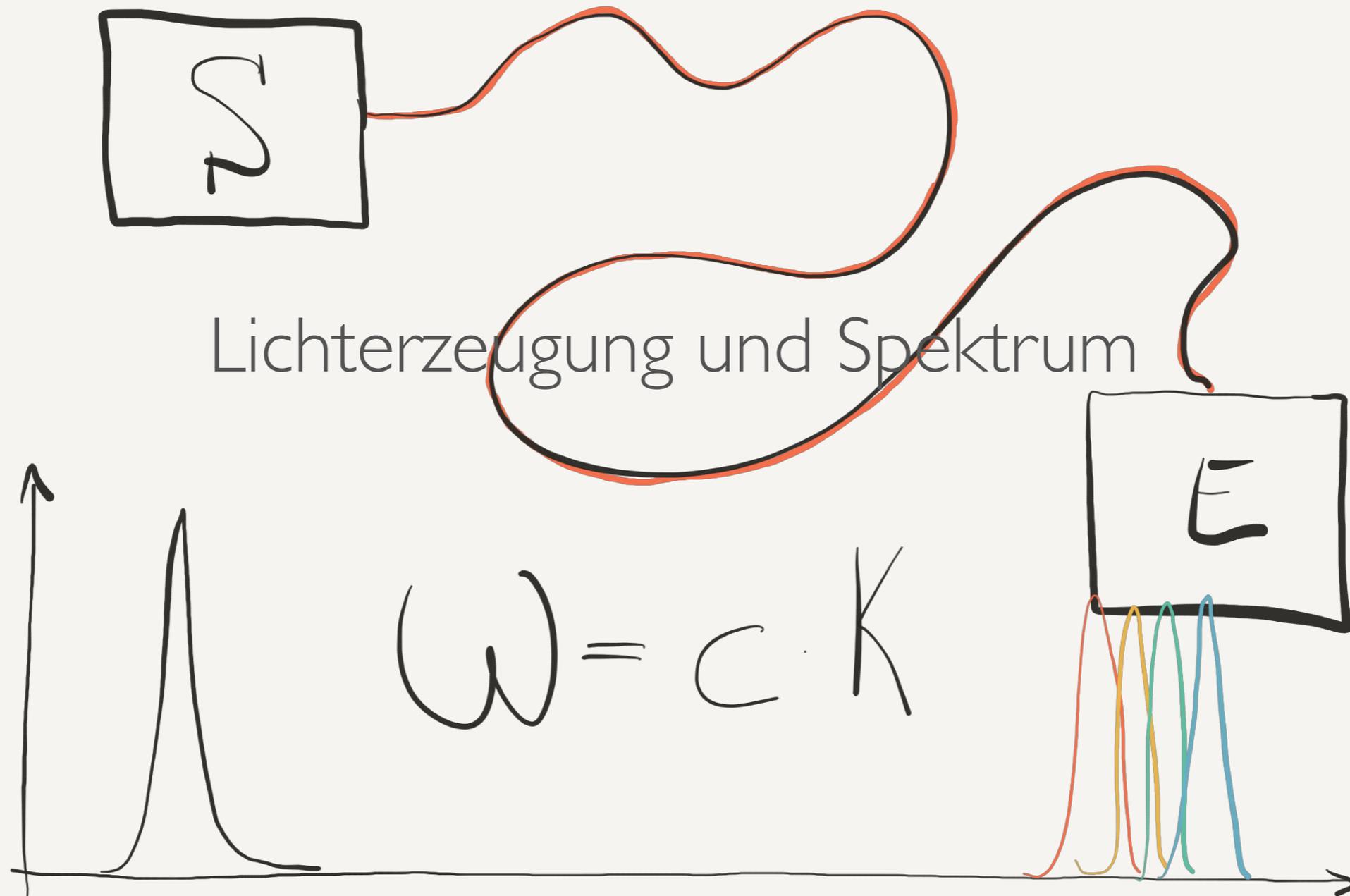


Optische Nachrichtentechnik

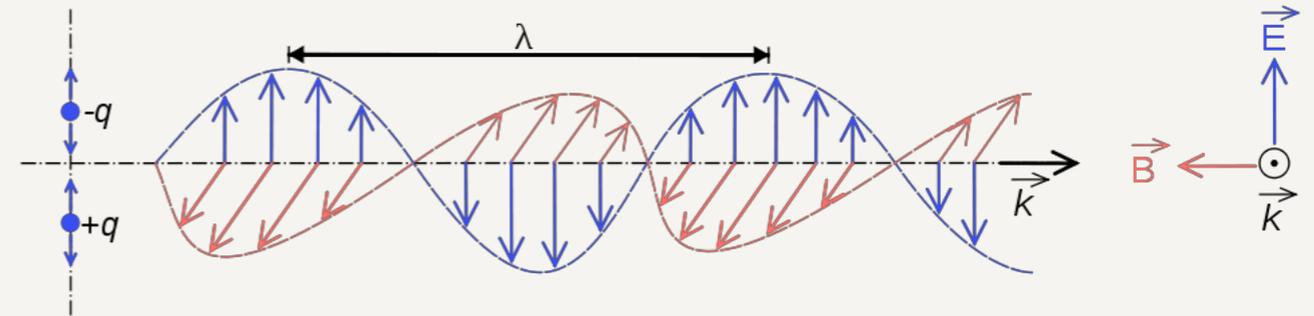


Was ist Licht?

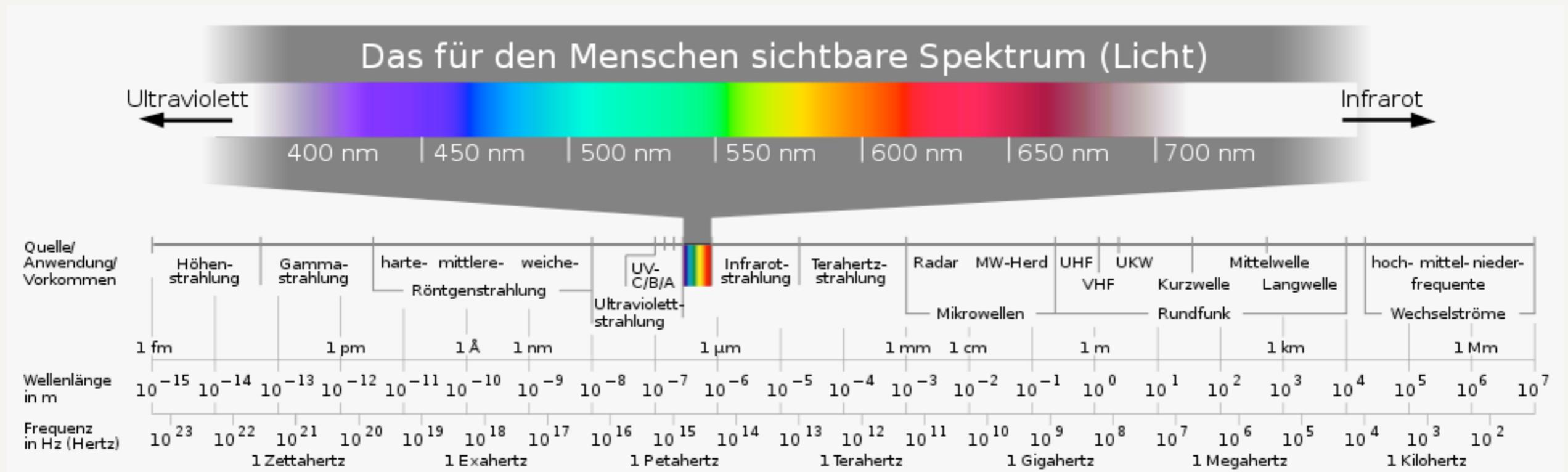
Was ist Licht?



- Elektromagnetische Welle
- Transversalwelle
- Polarisation

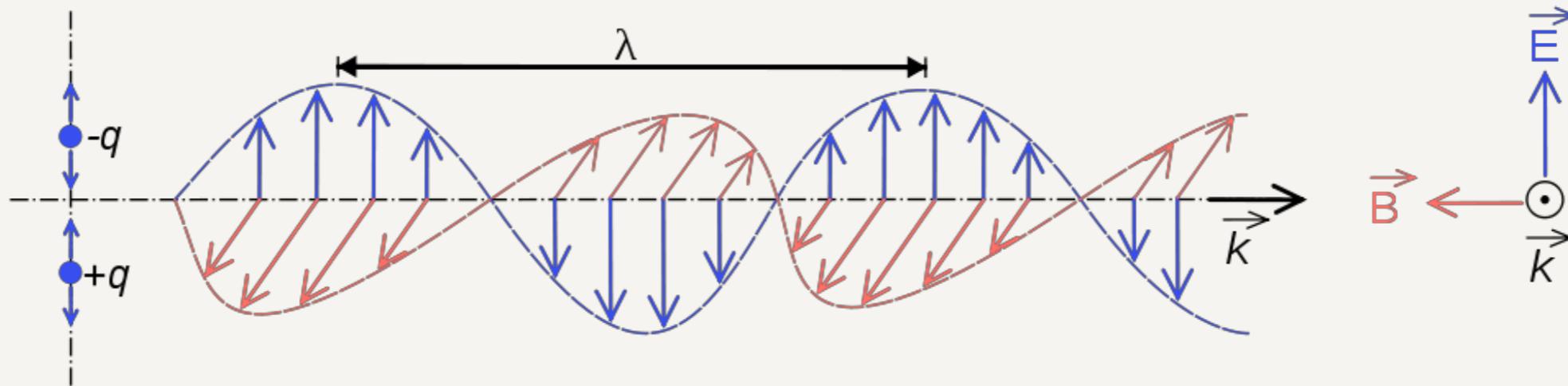


$$\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{E}_0 e^{-i\mathbf{k}\mathbf{x}} \cdot e^{i\omega t}$$



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

Daraus wird später unser Lichtstrahl!

- 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.

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


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

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

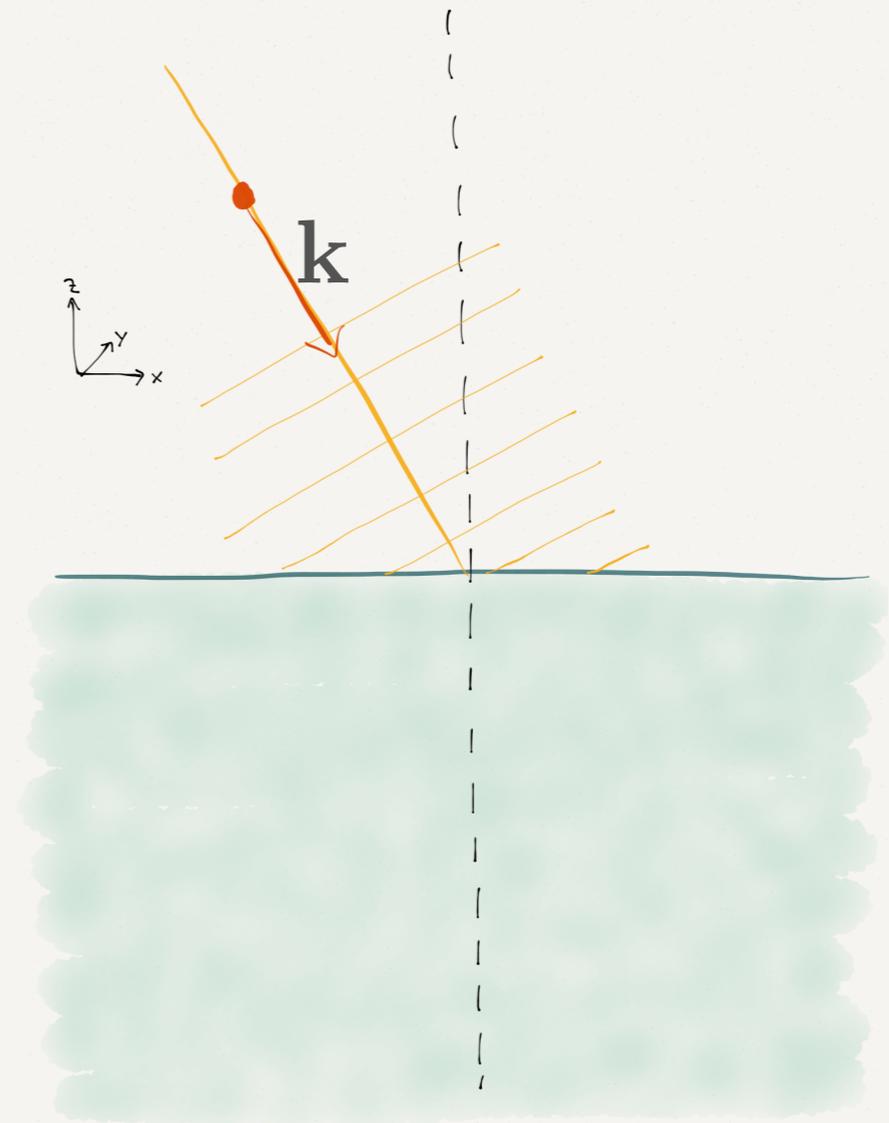
$$c = \lambda \cdot \nu$$

Aufgabe Ebene Welle

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

Hessesche Normalform!

$$kx - d = 0$$



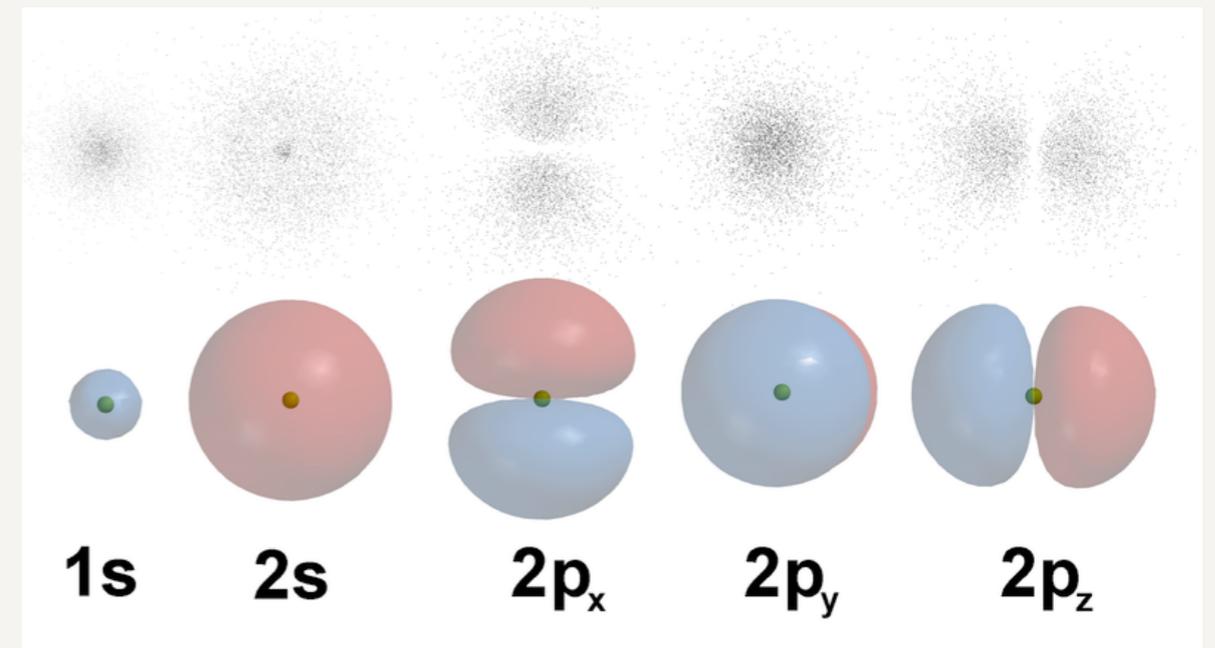
Überblick für Heute: Lichtentstehung und Spektrum

- Ein Atom
- Zwei Atome
- Viele Atome
 - Halbleiter
 - Wärmestrahlung
- Spektren diverser Lichtquellen

Ein Atom

Ein Atom Orbitale

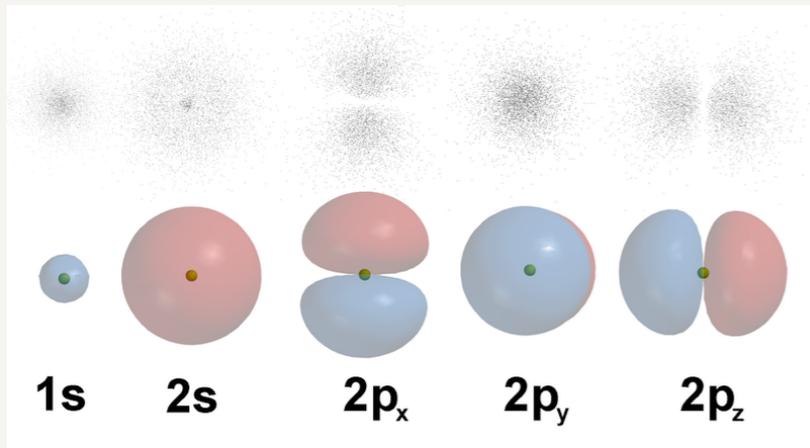
- Elektronen werden durch die Coulombkraft vom Atomkern angezogen.
- Die Aufenthaltsorte von Elektronen in einem Atom werden durch ‚Orbitale‘ beschrieben.
- Die Orbitale beschreiben die Wahrscheinlichkeit, bei einer Messung das Elektron an diesem Ort vorzufinden (präziser: das Quadrat des Orbitalwertes ist die Wahrscheinlichkeit).
- Geordnet nach Quantenzahlen (Haupt-QZ, Drehimpuls, magnetische QZ, Spin)



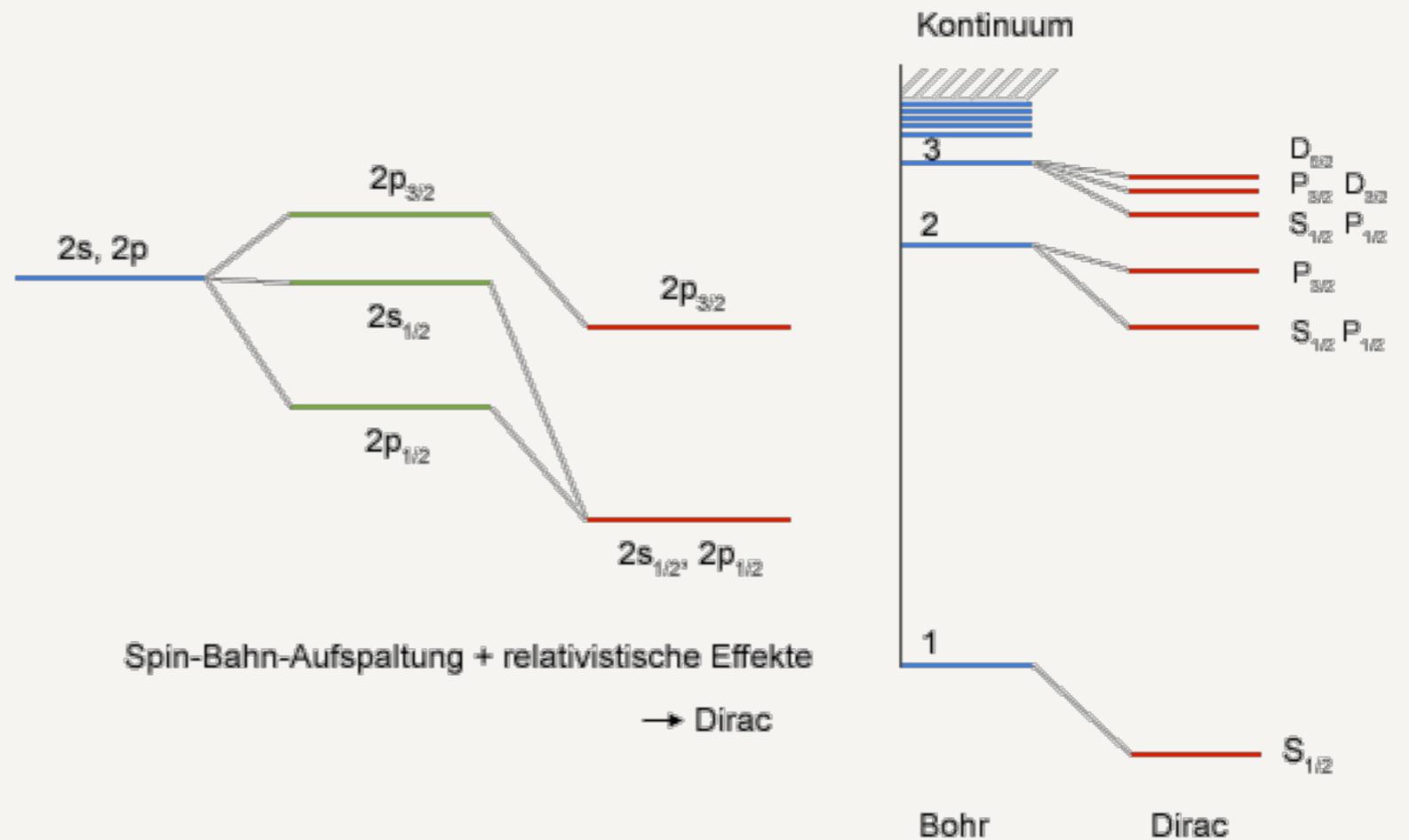
Quelle: Wikipedia



Ein Atom Termschema



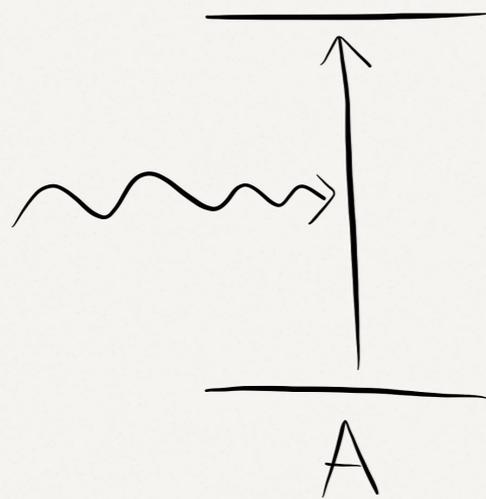
Quelle: Wikipedia



Quelle: Chemgapedia

Ein Atom

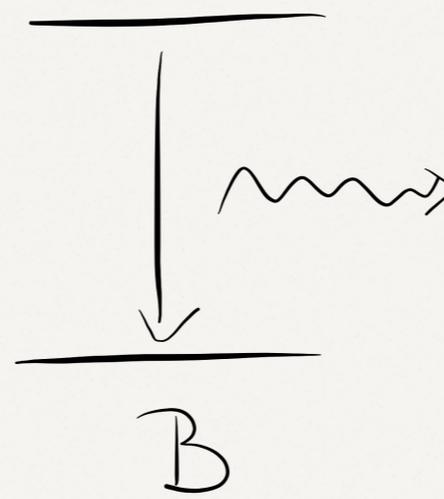
Wechselwirkung mit Licht



Absorption



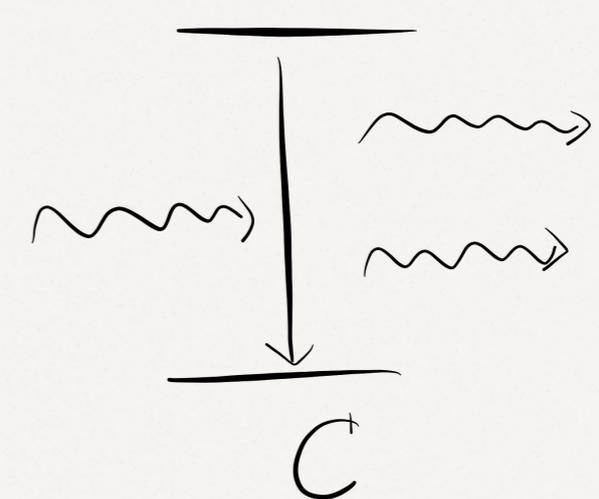
Absorptionsspektrum



Spontane Emission



Emissionsspektrum



Stimulierte Emission



Laser

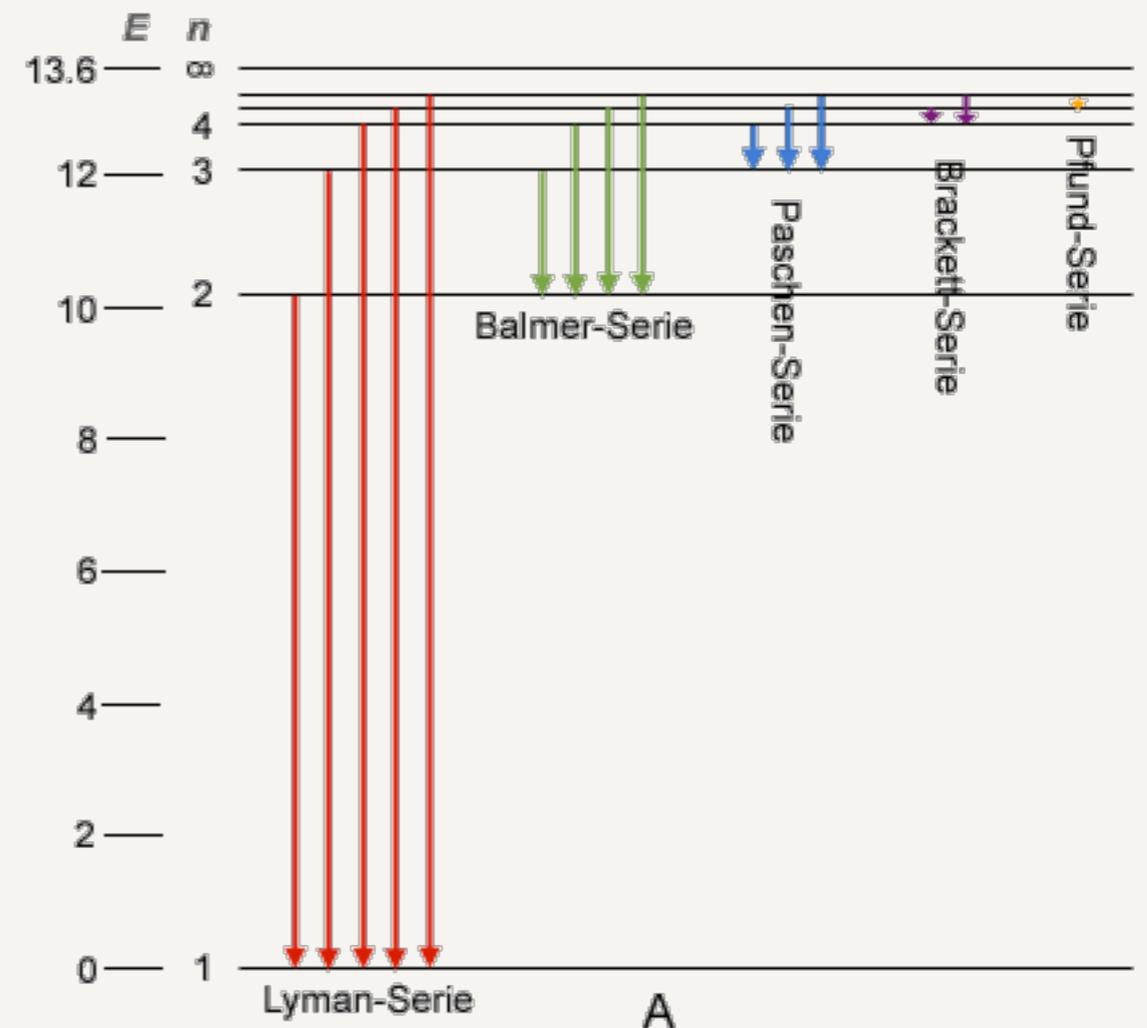
Fluoreszenz

Ein Atom Quantensprünge

Quelle: [Chemgapedia](#)

- Durch Absorption oder Emission von einem Photon wechselt das Atom von einem Energiezustand in einen anderen.
- Das Photon hat dabei die Energie:

$$\Delta E = h\nu$$



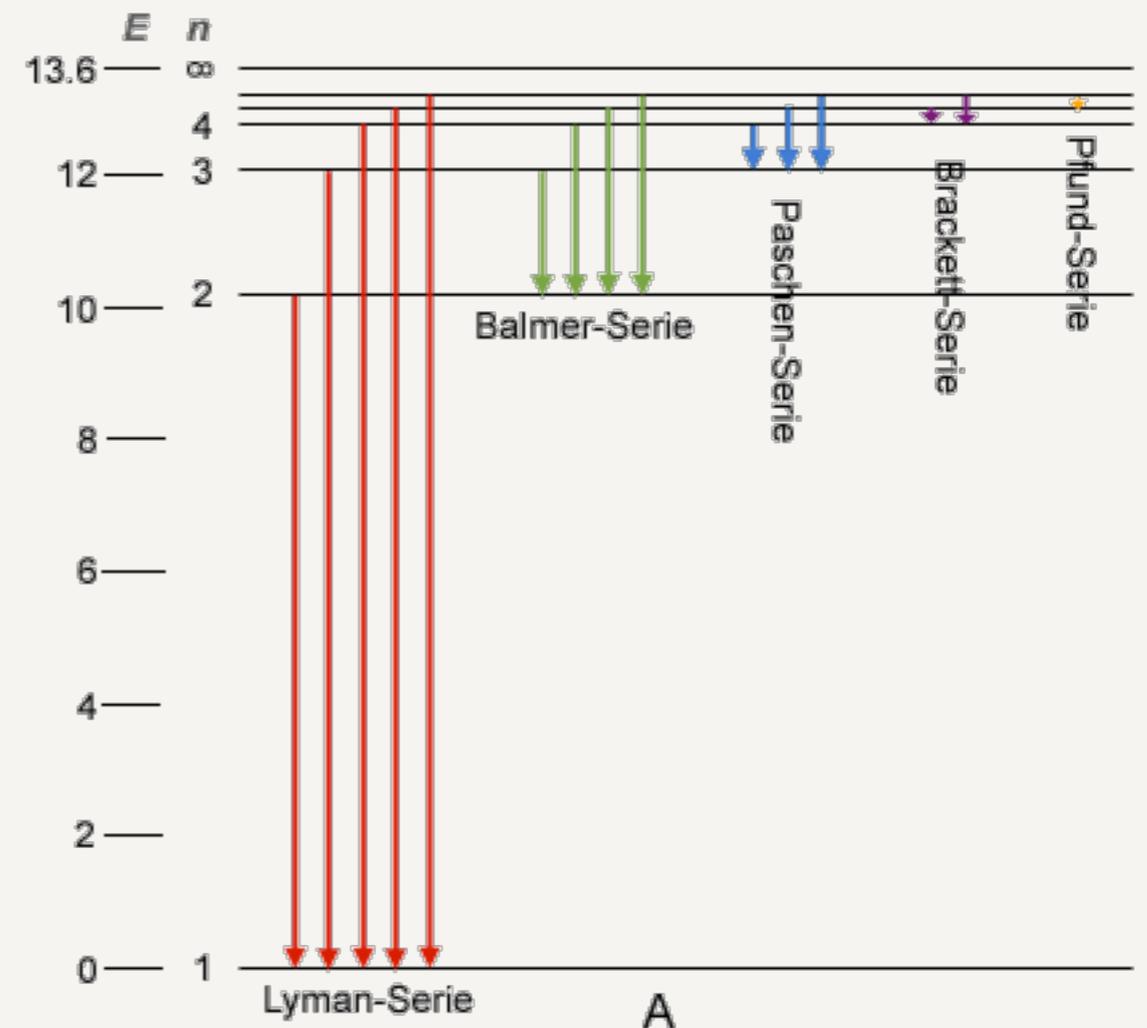
Mögliche Quantensprünge im Wasserstoff-Atom

Ein Atom Quantensprünge

Quelle: [Chemgapedia](#)

$$\Delta E = h\nu$$

Aufgabe: Schätzen Sie die Wellenlänge der ersten Balmer-Linie (3 → 2) ab.



Mögliche Quantensprünge im Wasserstoff-Atom

Ein Atom Spektrum

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

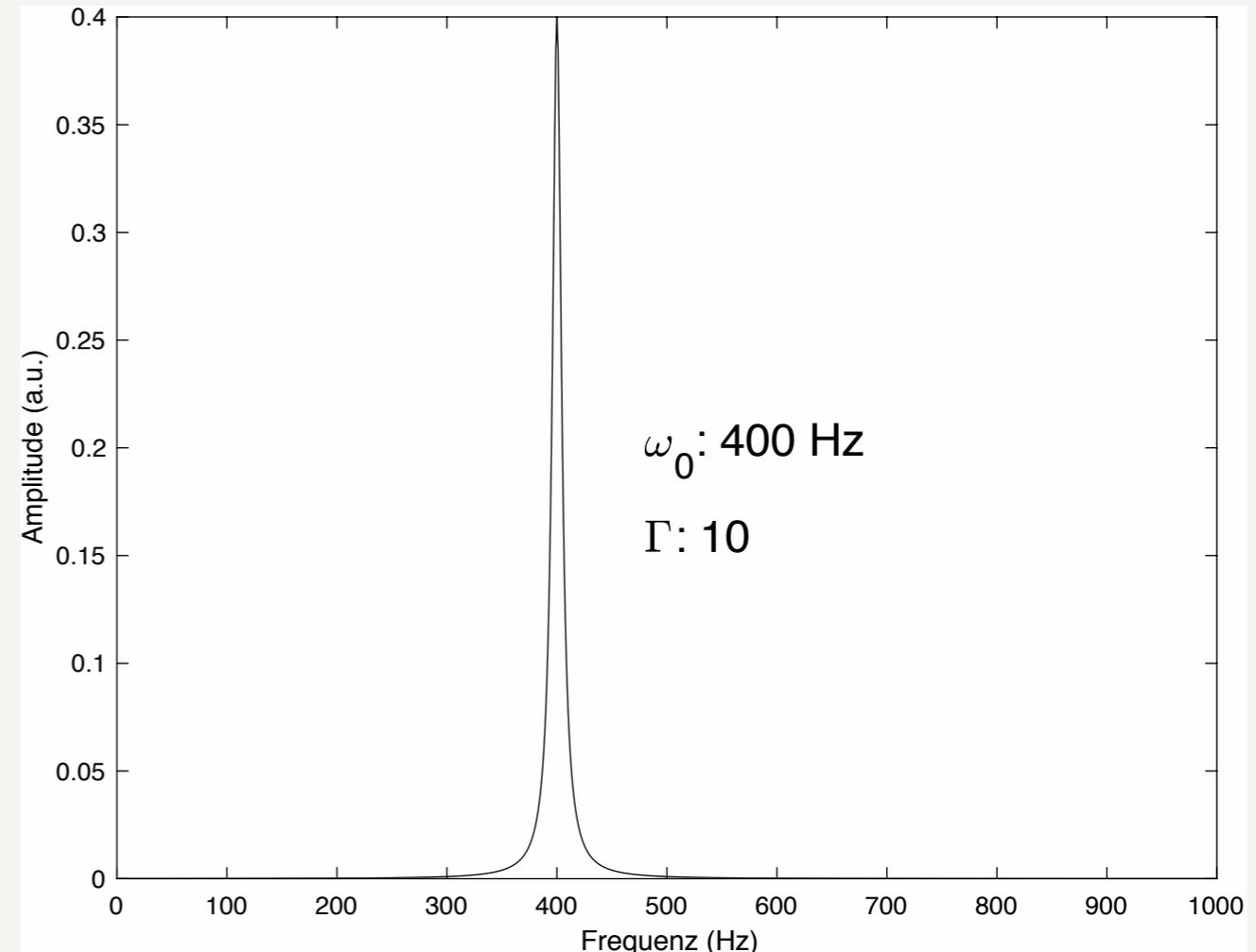


Quelle: Wikipedia



Ein Atom Linienbreiten

- Endliche Linienbreite als Resultat endlicher Lebensdauer eines Energiezustands
- Exponentieller Abfall der Amplitude des abgestrahlten Lichts
- Lorentzprofil ist die Fouriertransformierte der Exponential-Funktion



$$FT \left\{ e^{-a \cdot |t|} \right\} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{a}{\omega^2 + a^2}$$



Gedämpfter
harmonischer Oszillator

Ein Atom

Zusammenfassung

- Ein Atom hat diskrete Energieniveaus. Durch Übergang von einem Energieniveau in ein anderes kann Licht absorbiert bzw. emittiert werden. Das ausgestrahlte Licht nennt man Fluoreszenz.
- Aufgrund der vielen Energieniveaus gibt es viele Möglichkeiten von Übergängen. Es resultiert ein Linienspektrum.
- Die einzelnen Linien sind nicht unendlich schmal, sondern die Breite wird durch eine Lorentzkurve beschrieben.

Viele Atome

Viele Atome

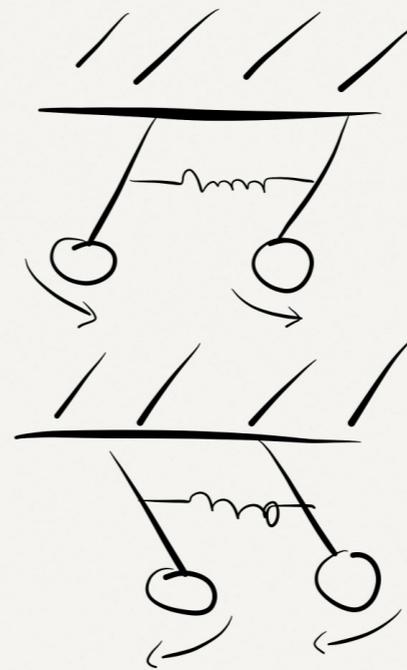
- Wir betrachten zwei Fälle von vielen Atomen:
 1. Elektronische Anregung: Bändermodell von Festkörpern
 2. Thermische Anregung: Wärmestrahlung

Zwei Atome Gekoppelte Pendel

- Analogie: Benachbarte Atome = gekoppelte Pendel
- Ein Pendel: eine Eigenfrequenz ω_0
- Zwei Pendel: zwei Eigenfrequenzen

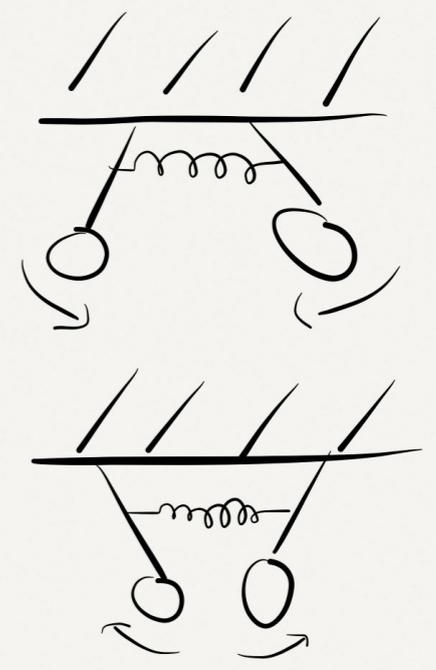
$$\omega_{M1} = \omega_0, \quad \omega_{M2} > \omega_0$$

Mode 1



$$\omega_{M1}^2 = \omega_0^2$$

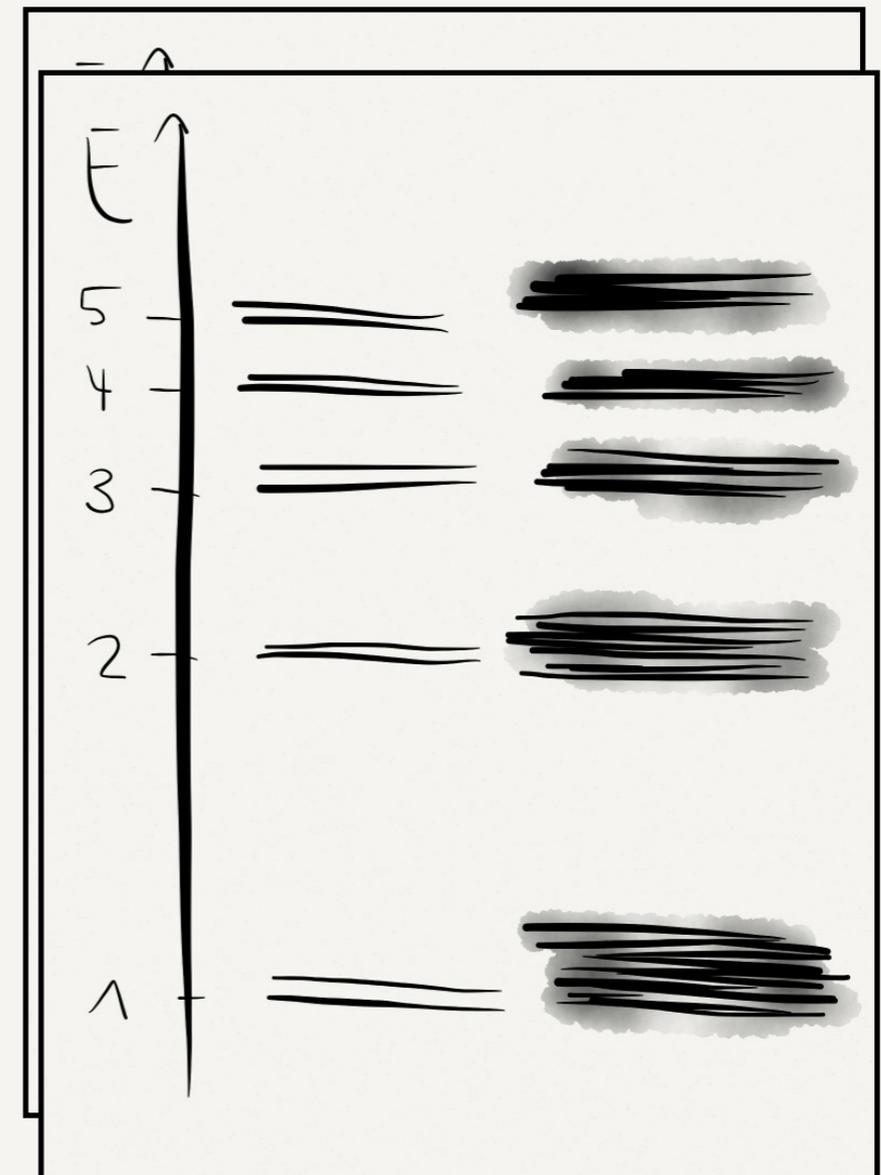
Mode 2



$$\omega_{M2}^2 = \omega_0^2 + \frac{2k}{m}$$

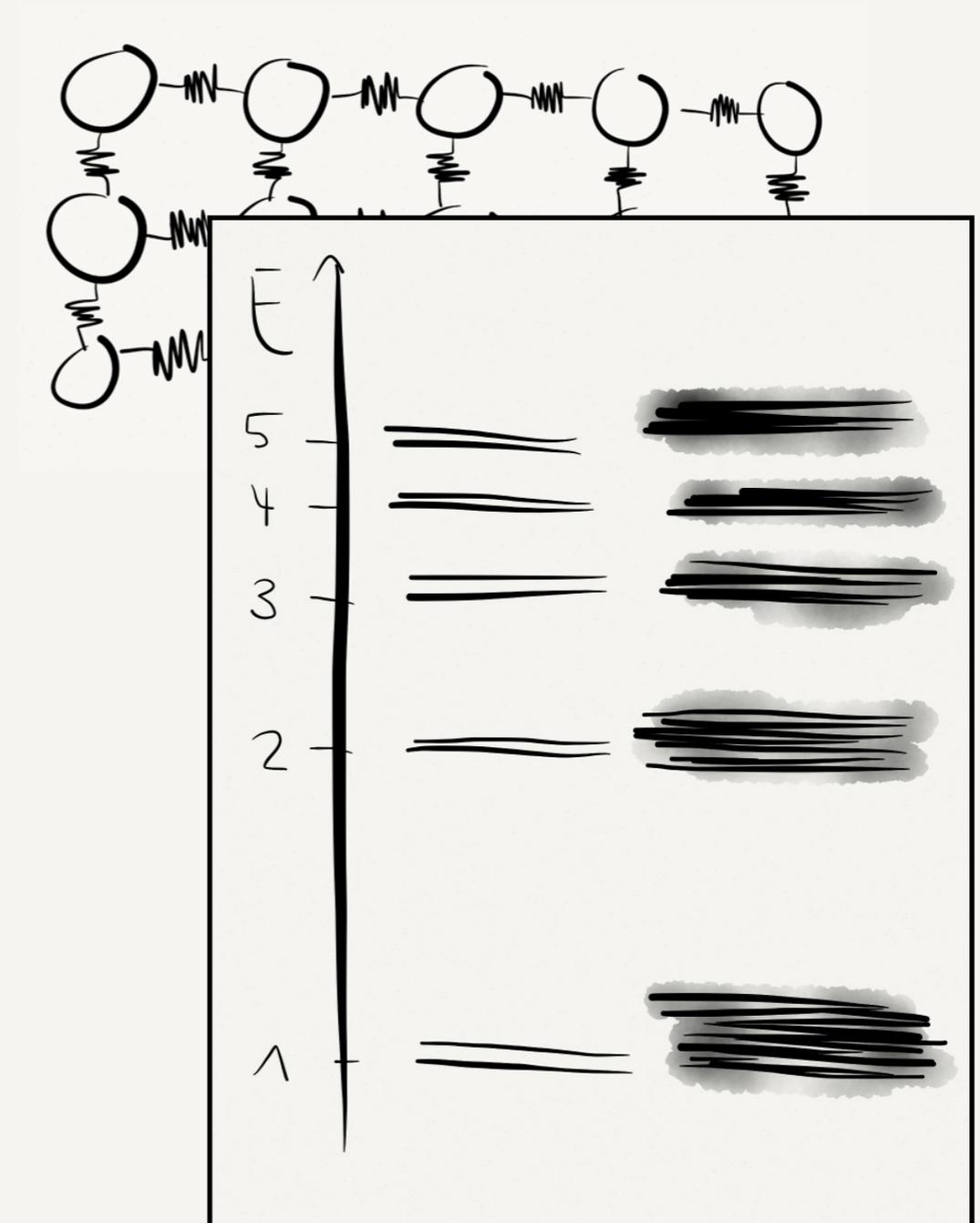
Zwei Atome Energieniveaus

- Zwei Atome haben durch die Kopplung mehr Energieniveaus
- Gleichbedeutend mit weiteren Übergangsmöglichkeiten und damit mehr Linien im Spektrum
- Drei Atome = 3 Moden
- Viele Atome = viele Moden!



Viele Atome Bändermodell

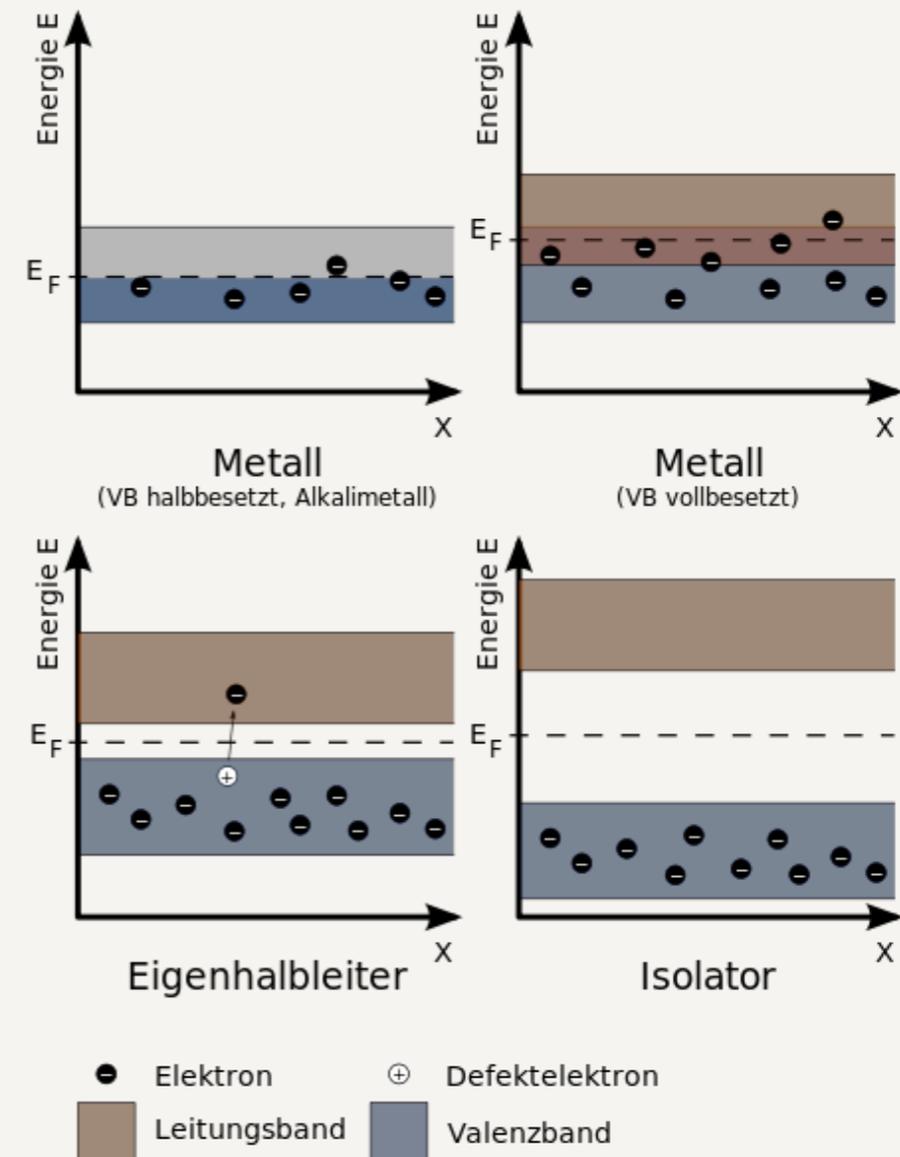
- Ein Festkörper besteht aus sehr vielen benachbarten Atomen
- Viele Atome bedeutet viele Schwingungsmoden
- Viele zusätzliche Energieniveaus
- Die Lorentzprofile überlappen und verschmelzen zu einem breiten Band



Halbleiter

Bandstruktur von Festkörpern

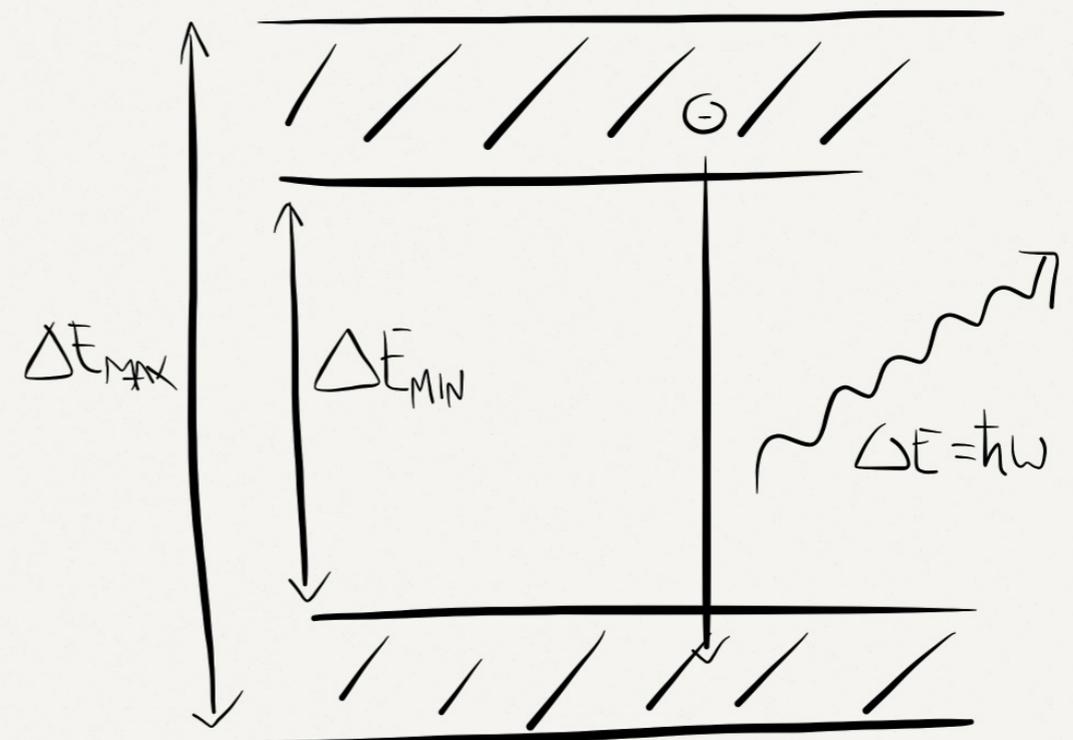
- Metalle, Halbleiter und Isolatoren unterscheiden sich durch die Lage des Valenz- und des Leitungsbands in Bezug auf die Fermi-Energie
- Für Leitung (= Strom) werden teilbesetzte Bänder benötigt
- Leerstellen werden als positive Ladungsträger betrachtet und als Defektelektronen bezeichnet



Halbleiter

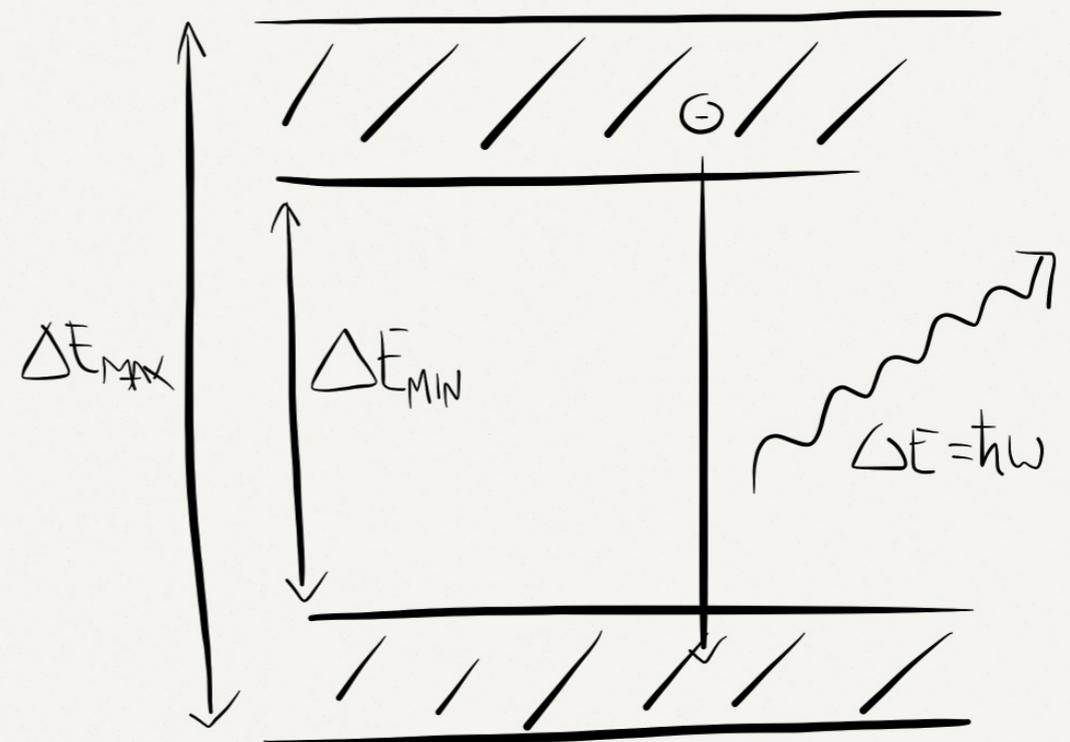
Lichtentstehung

- Nach Anregung ins Leitungsband fällt ein Elektron ins Valenzband zurück und gibt seine Energie als Photon ab.
- Wir werden diesen Effekt in weiteren Vorlesungen noch gründlicher behandeln



Halbleiter Lichtentstehung

- Aufgabe: Silizium wird als Photodiode oder Solarzelle gebraucht. Eine Photodiode aus Silizium erzeugt Strom bei Anregung mit Licht zwischen 400 - 1100nm.
- Wie groß ist ΔE_{min} ?



Halbleiter Spektrum

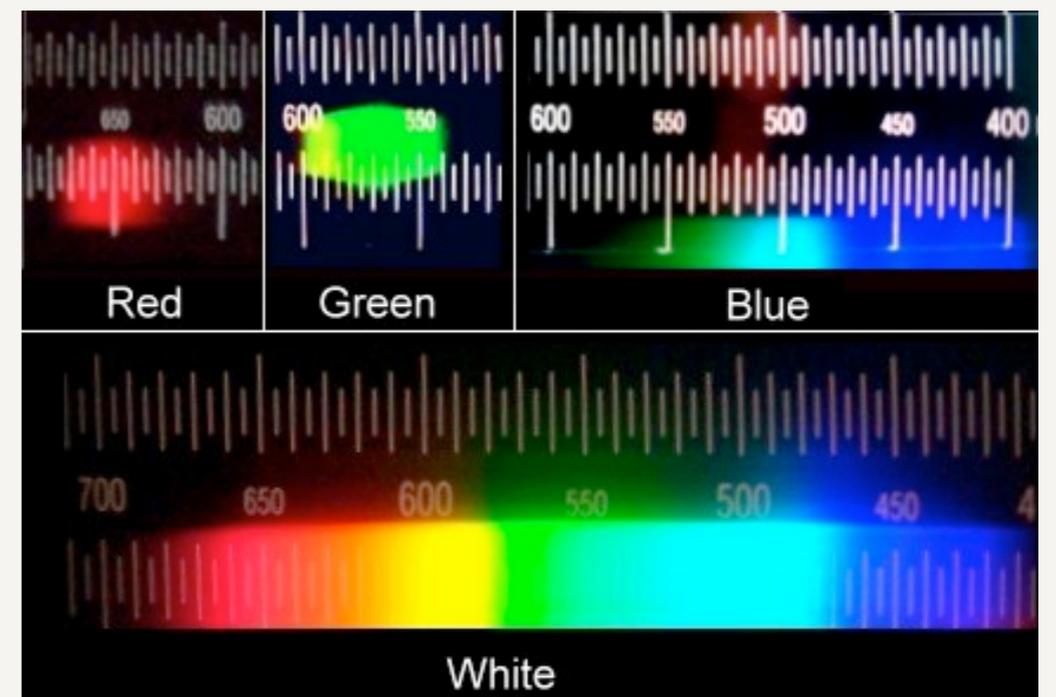
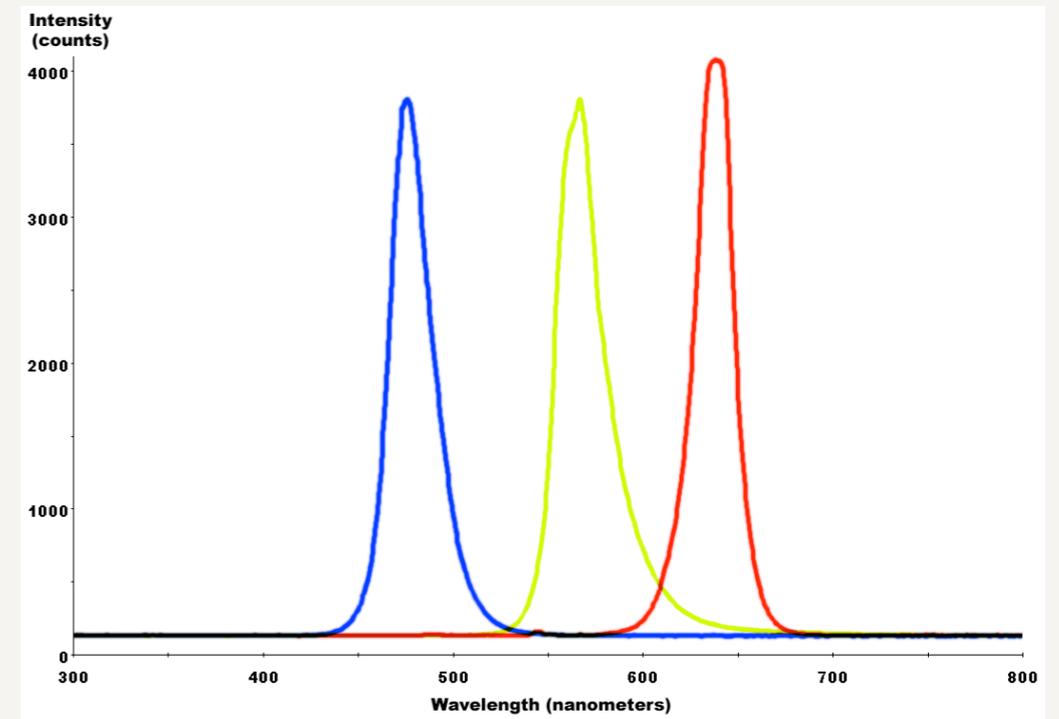
Quelle: Wikipedia



- Die Halbleiter werden zu Dioden verschaltet:

Light Emitting Diodes

- Durch Produktionsparameter können ΔE , ΔE_{min} und ΔE_{max} beeinflusst werden.

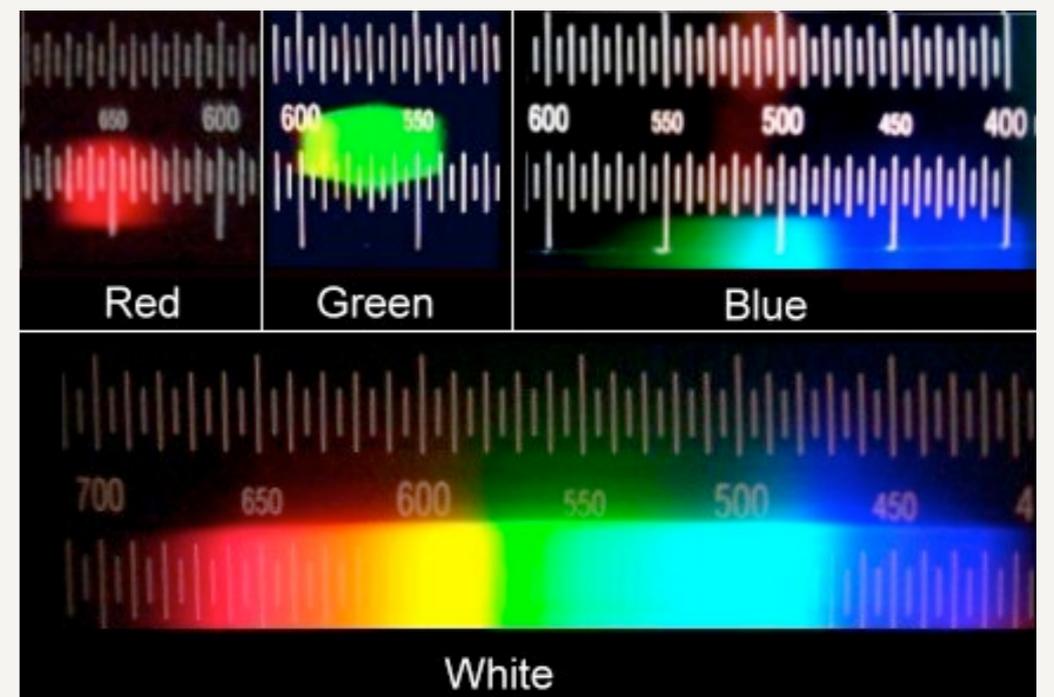
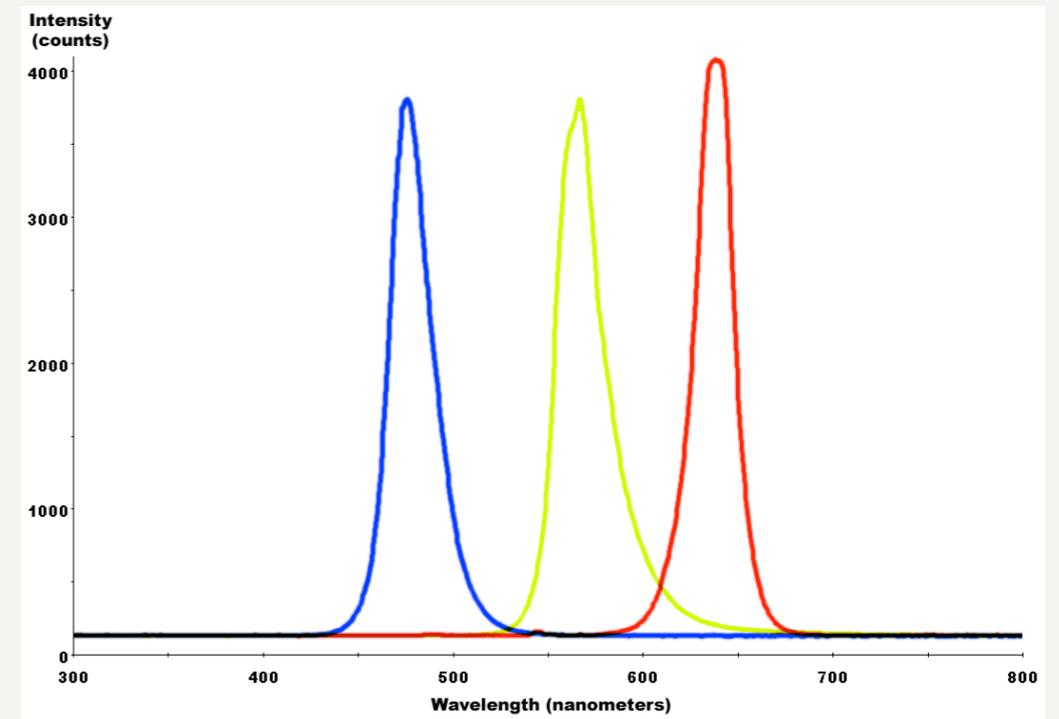


Halbleiter Spektrum

Quelle: Wikipedia



- Aufgabe: Berechnen Sie die Bandlücken, die Sie in den Halbleiter-Materialien für rotes, grünes und blaues Licht benötigen.

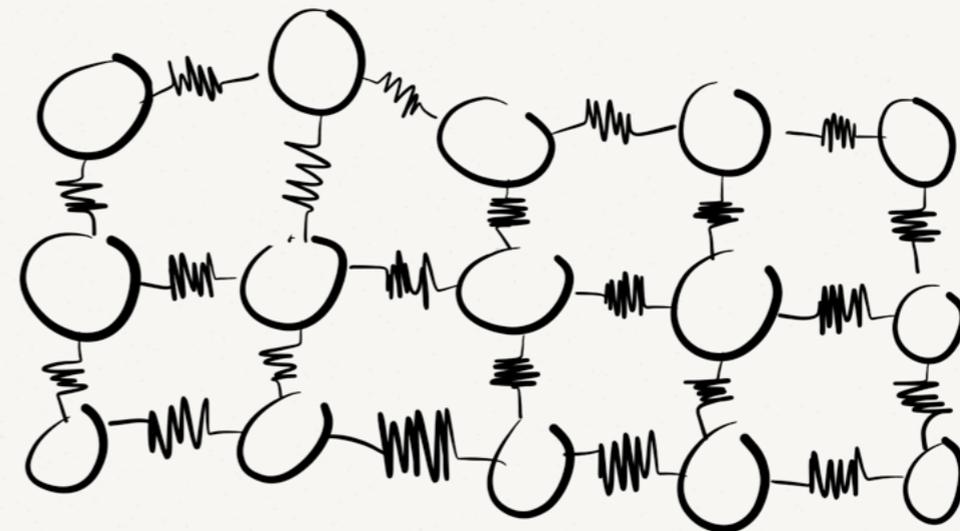


Wärmestrahlung

Wärmestrahlung

Lichtentstehung

- Wärme ist Bewegung der Atome
- Im Festkörper ist die Bewegung Schwingung
- Diese Schwingungen können selber Photonen aufnehmen und abgeben



Wärmestrahlung

Schwarzer Strahler

- Idealisiertes System zur Berechnung der Eigenschaften von Wärmestrahlung.
- Ein schwarzer Strahler absorbiert alle eingestrahlte elektromagnetische Strahlung.
- Im thermischen Gleichgewicht strahlt er dann aber auch genau die gleiche Energie wieder ab, nur mit einem eigenen, charakteristischen Spektrum.
- Erstmals von Max Planck 1900 korrekt berechnet. Dabei ‚erfand‘ Planck die Quantentheorie.
- Das Modell deckt eine enorm große Bandbreite von Fällen ab.

Wärmestrahlung

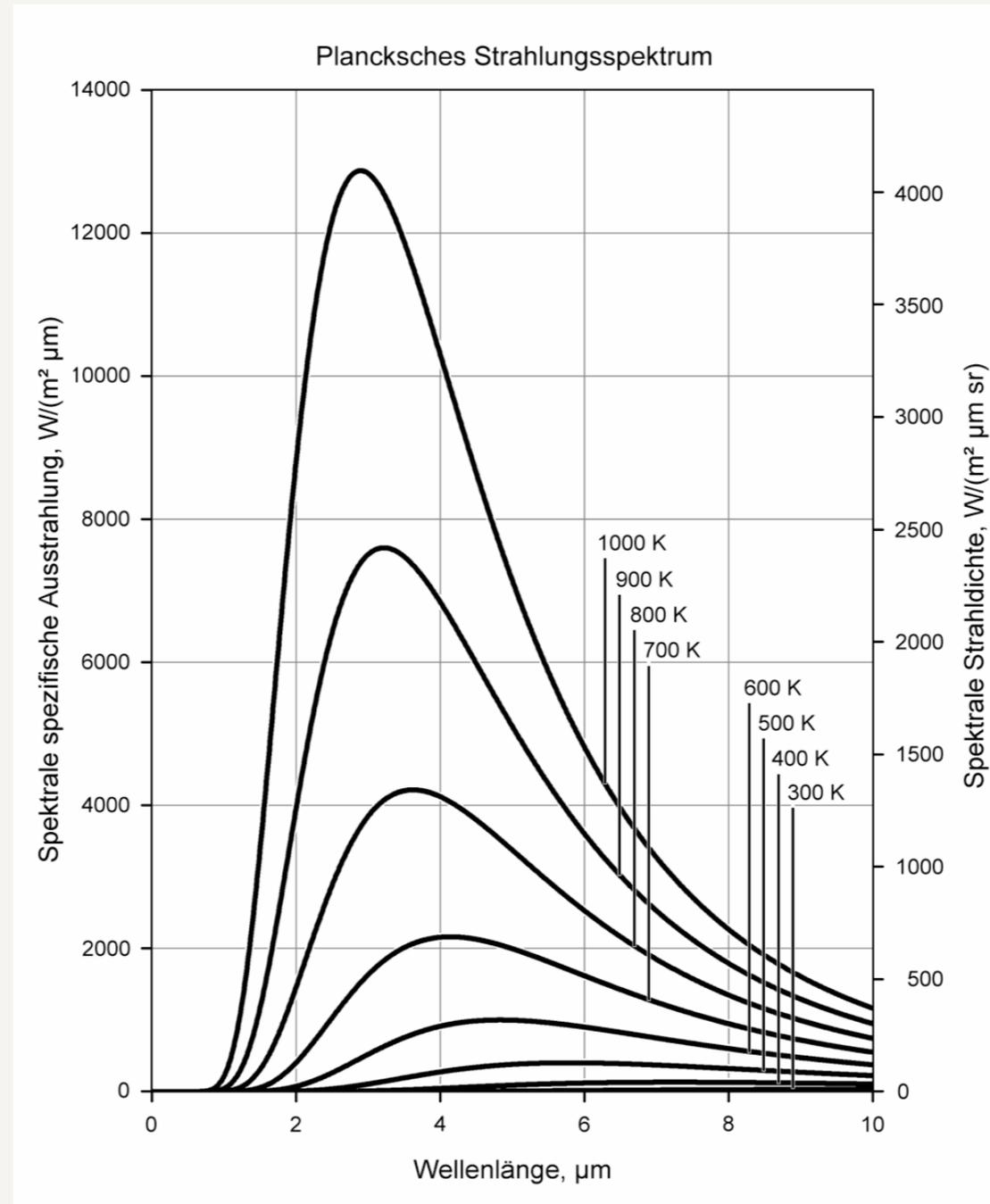
Planck'sche Strahlungsformel

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

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

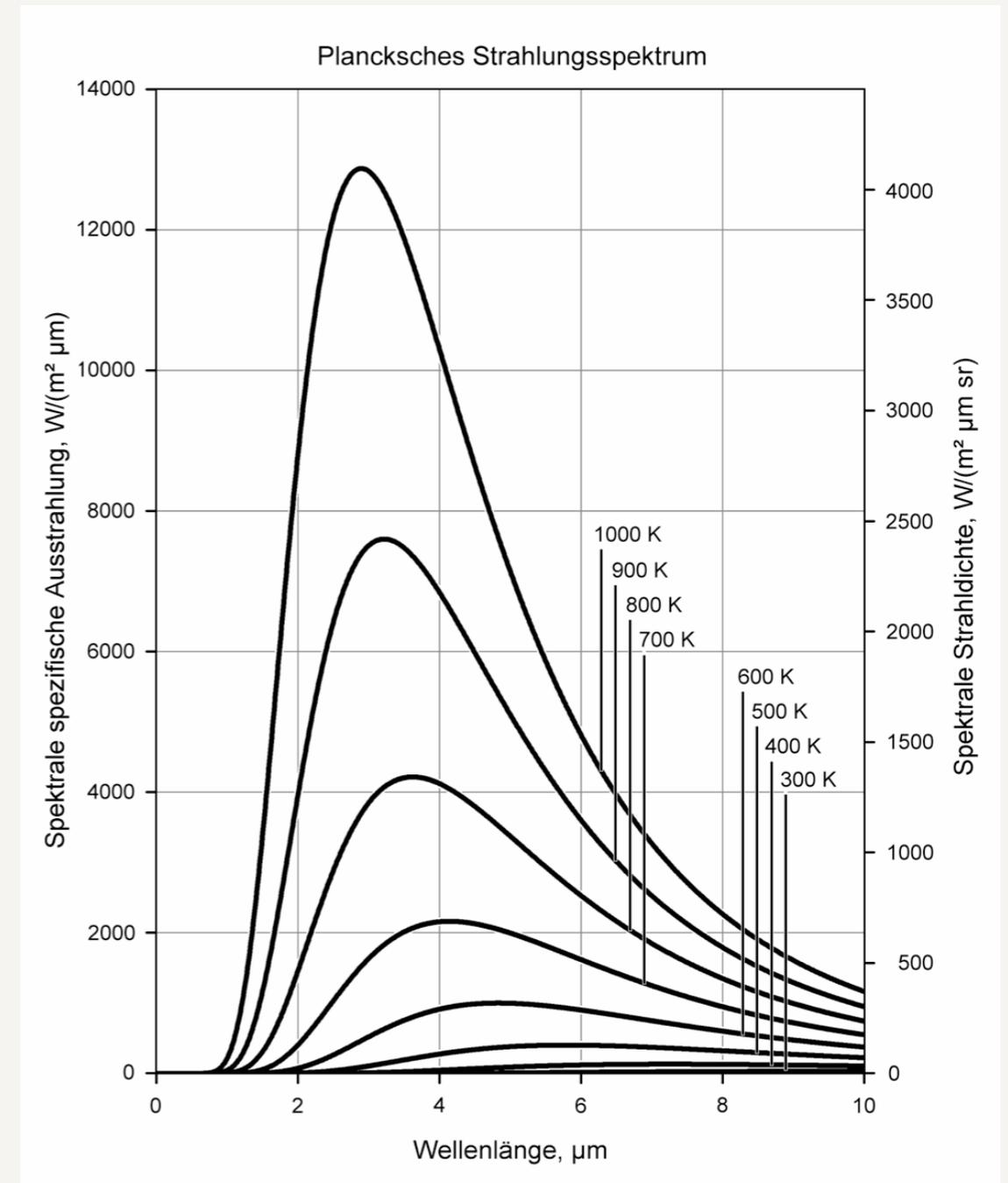
- Das Spektrum eines schwarzen Strahlers hängt nur von dessen Temperatur ab!

Wärmestrahlung Spektrum



Wärmestrahlung Spektrum

- Aufgabe: Berechnen Sie die Energie die der Wellenlänge des Maximums für 1000K entspricht.

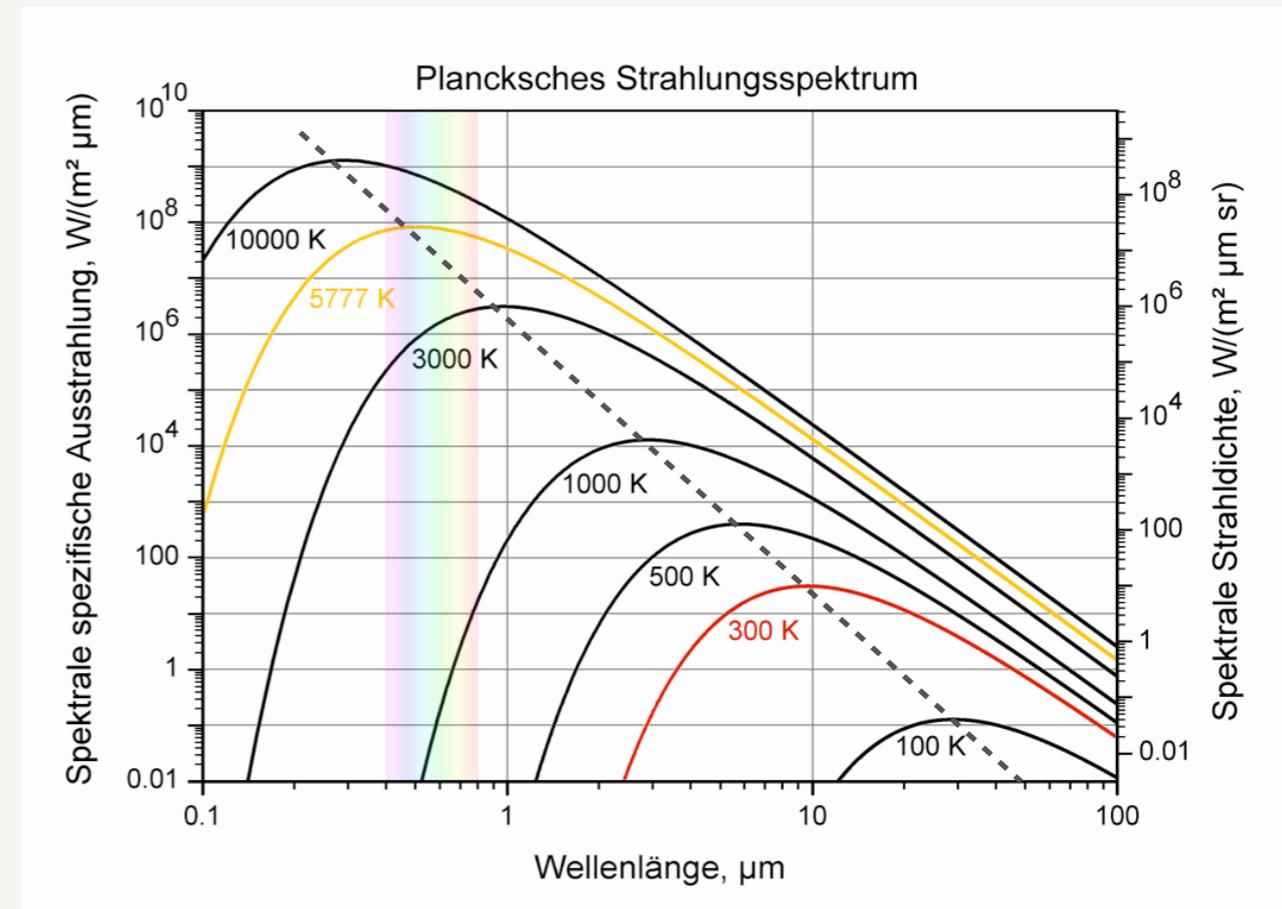


Wärmestrahlung Strahlungsmaximum

- 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.



Wärmestrahlung

Strahlungsmaximum

- Aufgabe: welcher Wellenlänge entspricht Raumtemperatur?
Welcher Körpertemperatur?

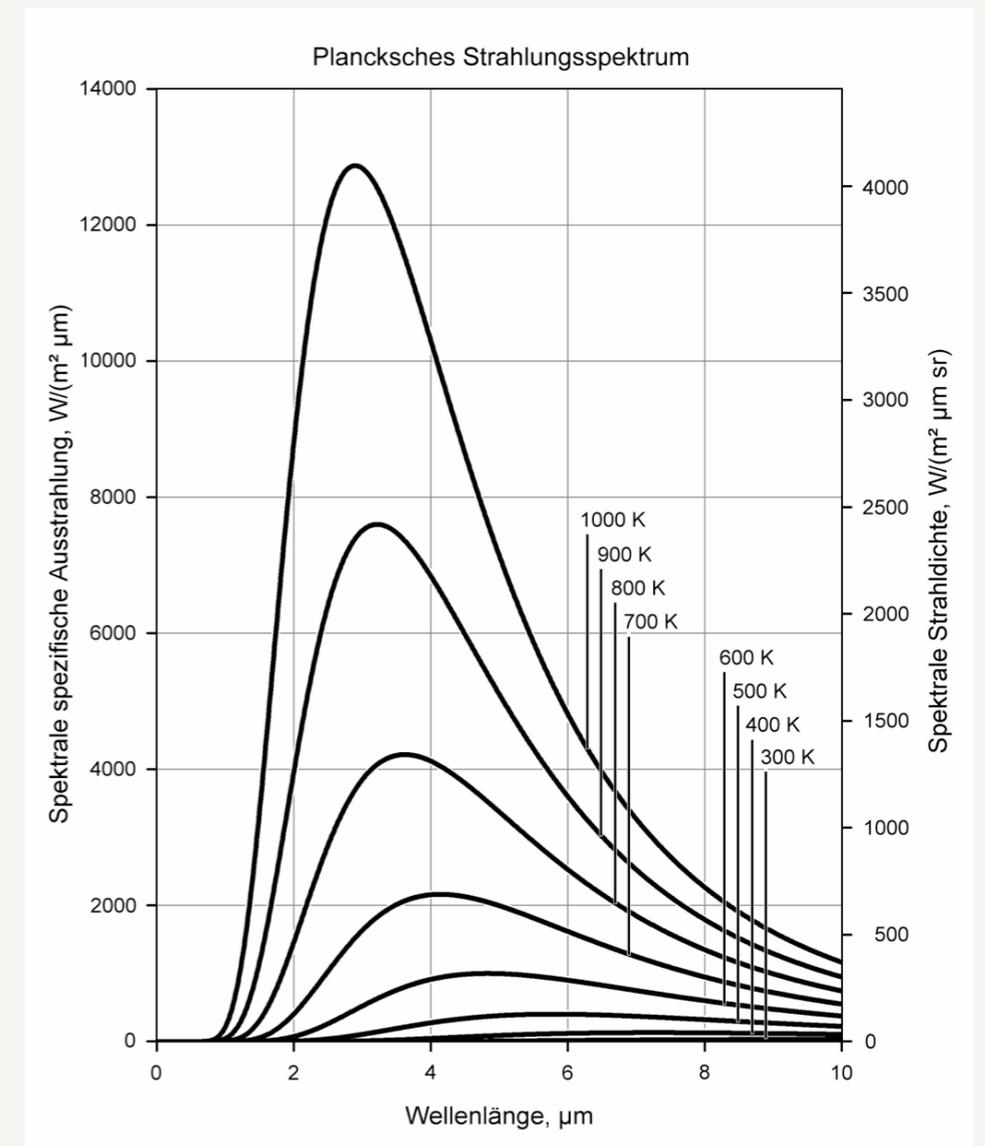
$$\lambda_{max} \cdot T = \text{konst.} = 2898 \mu m K$$

Wärmestrahlung

Strahlungsleistung

- Integriert man das Spektrum auf erhält man die gesamte abgestrahlte Leistung.
- Die Leistung wird durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz beschrieben:

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4$$



Aufgabe

Strahlungsleistung

- Schätzen Sie ab wie groß der Unterschied im Wärmeverlust ist bei

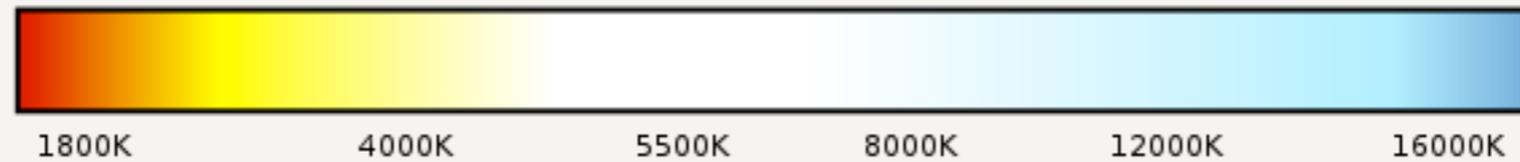
a. einem Parabol-Rinnen-Solkraftwerk mit 393°C

b. einem Solarturm-Kraftwerk mit 565°C.

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$$

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.



Viele Atome

Zusammenfassung

- Durch die vielen Schwingungsmoden im Festkörper werden die Energieniveaus zu Bändern verbreitert.
- Halbleiter haben eine Bänderstruktur, bei der die Wechselwirkung der Elektronen mit Photonen möglich ist.
- Wärmestrahlung entsteht durch die Schwingung der Atome im Festkörper.
- Das Spektrum hängt nur von der Temperatur ab.

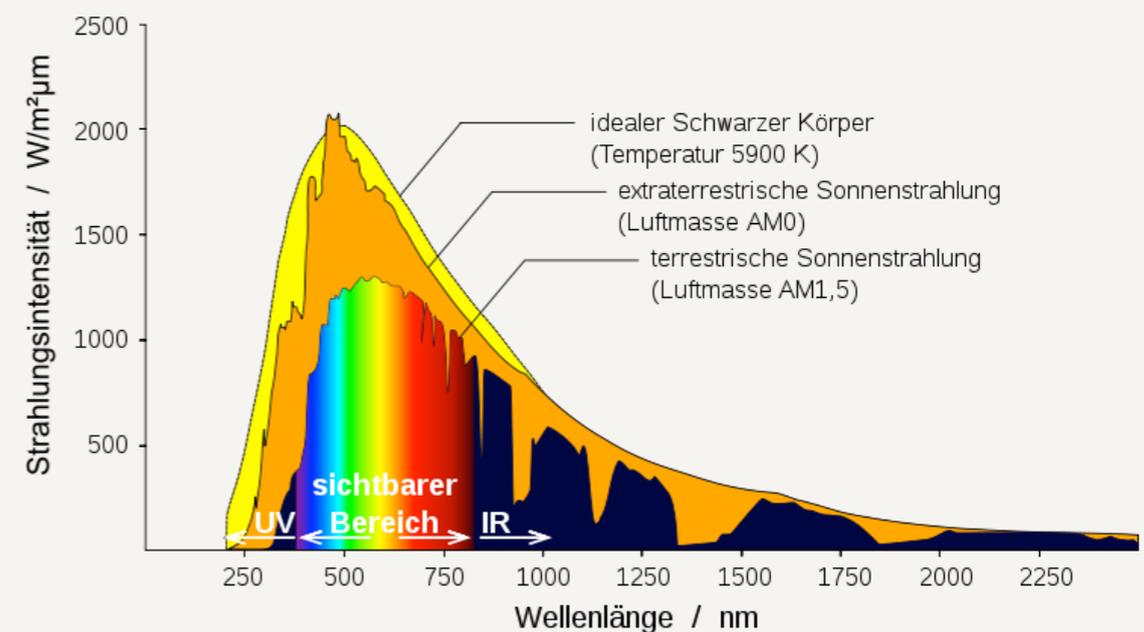
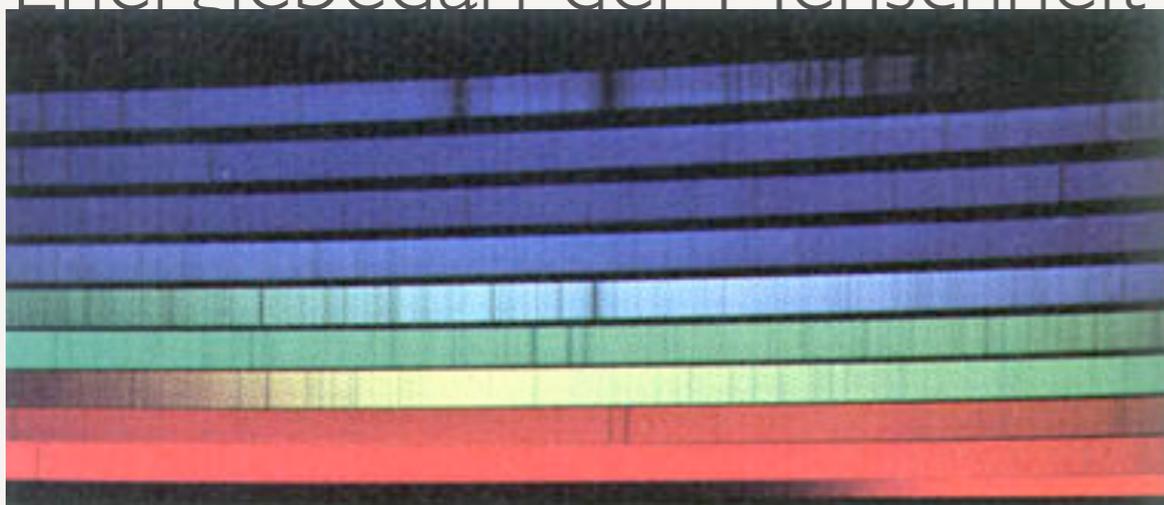
Beispiele

- Sonne
- Glühbirnen
- Halogen-Leuchten
- Leuchtröhren
- Leuchtstoffröhren
- LEDs
- Energiesparlampen
- Fahrzeugscheinwerfer
- Fluoreszenz (ein Atom, Flüssigkeiten) Spektren-App

Sonne

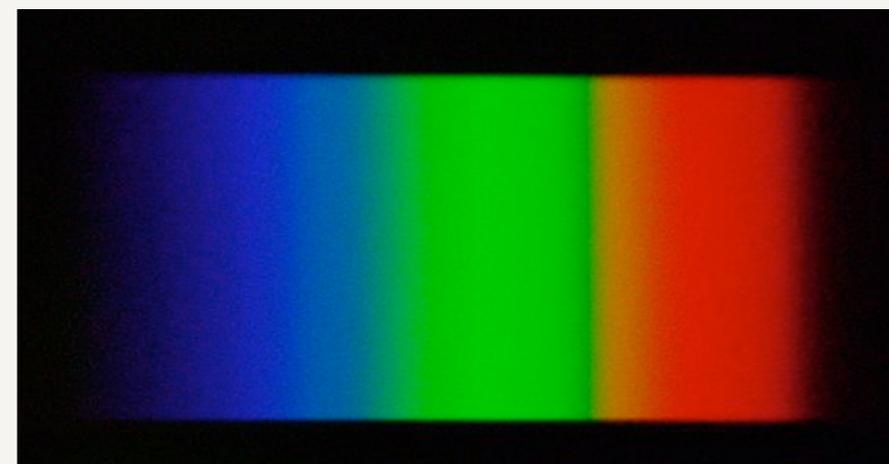
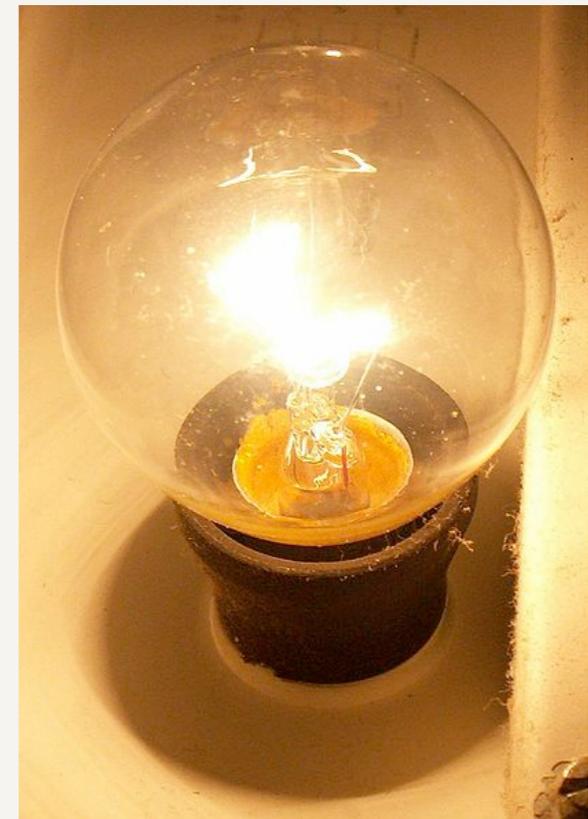


- Schwarzer Strahler mit 6000K
- Lichtleistung ca. 8000-facher Energiebedarf der Menschheit



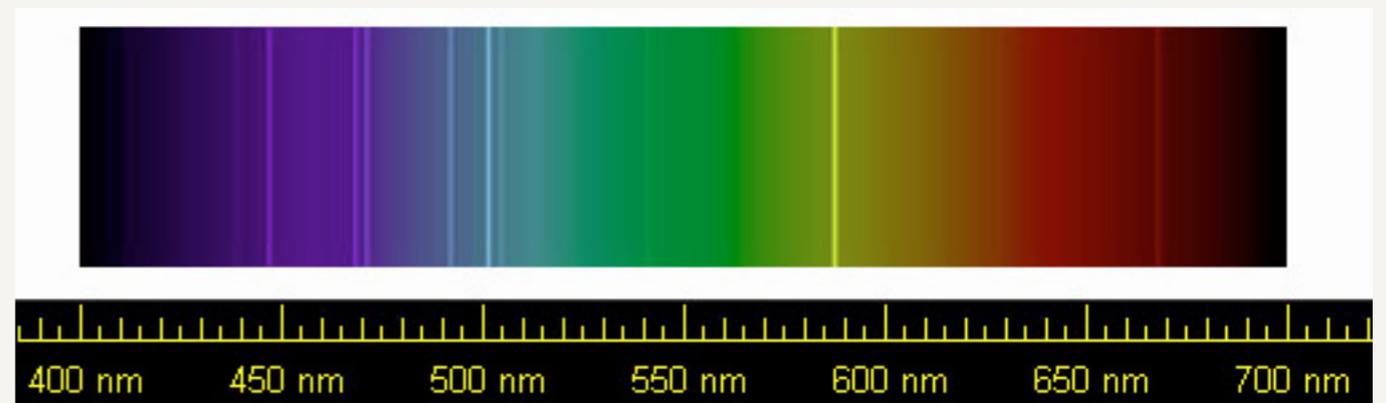
Glühbirne und Halogenstrahler

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

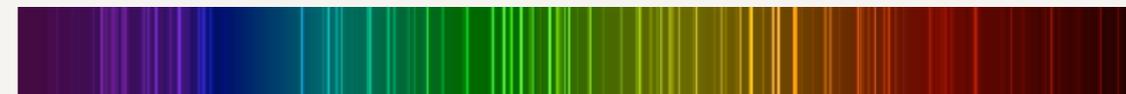
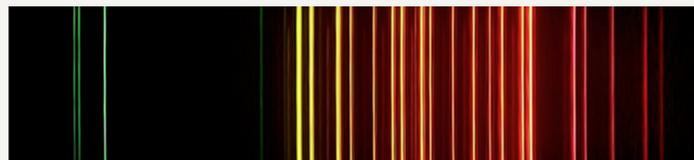
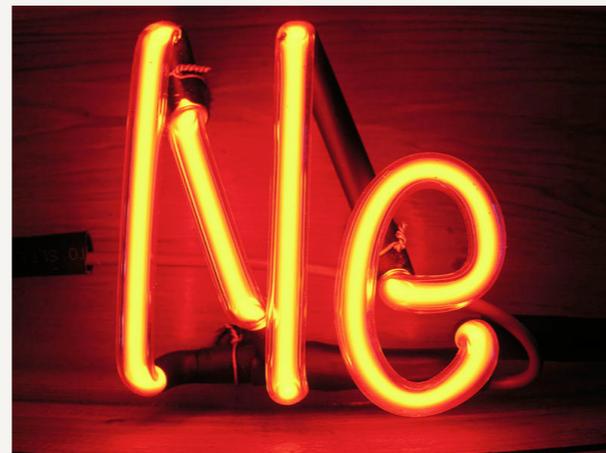
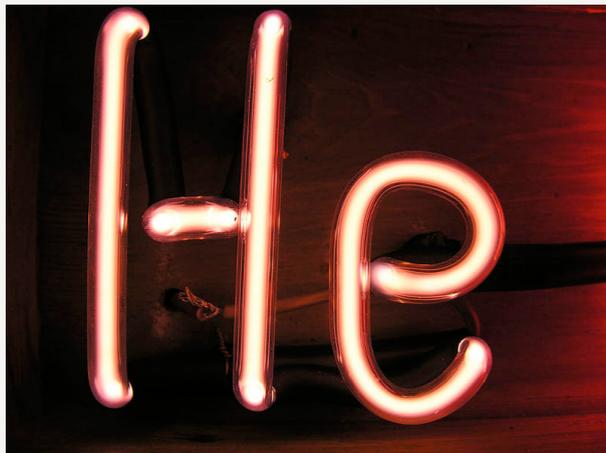


Leuchtröhren

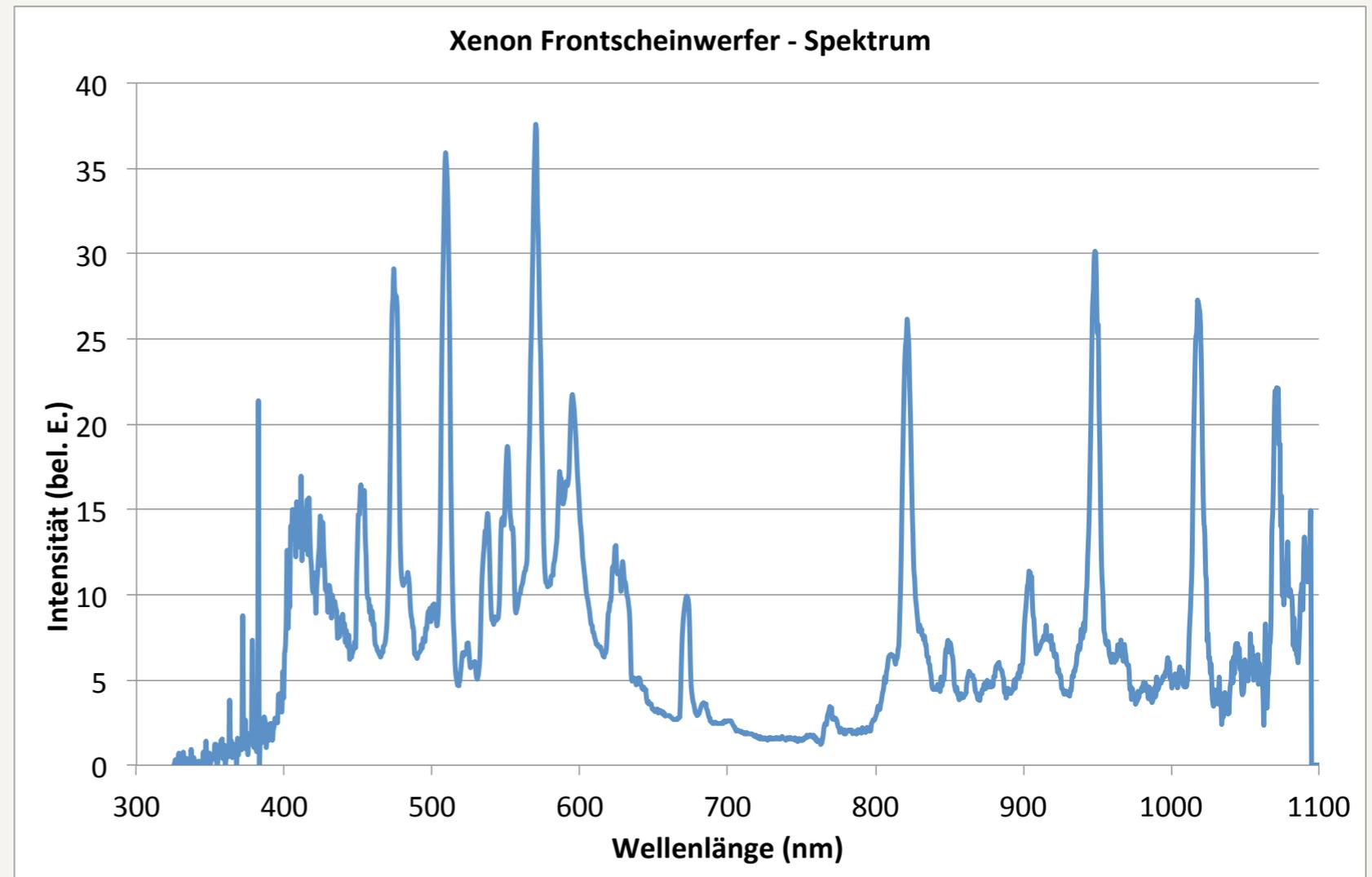
- Enthält nur Helium als Gas
- Wird durch Anlegen einer Spannung zum Leuchten angeregt
- Hat ein Linienspektrum



Leuchtröhren

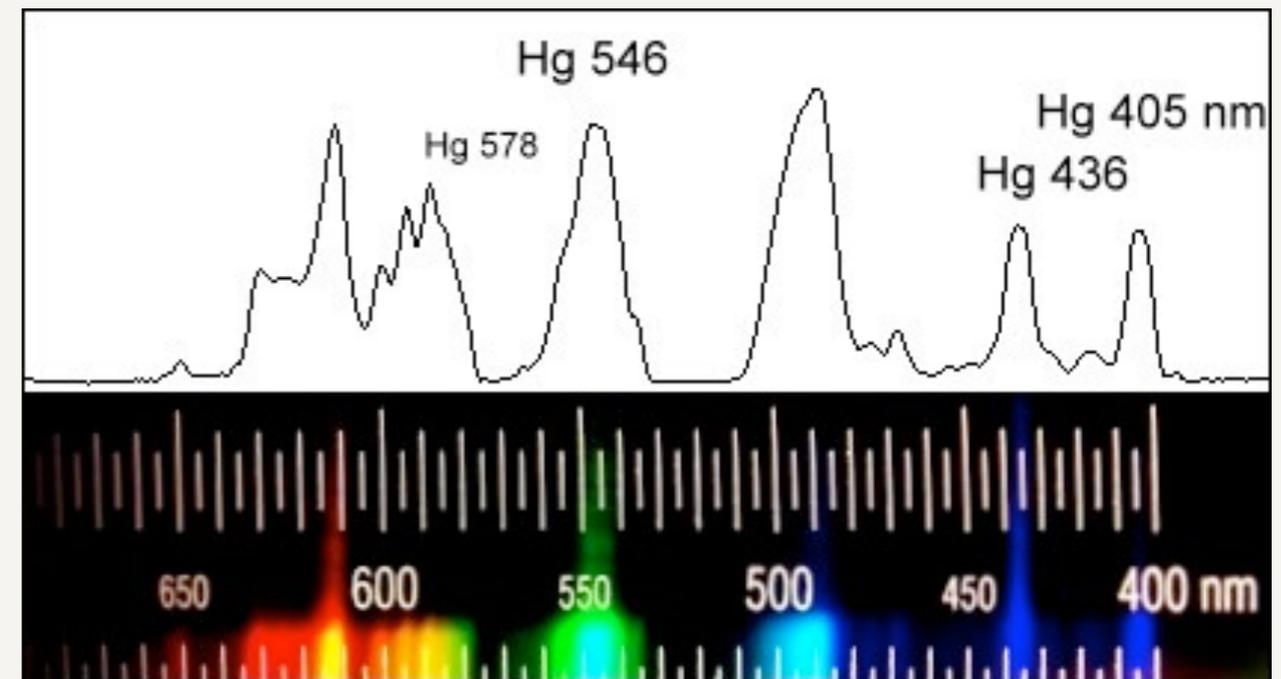


Xenon-Scheinwerfer



Leuchtstoffröhren

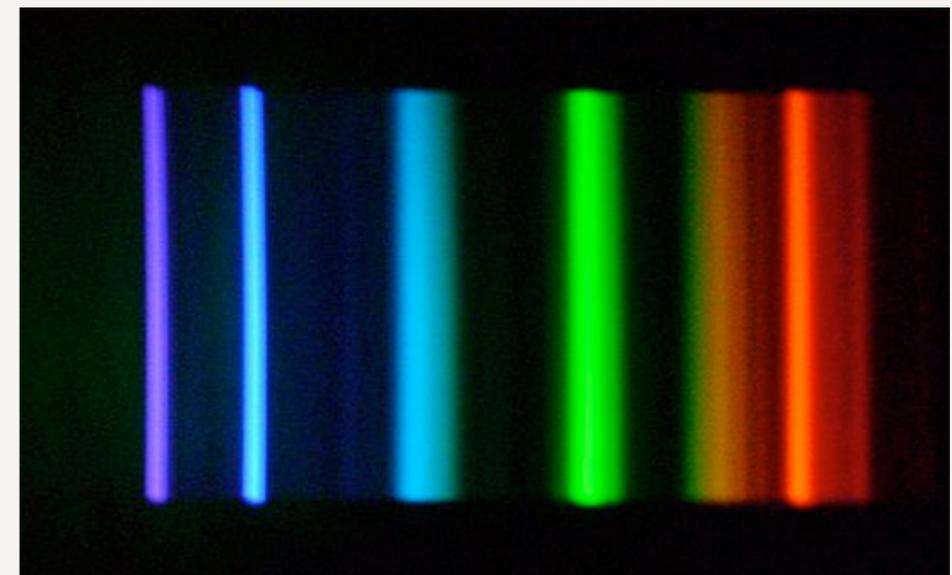
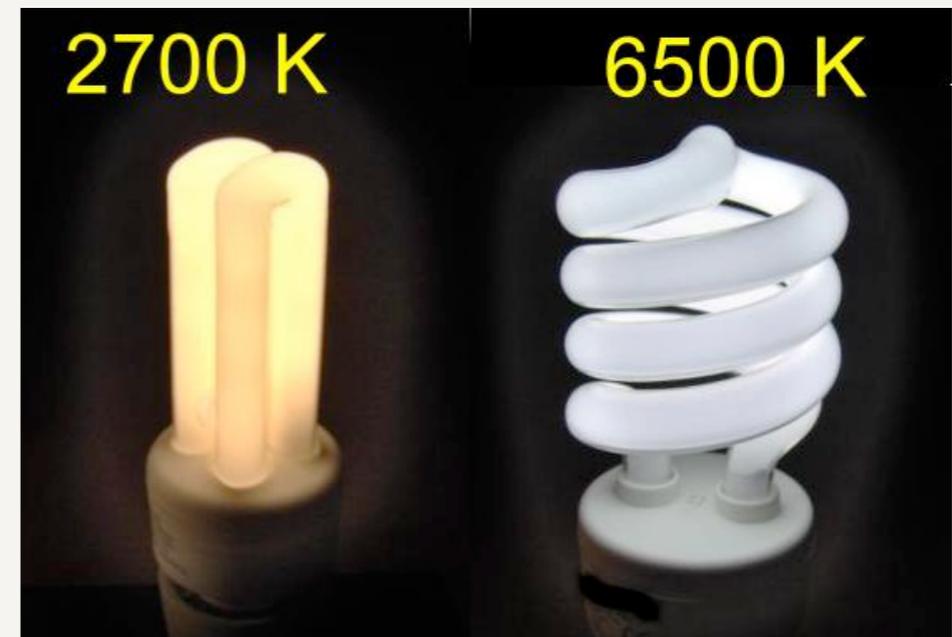
- Enthält als Leuchtgas Quecksilber
- Ist auf der Innenseite der Glasröhre mit einem fluoreszierendem Farbstoff lackiert
- Ist eine Mischung aus dem Linienspektrum von Quecksilber und dem breiten Fluoreszenzspektrum des Leuchtmittels



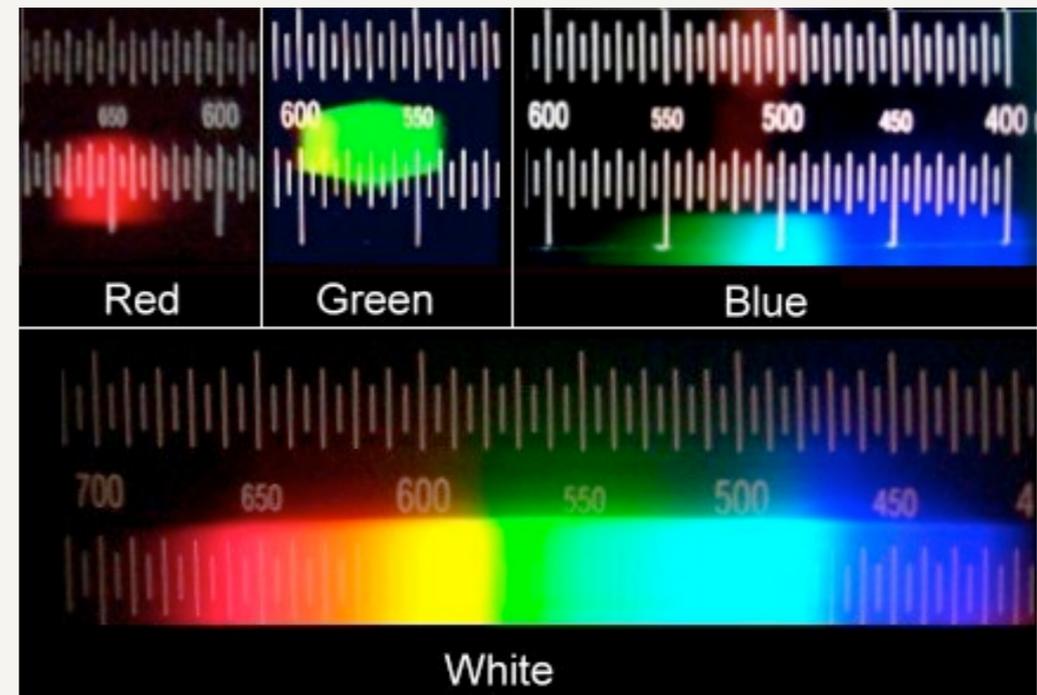
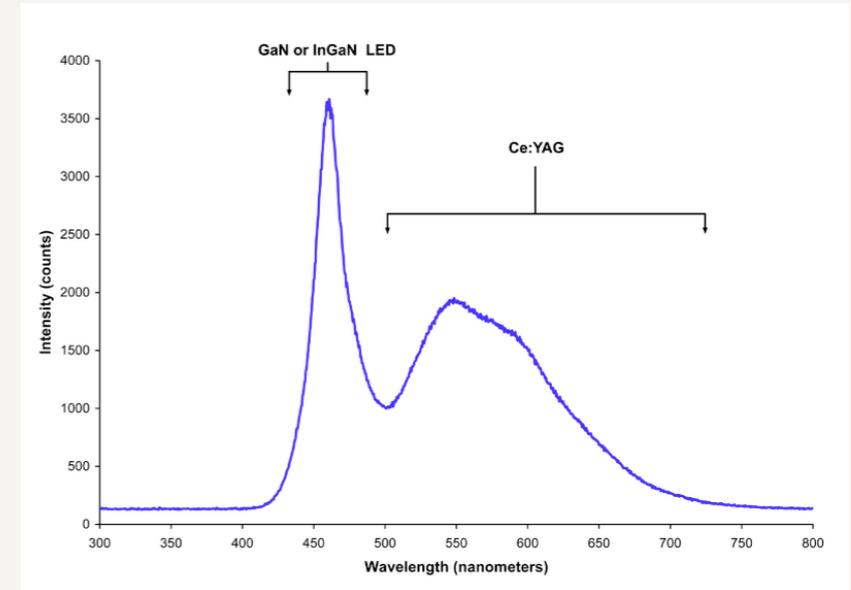
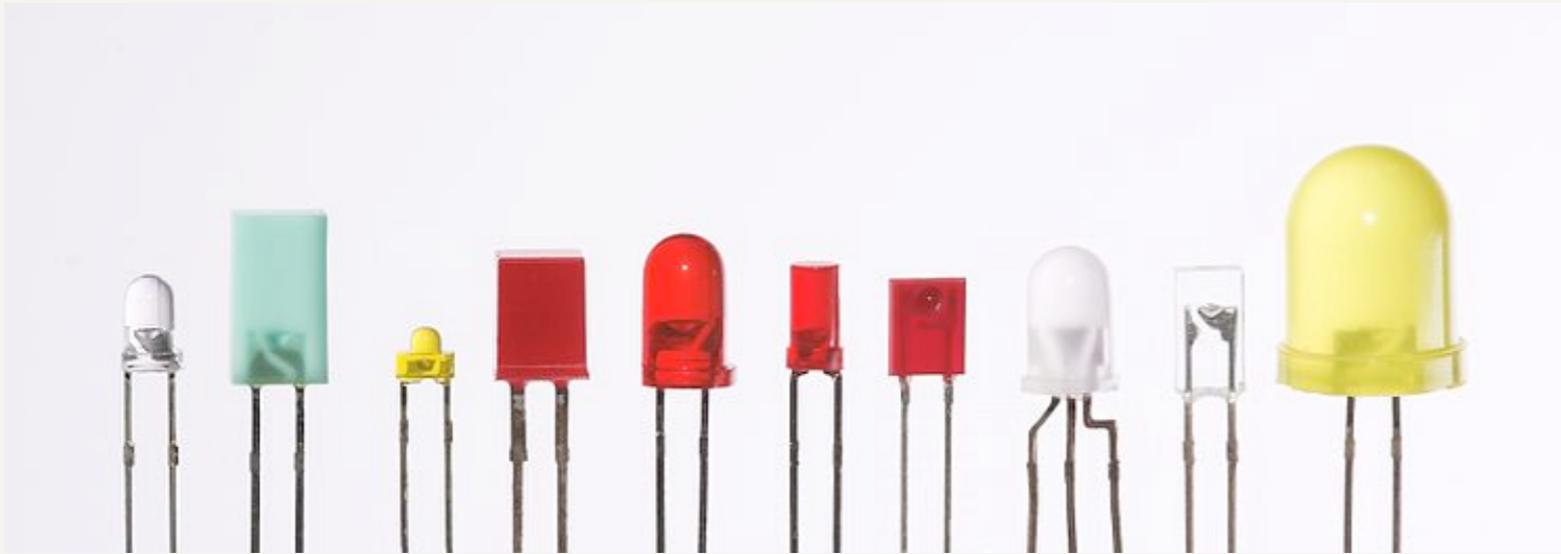
Energiesparlampen

Kompaktleuchtstofflampe

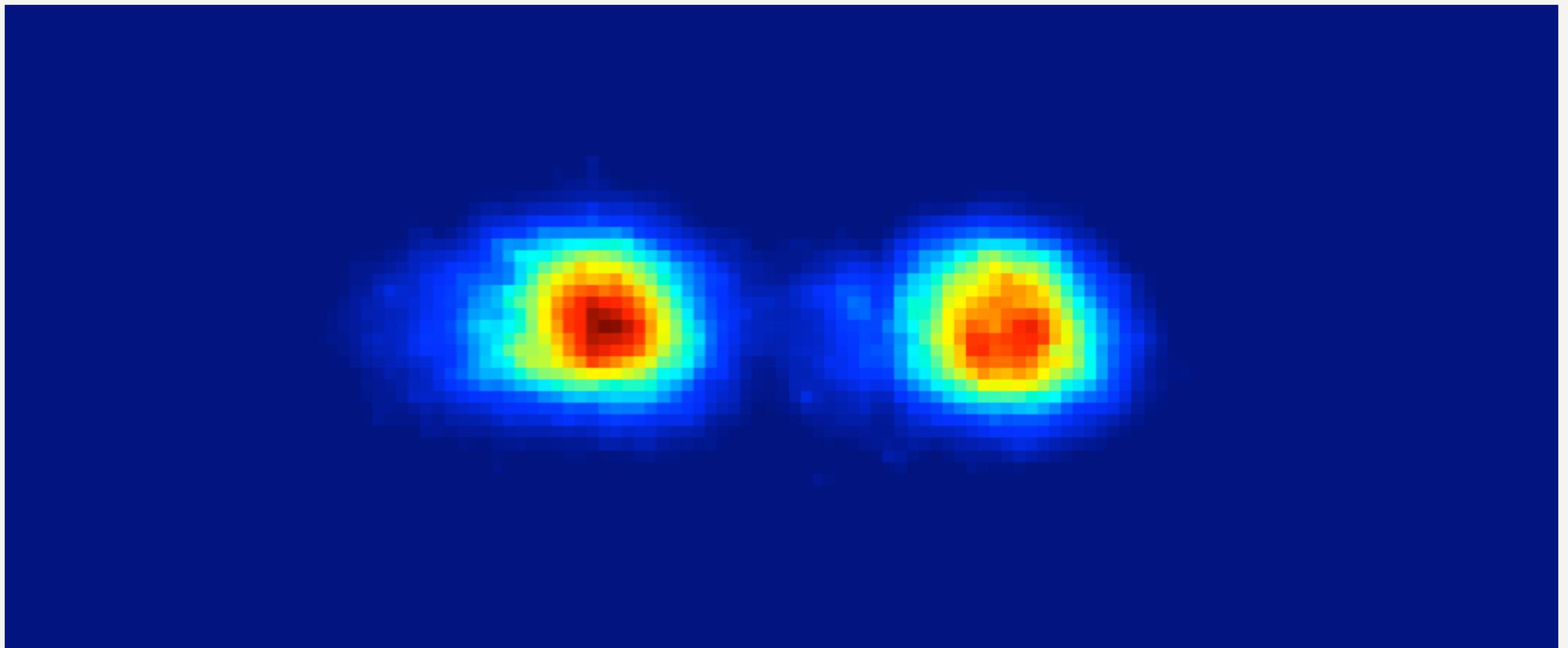
- Quecksilber-Dampf-Niederdruck-Lampe
- Linienspektrum
- Geringer Energieverbrauch



LED



Atomfluoreszenz



Zwei Ytterbium-Ionen in einer linearen Ionenfalle