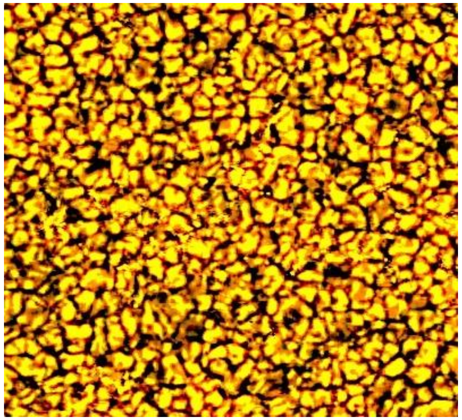


Konvektion an der Sonnenoberfläche

Transport von Wärme

- **Wärmeleitung:** Transport von Wärme ohne Teilchentransport
- **Konvektion:** durch Wärme getriebene Strömung von Gas/Flüssigkeit
- **Strahlung:** Emission elektromagnetischer Strahlung ("Licht")

Wärmestrahlung

Emittierte Leistung
ε : Emissionsvermögen

$$\boxed{P_{emittiert} = \varepsilon(T) \cdot dF \cdot d\Omega}$$

Absorbierte Leistung
A : Absorptionsvermögen

$$\boxed{P_{absorbiert} = A(T) \cdot P_{tot}}$$

$A_S = 1$ max. Absorptions- und Emissionsvermögen ("Schwarzer Körper")

Betrachte zwei gegenüberliegende Platten gleicher Temperatur:
Platte 1 emittiert P_1 und absorbiert $A_1 P_2$
Platte 2 emittiert P_2 und absorbiert $A_2 P_1$
Im Gleichgewicht:

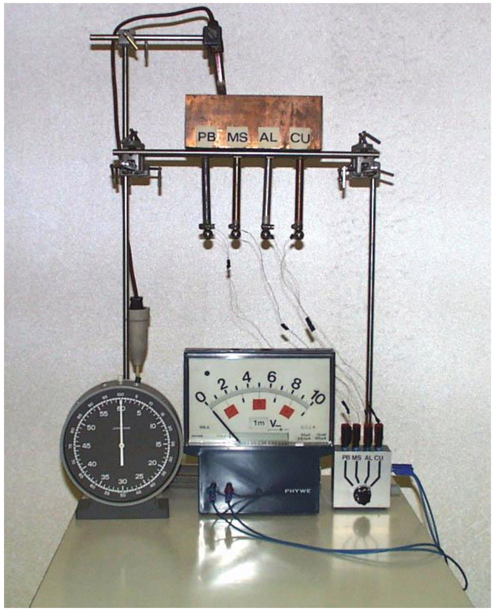
$$A_1 \cdot P_2 = A_2 \cdot P_1 \quad \rightarrow \quad \frac{P_1}{A_1} = \frac{P_2}{A_2} \quad \rightarrow \quad P \propto A$$

$$\text{z.B. } A_2 = A_S = 1 \quad \rightarrow \quad P_1 = A_1 \cdot P_S \quad \rightarrow \quad \boxed{P \propto A \propto \varepsilon}$$

Kirchhoffsches Strahlungsgesetz

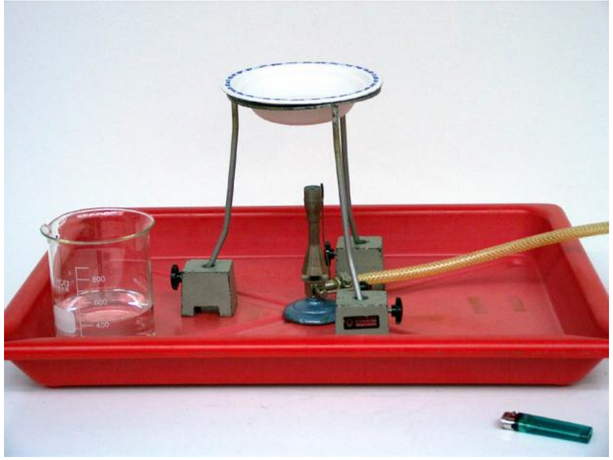
$$\frac{\varepsilon_1(T)}{A_1(T)} = \frac{\varepsilon_2(T)}{A_2(T)} = K(T)$$

Versuche zur Wärmeleitung



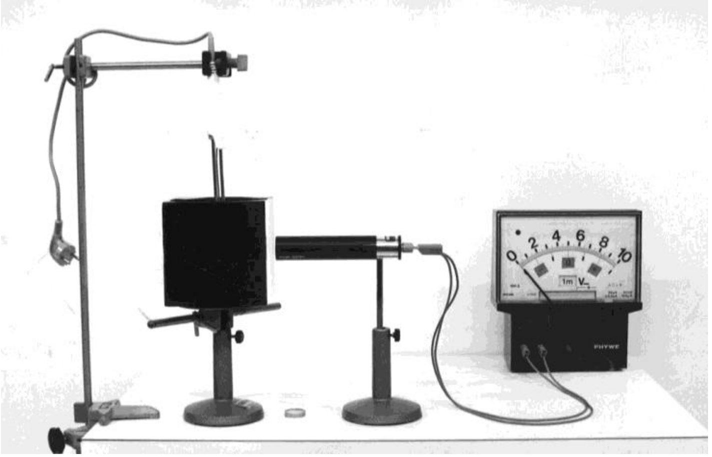
Vier verschiedene Metallstäbe sind mit einem Behälter mit heißem Wasser verbunden. Am anderen Ende befindet sich jeweils ein Thermoelement (Temp.messung) und eine mit Wachs angeklebte Kugel, die bei einer bestimmten Temperatur abfällt. Reihenfolge von guter zu schlechter Wärmeleitung mit Literaturwert der Wärmeleitfähigkeit bei 100° C:

- Kupfer	379 W/(mK)
- Aluminium	220 W/(mK)
- Messing	128 W/(mK)
- Blei	34 W/(mK)



Versuch zur Wärmeleitung: Wasser wird in einem Pappteller bis zum Sieden erhitzt, ohne dass der Teller brennt, da die Pappe durch Wärmeleitung die Temperatur des Wassers (höchstens 100 Grad C) annimmt.

Versuch zur Strahlungsemission

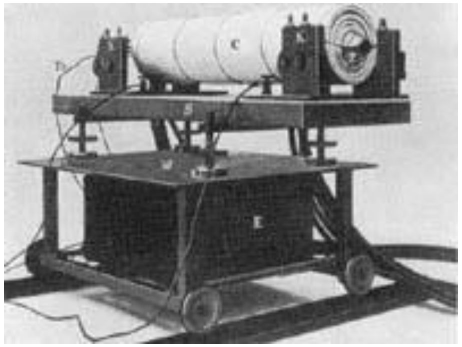


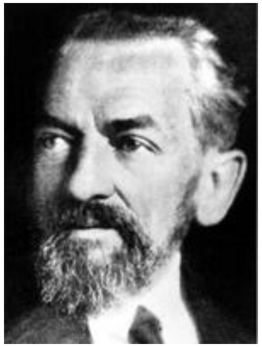
Leslie-Würfel: Ein hohler Würfel ist mit siedendem Wasser gefüllt, so dass alle Seitenflächen eine Temperatur von 100°C besitzen. Ein Strahlungs-messgerät (sog. Thermosäule) misst für jede Oberfläche eine andere Leistung, d.h. das Emissionsvermögen der Oberflächen unterscheidet sich. Messwerte in der Vorlesung :

Metall schwarz lackiert	3,4 mV
Metall weiß lackiert	3,2 mV
Metall matt	1,0 mV
Metall blank	0,6 mV

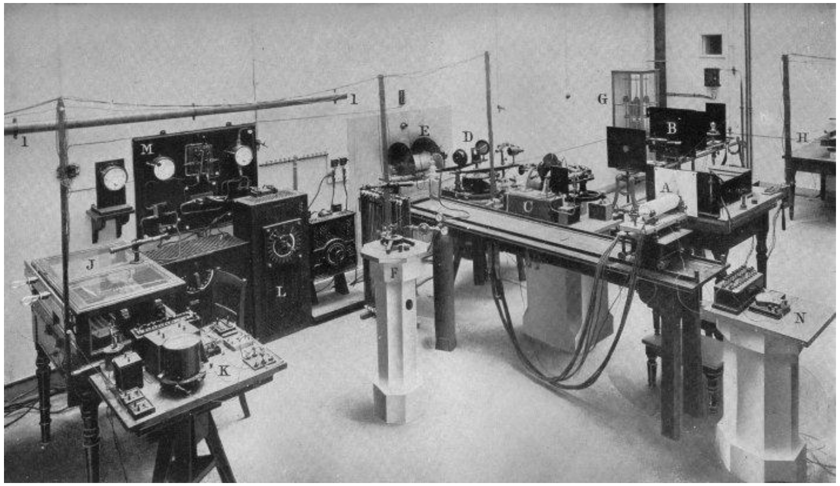
"Schwarzer Körper": Hohlraum mit kleiner Öffnung

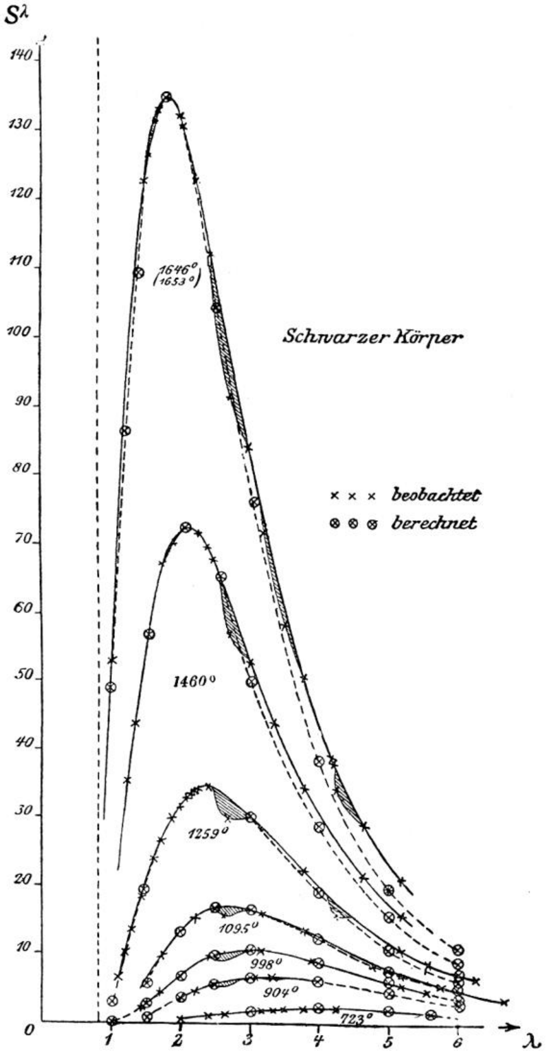
Einfallende Strahlung erleidet vielfache Reflexion, geringe Wahrscheinlichkeit des Wiederaustritts





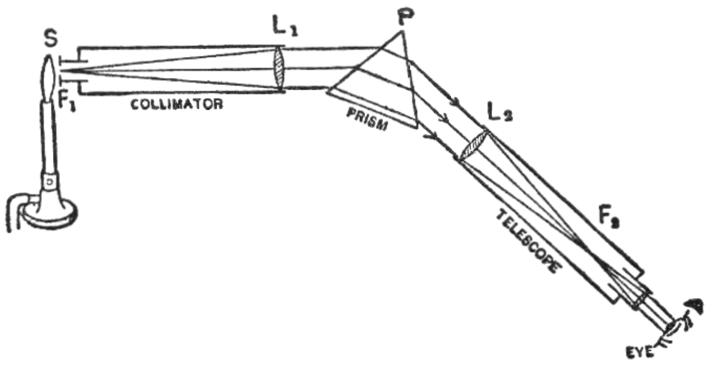
Otto Lummer
1860-1925

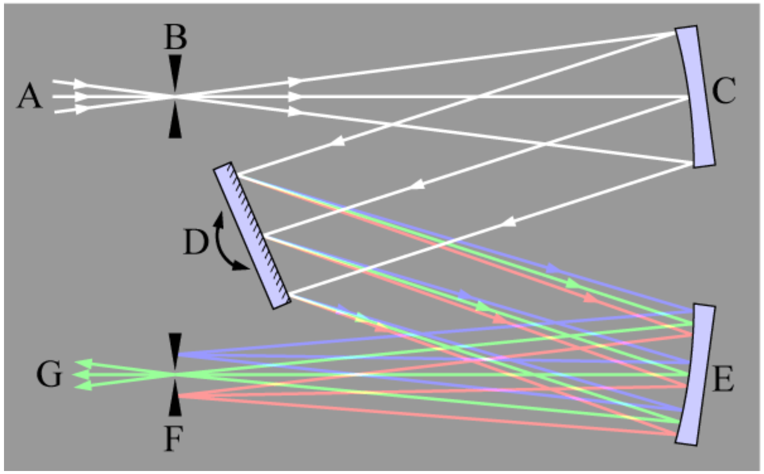


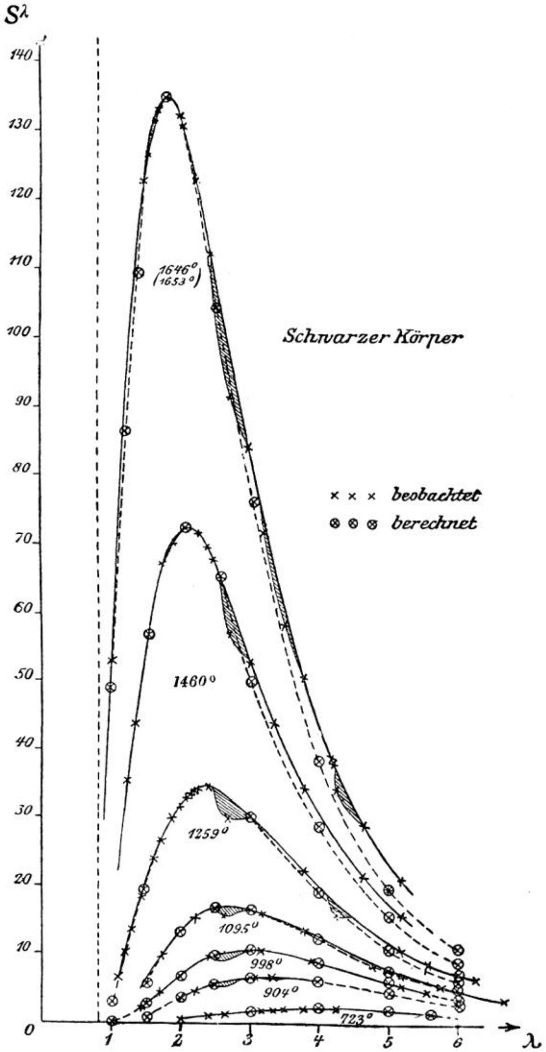


Spektroskopie

Spektrometer oder Monochromator mit Prisma oder Gitter

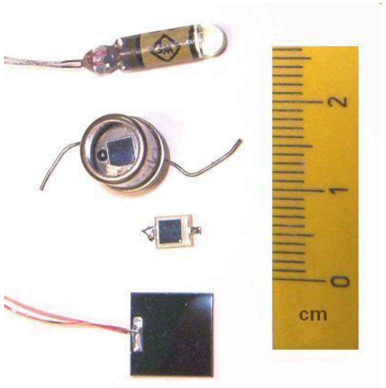


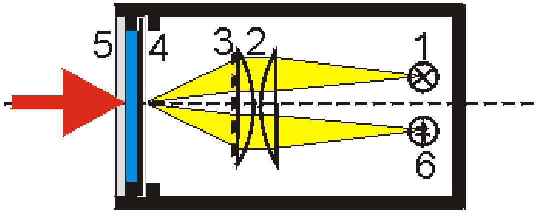


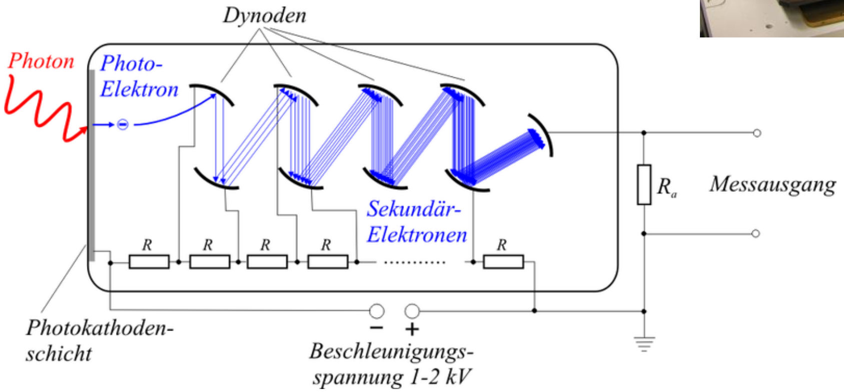


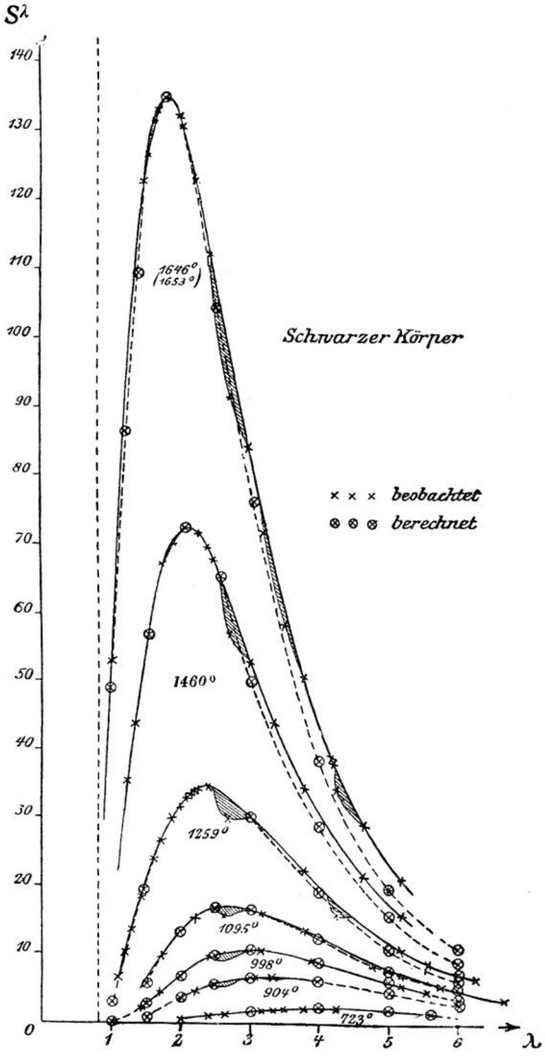
Spektroskopie

Intensitätsmessung mit
- Fotoplatte oder Film
- Fettfleck-Fotometer
- Fotozelle
- Fotomultiplier
- Fotodiode, CCD
- Thermosäule
- Golay-Zelle
- Bolometer







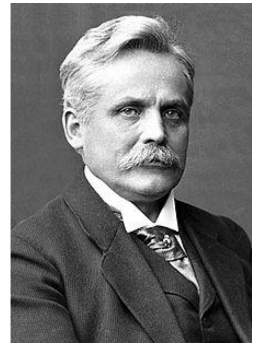


2. Grundlagen der Quantenmechanik

2.1 Das Spektrum des schwarzen Körpers

Josef Stefan
1835-1893

Ludwig Boltzmann
1844-1906



Wilhelm Wien
1864-1928

Stefan-Boltzmann-Gesetz (1873)
von der Fläche *A* emittierte Leistung

$$\boxed{P = 5{,}67 \cdot 10^{-8} \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2 K^4}} \cdot A \cdot T^4}$$

Wiensches Verschiebungsgesetz (1896)
Wellenlänge des spektralen Maximums

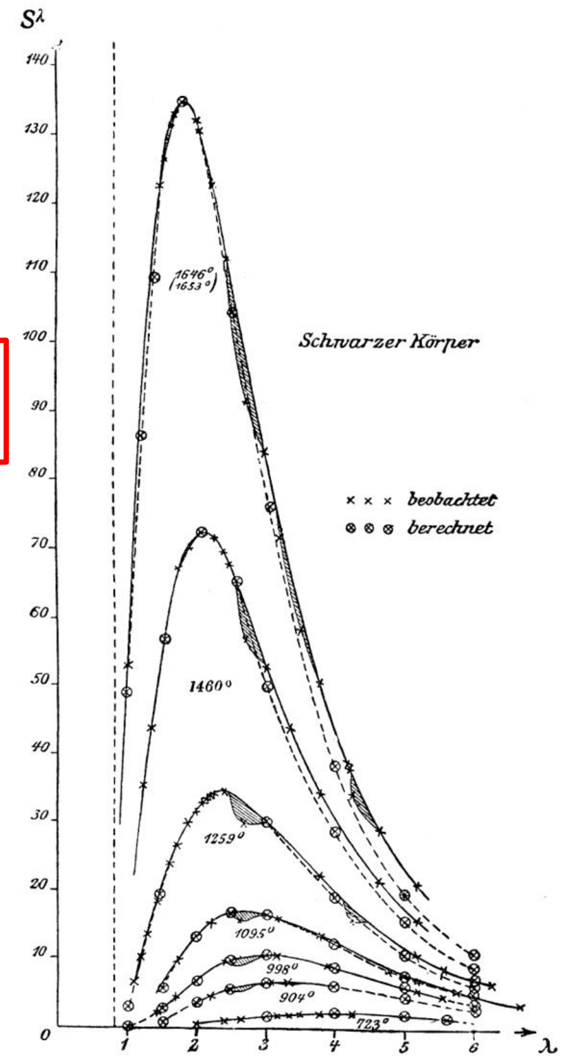
$$\boxed{\lambda_{\max} = 2898\,\mu\mathrm{m} \cdot \frac{\mathrm{K}}{T}}$$

Beispiel: Oberflächentemperatur der Sonne

a) spektrales Maximum bei 500 nm: $T = \dfrac{2898\,\mu\mathrm{m\,K}}{0{,}5\,\mu\mathrm{m}} = 5800\,\mathrm{K}$

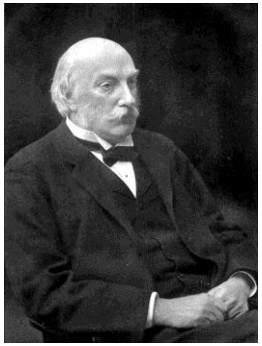
b) Solarkonstante ca. 1400 W/m^2
Sonnenradius $7 \cdot 10^8$ m; Sonnenabstand $1{,}5 \cdot 10^{11}$ m

$$T^4 = \frac{1400\,\mathrm{W\,m^2\,K^4}}{5{,}67 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{W}} \left(\frac{1{,}5 \cdot 10^{11}\,\mathrm{m}}{7 \cdot 10^8\,\mathrm{m}} \right)^2 = 0{,}11 \cdot 10^{16}\,\mathrm{K^4} \rightarrow T = 5800\,\mathrm{K}$$

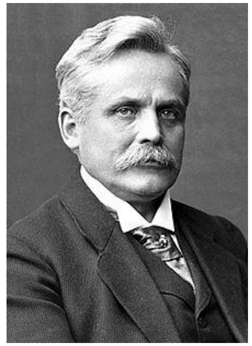


Herleitung

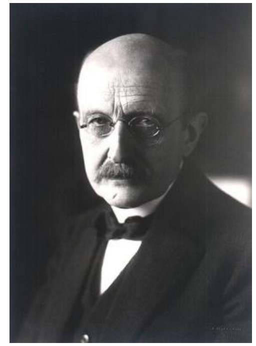
Sir James Jeans
1877-1946



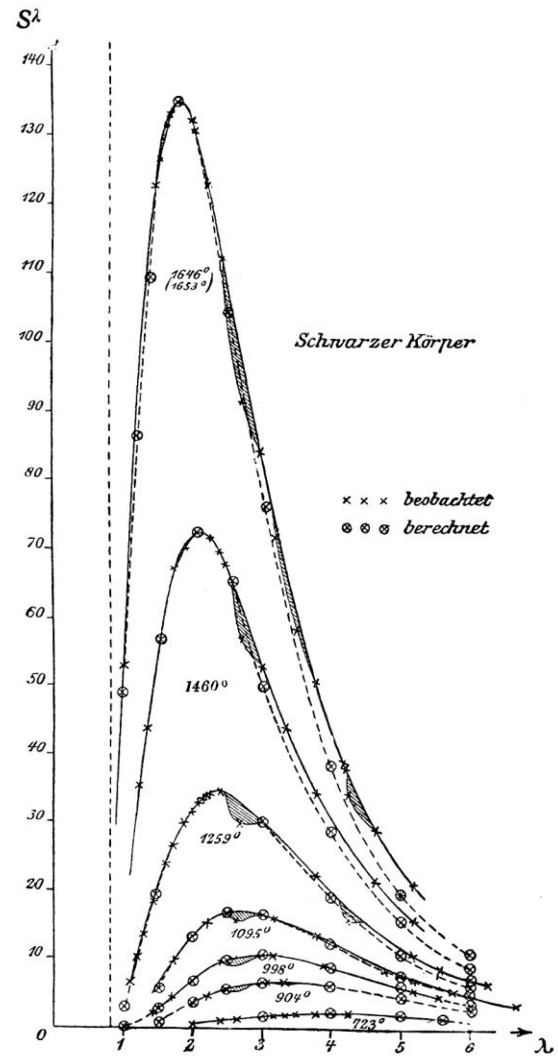
John Strutt
(Baron Rayleigh)
1842-1919



Wilhelm Wien
1864-1928



Max Planck
1858-1947



Wiensches Strahlungsgesetz (für kleine Wellenlängen)

$$P(\lambda) \propto \frac{1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{\text{const.}}{\lambda \cdot T}\right)} \cdot d\lambda$$

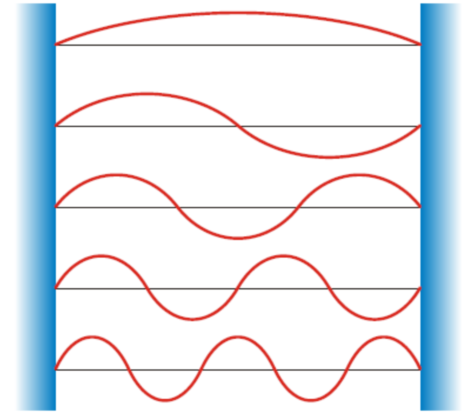
Rayleigh-Jeans-Gesetz (für große Wellenlängen)

$$P(\lambda) \propto \frac{1}{\lambda^4} \cdot d\lambda$$

Plancksche "Interpolation"

$$P(\lambda) \propto \frac{1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{\text{const.}}{k \cdot T}\right) - 1} \cdot d\lambda$$

Herleitung

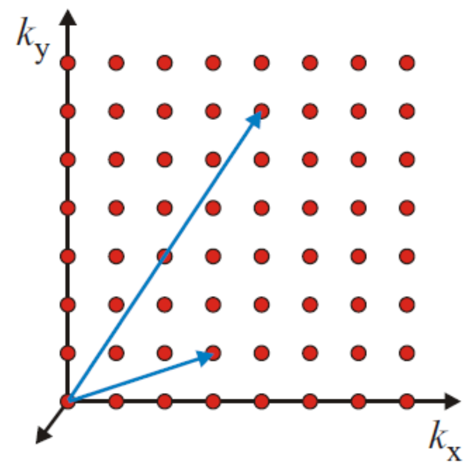


Schwingungsmoden im Hohlraumresonator

1-dimensionale Betrachtung (*n* ganzzahlig)

$$n \cdot \frac{\lambda}{2} = a \quad \rightarrow \quad k = \frac{\pi}{a} n \quad \text{mit} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Verallgemeinerung auf 3 Dimensionen (*n*, *m*, *q* ganzzahlig)



$$k = \frac{\pi}{a}\sqrt{n^2 + m^2 + q^2}$$

$$V_E = \frac{\pi^3}{a^3}$$ Volumen der Einheitszelle im *k*-Raum

$$V_k = \frac{1}{8} \cdot \frac{4\pi}{3} \cdot k^3$$ Volumen einer 1/8 Kugel mit Radius *k* im *k*-Raum

$$N_k = 2\frac{V_k}{V_E} = \frac{1}{3}\frac{a^3}{\pi^2}k^3$$ Zahl der Moden bis zur Wellenzahl *k* (Faktor 2 weil 2 Polarisationsrichtungen)

$$\frac{N_k}{V} = \frac{N_k}{a^3} = \frac{1}{3\pi^2}k^3 = \frac{8\pi}{3c^3}\upsilon^3 \quad \text{mit} \quad k = \frac{2\pi\upsilon}{c}$$ Zahl der Moden bis zur Frequenz υ pro Volumen des Resonators

$$\frac{d}{d\upsilon}\left(\frac{N_k}{V}\right) = \frac{8\pi}{c^3}\upsilon^2 \quad \rightarrow \quad \boxed{\frac{8\pi}{c^3}\upsilon^2 d\upsilon}$$ Zahl der Moden im Frequenzintervall υ *und* $\upsilon + d\upsilon$ pro Volumen des Resonators ("spektrale Modendichte")