

Entstehung des Lichtes: Temperaturstrahlung, Lumineszenz

VI. Lichtemission

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

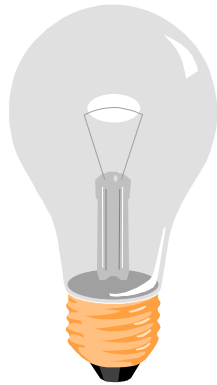
3. Lumineszenz

- a) Qualitative Beschreibung
- b) Mechanismus bei Atomen und Molekülen
- c) Gesetze: Stokes-Verschiebung, exponentielles Abklingen
- d) Anwendungen: Fluoreszenzspektroskopie, -mikroskopie, Sensoren, Lampen, Strahlungsdetektoren

Lichtemission: Lichtquellen

„warmes“ Licht

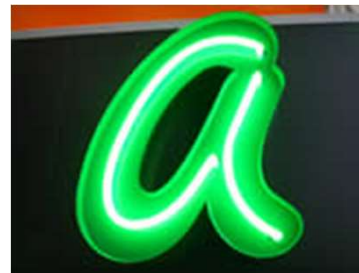
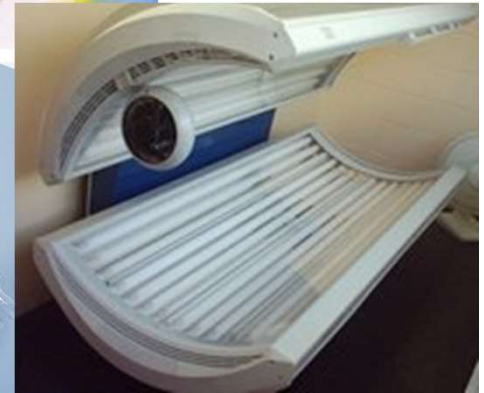
kontinuierliches Spektrum



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

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

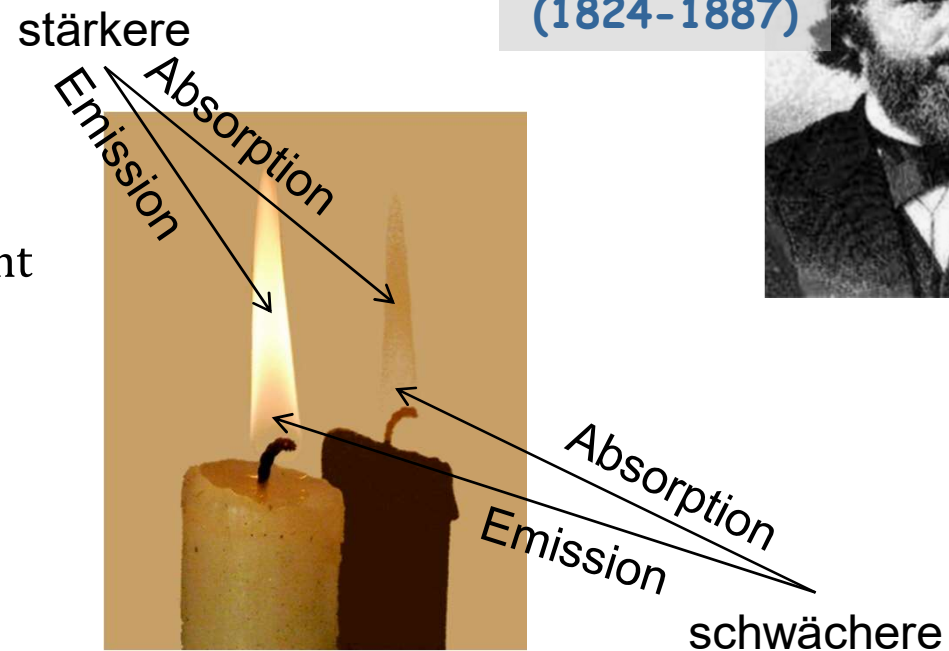
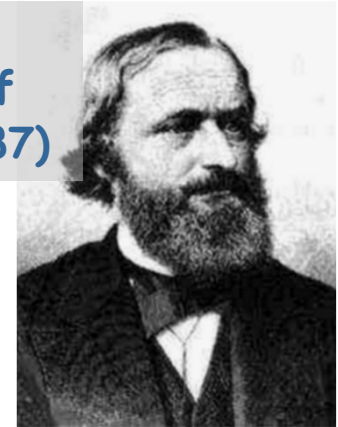
- spektraler Absorptionsgrad (α): $\alpha = \frac{J_{\text{absorbiert}}(\lambda)}{J_{\text{einfallend}}(\lambda)} \quad (0 \leq \alpha \leq 1)$

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

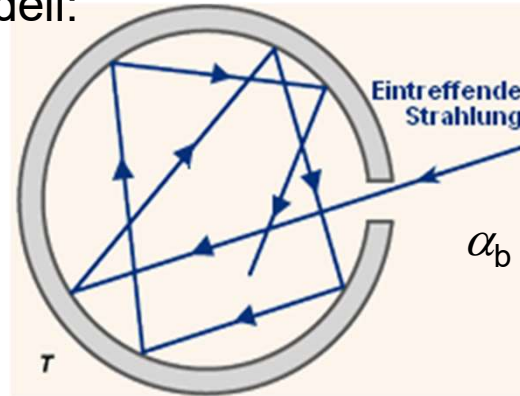
absolut schwarzer Körper/Strahler

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

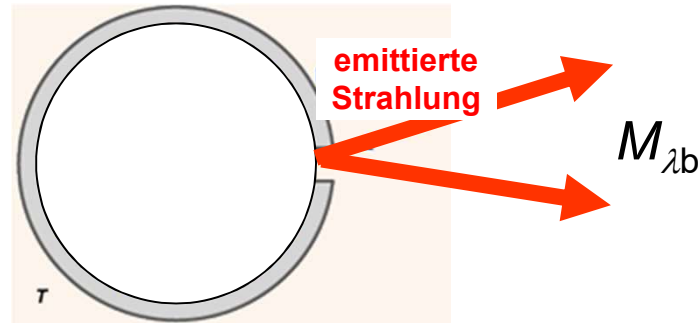
(„black body” = b)

Absorption:

Modell:

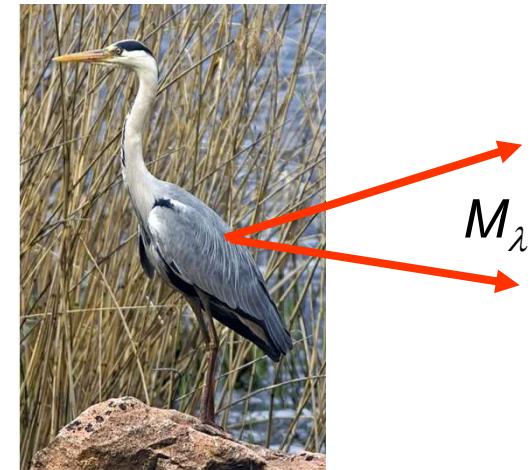
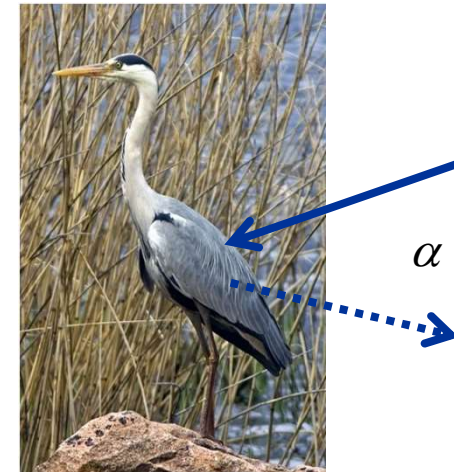


Emission:



ein reeller Körper

$$\alpha < 1$$



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

Gesetzes:

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

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

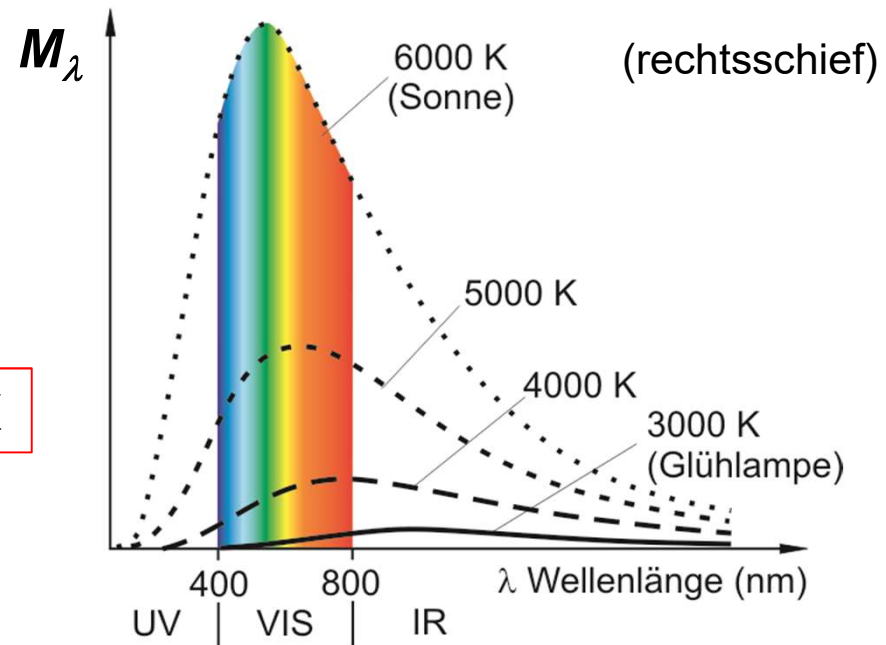
Wenn α des Körpers bekannt ist kann M_λ aus $M_{\lambda b}$ berechnet werden.

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

absolut schwarzer Körper/Strahler:

- kontinuierliches Spektrum:
- wiensches Verschiebungsgesetz:

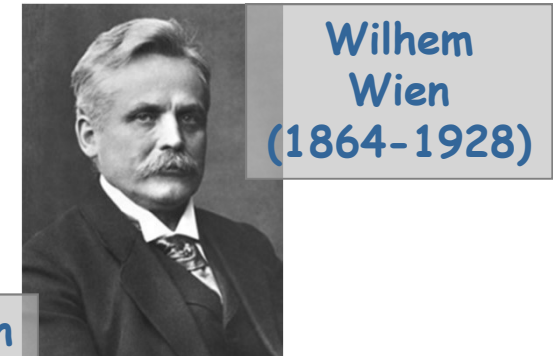
$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{konstant} = 2880 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$



- Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$M = \sigma T^4$$

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



Wilhelm
Wien
(1864-1928)

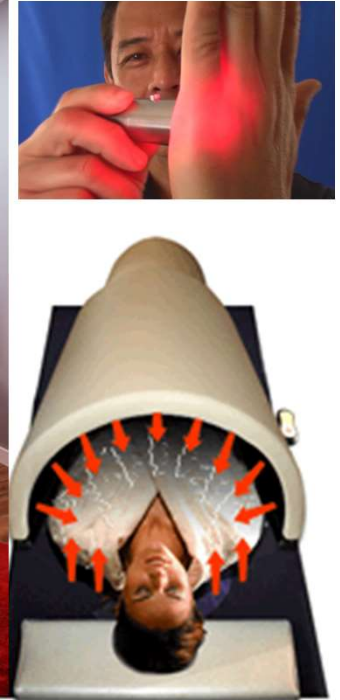
Jozef Stefan
(1835-1893)



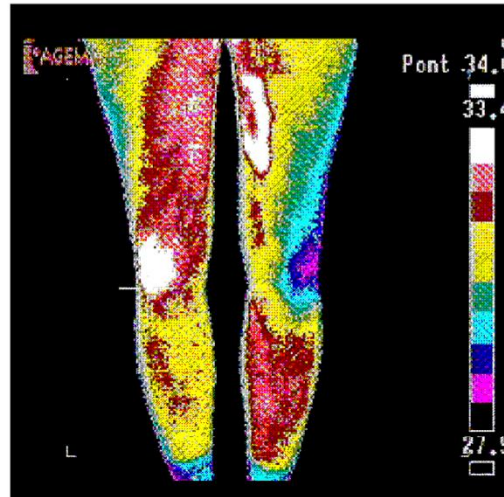
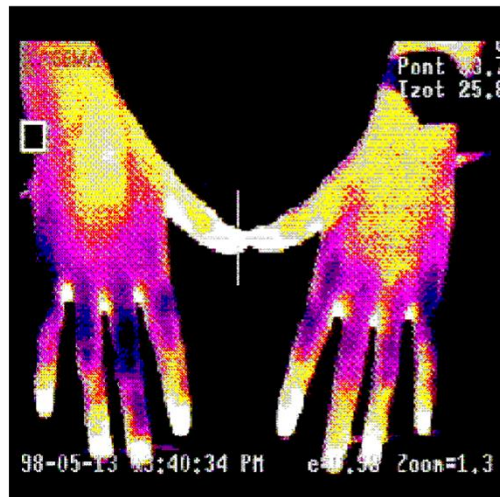
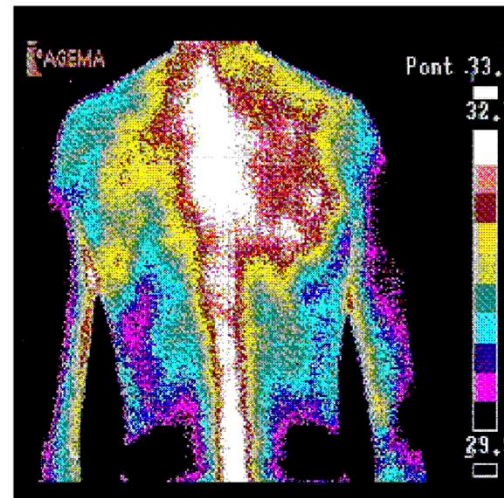
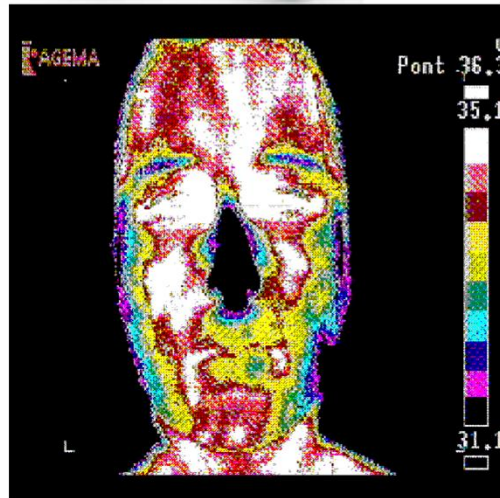
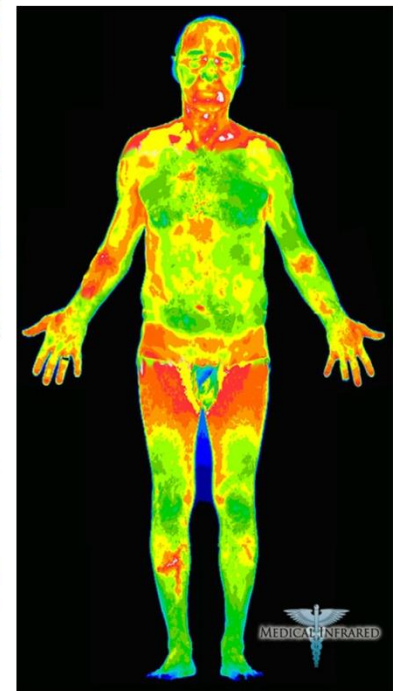
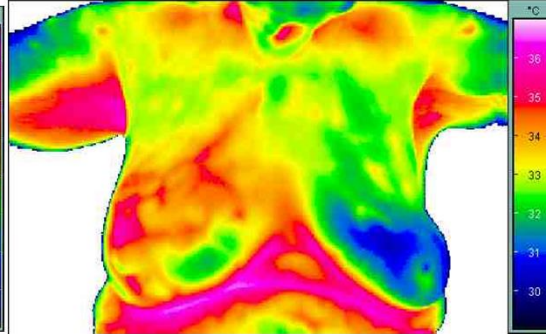
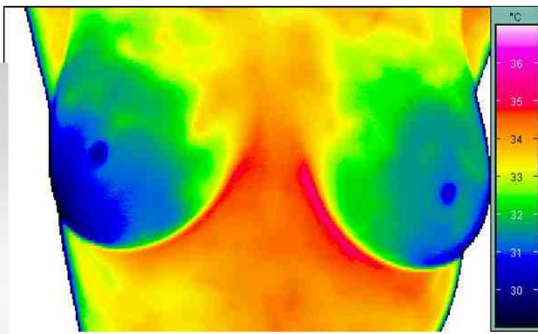
Ludwig
Boltzmann
(1844-1906)

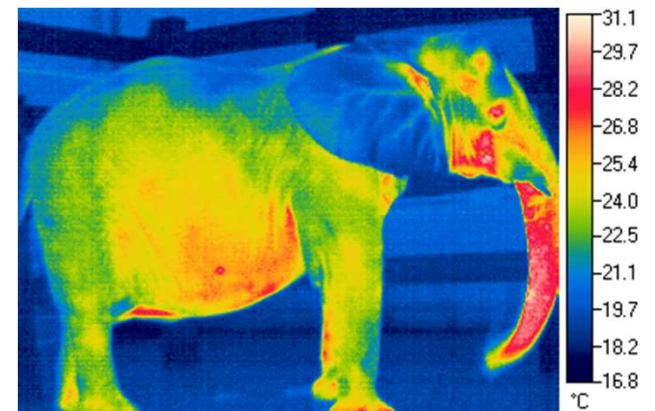
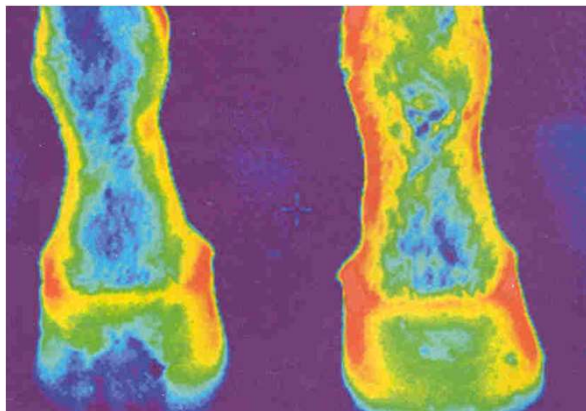
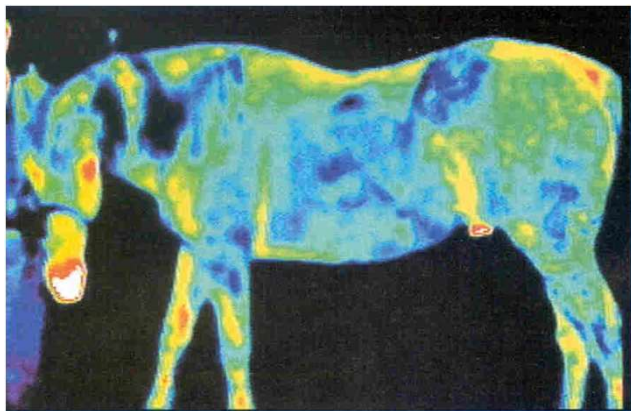
d) Anwendungen:

- IR-Therapie:

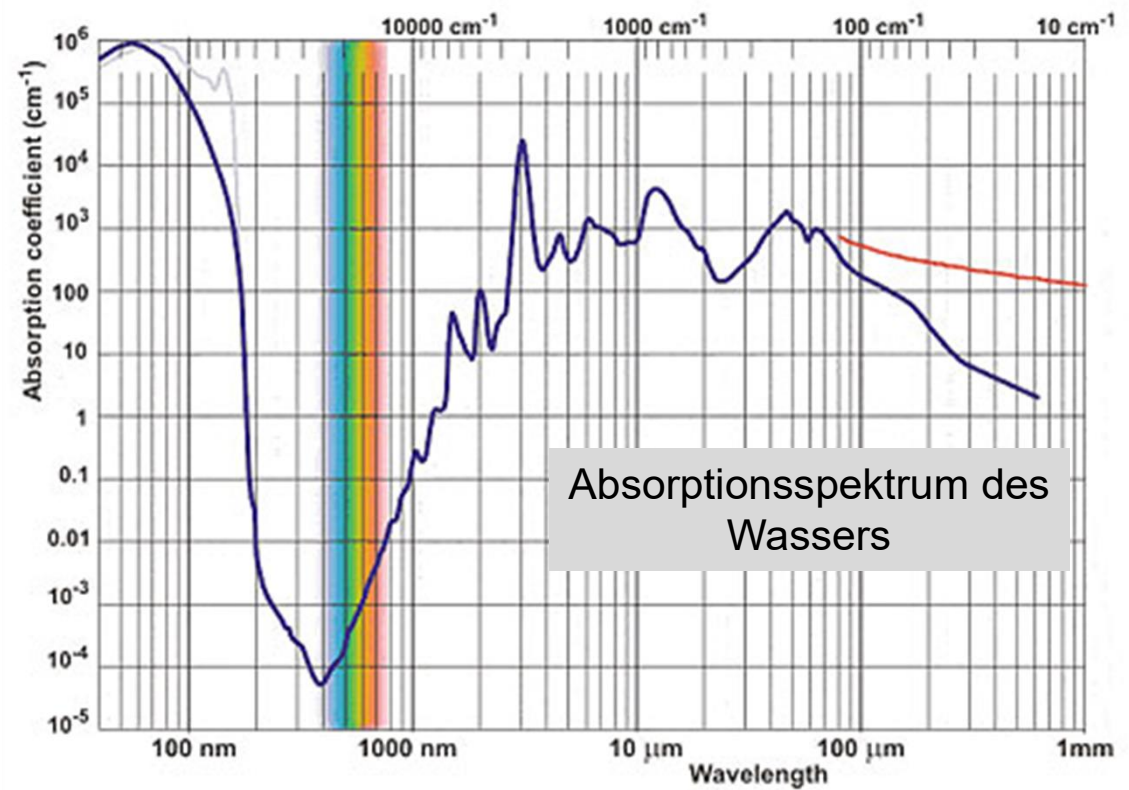


- IR-Diagnostik:





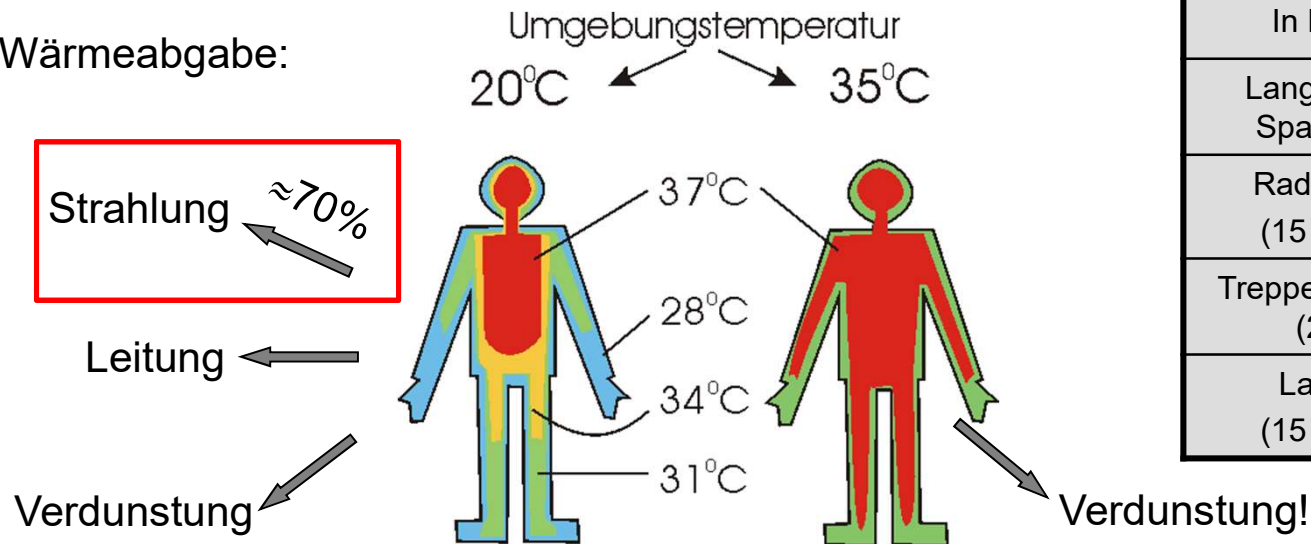
□ λ_{\max} der IR-Strahlung des Körpers:



- **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):

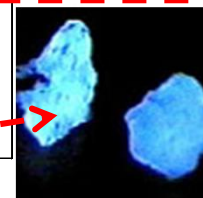
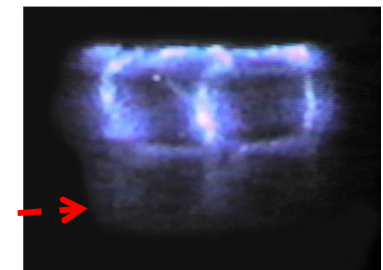
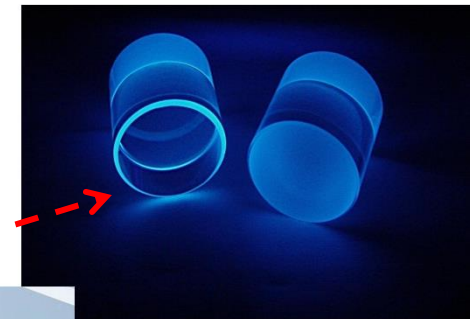
3. Lumineszenz

a) Qualitative Beschreibung:

- Überschussstrahlung über die Temperaturstrahlung
- nur schwach temperaturabhängig (mit Ausnahme der Thermolumineszenz)
- Linien/Bandenspektrum
- Aus Elektronenübergängen! (Dazu müssen die Elektronen zuerst angeregt werden.)

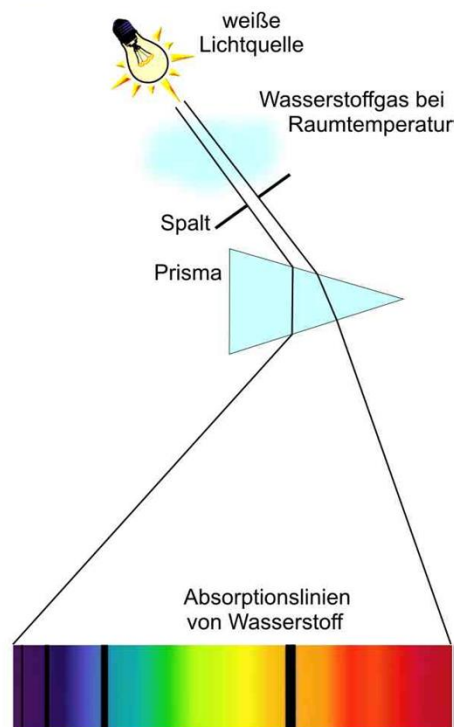
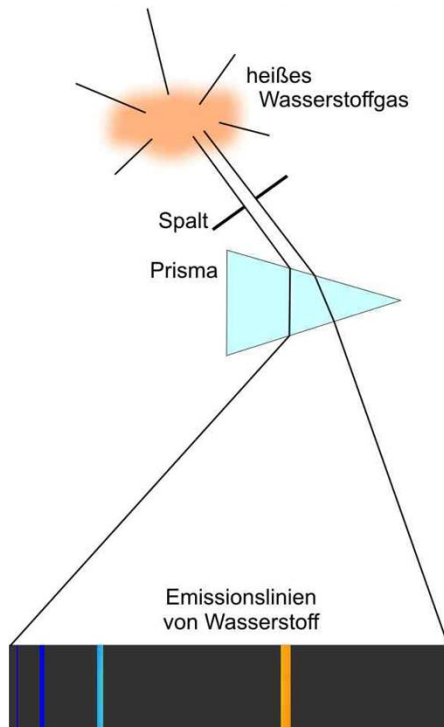
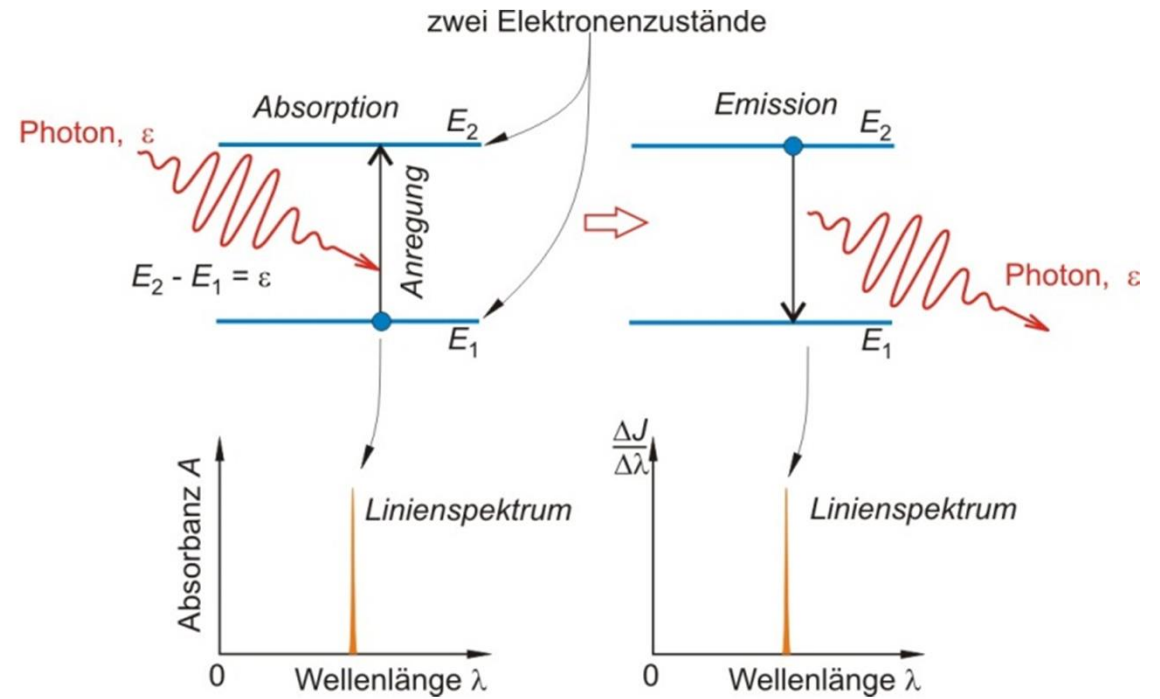
Fluoreszenz&Phosphoreszenz

<i>Art der Anregung</i>	<i>Name</i>	<i>Beispiel</i>
Licht	Photolumin.	Chinin-sulphat, Phosphor, ...
Röntgenstr.	Röntgenolumin.	NaI (Tl)
radioaktive Str.	Radiolumin.	NaI (Tl)
elektrisches Feld	Elektrolumin.	Quecksilberlampen
mechanische Wirkung	Tribolumin.	Würfelsucker
chemische Reaktion	Chemolumin. (Biolumin.)	Glühwürmchen
Wärme	Flammenphotometrie, Thermolumin.	Na ⁺ , K ⁺ Ionen CaSO ₄ (Dy)

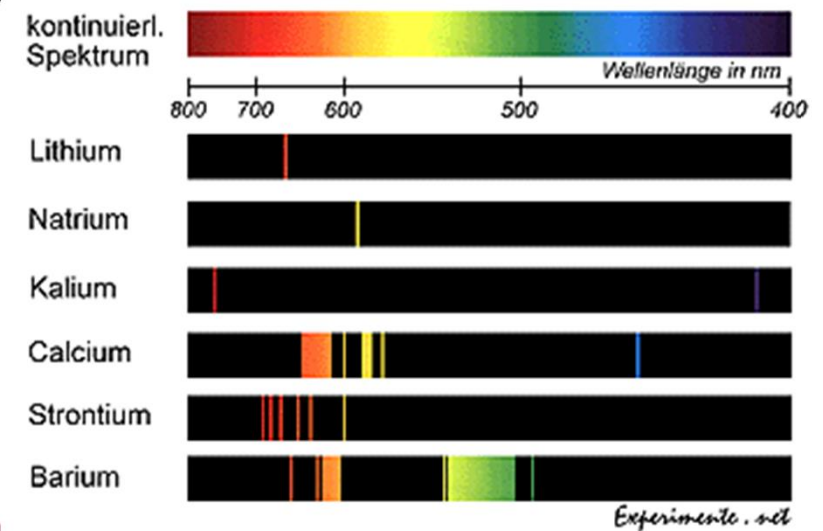


b) Mechanismus:

■ Lumineszenz von Atomen:



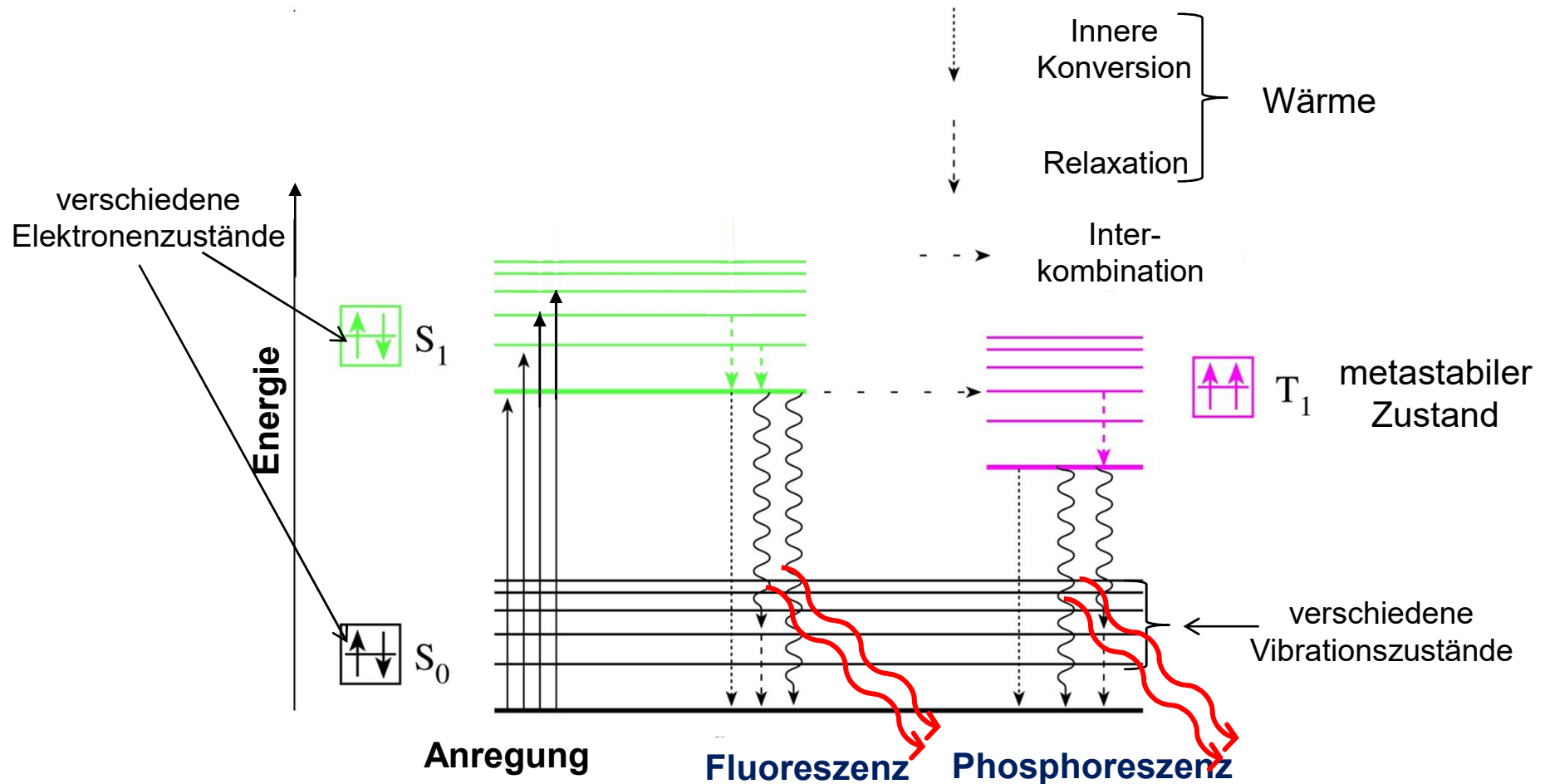
Linienpektren der Alkali- und Erdalkalimetalle



- Lumineszenz von Molekülen:

$$E_{\text{Molekül}} = E_{\text{Elektron}} + E_{\text{Vibration}} \left(+ E_{\text{Rotation}} \right)$$

Jablonski-Diagramm:



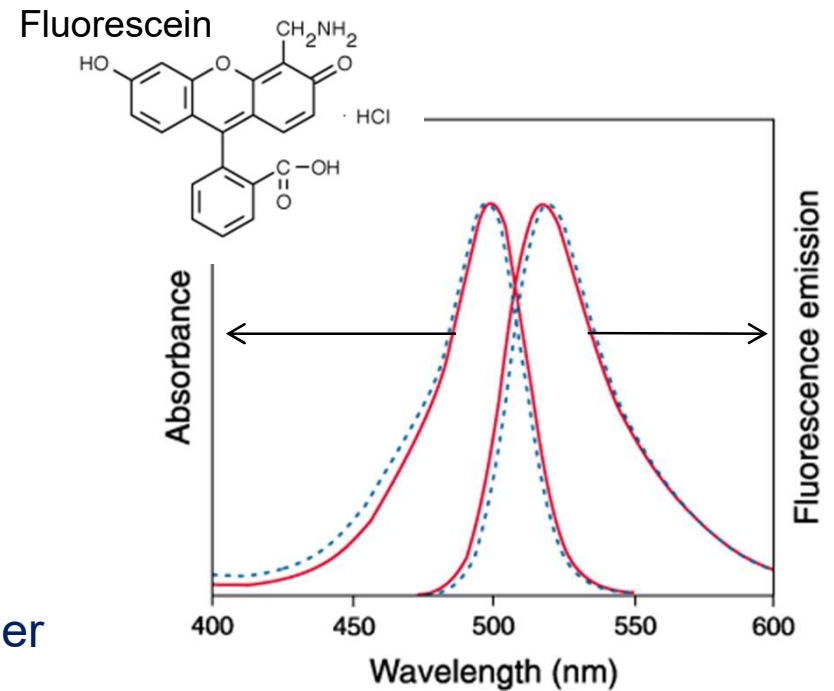
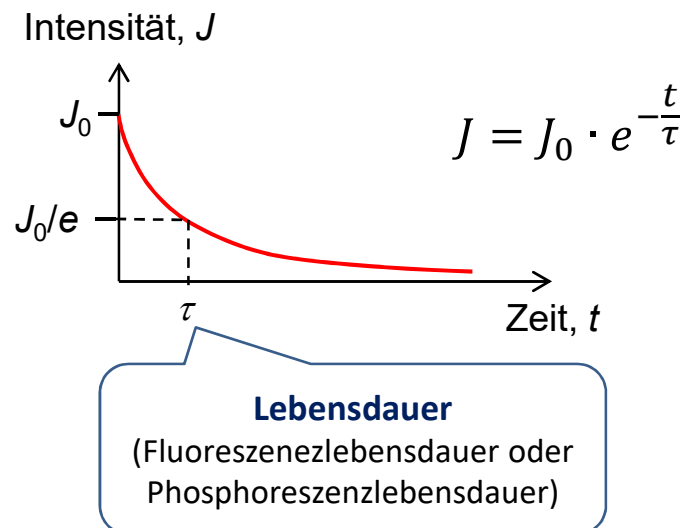
c) Gesetze:

- Linien/Bandenspektrum
- Stokes-Verschiebung:

$$\varepsilon_{\text{phos}} < \varepsilon_{\text{fluo}} < \varepsilon_{\text{abs}}$$

$$\lambda_{\text{abs}} < \lambda_{\text{fluo}} < \lambda_{\text{phos}}$$

- exponentielles Abklingen in der Zeit nach einer kurzzeitigen impulsförmigen Anregung:



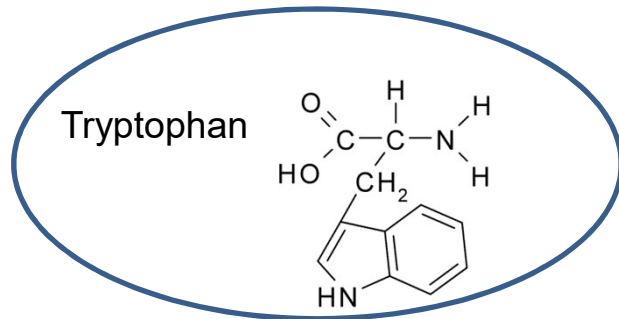
$\tau_{\text{fluo}} < \tau_{\text{phos}}$

$\approx \text{ns}$

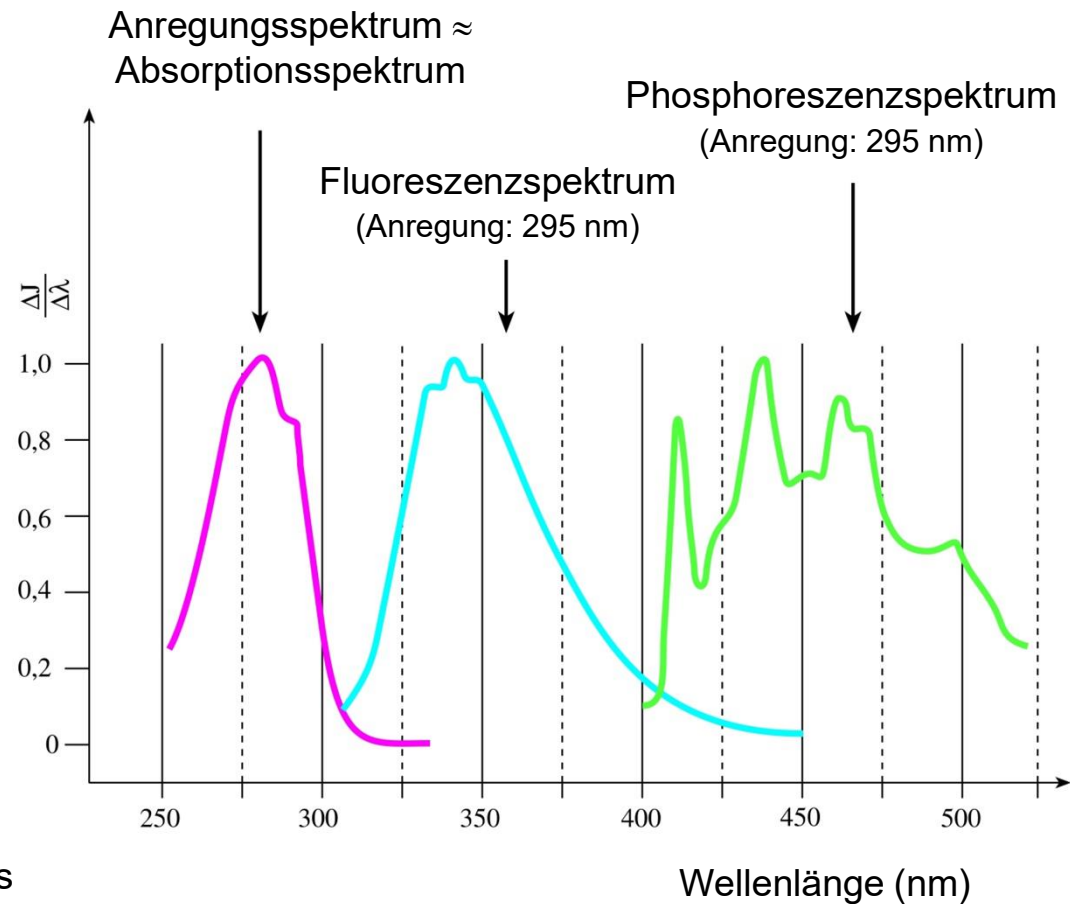
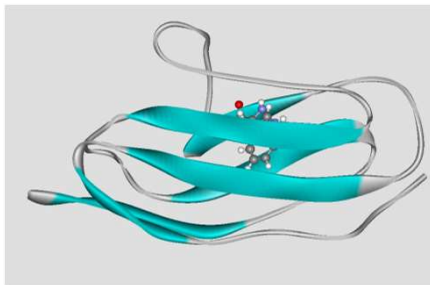
$\approx \mu\text{s} - \text{s}$

d) Anwendungen:

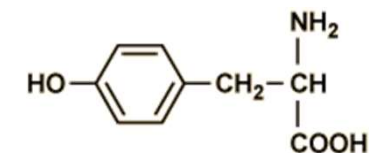
- Fluoreszenzspektroskopie
z.B. Proteinforschung



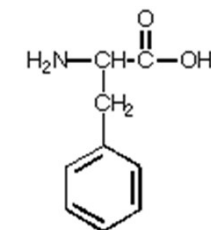
Die Eigenschaften des Lumineszenzlichtes (Intensität, spektrale Verteilung, Stokes-Verschiebung, Lebensdauer, ...) sind sehr empfindlich gegen der Umgebung, Moleülkonformation, Änderungen in diesen, ...



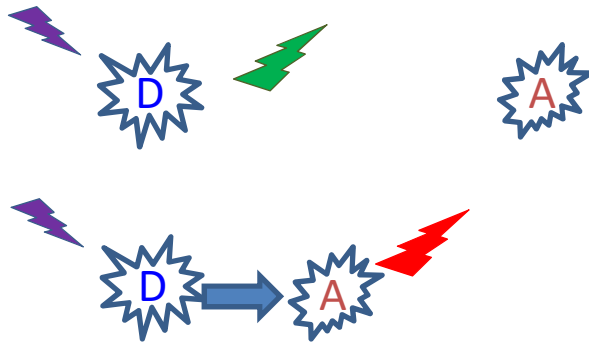
Tyrosin



Phenylalanin



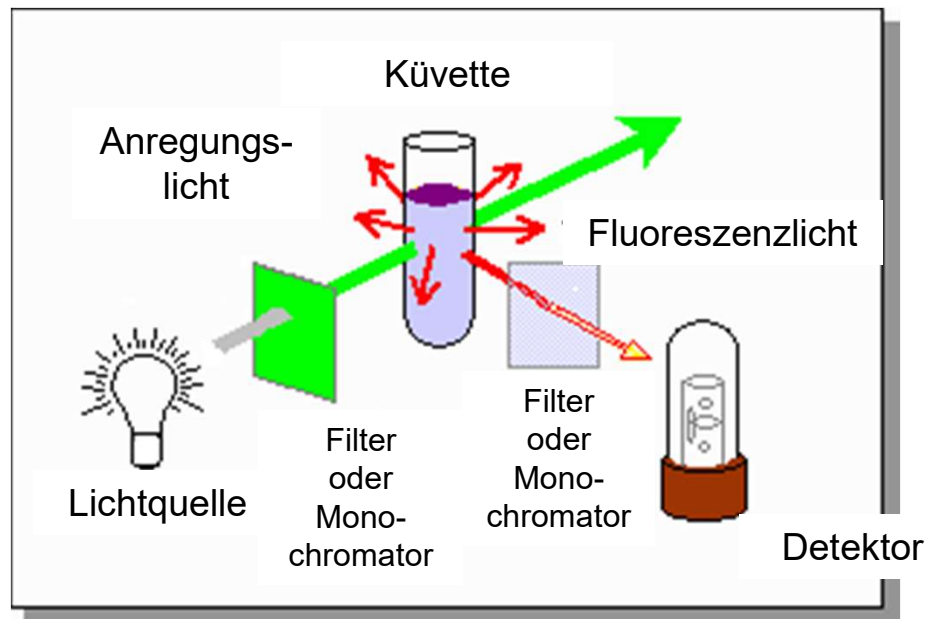
Förster Resonanzenergietransfer



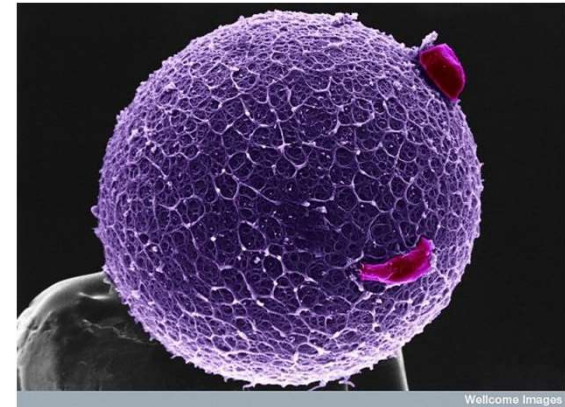
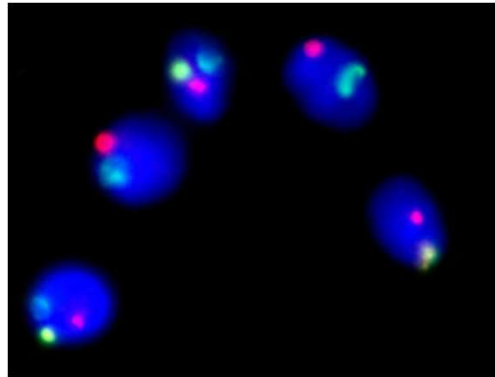
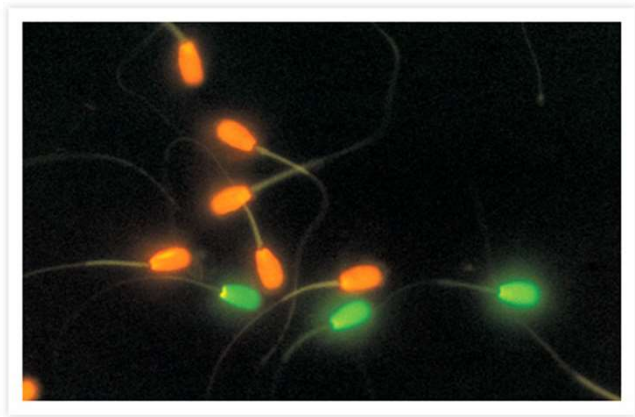
FRET ist sehr stark Abstandsabhängig:
Abstandsmessung in nm Bereich

z.B.: Assoziation von zwei Eiweiße
Faltung eines Makromoleküls

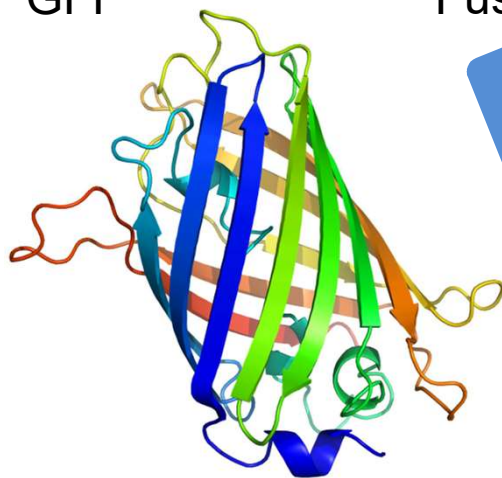
■ Aufbau eines Fluorimeters



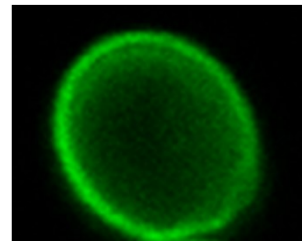
- Fluoreszenzmikroskopie



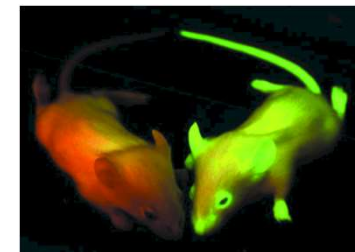
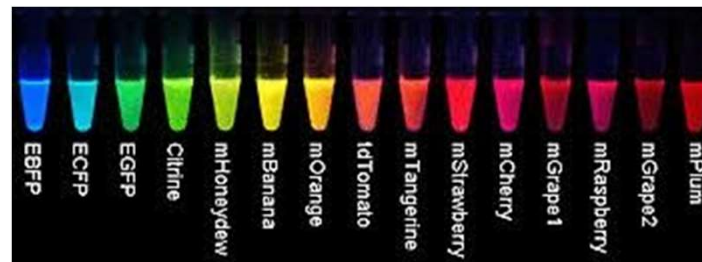
GFP



Fusionsprotein



Aequorea victoria

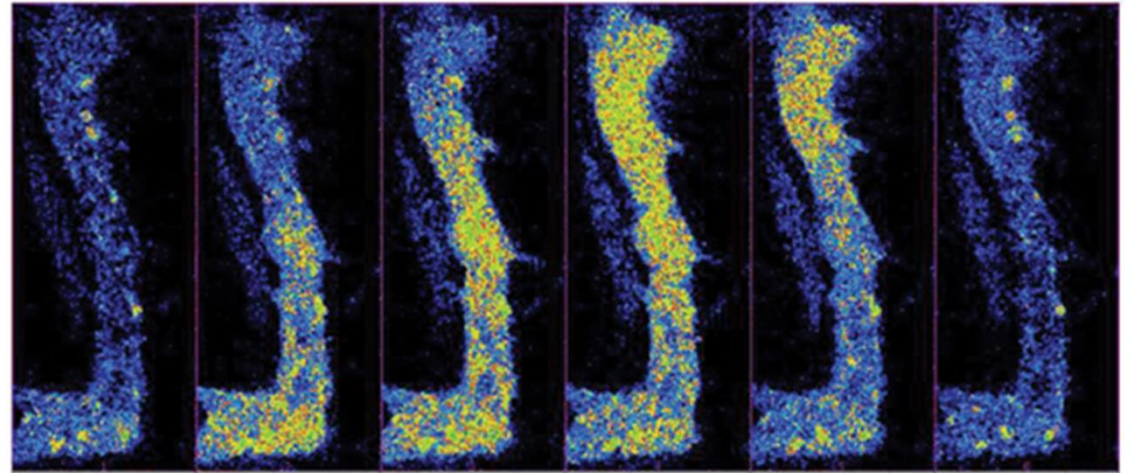


■ Sensoren

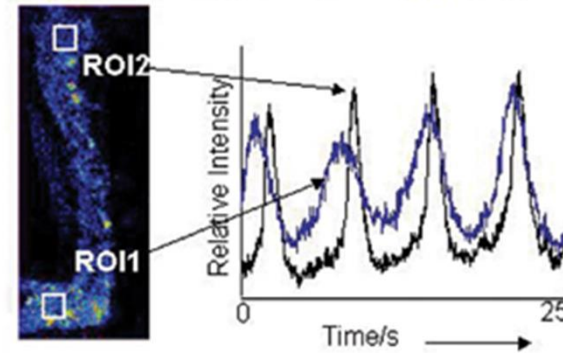
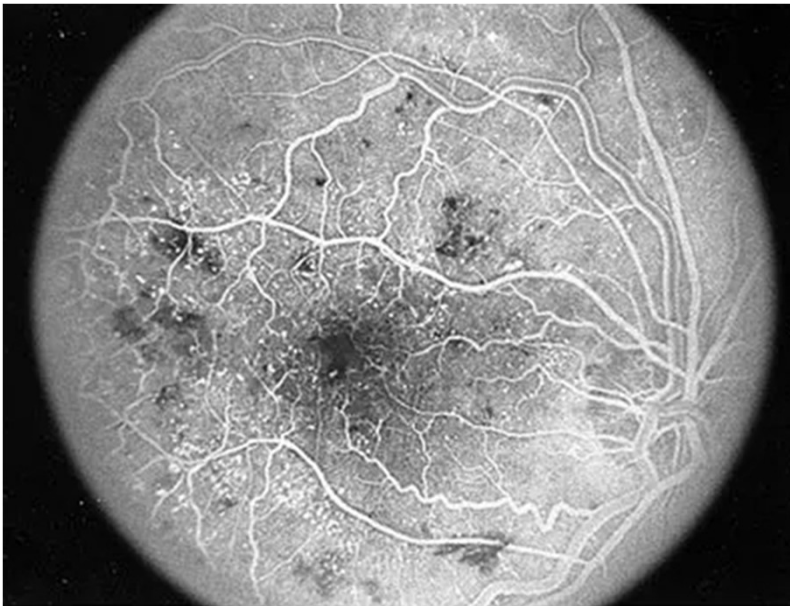
Sauerstoffsensor



Calciumsensor \Rightarrow Calciumwellen

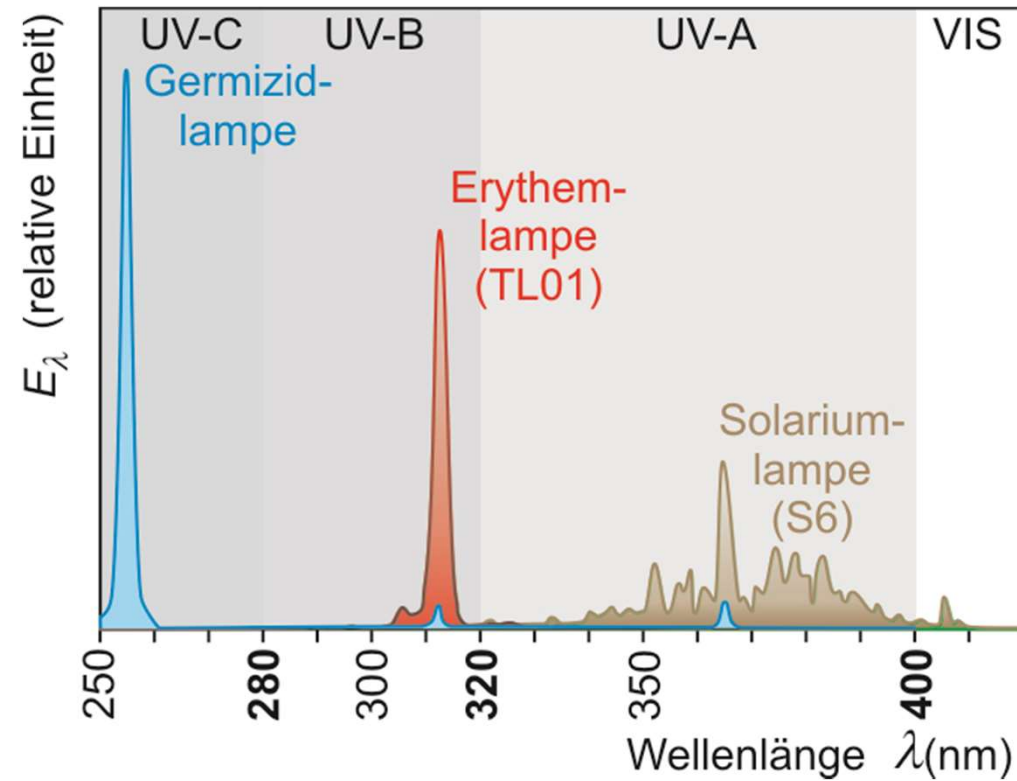


Fluorescein Angiographie



■ Lampen

Germizidlampen —
Niederdruckquecksilberdampf-
lampe



Blaulichttherapie von
Neugeborengelbsucht



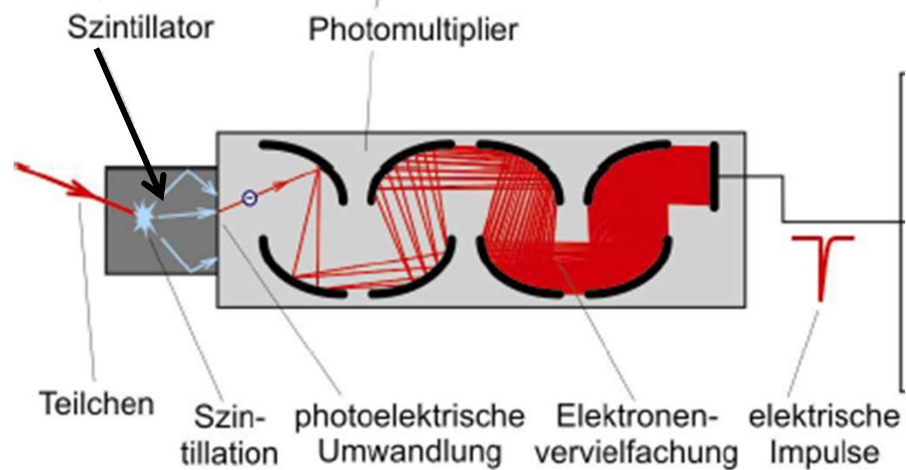
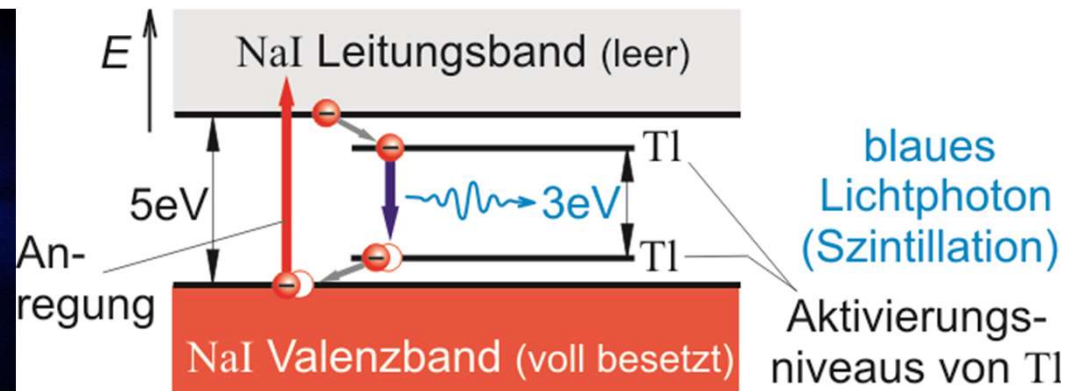
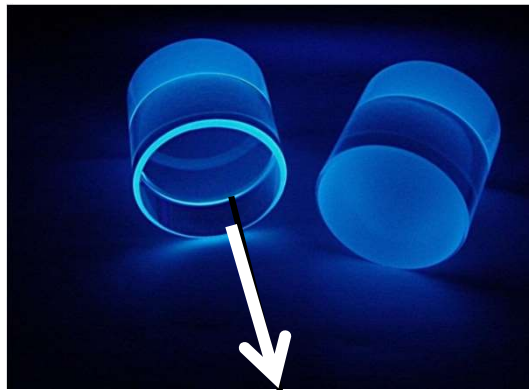
Leuchtdiode (LED:
light emitting diode)



■ Strahlungsdetektoren

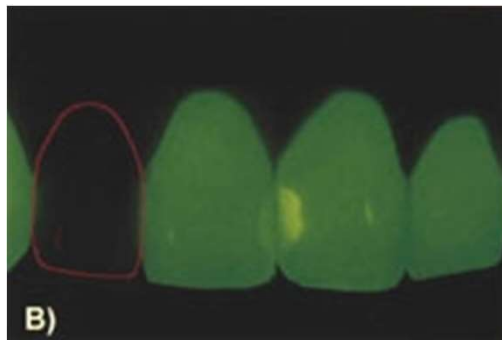
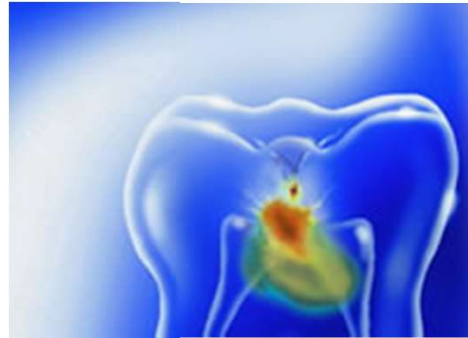
(Röntgenstrahlung, radioaktive Strahlungen, ...)

z. B. NaI(Tl)

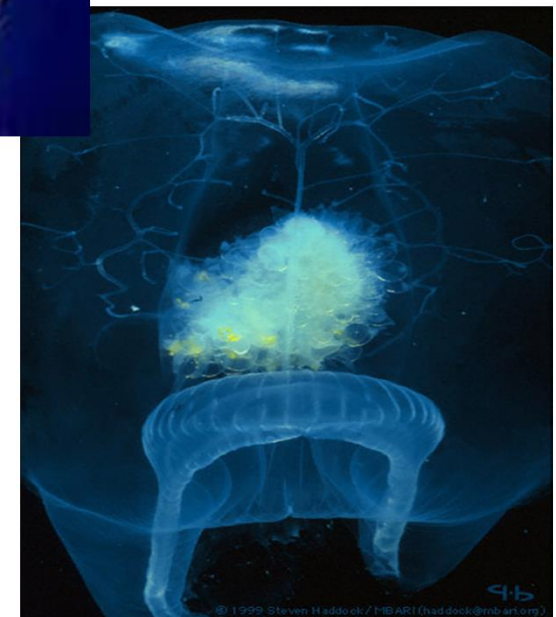
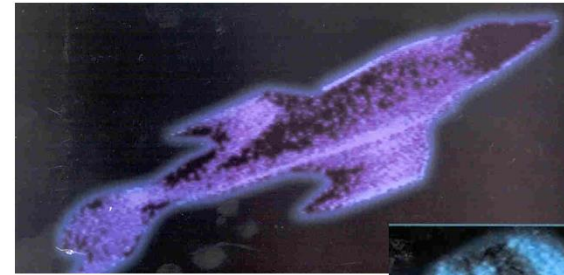


(s. noch Thermolumineszenzdosimeter)

- Zahnheilkunde

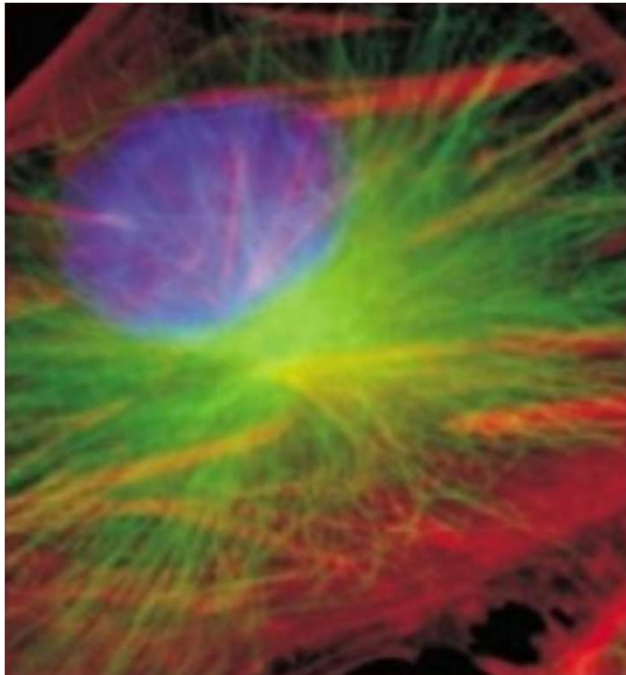


- Biolumineszenz



- Laser (s. später)

Hausaufgaben: Aufgabensammlung
2.47, 49, 51, 53, 60, 61
10.4, 6



Entstehung des Lichtes: Temperaturstrahlung, Lumineszenz

VI. Lichtemission

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

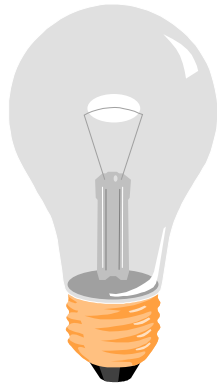
3. Lumineszenz

- a) Qualitative Beschreibung
- b) Mechanismus bei Atomen und Molekülen
- c) Gesetze: Stokes-Verschiebung, exponentielles Abklingen
- d) Anwendungen: Fluoreszenzspektroskopie, -mikroskopie, Sensoren, Lampen, Strahlungsdetektoren

Lichtemission: Lichtquellen

„warmes“ Licht

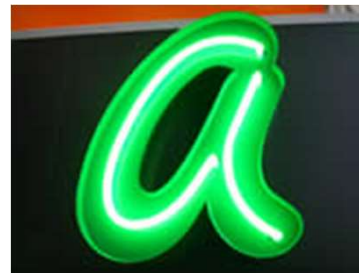
kontinuierliches Spektrum



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

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

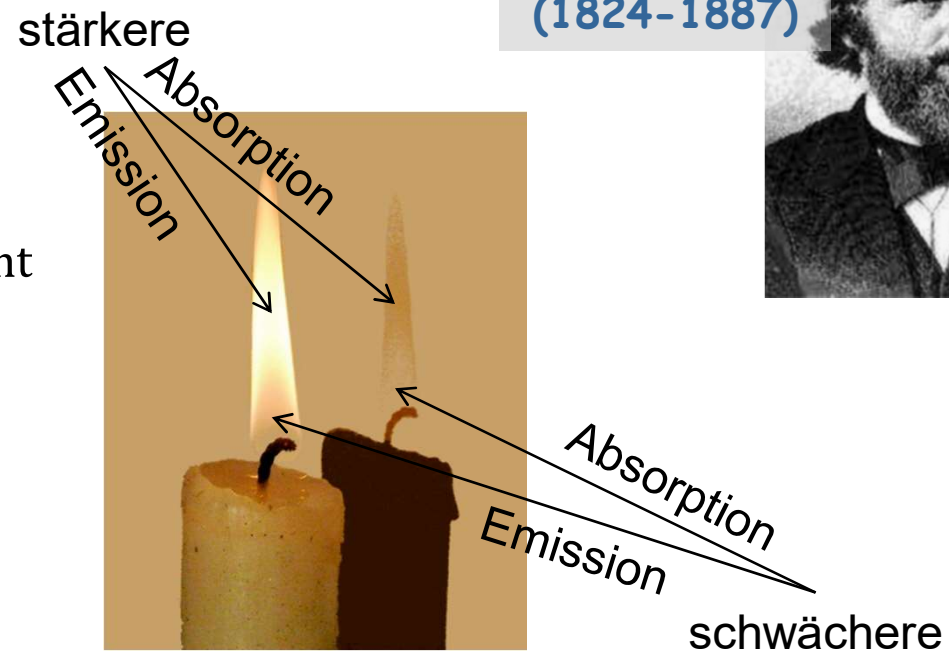
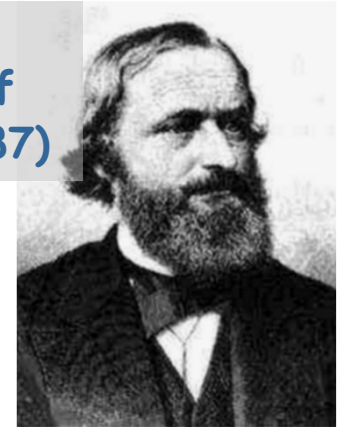
- spektraler Absorptionsgrad (α): $\alpha = \frac{J_{\text{absorbiert}}(\lambda)}{J_{\text{einfallend}}(\lambda)} \quad (0 \leq \alpha \leq 1)$

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

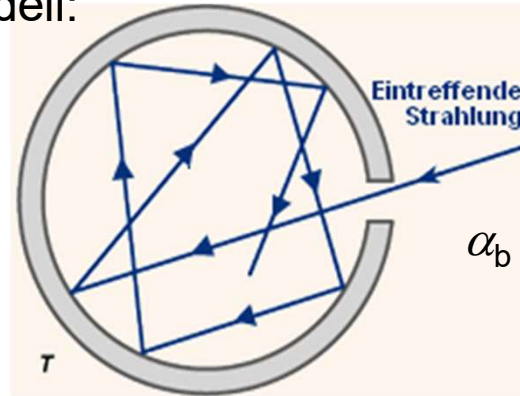
absolut schwarzer Körper/Strahler

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

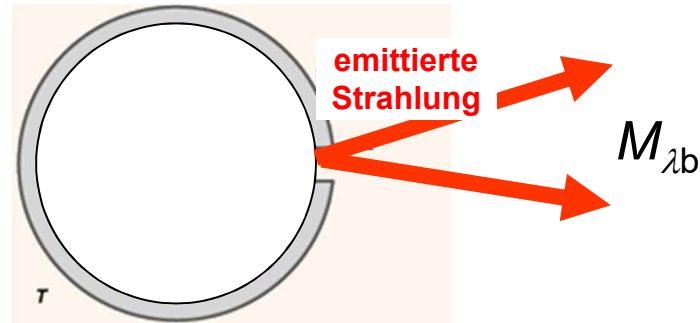
(„black body” = b)

Absorption:

Modell:

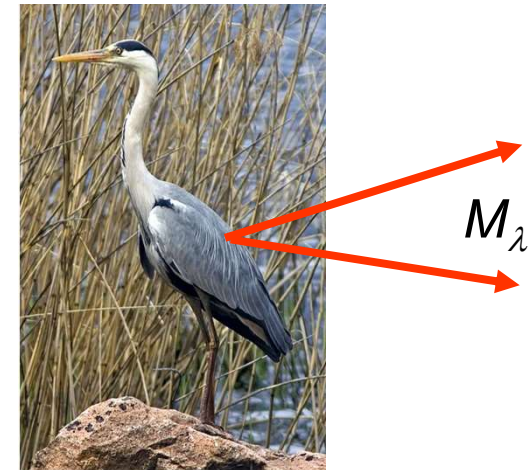
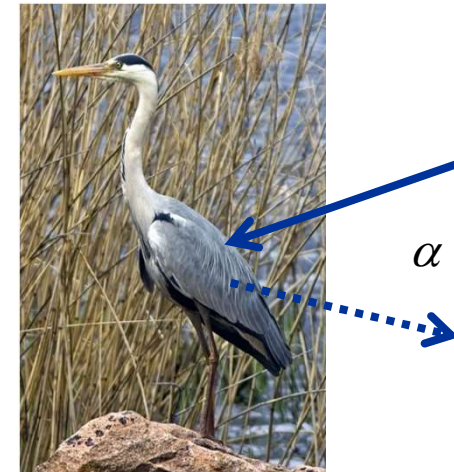


Emission:



ein reeller Körper

$$\alpha < 1$$



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

Gesetzes:

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

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

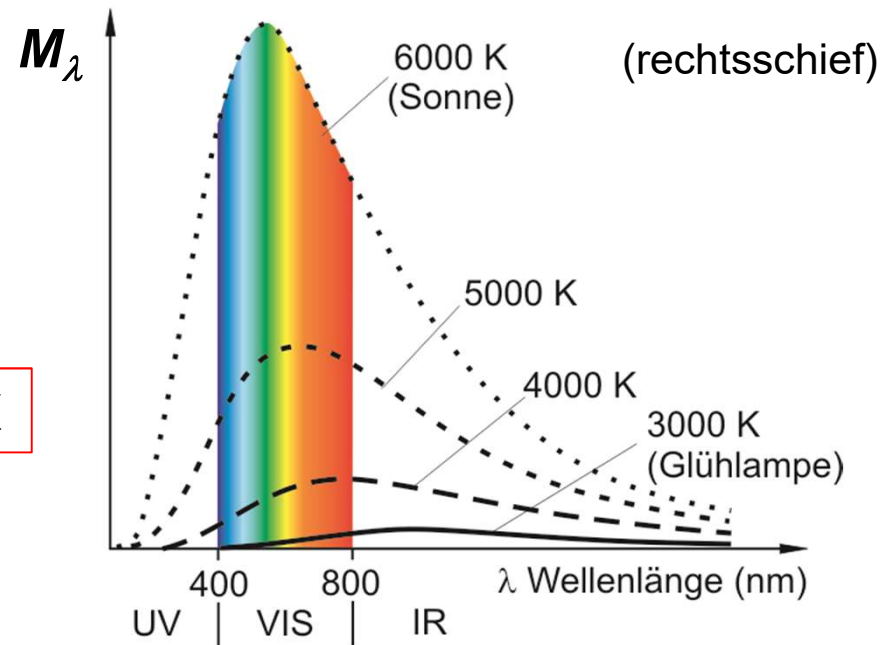
Wenn α des Körpers bekannt ist kann M_λ aus $M_{\lambda b}$ berechnet werden.

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

absolut schwarzer Körper/Strahler:

- kontinuierliches Spektrum:
- wiensches Verschiebungsgesetz:

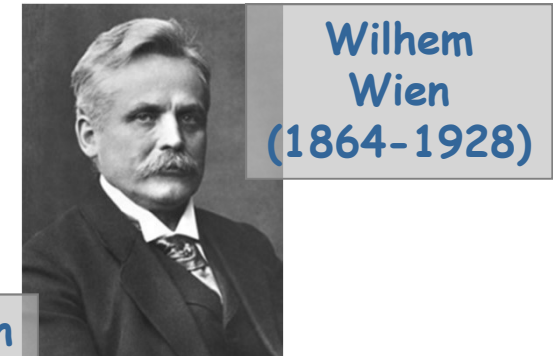
$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{konstant} = 2880 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$



- Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$M = \sigma T^4$$

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



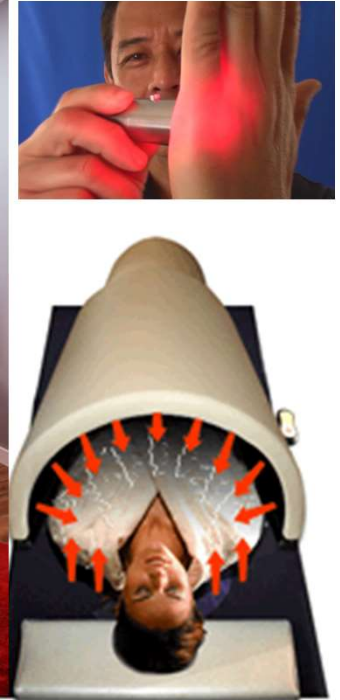
Jozef Stefan
(1835-1893)



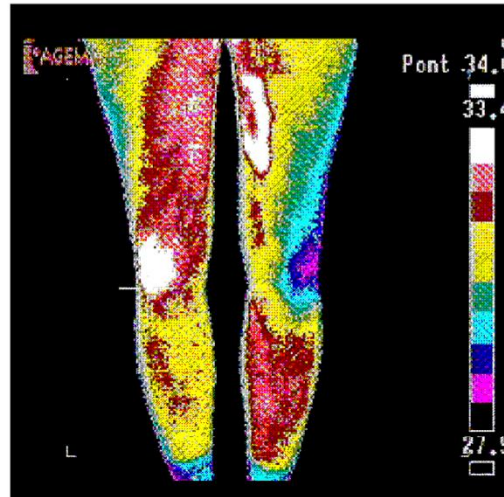
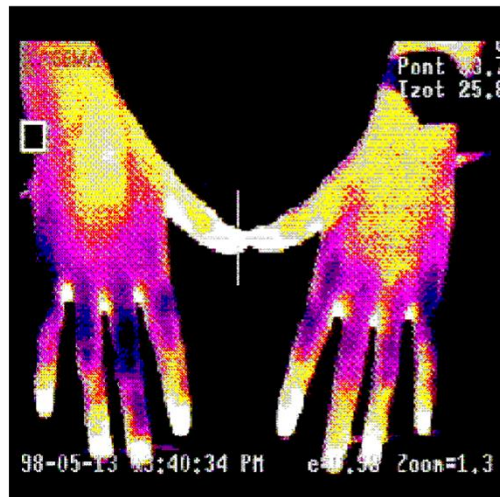
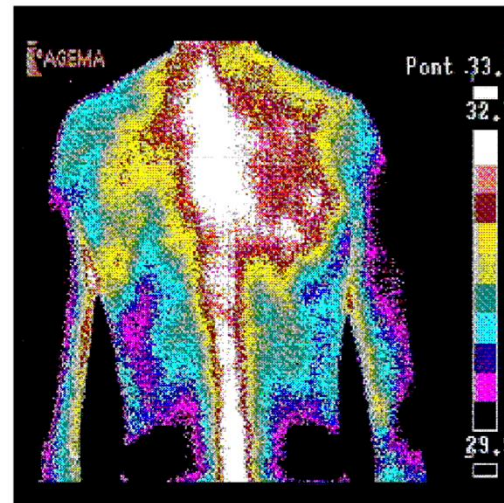
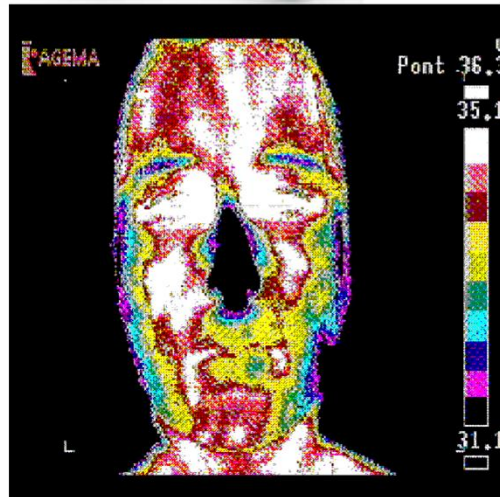
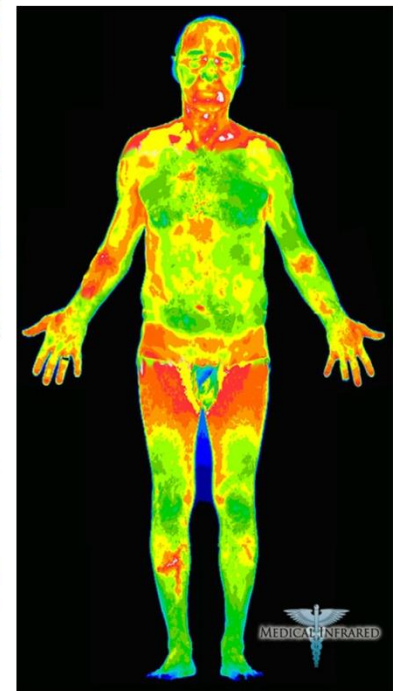
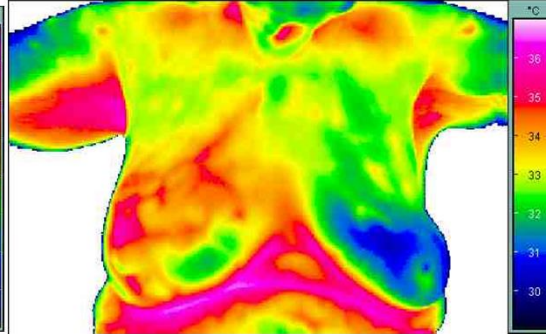
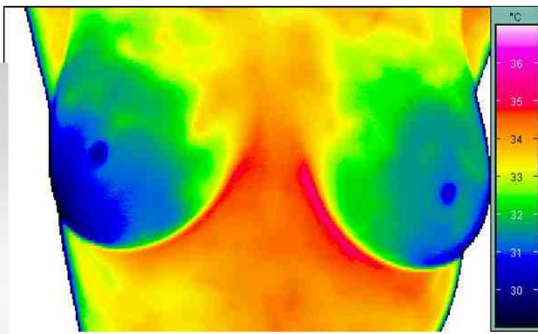
Ludwig Boltzmann
(1844-1906)

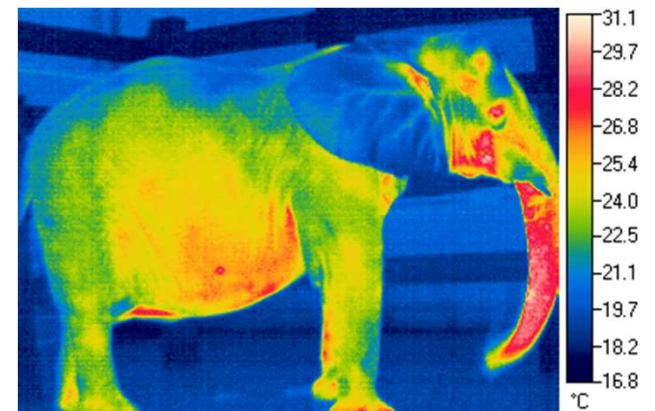
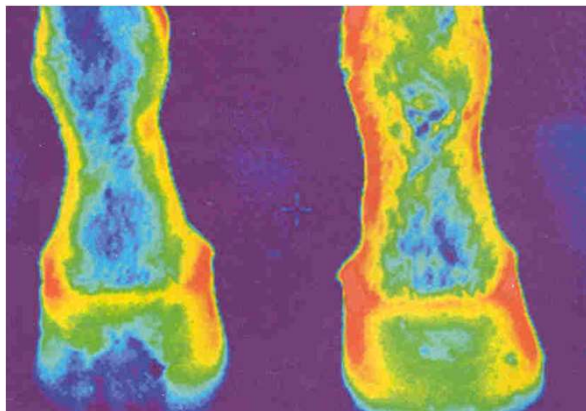
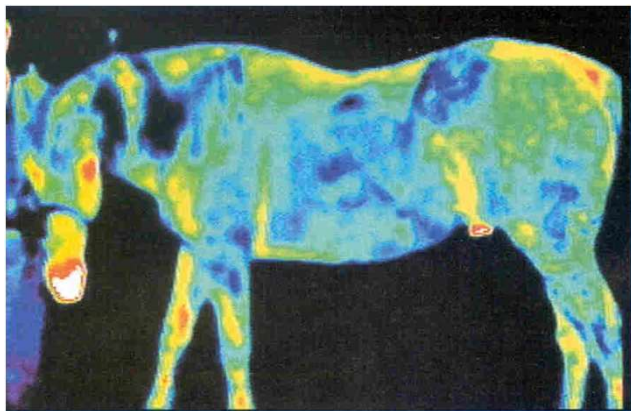
d) Anwendungen:

- IR-Therapie:

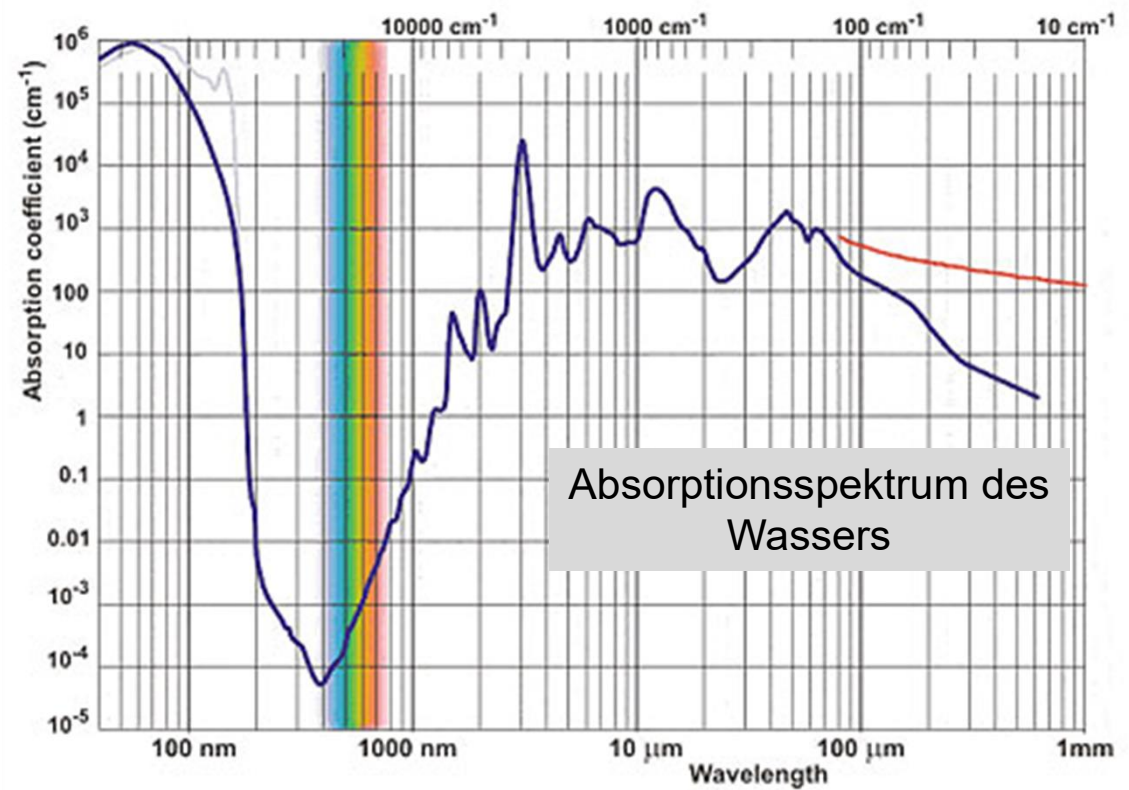


- IR-Diagnostik:





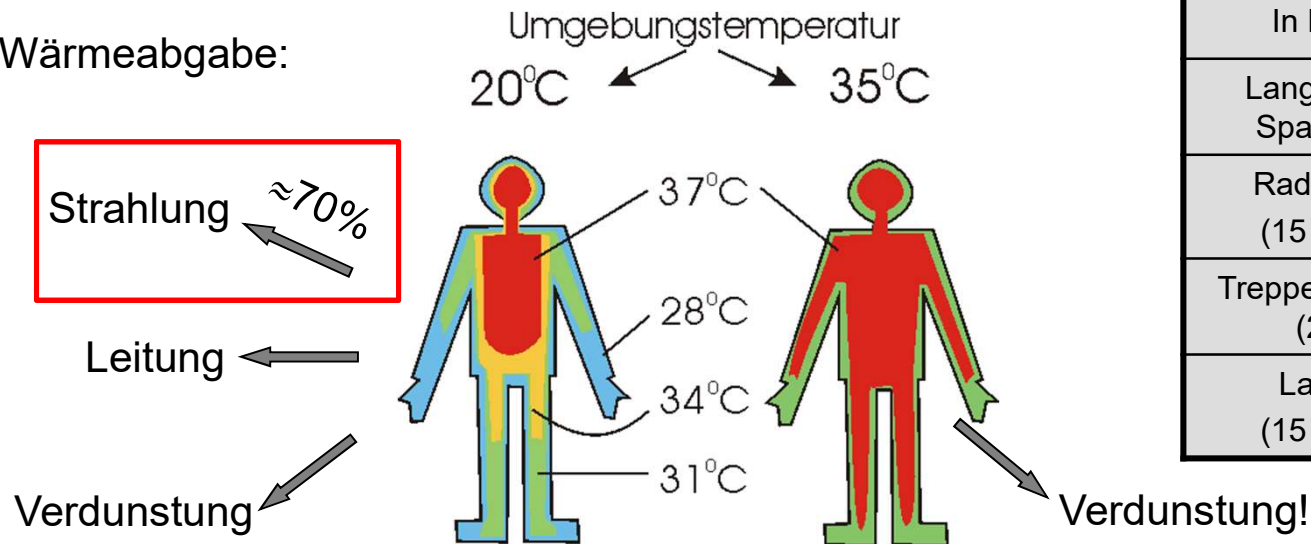
□ λ_{\max} der IR-Strahlung des Körpers:



- **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):

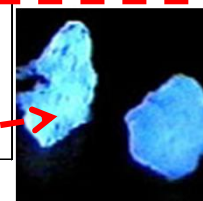
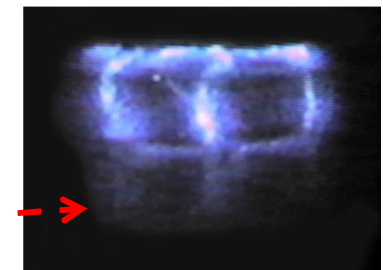
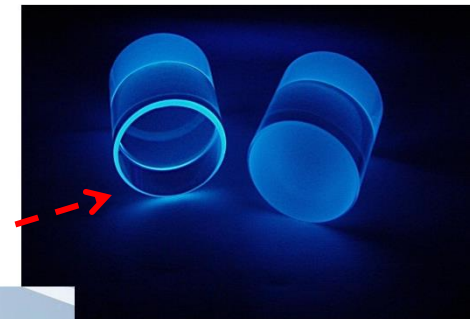
3. Lumineszenz

a) Qualitative Beschreibung:

- Überschussstrahlung über die Temperaturstrahlung
- nur schwach temperaturabhängig (mit Ausnahme der Thermolumineszenz)
- Linien/Bandenspektrum
- Aus Elektronenübergängen! (Dazu müssen die Elektronen zuerst angeregt werden.)

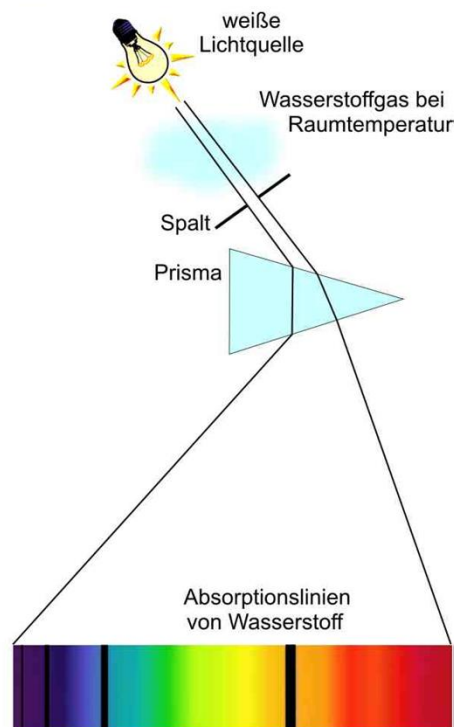
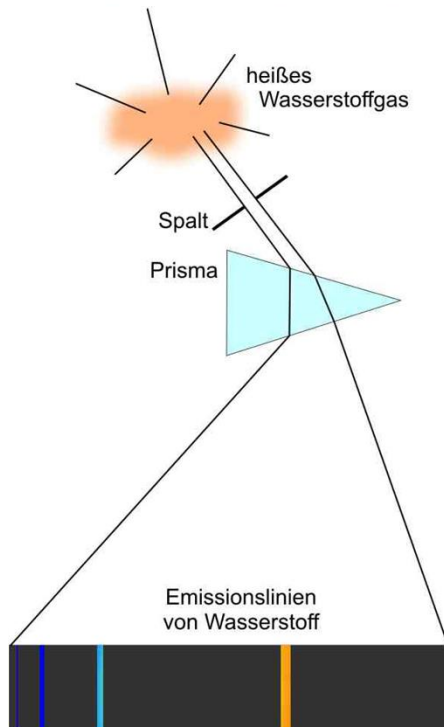
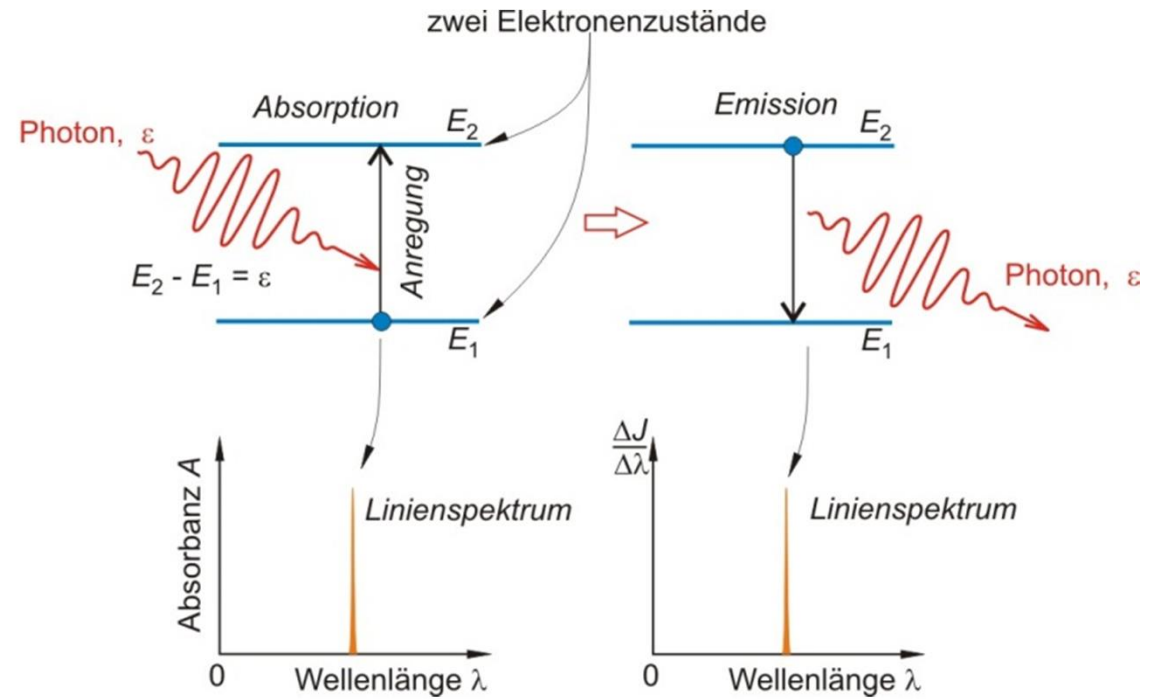
Fluoreszenz&Phosphoreszenz

<i>Art der Anregung</i>	<i>Name</i>	<i>Beispiel</i>
Licht	Photolumin.	Chinin-sulphat, Phosphor, ...
Röntgenstr.	Röntgenolumin.	NaI (Tl)
radioaktive Str.	Radiolumin.	NaI (Tl)
elektrisches Feld	Elektrolumin.	Quecksilberlampen
mechanische Wirkung	Tribolumin.	Würfelsucker
chemische Reaktion	Chemolumin. (Biolumin.)	Glühwürmchen
Wärme	Flammenphotometrie, Thermolumin.	Na ⁺ , K ⁺ Ionen CaSO ₄ (Dy)

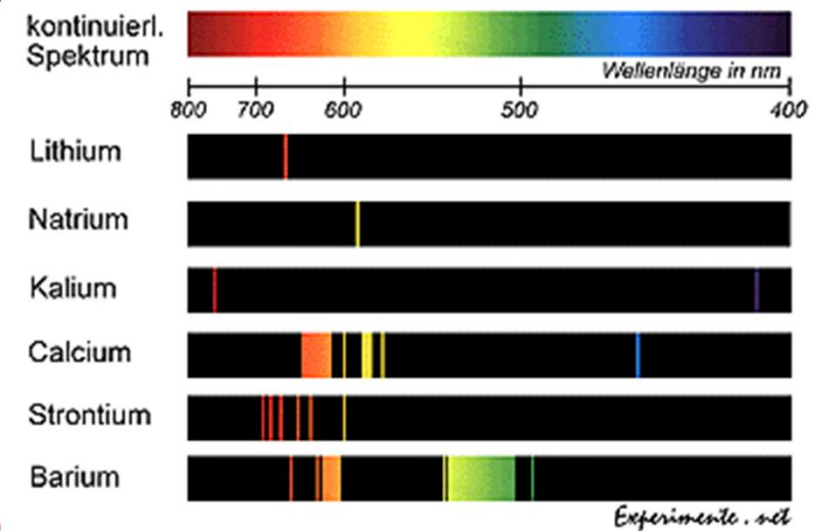


b) Mechanismus:

■ Lumineszenz von Atomen:



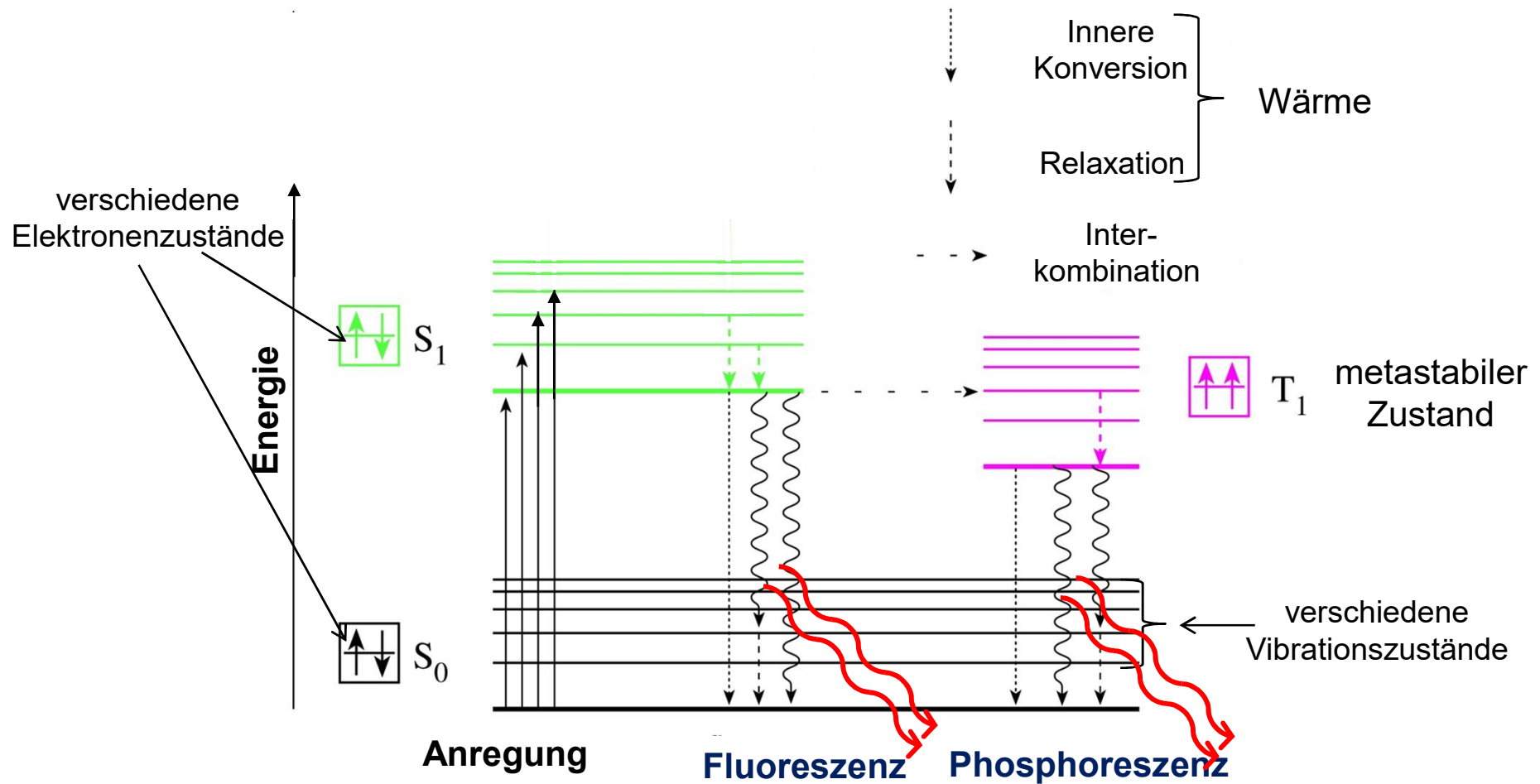
Linienpektren der Alkali- und Erdalkalimetalle



■ Lumineszenz von Molekülen:

$$E_{\text{Molekül}} = E_{\text{Elektron}} + E_{\text{Vibration}} (+ E_{\text{Rotation}})$$

Jablonski-Diagramm:



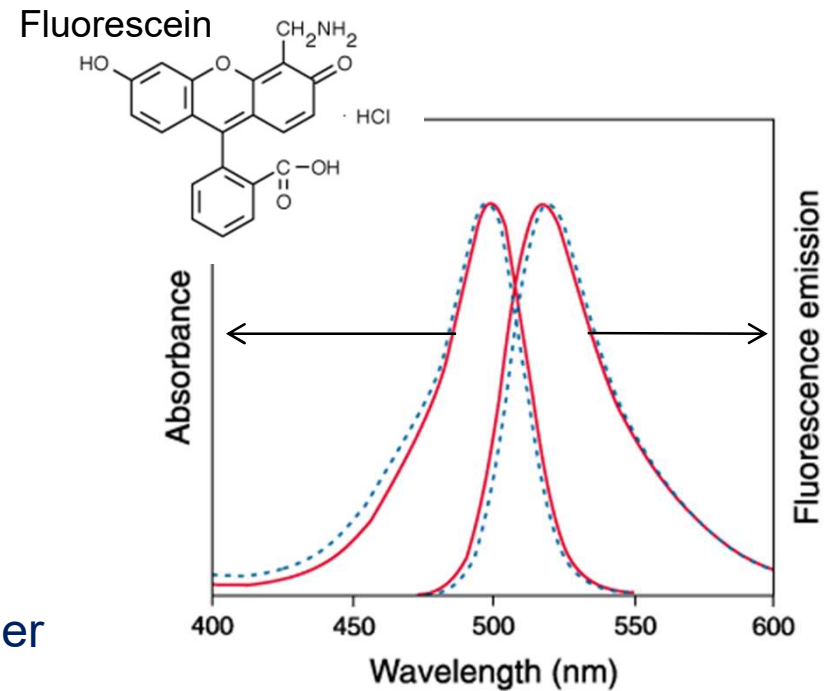
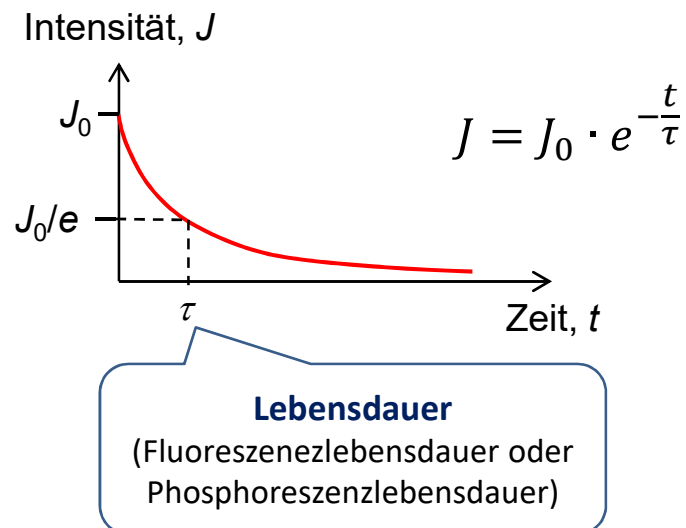
c) Gesetze:

- Linien/Bandenspektrum
- Stokes-Verschiebung:

$$\varepsilon_{\text{phos}} < \varepsilon_{\text{fluo}} < \varepsilon_{\text{abs}}$$

$$\lambda_{\text{abs}} < \lambda_{\text{fluo}} < \lambda_{\text{phos}}$$

- exponentielles Abklingen in der Zeit nach einer kurzzeitigen impulsförmigen Anregung:

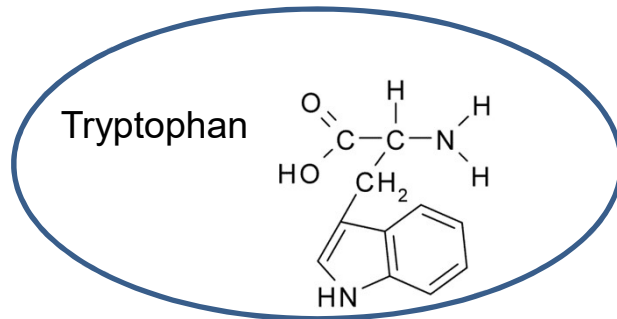


$$\tau_{\text{fluo}} < \tau_{\text{phos}}$$

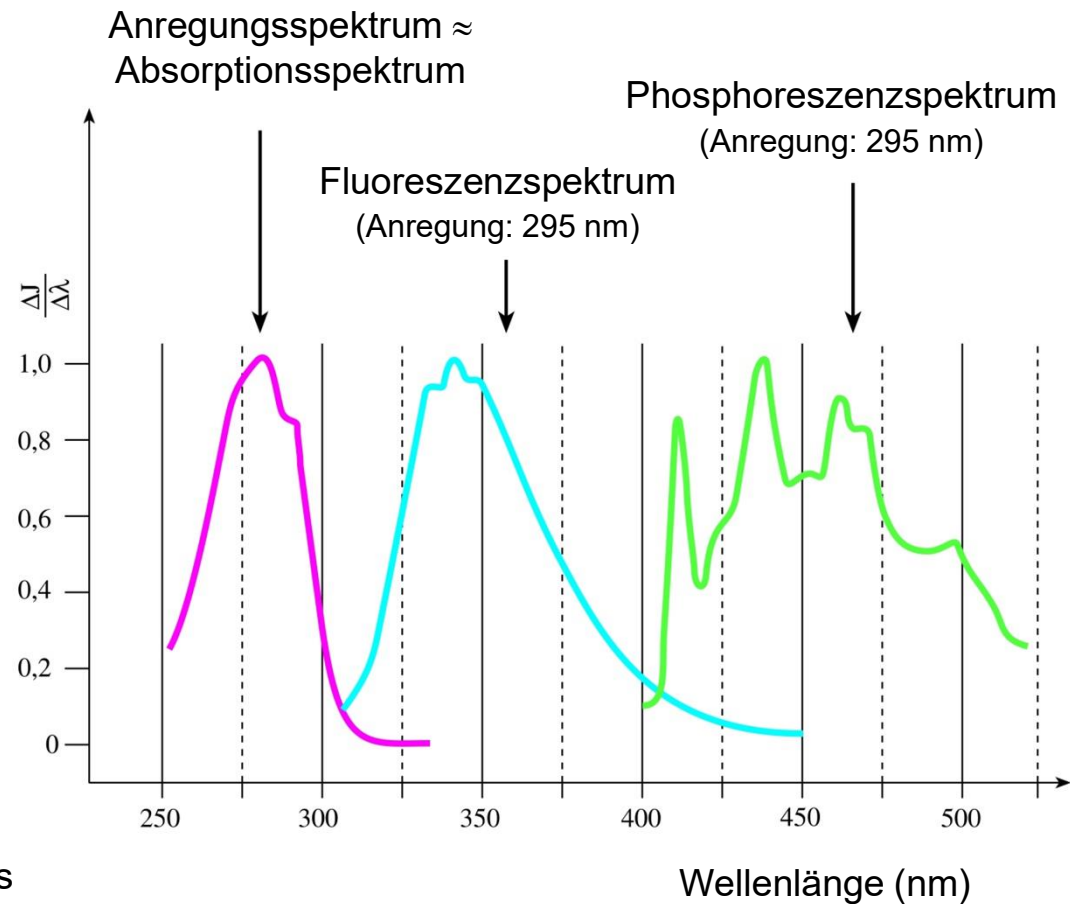
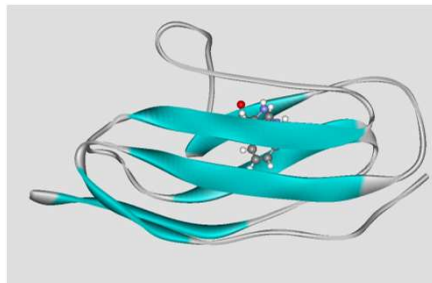
$\approx \text{ns}$ $\approx \mu\text{s} - \text{s}$

d) Anwendungen:

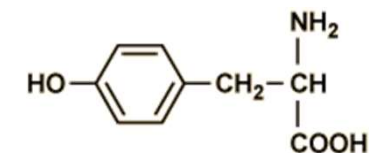
- Fluoreszenzspektroskopie
z.B. Proteinforschung



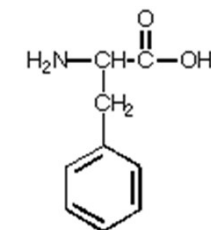
Die Eigenschaften des Lumineszenzlichtes (Intensität, spektrale Verteilung, Stokes-Verschiebung, Lebensdauer, ...) sind sehr empfindlich gegen der Umgebung, Moleülkonformation, Änderungen in diesen, ...



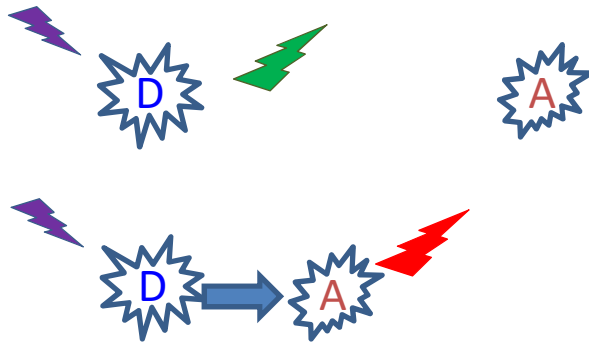
Tyrosin



Phenylalanin



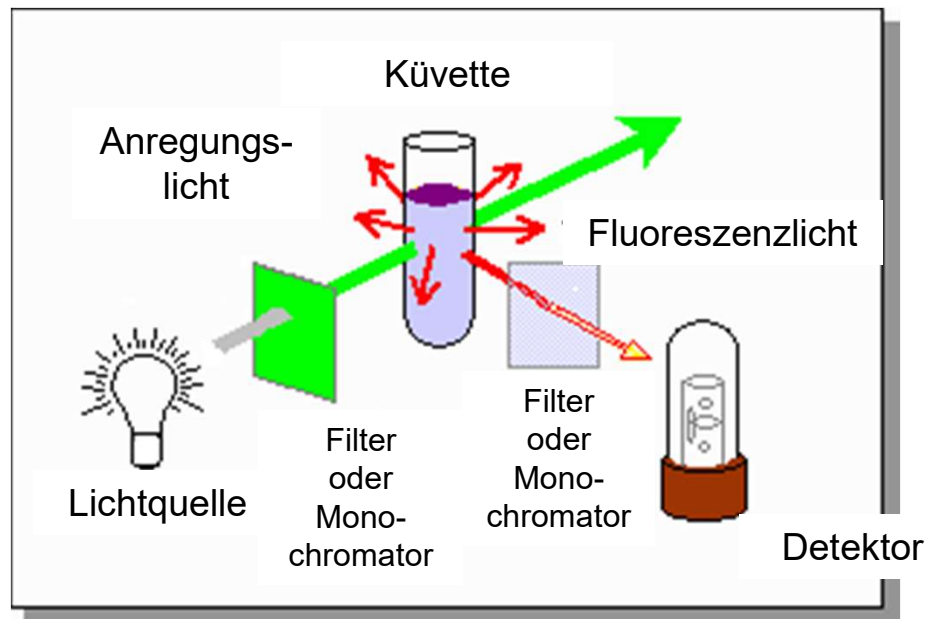
Förster Resonanzenergietransfer



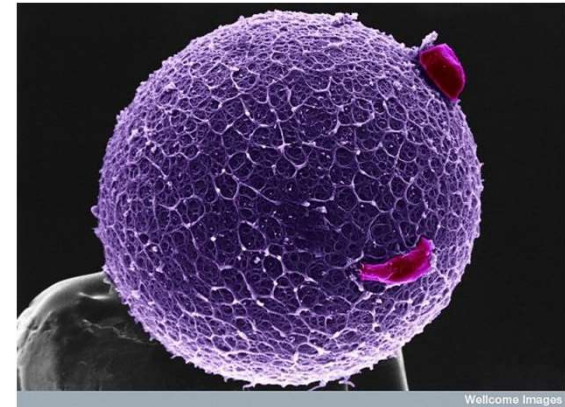
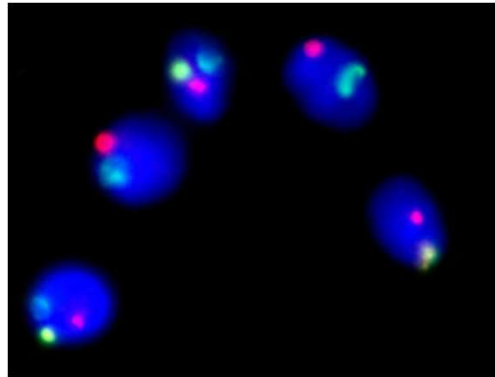
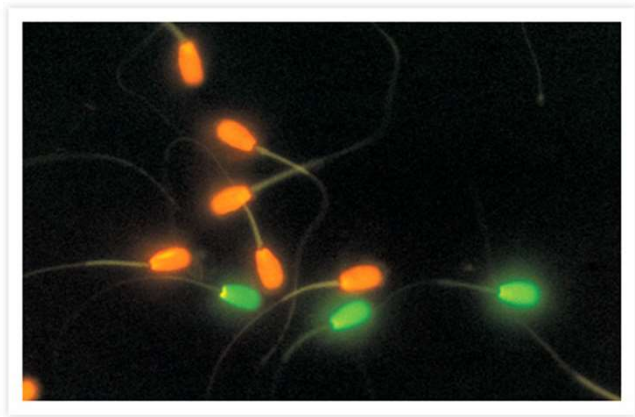
FRET ist sehr stark Abstandsabhängig:
Abstandsmessung in nm Bereich

z.B.: Assoziation von zwei Eiweiße
Faltung eines Makromoleküls

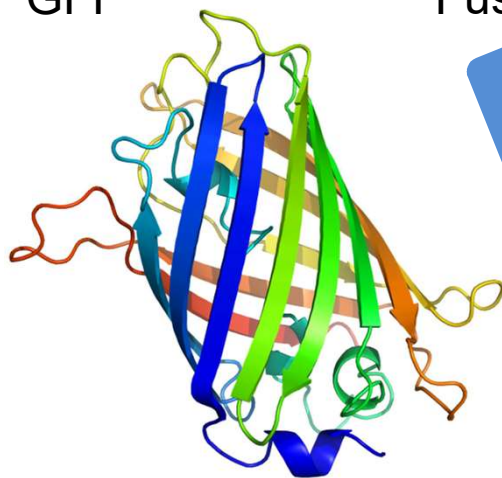
■ Aufbau eines Fluorimeters



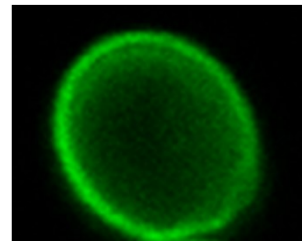
- Fluoreszenzmikroskopie



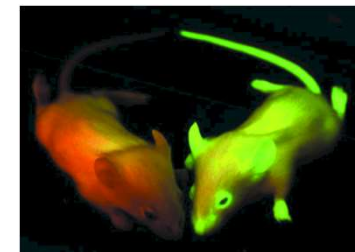
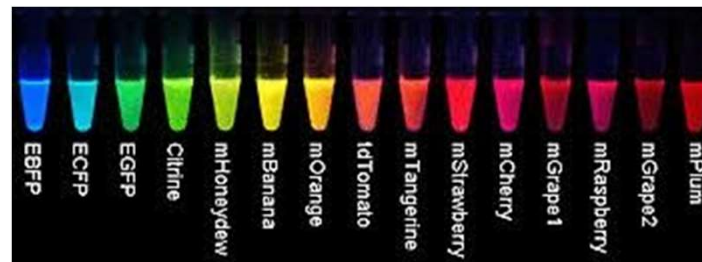
GFP



Fusionsprotein



Aequorea victoria

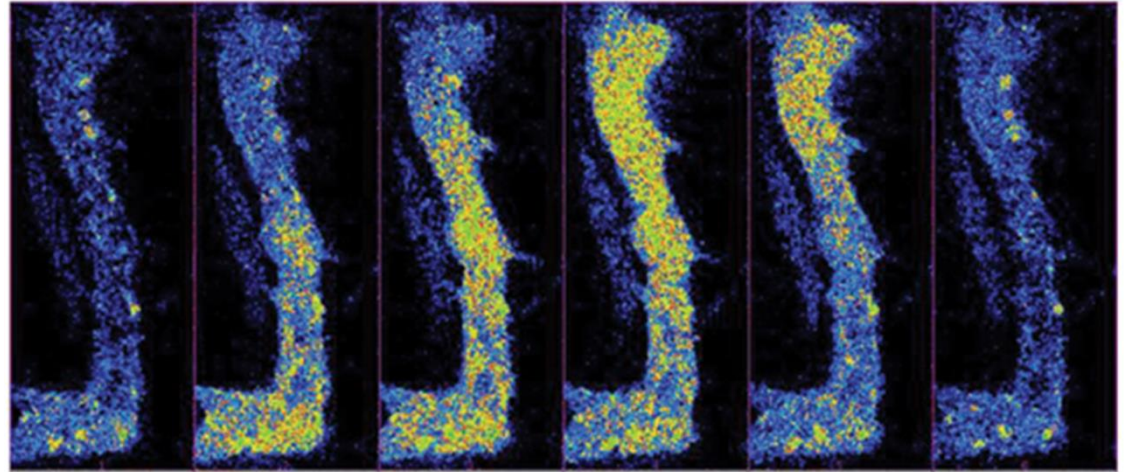


■ Sensoren

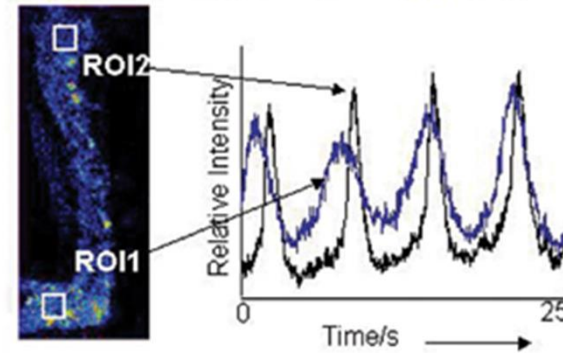
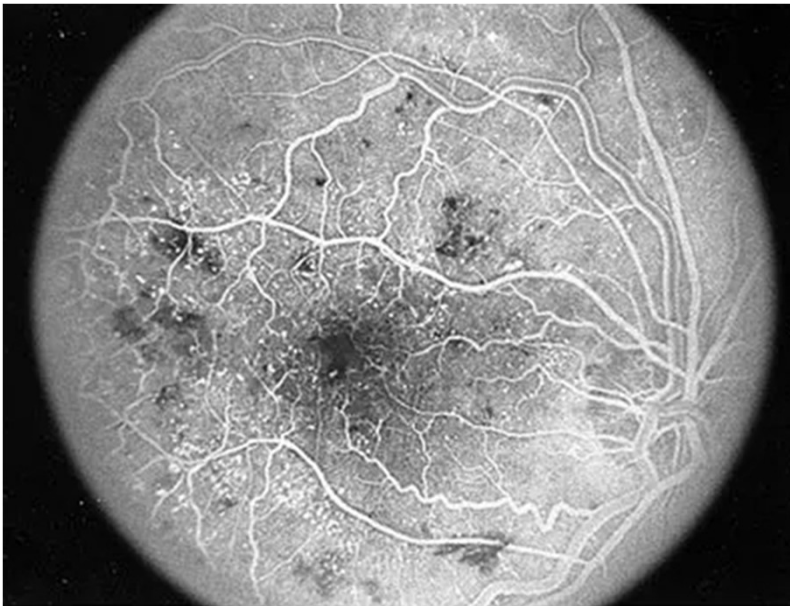
Sauerstoffsensor



Calciumsensor \Rightarrow Calciumwellen

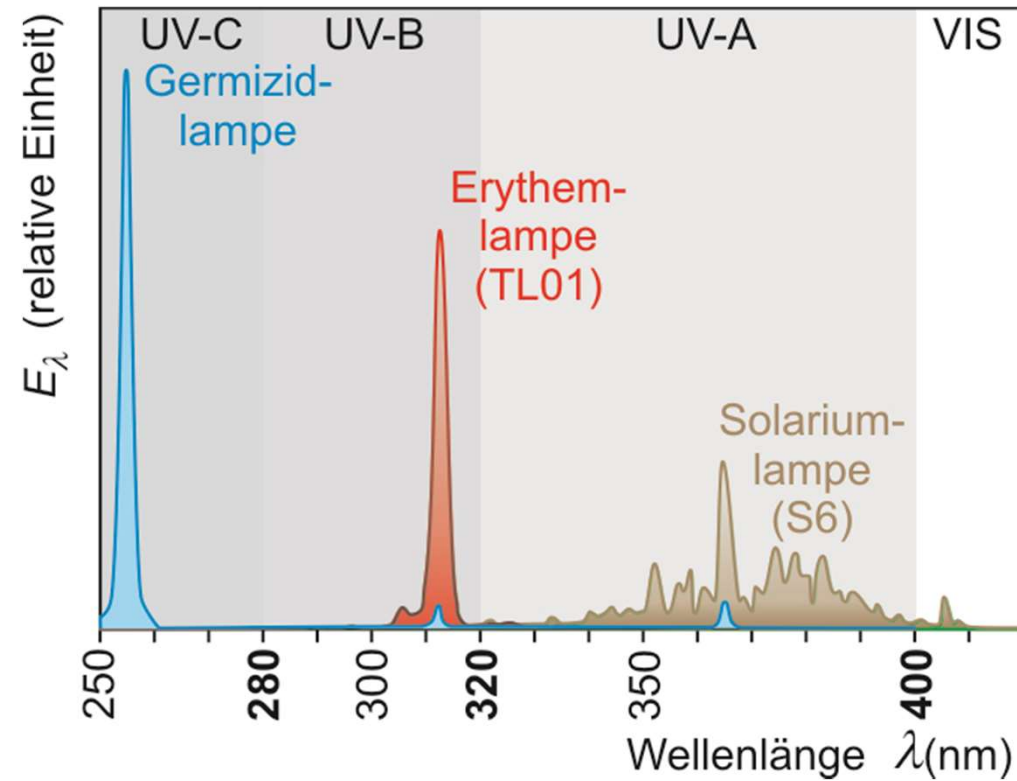


Fluorescein Angiographie



■ Lampen

Germizidlampen —
Niederdruckquecksilberdampf-
lampe



Blaulichttherapie von
Neugeborengelbsucht



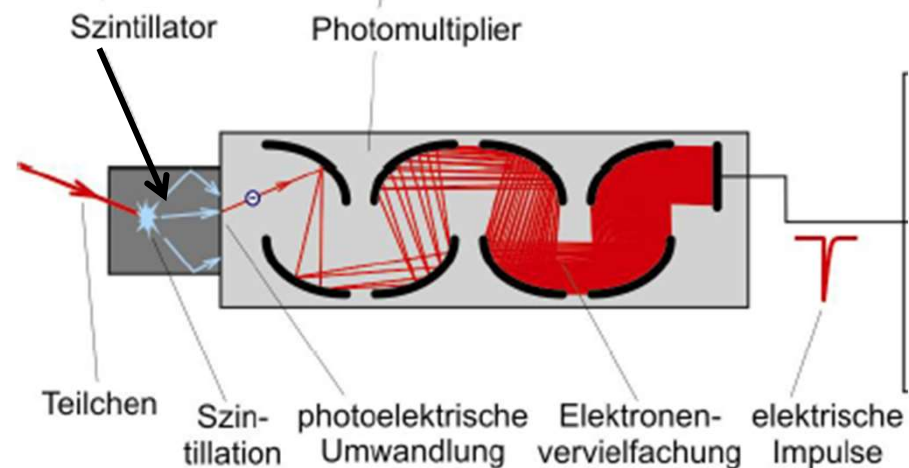
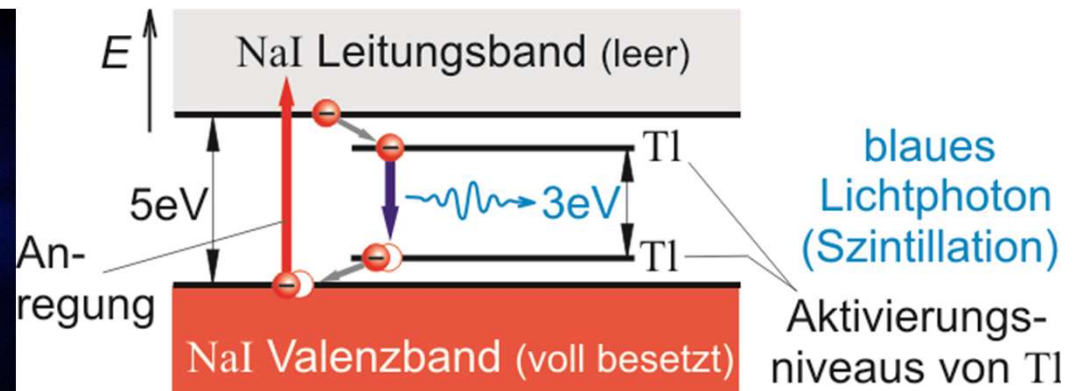
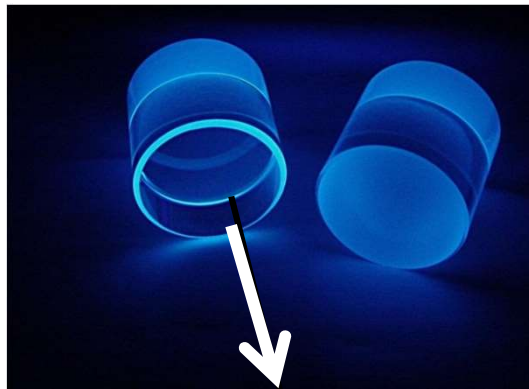
Leuchtdiode (LED:
light emitting diode)



■ Strahlungsdetektoren

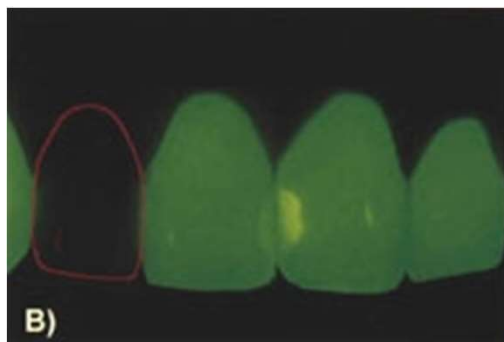
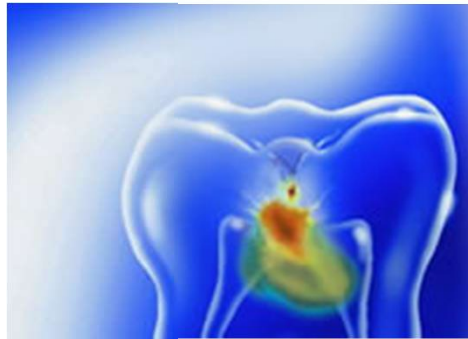
(Röntgenstrahlung, radioaktive Strahlungen, ...)

z. B. NaI(Tl)

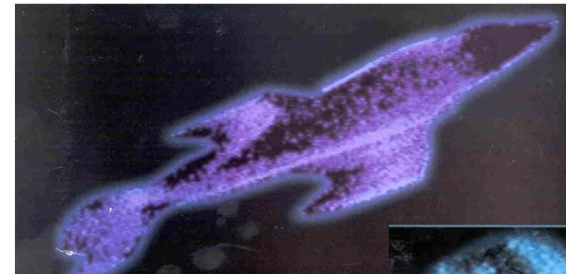


(s. noch Thermolumineszenzdosimeter)

- Zahnheilkunde



- Biolumineszenz



- Laser (s. später)

Hausaufgaben: Aufgabensammlung
2.47, 49, 51, 53, 60, 61
10.4, 6

