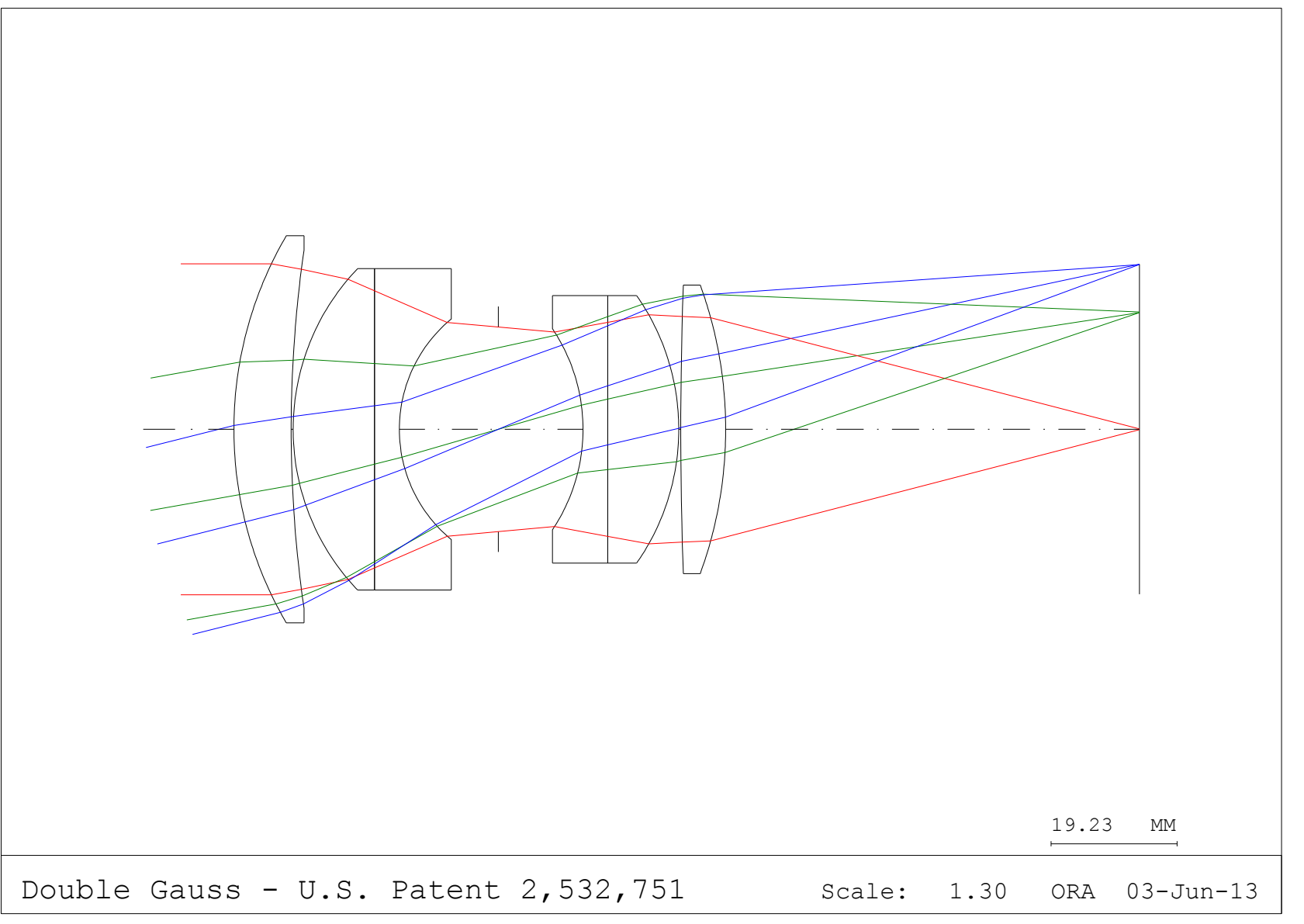
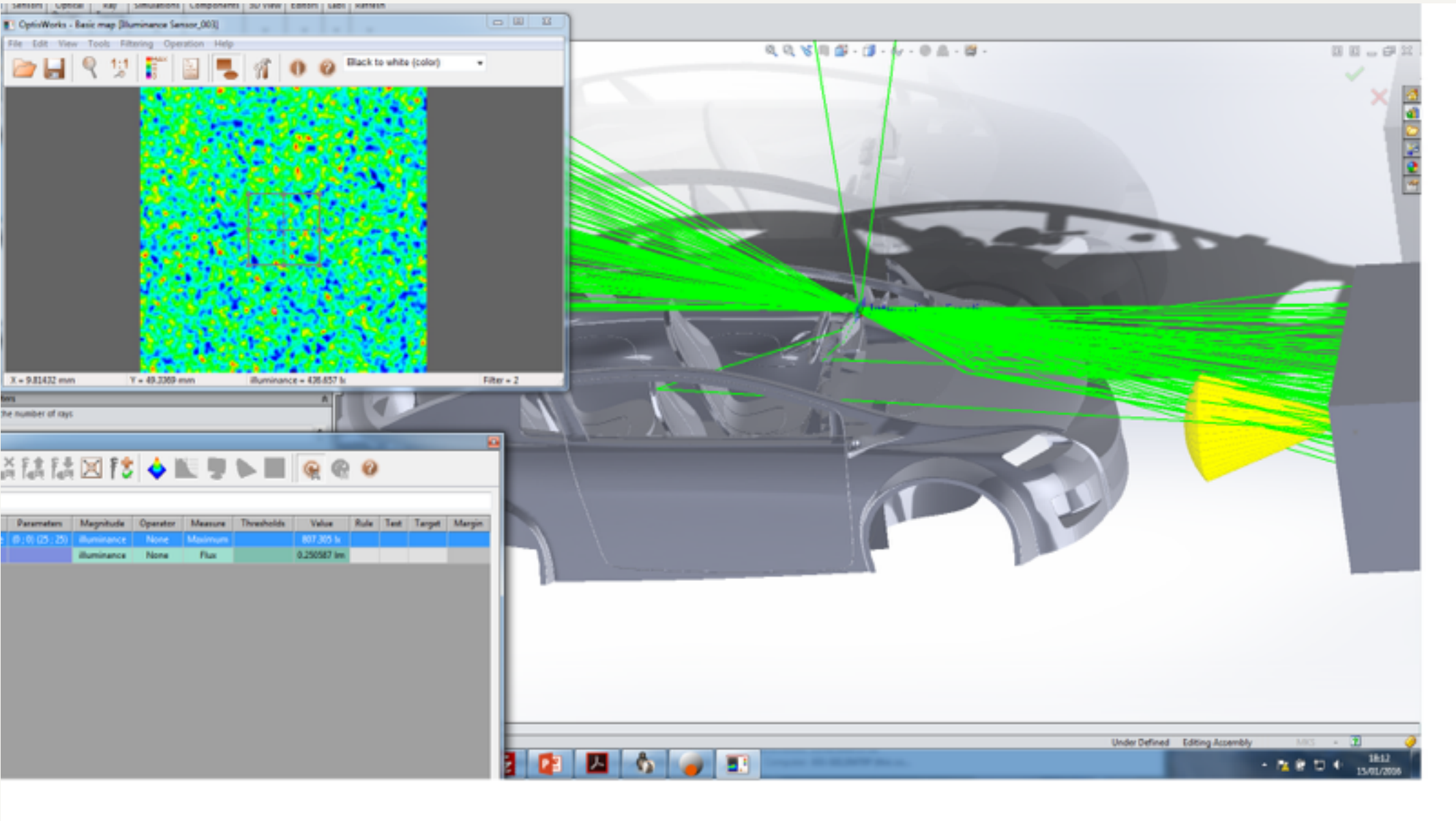
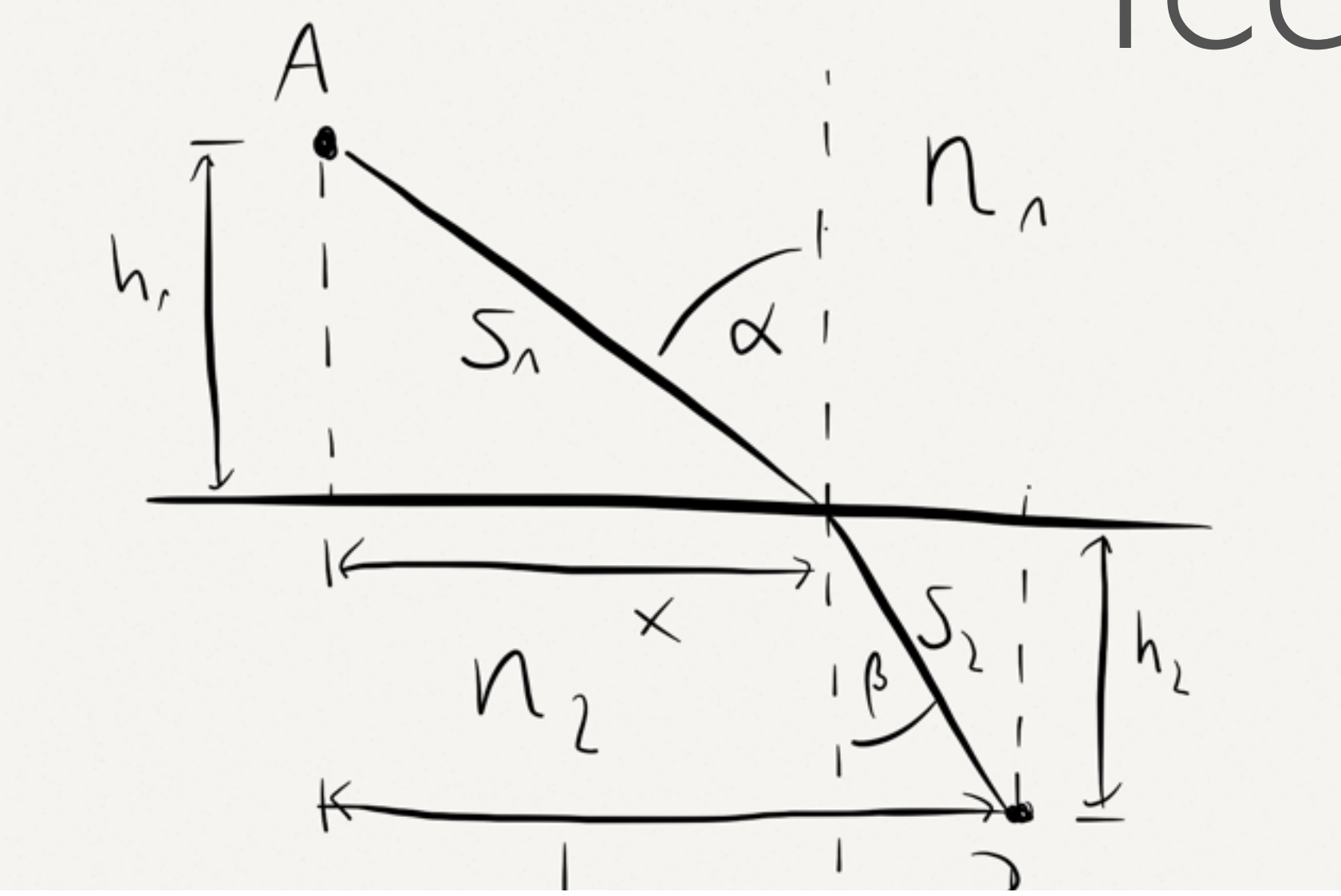


Technische Raytracer



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

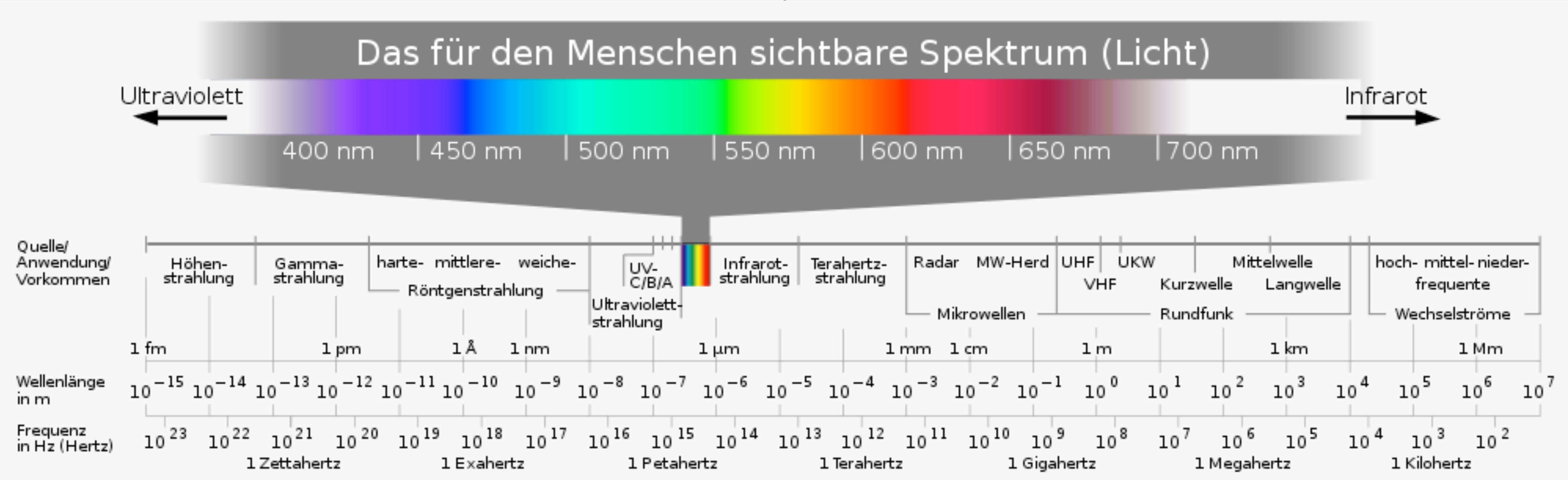
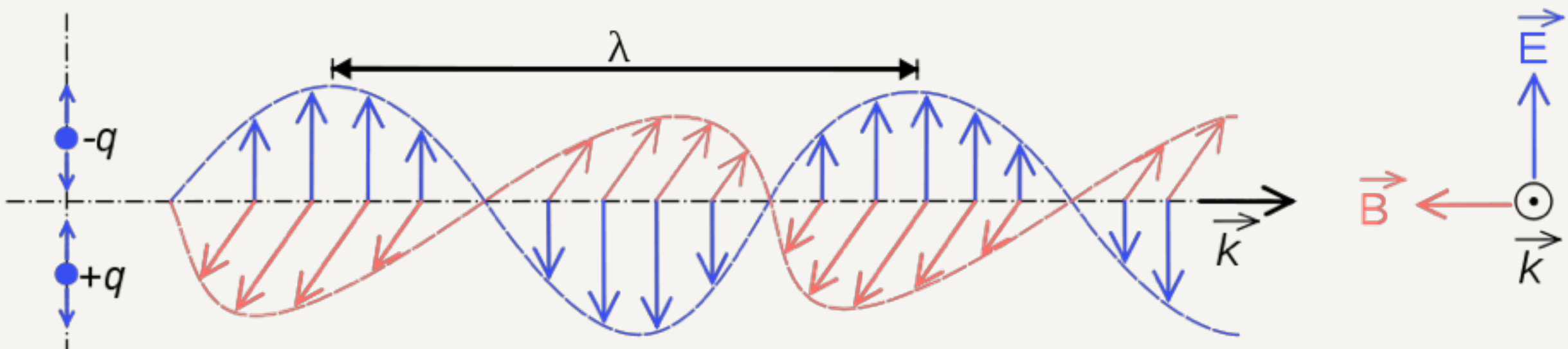
Licht und Spektrum

Was ist Licht?

Was ist Licht?

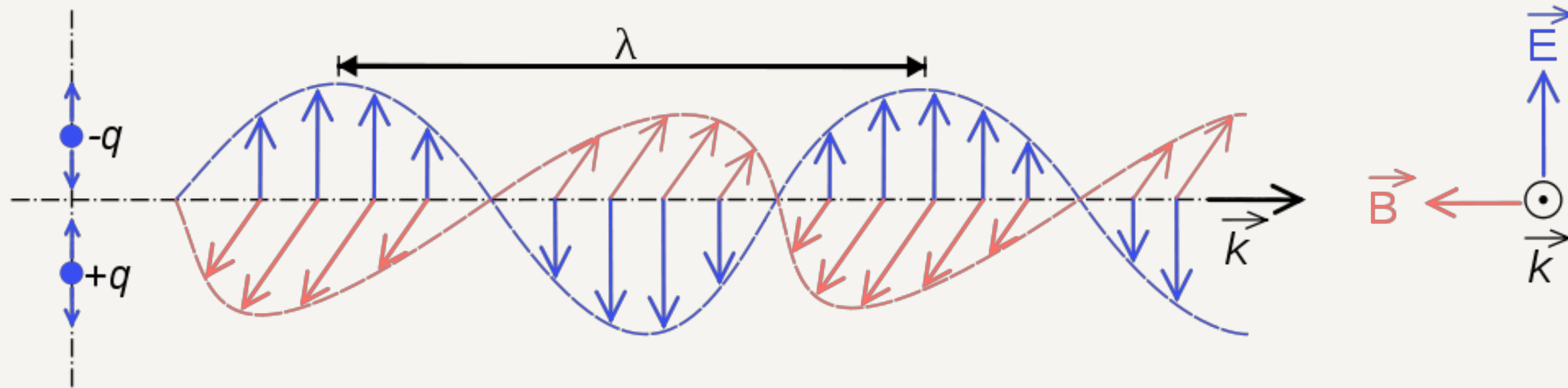
$$\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{E}_0 e^{-i\mathbf{k}\mathbf{x}} \cdot e^{i\omega t}$$

- 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 ω .
- Breitet sich mit der Geschwindigkeit c aus.

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

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

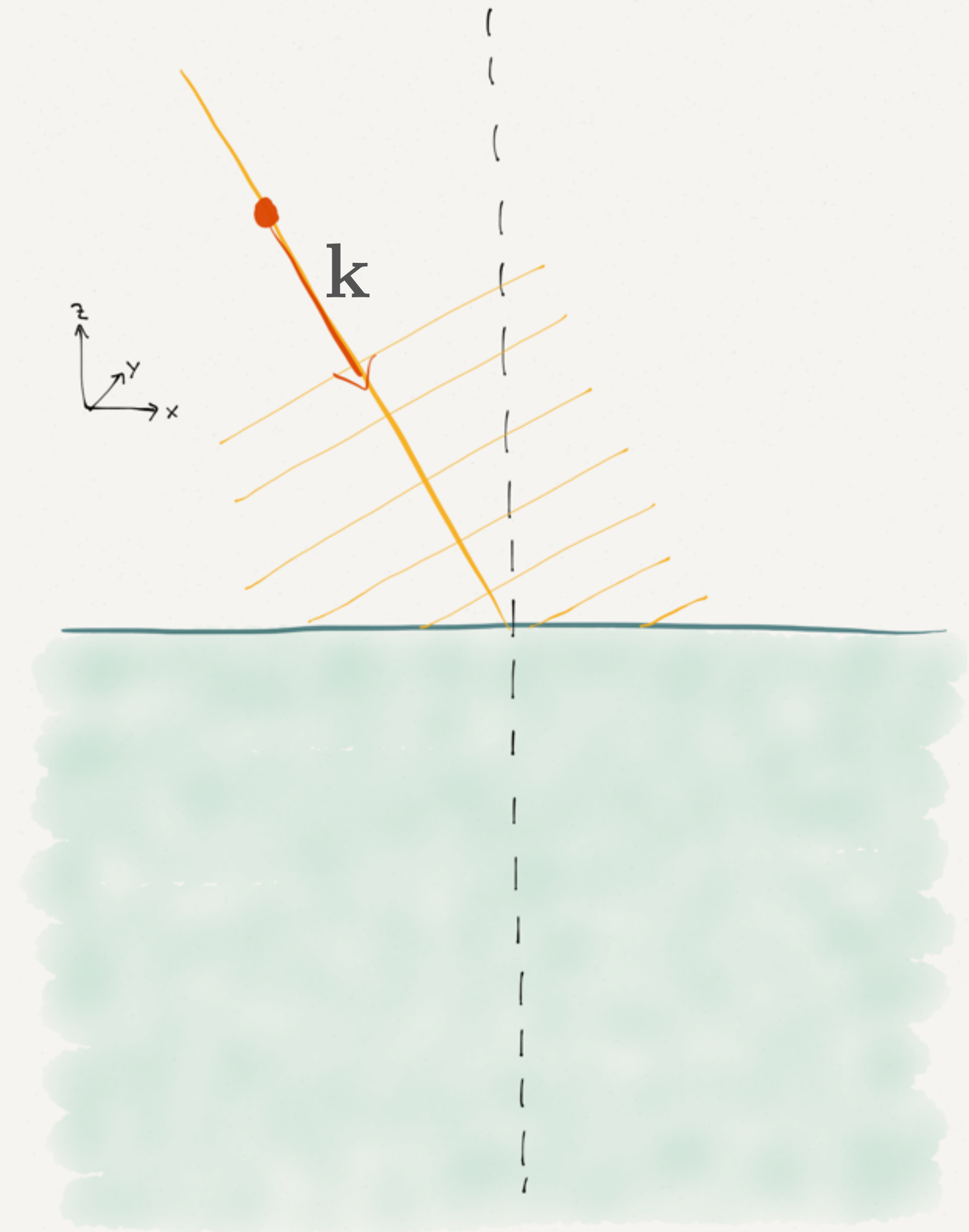
$$c = \lambda \cdot \nu$$

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

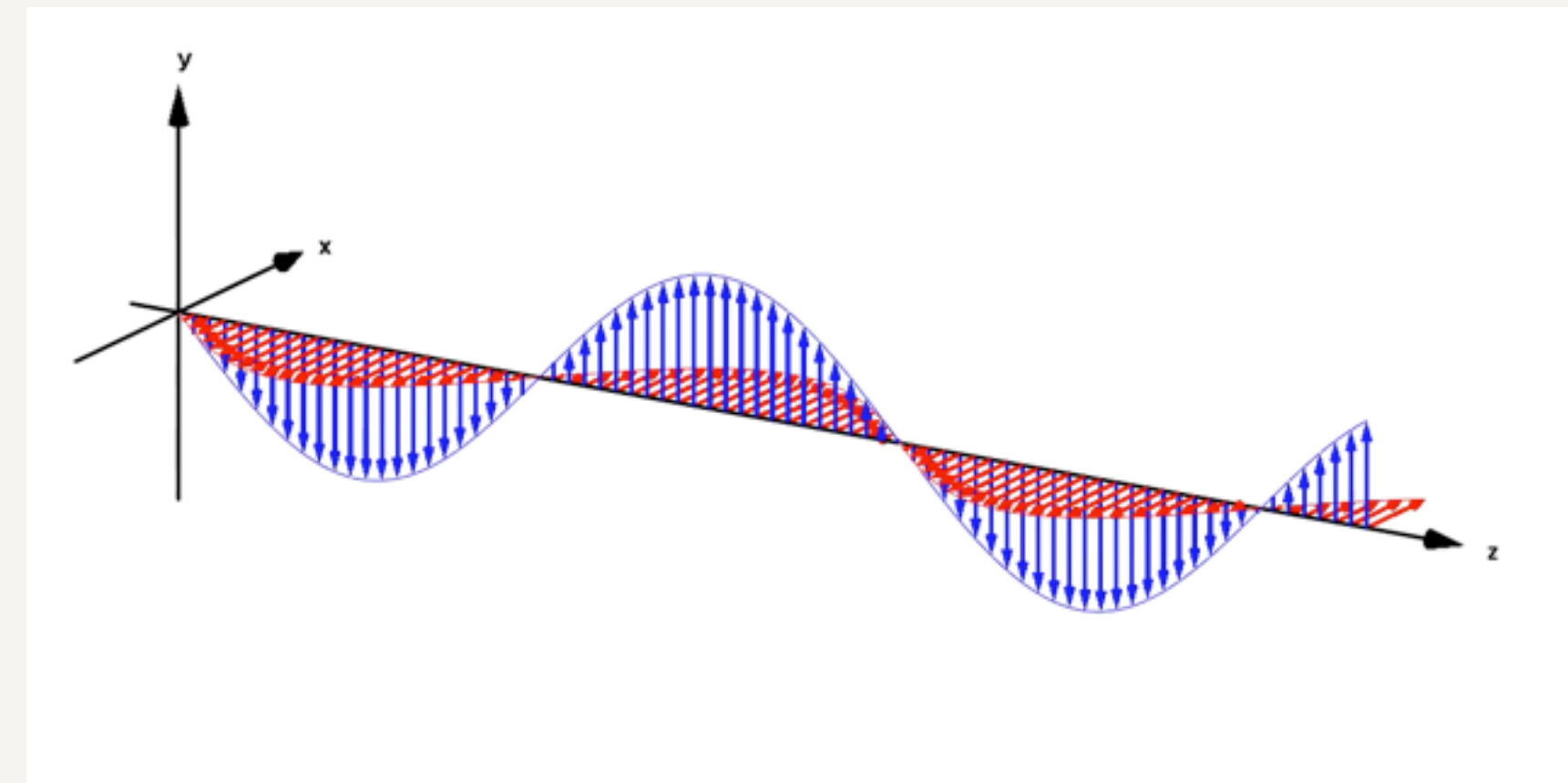
Polarisation

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

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

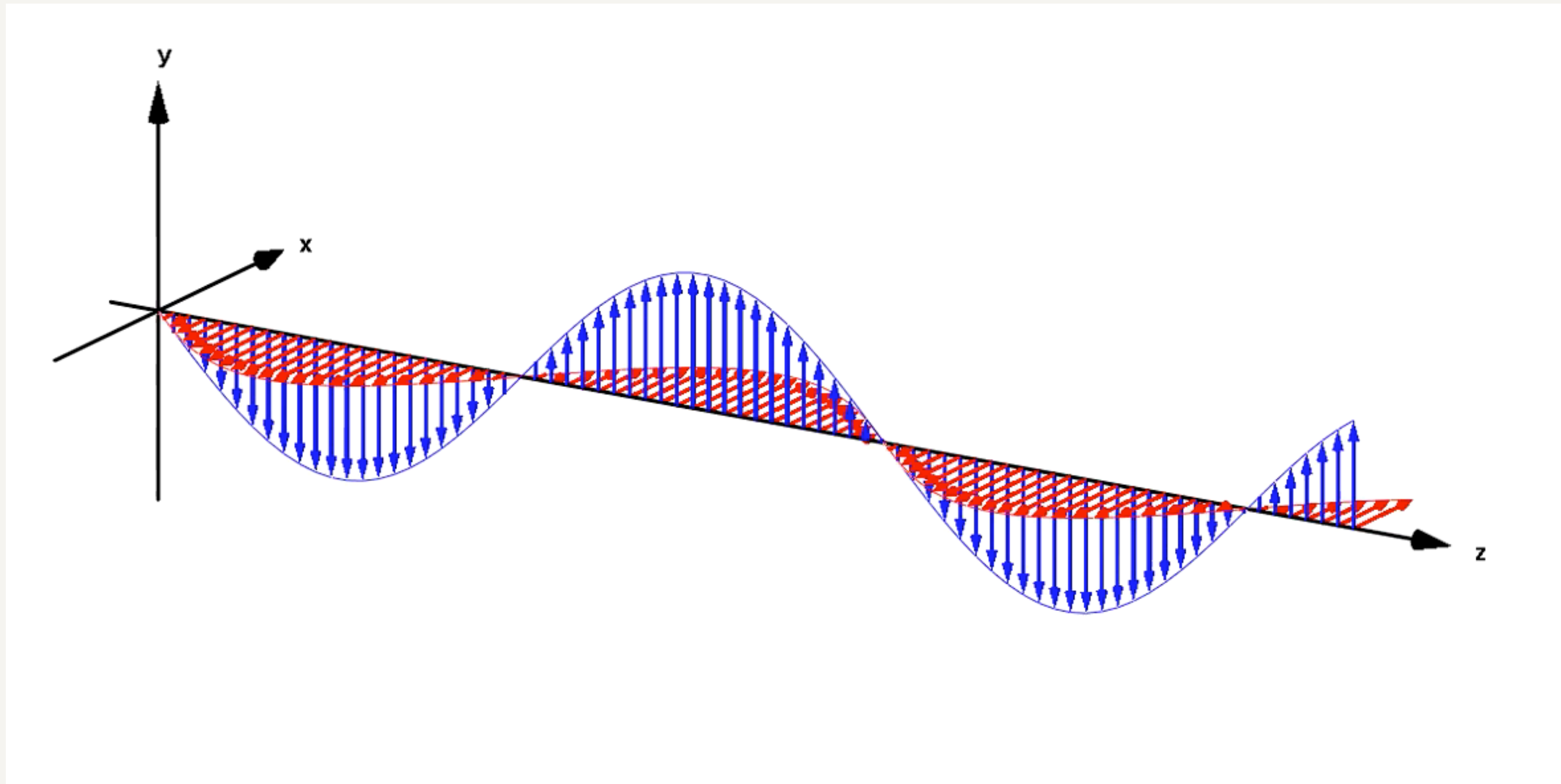
$$E_y(t, z) = E_0^y \cdot \cos(\omega t - kz + \varphi)$$

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



Polarisation

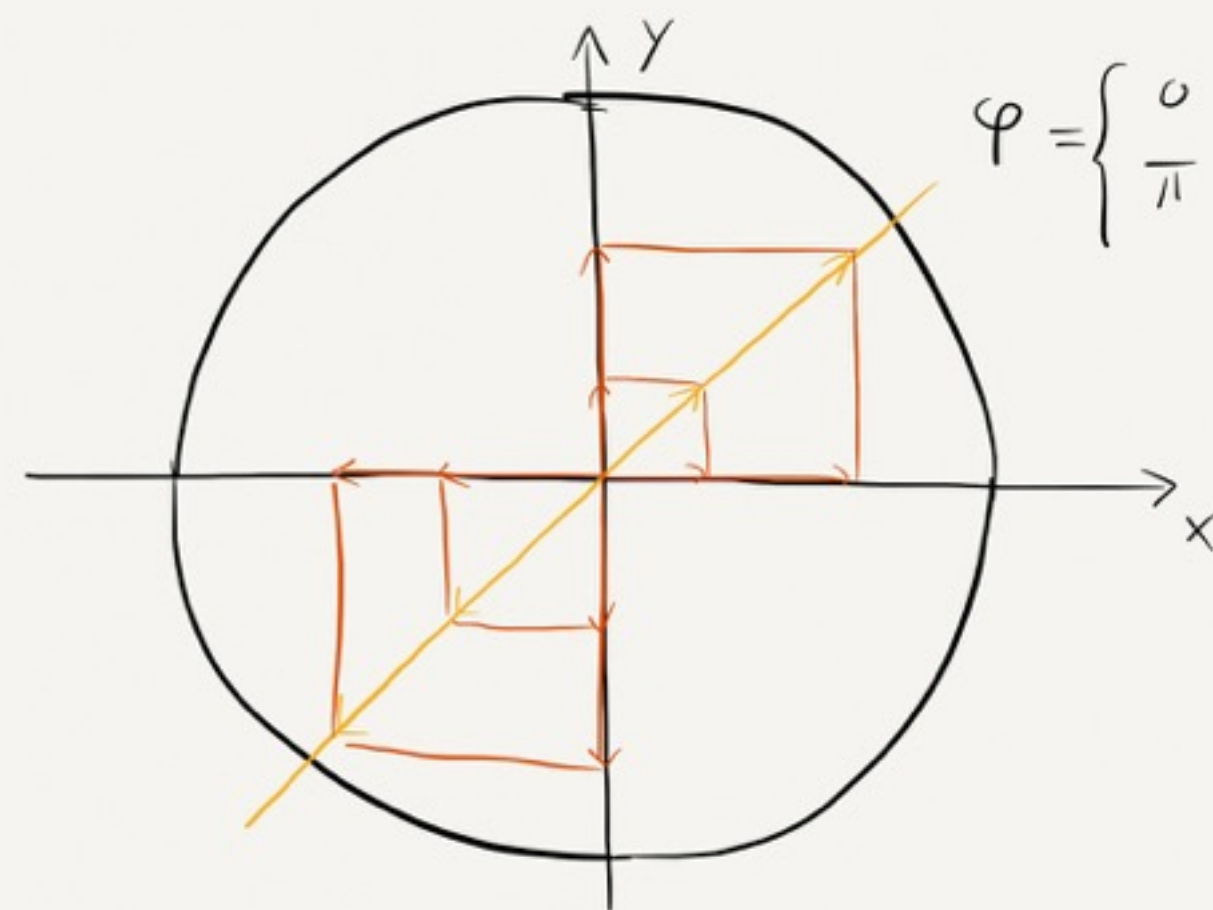
Lineare Polarisation



Polarisation

Lineare Polarisation

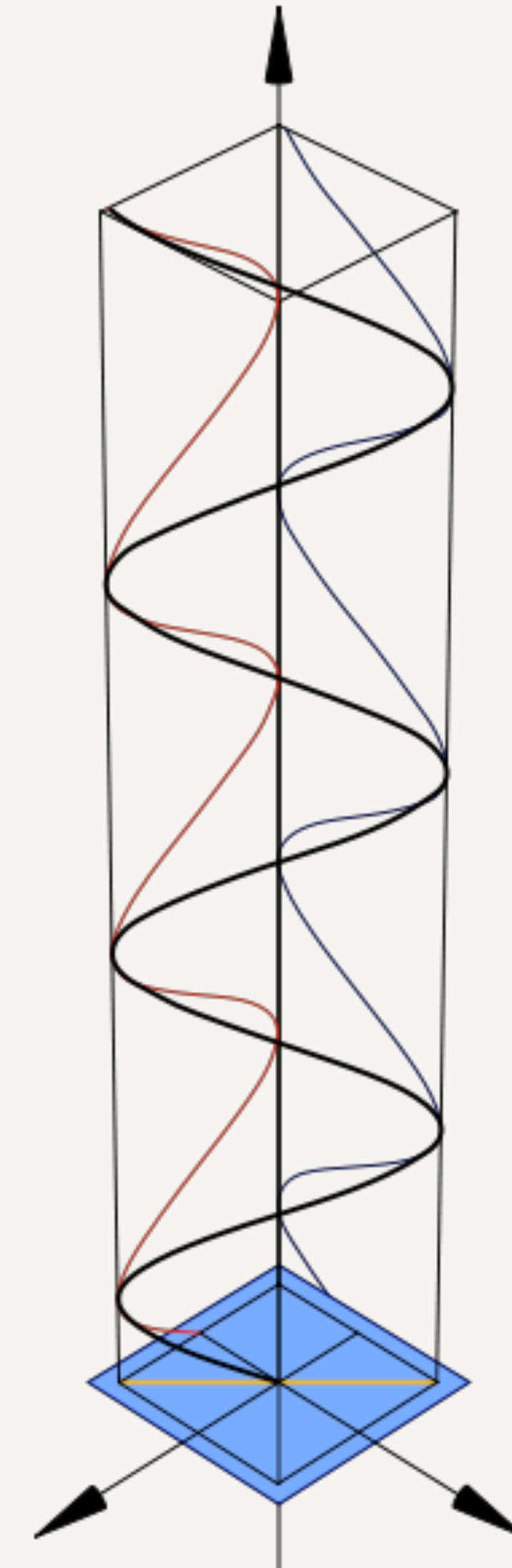
- Das elektrische Feld schwingt nur in einer festen Ebene
- Die Projektion in Blickrichtung ist eine **Linie**



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

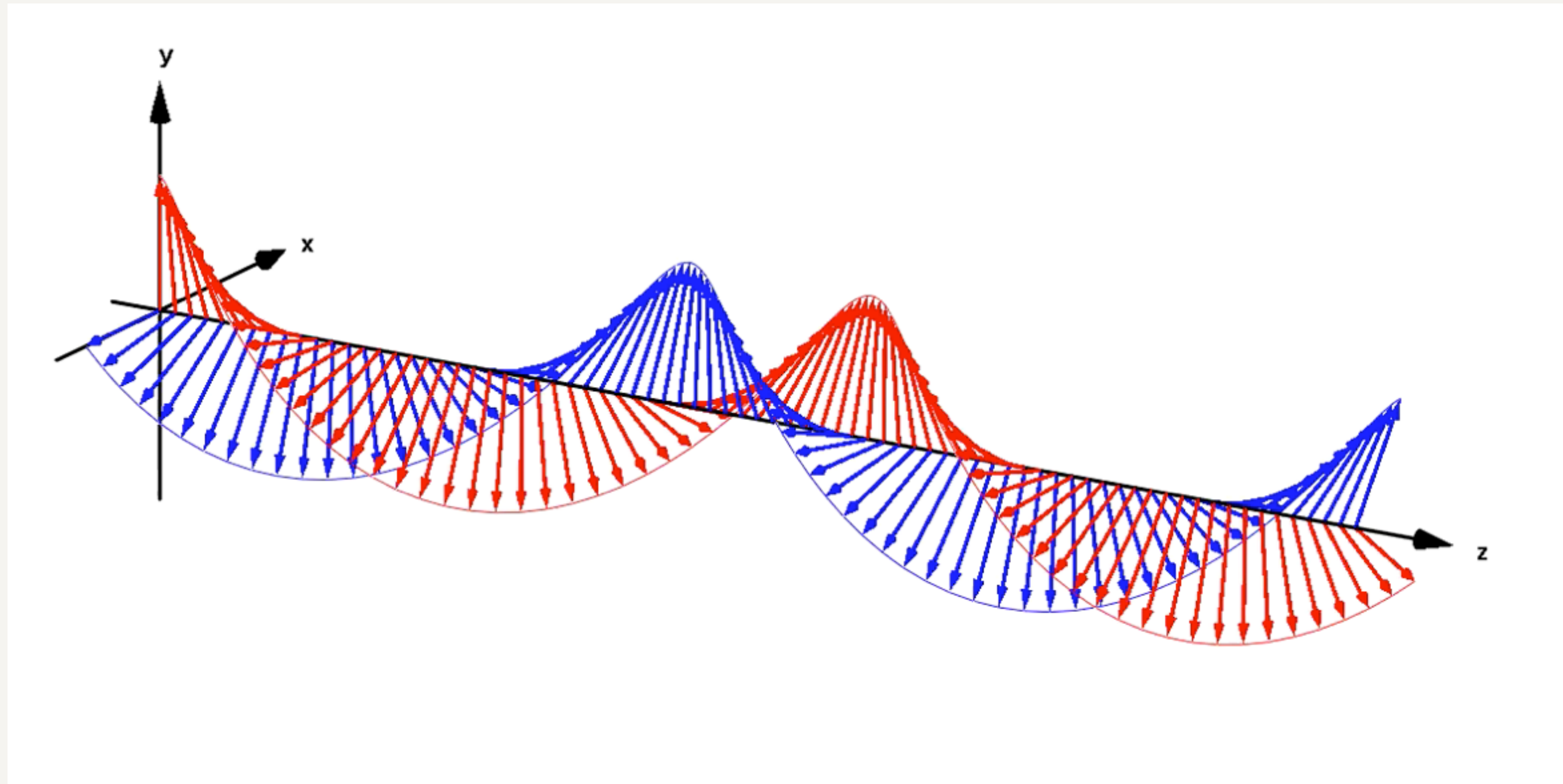
$$E_y(t, z) = E_0^y \cdot \cos(\omega t - kz + \varphi)$$

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



Polarisation

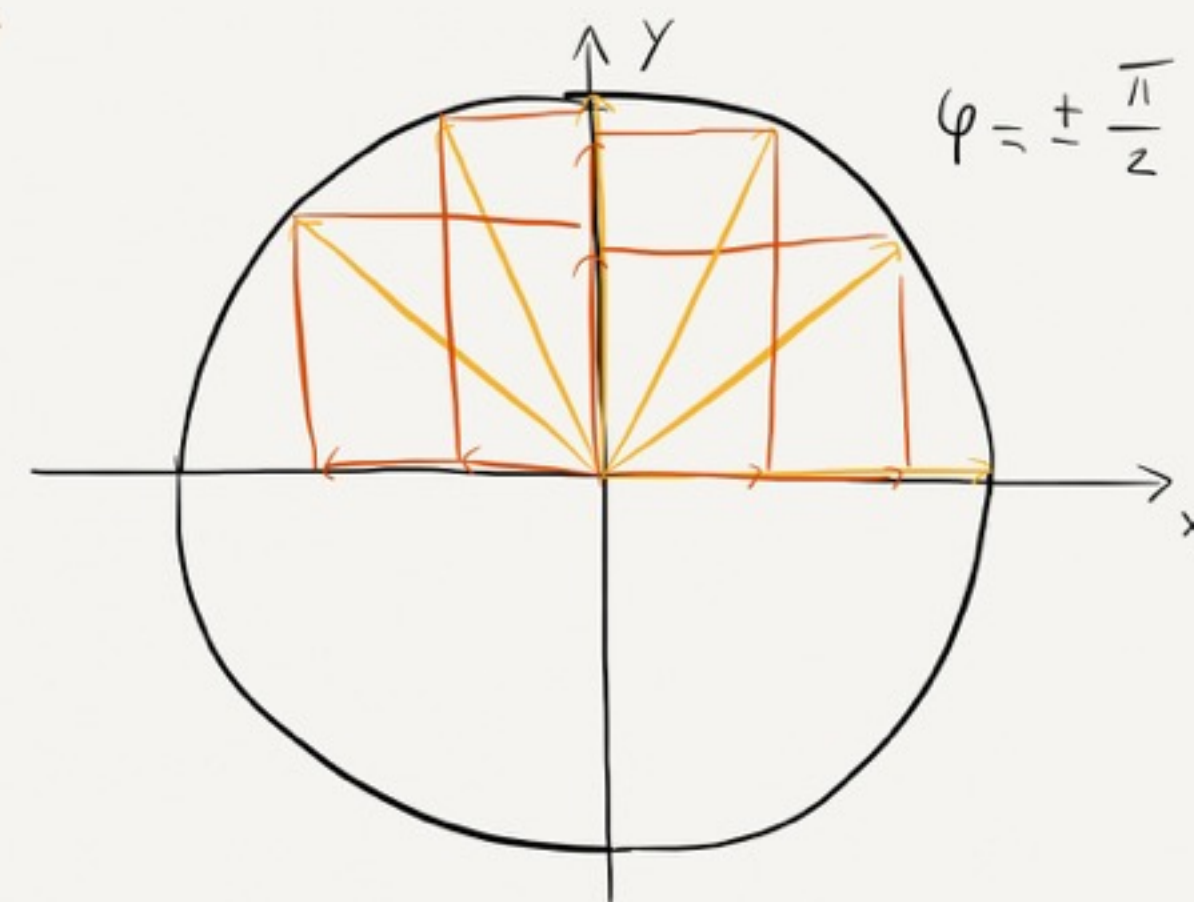
Zirkulare Polarisation



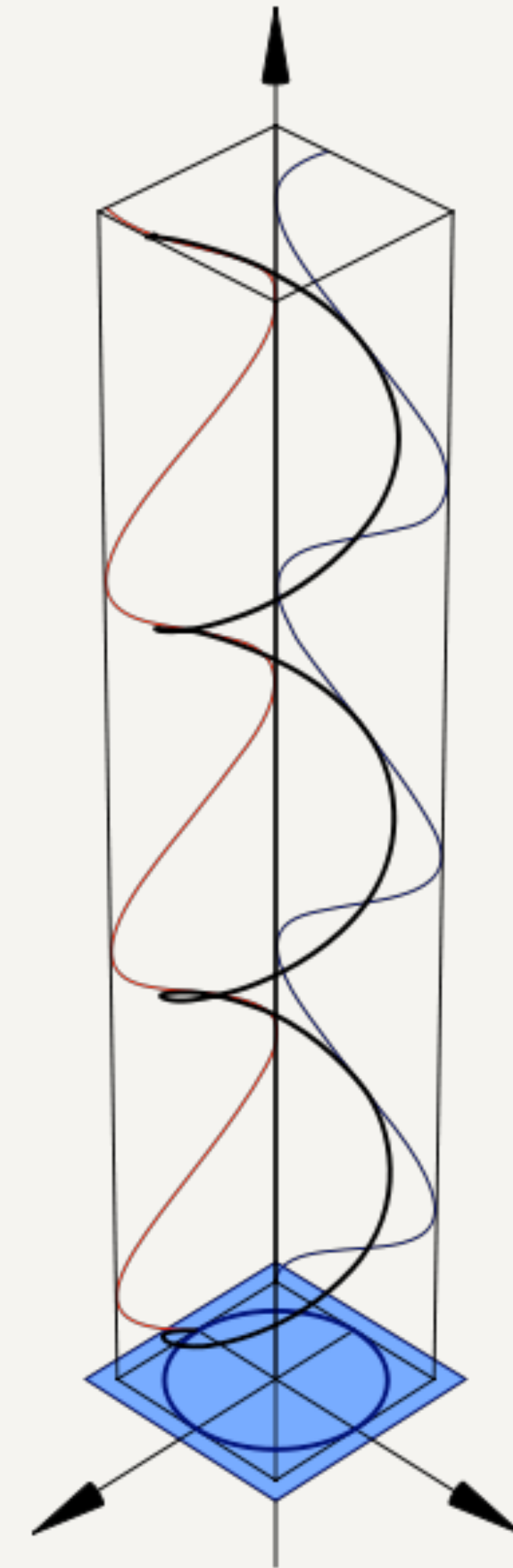
Polarisation

Zirkulare Polarisation

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



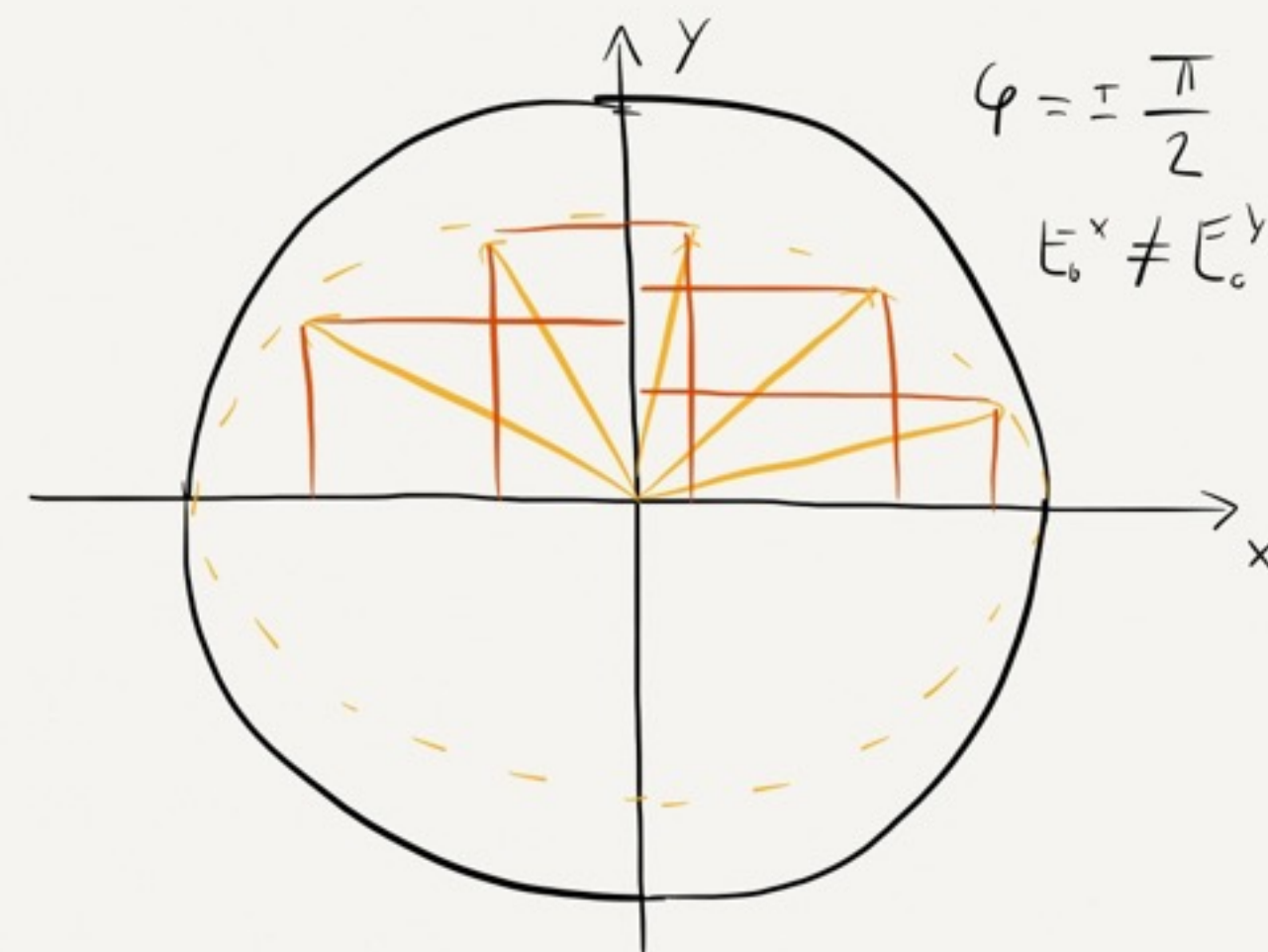
$$\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$$
$$E_x = E_y$$



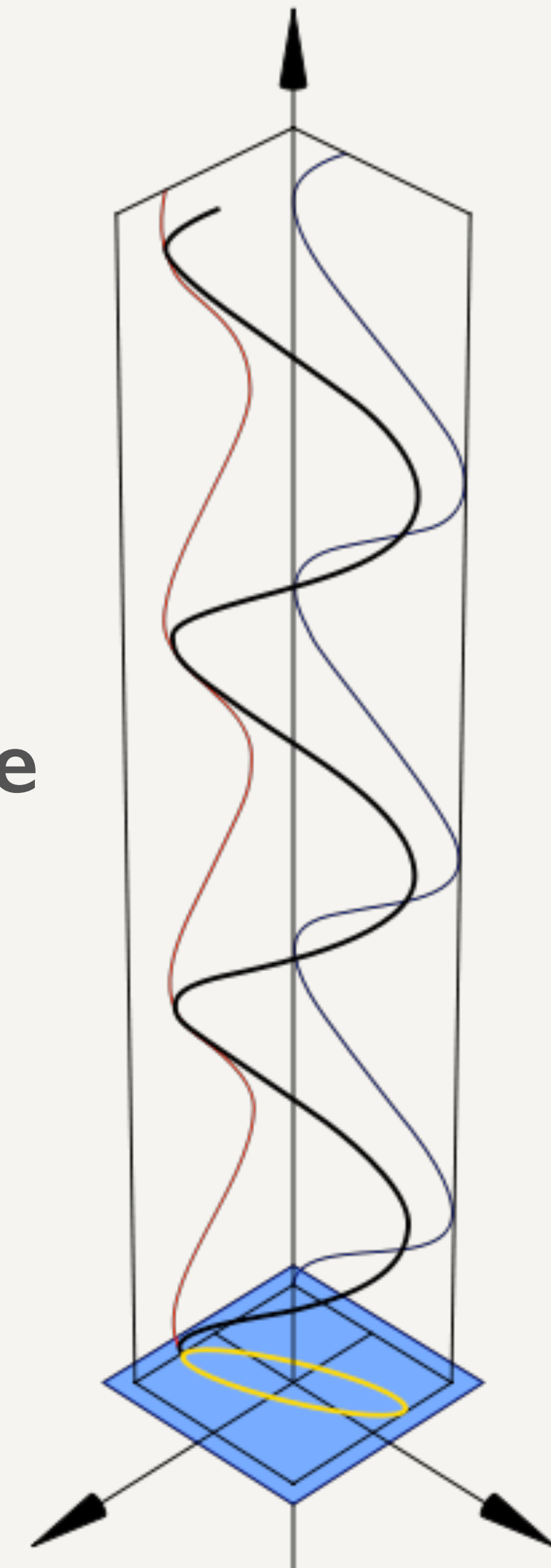
Polarisation

Elliptische Polarisation

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



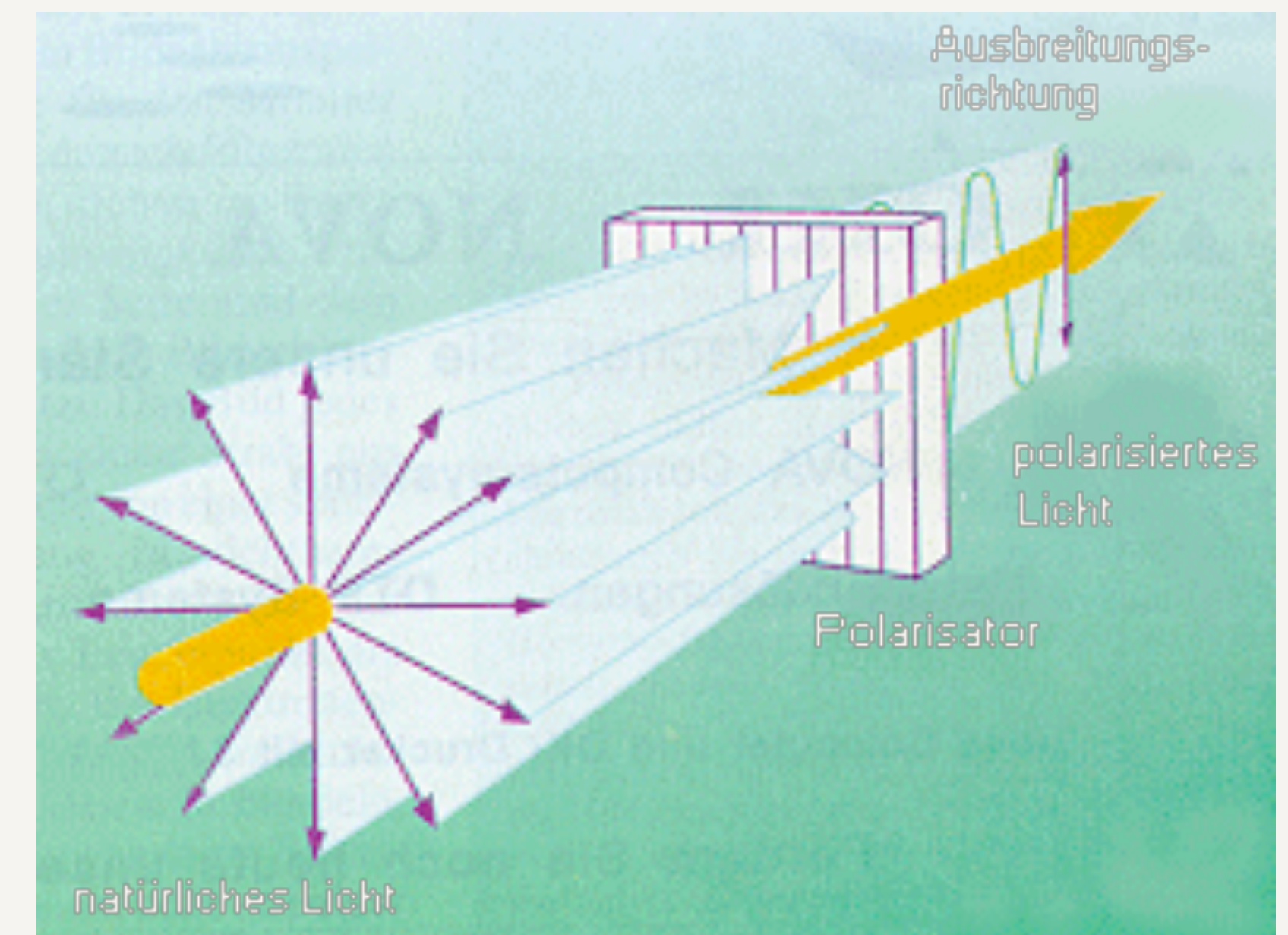
$$\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$$
$$E_x \neq E_y$$



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

Lichtentstehung und Spektrum

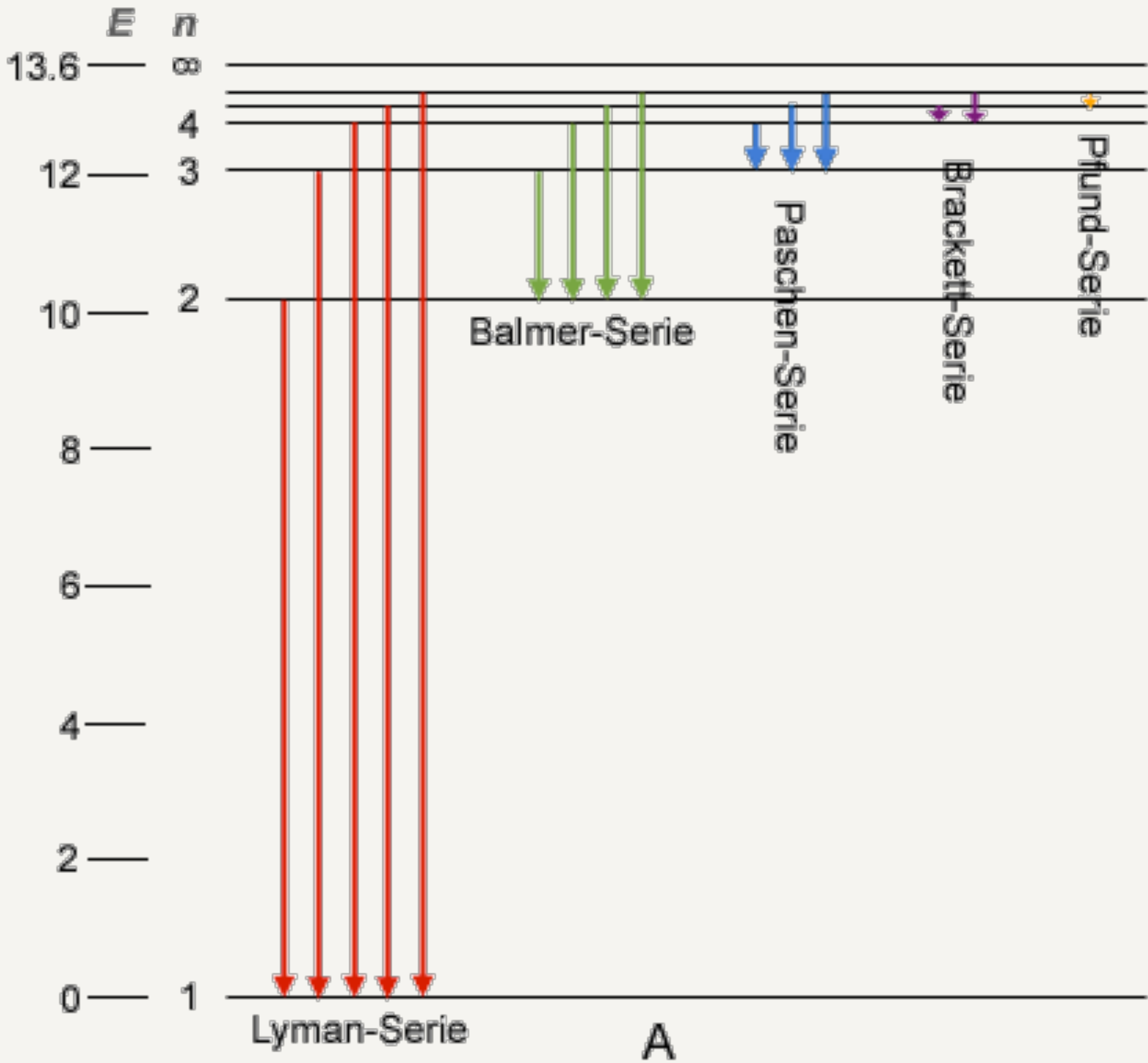
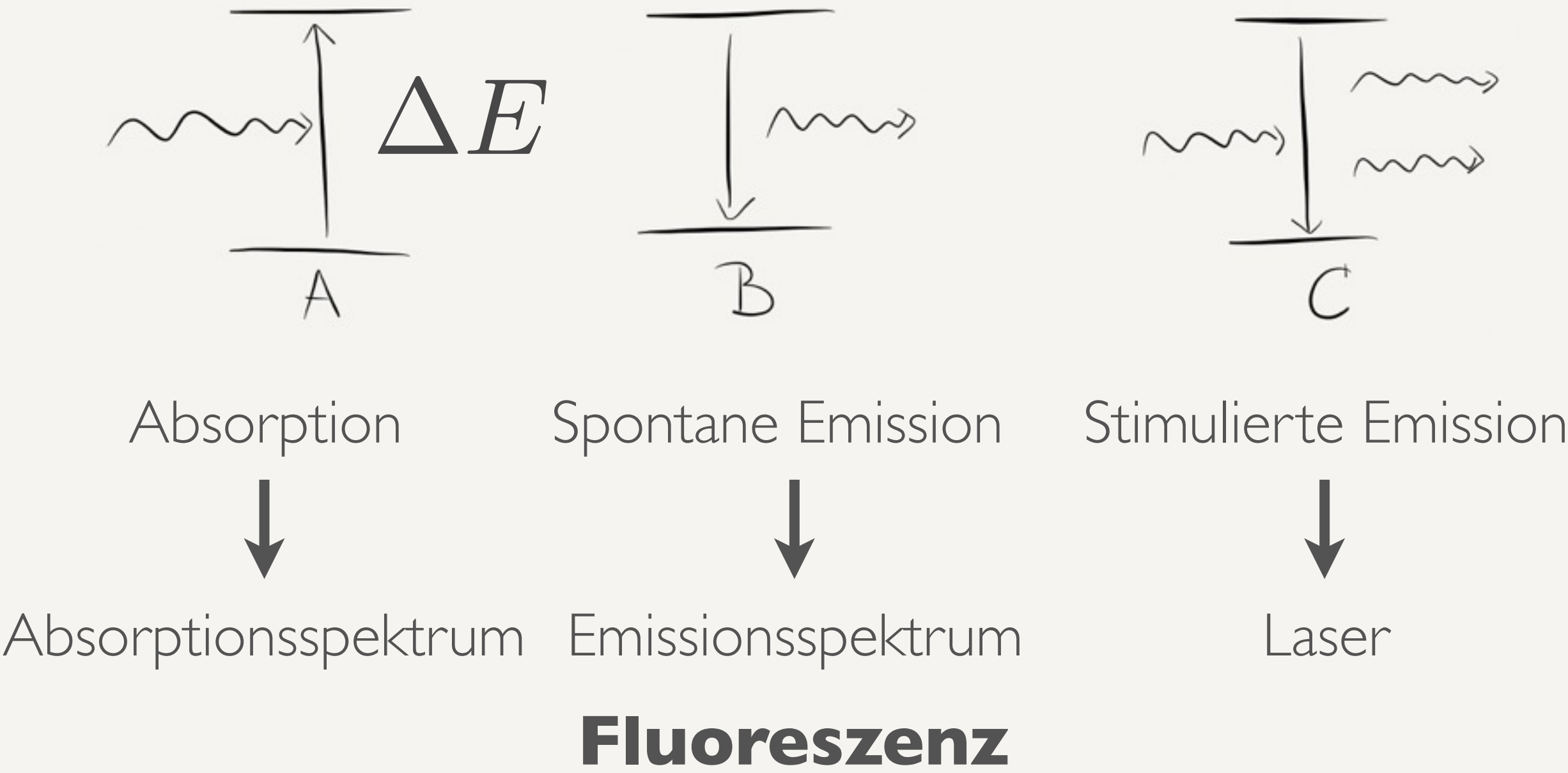
Lichtentstehung

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

Elektronische Übergänge

Fluoreszenz

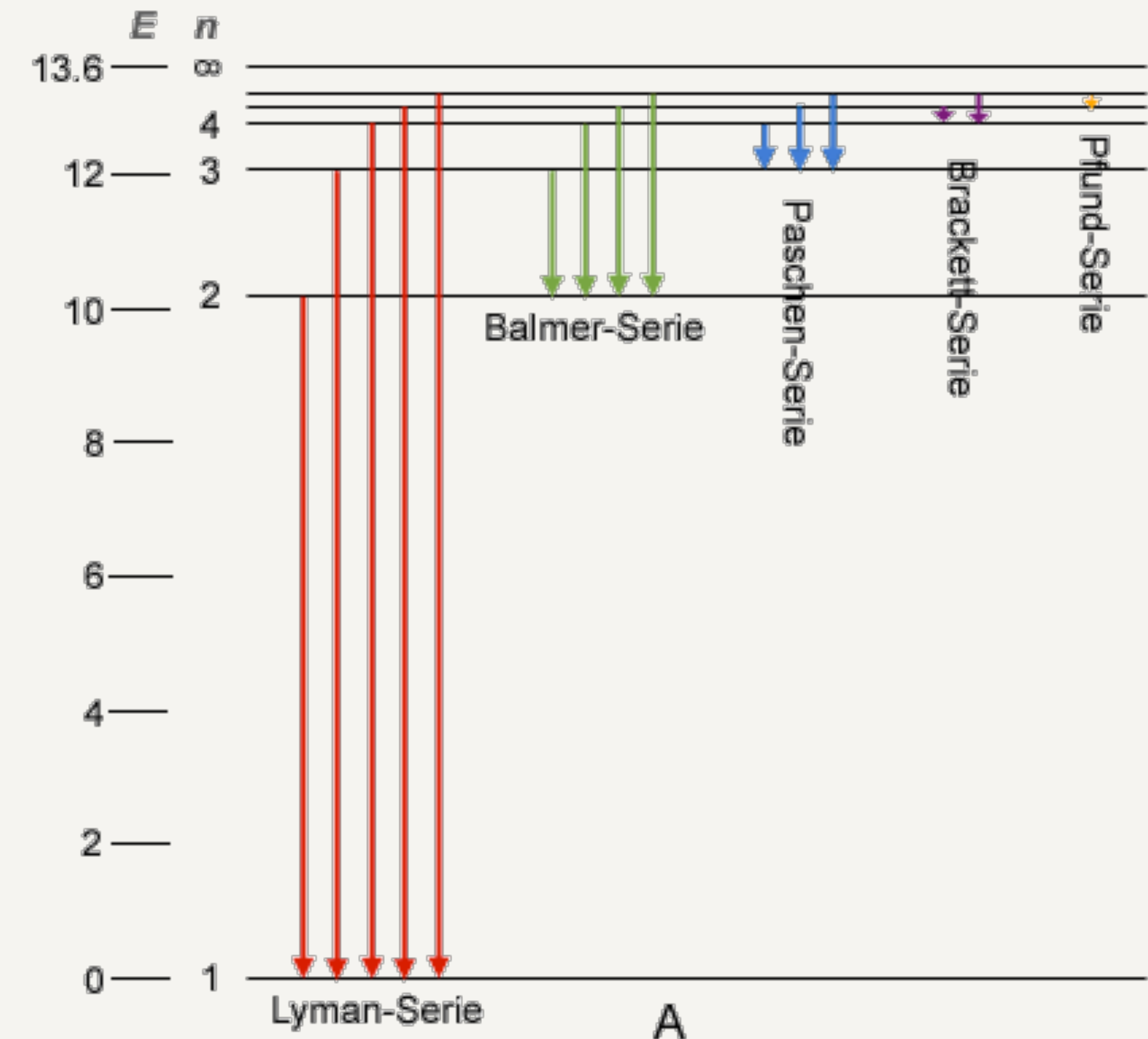
$$\Delta E = h\nu$$



Aufgabe Photonenenergie

$$\Delta E = h\nu$$

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



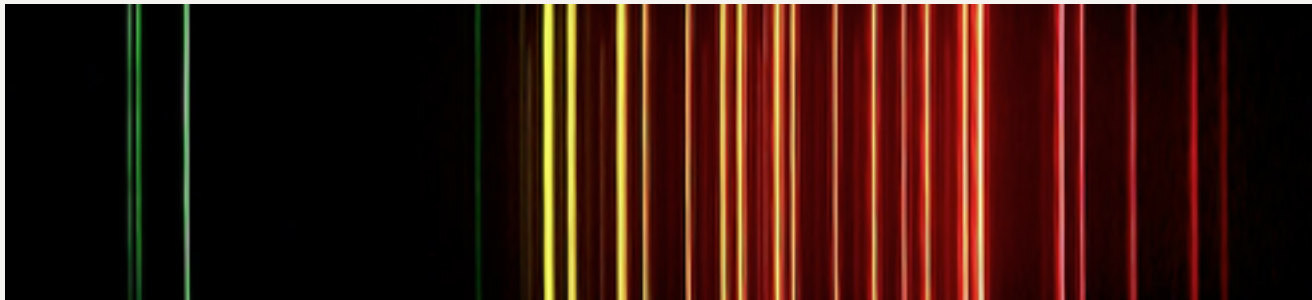
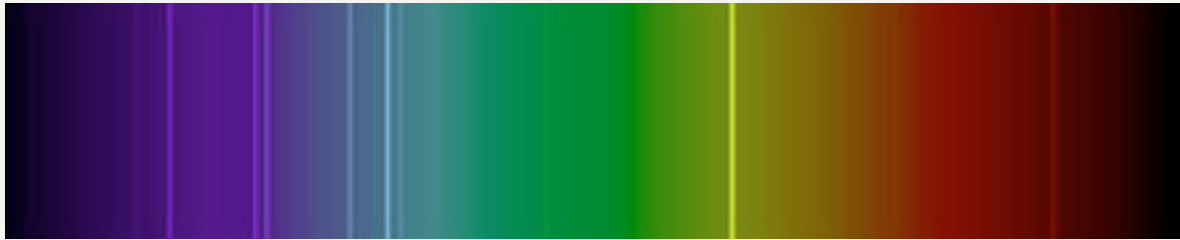
Spektrum

- 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)

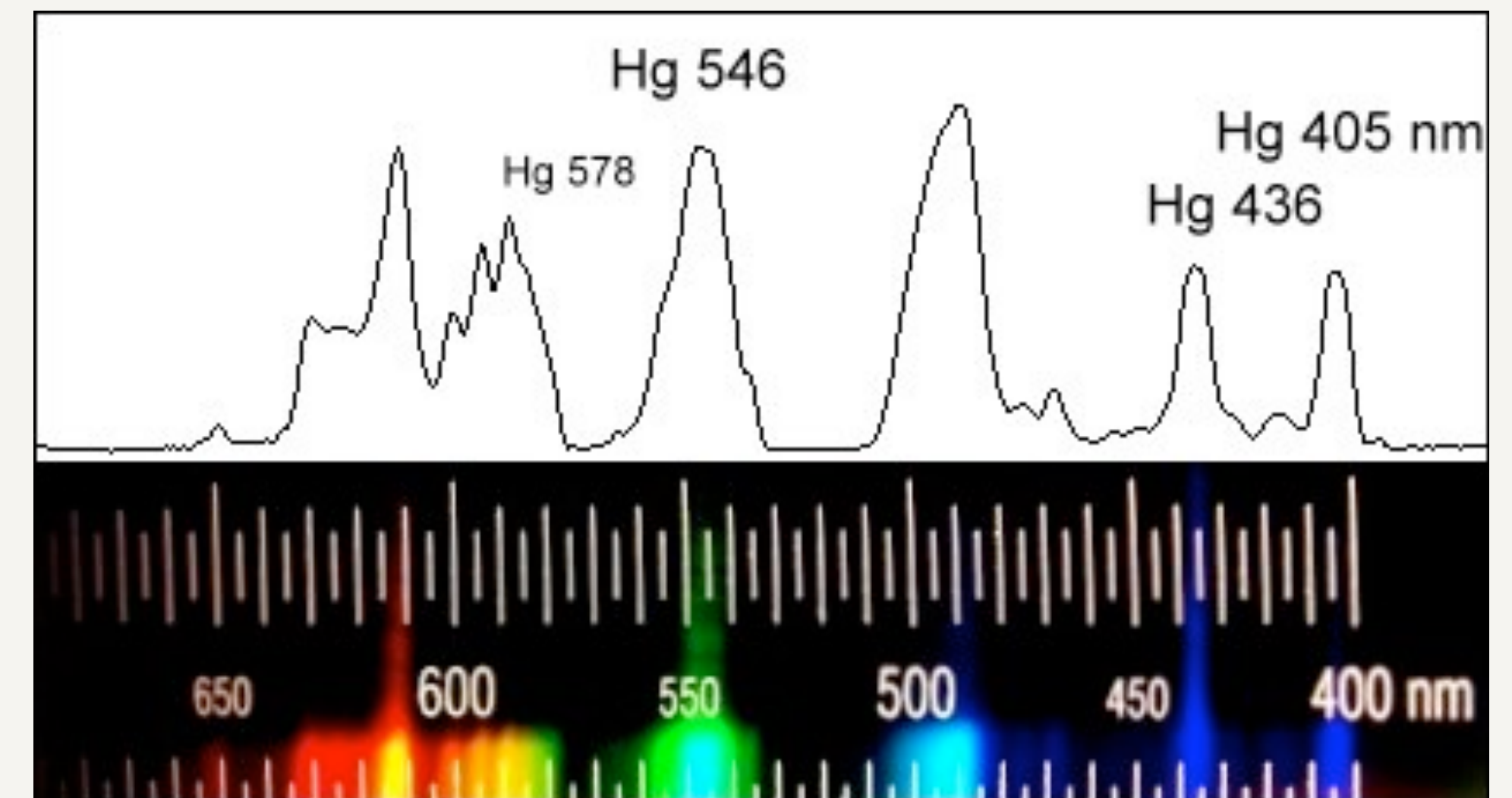


Leuchtröhren



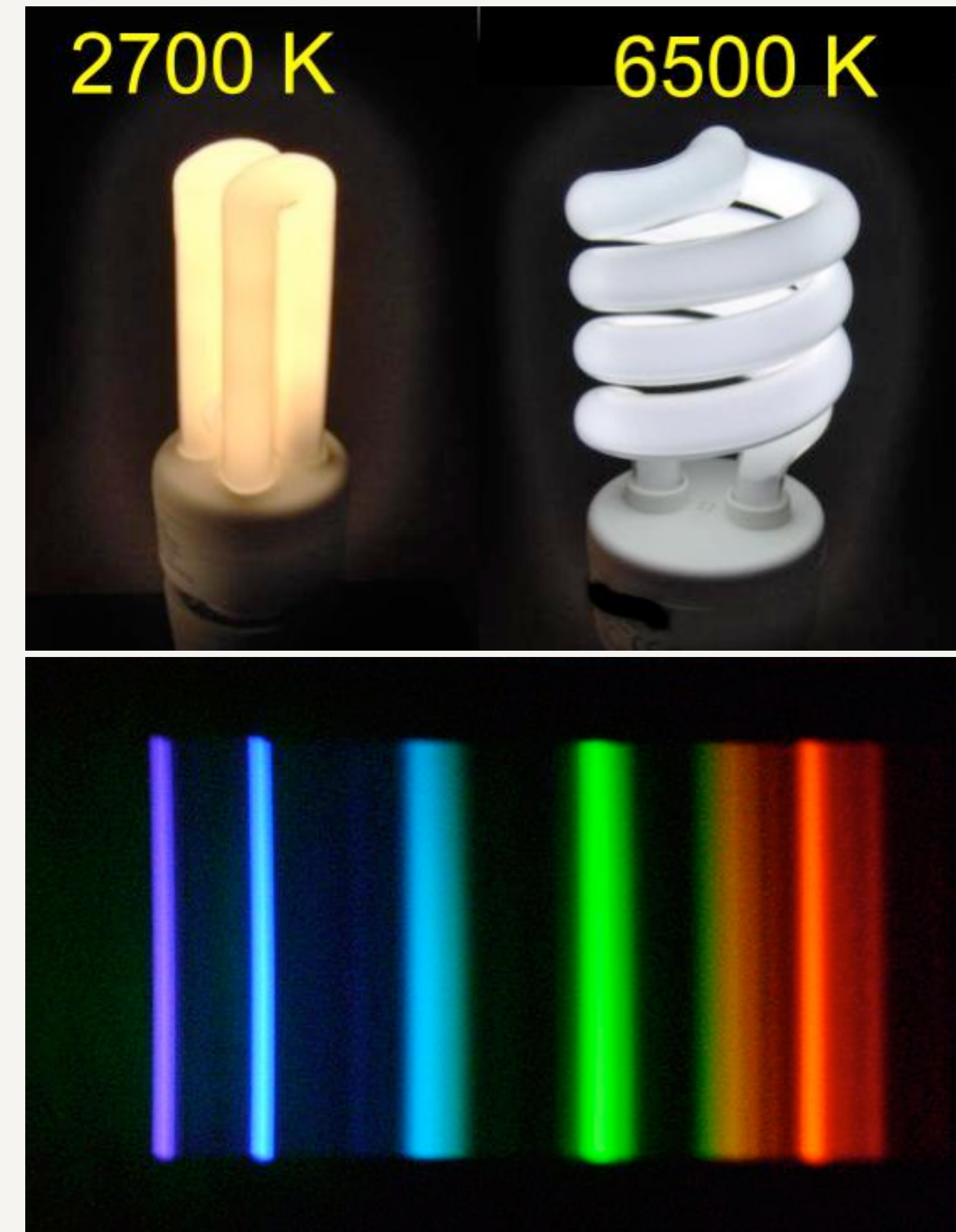
Leuchtstoffröhren

- 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



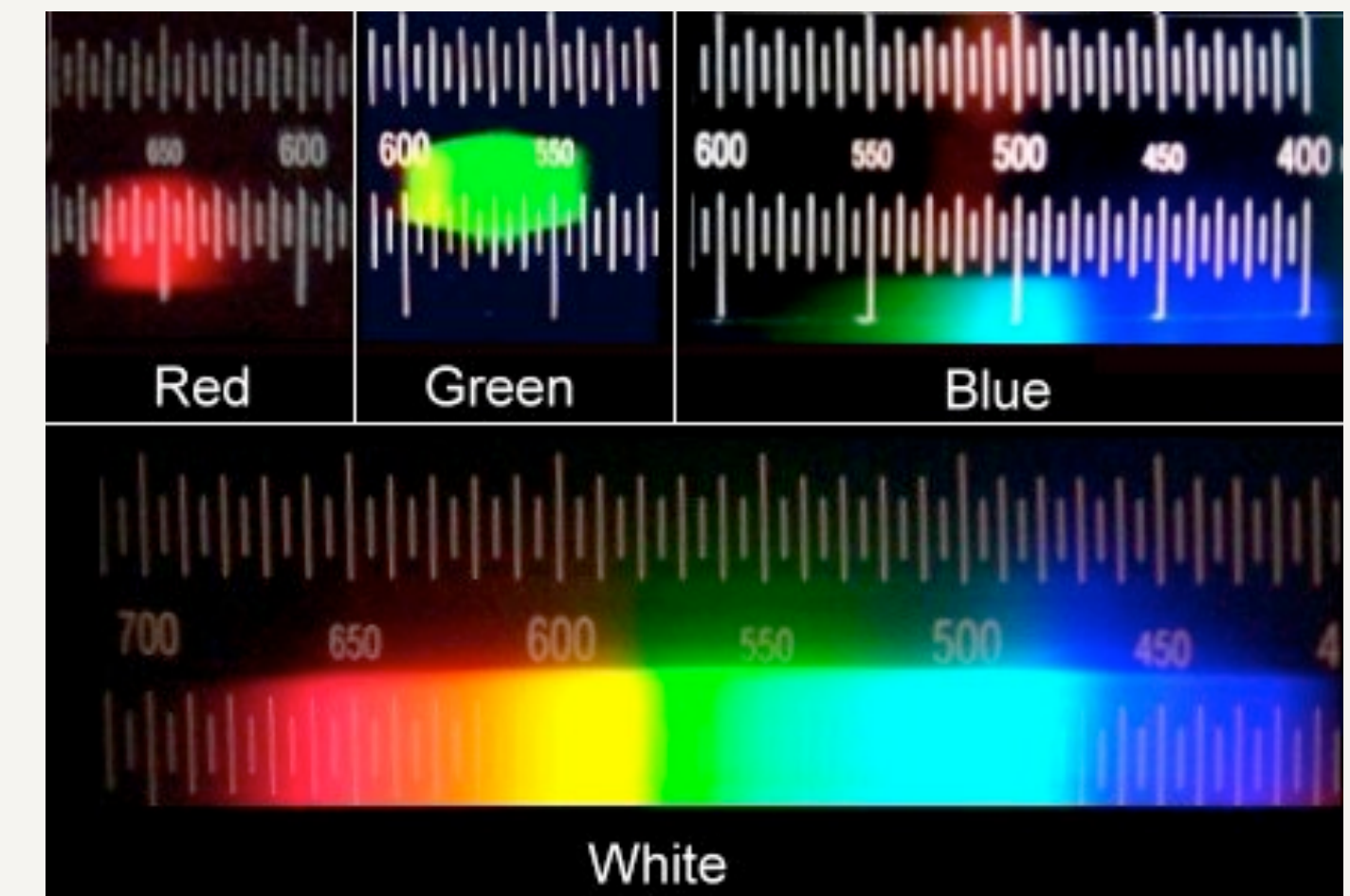
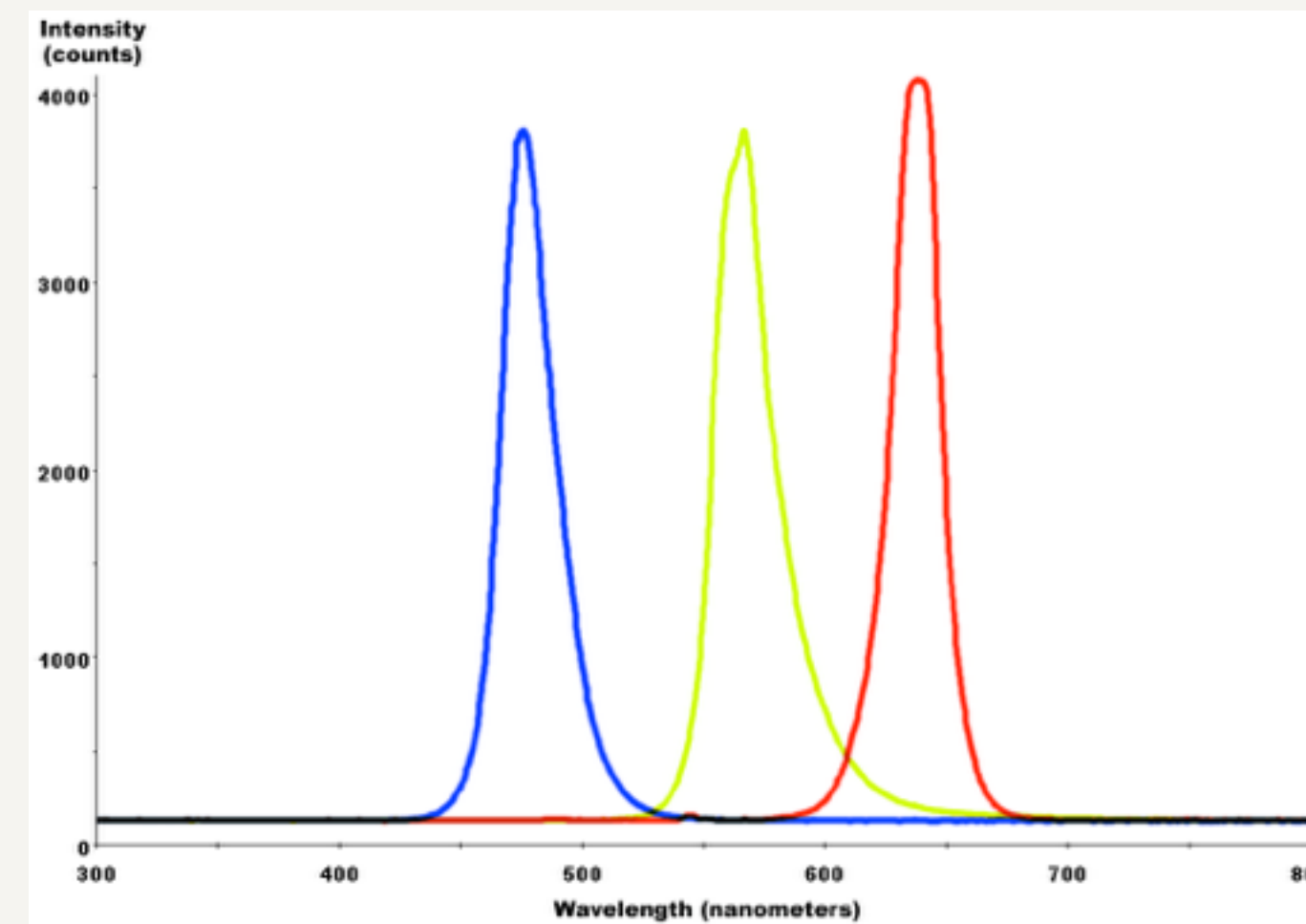
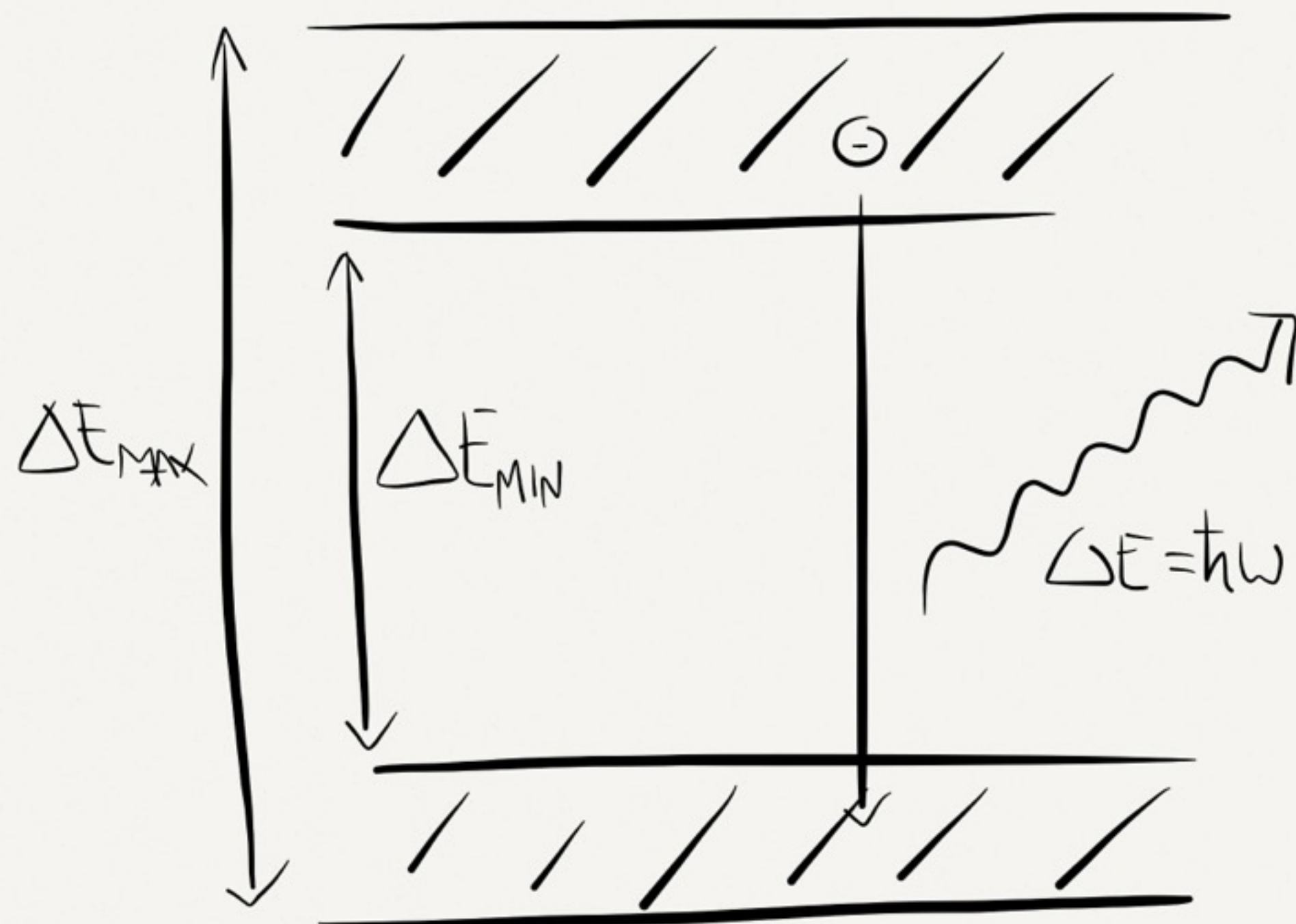
Energiesparlampen

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

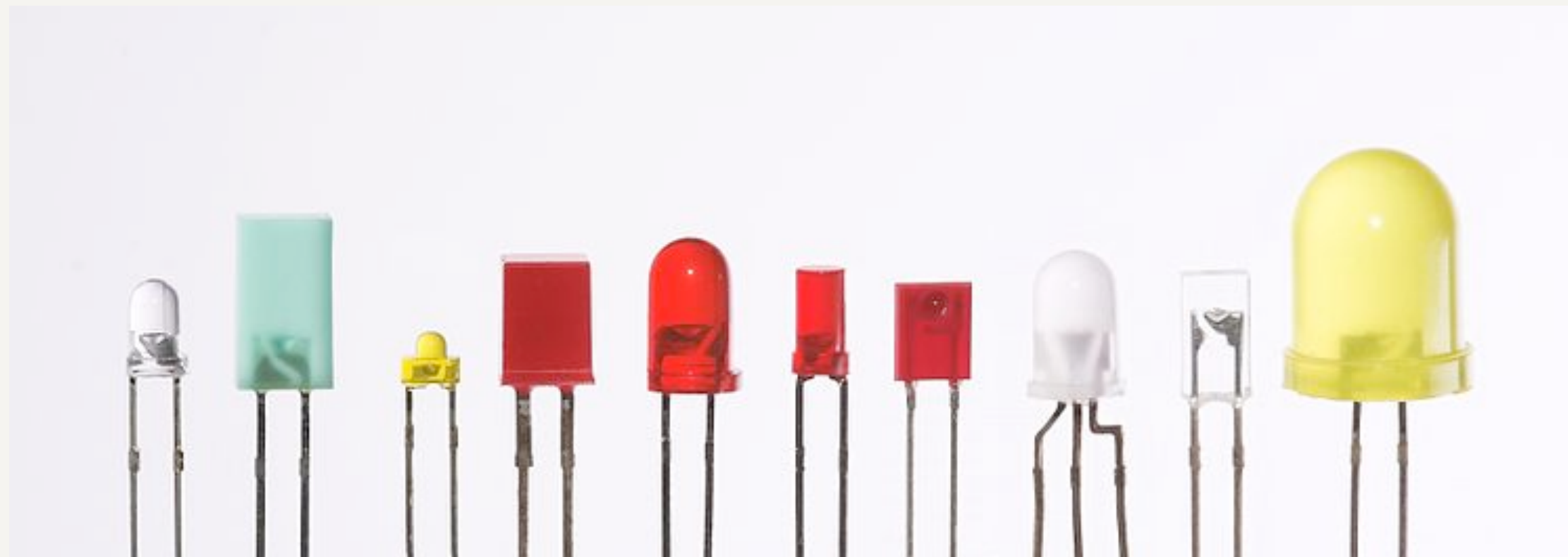


Elektronische Übergänge Halbleiter

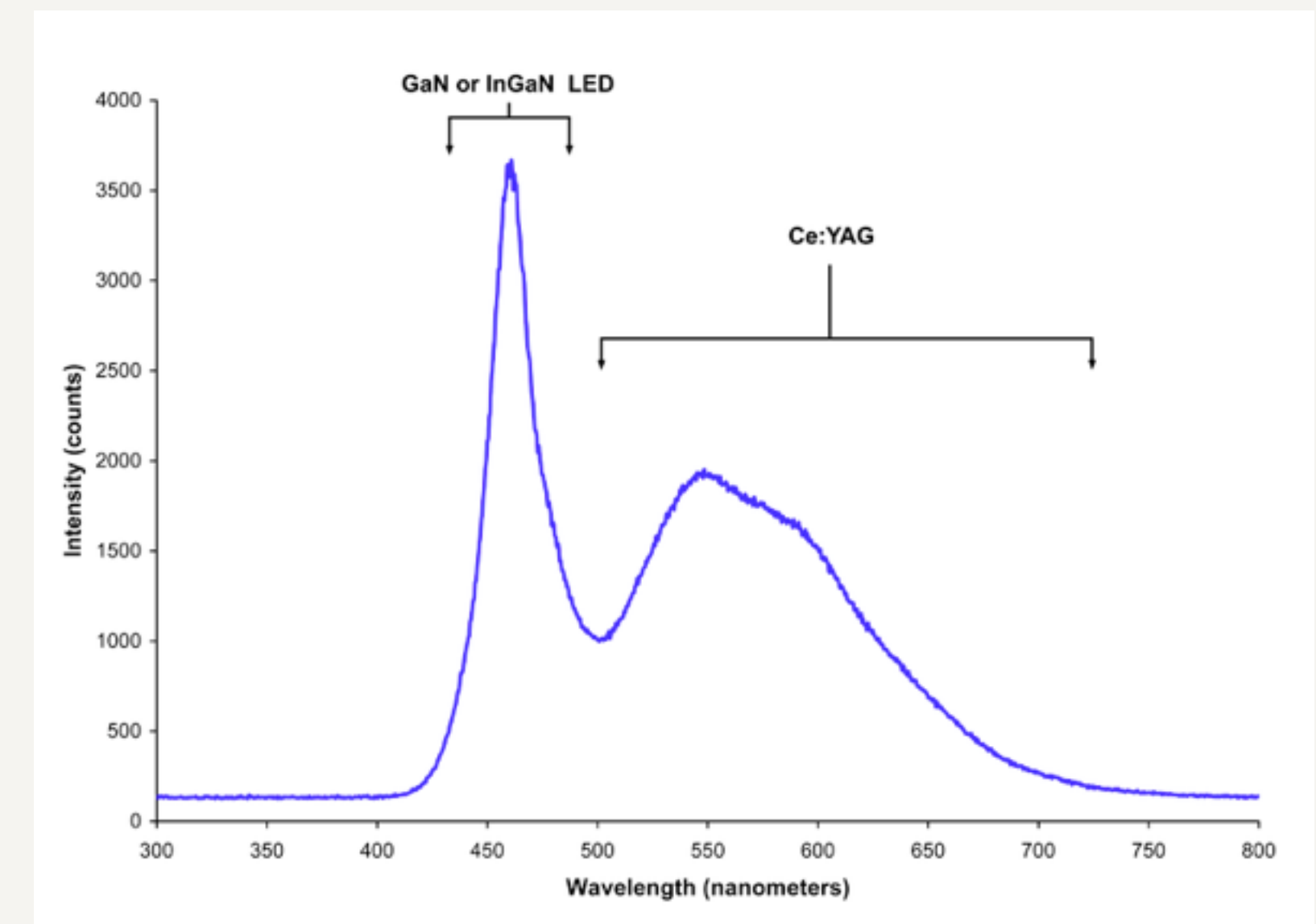
Bänder statt Niveaus $\longrightarrow$ Breite Spektren



LEDs



„Weiße“ LED



Blaue LED + gelber Phosphor

Wärmestrahlung

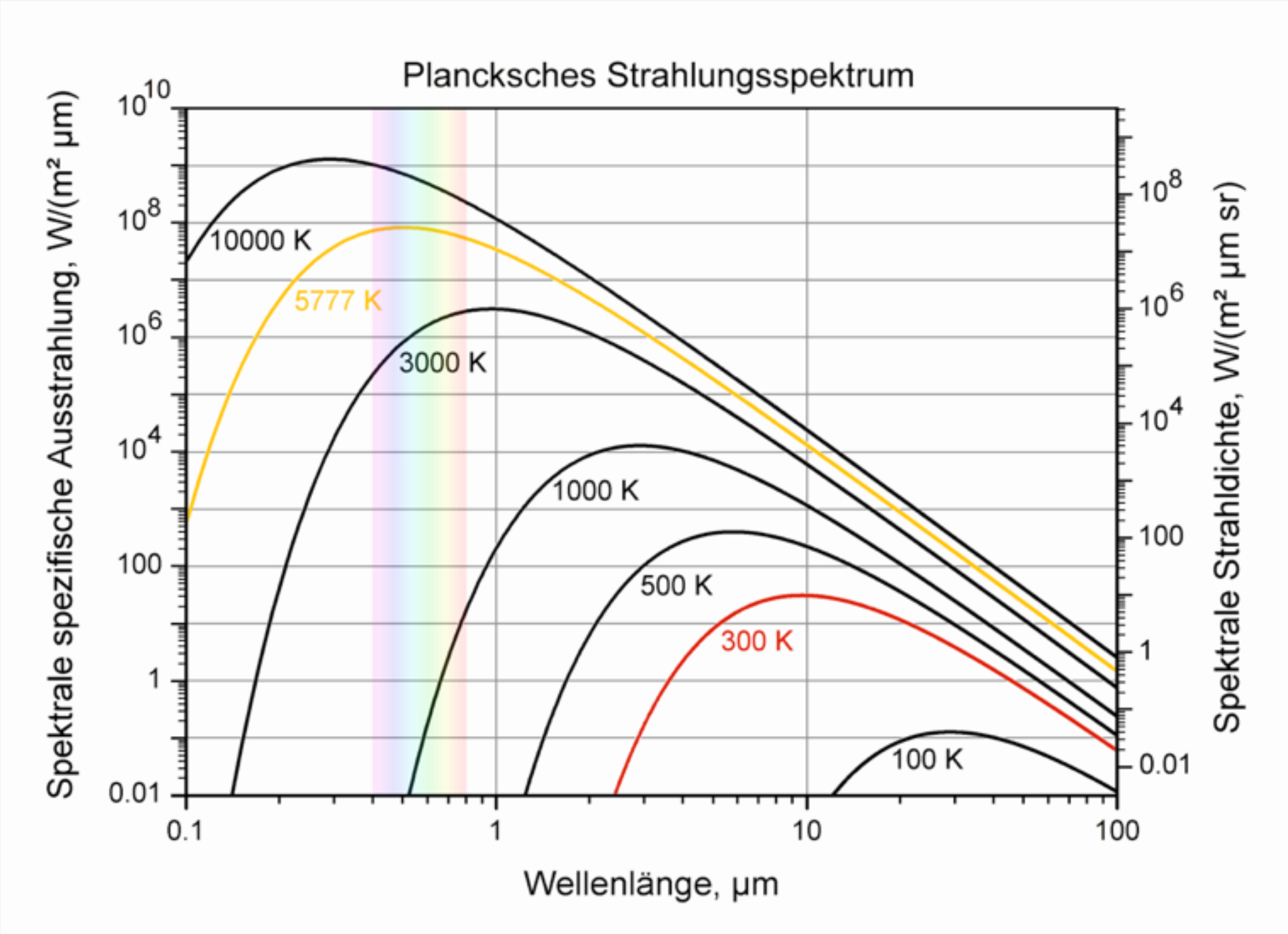
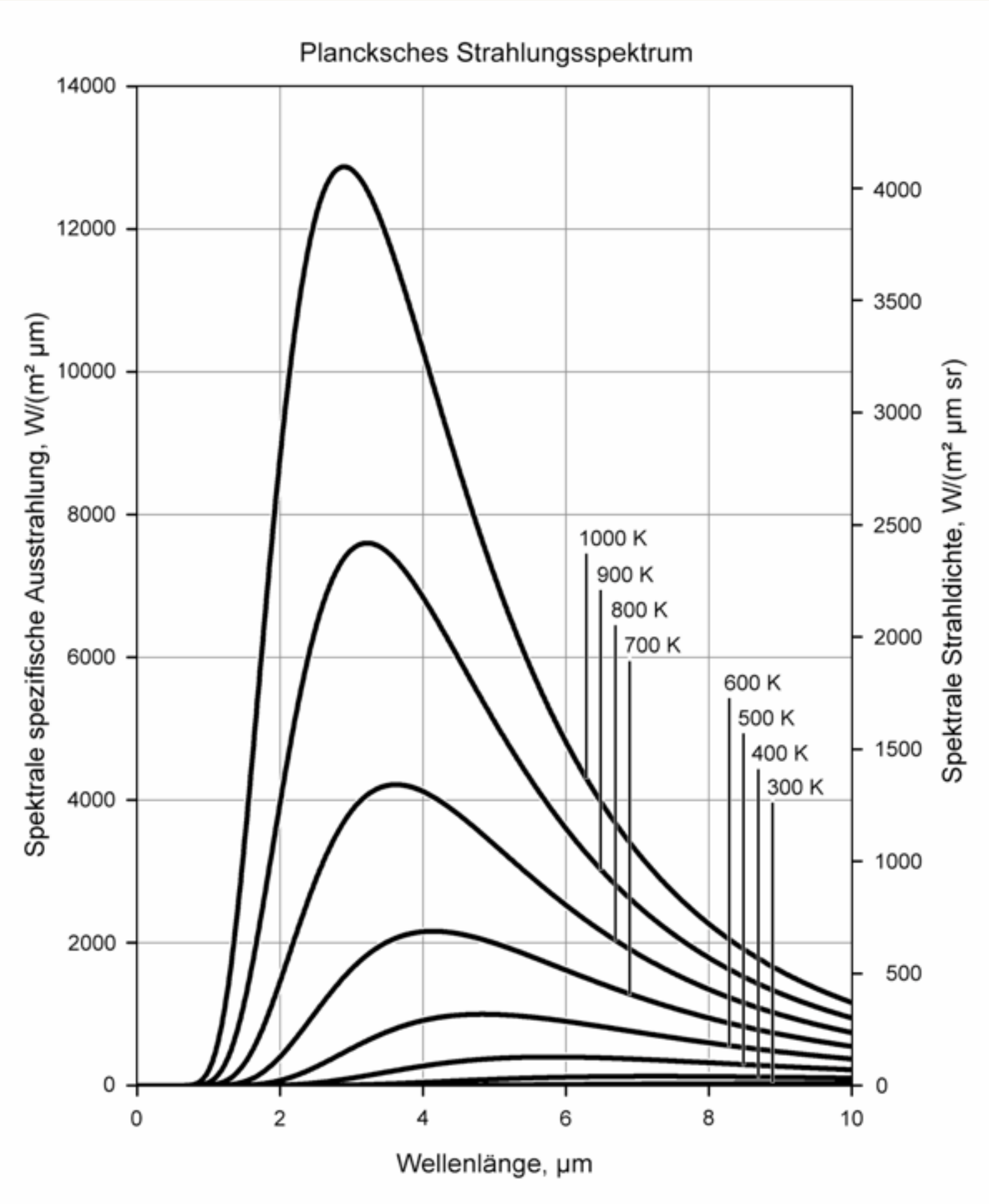
Planck'sche Strahlungsformel

- 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



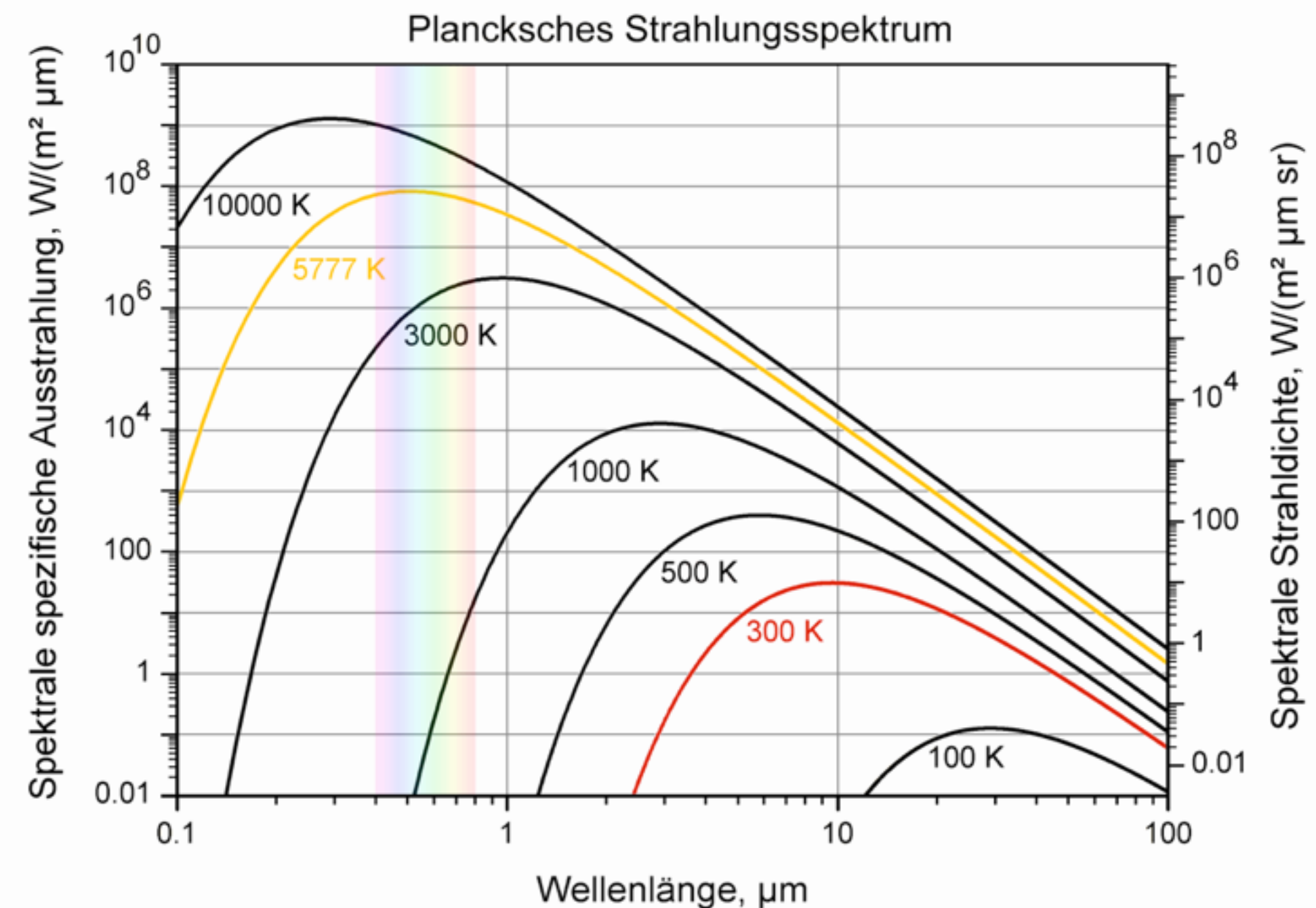
Wärmestrahlung

Strahlungsmaximum

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

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

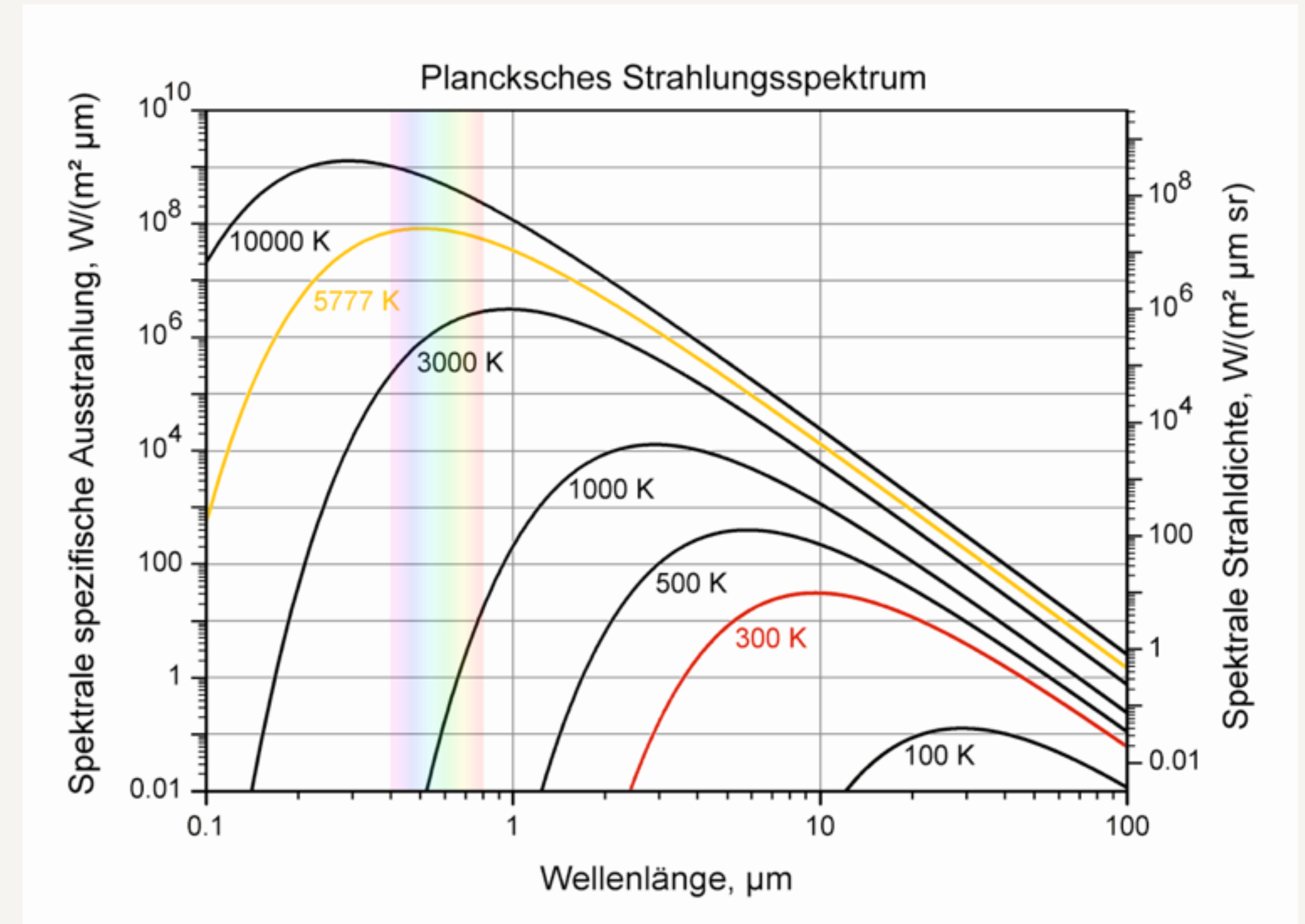
- Die Wellenlänge des Strahlungsmaximums verschiebt sich mit steigender Temperatur zu kürzeren Wellenlängen.



Aufgabe Wärmestrahlung

Strahlungsmaximum

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

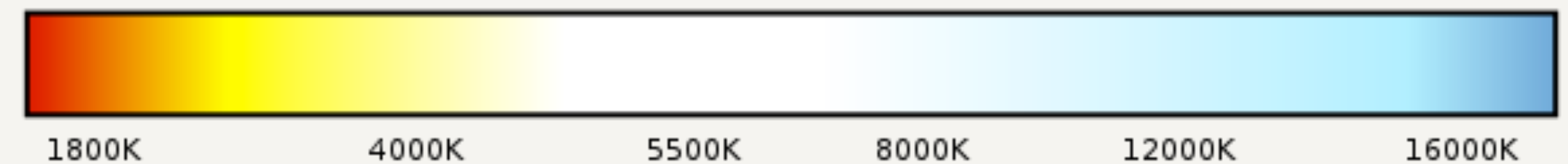


$$\lambda_{max} \cdot T = \text{konst.} = 2898 \mu m K$$

Wärmestrahlung

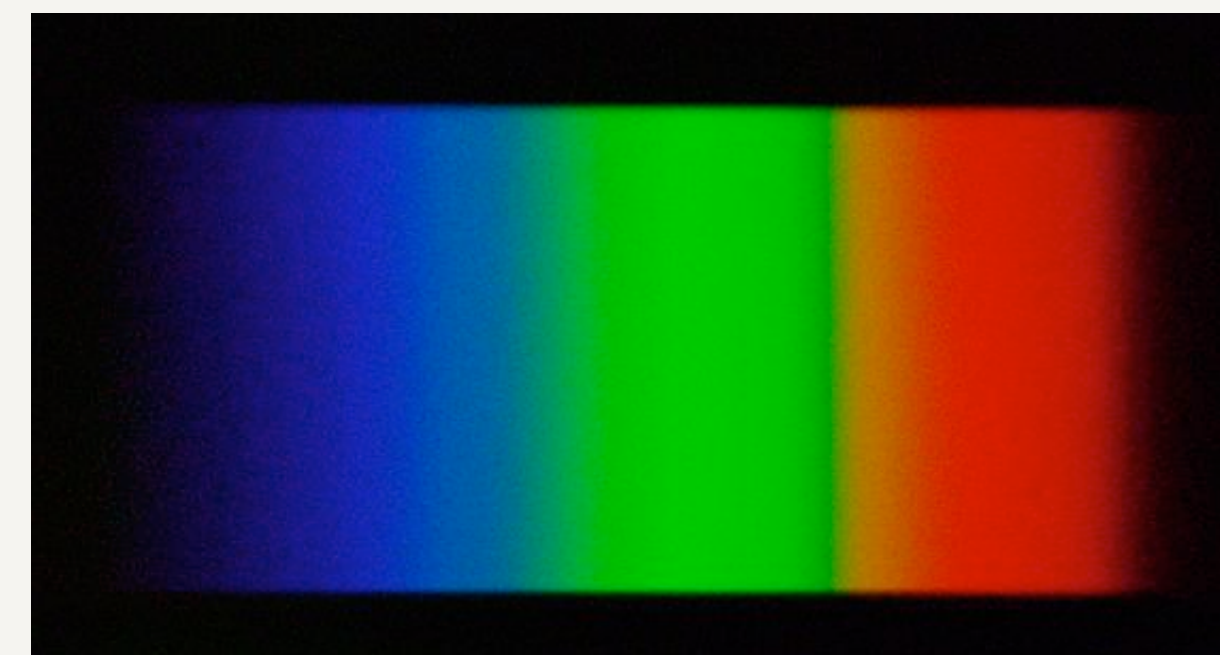
Farbtemperatur

- 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.

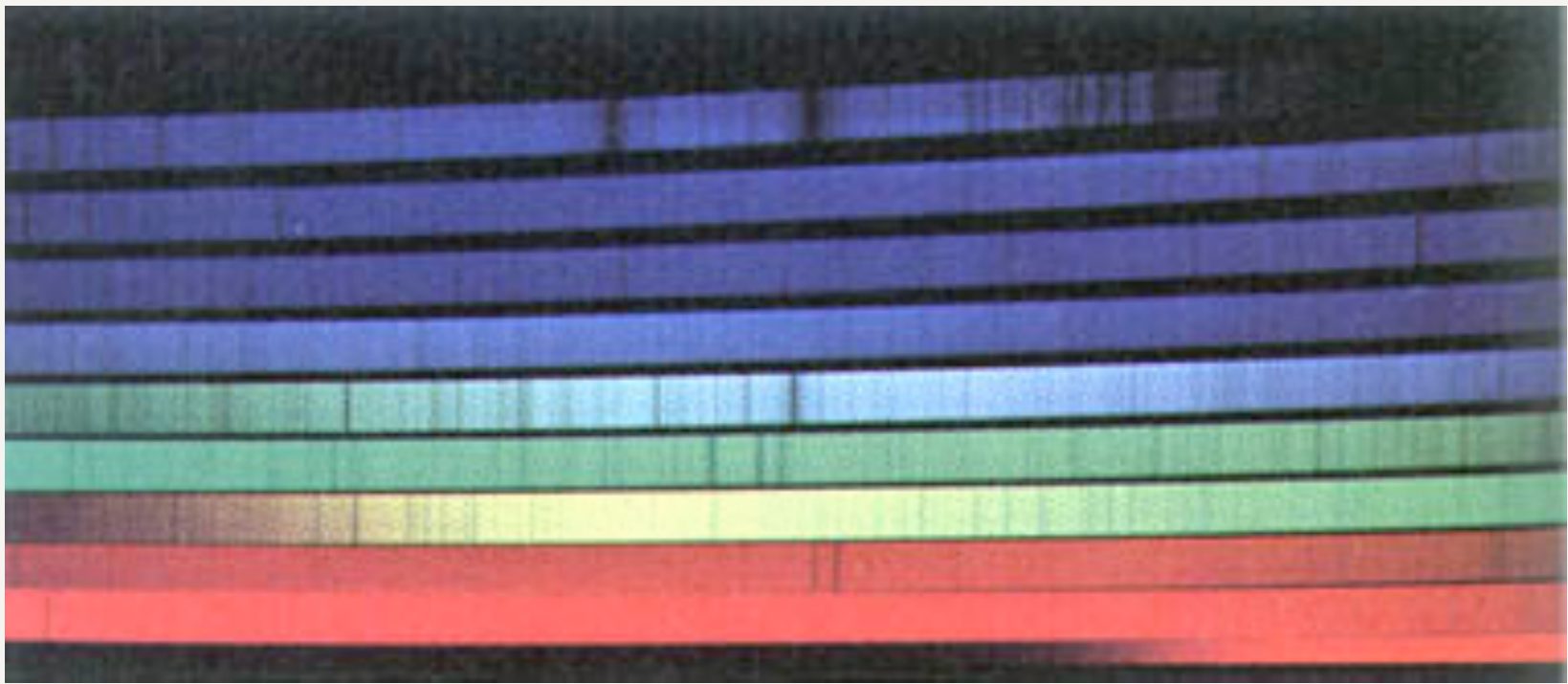
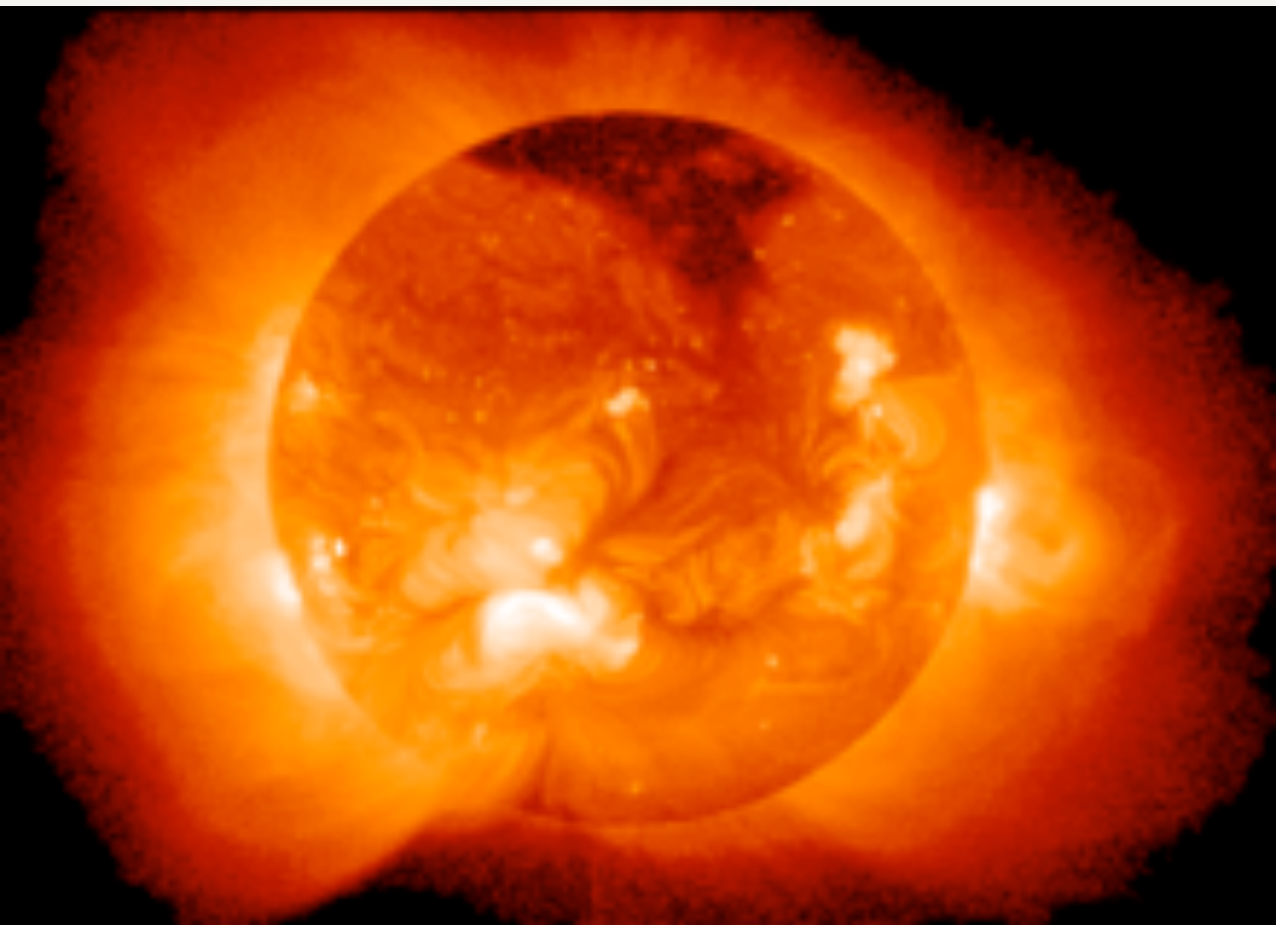
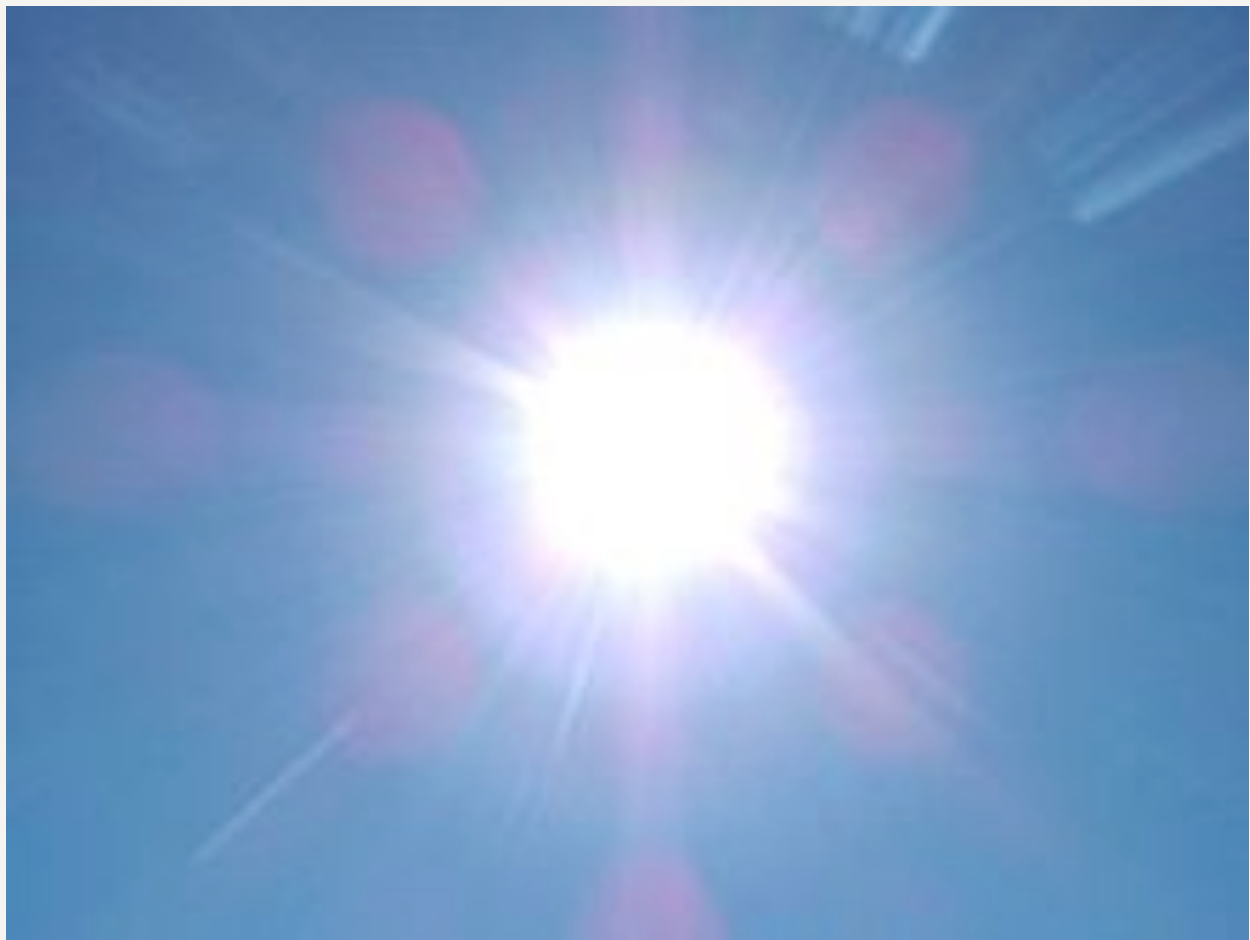


Glühbirne und Halogenstrahler

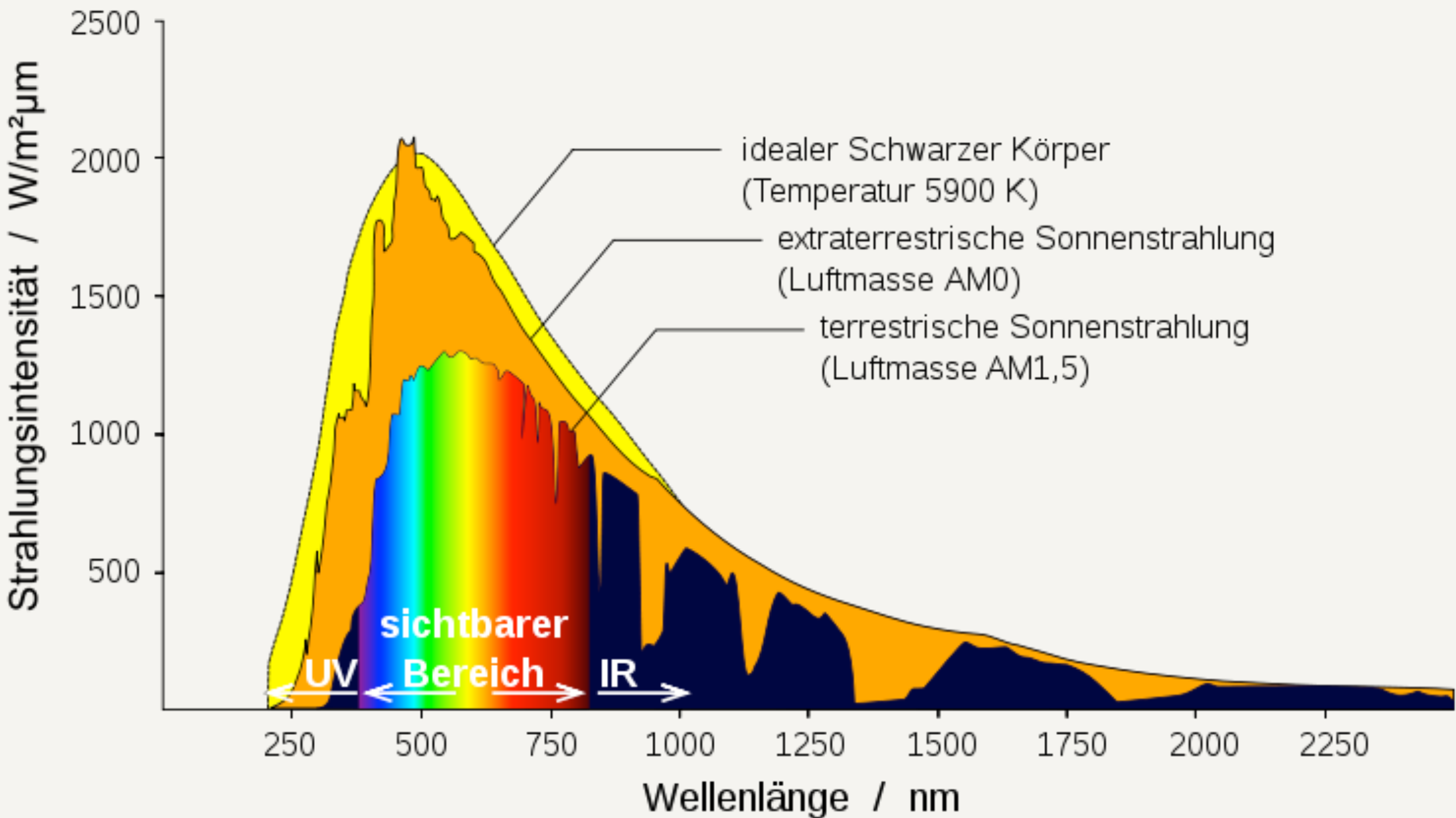
- Planck'scher Strahler: hohe Wärme erzeugt Licht im sichtbaren Bereich
- Spezialform Halogen-Strahler: höhere Temperatur durch spezielle Atmosphäre möglich



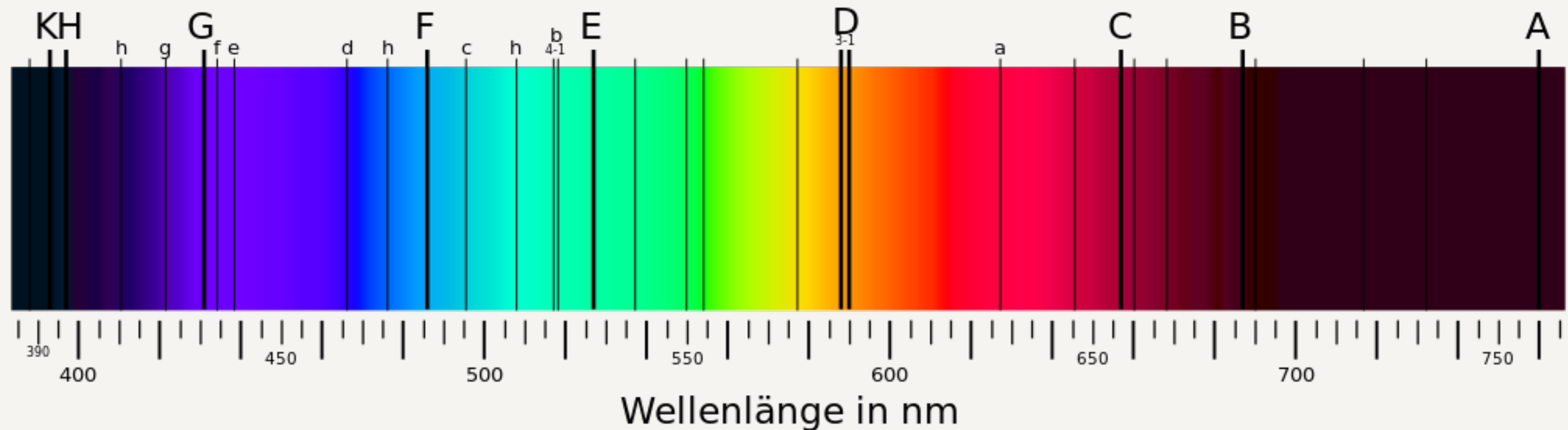
Sonne



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)