

# Vorlesung 2

Karim Kouz

WS 2016/2017 1. Semester Biophysik

## (I) Streuung, Absorption, Transmission

Karim Kouz

WS 2016/2017 1. Semester Biophysik

# Streuung ( $\sigma = \textit{Sigma}$ )

- Ablenkung eines Objektes durch die Wechselwirkung mit einem lokalen anderen Objekt
- Licht:
  - In Wasser oder Luft nur sehr schlecht zu beobachten
  - Je inhomogener das Medium, in dem sich das Licht ausbreitet, desto besser ist die Streuung zu beobachten
- Streuung ist abhängig von der Wellenlänge
- Spektraler Streukoeffizient:

$$\sigma(\lambda) = \frac{J(\lambda)_{\text{gestreut}}}{J(\lambda)_{\text{einfallend}}}$$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

3

# Streuung

- Elastische Streuung (Energie/Wellenlänge der Photonen **bleibt konstant**):
  - Rayleigh-Streuung
  - Mie-Streuung
  - ...
- Unelastische Streuung (Energie/Wellenlänge der Photonen **bleibt nicht konstant**):
  - Stokes-Raman-Streuung
  - Anti-Stokes-Raman-Streuung
  - ...

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

4

# Rayleigh-Streuung

- Streuung elektromagnetischer Wellen an Materie, bei der die Größe der Streuteilchen viel kleiner ist als die Wellenlänge (= kolloidale Teilchen)
- Es gilt:

$$\sigma(\lambda) \sim \frac{d^6}{\lambda^4}$$

$d$ : Durchmesser des Streuteilchens  
 $\lambda$ : Wellenlänge

- Blaues Licht wird also stärker gestreut als Licht höherer Wellenlänge – dies ist der Grund, warum der Himmel blau und die Sonne bei Sonnenuntergang rot erscheinen

Größenordnungen:

- Sichtbares Sonnenlicht: 380 nm - 780 nm
- Luftmoleküle: 0,1 nm - 0,2 nm



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.greif.org/Atmosphäre/Physik/Dammerung/dammerung.html>

5

# Mie-Streuung

- Streuung elektromagnetischer Wellen an Materie, bei der die Größe der Streuteilchen ungefähr gleich groß ist wie die Wellenlänge
- Streukoeffizient ist unabhängig von der Wellenlänge – dies ist der Grund, warum Wolken weiß erscheinen
- Tyndall-Effekt: Streuung von Licht an submikroskopischen Schwebeteilchen, mit Abmessungen ähnlich der Lichtwellenlänge, die in einer Flüssigkeit oder einem Gas suspendiert sind



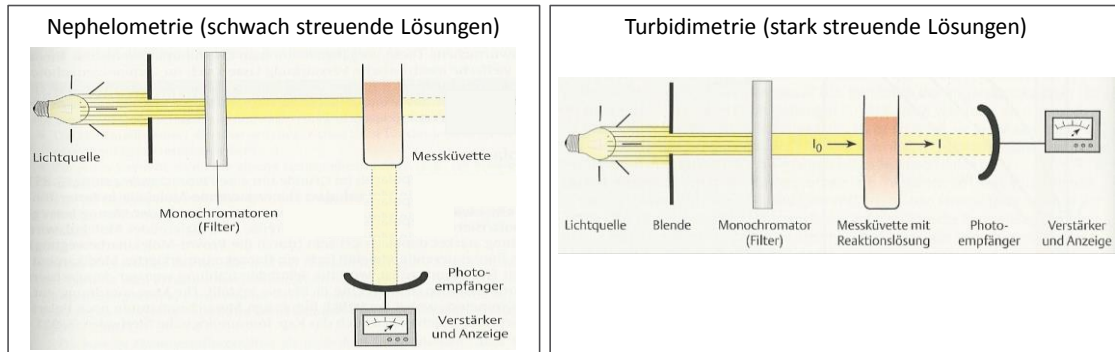
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Tyndall-Effekt>

6

# Anwendung: Konzentrationsbestimmung

- Die Streuung des Lichtes steht im Zusammenhang mit der Konzentration der Streuteilchen
- Die Messung des Streulichtes erlaubt Rückschlüsse auf die Konzentration



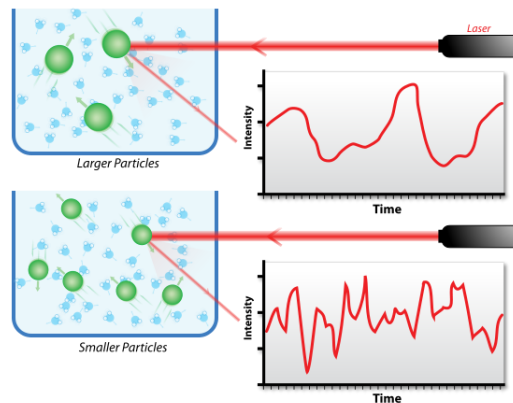
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: verändert nach Klinische Chemie und Hämatologie 8. Auflage: Klaus Dörner, Thieme-Verlag

7

# Dynamische Lichtstreuungsmessung

- Große Teilchen streuen mehr Licht als kleine Teilchen
- Große Teilchen bewegen sich langsamer aufgrund ihrer größeren Trägheit als kleine Teilchen



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: [http://en.wikipedia.org/wiki/Dynamic\\_light\\_scattering](http://en.wikipedia.org/wiki/Dynamic_light_scattering)

8

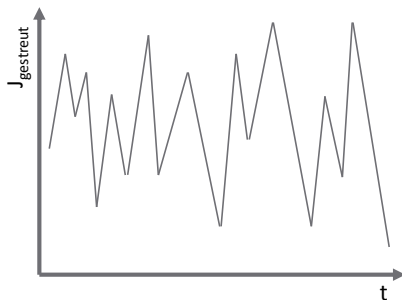
# Dynamische Lichtstreuungsmessung

- Ermöglicht den Rückschluss auf die Größe von streuenden Teilchen in einer Lösung aus der gemessenen Intensitätsänderung
- Laserstrahl wird auf die Lösung gerichtet und die Intensität des Streulichts wird in einem bestimmten Volumen der Lösung gemessen
- Intensität ändert sich aufgrund der Bewegung der Teilchen (brownsche Molekularbewegung)
- Vermessenes Volumen ist nicht abgegrenzt vom Rest der Lösung, sodass die Teilchen das Messvolumen verlassen bzw. betreten können

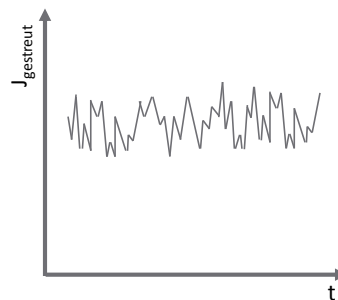
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

9

# Dynamische Lichtstreuungsmessung



- Große Teilchen verlassen Messvolumen
  - Große Intensitätsänderung
  - Änderungen benötigen mehr Zeit



- Kleine Teilchen verlassen Messvolumen
  - Kleine Intensitätsänderung
  - Änderungen benötigen weniger Zeit

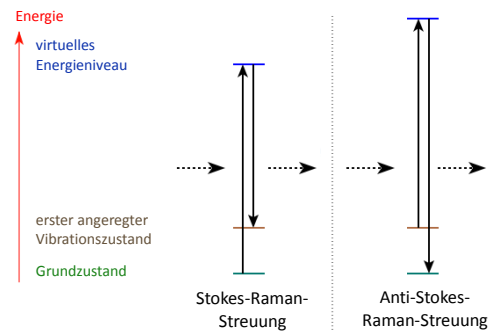
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (November 2014)

10

# Raman-Streuung

- Unelastische Streuung von Licht an Atomen oder Molekülen
- Stokes-Raman-Streuung:
  - Energieübertragung von dem Photon auf das streuende Teilchen
  - Streuendes Teilchen befindet sich nach dem Streuvorgang auf einem höheren Energieniveau
  - Energie und Frequenz des emittierten Photons sind geringer
- Anti-Stokes-Raman-Streuung:
  - Energieübertragung von dem streuenden Teilchen auf das Photon
  - Streuendes Teilchen befindet sich nach dem Streuvorgang auf einem niedrigerem Energieniveau
  - Energie und Frequenz des emittierten Photons sind höher

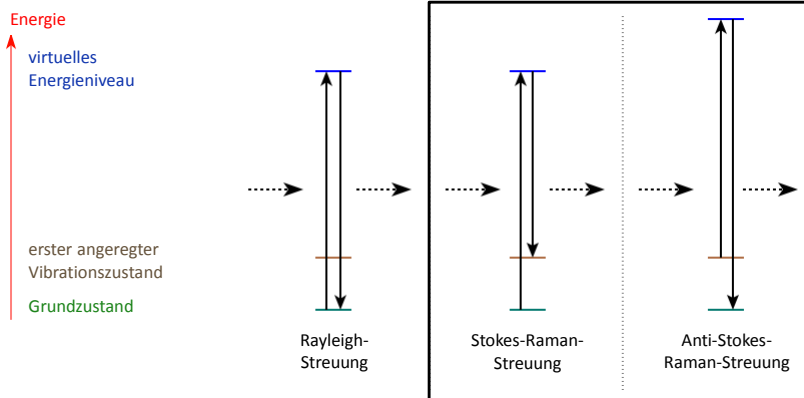


Quelle: Verändert nach <http://de.wikipedia.org/wiki/Raman-Streuung>

11

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

# Rayleigh vs. Raman-Streuung



Quelle: Verändert nach <http://de.wikipedia.org/wiki/Raman-Streuung>

12

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

# Absorption ( $\alpha = \textit{Alpha}$ )

- Energie des Lichts wird von Atomen oder Molekülen aufgenommen
- Absorption ist abhängig von der Wellenlänge
- Spektraler Absorptionskoeffizient:

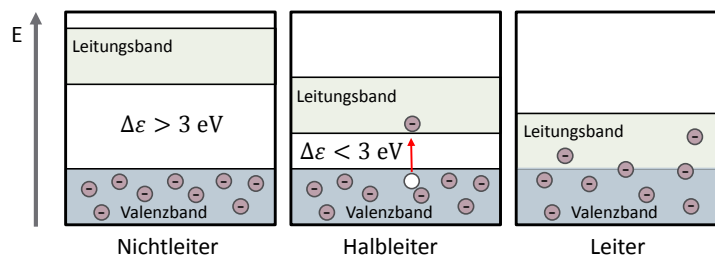
$$\alpha(\lambda) = \frac{J(\lambda)_{\text{absorbiert}}}{J(\lambda)_{\text{einfallend}}}$$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

13

## Absorption bei Festkörpern

- Isolatoren: Absorbieren keine sichtbaren Lichtphotonen, da deren Energie zu gering ist, die Energiedifferenz zwischen Valenz- und Leitungsband zu überwinden
- Halbleiter: Können sichtbares Licht absorbieren (z.B. Silicium: Energiedifferenz von 1 eV zwischen Valenz- und Leitungsband)
- Leiter: Können beliebige Energiemengen absorbieren, da Valenz- und Leitungsband zusammenfallen (Metallbindung)



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (November 2015)

14

# Absorptionsgesetz

- Beschreibt die exponentielle Abnahme einfallender Strahlung auf ein Medium aufgrund von Absorption (nicht Streuung):

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

$a$ : linearer Absorptionskoeffizient (1/m)

- Halbwertsdicke  $D$ : Die Materialdicke, bei der die Strahlungsintensität auf die Hälfte des Ausgangswertes abgeschwächt wird:

$$D = \frac{\ln(2)}{a}$$

- Eindringtiefe  $\delta$ : Die Materialdicke, bei der die Strahlungsintensität auf den e-ten Teil des Ausgangswertes abgeschwächt wird:

$$\delta = \frac{1}{a}$$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

15

# Absorbanz ( $A$ )

- Die Absorbanz ( $A$ ) ist definiert als:

$$A = \lg\left(\frac{I_0}{J}\right)$$

- Dimensionslos und keine Prozentzahl
- Ist immer vom Wert her größer/gleich 0
- Vorteil der Größe: logarithmische Skala und damit verbundene kleinere Zahlen
- Die Absorbanz ist abhängig von der Wellenlänge

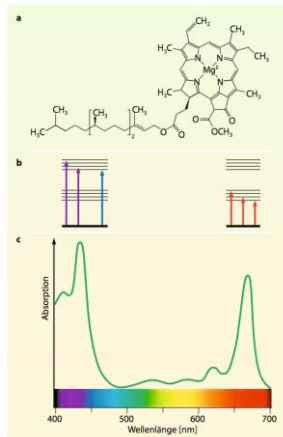
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

16



# Absorptionsspektrum

- Graphische Darstellung von  $A$ ,  $\alpha$  oder  $a$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge



Absorptionsspektrum von Chlorophyll  
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Fritzsche, Physik für Biologen und Mediziner, Springer Spektrum Verlag

17

# Schwächungsgesetz

- Beschreibt die exponentielle Abnahme einfallender Strahlung auf ein Medium aufgrund von Absorption und Streuung:

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

$\mu$ : linearer Schwächungskoeffizient (1/m)

- Wie auch beim Absorptionsgesetz gilt:

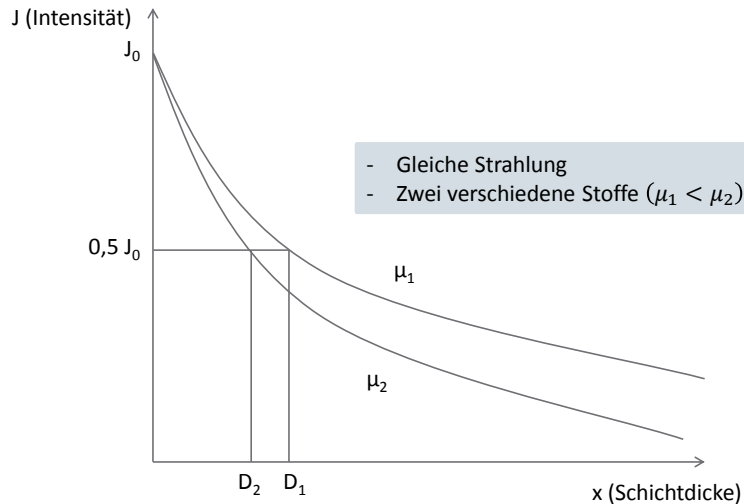
$$D = \frac{\ln(2)}{\mu}$$

$$\delta = \frac{1}{\mu}$$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

18

# Schwächungsgesetz



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (November 2014)

19

# Extinktion ( $E$ )

- Extinktion ( $E$ ) = optische Dichte ( $OD$ ):

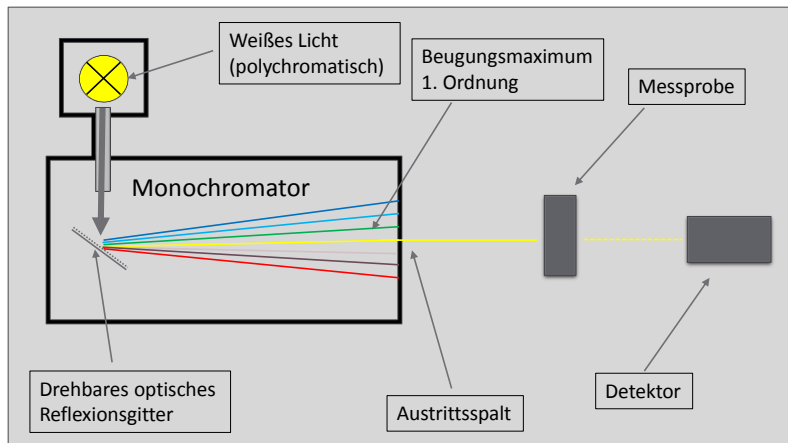
$$E = \lg\left(\frac{J_0}{J}\right)$$

- Dimensionslos und keine Prozentzahl
- Ist immer vom Wert her größer/gleich 0
- Vorteil der Größe: logarithmische Skala und damit verbundene kleinere Zahlen
- Die Extinktion ist abhängig von der Wellenlänge
- Oft werden die Begriffe Extinktion und Absorbanz gleichgesetzt, auch dann, wenn Streuung nicht vernachlässigbar ist

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

20

# Spektrophotometer



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (November 2014)

21

# Spektrophotometer

- Wichtigste Bauteile:
  - Polychromatische Lichtquelle
  - Monochromator (Eintrittsspalt, Prisma/Gitter, Austrittsspalt)
  - Lichtdetektor (SEV, Photodiode)
- Wichtig:
  - Es kann **n**ie nur eine ganz bestimmte Wellenlänge für die Messung ausgewählt werden, sondern nur ein Wellenlängenbereich
  - Die Auswahl des Bereichs kann erfolgen durch:
    - Bewegung des Gitters/Prismas
    - Bewegung des Austrittsspalts
    - Abstandsänderung zwischen Gitter/Prisma und Austrittsspalt



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: [https://sewer.com/app/catalog/Product/jasioneid-475ANeuUWidick3lgw87f\\*\\*\\_node77/article\\_number634s1022](https://sewer.com/app/catalog/Product/jasioneid-475ANeuUWidick3lgw87f**_node77/article_number634s1022)

22

# Absorptionsspektrometrie

- Rückschluss auf die Konzentration einer Lösung anhand von gemessener Lichtabsorption (und Streuung) durch die Lösung mittels Spektrophotometer
- Bei den in der Praxis untersuchten dünnen Lösungen (Lösungen geringer Konzentration) ist die Streuung minimal und zu vernachlässigen
- Aus dem Absorptionsgesetz lässt sich das Lambert-Beer-Gesetz herleiten:

$$A = \lg\left(\frac{I_0}{I}\right) = \varepsilon \cdot c \cdot x$$

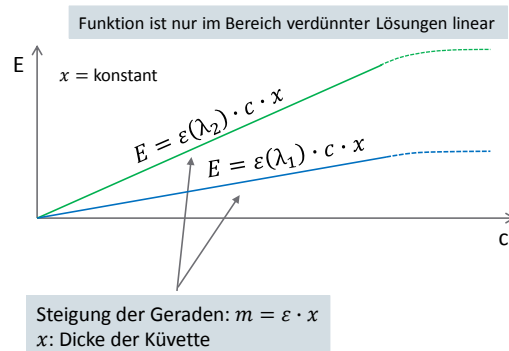
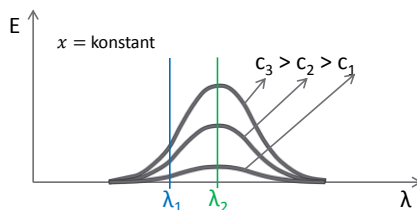
$$\varepsilon: \text{molarer Extinktionskoeffizient} \left[ \frac{1}{\frac{\text{mol}}{\text{l}} \cdot \text{cm}} \right]$$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

23

# Lambert-Beer-Gesetz

- Gilt nur für verdünnte Lösungen (bei konzentrierten Lösungen „überlappen“ sich die Teilchen, sodass Messfehler entstehen)
- Der molare Extinktionskoeffizient ist von der Wellenlänge und der Temperatur abhängig



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (November 2014)

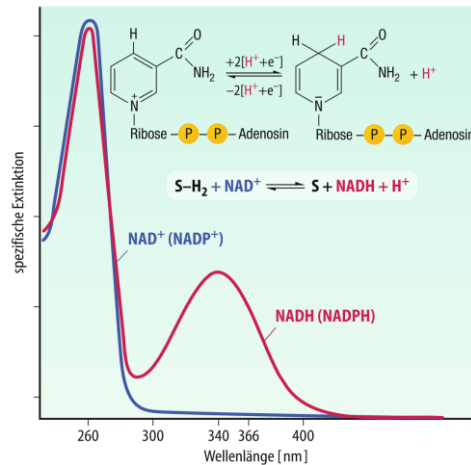
24

# Anwendung: Klinische Chemie

- Z.B. Nachweis der Laktatdehydrogenase im Serum
- Laktatdehydrogenase katalysiert folgende Reaktion:



- Kann z.B. erhöht sein bei einem Herzinfarkt, Muskel-, Leber- und Gallenerkrankungen
- Nachweis über das entstehende NADH mittels Spektrophotometrie



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

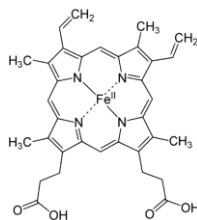
Quelle: Verheide nach Löffler, Petrides, Henrich - Biochemie und Pathobiochemie, 8. Auflage 2007

25

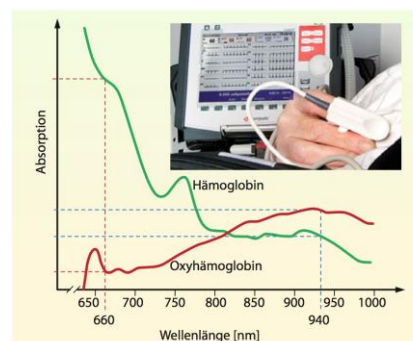
# Pulsoxymeter

- Messprinzip: Spektrophotometer, jedoch zwei Lichtquellen:
  - Rotes Licht (660 nm)
  - Licht im IR-Bereich (940 nm)

- Warum zwei Lichtquellen?
  - Oxygeniertes Hämoglobin absorbiert Licht im IR-Bereich
  - Desoxygeniertes Blut absorbiert Licht im Bereich von rotem Licht
  - Verhältnis-Rechnung ergibt Sättigungswert:



$$SpO_2 = \frac{HbO_2}{HbO_2 + Hb}$$



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Fritzsche, Physik für Biologen und Mediziner, Springer Spektrum Verlag: <https://doi.wiley.org/doi/10.1007/978-3-662-03000-0>

26

# Gewebeoxygenierung

- Pulsoxymeter: Misst die Sättigung des Blutes mit Sauerstoff
- Gewebeoxygenierung: Misst die Menge an Sauerstoff, die tatsächlich im Gewebe (Kapillarbett) ankommt (StO<sub>2</sub>)
- Unterschied?
  - Das Blut kann zu 100% gesättigt sein, obwohl zu wenig Blut im Körper ist, da der Sättigungswert ein Relativ-Wert ist
  - Fiktives Beispiel: Kommen im Blut 100 Hb-Moleküle vor, die vollständig gesättigt sind, ist die Sättigung 100%. Kommt im Blut 1 Hb-Molekül vor, das vollständig gesättigt ist, ist die Sättigung ebenfalls 100%, das Gewebe erhält jedoch viel weniger Sauerstoff



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017



Quelle: <http://www.criticalcare.com.au>; <http://cdn.medgadget.com>

27

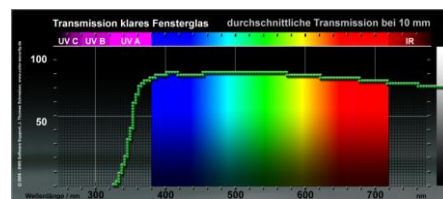
# Transmission ( $\tau = \text{Tau}$ )

- Größe für die Durchlässigkeit eines Mediums für Wellen
- Die Transmission ist von der Wellenlänge abhängig
- Spektraler Transmissionskoeffizient/Transmittanz:

$$\tau(\lambda) = \frac{J(\lambda)_{\text{durch}}}{J(\lambda)_{\text{einfallend}}}$$

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

- Begriffe:
  - $\tau = 1$ : transparent = durchsichtig
  - $\tau = 0$ : opak = undurchsichtig
  - $0 < \tau < 1$ : transluzent = halbdurchsichtig
- Transmissionsspektrum: Auftragung von  $\tau$  gegen  $\lambda$



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: [http://www.color-security.de/html/fenster\\_glas.html](http://www.color-security.de/html/fenster_glas.html)

28

## (II) Biologische Wirkungen des Lichts

Karim Kouz

WS 2016/2017 1. Semester Biophysik

### Zielorgane des Lichts

- Zielorgane des Lichts sind lichtexponierte Areale, d.h. v.a. das **Auge** und die **Haut**



Dermatitis solaris



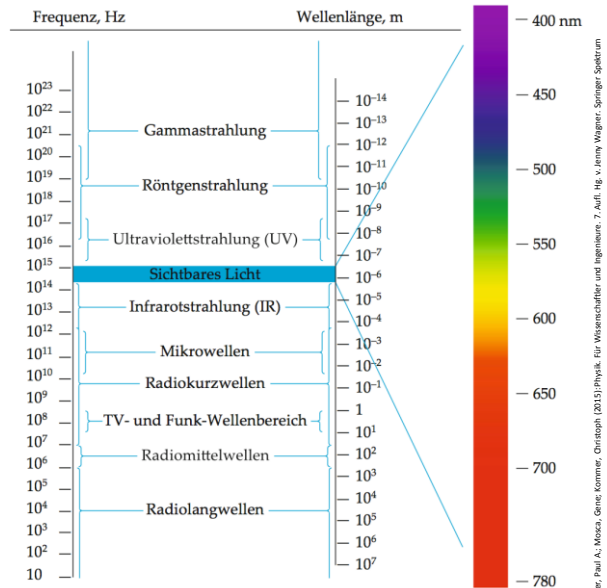
Basalzellkarzinom



Noduläres Melanom

# UV-Strahlung

- Ultraviolettes Spektrum: 100 nm – 380 nm
  - UV-C: 100 nm – 280 nm
  - UV-B: 280 nm – 315 nm
  - UV-A: 315 nm – 400 nm
- Für das menschliche Auge nicht wahrnehmbar („stille Gefahr“)



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Tipler, Paul A.; Mosca, Gene: Komme, Christoph (2011): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. 7. Aufl. hg. v. Jenny Wagner, Springer Spektrum

31

# Molekularer Mechanismus

- Biologische Wirkungen beruhen auf der Absorption der Strahlung
- Keine Absorption – keine Wirkung/Veränderung
- Absorption der Strahlung führt zur Anregung oder Ionisation, die zu einer photochemischen Reaktion führen kann
- Die photochemische Reaktion führt schließlich zur biologischen Wirkung
- Eine biologische Wirkung ist nicht immer zwingend nötig, da die absorbierte Energie auch in Wärme umgewandelt werden kann
- Absorbierte Strahlung kann sowohl positive als auch negative Auswirkungen für den Organismus haben

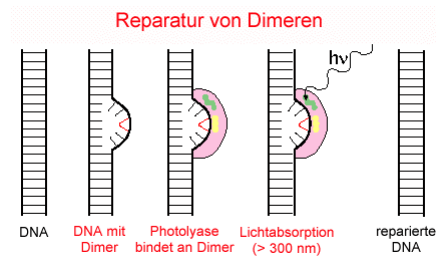
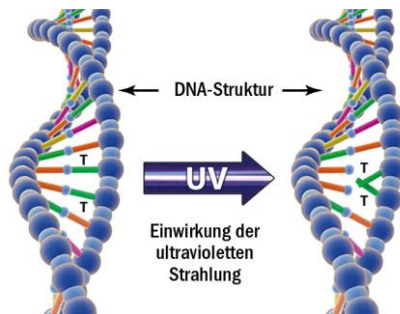
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

32



## Direkte biologische Wirkung

- Energieabsorption und biologische Wirkung finden im selben Molekül statt, z.B.:
  - Spaltung eines DNA-Doppelstrangs
  - Ausbildung von Thymin-dimeren
  - Ringspaltung bei der Vitamin-D-Synthese



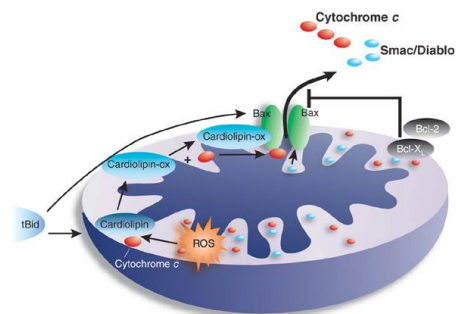
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.ilt-uv.com/ger/technology/>, <http://www.ernst-beck.de/de/epigen/13/na135c.htm>

33

## Indirekte biologische Wirkung

- Energieabsorption und biologische Wirkung finden in unterschiedlichen Molekülen statt, z.B.:
  - Spaltung von Sauerstoff in reaktive Radikale
  - Spaltung von Wasser in reaktive Radikale
  - Peroxidbildung
- Die dabei entstehenden Moleküle sind zytotoxisch und können u.a. die Apoptose auslösen



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: [http://www.nature.com/nchembio/journal/v1/n4/pdf/nchembio0905-188\\_f1.html](http://www.nature.com/nchembio/journal/v1/n4/pdf/nchembio0905-188_f1.html)

34

# Strahlenschäden durch Sonne

- Auch Sonnenstrahlen können die DNA schädigen
- Faktoren, die bei der Schädigung eine Rolle spielen:
  - Bestrahlungsstärke  $E$  (physikalischer Faktor)
  - Expositionszeit  $t$  (physikalischer Faktor)
  - Empfindlichkeit  $S$  (biologischer Faktor)

Lichtschutzfaktor ist der Faktor, mit dem man die Zeit multiplizieren muss, in der sich die Haut vor der Sonnenstrahlung selber schützen kann. Daher hilft wiederholtes eincremen nicht, einen länger anhaltenden Schutz zu erlangen.

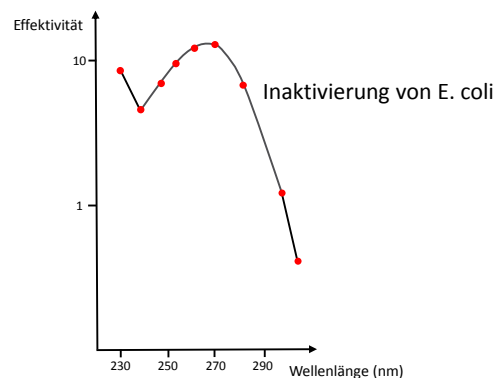
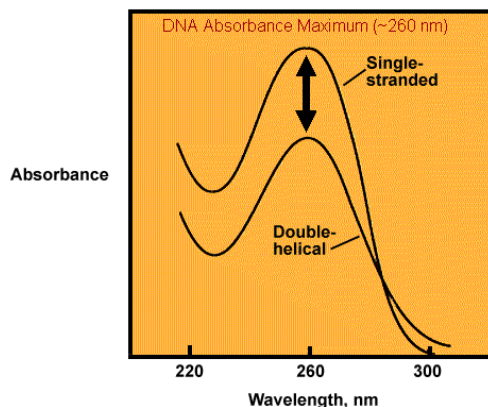


Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.erythema-dermatologie.de/artikel/der-2415>

35

# Absorptionsspektrum von DNA



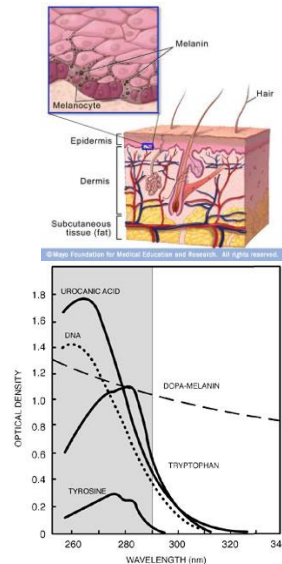
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.cancer2000.net/introduction/page2.htm>, angelehnt an Vorlesungsskript Biophysik Sommersemester Universität WZ2016

36

## Melanin als Schutz vor UV-Strahlung

- **2 Melanin-Formen:**
  - Eumelanin (braun-schwärzlich)
  - Phäomelanin (gelb-rötlich)
- Im menschlichen Körper kommen Mischformen der beiden Melanine vor
- Bildung wird durch UV-B-Strahlung in den Melanocyten angeregt
- Melanin dient dem Lichtschutz vor UV-Strahlung (Melanom-Risiko der stark pigmentierten Bevölkerungsgruppen ist geringer als bei der weniger pigmentierten Bevölkerung)
- **Mechanismus des Schutzes:**
  - Melanin absorbiert UV-Strahlung
  - Durch innere Konversion wird 99,9% der Strahlungsenergie in Wärme umgewandelt



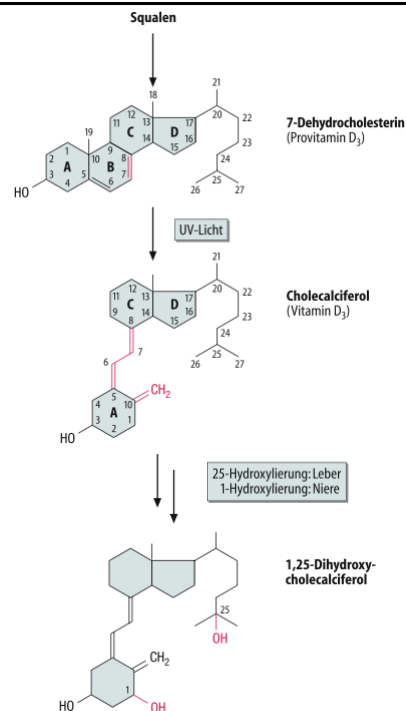
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.mayoclinic.com>; [http://eesc.columbia.edu/courses/v1003/lectures/czone\\_health/](http://eesc.columbia.edu/courses/v1003/lectures/czone_health/)

37

# Vitamin-D<sub>3</sub>-Synthese

- Die Vitamin-D<sub>3</sub>-Synthese benötigt UV-B-Strahlung
- In oberflächlichen Hautgefäßen zirkulierendes Provitamin D<sub>3</sub> wird durch auf die Haut strahlende UV-B-Strahlung in Vitamin D<sub>3</sub> gespalten
- Aktives Vitamin D<sub>3</sub> reguliert den Calcium- und Phosphatstoffwechsel, wirkt als Schutz vor Krebs und beschleunigt die Ausheilung einer Tuberkulose

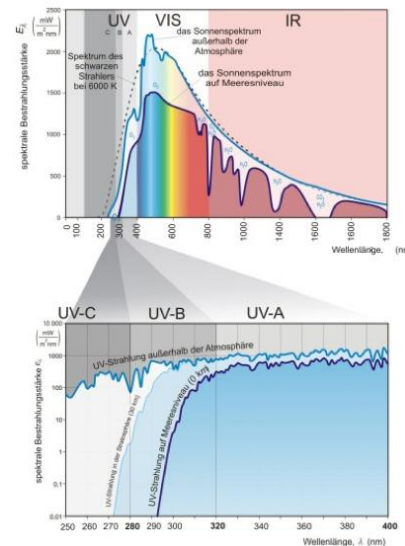


Quelle: Verändert nach Löffler, Petrides, Heinrich – Biochemie und Pathobiochemie: 8. Auflage 2007

38

# UV-Quellen

- Größte natürliche Quelle ist die Sonne
- Das Spektrum der Sonne ähnelt dem des absolut schwarzen Körpers
- Das Sonnenspektrum wird von der Atmosphäre beeinflusst (besonders wichtig ist hier die Absorption im UV-Bereich durch Ozon-Moleküle)
- Weitere künstliche Quellen:
  - UV-Lampen bzw. UV-Strahler
- Günstige Wirkungen (Beispiele):
  - Photosynthese
  - Entkeimung
  - Vit.-D-Synthese
  - Solarium?!



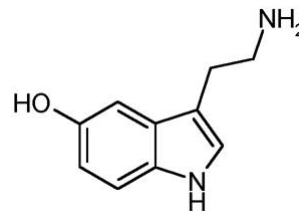
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik SS 2012 Semmelweis Universität

39

# Winterdepression

- Lichttherapie bei Winterdepression (SAD = seasonal affective disorder):
  - Tag-Wach-Rhythmus ist gestört, sodass geregelte Abgabe von Serotonin nicht/unregelmäßig stattfindet
  - Folge: Depressionen & Schlafstörungen
  - Behandlung:
    - 20 – 60 min Licht am morgen mittels Tageslichtlampe
    - Vitamin D
    - Fröhnsport
    - Johanniskraut (Hyperforin: Wiederaufnahmehemmer)
    - Anti-Depressiva



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.msclester.ac.uk/academic/psychology/whathappylamp/nmra/gd/ser/serotonin.jpg>

40

# Neugeborenenikterus

- Blaulichttherapie bei Kindern mit Neugeborenenikterus:
  - Gelbfärbung der Haut durch Einlagerung von Bilirubin (Abbauprodukt des Hämoglobins)
  - Bei stark erhöhten Konzentrationen kann dies die Blut-Hirn-Schranke überwinden und Strukturen dauerhaft schädigen (Kernikterus)
  - Blaulicht kann fettlösliches Bilirubin durch Spaltung einer Doppelbindung in wasserlösliches Lumirubin umwandeln (Ausscheidung über Galle und Urin)



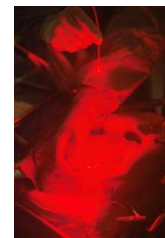
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://de.wikipedia.org>, <http://www.prenatalzentrum.uk-erlangen.de>

41

# Photodynamische Therapie

- Zur Behandlung von Tumoren und anderen Gewebsveränderungen
- Verfahren:
  - Applikation eines Photosensibilisators (systemische oder lokale Anwendung); primär nicht toxisch
  - Anreicherung im Behandlungsgebiet durch die Eigenschaften des zu behandelnden Gewebes und des Photosensibilisators
  - Nach Wartezeit wird der Tumor mit geeigneter Lichtquelle bestrahlt
  - Durch Lichteinwirkung wird toxische Substanz freigesetzt, die den Tumor bzw. das Gewebe schädigt



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://de.wikipedia.org>

42

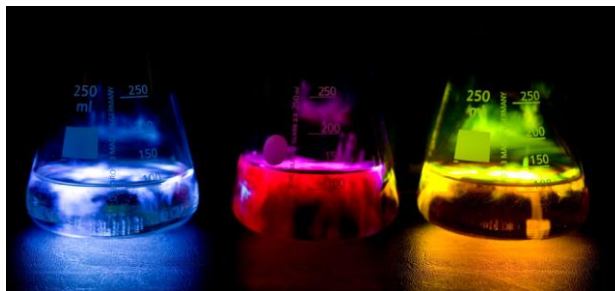
# (III) Temperaturstrahlung

Karim Kouz

WS 2016/2017 1. Semester Biophysik

## Grundlagen der Lichtentstehung

- Licht kann auf zwei verschiedene Arten entstehen:
  - Temperaturstrahler
  - Lumineszenzstrahler



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.foto.com/magazine/thermolumineszenz-mit-lumineszenz-3-a-afan-frankfurt/2012791>

# Temperaturstrahler

- Körper, die aufgrund ihrer eigenen Temperatur elektromagnetische Strahlung aussenden
- Strahlung entsteht auf Kosten der thermischen Energie
- Geben nicht notwendigerweise ihre Energie in Form von Wärme ab (vermitteln eher ein Wärmegefühl, „warmes“ Licht)
- Meistens geschieht die Energieabgabe unter Lichtemission oder sogar UV-Strahlung
- IR-Strahlung, auch eine Temperaturstrahlung, wird auch als Wärmestrahlung bezeichnet
- Jeder Körper emittiert Temperaturstrahlung außer bei  $T = 0 \text{ K}$
- Mit steigender Temperatur wächst auch die Intensität der Strahlung (stark temperaturabhängig)

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

45

# Spektrum der Temperaturstrahler

- Kontinuierliches Spektrum (vs. Linien-/Bandenspektrum bei Lumineszenzstrahlern)
- Spektrale Verschiebung ist zu beobachten:



Abhängig von der Temperatur strahlt Stahl bei unterschiedlichen Wellenlängen mit maximaler Strahlungsintensität (IR-Strahlung, Rotglut, Weißglut)

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

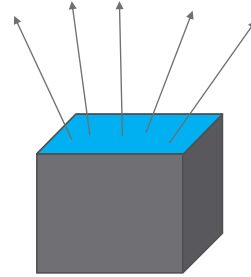
Quellen: <http://www.directindustry.de>; <http://www.hilfsmittel-off.de>; <http://www.sciencex.de>

46

# Spezifische Ausstrahlung ( $M$ )

- Charakterisiert die Strahlungsquelle
- Gibt den Energiebetrag an, der aus einer bestimmten Fläche in einer bestimmten Zeit von einem Körper abgegeben wird:

$$M = \frac{\Delta E}{\Delta t \cdot A} = \frac{\Delta P}{A} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$



- Da die Ausstrahlung u.a. von der Wellenlänge abhängig ist, wird eine neue Größe eingeführt, die spektrale spezifische Ausstrahlung  $M_\lambda$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (November 2013)

47

# Spektrale spezifische Ausstrahlung ( $M_\lambda$ )

- Die Strahlungsleistung, die pro Flächeneinheit bei einer bestimmten Wellenlänge ausgestrahlt wird:

$$M_\lambda = \frac{\Delta M}{\Delta \lambda} = \frac{\Delta P}{\Delta \lambda \cdot A}$$

- Zusammenhang zwischen spezifischer und spektraler spezifischer Ausstrahlung:

$$M = \int M_\lambda d\lambda$$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

48



# Spektraler Absorptionskoeffizient

- Quotient, der vom Körper absorbierten Energie/Intensität und der gesamten einfallenden Strahlungsenergie bzw. Intensität
- Da Körper verschiedene Wellenlängen unterschiedlich stark absorbieren, ist auch der Absorptionskoeffizient von der Wellenlänge abhängig

$$\alpha(\lambda) = \frac{J(\lambda)_{\text{absorbiert}}}{J(\lambda)_{\text{einfallend}}}$$

- Maß, wie gut ein Körper elektromagnetische Strahlung einer bestimmten Wellenlänge absorbieren kann

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

49

# Kirchhoffsches Gesetz

- Wenn ein Körper Strahlung absorbiert, so erhöht sich seine Temperatur
- Dies führt zur erhöhten Emission von Temperaturstrahlung, bis ein Strahlungsgleichgewicht erreicht ist
- Hieraus folgt für verschiedene Körper bei gleichen Bedingungen:

$$M_{\lambda} \sim \alpha(\lambda)$$

$$\frac{M_{\lambda}}{\alpha(\lambda)} = \text{konst. für verschiedene Körper bei gleichen Bedingungen}$$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

50

# Der absolut schwarze Körper

- Ein **idealisierter** Körper, der...
  - ...auf ihn treffende elektromagnetische Strahlung bei jeder Wellenlänge vollständig absorbiert ( $\alpha_{\text{schwarz}} = 1$ )
  - ...eine ideale thermische Strahlungsquelle ist, die elektromagnetische Strahlung mit einem charakteristischen, nur von der Temperatur abhängigen Spektrum aussendet

$$\frac{M_{\lambda}}{\alpha(\lambda)} = \frac{M_{\lambda \text{ schwarz}}}{\alpha_{\text{schwarz}}} = \frac{M_{\lambda \text{ schwarz}}}{\mathbf{1}} = M_{\lambda \text{ schwarz}}$$

$$M_{\lambda \text{ schwarz}} \cdot \alpha(\lambda) = M_{\lambda}$$

Wenn  $\alpha(\lambda)$  des Körpers sowie  $M_{\lambda \text{ schwarz}}$  bekannt sind, kann  $M_{\lambda}$  berechnet werden.

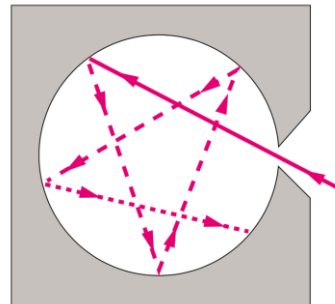
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

51

# Der absolut schwarze Körper

- Der absolut schwarze Körper spiegelt und streut keine Strahlung – es findet lediglich Emission von Strahlung statt (bei einem realen Körper ist  $\alpha < 1$ )
- Die Strahlung des schwarzen Körpers wird schwarze Strahlung genannt

$$M_{\lambda \text{ schwarz}} \cdot \alpha(\lambda) = M_{\lambda}$$



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Tipler, Paul A.; Mosca, Gene: *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*, 7. Aufl., Hg. v. Jerry Wagner, Springer Spektrum

52

# Stefan-Boltzmann-Gesetz

- Physikalisches Gesetz, das die thermisch abgestrahlte Leistung eines idealen schwarzen Körpers in Abhängigkeit von seiner Temperatur angibt:

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

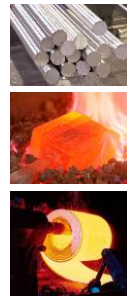
- Wichtig:
  - Spezifische Ausstrahlung ist stark von der Temperatur abhängig
  - Formel drückt die spezifische Ausstrahlung, also die Ausstrahlung im gesamten Wellenlängenbereich, aus

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

53

# Wiensches Verschiebungsgesetz

- Gibt an, bei welcher Wellenlänge ein schwarzer Körper, abhängig von seiner Temperatur, die größte spezifische Ausstrahlung hat
- Beim Erhitzen von Körpern stellt man eine spektrale Verschiebung fest
- Mit steigender Temperatur verschiebt sich die Wellenlänge, bei der die Strahlungsintensität maximal ist
- Zu jeder Temperatur gehört eine charakteristische Wellenlänge, deren Strahlung im Vergleich zu allen anderen Wellenlängen intensiver ist

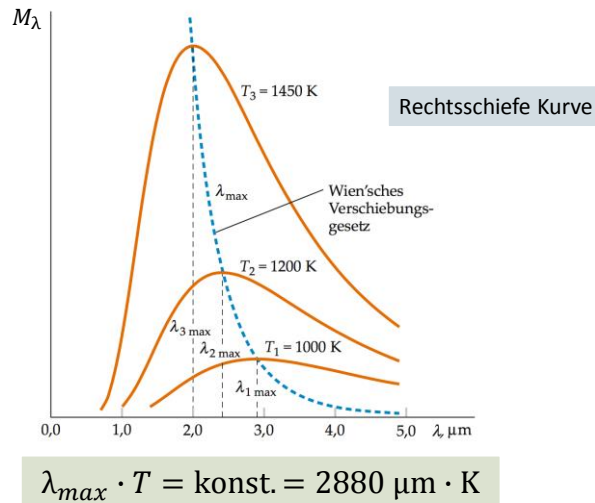


Quellen: <http://www.directindustry.de>, <http://www.hofschmiede-elf.de>, <http://www.sciencex.de>

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

54

# Wiensches Verschiebungsgesetz



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Verändert nach Tipler, Paul A.; Mosca, Gene; Kommer, Christoph (2015): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. 7. Aufl. Hr. v. Jenny Wagner. Springer Spektrum

55

## IR-Therapie

- Anwendungsgebiete: Therapie, bei der Wärmebehandlung indiziert ist (Durchblutung wird durch Wärme gefördert)
- Beispiele:
  - Muskelverspannungen
  - Nasennebenhöhlenprozesse
  - Rheuma
  - Abzessreifung
  - Schutz vor Unterkühlung bei Frühgeborenen



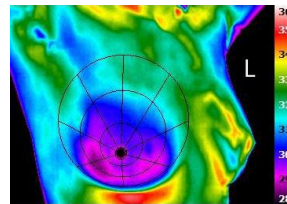
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Infrarotstrahlung>

56

# IR-Diagnostik

- Anwendungsgebiete: Detektion von IR-Strahlung mit aussagendem Effekt
- Beispiele:
  - Fiebermessung
  - Pulsoxymetrie
  - Wärmebildkamera



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.online-artikel.de: http://www.rnvr.ch>

57

# IR-Kamera

- Messung der Intensität der IR-Strahlung
- Rückschluss auf die spezifische Ausstrahlung des Körpers und auf die Temperatur (Stefan-Boltzmann-Gesetz)
- Anfertigung einer Temperaturkarte in Falschfarben
- Aufbau (vereinfacht):
  - IR-durchlässige Optik
  - Halbleiterdetektor als Strahlungsdetektor (meistens)
  - Kühlung für den Detektor (bei gekühlten Kamerasystemen)
- Sehr gute Auflösung (mm; 0,1 °C; 30-40 Hz)

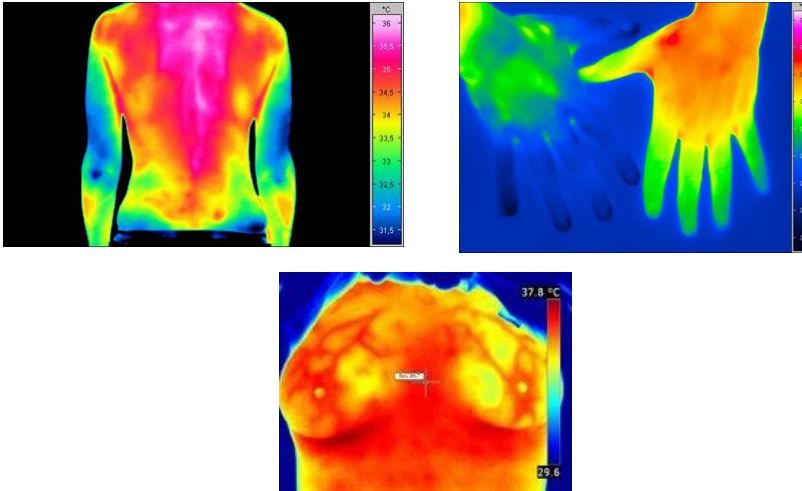


Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.flir.com>

58

## Medizinische Anwendung



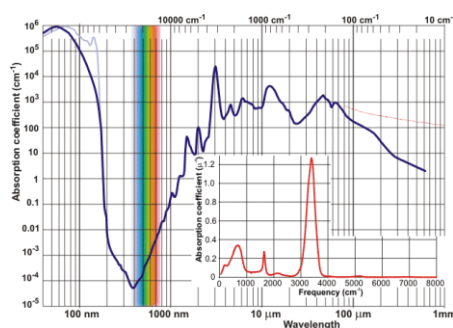
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: [http://www.infranc.de](http://www.infranc.de/http://www.infranc.de)

59

## Wärmehaushalt des menschlichen Körpers

- Der menschliche Körper besteht zu ca. 70% aus Wasser
- Absorptionsspektrum des Wassers:



Im IR-Bereich ist der Großteil des menschlichen Körpers ein nahezu absoluter schwarzer Körper.

Die Wellenlänge, bei der der Mensch am stärksten strahlt, lässt sich wie folgt berechnen:

$$\lambda_{max} = \frac{2880 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{300 \text{ K}} \sim 10 \mu\text{m}$$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.sibu.ac.uk>

60

# Wärmehaushalt des menschlichen Körpers

- Der menschliche Körper produziert ununterbrochen Wärme im Rahmen des Stoffwechsels
- Die produzierte Wärme muss abgegeben werden, um die Körpertemperatur konstant zu halten
- Im Grundstoffwechsel produziert der Körper ca.  $2000 \frac{\text{kcal}}{\text{d}} = 100 \text{ W}$  (bei sportlicher Aktivität um bis zu das 10-fache)
- Der Körper bedient sich drei Mechanismen zur Wärmeabgabe:
  - Temperaturstrahlung (rund 70% der Wärmeabgabe bei 20°C, bei hohen Temperaturen kaum (keine) Bedeutung)
  - Wärmeleitung (keine große Rolle, da Luft/Kleidung guter Wärmeisolator ist)
  - Verdunstung von Wasser (große Bedeutung ab 35°C)

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

61

# Wärmehaushalt des menschlichen Körpers

- Spezifische Ausstrahlung des menschlichen Körpers:

$$M = \sigma \cdot T^4 = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot 300^4 \approx 460 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

- Bei ca. 2 m<sup>2</sup> Körperoberfläche (KOF = BSA):

$$M \cdot A = 460 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 2 \text{ m}^2 \approx 1000 \text{ W}$$

„Im Grundstoffwechsel ca.  $2000 \frac{\text{kcal}}{\text{d}} = 100 \text{ W}$ “

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

62

## Widerspruch? Nein! „Rechenfehler!“

1. Der menschliche Körper ist nur zu 95% ein idealer schwarzer Körper
2. Die Kleidung reduziert die Wärmeabgabe um etwa die Hälfte (sofern man Kleidung trägt)
3. Auch die Umgebung des Körpers strahlt und zwar nahezu mit der gleichen Wellenlänge: Der Körper „gewinnt“ einiges von dem, was er abstrahlt von der Umgebung zurück – Netto-Abstrahlung muss berechnet werden

$$\Delta E = \sigma \cdot (T_{\text{Körper}}^4 - T_{\text{Umgebung}}^4) \cdot A \cdot t$$

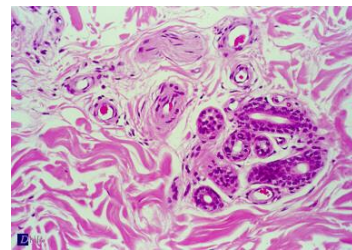
Ist die Temperatur des Körpers genauso groß bzw. kleiner als die der Umgebung, so findet keine Netto-Abstrahlung mehr statt. Die Wärmeabgabe ist jetzt nur noch über Wärmeleitung und Verdunstung von Wasser möglich.

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

63

## Fakten zum Schwitzen

- Frischer Schweiß ist duftneutral – erst Bakterien, die Stoffe im Schweiß abbauen, sorgen für den unangenehmen Geruch
- Ohne körperliche Aktivität oder heiße Umgebung verliert der Mensch ca. 100 – 200 ml Schweiß am Tag (dies kann bis zu 10 – 14 Liter am Tag ansteigen)
- **Von der Außentemperatur ist die Wärmeabgabe mittels Schwitzen unabhängig**
- Schwitzen ist neben der Wärmeregulation auch für die Aufrechterhaltung des Säureschutzmantels der Haut und die Pheromonabgabe wichtig



Quelle: <http://www.hauttonet.ch/Mat/Altkanal/instatdovd.htm>

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

64