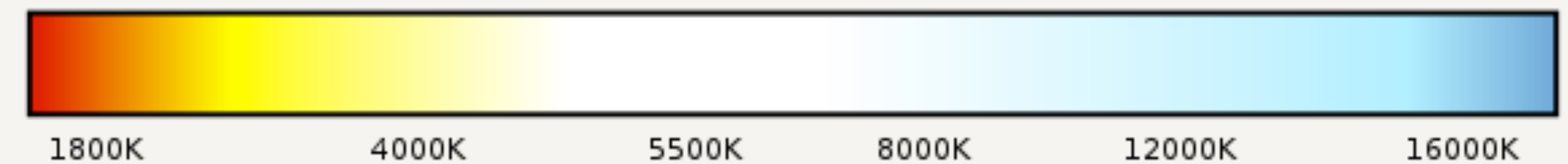
$$\lambda_{max} \cdot T = \text{konst.} = 2898 \mu\text{mK}$$



# Wärmestrahlung

## Farbtemperatur

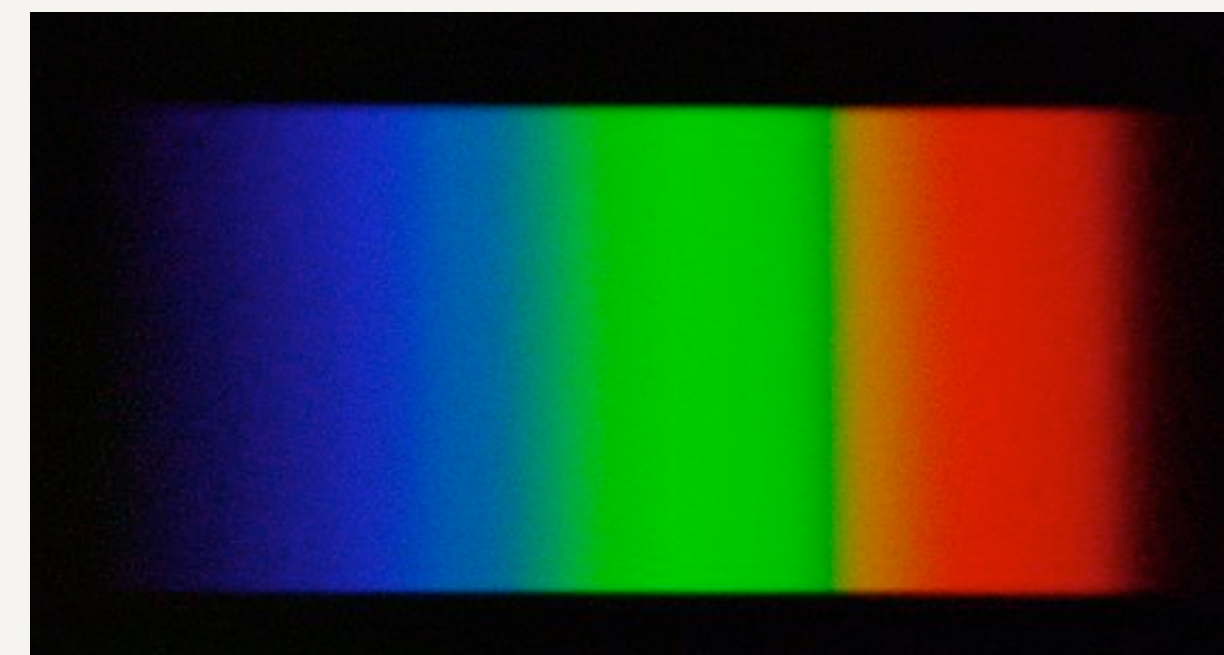
- Das Spektrum des schwarzen Strahlers wird nur über den einen Parameter Temperatur festgelegt.
- Damit kann jeder Temperatur eine Farbe zugewiesen werden, die dann Farbtemperatur heisst.





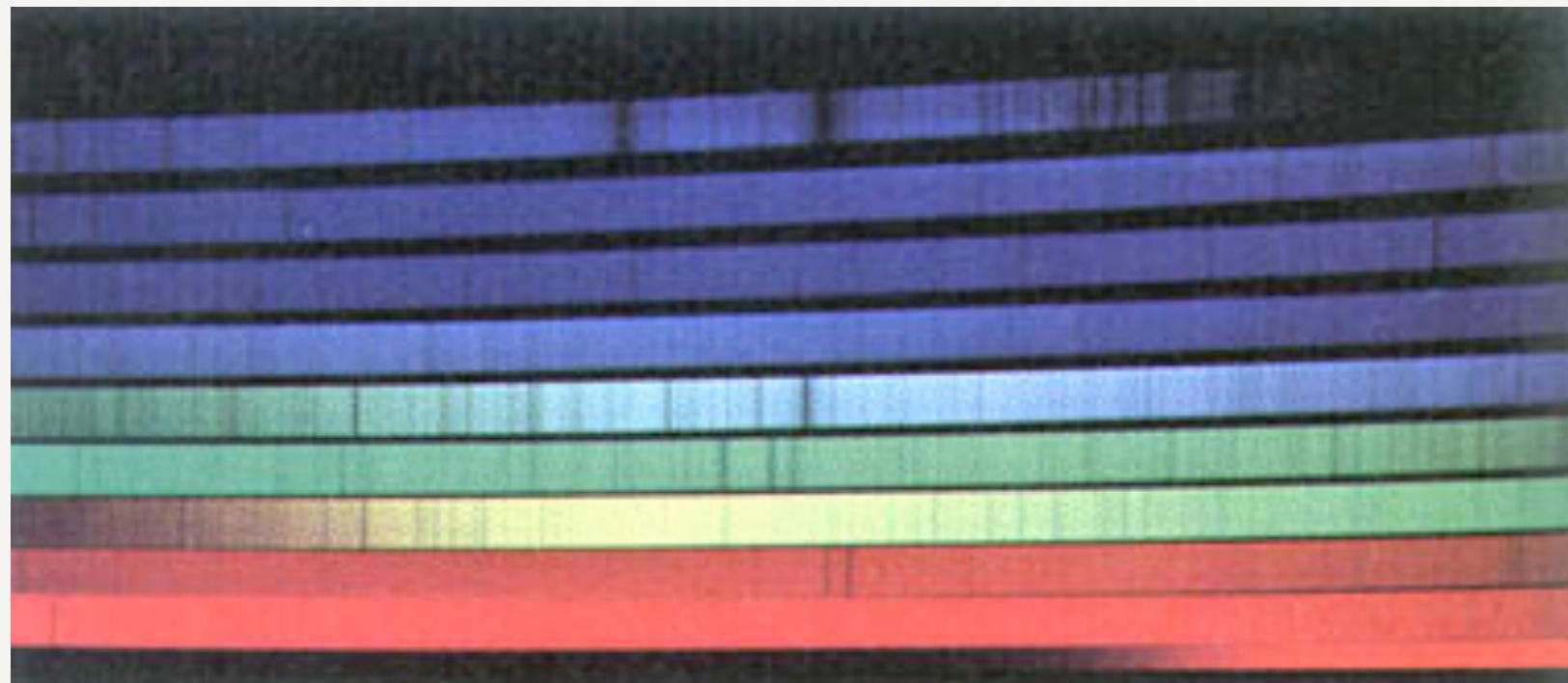
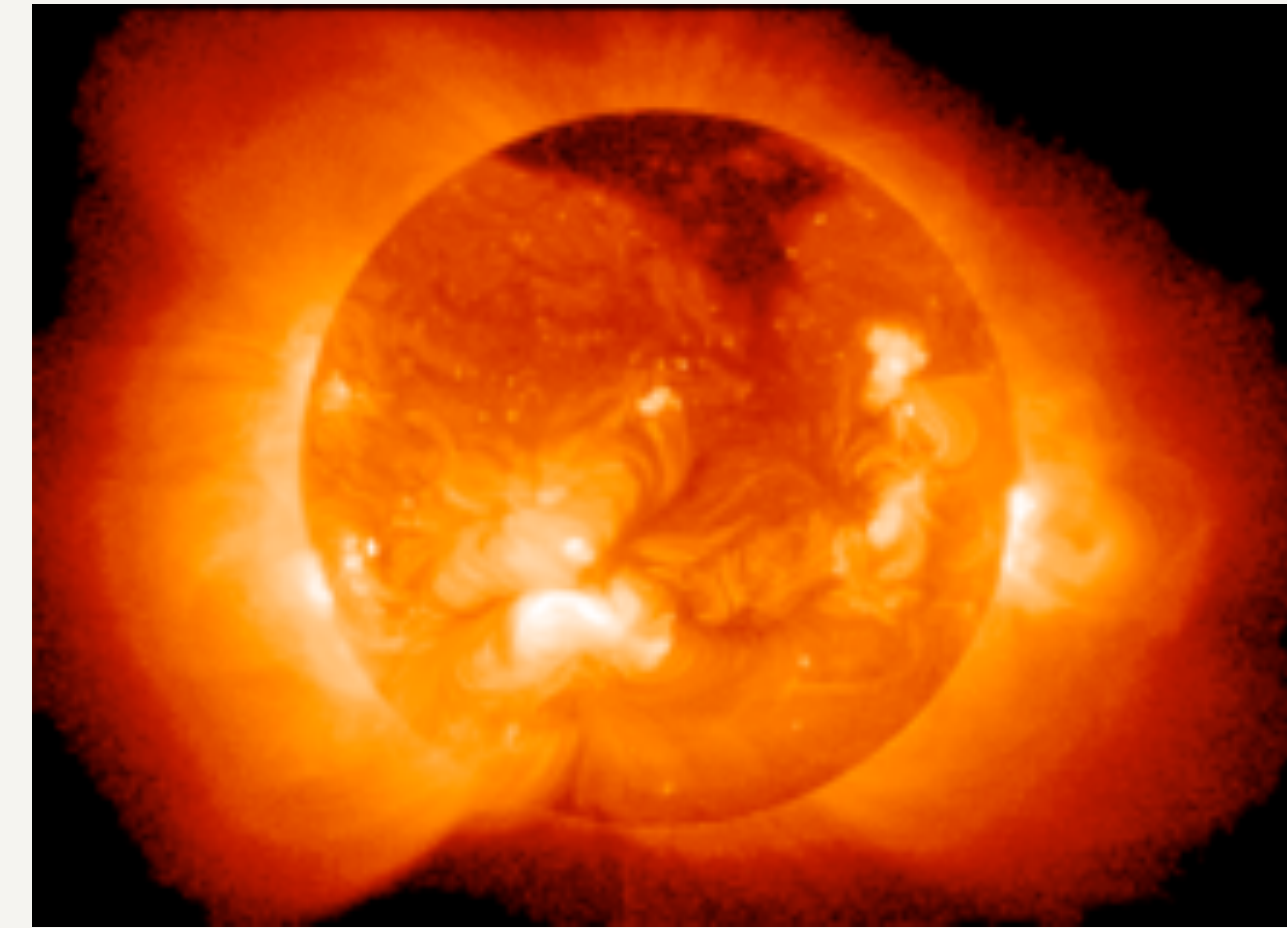
# Glühbirne und Halogenstrahler

- Planck'scher Strahler: hohe Wärme erzeugt Licht im sichtbaren Bereich
- Spezialform Halogen-Strahler: höhere Temperatur durch spezielle Atmosphäre möglich

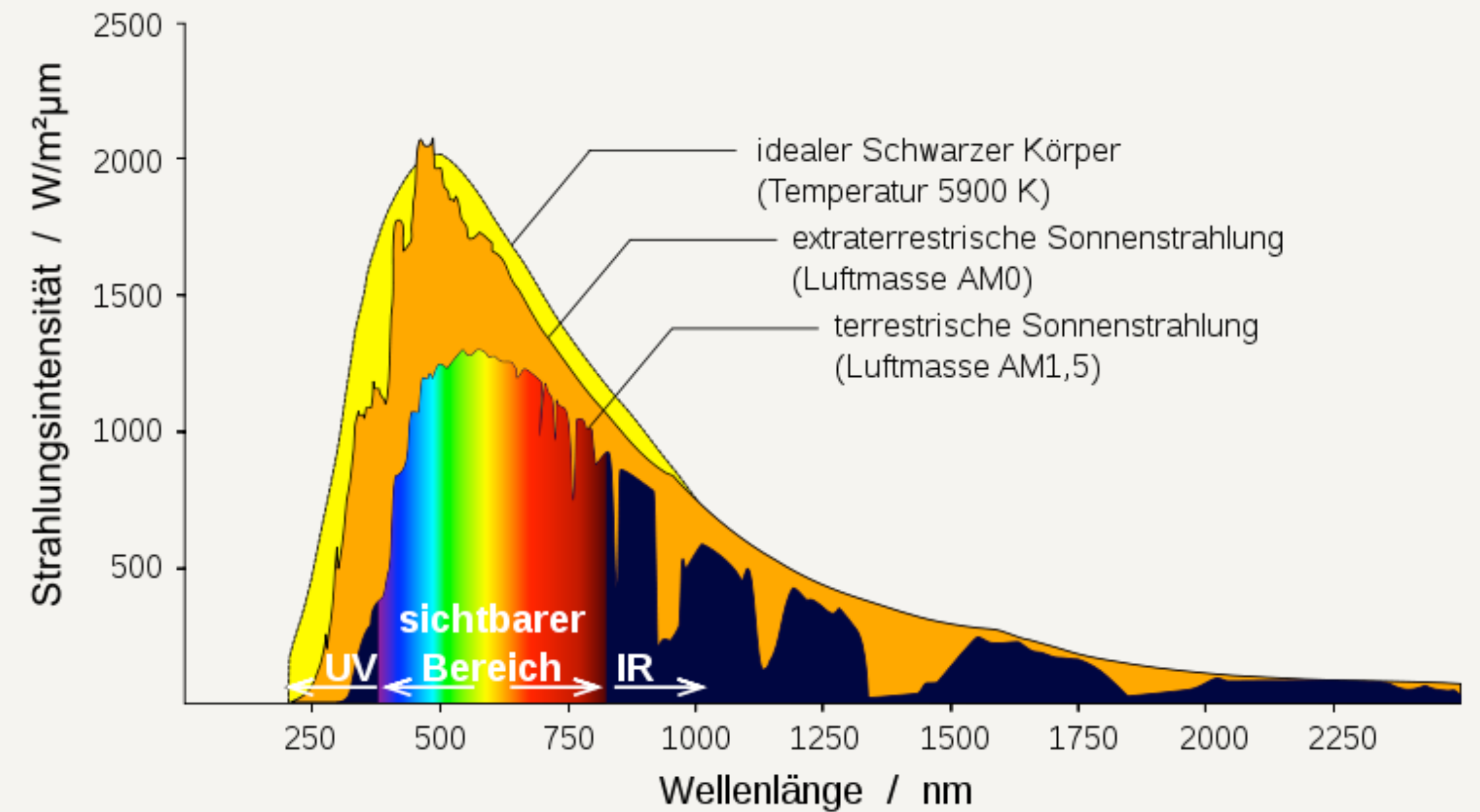




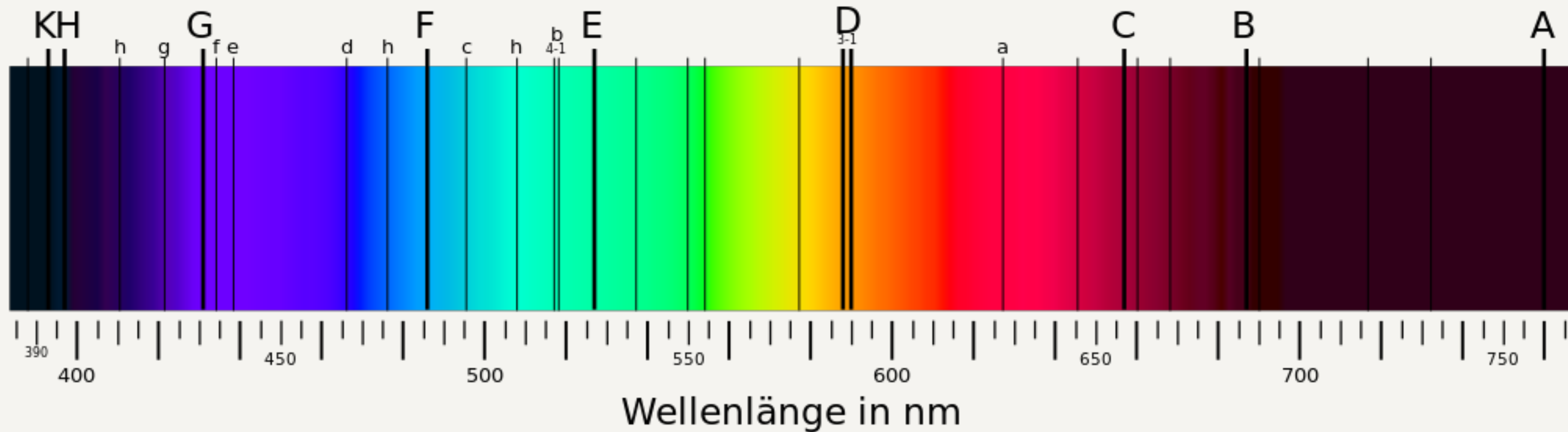
# Sonne



Fraunhofer-Linien: Absorptionslinien



# Fraunhofer-Linien



- Fraunhofer hat die dunklen Linien bei der Entwicklung von neuen Glassorten entdeckt.
- Sie sind seit dem als Referenz für spektrale Positionen etabliert und werden in vielen optischen Situationen gebraucht, insbesondere bei Dispersion (Abbe-Zahl)

# Was ist Farbe?

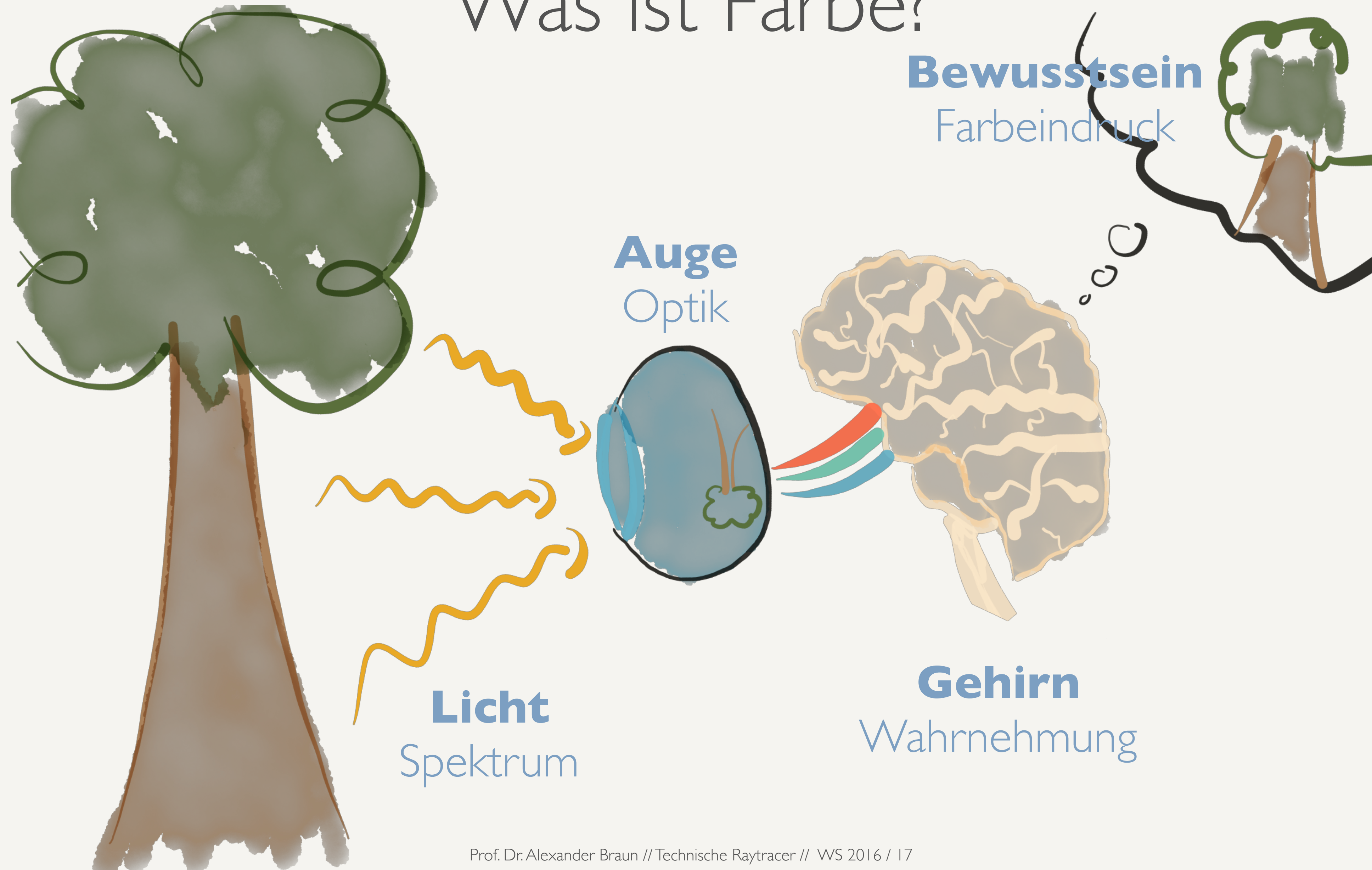
Farbe ist ein **Sinneseindruck** im Bewusstsein.

Farbe hat **keine physikalische Realität!**



# Szene

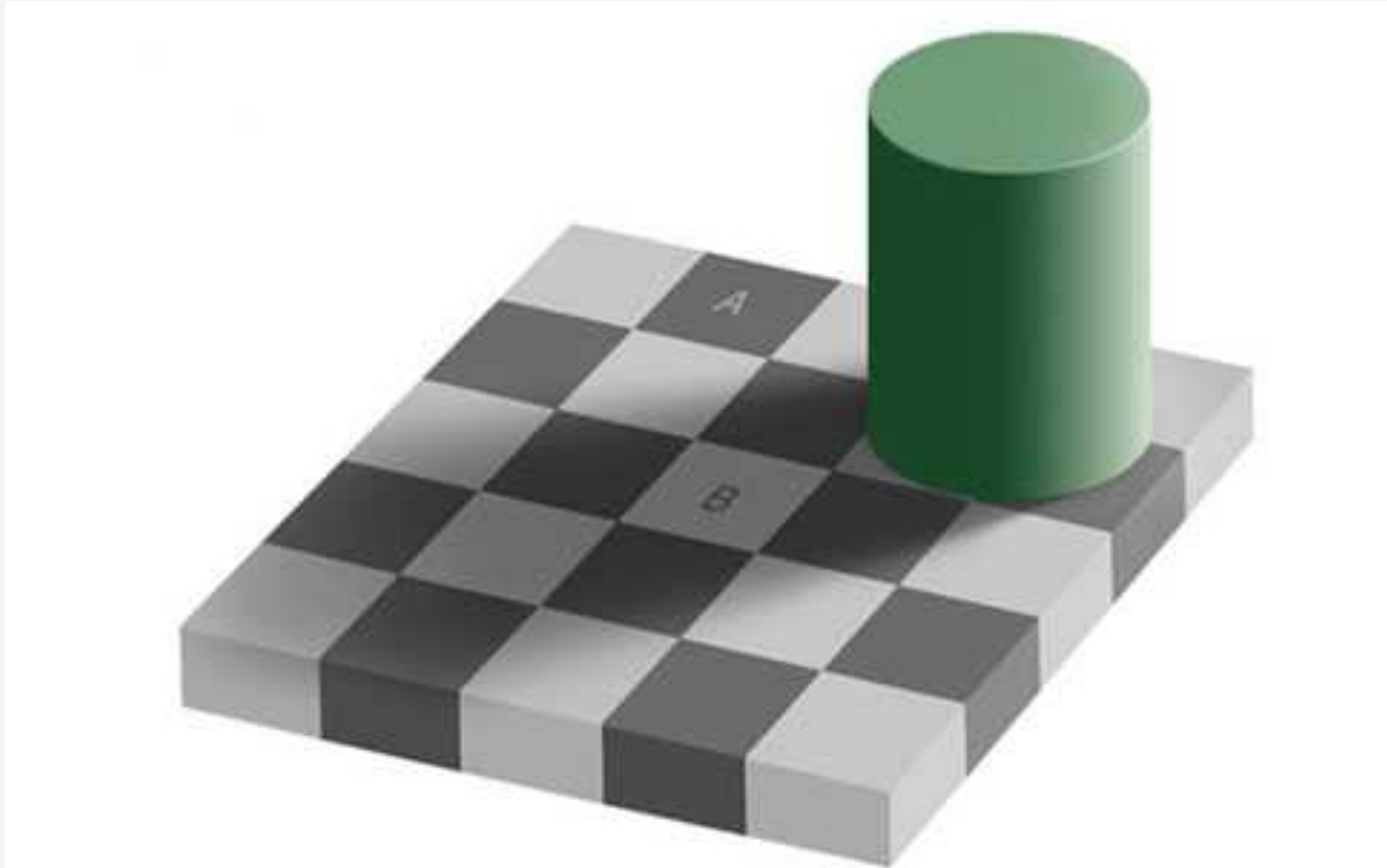
# Was ist Farbe?



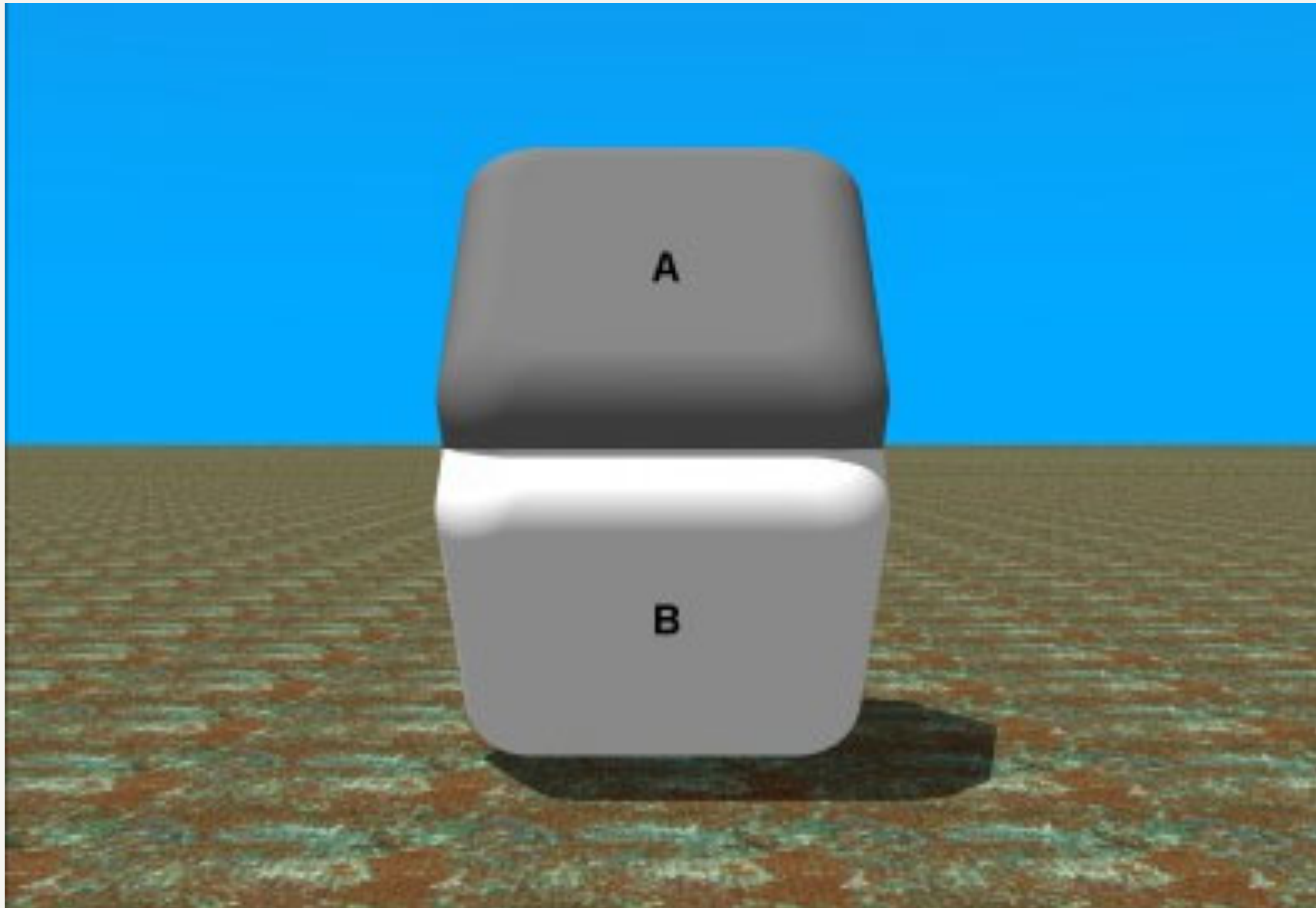


# Was ist Farbe?

- **Farbe ist kein Spektrum.** Ein Spektrum führt zu einer Farbe, aber umgekehrt ist es nicht eindeutig.
- Die Wahrnehmung der **Farbe hängt vom Kontext ab.**
  - Tag / Nacht, hell/dunkel
  - Kontrast / diffus
  - Restliche Umgebung
  - ‚Vorgeschichte‘ des Beobachters (dunkeladaptiert)



[http://www.illusionen.biz/blog/?page\\_id=22](http://www.illusionen.biz/blog/?page_id=22)

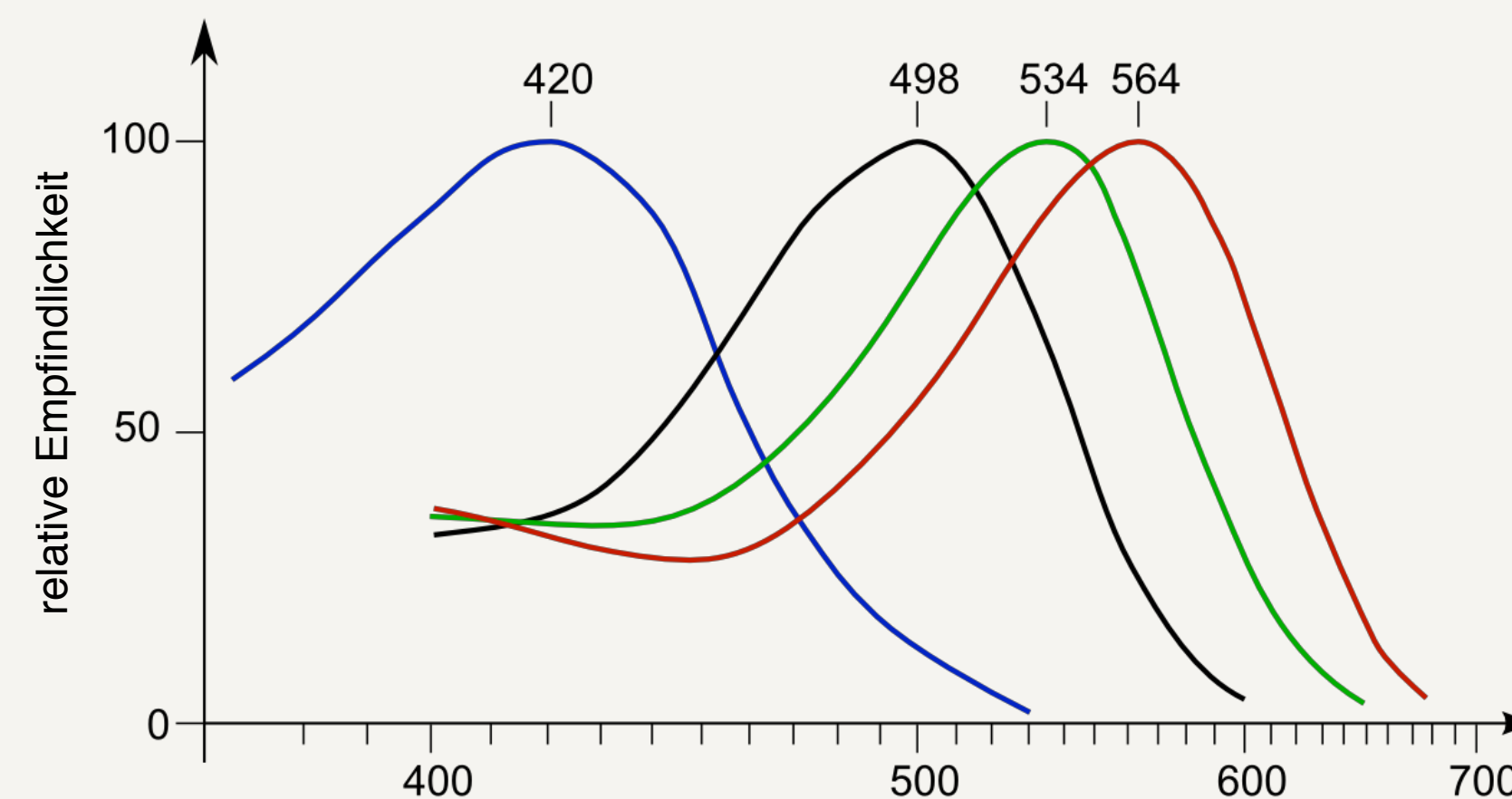
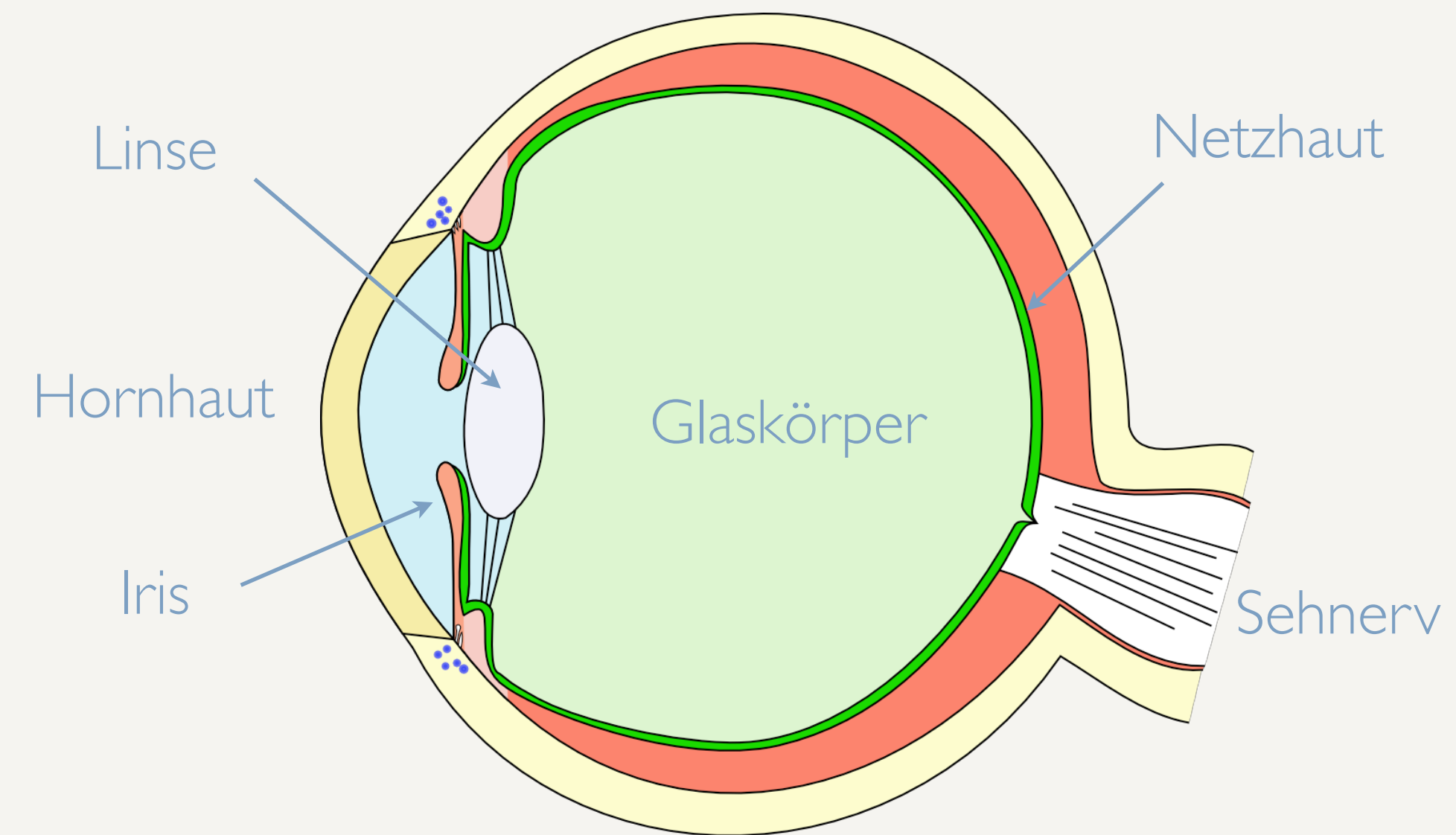


[http://www.illusionen.biz/blog/?page\\_id=22](http://www.illusionen.biz/blog/?page_id=22)



# Was ist Farbe?

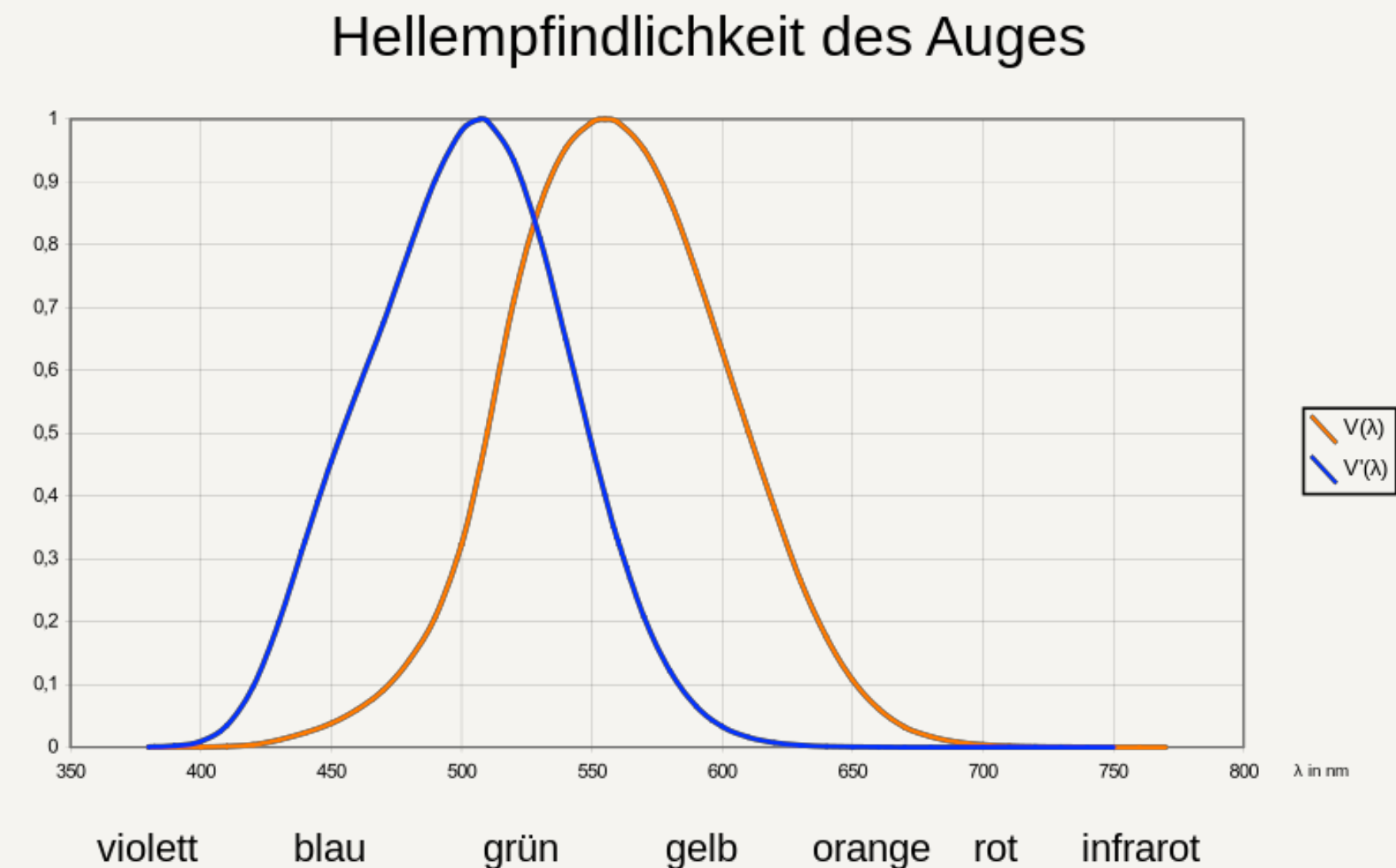
- Die Netzhaut enthält zwei Typen von Rezeptoren
- **Stäbchen** für das Hell-Dunkel-Empfinden
- **Zapfen** für das Farbempfinden
- Es gibt drei Sorten von Zapfen: **Rot**, **Grün** und **Blau**!





# Was ist Farbe?

- Die Hellempfindlichkeit des Auges kann spektral aufgelöst vermessen werden.
- Die Kurve wird „V-lambda“ genannt:  $V(\lambda)$
- Es gibt zwei Kurven, eine für das auf helladaptierte Auge, eine für das dunkeladaptierte Auge.
- Die Kurve ist auf eins normiert.

















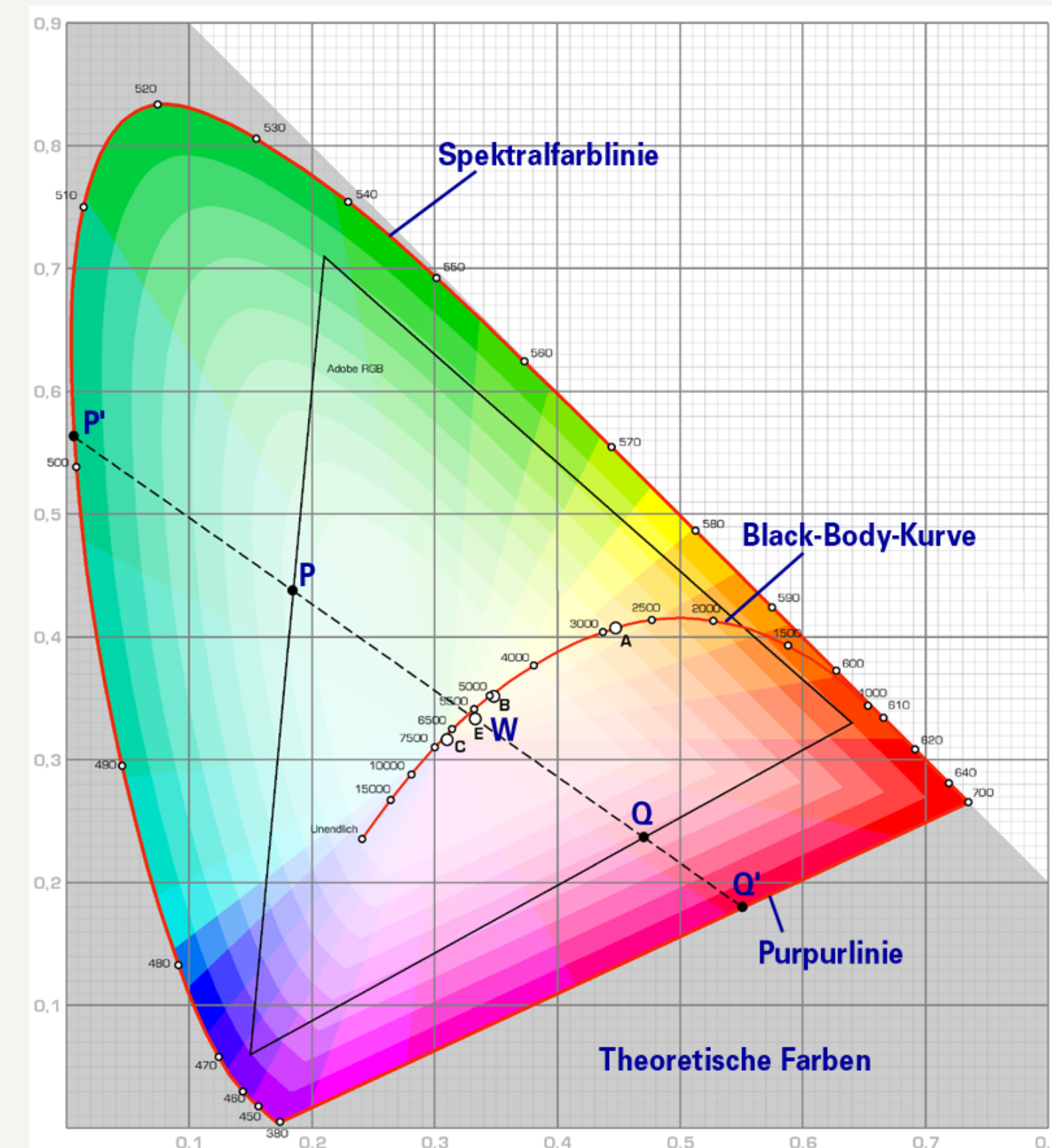
# Was ist Farbe?

## Color Rendering Index , CRI

## CIE 1931

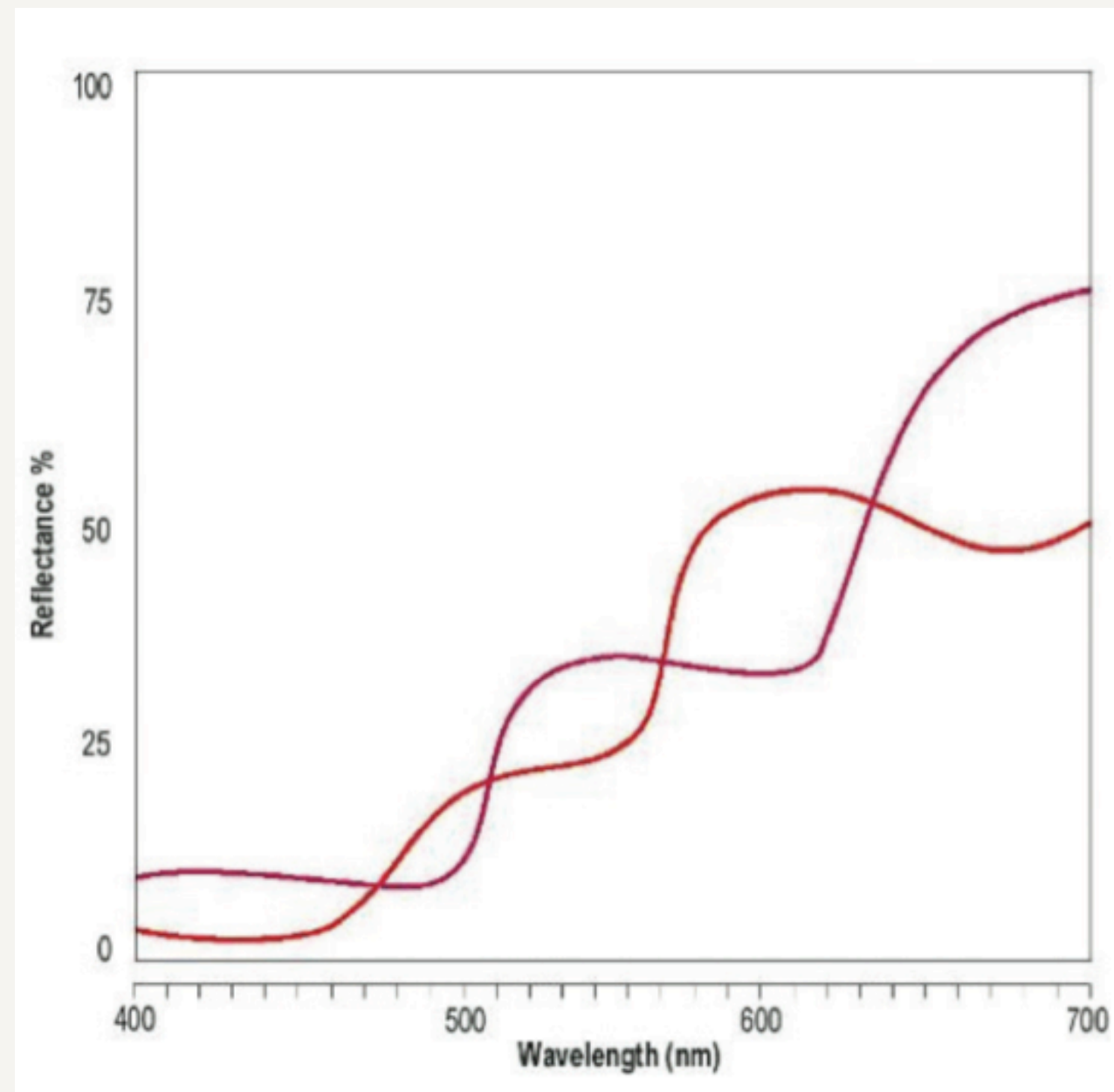
Die 14 Testfarben nach DIN 6169

	# 1 Altrosa		# 9 Rot gesättigt
	# 2 Senfgelb		# 10 Gelb gesättigt
	# 3 Gelbgrün		# 11 Grün gesättigt
	# 4 Hellgrün		# 12 Blau gesättigt
	# 5 Türkisblau		# 13 Rosa (Hautfarbe)
	# 6 Himmelblau		# 14 Blattgrün
	# 7 Asterviolett		
	# 8 Fliederviolett		



<https://de.wikipedia.org/wiki/Farbwiedergabeindex>

<https://de.wikipedia.org/wiki/CIE-Normvalenzsystem>



# Was ist Farbe?

## Metamerie

Leuchtstofflampe

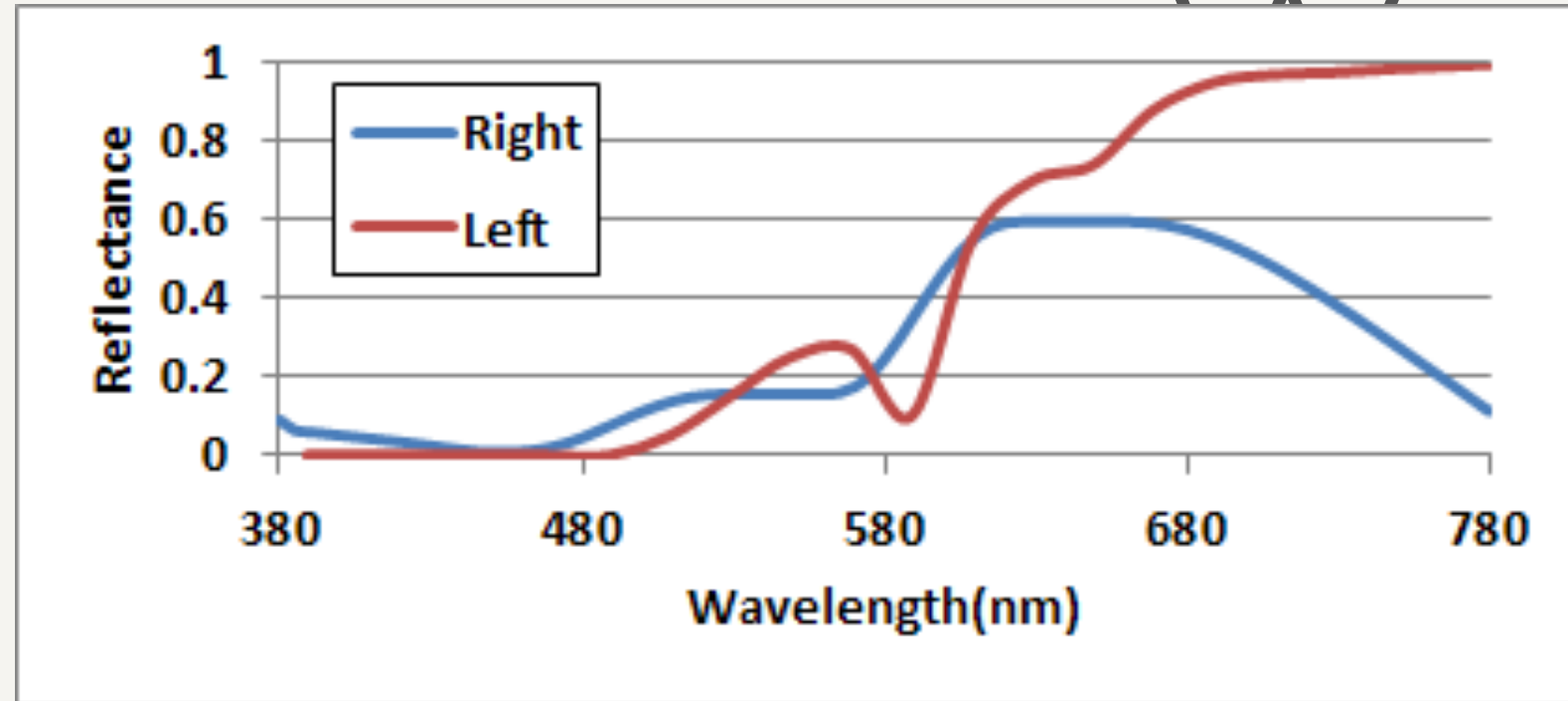


Glühbirne





# Was ist Farbe? Metamerie

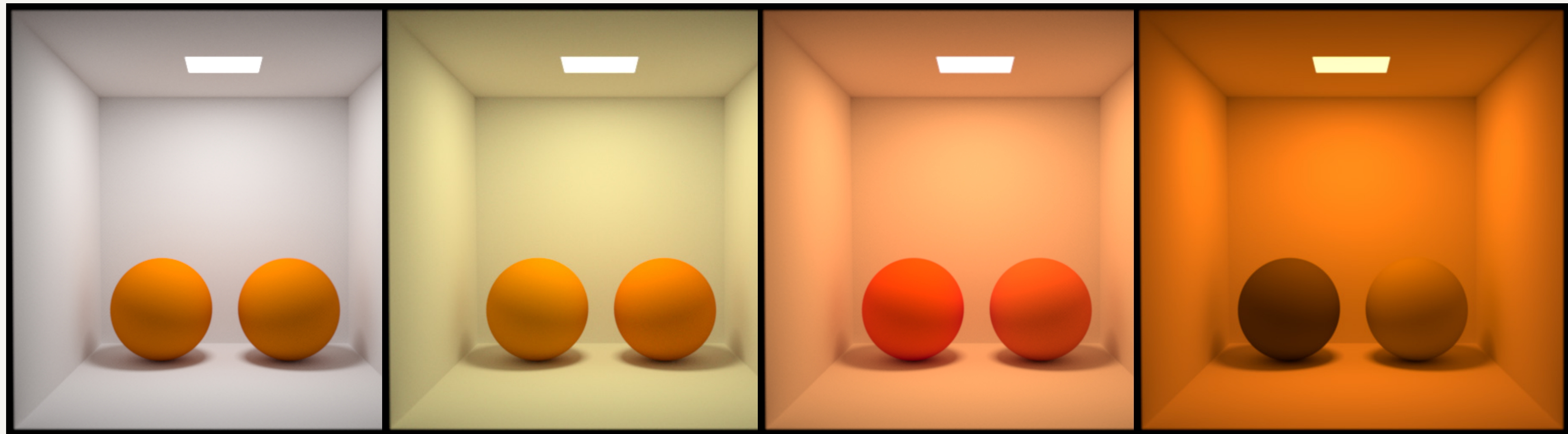


D65

Leuchtstoff

Kerzenlicht

Natrium-Dampf



<http://www.eclat-digital.com/metamerism/>

# Was ist Farbe?

Zu einer Farbe gehört  
immer  
**die Lichtquelle**  
**und**  
**das Objekt!**