

**Tell me, I will forget  
Show me, I may remember  
Involve me, and I will understand**  
*Chinesisches Sprichwort*

## **Strahlungsgesetze**

⇒ **Stefan-Boltzmann Gesetz**



⇒ **Wiensches Verschiebungsgesetz**



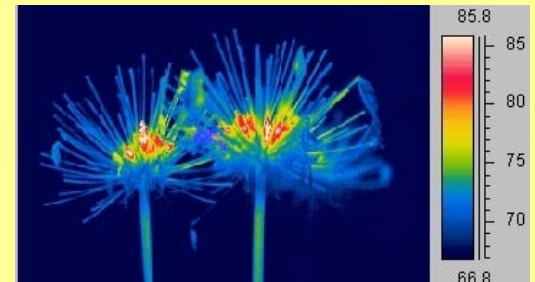
⇒ **Plancksches Strahlungsgesetz**



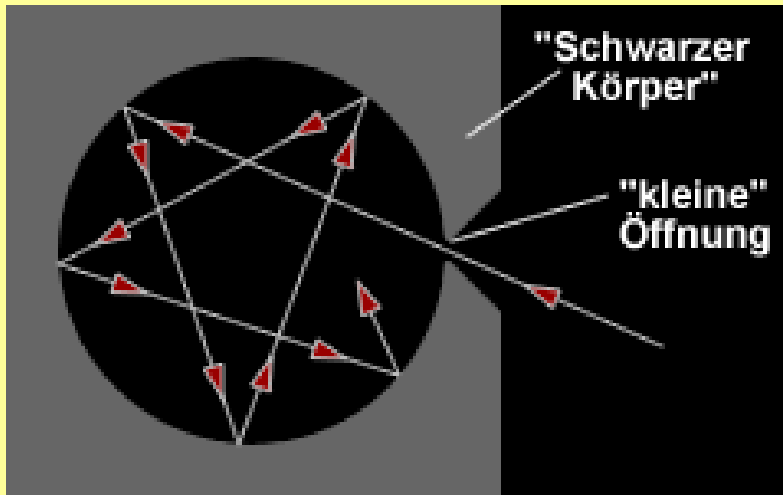
# STRAHLUNG

## Beobachtungen und Fragen:

- Die Materie erscheint uns farbig. Die Farben entstehen dann, wenn die Atome der Materie Licht im sichtbaren Spektralbereich emittieren
- Optische und thermische Wahrnehmung der Strahlung
- Warum senden erwärmte Körper (z.B. Glühlampenwendel) eine Strahlung - VIS, UV und IR - „Licht“ aus ?
- Warum fangen heiße Herdplatten an zu glühen?
- Kann man aus dem Spektrum eines Sternes die Temperatur seiner Oberfläche erfahren?
- Gelingt es berührungsfrei die Temperatur zu messen? Gibt es einen Zusammenhang zwischen Temperatur und Wellenlänge?



- Dunkle Körper absorbieren gut die aufgetroffene Strahlung (vor allem in jenem Wellenlängenbereich in dem sie dunkel erscheinen).
- Die beste (maximale) Absorption hat ein idealer schwarzer Körper. Die auffallende Strahlung wird zur Gänze absorbiert und in Wärme umgewandelt.
- Mit dem Modell des "Schwarzen Körpers" kann man einen Teil des elektromagnetischen Spektrums - Strahlung von Objekten - beschreiben, weil dieser nur durch ihre Temperatur bestimmt wird.



Ein idealer **schwarzer Strahler** ist ein physikalisches **Gedankenmodell**.

Schwarzer Strahler ist ein Körper, der alle Strahlung in allen Wellenlängen, die auf ihn trifft, absorbiert und ist auch in der Lage, in allen Wellenlängen Strahlung zu emittieren.

Es dient als Grundlage für sowohl theoretische Betrachtungen als auch als Referenz für praktische Untersuchungen elektromagnetischer Strahlung.

*Mögliche Realisierung des „schwarzen Körpers“*

# Schwarzer Körper (schwarzer Strahler) (in der Physik)

- Schwarze Körper sind Gegenstände, die **kein Licht reflektieren**
- Reale Objekte reflektieren immer irgendwelches Licht. Das Verhalten von schwarzen Körpern ist aber besonders leicht zu berechnen.
- Modell – **Hohlraum**
- Dass ein Körper kein Licht reflektiert bedeutet nicht, dass er nicht strahlen kann. Tatsächlich kann das Leuchten einer Glühlampe oder der Sonne gut als Strahlung in Referenz zu Strahlung eines schwarzen Körpers beschrieben werden.
- Je nach der **Temperatur** werden unterschiedliche **Wellenlängen** abgestrahlt
- Die Theorie der schwarzen Körper ist zugleich die Theorie der Wärmestrahlung. Ein Mensch, der etwa 37 Grad warm ist, strahlt **infrarotes Licht** ab. Infrarotlicht wird daher oft "Wärmestrahlung" genannt.

⇒ **Für Physiker (und nun auch für die Biologen) ist die Sonne also beinahe ein „schwarzer Strahler“**

Wissenschaftlich und historisch betrachtet liegt der interessante Aspekt der **Schwarzkörperstrahlung** darin, dass ihre **Beschreibung** mit klassischen physikalischen Prinzipien **nicht möglich** war, was zu der Entwicklung der **Quantenmechanik** beitrug.

## Beschreibung der Strahlung

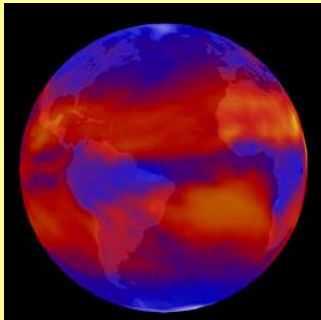
- Infrarotstrahlung ist im Vergleich zu sichtbarem Licht langwellig. Macht man einen Körper nun heiß, so wird seine Wärmestrahlung immer kurzwelliger und man kann erreichen, dass er sichtbares Licht abstrahlt. So ist es zu erklären, dass eigentlich schwarze Kohlen beim glühen rot werden.

- Strahlungsintensität ist durch die **EMITTANZ „E“** gegeben:

$$E = \frac{\text{Strahlungsleistung}}{\text{Fläche}} \left[ \text{Wm}^{-2} \right]$$

- Trifft auf ein Objekt eine Strahlung auf, so wird sie von diesem absorbiert und / oder reflektiert. Absorption und Reflexion einer Strahlung hängt von der Beschaffenheit des Körpers ab.

Das **Absorptionsvermögen A** ist definiert:



Emittanz der Erde (NASA)

$$A = \frac{\text{absorbierte Leistung}}{\text{aufgetroffene Leistung}} \left[ - \right]$$

**Schwarzer Körper:  $A = 1$ , d.h. die aufgetroffene Leistung wird zur Gänze in Wärme umgewandelt.**

**Emittanz E und Absorptionsvermögen A** sind Funktionen der Temperatur und Beschaffenheit des Körpers (hell, dunkel, glatt, rauh).

Experimentell wurde festgestellt, daß für jede Wellenlänge

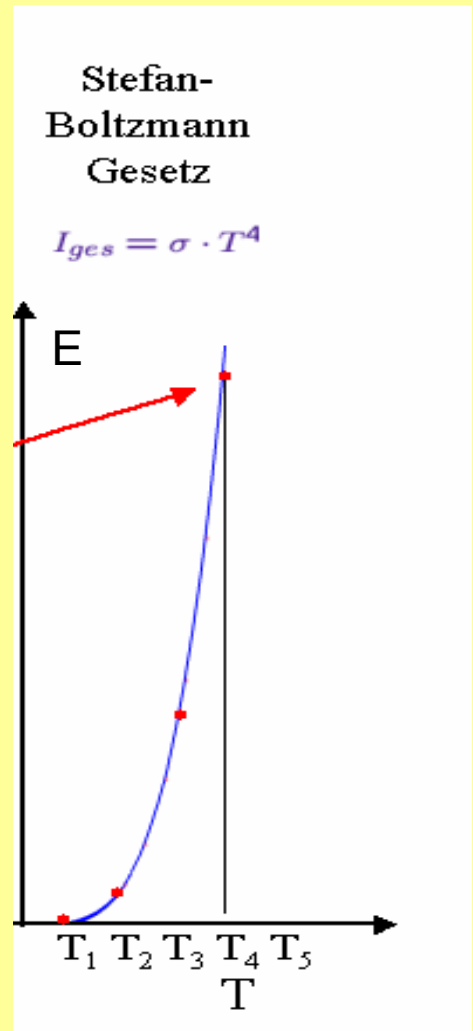
**$E/A = \textit{konstant}$**  (Kirchhoffsches Gesetz)

Ende des 19. Jahrhunderts war das Interesse an der Wärmestrahlung sehr groß und man versuchte mit Hilfe der damals recht jungen *Physik der Wärme* - der *Thermodynamik* oder *statistischen Physik* - diese Strahlung zu erklären.

**J. Stefan und L. Boltzmann** gelang es, die Abhängigkeit der gesamten Strahlungsenergie von der Temperatur vorherzusagen:

$$E_{ges} = A \cdot \sigma \cdot T^4, \sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} [Wm^{-2}K^{-4}]$$

Wird ein Körper wärmer, so strahlt er überproportional viel Wärme ab. Seine Emittanz hängt nur von seiner Temperatur ab. **Für nicht schwarze Körper:  $A < 1$ .**



# Wiensches Verschiebungsgesetz (Wilhelm Wien)

Erhitzt man zunehmend einen Körper, so wird seine Wärmestrahlung immer kurzwelliger und man kann erreichen, dass er sichtbares Licht abstrahlt. Die Regel, dass die **Wellenlänge der Wärmestrahlung bei steigender Temperatur kleiner wird (Rotglut→Weissglut (bläulich))**, nennt man nach dem Physiker Wilhelm Wien **Wiensches Verschiebungsgesetz**. Dieses Gesetz wurde empirisch gefunden:

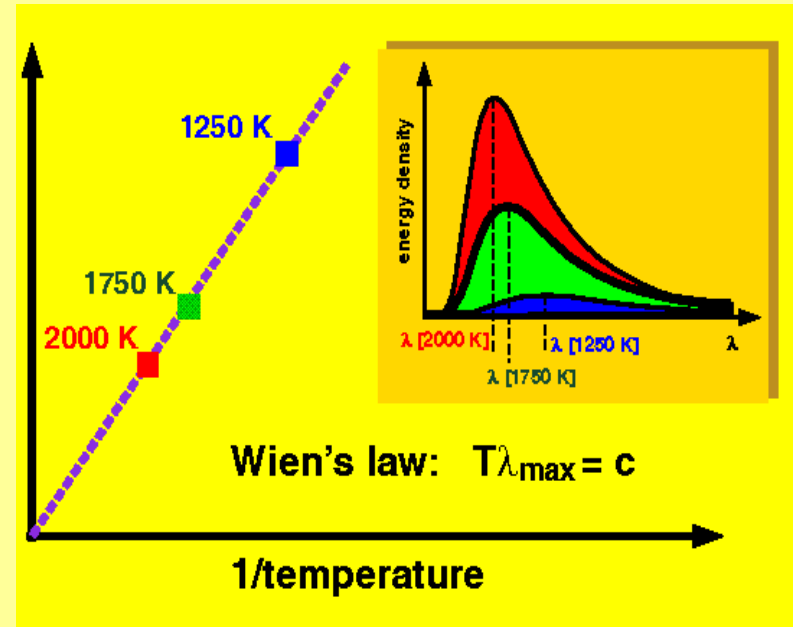
$$\lambda_{MAX} \cdot T = b = 2.89 \cdot 10^{-3} \text{ [mK]}$$

Also die **Temperatur eines Körpers** sagt genau welche **Wellenlänge Strahlung** vorzugsweise abstrahlt wird.

**Beispiel:** Sehr heißes Eisen glüht hell, weniger heißes Eisen glüht dunkelrot und warmes Eisen strahlt nichtsichtbares infrarotes Licht als Wärme ab.

Wieso ? Wie kann man es erklären ?

*Nicht klassisch, aber quantenmechanisch → ...  
..... Planksches Strahlungsgesetz*



Zuerst aber einige Beispiele:

## Beispiele:

Ausgestrahlte Leistung eines Kachelofens mit  $3\text{m}^2$  Oberfläche.

Ann. Schwarzer Körper ( $A=1$ ). Oberflächentemp.  $T = 60^\circ\text{C}=333\text{K}$ .  $\rightarrow E = 700 \text{ Wm}^{-2}$ .

Also für den Kachelofen erhalten wir eine Leistung  $P = 2100 \text{ W}$ .

### Interessanter Vergleich:

$3\text{m}^2$  Sonne emittieren bei einer Oberflächentemperatur von  $6000\text{K}$  eine Leistung von etwa  $221 \text{ MW}$  (!). Mit dieser Energie könnte man ungefähr  $15000$  Einfamilienhäuser im Winter beheizen.

Bei der Temp. von  $T=6000\text{K}$  ist  $\nu_{\text{max}}=6,0 \cdot 10^{14}\text{s}^{-1}$ ,  $\lambda=550 \text{ nm}$ .

Die Glühwendel einer Glühbirne hat  $T \sim 2800\text{K} \rightarrow \lambda_{\text{max}}=970 \text{ nm}$ , d.h. Maximum der Lichtemission liegt im **IR**. Somit wird für die Beleuchtung nur ein geringer Prozentsatz der emittierten Strahlung genutzt. Die LICHTAUSBEUTE  $\eta$  für eine Glühbirne :

$$\eta = \frac{\text{emittierte sichtbare Lichtleistung}}{\text{aufgewandte elektrische Leistung}} \ll 1$$

Auch bei Zimmertemperaturen von  $T=300\text{K}$  strahlen alle Körper Energie als Wärmeenergie mit dem Maximum bei etwa  $\lambda_{\text{max}} \sim 9700\text{nm} = 9,7\mu\text{m}$  ab.



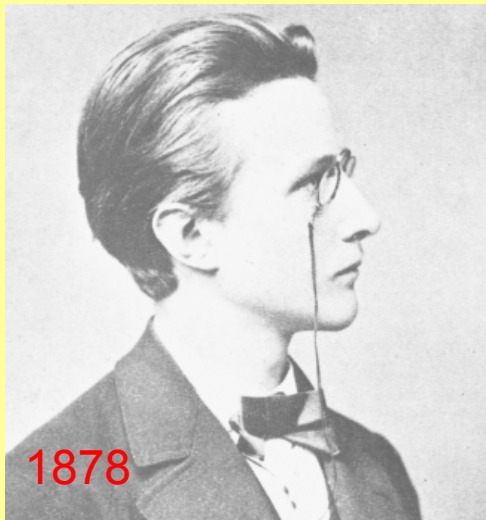
# Die Geburtsstunde der Quantenmechanik

14. Dezember 1900

Deutschen Physikalischen Gesellschaft in Berlin

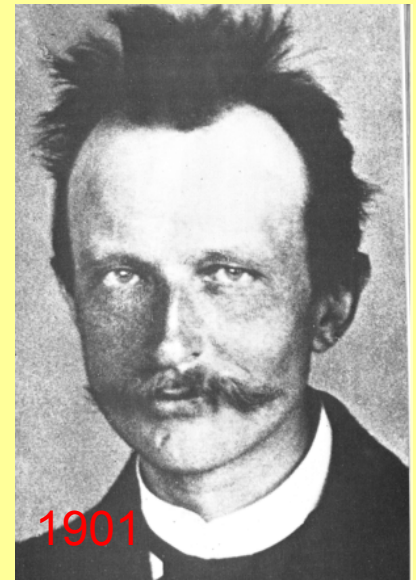
"Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum,,  
Von Max Planck

*"Kurz zusammengefasst kann ich die ganze Tat als einen Akt der Verzweiflung bezeichnen. Denn von Natur bin ich friedlich und bedenklichen Abenteuern abgeneigt."*



## Plancksches Strahlungsgesetz Max Planck (1858 – 1947), Nobelpreis 1918.

$$E \cdot d\lambda = \frac{c^2}{\lambda^5} h \cdot \frac{1}{e^{\frac{c \cdot h}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1} d\lambda$$



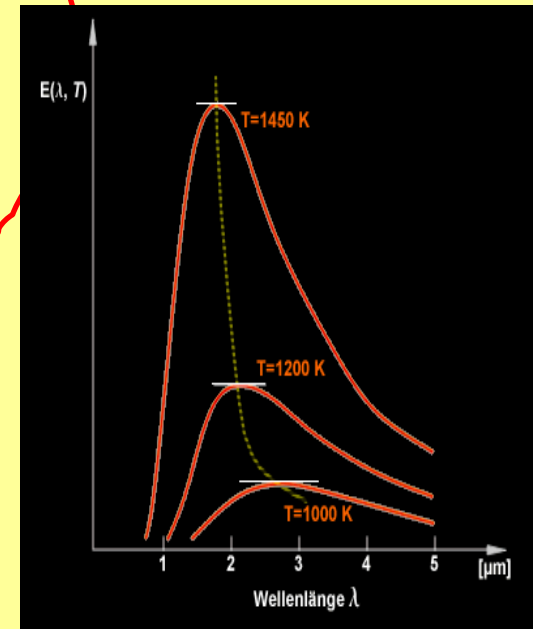
**Schwingungsfähige Systeme** (Atome) in s. Körper nehmen die Wärmeenergie auf und **werden zu Schwingungen** angeregt. Die Schwingung einzelner Systeme (Oszillatoren) **steigt mit Temp.** Diese **Oszillatoren** (bewegte Ladungen) **geben** dann diese Energie als **Strahlung ab**.

Planck ist es gelungen mit der berühmten Annahme ( $E=h \cdot f$ ) dass die Oszillatoren die Energie nur in Quanten von  $hf$  abgeben können das Strahlungsgesetz, welches nun seinen Namen trägt **abzuleiten**,

wobei  $c = 2,99 \cdot 10^8$  m/s,  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Js und  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K,

E entspricht der ausgestrahlten Leistung in  $W/m^2$  im Wellenlängenintervall  $\lambda, \lambda+d\lambda$ .

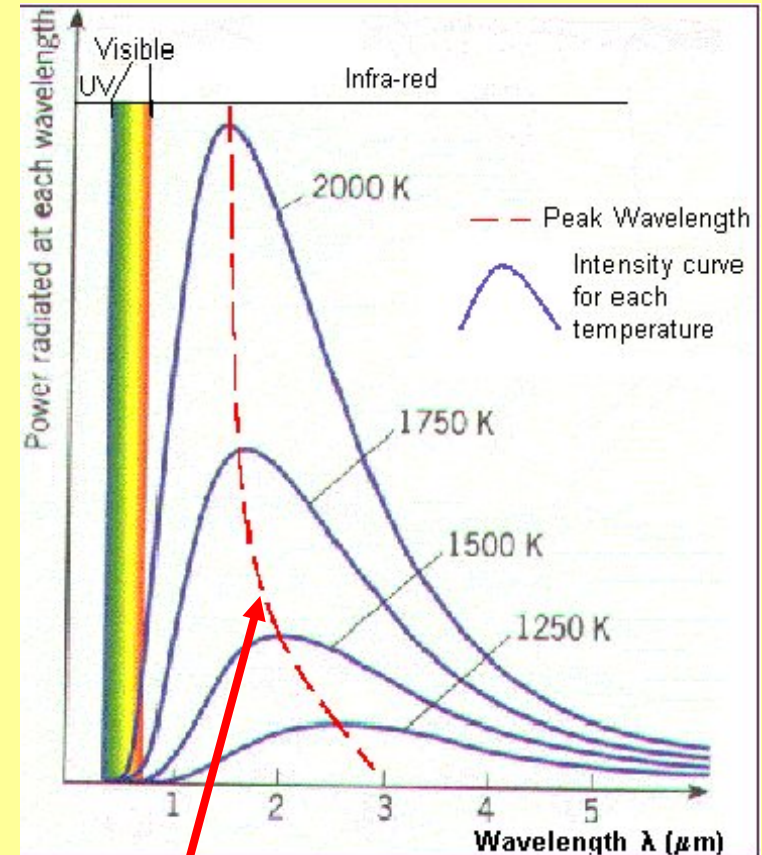
Die gesamte ausgestrahlte Energiemenge ergibt sich durch Berechnung der Fläche unter der Kurve, die Wellenlänge der maximalen Emission liegt im Maximum der Kurve.



# Tiefere Temperaturen – Strahlungskurvenmaxima liegen im IR

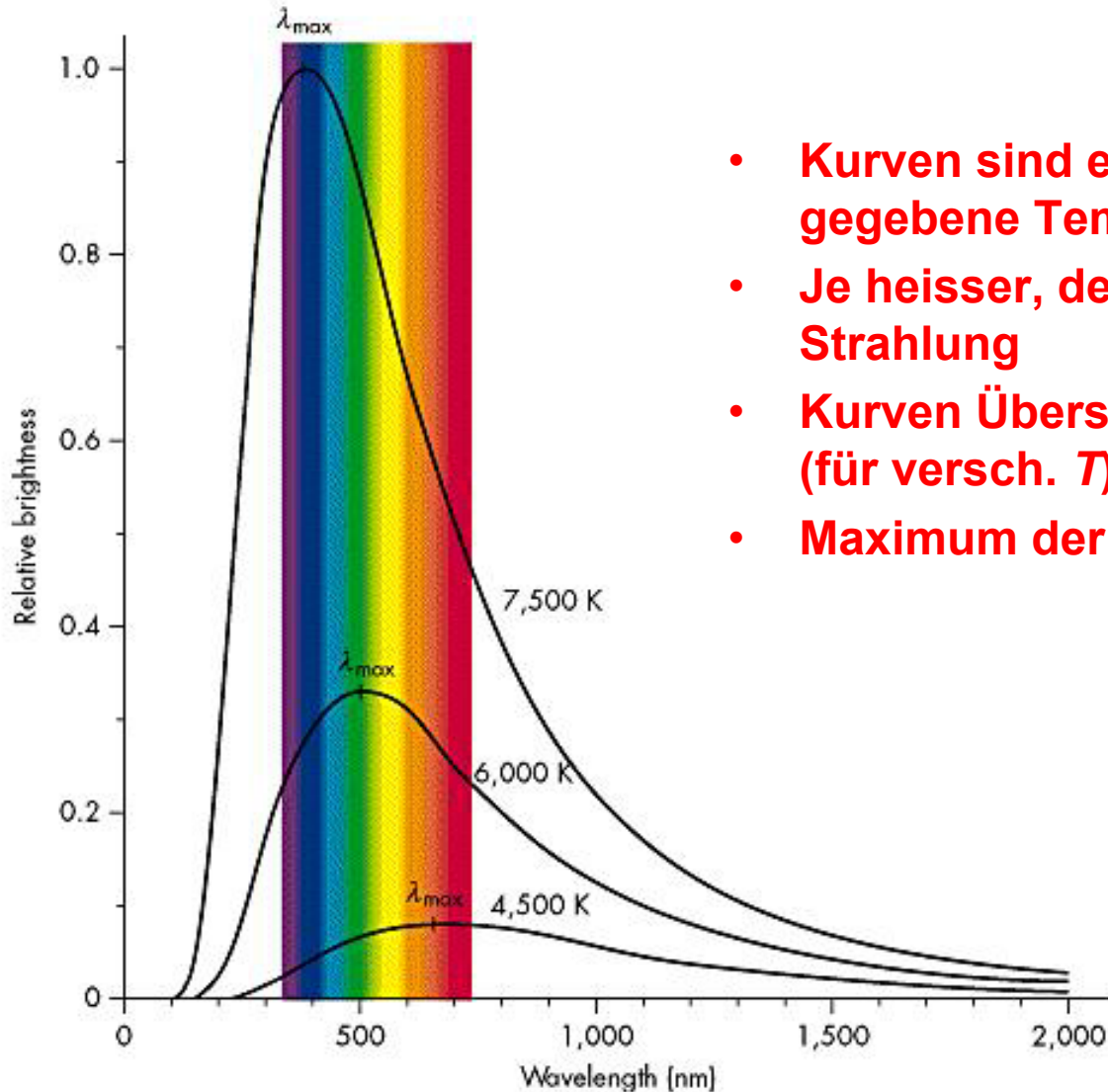
## Spektrale Energieverteilung:

- Typischer Kurvenverlauf
- Fläche unter Kurven nimmt mit Temperatur zu
- Um Strahlung im Sichtbaren zu haben  
 $T \rightarrow 5000\text{K}$
- Bei  $T < 3000\text{K} \rightarrow$  IR Strahlung



Gesamtintensität  $\propto T^4$   
Stefan-Boltzmann  
Gesetz

Wiensches Verschiebungsgesetz:  
 $\lambda_{\text{max}} * T = \text{const}$



- Kurven sind eindeutig für gegebene Temperatur
- Je heisser, desto intensiver die Strahlung
- Kurven Überschneiden sich nicht (für versch.  $T$ )
- Maximum der Kurve  $\Rightarrow$  „Farbe“

Ein „strahlendes“ System kann Energie nicht in beliebigen Portionen aussenden sondern nur in ganzzahligen Vielfachen des **Energiequantums  $E=hf=h(c/\lambda)$**

Die Gesamtemission des schwarzen Strahlers über alle Wellenlängen integriert entspricht der Fläche der Planck-Kurve

Plancksches Strahlungsgesetz

$$E \cdot d\lambda = \frac{c^2}{\lambda^5} h \cdot \frac{1}{e^{\frac{c \cdot h}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1} d\lambda$$

Durch Nullsetzen der Ableitung nach  $d\lambda$  des Planckschen Strahlungsgesetzes ergibt sich bei welcher Wellenlänge das Maximum der Strahlung eines schwarzen Körpers liegt

$$E_{ges} = A \cdot \sigma \cdot T^4$$
$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ [Wm}^{-2}\text{K}^{-4}\text{]}$$

Gesamtemission des schwarzen Strahlers  
Stefan-Boltzmann G.

$$\lambda_{MAX} \cdot T = b$$
$$b = 2.89 \cdot 10^{-3} \text{ [m} \cdot \text{K]}$$

Lage des Emissionsmaximums  
Wiensches Verschiebungsgesetz