

4. Photonen

Licht als Welle:

Interferenzversuche von
Huygens, Young
(17. - 18. Jahrh.)

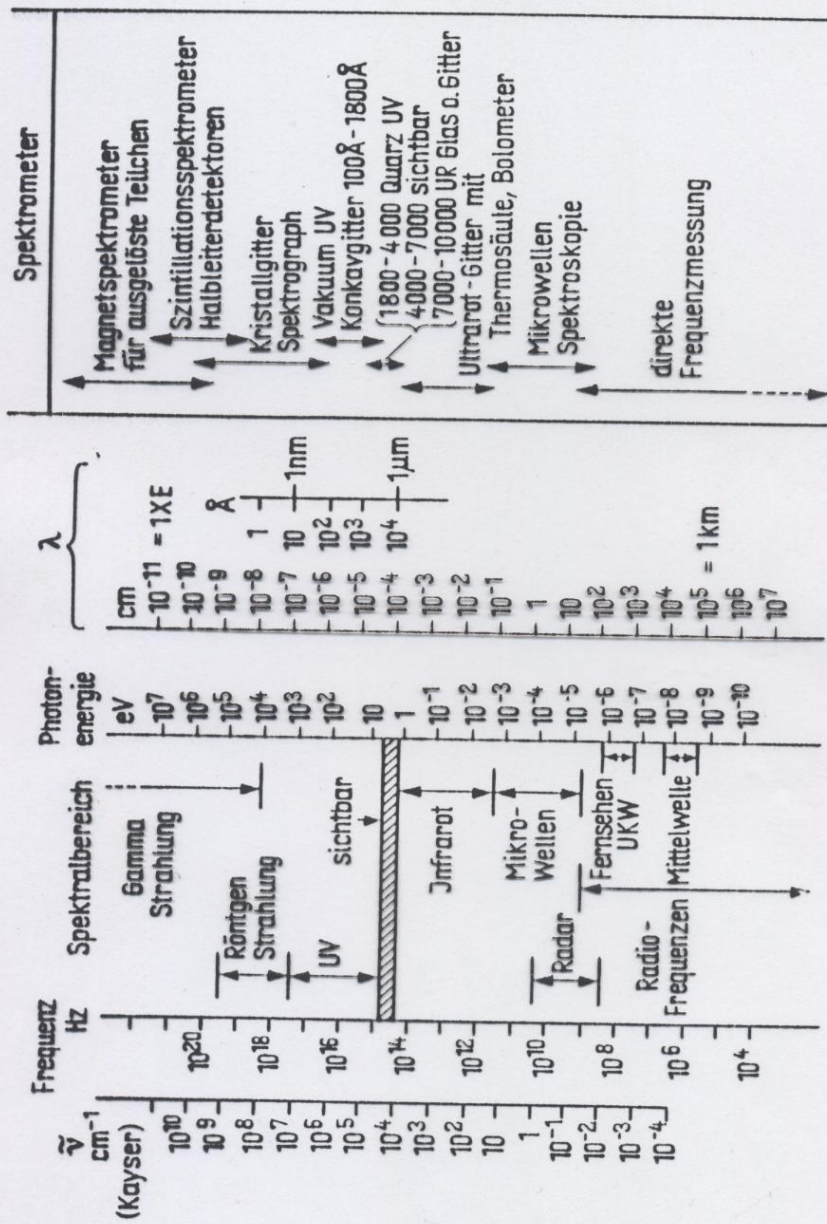
E/M Welle:

Maxwellgleichungen
(1885)

Nachweis durch Hertz
(1887)

Erzeugung von Photonen

- Schwingende Ladungen in Antennen $10^4 \dots 10^8 \text{ Hz}$
in Hohlräumen $10^8 \dots 10^{10} \text{ Hz}$
- Wärmestrahlung $10^{12} - 10^{15} \text{ Hz}$
- Röntgenstrahlung: Abbremsung für Elektronen $10^{17} \dots 10^{19}$
- Synchrotronstrahlung: Ablenkung von Elektronen im Magnetfeld $10^{14} - 10^{19}$
- Gammastrahlung: Radioaktivität Teilchenphysik $> 10^{20}$

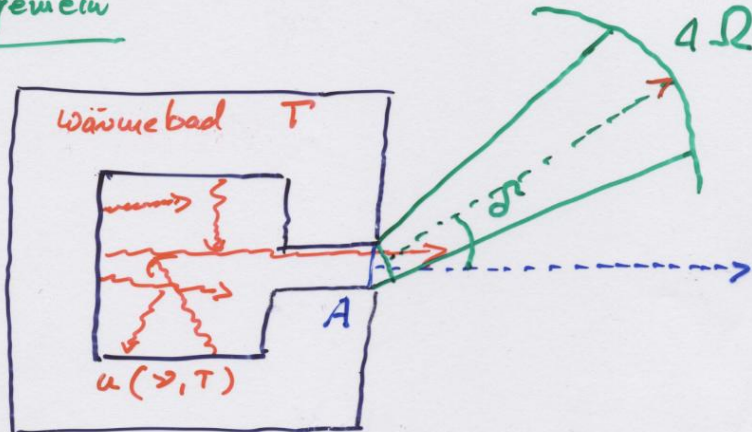


Elektromagnetisches Spektrum: Bereiche, gebräuchliche Einheiten und Spektrometer

4.1. Wärmestrahlung

4.1.1. Schwarzer Strahler

a) Allgemein



Th: Energiedichte

$$u(\nu, T) d\nu \equiv \frac{\text{Strahlungsenergie}}{\text{Volumen}} \text{ in } \nu \dots \nu + d\nu$$

Exp: Intensität der Strahlungsleistung

$$2 \cdot P(\nu, T) d\nu \equiv \frac{\text{Strahlungsleistung}}{\text{Fläche} \cdot \text{Raumwinkel}}$$

↑
* Polarisationsrichtungen

$$\text{Mit } \Delta E = u(\nu, T) d\nu \cdot \underbrace{A \cos \vartheta \cdot c \cdot \Delta t}_{\text{durch flossendes Volumen in } \Delta t} \cdot \frac{\Delta \Omega}{4\pi}$$

$$P(\nu, T) = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} d\vartheta \cdot \sin\vartheta \cdot u(\nu, T) \cdot c$$

$$\frac{\cdot \Delta t \cdot A \cdot \frac{\cos\vartheta}{4\pi}}{A \cdot \Delta t}$$

$$= \frac{c}{8} u(\nu, T)$$

b) Exp. Beobachtung

Strahlungsleistung

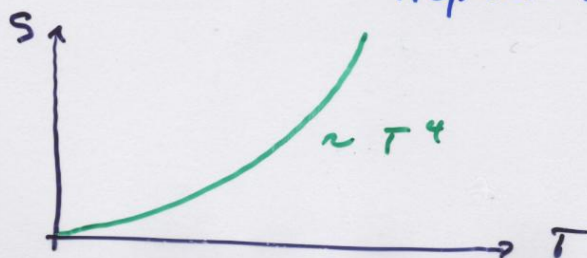
$$S = 2 \int_0^{\infty} P(\nu, T) d\nu$$

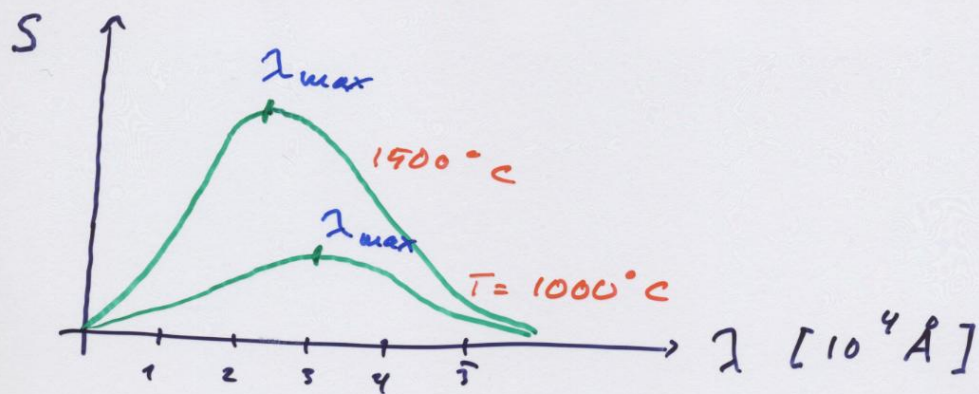
$$= 2 \int_0^{\infty} \frac{c}{8} u(\nu, T) d\nu$$

$$= \frac{\text{Theorie}}{G \cdot T^4}$$

experimentelle
Beobachtung

Stephen-Boltzmann-Gesetz





Beobachtung: Wellenlänge $\lambda_{\max} = \frac{0,29 \text{ cm K}}{T}$
 Wiensche Verschiebungsgesetz

Bs Sonne: $T \sim 6000 \text{ K}$
 $\lambda_{\max} \sim 480 \text{ nm}$

Formuliere Theorie zu $u(\lambda, T)$
 anhand diese Messungen.

4.1.2 Plancksche Strahlungsformel

Klassischer Ansatz (Rayleigh, Jeans):

$$P(\nu, T) = \frac{\nu^2}{c^2} kT \quad \begin{array}{l} \text{klassischer} \\ \text{E-Dynamik} \end{array}$$

- Problem: $P \rightarrow \infty$ für $\nu \rightarrow \infty$

+ Bonus: gute Übereinstimmung mit exp. bei kleinen ν

Planck:

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

Annahmen:

- Atome sind EM Oszillatoren mit diskreten Energiewerten
 $E_m = n \cdot \nu \cdot h$

- Strahlung: stehende Wellen im Strahler

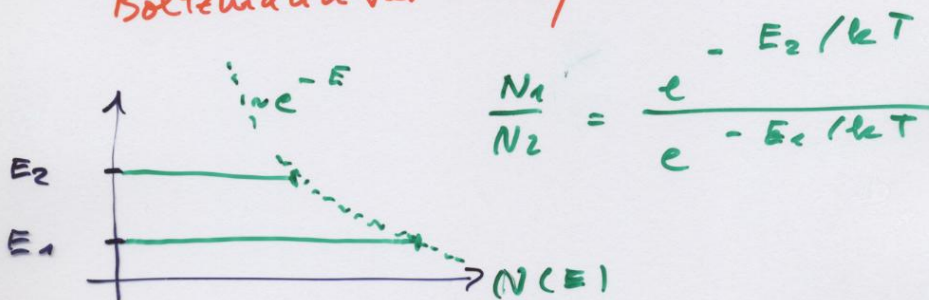
$$h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

- Atome sind im therm. Gleichgewicht mit Strahlung

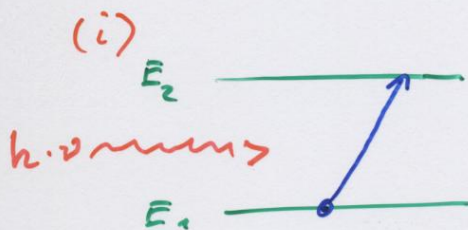
Ableitung nach Einstein (1917)

- Atome besitzen 2 Energiezustände E_1, E_2

- Therm. Gleichgewicht: klassische Boltzmannverteilung:

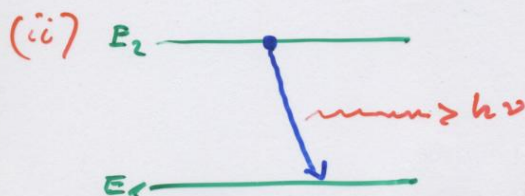


- Übergänge zwischen E_1 und E_2 durch Absorption oder Emission von γ



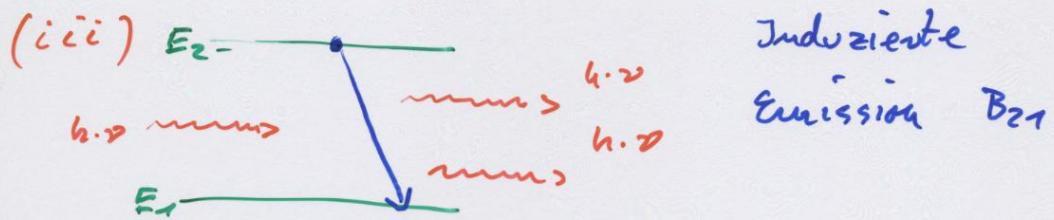
Absorption

Übergangswahrsch. B_{12}



Spontane Emission

$\bar{u}$ A_{21}



• Übergangswahrscheinlichkeiten:

$$dN_{12} = B_{12} \cdot u(\nu, T) \cdot N_1 \cdot dt$$

$$dN_{21}^s = A_{21} \cdot N_2 \cdot dt$$

$$dN_{21}^I = B_{21} \cdot u(\nu, T) \cdot N_2 \cdot dt$$

• Therm. Gleichgewicht:

$$dN_{12} = dN_{21}^s + dN_{21}^I:$$

$$\Rightarrow \frac{N_2}{N_1} = \frac{B_{12} \cdot u}{A_{21} + B_{21} \cdot u}$$

$$= \frac{e^{-E_2/kT}}{e^{-E_1/kT}} \quad ; h\nu = E_2 - E_1$$

$$\Rightarrow u(\nu, T) = \frac{A_{21}}{B_{12} \cdot e^{h\nu/kT} - B_{21}}$$

• Randbedingungen:

$$T \rightarrow \infty: u(\nu, T) \rightarrow \infty$$

$$\Rightarrow B_{21} = B_{12}$$

$$h \cdot \nu \ll kT: u(\nu, T) = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} kT$$

$$\Rightarrow \frac{A_{21}}{B_{12}} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3}$$

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

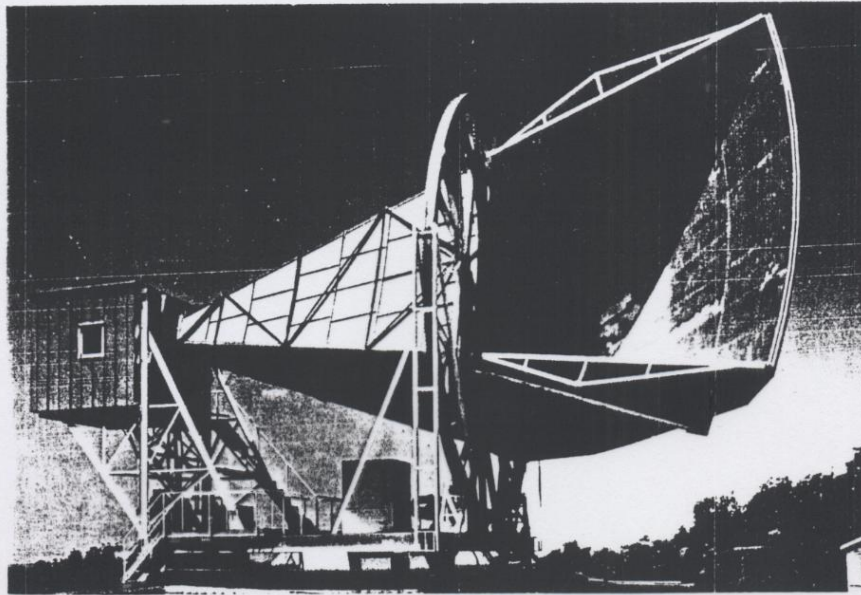
Plancksches Strahlungsgesetz

• Test:

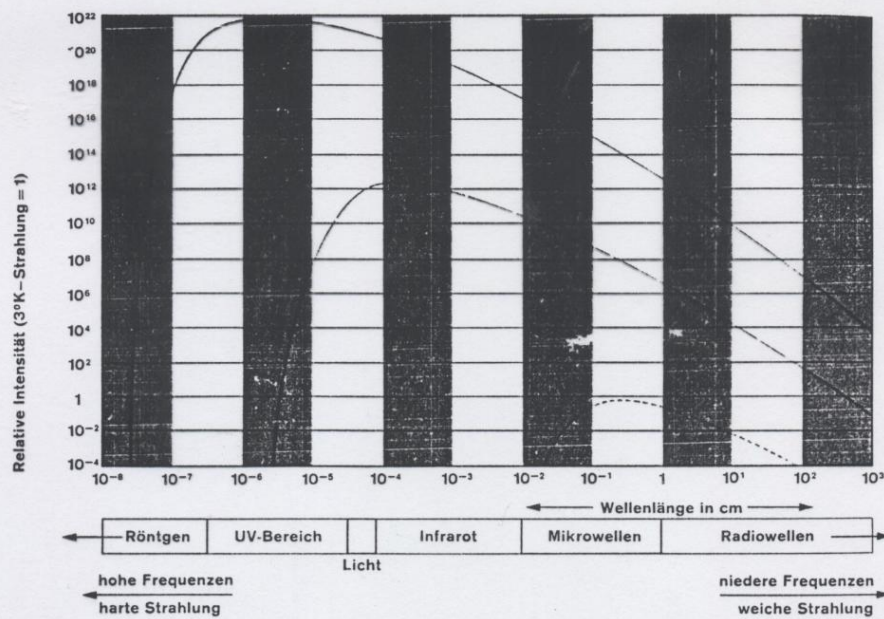
Stefan-Boltzmann:

$$S = \int_0^{\infty} \frac{c}{4} u(\nu, T) d\nu = \frac{2\pi^5 k^4}{15 c^2 h^3} T^4$$

$$\left[\int_0^{\infty} \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \frac{1}{15} \pi^4 \right]$$



Mit dieser imposanten Antenne, die von den Bell Telephone Laboratories ursprünglich für den Funkverkehr mit Satelliten gebaut wurde, empfingen A. A. Penzias und R. W. Wilson die 3°-K-Hintergrundstrahlung. (Nobelpreis 1978)



Verteilung der Energie in der Strahlung eines »Schwarzen Körpers«. Große Kurve: bei 1 000 000° K. mittlere Kurve: bei 5 600° K (Oberfläche der Sonne), kleine Kurve: bei 3° K. Bei steigender Temperatur wächst die abgestrahlte Energie für sämtliche Frequenzen; das Maximum verlagert sich immer weiter in den kurzweligen Bereich.