

Wechselwirkungen des Lichts mit der Materie

3. Absorption

- e) Schwächungsgesetz
- f) Anwendungen (Absorptionsspektrometrie, Lambert-Beer-Gesetz), Pulsoximetrie
- g) Aufbau eines Spektrophotometers

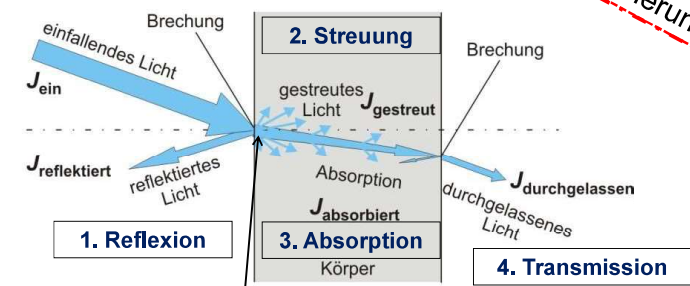
4. Transmission

- a) spektraler Transmissionskoeffizient (Transmittanz)
- b) Transmissionsspektrum:

5. Wechselwirkungen bezüglich der Polarisation des Lichtes

- a) lineare Polarisation des Lichtes:
- b) optische Aktivität:
- c) Drehung der Polarisationssebene durch geordnete Strukturen

VI. Wechselwirkungen zwischen Licht und Materie

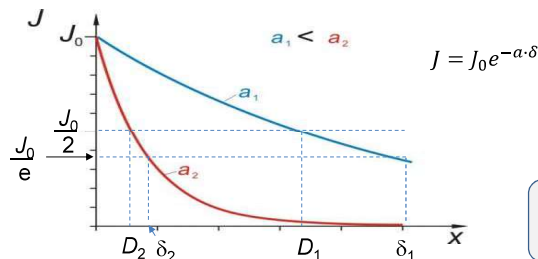


Die in den Körper eindringende Intensität ist J_0 : $J_0 = J_{\text{ein}} - J_{\text{reflektiert}}$

spektraler Absorptionskoeffizient $\alpha(\lambda)$: $\alpha(\lambda) = \frac{J_{\text{absorbiert}}(\lambda)}{J_{\text{einfallend}}(\lambda)}$ (dimensionslose Zahl)

Absorbanz (A): $A = \lg \frac{J_0}{J}$ (dimensionslose Zahl)

Diagramm:



$$J = J_0 e^{-a \cdot \delta}$$

Eindringtiefe und Schichtdicke (x) sind nicht zu verwechseln!

■ Halbwertsdicke (D):

$$\begin{aligned} \frac{J_0}{2} &= J_0 e^{-a \cdot D} \\ 2 &= e^{+a \cdot D} \quad / \ln \\ \ln 2 &= a \cdot D \\ D &= \frac{\ln 2}{a} \end{aligned}$$

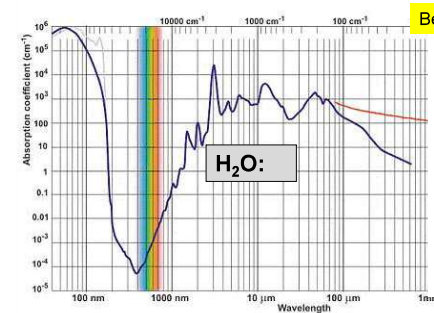
$$D = \ln 2 \cdot \delta$$

■ Eindringtiefe (δ): $x = \delta$
 $J = \frac{J_0}{e}$

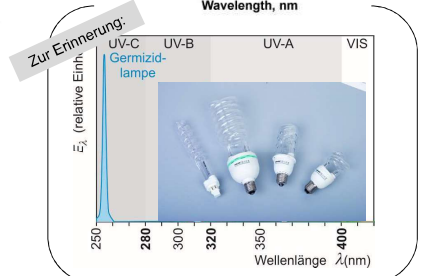
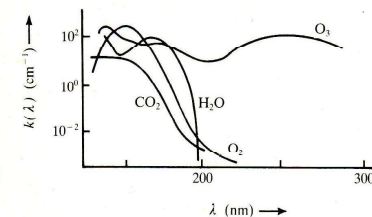
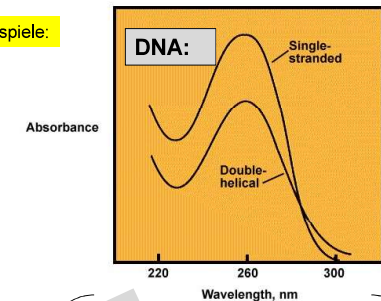
$$\begin{aligned} \frac{J_0}{e} &= J_0 e^{-a \cdot \delta} \\ e &= e^{+a \cdot \delta} \quad / \ln \\ 1 &= a \cdot \delta \\ \delta &= \frac{1}{a} \end{aligned}$$

■ Absorbanz (A): $A = \lg \frac{J_0}{J}$ (dimensionslose Zahl)

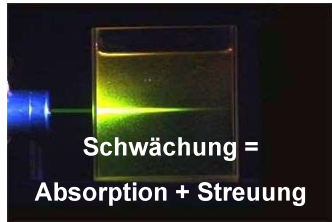
■ Absorptionsspektrum: α oder a oder A vs. λ



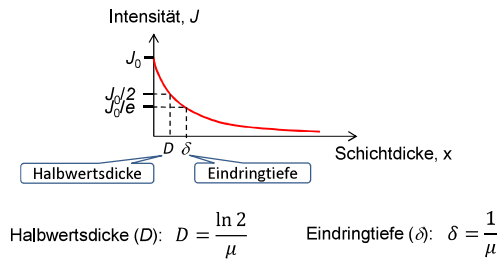
Beispiele:



e) Schwächungsgesetz: $J = J_0 \cdot e^{-\mu x}$



Linearer Schwächungskoeffizient (μ),
Maßeinheit: 1/m
(enthält den linearen Absorptions- und
Streuungskoeffizienten)



Gilt allgemein für elektromagnetische Str., β -Str., mechanische Str., siehe später!

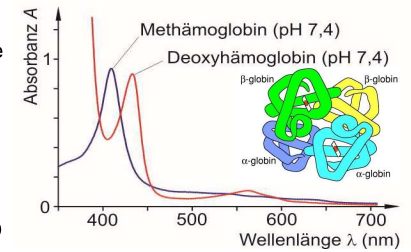
▪ (dekadische) Extinktion (E) = optische Dichte (OD): $E = \lg \frac{J_0}{J}$

Oft spricht man über Absorbanz auch dann, wenn die Streuung nicht vernachlässigbar ist, wenn man also Extinktion sagen müsste:
Absorbanz = (dekadische) Extinktion (E) = optische Dichte (OD)

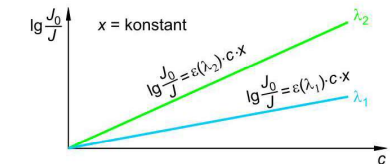
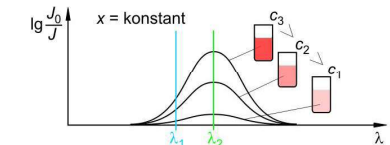
5

f) Anwendung: Absorptionsspektrometrie

- Untersuchung von biologischen Makromoleküle
- Konzentrationsbestimmung
 - Lambert-Beer-Gesetz (für dünne Lösungen)



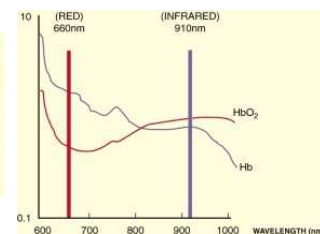
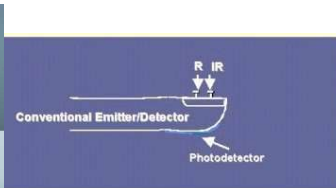
$$\lg \frac{J_0}{J} = \epsilon(\lambda) \cdot c \cdot x$$



▪ molarer Extinktionskoeffizient (ϵ), Maßeinheit: 1/(cm·mol/l)

6

Pulsoxymetrie



4. Transmission

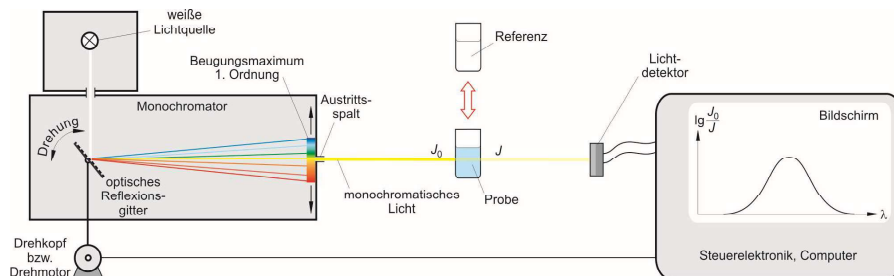
a) spektraler Transmissionskoeffizient $\tau(\lambda)$:
(Transmittanz)

$$\tau(\lambda) = \frac{J_{\text{durchgelassen}}(\lambda)}{J_{\text{einfallend}}(\lambda)}$$



$$\rho(\lambda) + \sigma(\lambda) + \alpha(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$$

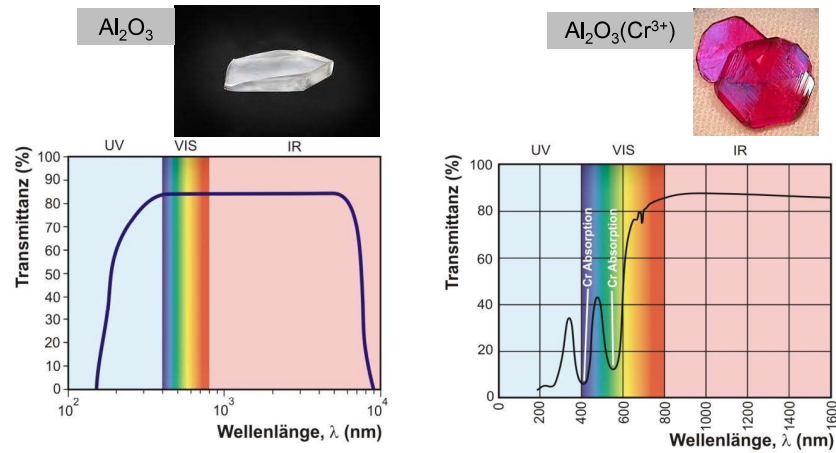
g) Aufbau eines Spektrophotometers:



7

8

b) Transmissionsspektrum: τ vs. λ



Bemerkung: $E = \lg \frac{J_0}{J} = \lg \frac{1}{\tau}$

9

Zusammenfassung der für die Charakterisierung der Wechselwirkungen eingeführten Größen

Erscheinungen: Reflexion, Streuung, Absorption, Schwächung (=Streuung+Absorption), Transmission

Intensitätswerte: $J_{\text{ein}}, J_{\text{reflektiert}}, J_0 (= J_{\text{ein}} - J_{\text{reflektiert}}), J_{\text{gestreut}}, J_{\text{absorbiert}}, J_{\text{durchgelassen}}$

(spektrale) Koeffizienten:

- (spektraler) Reflexionskoeffizient (Reflektanz, Reflexionsgrad) $\rho(\lambda)$
- (spektraler) Streukoeffizient $\sigma(\lambda)$
- (spektraler) Absorptionskoeffizient $\alpha(\lambda)$
- (spektraler) Transmissionskoeffizient (Transmittanz) $\tau(\lambda)$

dimensionslose Quotienten
 $\rho(\lambda) + \sigma(\lambda) + \alpha(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$

weitere Größen zur Absorption

- linearer Absorptionskoeffizient (a), Maßeinheit: 1/m
- Absorbanz (A), Maßeinheit: keine (dimensionslos)

weitere Größen zur Schwächung

- linearer Schwächungskoeffizient (μ), Maßeinheit: 1/m
- (dekadische) Extinktion (E) = optische Dichte (OD), Maßeinheit: keine (dimensionslos)
- molarer Extinktionskoeffizient (ϵ), Maßeinheit: 1/(cm·mol/l)

Oft auch als Absorbanz genannt.

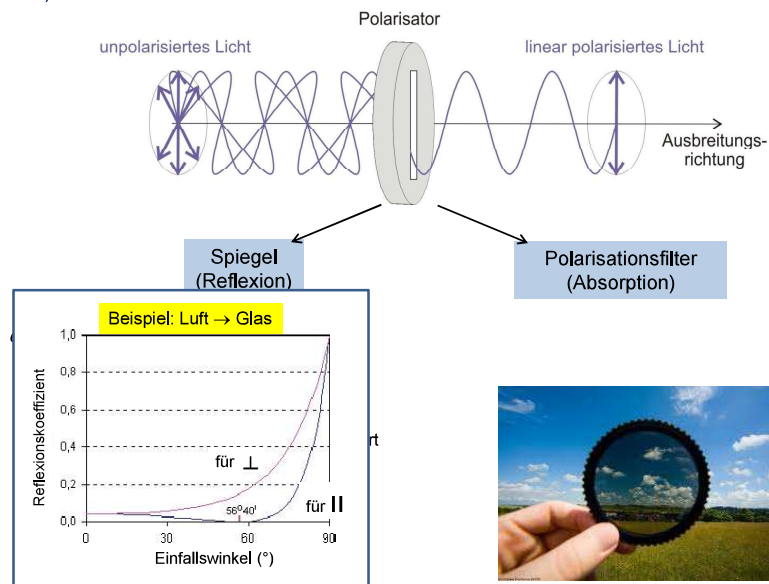
weitere Größen zur Absorption oder zur Schwächung

- Halbwertsdicke (D), Maßeinheit: m
- Eindringtiefe (δ), Maßeinheit: m

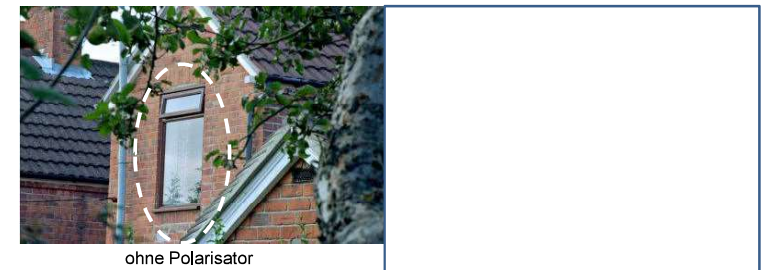
10

5. Wechselwirkungen bezüglich der Polarisierung des Lichtes

a) lineare Polarisation des Lichtes:



11



b) optische Aktivität: Drehung der Schwingungsebene des linear polarisierten Lichtes

Drehwinkel (°)

Konzentration (g/cm³)

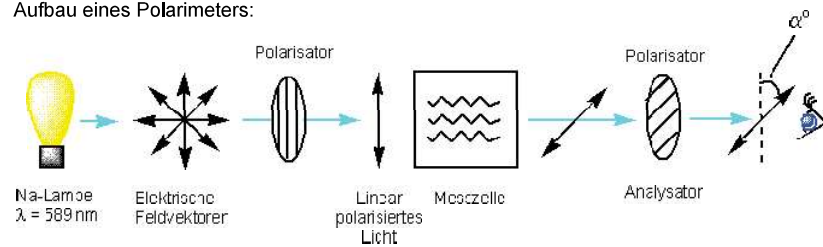
Länge der Küvette (dm)

$$\alpha = [\alpha]_D^{20} \cdot c \cdot l$$

Drehwert, Drehvermögen (spez. Drehung)
(°·cm³/(g·dm)) bezogen auf 20°C und auf die D-Linie (589 nm) von Na

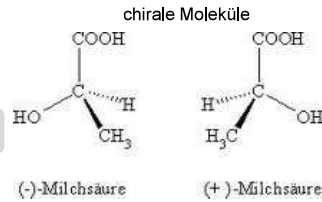
■ Anwendung: Polarimetrie - Konzentrationsbestimmung

Aufbau eines Polarimeters:



13

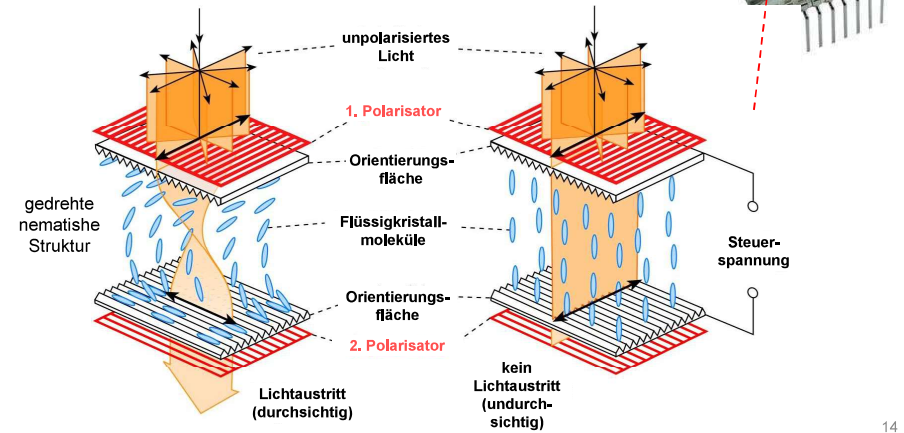
Siehe Praktikum!



c) Drehung der Polarisationssebene durch geordnete Strukturen

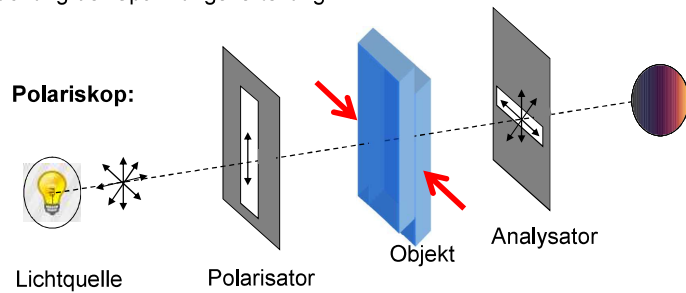
Anwendung: LCD (liquid crystal display - Flüssigkristallbildschirm)

Grundprinzip: elektro-optische Erscheinung

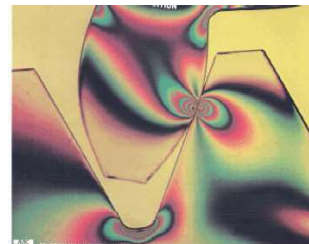


14

Untersuchung der Spannungsverteilung

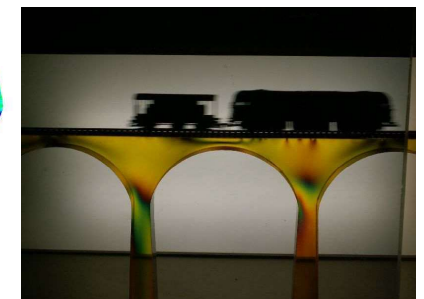
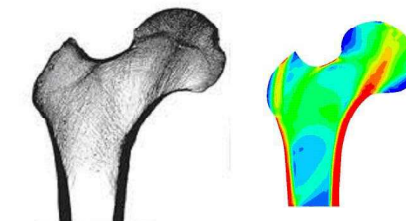
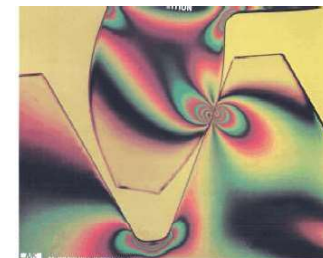


Spannungsoptik:



→ Spannungsverteilung

15



16

Lichtemission

1. Temperaturstrahlung

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

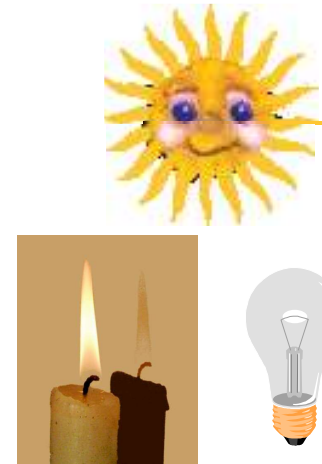
2. Lumineszenz

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

17

Lichtquellen

„warmes“ Licht
kontinuierliches Spektrum



Temperaturstrahler

„kaltes“ Licht
Linien- oder Bandenspektrum



Lumineszenzstrahler

18

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

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

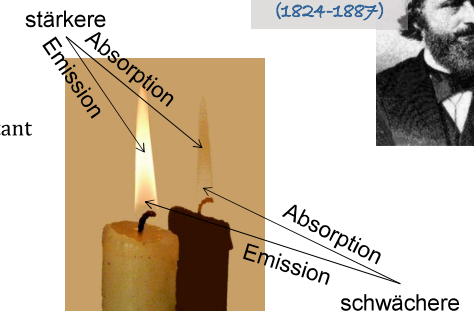
- spektraler Absorptionskoeffizient (α): $\alpha = \frac{J_{\text{absorbiert}}(\lambda)}{J_{\text{einfallend}}(\lambda)} \quad (0 \leq \alpha \leq 1)$

19

c) Gesetze:

- kirchhoffsches Gesetz:

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



stärkere
Absorption
und
Emission



schwächere
Absorption
und
Emission

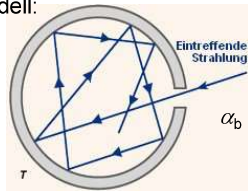
➡ Abstraktion: absolut schwarzer Körper/Strahler

20

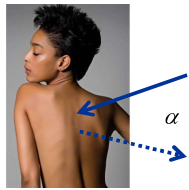
absolut schwarzer Körper/Strahler
 $\alpha = 1 (= \alpha_b)$
 („black body“ = b)

Absorption:

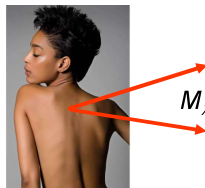
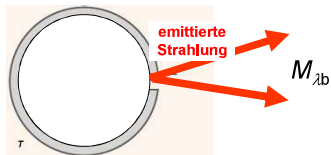
Modell:



ein reeller Körper
 $\alpha < 1$



Emission:



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.

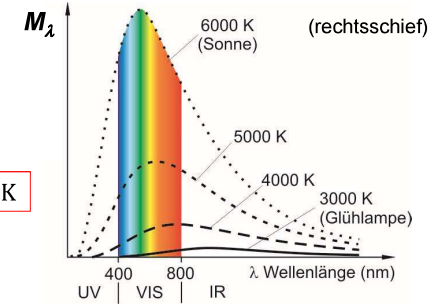
Wir beschäftigen uns nur mit den Gesetzen für den absolut schwarzen Strahler.

21

absolut schwarzer Körper/Strahler:

- kontinuierliches Spektrum:
- Wien'sches Verschiebungsgesetz:

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



- Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$M = \sigma T^4$$

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



22

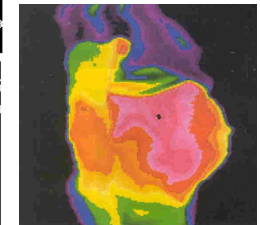
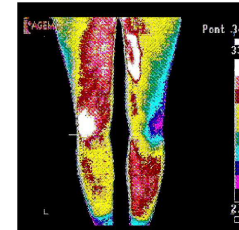
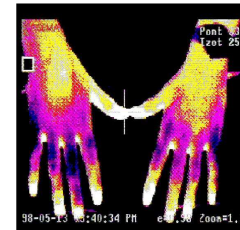
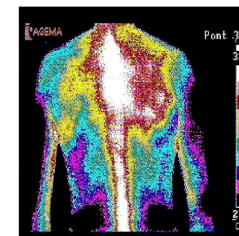
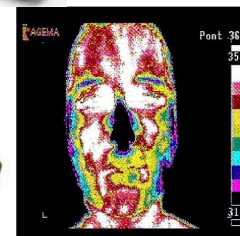
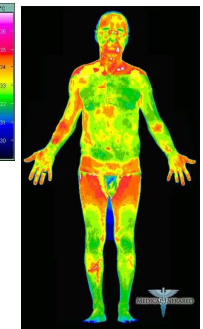
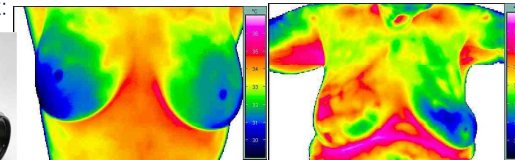
d) Anwendungen:

- IR-Therapie:

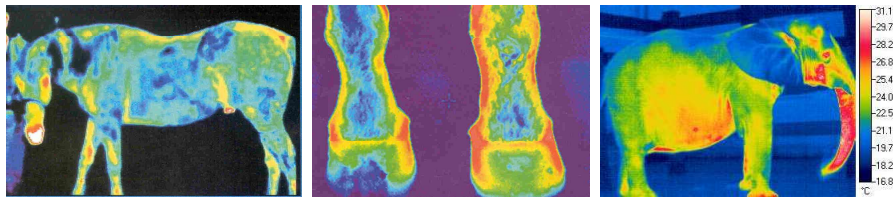


23

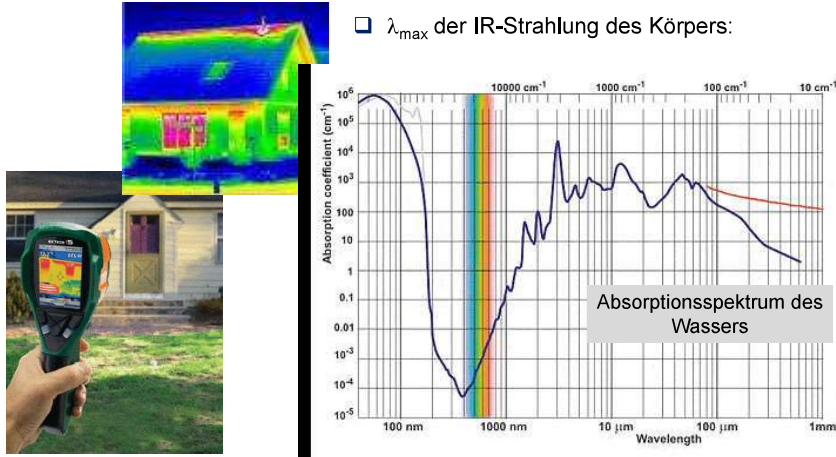
- IR-Diagnostik:



24



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

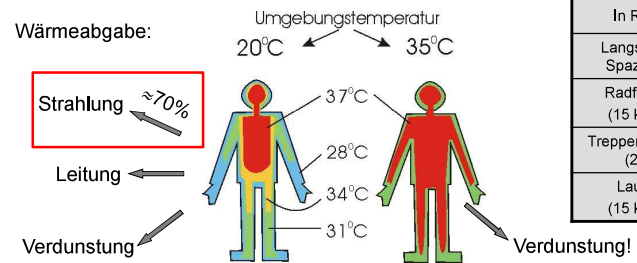


25

■ 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 ($\Delta E_{\text{netto}} = \Delta E_{\text{emittierte}} - \Delta E_{\text{absorbierte}}$):

$$M = \sigma T^4 \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta E_{\text{netto}} = \Delta A \cdot \Delta t \cdot \sigma (T_{\text{Körper}}^4 - T_{\text{Umgebung}}^4) \\ M = \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{\Delta E}{\Delta A \Delta t} \end{array} \right.$$

26

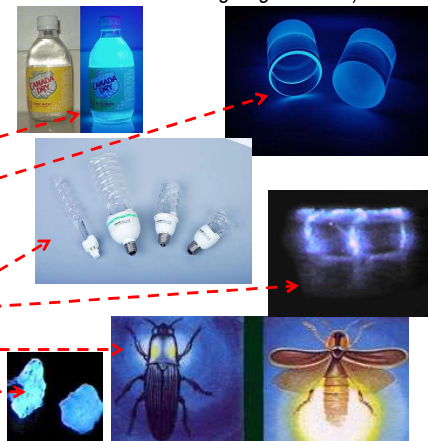
2. Lumineszenz

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

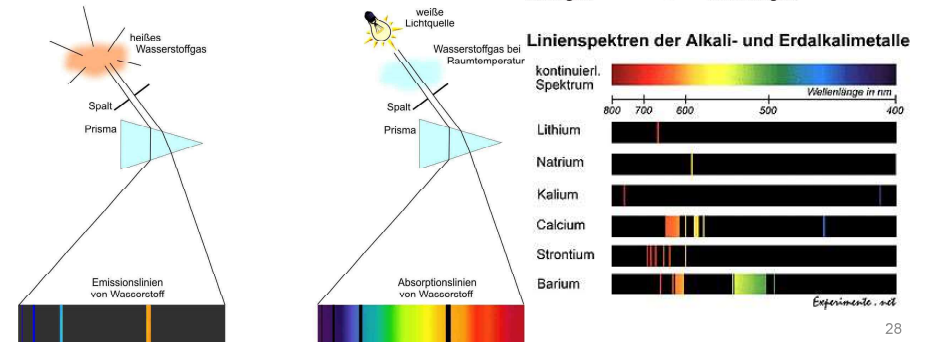
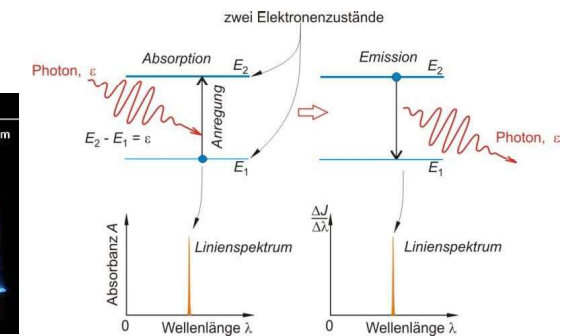
Art der Anregung	Name	Beispiel
Licht	Photolumin.	Chinin-sulphat, Phosphor, ...
Röntgenstr.	Röntgenolumin.	NaI (TI)
radioaktive Str.	Radiolumin.	NaI (TI)
elektrisches Feld	Elektrolumin.	Quecksilberlampen
mechanische Wirkung	Tribolumin.	Würfelfucker
chemische Reaktion	Chemolumin. (Biolumin.)	Glühwürmchen
Wärme	Thermolumin.	CaSO ₄ (Dy)



27

b) Mechanismus:

■ Lumineszenz von Atomen:

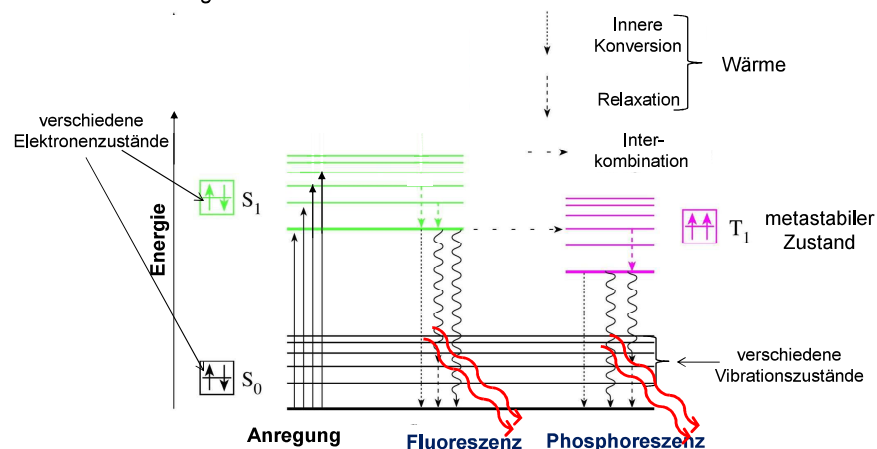


28

■ Lumineszenz von Molekülen:

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

Jablonski-Diagramm:



29

c) Gesetze:

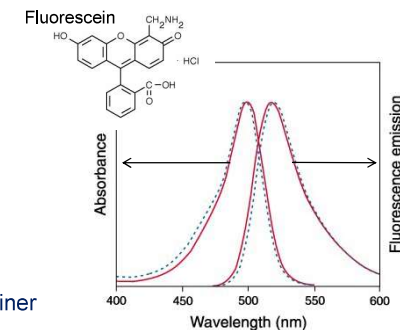
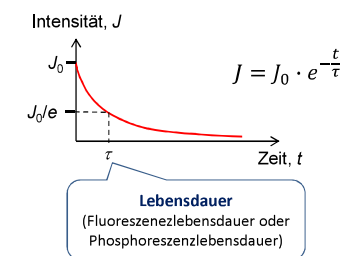
■ Linien/Bandenspektrum

■ Stokes-Verschiebung:

$$\epsilon_{\text{phos}} < \epsilon_{\text{flu}} < \epsilon_{\text{abs}}$$

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

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



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

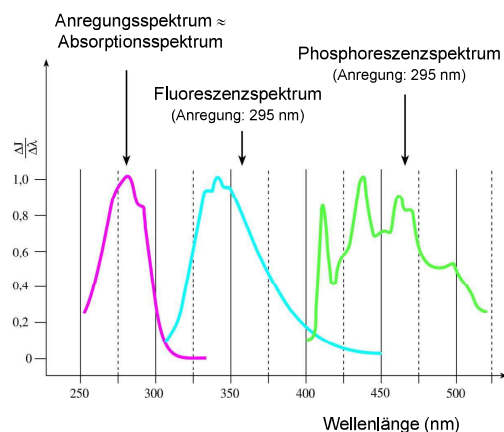
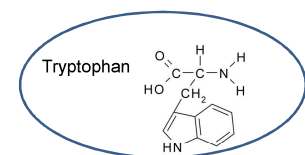
$$\approx \text{ns}$$

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

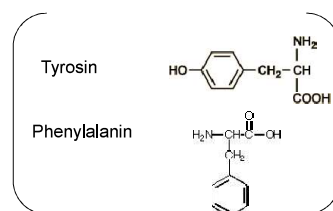
30

d) Anwendungen:

■ Fluoreszenzspektroskopie
z.B. Proteinforschung

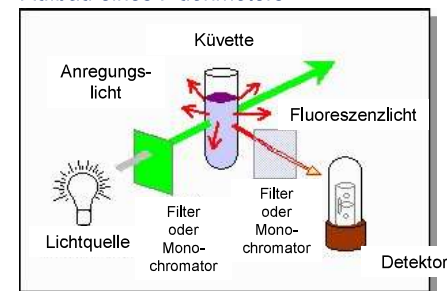


Die Eigenschaften des Lumineszenzlichtes (Intensität, spektrale Verteilung, Stokes-Verschiebung, Lebensdauer, ...) sind sehr empfindlich gegen der Umgebung, Molekülkonformation, Änderungen in diesen, ...

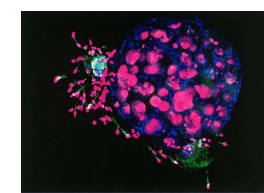
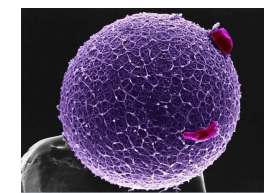
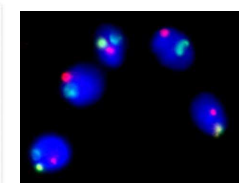
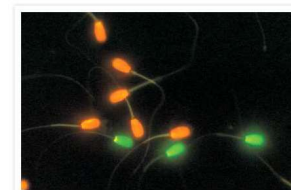


31

■ Aufbau eines Fluorimeters



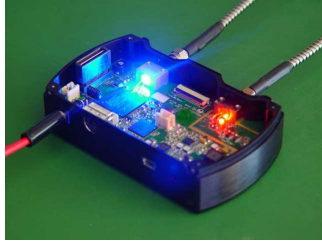
■ Fluoreszenzmikroskopie



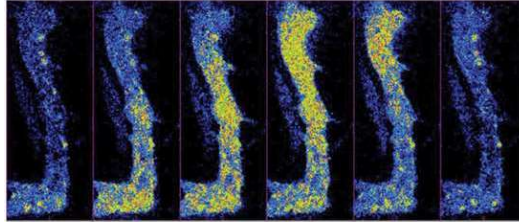
32

Sensoren

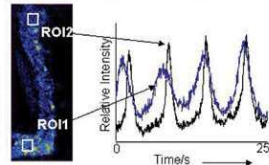
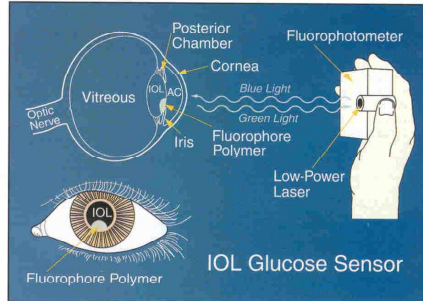
Sauerstoffsensor



Calciumsensor \Rightarrow Calciumwellen



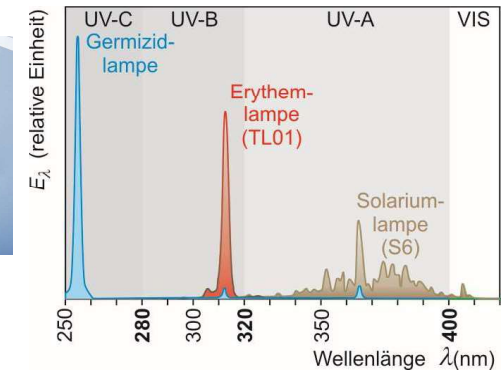
Glukosesensor



33

Lampen

Germizidlampen — Niederdruckquecksilberdampf Lampe

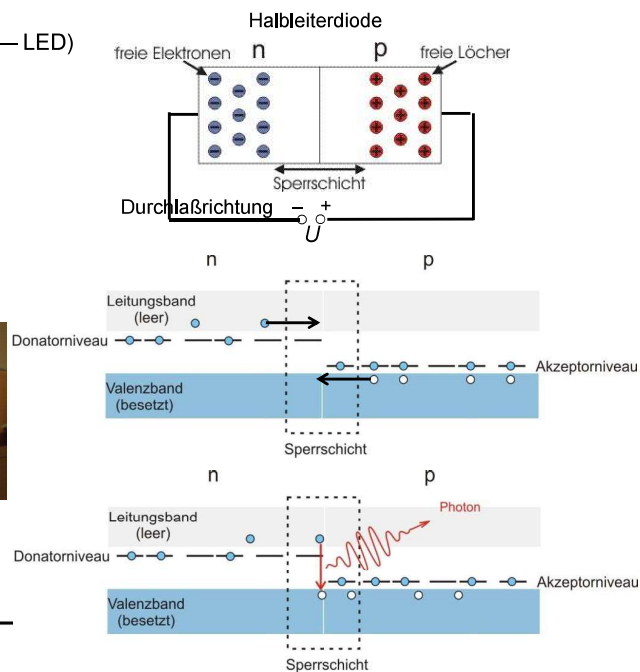
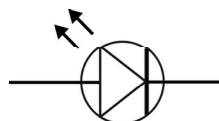


Blaulichtherapie von Neugeborengelbsucht



34

Leuchtdiode (light emitting diode — LED)

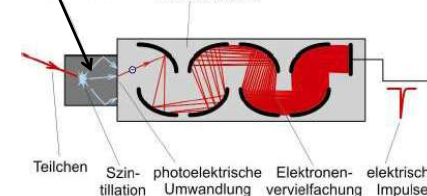
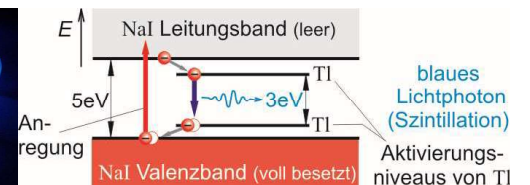
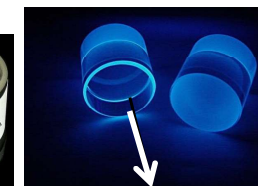


35

Strahlungsdetektoren

(Röntgenstrahlung, radioaktive Strahlungen, ...)

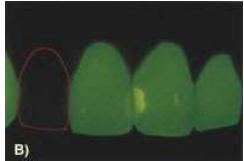
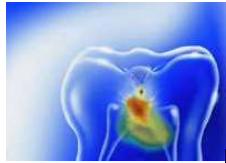
z. B. NaI(Tl)



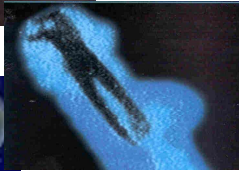
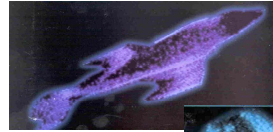
(s. noch
Thermolumineszenz-
dosimeter)

36

- Zahnheilkunde



- Biolumineszenz



- Laser (s. später)

37

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

