

Medizinische Biophysik

Licht in der Medizin. Eigenschaften des Lichts, Emissionsspektrometrie

5. Vorlesung
05. 10. 2022

IV. Teilchencharakter des Lichtes

- a) Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt)
- b) Photon, Photonenenergie

V. Energietransport im Licht (in Strahlungen)

- a) Größen zur Beschreibung des Energietransports
- b) Strahlungsquellen mit verschiedener Geometrie

VI. Lichtemission

1. Emissionsspektrometrie

- a) Emissionsspektrum
- b) Messung des Emissionsspektrums – Aufbau eines Spektrometers
- c) Monochromator
- d) Lichtdetektor

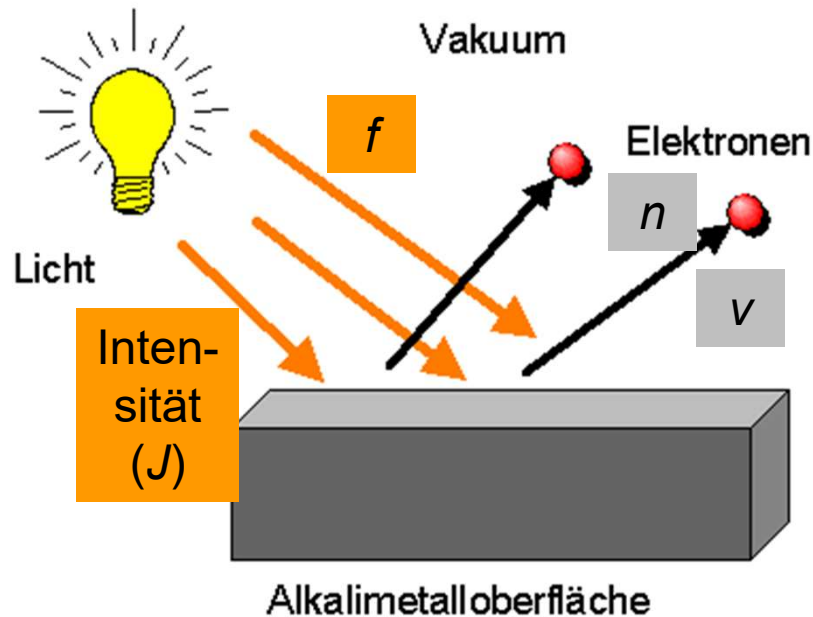
2. Temperaturstrahlung

- a) Qualitative Beschreibung
- b) Größen zur quantitativen Beschreibung
- c) Gesetze: Wiensches Gesetz, Stefan-Boltzmann-Gesetz
- d) Anwendungen: IR-Therapie, IR-Diagnostik, Wärmehaushalt des Körpers

IV. Teilchencharakter des Lichtes

a) Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt)

$$c = \lambda \cdot f$$



Man variiert:

- die Frequenz (f) des Lichtes
- die Intensität (J) des Lichtes

Man beobachtet:

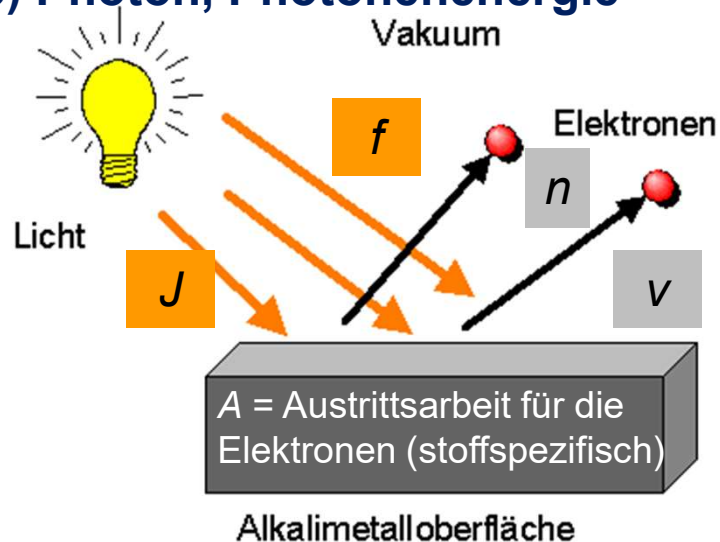
- die Zahl der ausgelösten Elektronen (n)
- die Geschwindigkeit der Elektronen (v)

Beobachtungen:

Es gibt eine minimale Frequenz (f_{\min}), für welche

- $f < f_{\min} \Rightarrow n = 0$, egal wie groß J ist;
- $f_{\min} \leq f \Rightarrow$ Elektronen werden ausgelöst
 - n wächst mit wachsender J
 - v wächst mit wachsender f

b) Photon, Photonenenergie



Ein Photon tritt in Wechselwirkung mit einem Elektron!

Es gibt eine minimale Frequenz (f_{\min}), für welche

- $f < f_{\min} \Rightarrow n = 0$, egal wie groß J ist;
- $f_{\min} \leq f \Rightarrow$ Elektronen werden ausgelöst
 - n wächst mit wachsender J
 - v wächst mit wachsender f

$$\varepsilon = h \cdot f$$

plancksche Konstante
 $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

$$h \cdot f_{\min} = \varepsilon_{\min} = A$$

$$f < f_{\min} \Rightarrow h \cdot f = \varepsilon < A \Rightarrow \text{Kein Elektron wird ausgelöst}$$

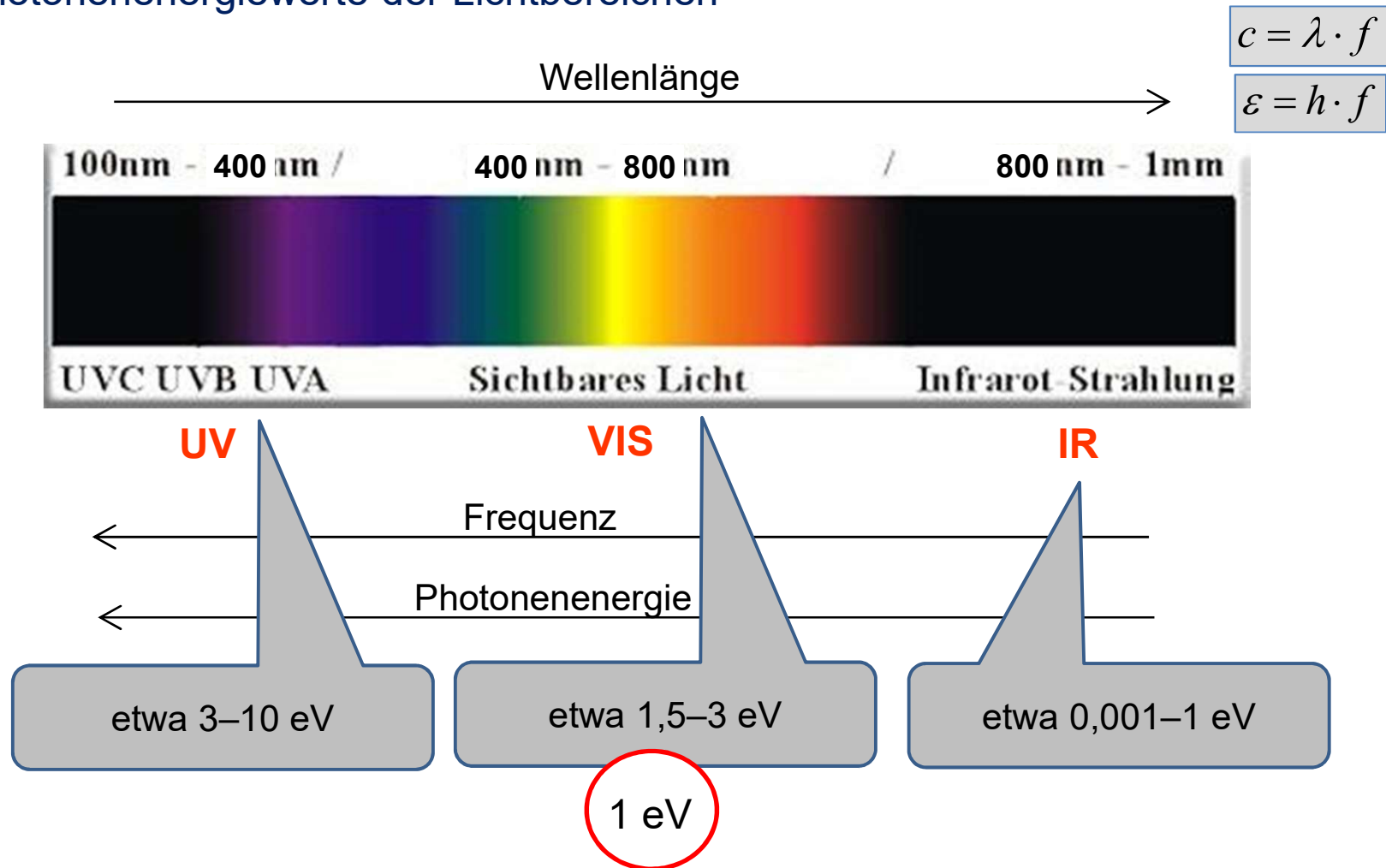
$$f_{\min} < f \Rightarrow A < h \cdot f = \varepsilon \Rightarrow \text{Elektron wird ausgelöst}$$

Energieerhaltungssatz für den Photoeffekt:
$$\varepsilon = A + \frac{1}{2} m_{\text{Elektron}} v_{\text{Elektron}}^2$$

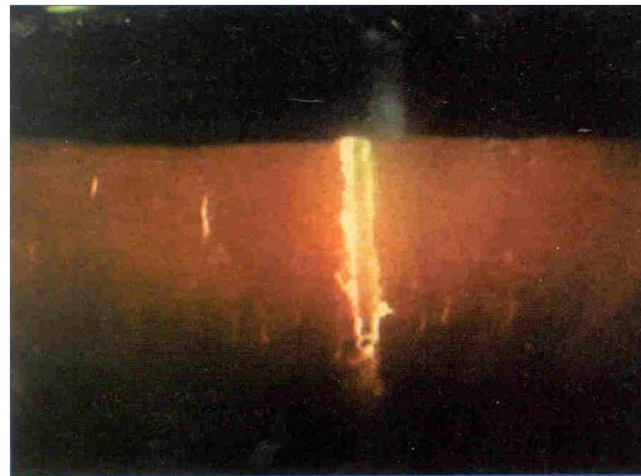
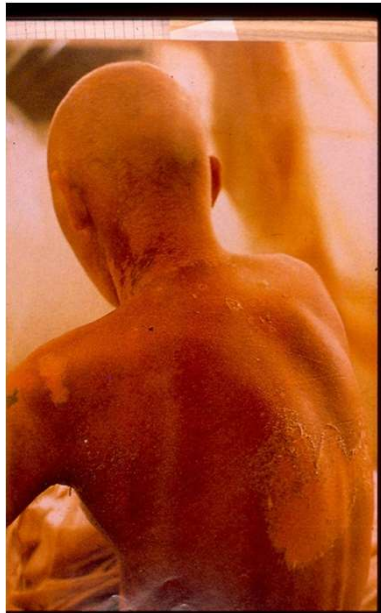
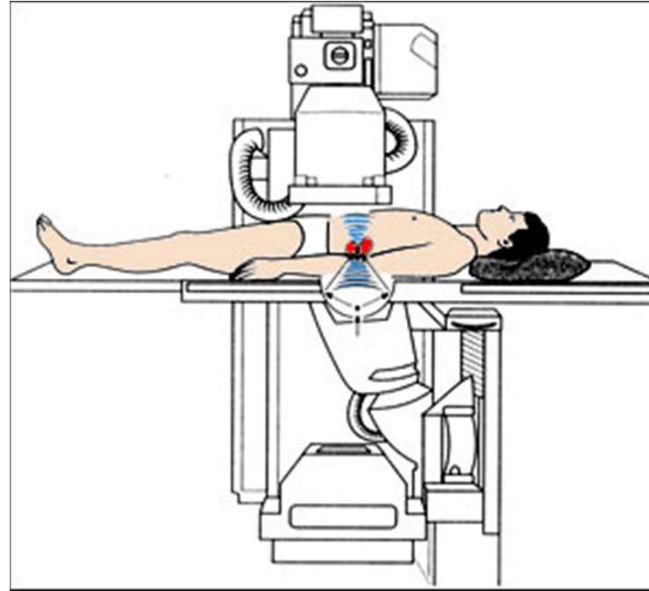
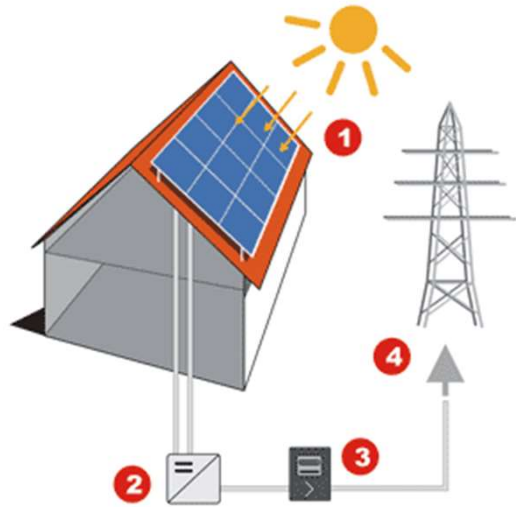
Bei zunehmender Intensität (mehr Photonen) werden mehr Elektronen ausgelöst.

Bei zunehmender Frequenz wird die kinetische Energie und v des Elektrons größer.

- Photonenenergiewerte der Lichtbereiche



V. Energietransport im Licht (in Strahlungen)



a) Größen zur Beschreibung des Energietransports:

„Teilnehmer“ der Strahlungsvorgänge

Strahlungsleistung (P):

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (\text{W})$$



Strahlenquelle



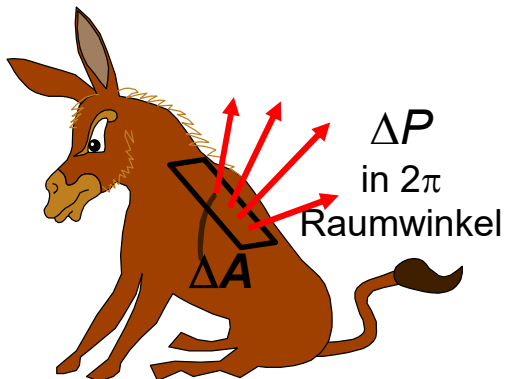
Strahlung



bestrahlter
Körper

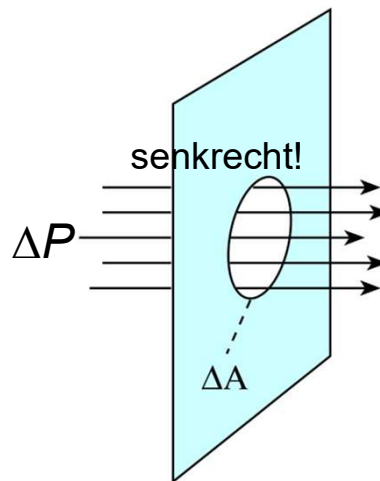
**Spezifische Ausstrahlung
(M):**

$$M = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)$$



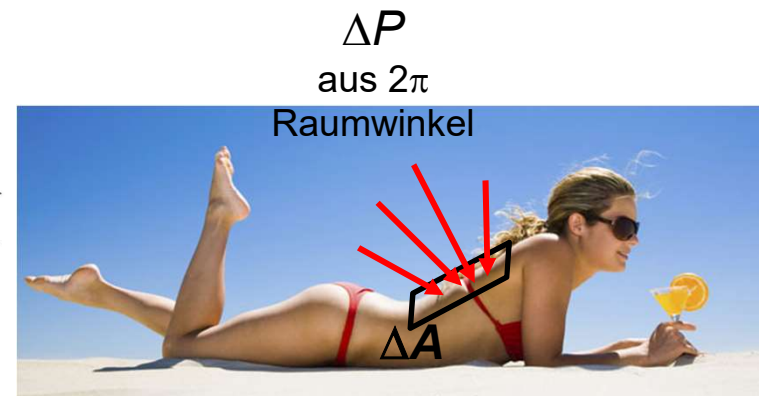
**Strahlungsintensität
(J):**

$$J = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)$$

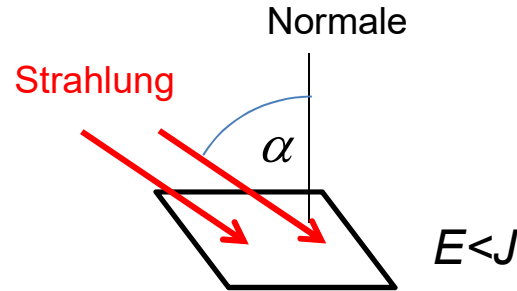
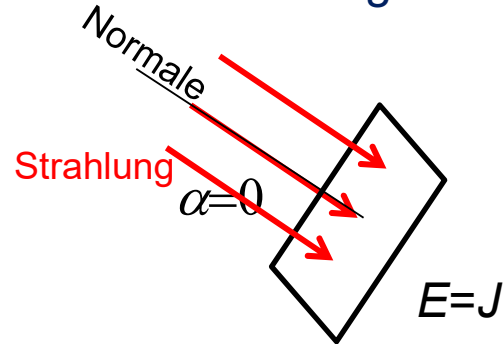


**Bestrahlungsstärke
(E):**

$$E = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)$$

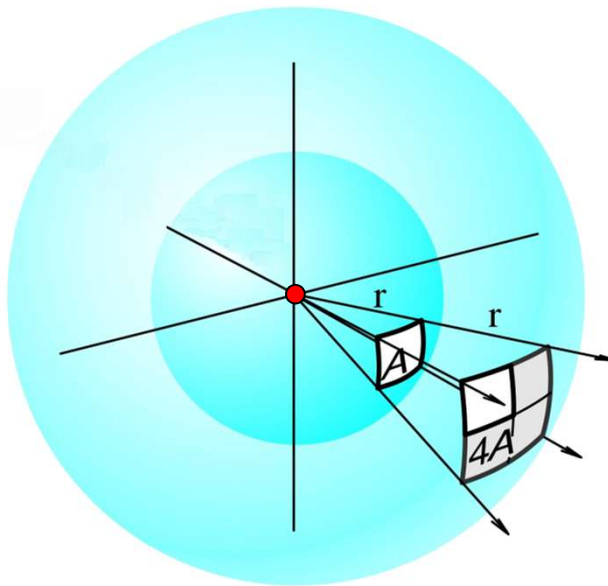


- Zusammenhang zwischen J und E :

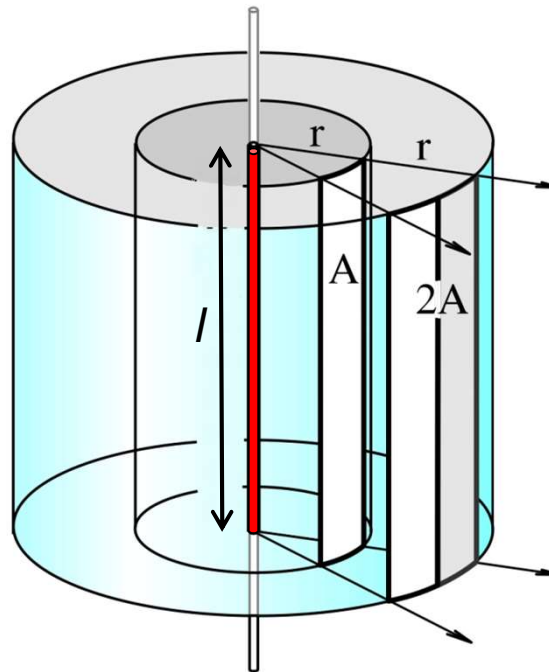


b) Strahlungsquellen mit verschiedener Geometrie:

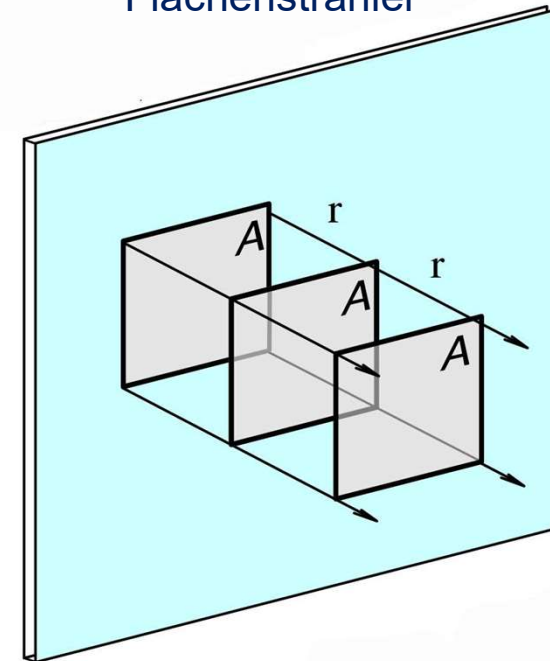
Punktstrahler



Linienstrahler



Flächenstrahler

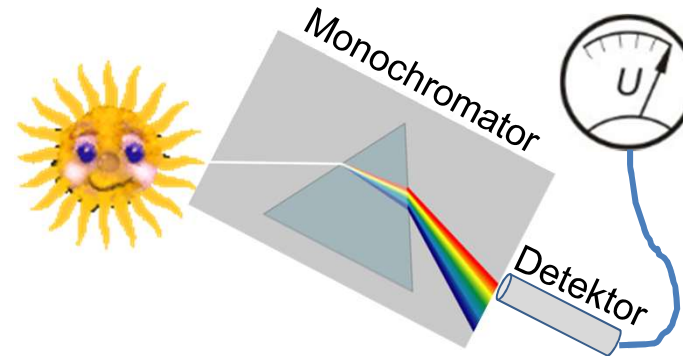


$J(r)$

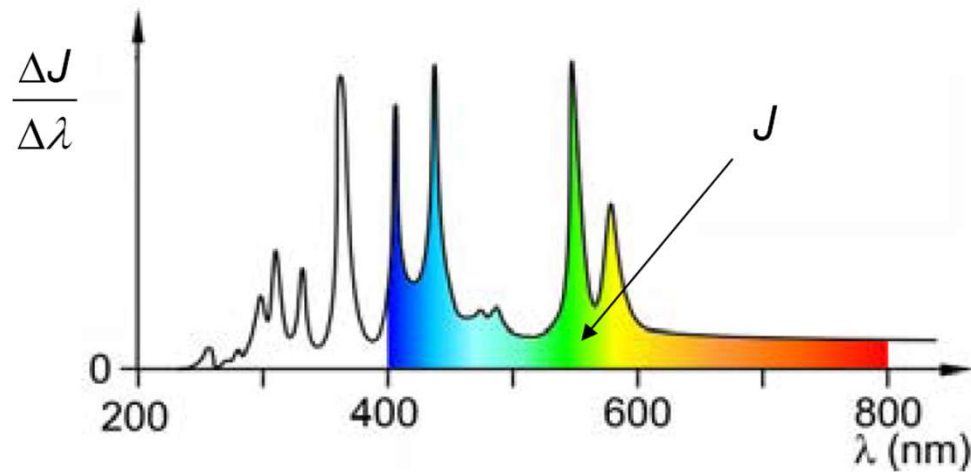
VI. Lichtemission

1. Emissionsspektrometrie

Analyse des emittierten
(ausgestrahlten) Lichts



a) Emissionsspektrum

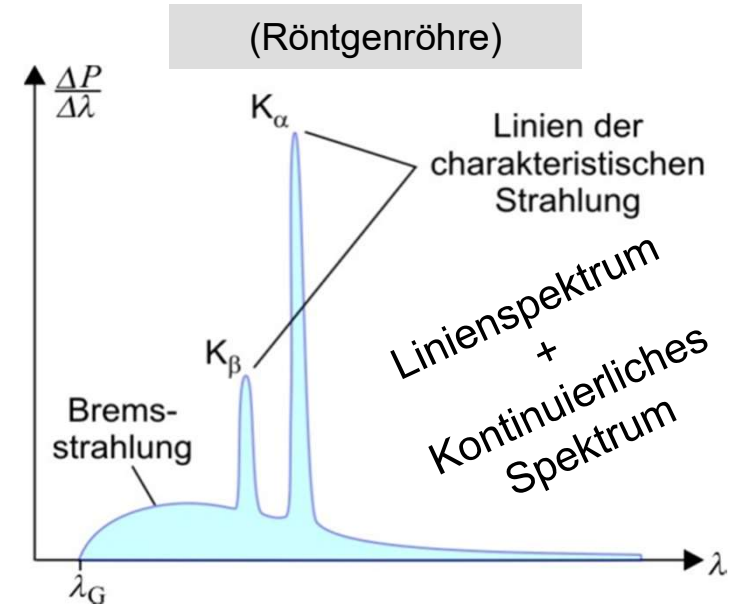
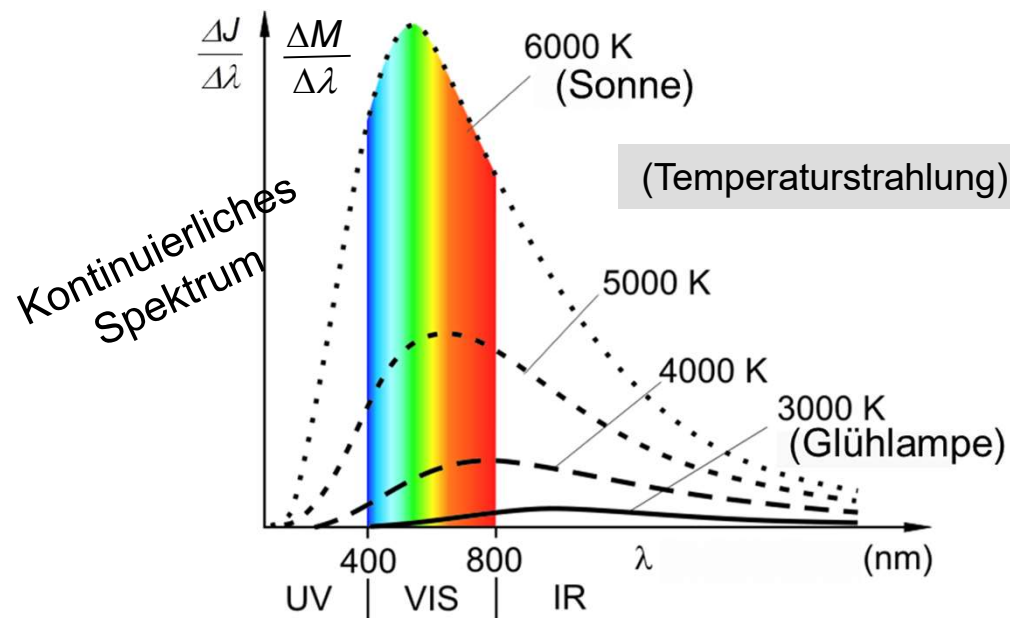
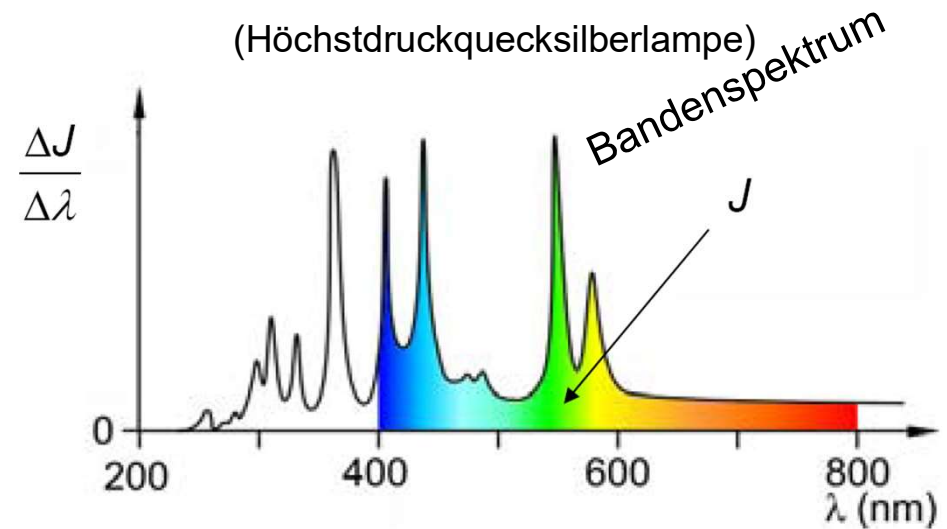
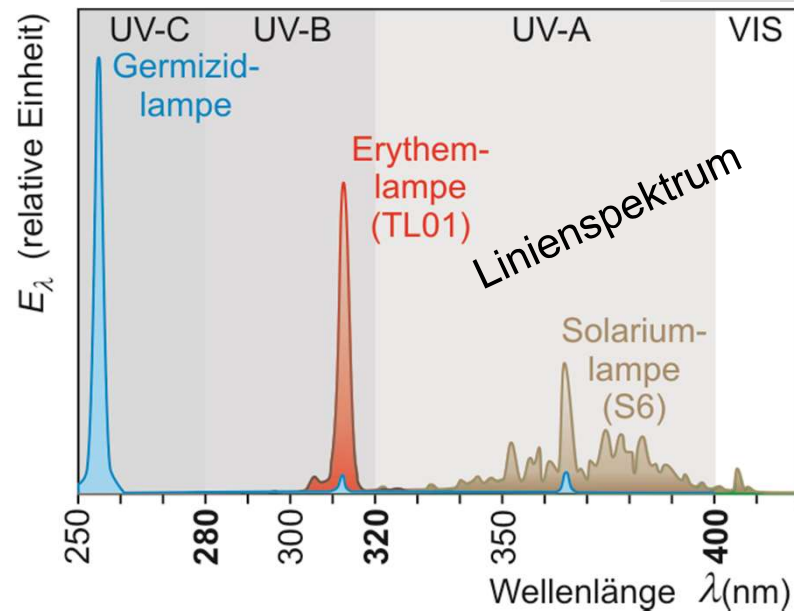


Spektrumtypen:

- Linienspektrum
- Bandenspektrum
- Kontinuierliches Spektrum

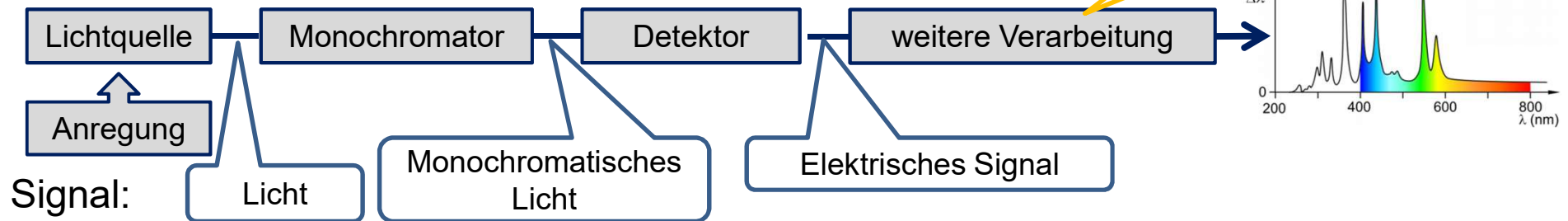
Beispiele:

(Lumineszenzlampen)

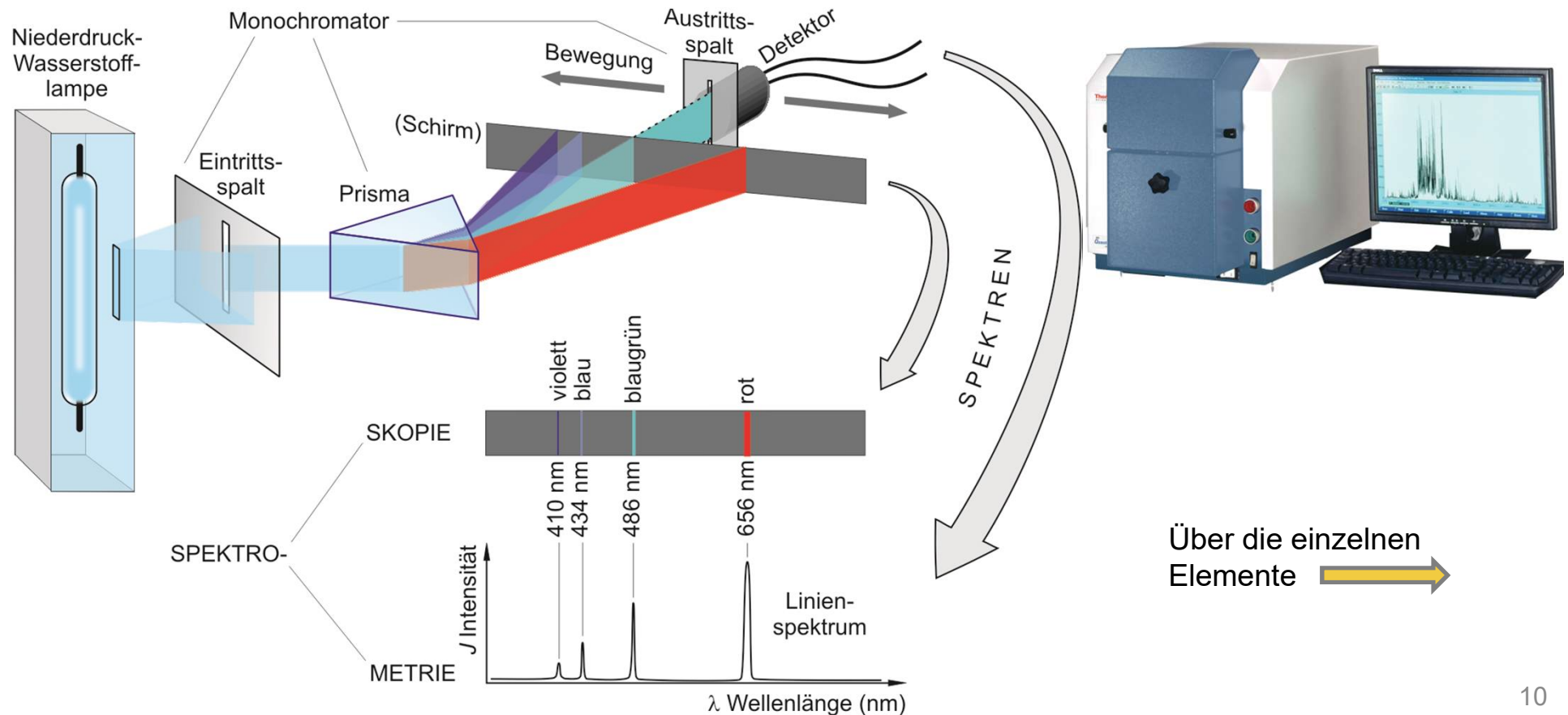
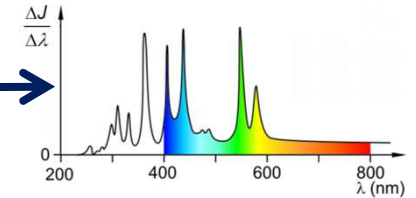


b) Messung des Emissionsspektrums

Aufbau eines Emissionsspektrometers:



Verstärkung,
Digitalisierung,
Filterung, ...

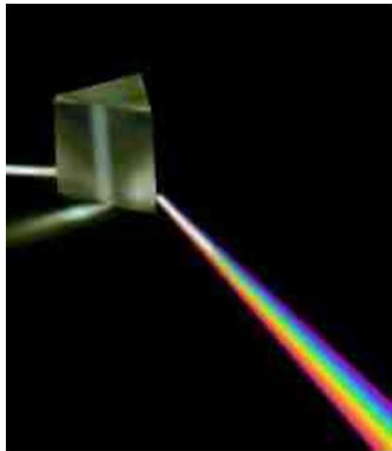


c) Monochromator

● Prisma

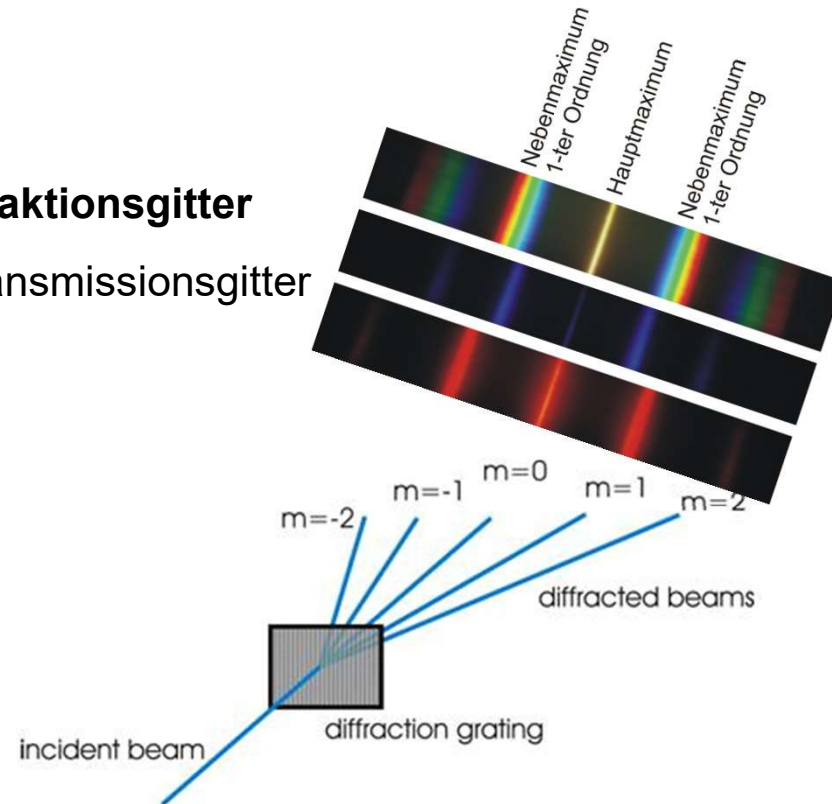
Funktionsprinzip:

Dispersion

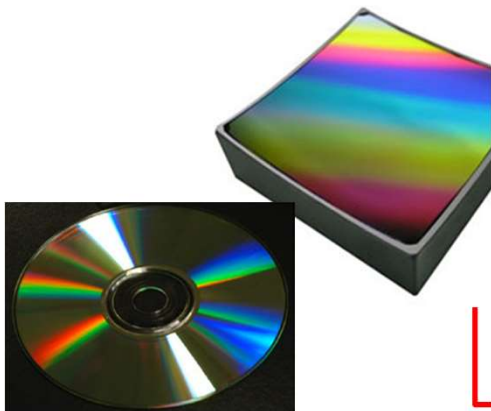
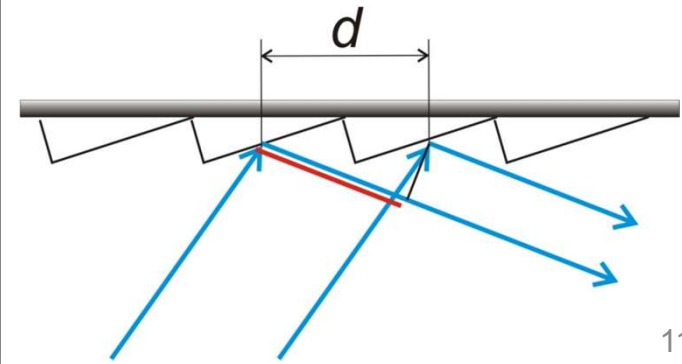
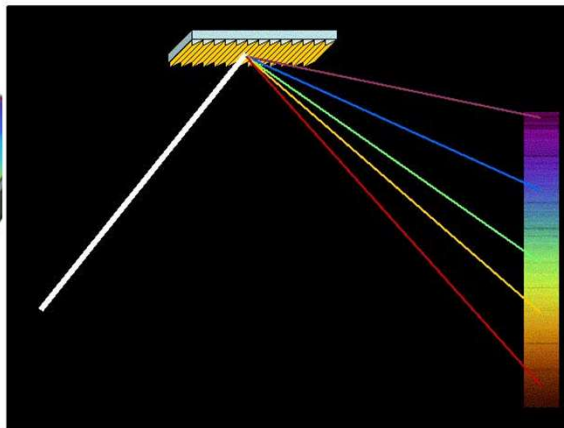


● Diffraktionsgitter

— Transmissionsgitter



— Reflexionsgitter Funktionsprinzip: **Interferenz**



Vergleich des Prismas und Gitters

● Prisma

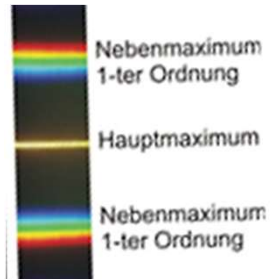


Nonlineare Aufspaltung
(ungleichmäßige Skaleneinteilung)



Intensitätsreich
(die ganze Strahlung ist zerlegt)

● Transmissionsgitter

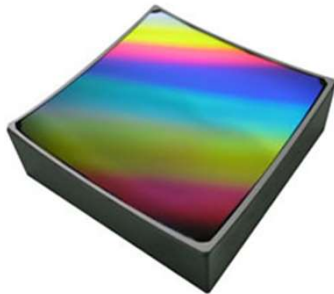


Lineare Skala
(gleichmäßige Skaleneinteilung)



Intensitätsarm
(nur Teil der Strahlung ist zerlegt)

● Reflexionsgitter



Lineare Skala
(gleichmäßige Skaleneinteilung)

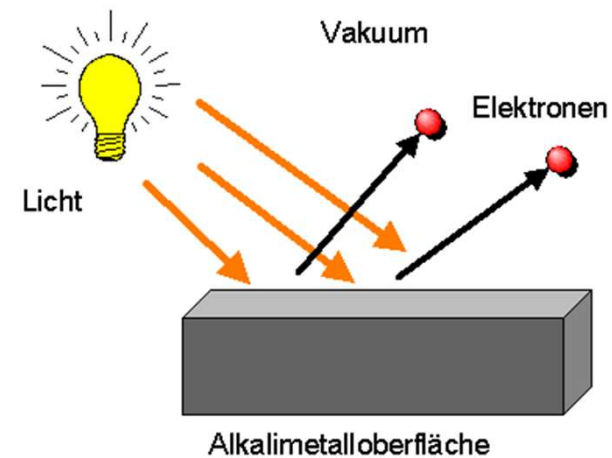


Intensitätsreich
(Großteil der Strahlung ist zerlegt)

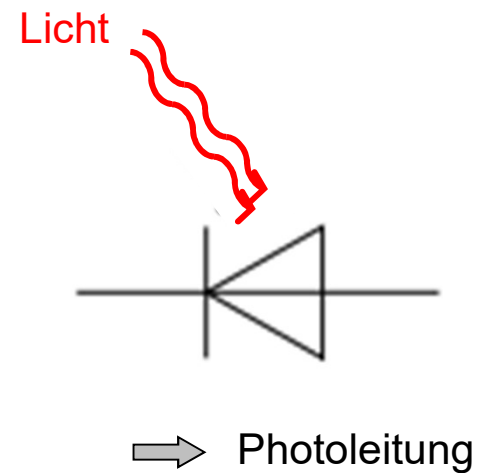
d) Lichtdetektor

- Photozelle
- Photomultiplier (PM)
(Sekundärelektronenvervielfacher, SEV):

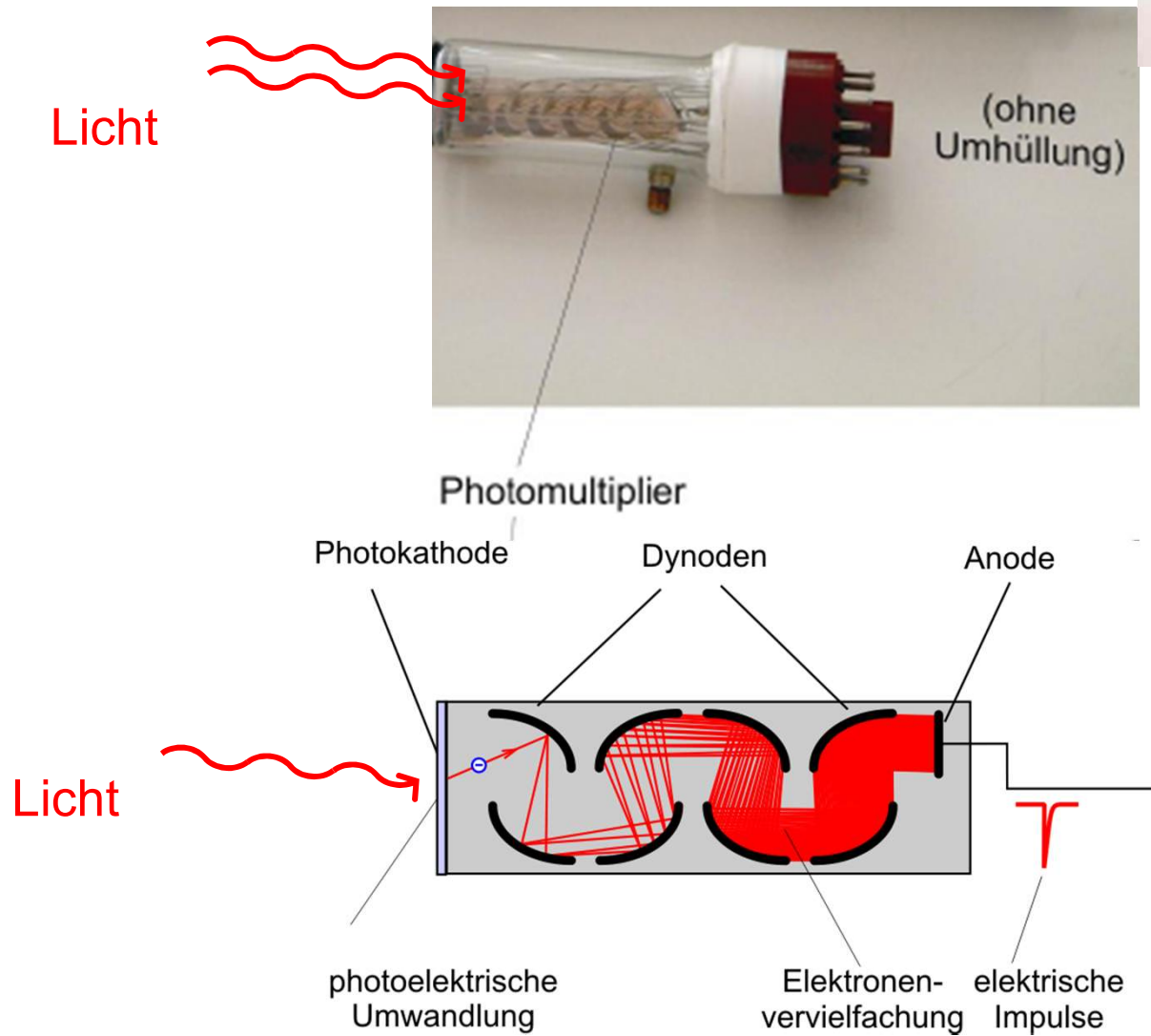
Prinzip:
äußerer
lichtelektrischer
Effekt



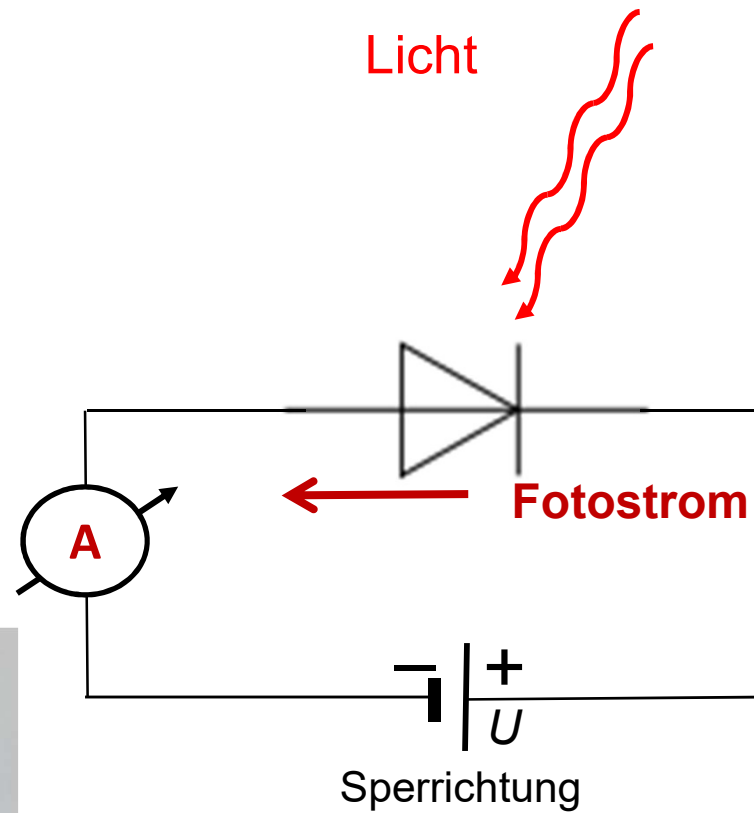
- (Halbleiter) Photodiode:



Photomultiplier (PM) (Sekundärelektronenvervielfacher – SEV):



➤ Photodiode



Stromstärke \sim Lichtintensität

Als Wirkung des
einfallenden
Photons entstehen:

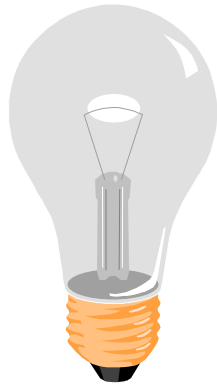
freie
Ladungsträgern
zB. Bewegbare
Elektronen

(Nicht zu verwechseln mit den lichtemittierenden Dioden ➞ siehe Leuchtdioden, LED)

Typen der Lichtemission: Lichtquellen

„warmes“ Licht

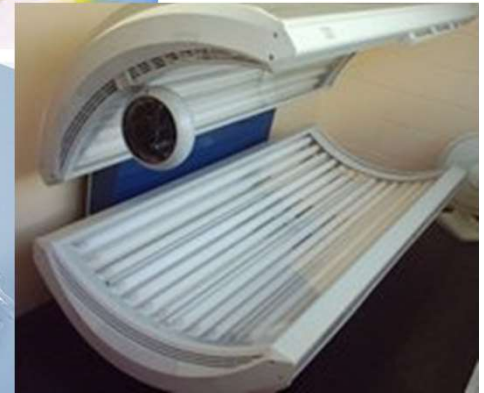
kontinuierliches Spektrum



Temperaturstrahler

„kaltes“ Licht

Linien- oder Bandenspektrum



Lumineszenzstrahler

2. Temperaturstrahlung

a) Qualitative Beschreibung:

- jeder Körper emittiert Temperaturstrahlung bei jeder Temperatur (Ausnahme: 0 K)
- elektromagnetische Strahlung (z.B. IR-Strahlung = „Wärmestrahlung“)
- stark temperaturabhängig (wachsende $T \Rightarrow$ zunehmende Intensität, spektrale Verschiebung)
- Auf Kosten der Bewegungsenergie der Teilchen!
- kontinuierliches Spektrum

b) Größen zur quantitativen Beschreibung:

- spezifische Ausstrahlung (M): $M = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)$
- spektrale spezifische Ausstrahlung (M_λ): $M_\lambda = \frac{\Delta M}{\Delta \lambda} = \frac{\Delta P}{\Delta A \cdot \Delta \lambda} \quad \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{nm}} \right)$

$$\left(\Rightarrow M = \int M_\lambda d\lambda \text{ , d. h. das Flächenstück unter der } M_\lambda(\lambda) \text{ Kurve} \right)$$

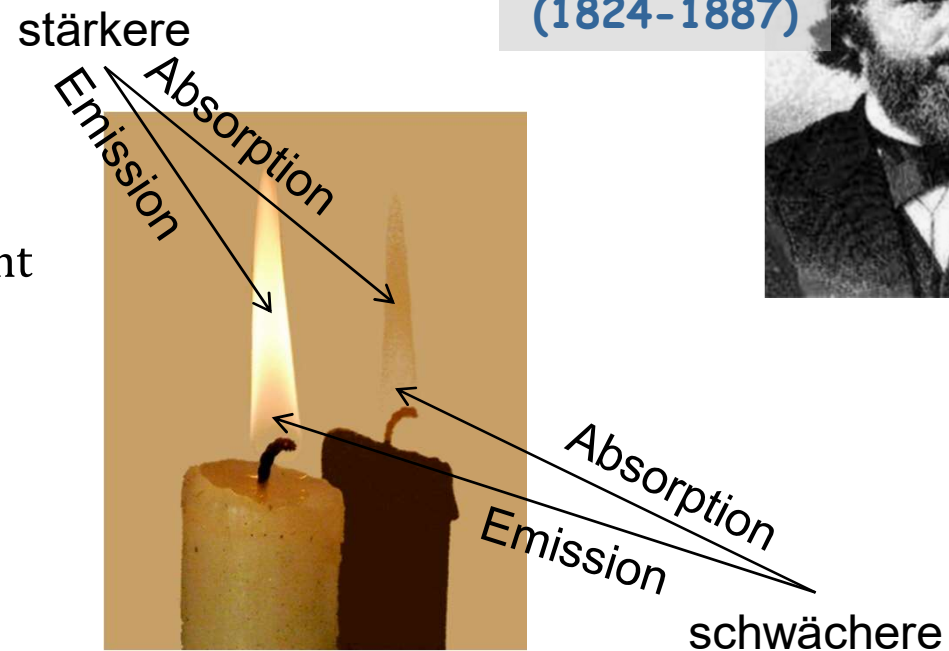
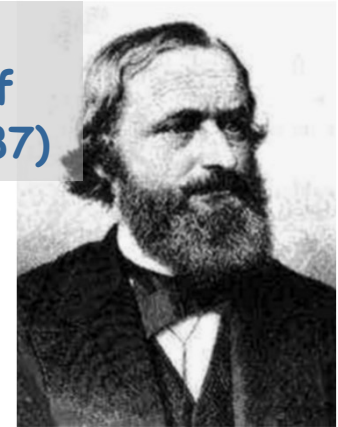
- spektraler Absorptionskoeffizient (α): $\alpha = \frac{J_{\text{absorbiert}}(\lambda)}{J_{\text{einfallend}}(\lambda)} \quad (0 \leq \alpha \leq 1)$

c) Gesetze:

- kirchhoffsches Gesetz:

$$\frac{M_{\lambda, \text{Körper1}}}{\alpha_{\text{Körper1}}} = \frac{M_{\lambda, \text{Körper2}}}{\alpha_{\text{Körper2}}} = \text{konstant}$$

Gustav
Kirchhoff
(1824-1887)



stärkere
Absorption
und
Emission



schwächere
Absorption
und
Emission



Abstraktion: absolut schwarzer Körper/Strahler

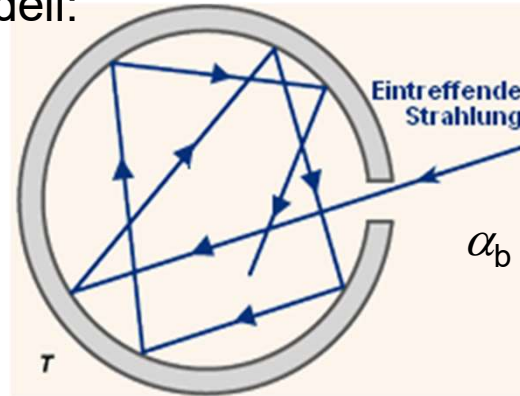
absolut schwarzer Körper/Strahler

$$\alpha = 1 (= \alpha_b)$$

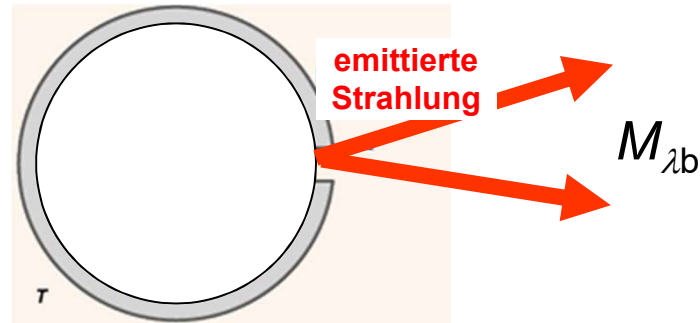
(„black body” = b)

Absorption:

Modell:

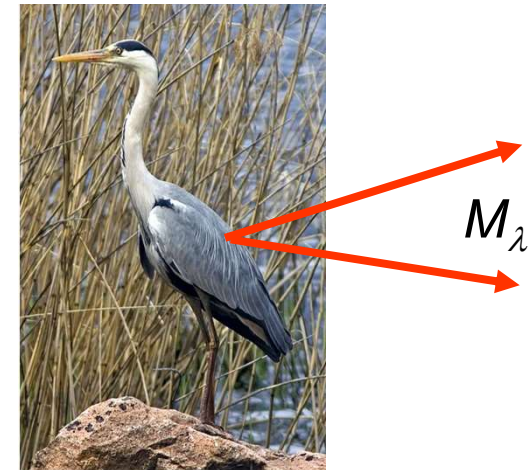
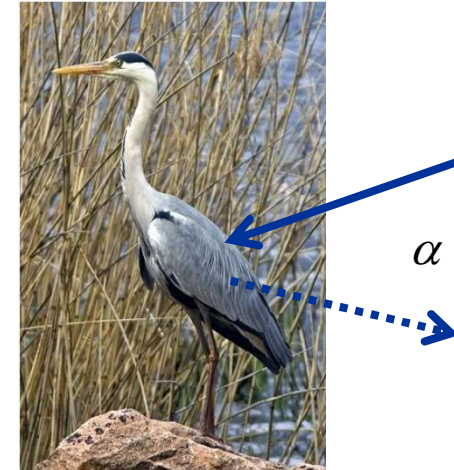


Emission:



ein reeller Körper

$$\alpha < 1$$



Vergleichen wir einen realen Körper
mit dem absolut schwarzen Körper
mithilfe des kirchhoffschen

Gesetzes:

$$\frac{M_{\lambda}}{\alpha} = \frac{M_{\lambda b}}{\alpha_b} = \frac{M_{\lambda b}}{1} = M_{\lambda b}$$

$$M_{\lambda} = \alpha \cdot M_{\lambda b}$$

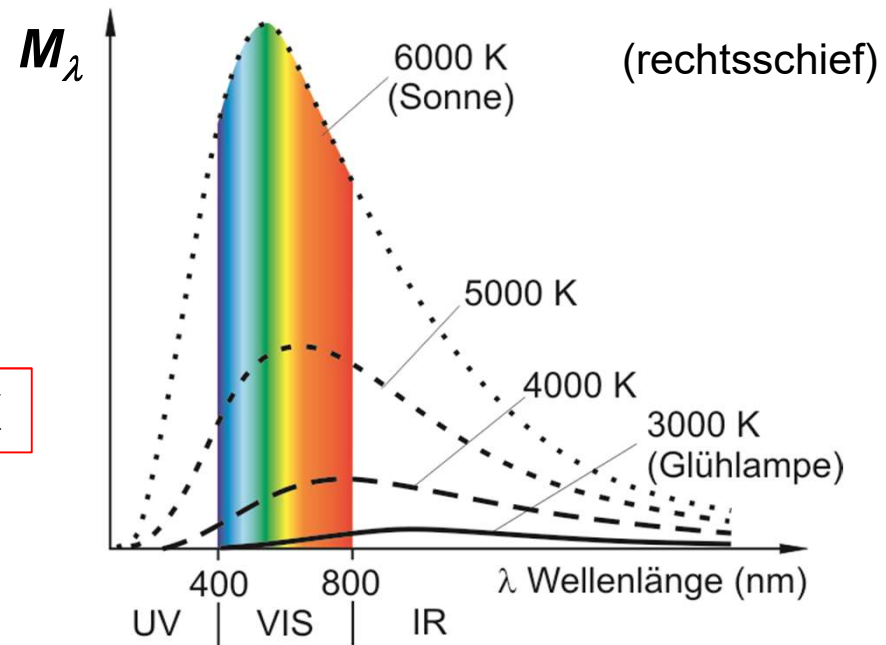
Wenn α des Körpers bekannt ist kann M_{λ}
aus $M_{\lambda b}$ berechnet werden.

Wir beschäftigen uns nur mit den Gesetzen
für den absolut schwarzen Strahler.

absolut schwarzer Körper/Strahler:

- kontinuierliches Spektrum:
- wiensches Verschiebungsgesetz:

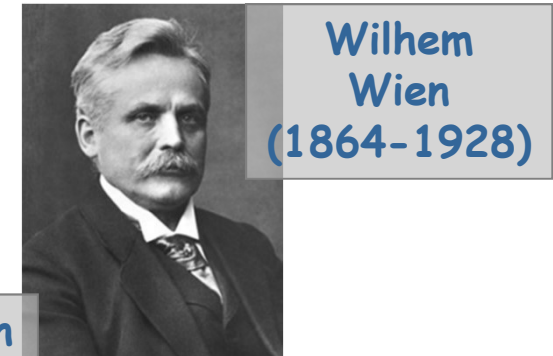
$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{konstant} = 2880 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$



- Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$M = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$



Jozef Stefan
(1835-1893)



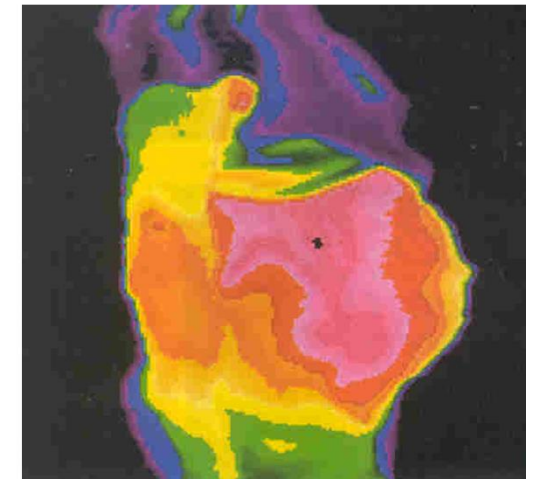
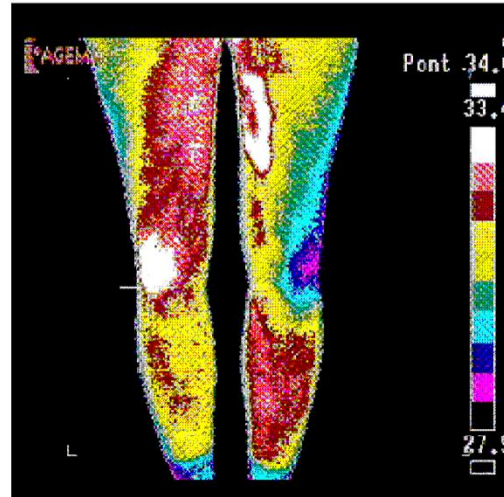
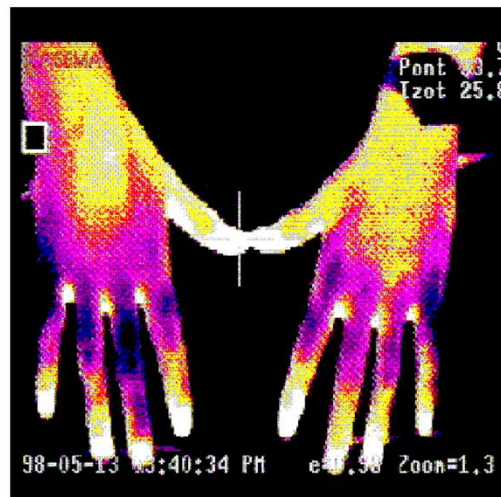
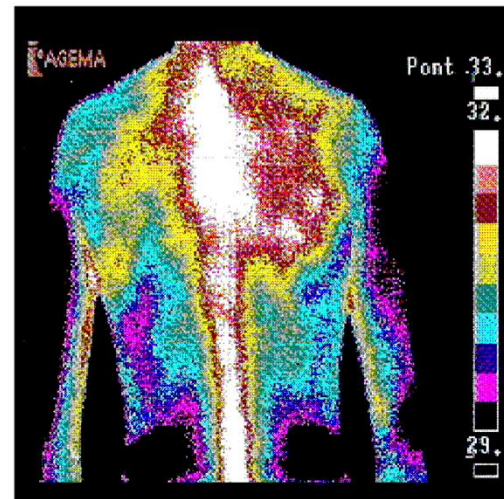
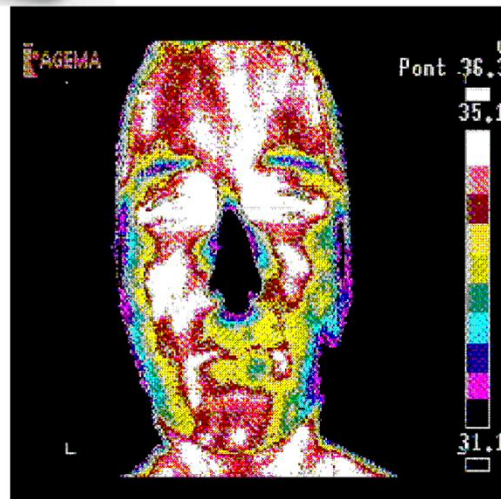
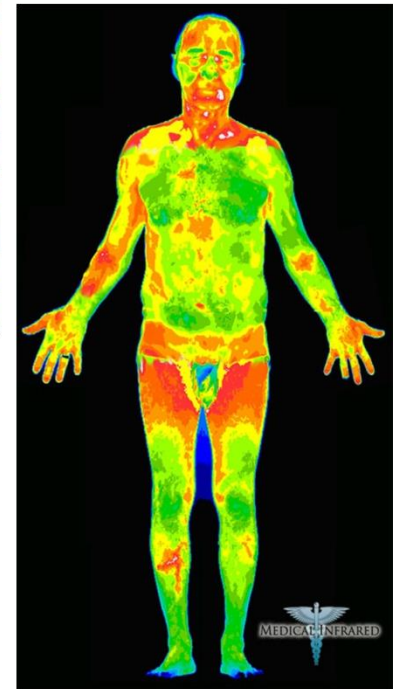
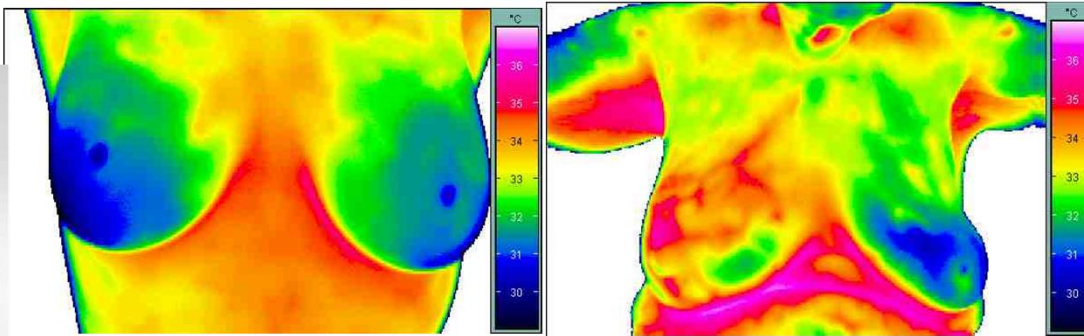
Ludwig Boltzmann
(1844-1906)

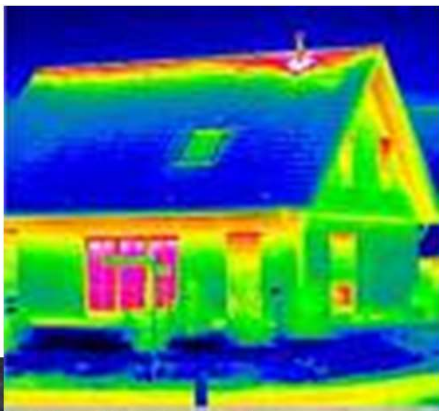
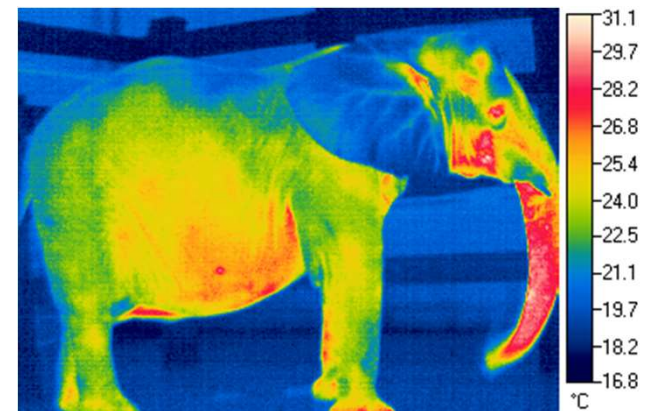
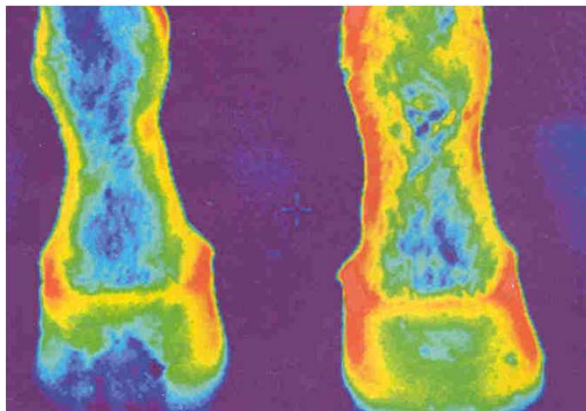
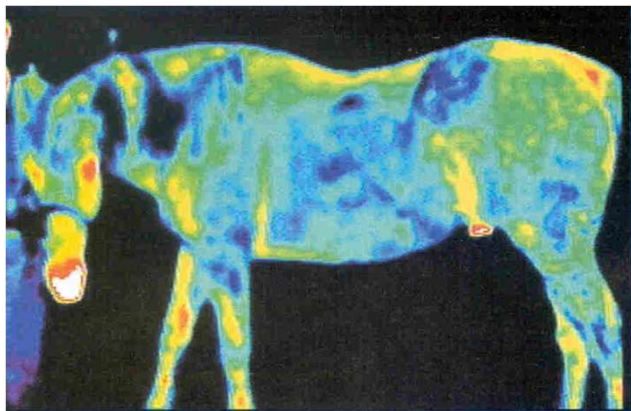
d) Anwendungen:

- IR-Therapie:

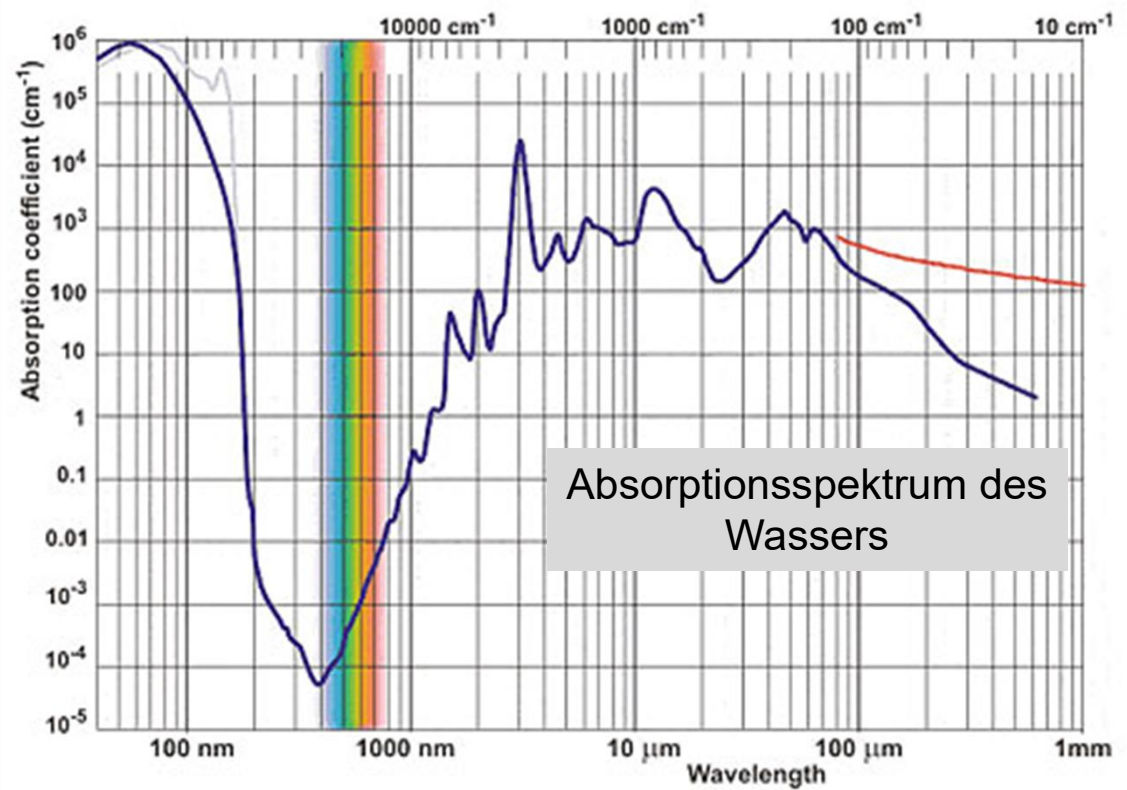


- IR-Diagnostik:





□ λ_{\max} der IR-Strahlung des Körpers:

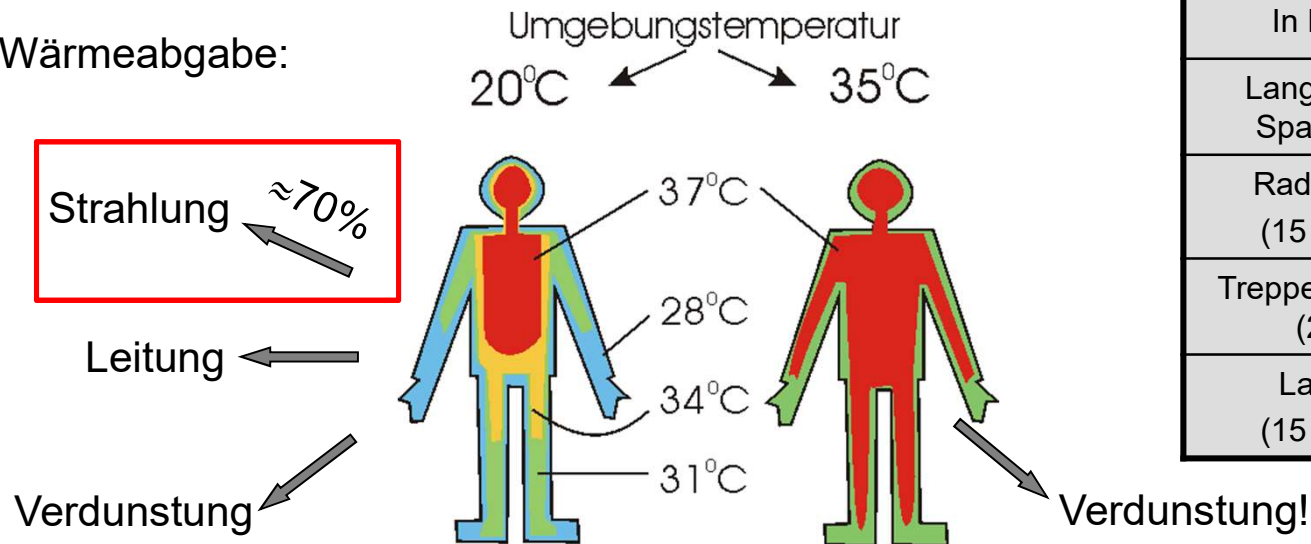


Absorptionsspektrum des Wassers

- **Wärmehaushalt des Körpers:**

- Problem: Stoffwechsel \Rightarrow Wärmebildung \Rightarrow Wärmeabgabe ist nötig zur konstanten Körpertemperatur

- **Wärmeabgabe:**



Aktivität	Wärmebildung (W)
In Ruhe	115
Langsames Spazieren	260
Radfahren (15 km/h)	420
Treppensteigen (2/s)	700
Laufen (15 km/h)	1150

- **Anwendung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes:**

Netto-Abstrahlung (ΔE):