

# Vorlesung 3

Karim Kouz

WS 2016/2017 1. Semester Biophysik

# (I) Lumineszenz

Karim Kouz

WS 2016/2017 1. Semester Biophysik

# Lumineszenz

- Erscheinung beruht auf Elektronenübergängen, die nach unterschiedlichster Anregung des Materials stattfinden und dabei (sichtbare) Strahlung emittieren
- Kann zusätzlich zur Temperaturstrahlung auftreten
- Ist nur schwach temperaturabhängig (außer Thermolumineszenz)
- Linien- oder Bandenspektrum (abhängig von dem jeweiligen Material)
- Zwei Arten: Fluoreszenz und Phosphoreszenz

Jeder Körper strahlt in Form von Temperaturstrahlung (außer  $T = 0 \text{ K}$ ).  
Zusätzlich zu dieser Art der Strahlung kann Lumineszenz auftreten (Überschussstrahlung).



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.fetcommunity.de/photo/chemolumineszenz-unt-luminoi-3-a-stefan-frankenhof/42826791>

3

# Anregungsarten

- Verschiedene Arten der Anregungen der Elektronen in einem lumineszierenden Material sind möglich
- Je nach Anregungstyp gibt es einen unterschiedlichen Namen für den Erscheinungstyp der Lumineszenz

Art der Anregung	Name	Beispiel
Licht	Photolumineszenz	Chininsulfat, Phosphor
Röntgenstrahlung	Röntgenlumineszenz	NaI (Tl)
Radioaktive Strahlung	Radiolumineszenz	NaI (Tl)
Elektrisches Feld	Elektrolumineszenz	Quecksilberdampf Lampe
Mechanische Wirkung	Tribolumineszenz	Würfelsucker
Chemische Reaktion	Chemolumineszenz	Glühwürmchen
Wärme	Thermolumineszenz	$\text{CaSO}_4$ (Dy)

Es sind weitaus mehr Arten der Anregungen möglich.

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

4

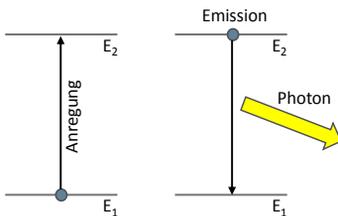
# Lumineszenz von Atomen

- Versuch: Einstreuen von NaCl in die Brennerflamme und spektrale Zerlegung des entstehenden Lichts

- Beobachtung:  Natrium

- Auswertung:

- Natriumatome werden durch thermische Energie angeregt
- Thermische Energie wird in potenzielle Energie und schließlich in Lichtphotonen umgewandelt
- Natriumatome geben im sichtbaren Bereich ausschließlich Photonen der Wellenlänge 589 nm ab
- Die Energie der Lichtphotonen beträgt:



$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Verändert nach <http://www.seifnacht.com>, Karim Kouz (November 2016)

5

# Lumineszenz von Atomen

- Versuch: Einbringen eines mit Natriumgas gefüllten Glaskolbens in das Licht einer Halogenlampe (kontinuierliches Spektrum) und Beobachtung des kontinuierlichen Spektrums

- Beobachtung: 

- Auswertung:

- Natriumgas absorbiert Licht der Wellenlänge 589 nm aus dem kontinuierlichen Spektrum des Halogenstrahlers
- Das emittierte Licht des Natriumgases ist zu schwach, um das Spektroskop zu erreichen, sodass an der Stelle des Natriumspektrums eine schwarze Linie erscheint



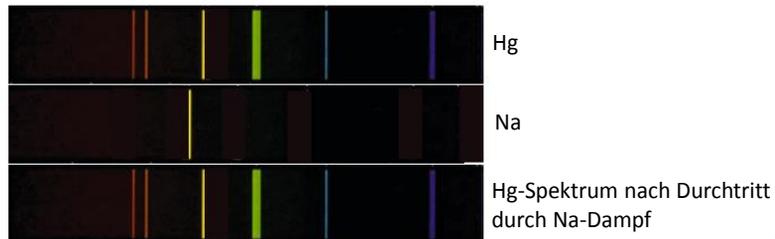
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Verändert nach <http://www.kilgiplyak.de>

6

# Lumineszenz von Atomen

- Versuch: Licht einer Hg-Dampf-Lampe (6 Spektrallinien) wird durch einen Glaskolben mit Natriumdampf geschickt
- Beobachtung:



- Auswertung:
  - Spektrum der Hg-Lampe verändert sich durch Einbringen des Na-Dampfes nicht
  - Die gelbe Linie der Hg-Lampe und des Na-Dampfes stimmen nicht in ihren Energiebeträgen (Wellenlängen) überein

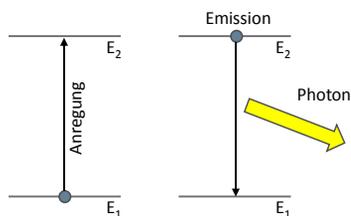
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: verändert nach <http://www.phys.ethz.ch>

7

# Zusammenfassung

- Atome absorbieren genau diejenigen Energiebeträge, die sich auch emittieren
- Aufgrund ihrer diskreten Energiezustände ergibt sich als Spektrum ein Linienspektrum
- Licht muss nicht immer zwangsläufig emittiert werden (es können auch strahlungsfreie Übergänge auftreten, bei denen die Energie in Form von Wärme frei wird)



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Karim Kouz (November 2016)

8

# Lumineszenz von Molekülen

- Moleküle zeigen andere Eigenschaften als Atome
- Sie besitzen neben den diskreten Energieniveaus auch andere Energiezustände in zahlreicher Form:
  - Vibrationszustände (Schwingungszustände)
  - Rotationszustände
- Moleküle zeigen daher meistens ein **Bandenspektrum**
- Moleküle zeigen die **Stokes-Verschiebung**

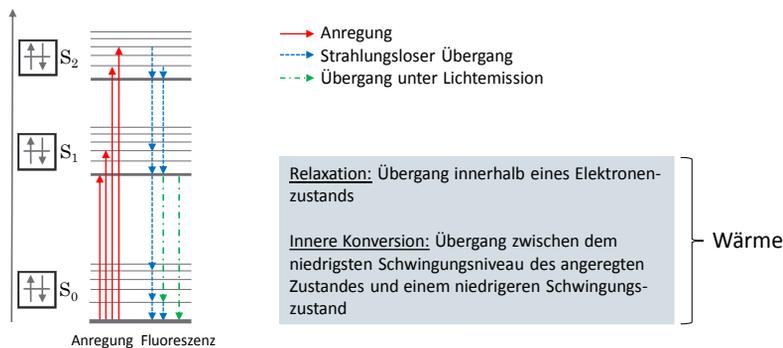
$$E_{\text{Molekül}} = E_{\text{Elektron}} + E_{\text{Vibration}} + E_{\text{Rotation}}$$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

9

# Jablonski-Diagramm: Fluoreszenz

- Veranschaulicht die möglichen Übergänge von Valenzelektronen in die verschiedenen Anregungszustände nach Anregung und zurück in den Grundzustand



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.chemedakkt.uni-wuppertal.de>

10

# Multiplizität

- Mit Hilfe der Multiplizität lässt sich u.a. die Phosphoreszenz erklären
- Größe, die angibt, in wie viele Richtungen sich der Spinvektor eines Teilchens bezüglich einer festen Achse im Raum ausrichten kann:

$$M = 2 \cdot S + 1$$

S: Gesamtspin-Quantenzahl  
s: Spinquantenzahl  
M: Multiplizität

$$S = \sum s = \frac{n_{\text{ungepaart}}}{2}$$

Molekül	Anzahl gepaarter Elektronen (äußere Schale)	Anzahl ungepaarter Elektronen (äußere Schale)	S	M	Grundzustand
H <sub>2</sub>	1 x 2	0	0	1	Singulett
NO	5 x 2	1	0,5	2	Dublett
O <sub>2</sub>	5 x 2	2	1	3	Triplet

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

11

# Fluoreszenz

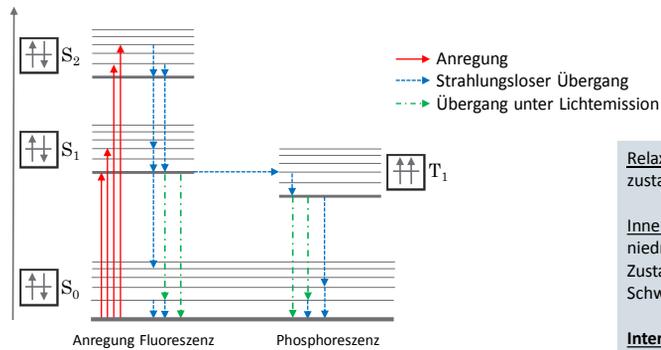
- Ein/mehrere Elektron(en) wird/werden in einen energetisch höheren Zustand durch Anregung angehoben
- Bei der Anregung ändert sich die Multiplizität ( $\Delta S = 0$ ) **nicht**
- Unmittelbar nach der Anregung gelangt/gelangen das Elektron/die Elektronen (in einem oder) in mehreren Sprüngen wieder in den Grundzustand:
  - Strahlungsfrei und/oder
  - Unter Lichtemission
- Da in einem Molekül Vibrations- und Rotationszustände vorliegen und Übergänge innerhalb dieser Niveaus strahlungsfrei ablaufen, wird **immer** ein Photon mit einer größeren Wellenlänge emittiert als ursprünglich absorbiert = **Stokes-Verschiebung**
- Das Spektrum der Fluoreszenz ergibt ein Bandenspektrum (aufgrund der vielen Energiezustände)

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

12

# Jablonski-Diagramm: Phosphoreszenz

- Veranschaulicht die möglichen Übergänge von Valenzelektronen in die verschiedenen Anregungszustände nach Anregung und zurück



**Relaxation:** Übergang innerhalb eines Elektronenzustands

**Innere Konversion:** Übergang zwischen dem niedrigsten Schwingungsniveau des angeregten Zustands und einem niedrigeren Schwingungszustand

**Interkombination:** Übergang zwischen Zuständen unterschiedlicher Spinmultiplizität

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.chemedial.de/kun-waagportal.de>

13

# Phosphoreszenz

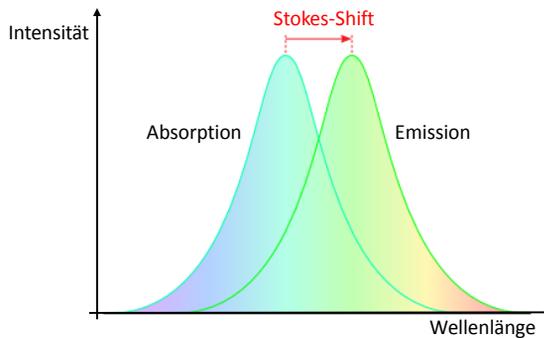
- Ein/mehrere Elektron(en) wird/werden in einen energetisch höheren Zustand durch Anregung angehoben
- Die Multiplizität ( $\Delta S = 0$ ) bleibt nicht erhalten
- Nach der Hund-Regel ist der Triplett-Zustand energetisch günstiger (möglichst viele ungepaarte Spins) als der Singulett-Zustand
- Triplett-Zustand ist relativ stabil (metastabil) und kann eine gewisse Zeit vorliegen, bis der Grundzustand wieder erreicht wird
- Übergänge zwischen unterschiedlichen Spinmultiplizitäten sind verboten und daher statistisch sehr unwahrscheinlich (**es dauert sehr lange, bis ein Übergang zu beobachten ist**)
- Da in einem Molekül Vibrations- und Rotationszustände vorliegen und Übergänge innerhalb dieser Niveaus strahlungsfrei ablaufen, wird **immer** ein Photon mit einer größeren Wellenlänge emittiert als ursprünglich absorbiert = **Stokes-Verschiebung**
- Das Spektrum der Phosphoreszenz ergibt ein Bandenspektrum (aufgrund der vielen Energiezustände)

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

14

# Stokes-Verschiebung

- Es findet eine spektrale Zerlegung zwischen Anregungslicht und Lumineszenzlicht statt



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: verändert nach <https://ip.uni-goettingen.de/ge/View/6741>

15

# Stokes-Verschiebung

- Verschiebung der Wellenlänge bzw. der Frequenz von Licht (elektromagnetischer Strahlung) zwischen Absorption und Emission
- D.h., wird elektromagnetische Strahlung absorbiert, so wird die emittierte Strahlung im Durchschnitt einen kleineren Energiebetrag besitzen als die absorbierte Strahlung
- Für die Phosphoreszenz/Fluoreszenz gilt:

$$\overline{\varepsilon}_{Phos} < \overline{\varepsilon}_{Fluo} < \overline{\varepsilon}_{Absorbiert}$$

$$\overline{\lambda}_{Phos} > \overline{\lambda}_{Fluo} > \overline{\lambda}_{Absorbiert}$$

$$\overline{f}_{Phos} < \overline{f}_{Fluo} < \overline{f}_{Absorbiert}$$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

16

# Lebensdauer des angeregten Zustandes

- Die Lebensdauer des angeregten Zustandes lässt sich durch folgende Gleichung beschreiben:

$$J = J_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

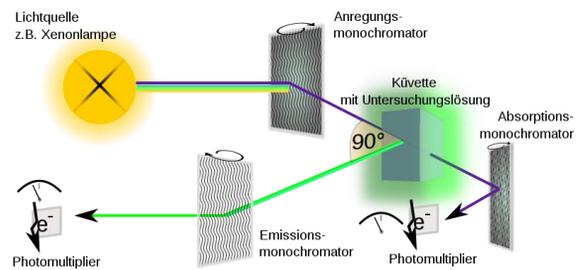
- $\tau$ : Lumineszenzlebensdauer des angeregten Zustandes (die Zeit, nach der die Intensität auf den e-ten Teil gesunken ist, also rund 37% der Ausgangsintensität)
- $\tau_{\text{Fluoreszenz}}$ : ns
- $\tau_{\text{Phosphoreszenz}}$ :  $\mu\text{s} - \text{s}$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

17

# Fluorimeter

- Verwendung: Aufnahme des Emissionsspektrums einer leuchtenden Substanz
- Lichtdetektor steht senkrecht zum Anregungslicht
- Anregungsmonochromator: Auswahl des Anregungslichts
- Emissionsmonochromator: Aufnahme des Emissionsspektrums



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fluorimeter\\_Diagramm.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fluorimeter_Diagramm.svg)

18

# Anwendungen

- Fluoreszenzmikroskopie: z.B. FISH und GFP (siehe Strukturuntersuchungsmethoden)
- Fluoreszenzspektroskopie: Proteinforschung
- Strahlungsdetektoren (siehe Detektoren)
- Sensoren: Pulsoximetrie, Calcium-Signalmessung
- Lampen (Germizidlampe, Blaulichttherapie, Solarium, LED)
- Monitore (fluoreszierender Schirm)
- Biologie: Luziferin produzierende Tiere, z.B. Glühwürmchen
- Zahnheilkunde:
  - Konsistenzprüfung des Zahnschmelzes
  - Plaque- und Bakteriendetektion

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

19

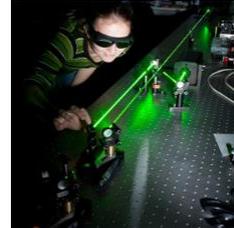
## (II) Laser

Karim Kouz

WS 2016/2017 1. Semester Biophysik

# Grundlagen

- Laser: Light amplification by stimulated emission of radiation
- Entstehung des Laserlichts:
  - Induzierte Emission
  - Besetzungsinversion
  - Laserniveau
  - Pumpen
  - Rückkopplung
  - Optischer Resonator



“Dozens of ravers partially blinded at Moscow party after their retinas are burned by laser light show”

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.dailymail.co.uk/news/article-103973/Dozens-ravers-blinded-Moscow-party-laser-light-show.html>

21

# Induzierte Emission

- Ein einzelnes isoliertes Atom kann sich entweder in einem Zustand niedrigster Energie (Grundzustand) oder in einem Zustand höherer Energie befinden
- Für den Laser sind die folgenden 3 Möglichkeiten des Wechsels zwischen diesen beiden Zuständen von Bedeutung:
  - Absorption
  - Spontane Emission
  - Induzierte Emission

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

22

# Induzierte Emission

• Absorption: Ein Atom im Grundzustand absorbiert Energie einer elektromagnetischen Strahlung der Energie  $E = h \cdot f$  und gelangt damit in einen Zustand höherer Energie

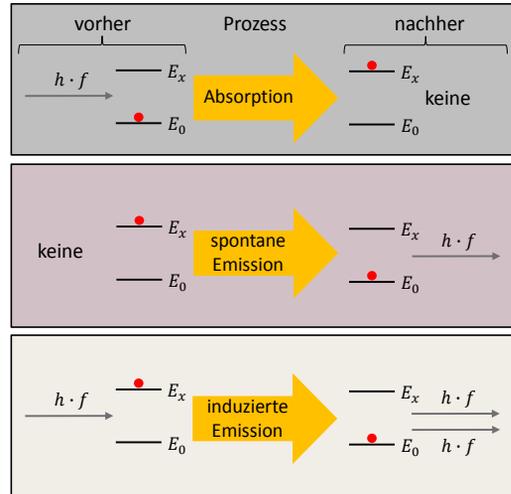
• Es gilt:  $h \cdot f = E_x - E_0 = \Delta E$

• Spontane Emission: Das sich im angeregten Energiezustand befindende Atom gelangt ohne äußere Einflüsse nach einer Weile in seinen Grundzustand und emittiert dabei ein Photon der Energie  $E = h \cdot f$

• Die Emission wird spontan genannt, weil sie durch keine äußeren Einflüsse ausgelöst wurde

• Induzierte Emission: Ein Photon der Energie  $E = h \cdot f$  stimuliert das angeregte Atom zum Übergang in seinen Grundzustand. Dabei wird ein zusätzliches Photon der Energie  $E = h \cdot f$  emittiert.

• Die Emission wird induziert genannt, weil dieses Ereignis durch ein äußeres Photon ausgelöst wurde



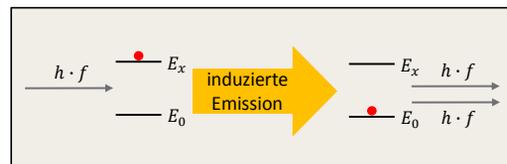
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Angelehnt an Physik: Halliday, Resnick, Walker, Wiley-VCH

23

# Voraussetzungen und Folgen der induzierten Emission

- Das induzierende Photon muss genau die Energie besitzen, die der Energiedifferenz zwischen angeregtem Zustand und Grundzustand entspricht
- Es kommt zur Lichtverstärkung: aus einem einfallenden Photon sind zwei Photonen (1 induziertes + 1 induzierendes Photon) geworden
- Induziertes und induzierendes Photon besitzen dieselbe:
  - Energie (Frequenz, Wellenlänge)
  - Phase (kohärent)
  - Polarisation
  - Ausbreitungsrichtung



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Angelehnt an Physik: Halliday, Resnick, Walker, Wiley-VCH

24

# Besetzungsinversion

- Betrachtet man eine große Anzahl von Atomen, die bei einer Temperatur  $T$  im thermischen Gleichgewicht sind, so befinden sich einige Atome ( $N_x$ ) im angeregten Zustand ( $E_x$ )
- Ohne äußere Bestrahlung gilt dann:

$$\frac{N_x}{N_0} = e^{-\frac{(E_x - E_0)}{k \cdot T}}$$

$N_x$ :	Anzahl der Atome im angeregten Zustand
$N_0$ :	Anzahl der Atome im Grundzustand
$E_x$ :	Energie der angeregten Atome
$E_0$ :	Energie der Atome im Grundzustand
$k$ :	Boltzmann-Konstante
$T$ :	Temperatur
$k \cdot T$ :	mittlere kinetische Energie eines Atoms bei der Temperatur $T$

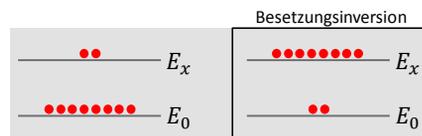
- Je höher die Temperatur, desto mehr Atome werden (im Mittel) durch die thermische Bewegung in den Zustand mit der höheren Energie „gestoßen“
- Da die Energie des angeregten Zustands größer als die des Grundzustands ist, ist die Anzahl der angeregten Atome kleiner als die der im Grundzustand

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

25

# Besetzungsinversion

- Bestrahlt man die Atome mit Photonen der Energie  $\Delta E = E_x - E_0$ , so werden einige der Photonen absorbiert, andere wirken als induzierendes Photon, sodass induzierte Emission stattfindet
- Die Wahrscheinlichkeit dieser beiden Prozesse (Absorption und induzierte Emission) ist gleich groß
- Da sich jedoch mehr Atome im Grundzustand befinden, überwiegt insgesamt die Absorption: das einfallende Licht wird geschwächt
- Eine Voraussetzung des Laserlichtes ist jedoch, dass die induzierte Emission überwiegt
- Dies wäre dadurch zu erreichen, wenn sich mehr Atome im angeregten Zustand befinden würden als im Grundzustand = **Besetzungsinversion**
- Besetzungsinversion steht aber im Widerspruch zum thermischen Gleichgewicht, wird jedoch durch **Pumpen und Laserniveaus** ermöglicht



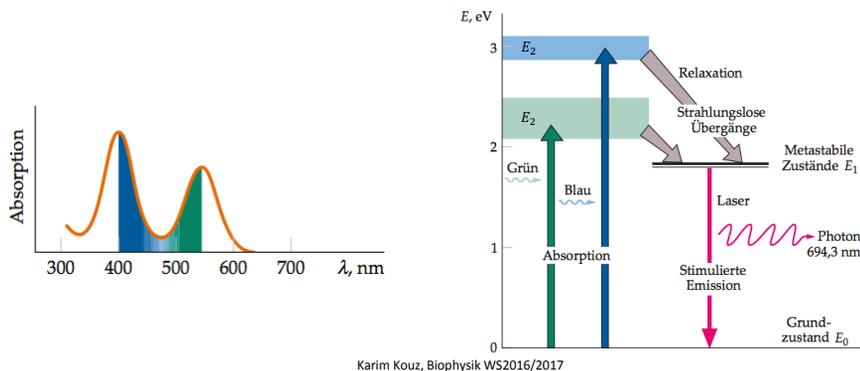
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Angewandte Physik: Halliday, Resnick, Walker, WILEY-VCH

26

# Laserniveau

- Unter „normalen Bedingungen“ kann keine Besetzungsinversion geschaffen werden
- Durch das Einführen eines dritten Energieniveaus kann Besetzungsinversion jedoch stattfinden:  
**Dreiniveausystem**
- Ein Beispiel für ein Dreiniveausystem-Laser ist der Rubin-Laser:

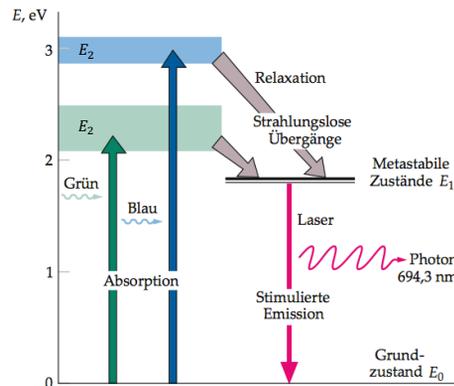


Quelle: Verändert nach Tipler, Paul A., Mosca, Gene: Kommer, Christoph (2013) Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Aufl. Hg. v. Jenny Wagner, Springer Spektrum

27

# Dreiniveausystem – Funktionsweise

- Atome bzw. Elektronen werden angeregt und gelangen aus dem Grundzustand  $E_0$  durch „Pumpen“ in den angeregten Zustand  $E_2$ , wobei gilt:  $E_2 > E_1 > E_0$
- Die Elektronen gelangen von  $E_2$  viel schneller auf  $E_1$  (strahlungslos) als von  $E_1$  auf  $E_0$  ( $E_1$  ist metastabil), sodass gilt:  $N = N_0 + N_1 + N_2 \approx N_0 + N_1$
- Es sind nun mehr Elektronen auf dem Niveau  $E_1$  als im Grundzustand  $E_0$ : es besteht Besetzungsinversion
- Vom Niveau  $E_1$  können die Elektronen spontan auf  $E_0$  relaxieren, wobei die dabei spontan emittierten Photonen als induzierende Photonen weitere Elektronen stimulieren können in den Grundzustand zu wechseln und dabei induzierte Photonen emittiert werden, die dann ebenfalls als induzierende Photonen wirken können
- Der Übergang von  $E_2$  auf  $E_0$  ist sehr unwahrscheinlich, aber dennoch möglich



Das erste emittierte Photon vom Niveau  $E_1$  ist immer ein spontan emittiertes Photon. Auch während der induzierten Emission findet immer wieder auch spontane Emission statt.

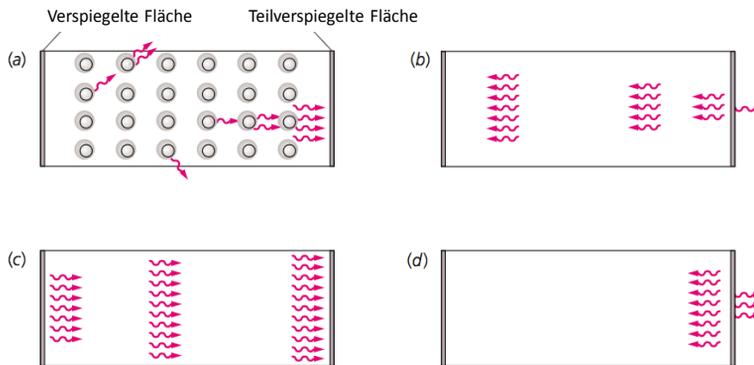
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Verändert nach Tipler, Paul A., Mosca, Gene: Kommer, Christoph (2013) Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Aufl. Hg. v. Jenny Wagner, Springer Spektrum

28



# Positive Rückkopplung



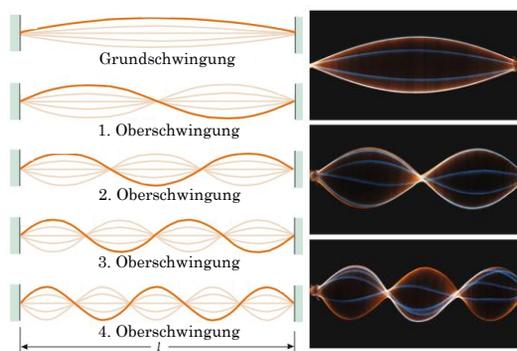
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Tipler, Paul A., Mosca, Gene: Kommer, Christoph (2013): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. 7. Aufl. Ig. v. Jenny Wagner. Springer Spektrum

31

# Stehende Wellen

- Entstehen durch Überlagerung zweier gegenläufiger ebener Wellen gleicher Frequenz und gleicher Amplitude (z.B. Überlagerung von reflektierter und einfallender Welle)
- Alle Punkte schwingen mit gleicher Phase, aber unterschiedlicher Amplitude



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

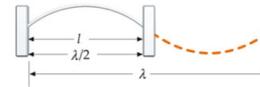
Quelle: Yeandere nach Tipler, Paul A., Mosca, Gene: Kommer, Christoph (2013): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. 7. Aufl. Ig. v. Jenny Wagner. Springer Spektrum

32

# Optischer Resonator

- Bei zwei festen Enden können stehende Wellen nur dann entstehen, wenn sie die folgende Bedingung erfüllen:

$$2 \cdot l = k \cdot \lambda \quad (k = 1, 2, 3, \dots)$$



$l$ : Abstand zwischen den beiden festen Enden

- Im Resonator entstehen stehende Wellen
- Nur die Frequenzen werden verstärkt, die die Resonanzbedingung erfüllen (positive Interferenz) – unerwünschte Frequenzen werden somit durch negative Interferenz eliminiert

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

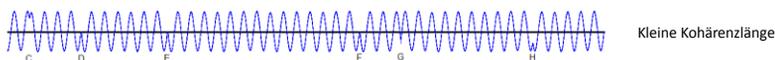
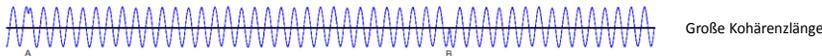
Quelle: verändert nach Tipler, Paul A.; Mosca, Gene; Kommer, Christoph (2015): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. 7. Aufl. Hb. v. Jenny Wagner, Springer Spektrum

33

# Eigenschaften der Laserstrahlung

- Monochromatisch ( $\frac{\Delta f}{f} \approx 10^{-10}$ )

- Kohärent: Kohärenzlänge beträgt bis zu mehrere Kilometer



- Geringe Divergenz ( $\theta \approx 0,1 - 1$  mrad)



- Hohe Intensität ( $I \approx 10^3 - 10^{14} \frac{W}{m^2}$ )

- Polarisiert

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

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

34

# Lasertypen

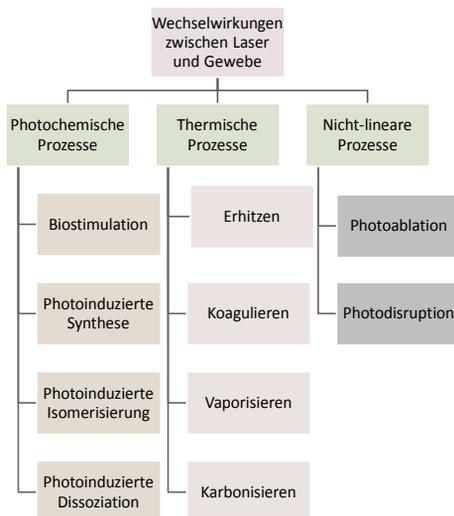
Lasertyp	Wellenlänge
Excimer-KrF	248 nm (UV)
Argon	488/514 nm
He-Ne	633 nm
Rubin	694 nm
GaAs	840 nm (IR)
Nd:YAG: Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser	1,06 µm (IR)
Er:YAG: Erbium-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser	1,6 µm (IR)
CO <sub>2</sub>	10,6 µm (IR)

Man kann Laser in Dauerstrichlaser und Impulslaser einteilen. Eine häufige Einteilung geschieht auch nach der Art des Lasermaterials: gasförmig, flüssig und kristallin.

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

35

# Anwendungen: Absorption in Geweben



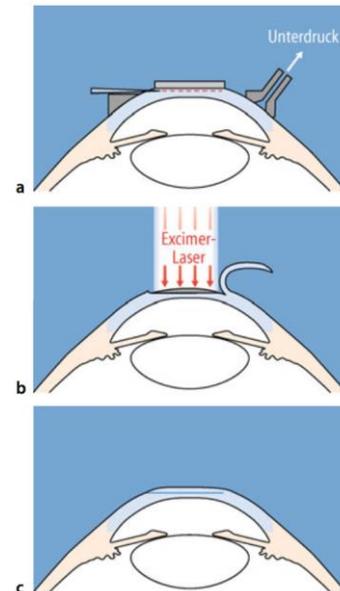
Prozess	Temperaturbereich
Erwärmen	≈ 40°C
Koagulieren	≈ 60°C – 90°C
Vaporisieren	≈ 100°C – 150 °C
Karbonisieren	≈ 300°C

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

36

# LASIK

- LASIK = Laser-in-sito-Keratomileusis
- Operation zur Korrektur optischer Fehlsichtigkeiten als Alternative zur Brille oder Kontaktlinse
- Laser-Verwendung: Abtragung von Hornhaut
- Lasertyp: Nd:YAG-Laser, Excimerlaser



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Geim, Augenheilkunde, 31. Auflage, Springer-Verlag.

37

# Laserskalpell

- Schneidewirkung beruht auf der Vaporisation und Karbonisation des Lasers
- Lasertyp: CO<sub>2</sub>-Laser, Nd-YAG-Laser (sind nicht sichtbar, ein Ziellaser muss verwendet werden)
- Vorteile:
  - Sehr genaue Arbeit ist möglich auch in Körperhöhlen (Endoskope,...)
  - Sehr genaue Zerstörung von Zellen ist möglich
  - Scharfe Wundränder beim Schneiden heilen erheblich schneller
  - Gleichzeitige Blutstillung (Laserkoagulation) beim Schneiden
  - Laser wirkt gleichzeitig sterilisierend, was postoperative Infektionen minimiert



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017



Universität Hamburg  
DER FORSCHUNG | DER LEHRE | DER BILDUNG

Quelle: [http://www.klinikum.uni-hamburg.de/presse/2009/03/17\\_news\\_junge.jpg](http://www.klinikum.uni-hamburg.de/presse/2009/03/17_news_junge.jpg); [http://www.zenit.de/medien/medienbilder/pskalk\\_x\\_400/haerthel/uh.jpg](http://www.zenit.de/medien/medienbilder/pskalk_x_400/haerthel/uh.jpg)

38



# (III) Optik des Auges und das Sehen

Karim Kouz

WS 2016/2017 1. Semester Biophysik

## Entwicklung des Sehorgans

- Im Tierreich gibt es die verschiedensten Augentypen – viele davon sind hoch, andere auf sehr niedrigen Stadien entwickelt
- Das hochentwickelte Auge der Wirbeltiere scheint eine Weiterentwicklung aus den niedrigeren Stadien zu sein



Regenwurm



Napfschnecke



Nautilus



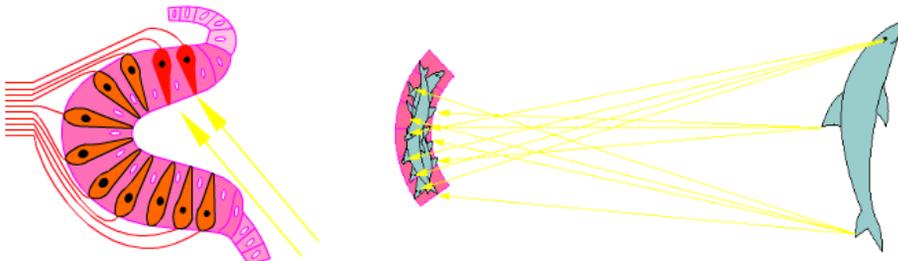
Weinbergschnecke

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.kelliparis.de/themenbereiche/optische-innenfz/das-auge-heraugen>

## Grubenaug

- Lichtempfindliche Zellen sind konzentriert an bestimmten Flecken, die zu einer Grube eingezogen sind
- Minimale räumliche Auflösung und kein Bildeindruck
- Verletzungsanfällig



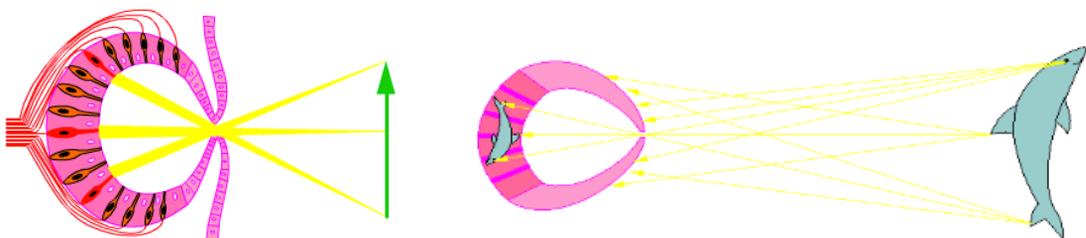
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.biophysik.de/themenbereich/optische-innen/ab/das-auge-tieraugen>

43

## Lochaug

- Lichtempfindliche Zellen sind konzentriert an bestimmten zu einer Grube eingezogenen Flecken, die jedoch fast zugewachsen ist (bzw. von einer durchsichtigen Haut bedeckt ist: Blasenauge)
- Schlechte räumliche Auflösung, aber verbesserter Bildeindruck
- Relativ verletzungsanfällig



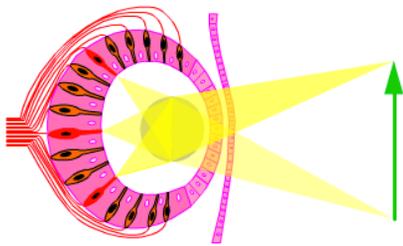
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.biophysik.de/themenbereich/optische-innen/ab/das-auge-tieraugen>

44

# Linsenauge

- Das Lochauge entwirft nur ein scharfes Bild, wenn das Loch sehr klein ist (auf Kosten der Bildhelligkeit)
- Wahrscheinlich entstand aus der im Hohlraum des Lochauges vorhandenen Flüssigkeit die Augenlinse
- Abbildung des Gegenstandes (Schärfe) und eine ausreichende Bildhelligkeit sind möglich



Schnitt durch das Auge einer  
Weinbergschnecke

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.leifiphys.de/themenbereich/optische-inventiv/das-auge-leragen>

45

# Das Auge als Kugel?

- Wäre das Auge eine einfache Kugel:

$$D = \frac{n_b - n_g}{R} = \frac{n_g}{g} + \frac{n_b}{b}$$

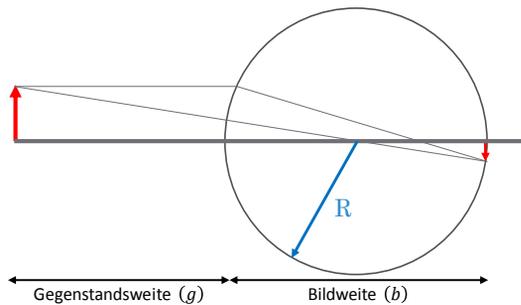
- Wenn  $n_g = 1$  (Luft) und das Bild unmittelbar am Ende der Kugel abgebildet werden soll, muss gelten:

$$\frac{n_b - 1}{R} = \frac{1}{g} + \frac{n_b}{2 \cdot R}$$

- Für  $n_b$  müsste dann gelten:

$$n_b = \frac{2 \cdot R}{g} + 2$$

Die Brechzahl des Auges müsste also mindestens 2 bzw. sogar noch größer sein. ( $n_{\text{Diamant}} = 2,42$ )

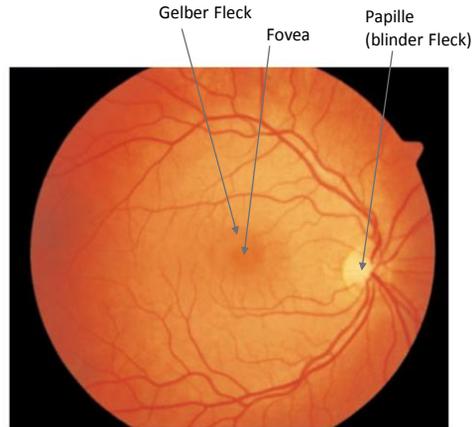
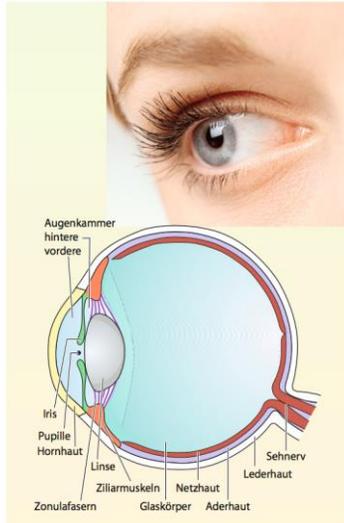


Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (November 2016)

46

# Anatomie des Auges



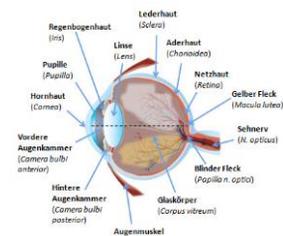
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Fritzsche, Physik für Biologen und Mediziner, Springer Spektrum Verlag, Vorlesung nach Grehm, Augenheilkunde, 31. Auflage, Springer, Verlag

47

# Strahlengang beim Sehvorgang

- Lichtstrahlen passieren beim Sehvorgang fünf Grenzflächen:
  - Luft – Tränenfilm
  - Tränenfilm – Hornhaut
  - Hornhaut – Kammerwasser
  - Kammerwasser – Linse
  - Linse – Glaskörper
- Intensität auf der Retina muss genügend groß, aber nicht zu groß sein (kein optimales Bild vs. Schädigung der Retina): Regelung durch die Pupille (Iris-muskulatur)



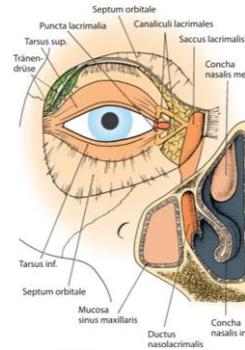
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.dr-gumpert.de>

48

## Brechkraft des Auges: Tränenfilm

- Brechung und auch Reflexion am Auge sind zunächst diffus (raue Oberfläche der Hornhaut)
- Der Tränenfilm auf dem Auge gleicht Unebenheiten aus und ist somit unentbehrlich für das klare Sehen; zudem dient er der Abwehr von Bakterien
- Zusammensetzung des präkornealen Tränenfilms:
  - Fettphase (Reduktion der Verdunstung)
  - Wässrige Phase
  - Muzinphase (Verbesserung der Haftung auf dem Hornhautepithel)



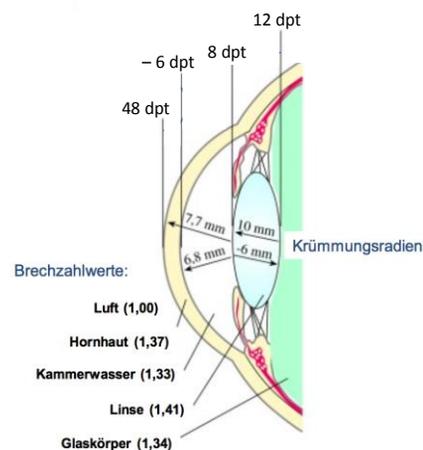
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Gem., Augenheilkunde, 31. Auflage: Springer-Verlag.

49

## Brechkraft des Auges

- Die Brechkraft des Auges ist die Stärke, mit der Lichtstrahlen beim Eintritt in das Auge gebündelt werden
- Die Regulation der Brechkraft erfolgt über die Veränderung des Krümmungsradius der Linse (Akkommodation)
- Die Brechkraft der Augen beträgt im Ruhezustand (ohne Akkommodation) ca. 62 dpt
- Die Grenzfläche Luft-Hornhaut besitzt die größte Brechkraft (operative Möglichkeiten sind hier sehr effektiv, z.B. mittels Laser)



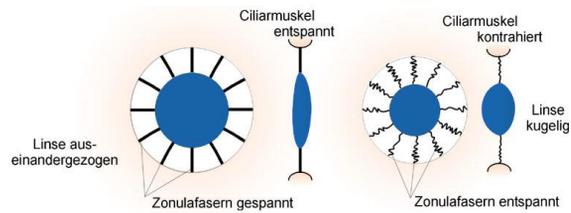
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: verändert nach Vorlesungsskript Biophysik Sommersemester WS 2016

50

# Akkommodation

- Der Ziliarmuskel ist ein ringförmiger Muskel, an dem die Zonulafasern befestigt sind, die die Aufhängung der Linse darstellen
- Kontraktion des Muskels:
  - Umschlössener Durchmesser verkleinert sich
  - Zonulafasern entspannen sich
  - Elastische Linse wölbt sich
- Entspannung des Muskels:
  - Umschlössener Durchmesser vergrößert sich
  - Zonulafasern werden gespannt
  - Linse wird auseinandergezogen



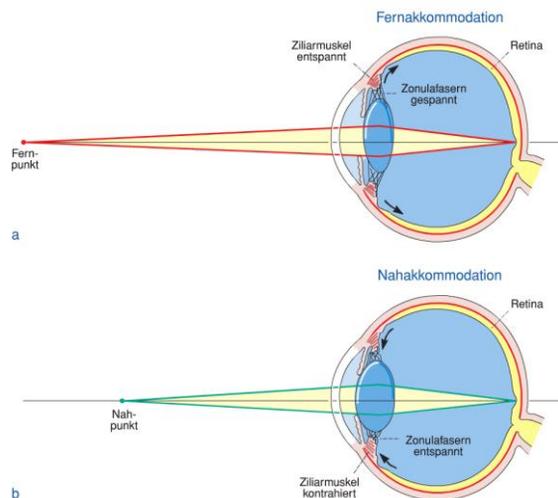
Quelle: <http://www.jimu.uib.ac.at/app/114/Grundlagen%20Augenheile/mobi/156577de-1>

51

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

# Akkommodation

- Die Brechkraft und somit der Krümmungsradius der Linse müssen den Bildverhältnissen angepasst werden:
  - Blick in die Ferne: Linse ist relativ flach; Brechkraft ist klein; Ziliarmuskel entspannt, Zonulafasern gespannt
  - Blick in die Nähe: Linse ist gekrümmt; Brechkraft ist groß; Ziliarmuskel kontrahiert, Zonulafasern entspannt
  - Größte Entfernung, bei der man Gegenstände noch klar sehen kann: Fernpunkt ( $g_f$ )
  - Kleinste Entfernung, bei der man Gegenstände noch klar sehen kann: Nahpunkt ( $g_p$ )



Quelle: Spectorian, Physiologie, 6. Auflage, München: Elsevier, Urban & Fischer.

52

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

# Akkommodationsbreite

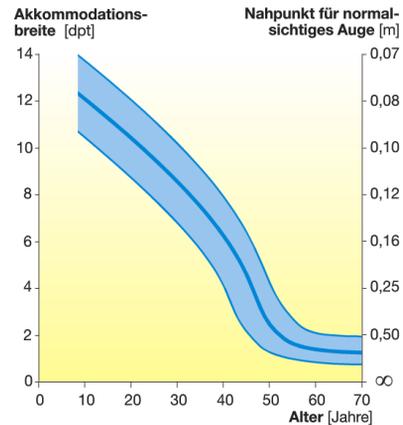
- Die maximal mögliche Brechkraftänderung wird als Akkommodationsbreite oder auch Akkommodationsamplitude bezeichnet:

$$\Delta D = D_{max} - D_{min}$$

$$D_{max} = \frac{n_g}{g} + \frac{n_b}{b} = \frac{1}{g_p} + \frac{n_b}{b}$$

$$D_{min} = \frac{n_g}{g} + \frac{n_b}{b} = \frac{1}{g_r} + \frac{n_b}{b}$$

$$\Delta D = \frac{1}{g_p} - \frac{1}{g_r}$$



Bei jungen Leuten ist die physiologische Akkommodationsbreite zwischen 10 – 12 dpt. Mit dem Alter nimmt sie teilweise bis auf 1 dpt ab.

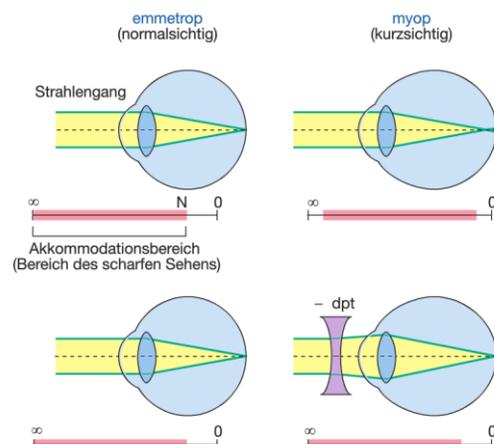
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Spektrum, Physiologie, 6. Auflage, München: Elsevier, Urban & Fischer.

53

# Augenfehler – Kurzsichtigkeit

- Kurzsichtigkeit = Myopie
- Unscharfes Sehen in der Ferne
- Ursache: Bulbus ist zu lang, Bild entsteht im Auge vor der Netzhaut
- Korrektur: Zerstreuungslinsen (konkave Linsen), also Linsen mit negativer Brechkraft



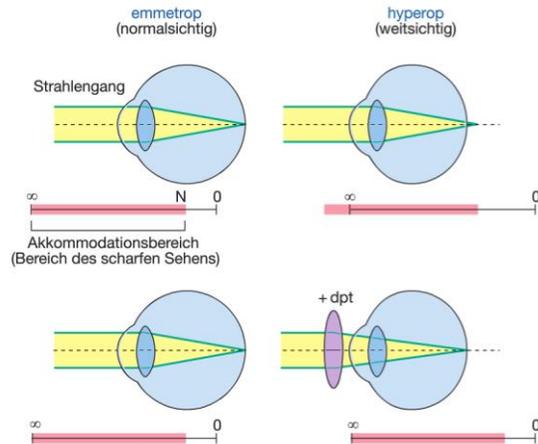
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://commons.wikimedia.org>, Spektrum, Physiologie, 6. Auflage, München: Elsevier, Urban & Fischer.

54

# Augenfehler – Übersichtigkeit

- Übersichtigkeit = Weitsichtigkeit = Hyperopie
- Unscharfes Sehen in der Nähe
- Ursache: Bulbus ist zu kurz, Bild entsteht hinter der Netzhaut
- Korrektur: Sammellinsen (konvexe Linse) – also Linsen mit positiver Brechkraft



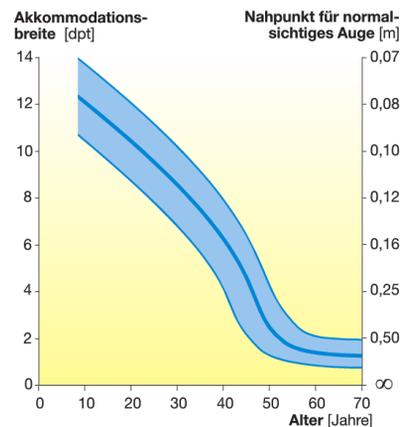
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.laktinstitute.com>; Physiologie 6. Auflage, München: Elsevier, Urban & Fischer.

55

# Alterssichtigkeit – Presbyopie

- Unscharfes Sehen in der Nähe (altersbedingt)
- Ursache:
  - Durch Sklerosierung und Elastizitätsverlust der Linse nimmt die Akkommodationsbreite stetig ab
  - Abnahme der Akkommodationsbreite von rund 2 dpt/10 Jahre
  - Keine Krankheit, sondern normaler Funktionsverlust
- Korrektur: meistens durch Brillengläser mit Sammellinsen, wenn keine kombinierten Sehschwächen vorliegen (z.B. Alterssichtigkeit und Kurzsichtigkeit)



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Speckmann, Physiologie 6. Auflage, München: Elsevier, Urban & Fischer.

56

# Nachtmyopie

- Die Hornhaut weist physiologischer Weise eine (gleichbleibend) positive sphärische Aberration auf
- Die Linse des menschlichen Auges weist physiologischer Weise eine negative Aberration auf, die ab dem 40. Lebensjahr positiver wird
- Bei enger Pupille werden achsenferne Strahlen ausgeblendet: Gesamtaberration ist nahezu Null
- Bei weiter Pupille werden achsenferne Strahlen nicht ausgeblendet: Gesamtaberration ist positiv – Folge ist ein leicht verschwommenes Bild bei weiter Pupille
- Physiologische Kompensationsmechanismen:
  - Cornea peripher weniger stark gekrümmt
  - Brechzahl der Linse im Zentrum größer



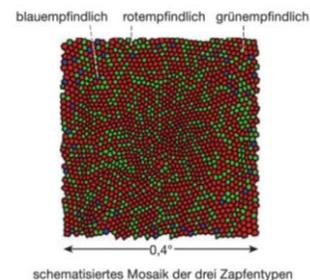
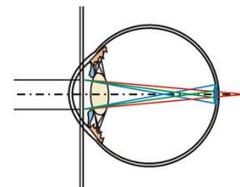
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Vorlesungstext Biophysik Sommersemester Universität WS 2016

57

# Chromatische Aberration

- Chromatische Aberration:
  - Ursache: Dispersion
  - Ergebnis:
    - Abweichende Brennweite der verschiedenen Farben (Wellenlängen)
    - Jede Wellenlänge hat ihren eigenen Brennpunkt
    - Blaues Licht wird als Streulicht wahrgenommen und verursacht Blendungen
- Physiologische Kompensationsmechanismen:
  - Spektrale Empfindlichkeit im blauen Wellenlängenbereich eingeschränkt
  - Keine Blau-Zapfen in der Fovea



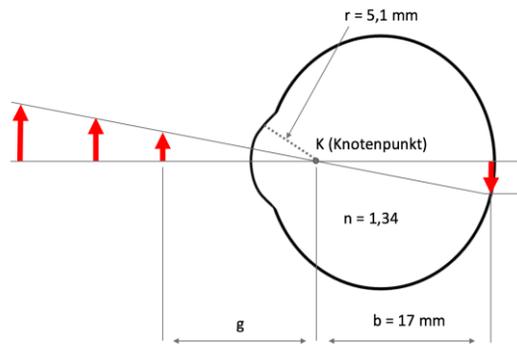
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.optikum.at/kurzweiliges-ich/Bares-für-amerbedrpte-malabildgeneration-und-blendung/>, Specimen, Physiologie, 6. Auflage, München: Elsevier, Urban & Schwarzenberg

58

# Das reduzierte Auge

- An jeder optisch aktiven Grenzfläche des Auges müsste man Prozesse wie Brechung und Reflexion gesondert betrachten
- Mit Hilfe eines Modells – dem reduzierten Auge – kann dies vereinfacht werden
- Das reduzierte Auge ist ein schematisch vereinfachtes Modell des durchschnittlichen menschlichen Auges in der Optometrie
- Daten:
  - Homogener Körper mit  $n = 1,34$
  - $r = 5,1$  mm
  - $b = 17$  mm
  - $D = 67$  dpt (entspricht dem menschlichen Auge bei halber Akkommodation bei  $\Delta D = 10$  dpt)



Das Bild auf der Retina ist:

- verkleinert
- reell
- umgekehrt

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (November 2016)

59

# Exkurs: Bogenmaß

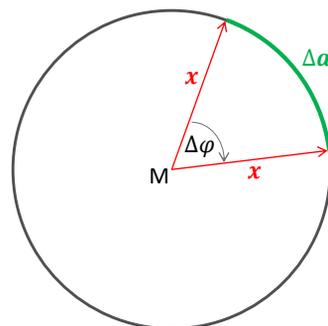
- Bogenmaß: Quotient aus dem Kreisbogen  $\Delta a$ , der zum Winkel  $\Delta\varphi$  gehört und dem Radius  $x$

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta a}{x}$$

- Beispiel: Für  $90^\circ$  ist der Winkel in Bogenmaß

$$\Delta\varphi = \frac{2 \cdot \pi \cdot x}{4 \cdot x} = \frac{1}{2} \cdot \pi$$

Erklärung zur Rechnung:  
 $2 \cdot \pi \cdot x$ : Umfang des Kreises  
 4: Es wird durch 4 geteilt, da  $90^\circ$  genau  $\frac{1}{4}$  Kreis ist



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (August 2014)

60

# Bogenmaß, Winkelminute, Grad

- Umrechnung: Bogenmaß in Winkelminute

$$\alpha(') = \frac{a}{x} (\text{rad}) \cdot \frac{360(^{\circ})}{2\pi(\text{rad})} \cdot 60 \left( \frac{'}{^{\circ}} \right)$$

- Umrechnung: Bogenmaß in Grad

$$\alpha(^{\circ}) = \frac{a}{x} (\text{rad}) \cdot \frac{360(^{\circ})}{2\pi(\text{rad})}$$

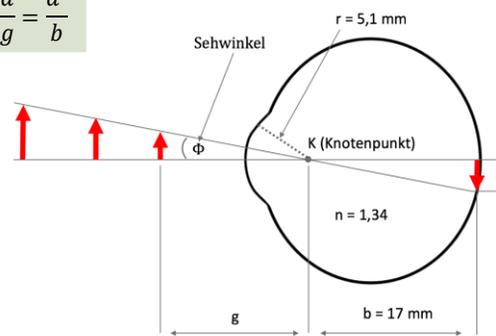
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

61

# Sehwinkel ( $\Phi = \text{Phi}$ )

- Winkel, unter dem ein Objekt vom Beobachter wahrgenommen wird
- Der Abstand der äußersten Punkte des Bildes entspricht ungefähr der Bogenlänge:

$$\phi(\text{rad}) = \frac{a}{g} = \frac{a'}{b}$$



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (November 2016)

62

# Auflösung des Auges

- Sehwinkelgrenze ( $\alpha$ ): Der minimale Sehwinkel, unter dem man zwei Gegenstandspunkte gerade noch getrennt sieht
- Auflösungsvermögen:

$$\frac{1}{\text{Sehwinkelgrenze } (\alpha)} \left[ \frac{1}{7} \right]$$

Der Referenzwert der Sehwinkelgrenze beträgt 1' (1 Winkelminute).

- Sehschärfe/Visus:

$$\frac{\text{Auflösungsvermögen des Patienten}}{\text{Auflösungsvermögen (Referenzwert)}} = \frac{\frac{1}{\alpha}}{\frac{1}{1'}} = \frac{1'}{\alpha} (\cdot 100\%)$$

Die Begrenzung des Auflösungsvermögens hat zwei Ursachen:

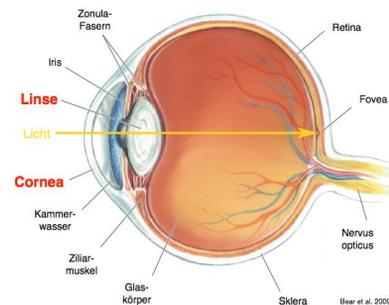
- Physikalische Gesetze
- Biologische Gründe (Anatomie des Auges)

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

63

# Physikalische Begrenzung

- Lichtdurchtritt durch die Pupille ist vergleichbar mit Lichtdurchtritt durch einen Spalt
- Beim Durchtritt von Licht durch einen Spalt tritt Beugung auf (Huygen'sches Prinzip)
- Beugungsbilder (= Airy-Scheiben) erscheinen auf der Retina und keine ganz klaren Bilder

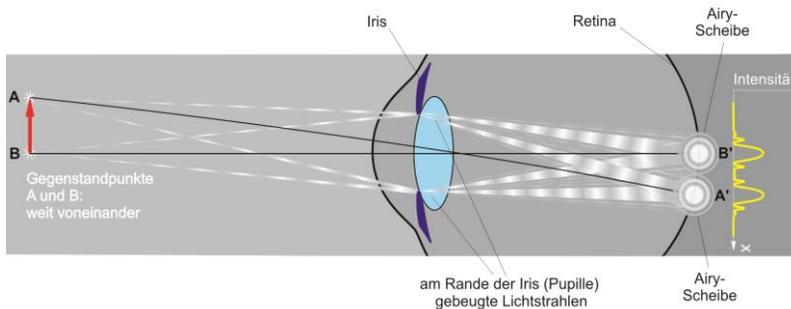


Quelle: Bear, M. & Connor, T. (2004). Atlas of Human Anatomy: A Basic Text for the Health Sciences. Elsevier, London.

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

64

## Beugung am Auge I



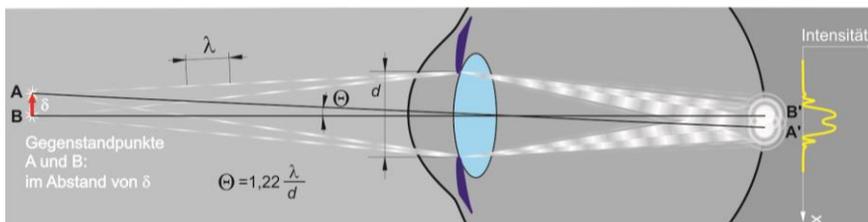
Die beiden Gegenstandspunkte sind noch weit genug voneinander entfernt, sodass sich die Airy-Scheiben nicht überlappen. Die beiden Punkte werden getrennt wahrgenommen.

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Biophysik Vorlesungsskript, Semmelweis Universität Budapest WS2014/15

65

## Beugung am Auge II



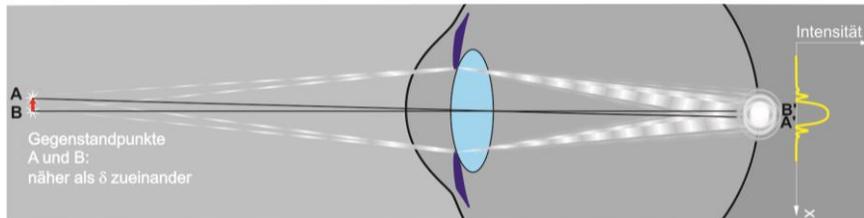
Die beiden Gegenstandspunkte liegen in einem kritischen Abstand zueinander: Die Airy-Scheiben überlappen einander, die Bildpunkte sind aber noch zu unterscheiden, sodass zwei getrennte Bildpunkte wahrgenommen werden.

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Biophysik Vorlesungsskript, Semmelweis Universität Budapest WS2014/15

66

## Beugung am Auge III



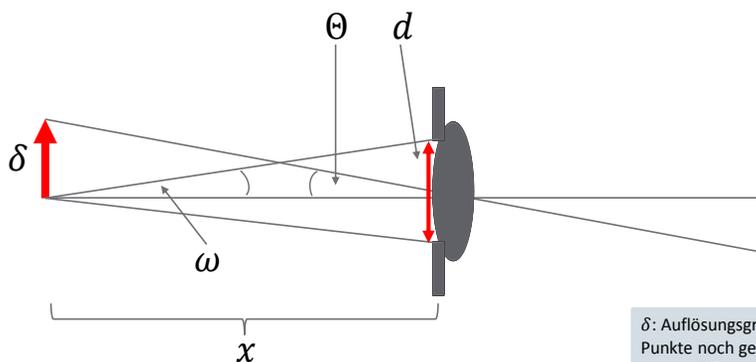
Die beiden Gegenstandspunkte liegen so dicht beieinander, dass die Airy-Scheiben nahezu komplett überlappen und die zwei Bildpunkte nicht mehr getrennt wahrgenommen werden. Das Bild ist nicht mehr auflösbar.

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Biophysik Vorlesungskript Semmelweis Universität Budapest WS2014/15

67

## Berechnung der Sehinkelgrenze ( $\Theta = \text{Theta}$ )



$$\Theta = \frac{\delta}{x} \text{ (Näherung)}$$

$\delta$ : Auflösungsgrenze (kleinster Abstand, unter dem zwei Punkte noch getrennt wahrgenommen werden können)  
 $\omega$ : Halboffnungswinkel der Pupille  
 $d$ : Pupillendurchmesser

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (November 2014)

68

## Berechnung der Sehwinkelgrenze

- Die Auflösungsgrenze lässt sich mit der Abbe'schen Formel ausdrücken:

$$\delta = 0,61 \cdot \frac{\lambda}{n \cdot \sin(\omega)}$$

$\lambda$ : Wellenlänge des einfallenden Lichtstrahls  
 $n$ : Brechzahl zwischen Objekt und Auge = Luft = 1  
 $\omega$ : Halböffnungswinkel der Pupille

- Der Halböffnungswinkel lässt sich wie folgt ausdrücken:

$$\omega = \frac{d}{2x} \text{ (Näherung)}$$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

69

## Berechnung der Sehwinkelgrenze

- Mit Hilfe folgender drei Formeln kann die Sehwinkelgrenze berechnet werden:

$$\Phi = \frac{\delta}{x}$$

$$\delta = 0,61 \cdot \frac{\lambda}{n \cdot \sin(\omega)}$$

$$\omega = \frac{d}{2x}$$

$$\Phi = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{d} = 1,22 \cdot \frac{550 \text{ nm}}{5000000 \text{ nm}} \approx 0,5'$$

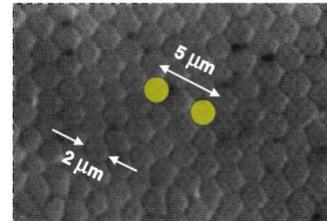
- Durch Einsetzen einer mittleren Wellenlänge ( $\lambda = 550 \text{ nm}$ ) und einem Pupillendurchmesser von  $d = 5 \text{ mm}$  erhält man eine Sehwinkelgrenze von  $\Phi = 0,5'$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

70

## Biologische Begrenzung

- Die Auflösung ist aufgrund des diskreten Rezeptorfeldes begrenzt
- Damit zwei Bildpunkte getrennt wahrgenommen werden können, müssen sie auf unterschiedlichen Rezeptoren, die zudem nicht direkt nebeneinander liegen, projiziert werden



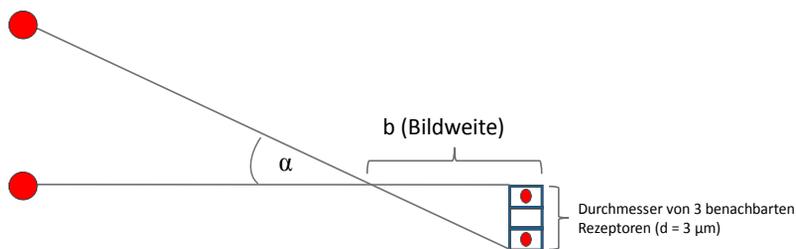
Gegenstandspunkte	Bildpunkte	Empfindung

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Bear, Mark F.; Connors, Edgar; Arndt, Andreas: Neuroanatomie. Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie. 3. Aufl., Heidelberg: Spektrum Akadem. Verl.

71

## Berechnung der biologischen Sehwinkelgrenze



$$\alpha = \frac{d \text{ (Durchmesser der 3 Rezeptoren)}}{b \text{ (Bildweite)}} = \frac{3 \mu\text{m}}{17000 \mu\text{m}} = 0,6'$$

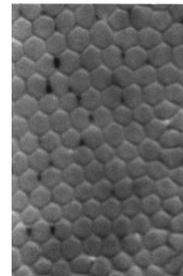
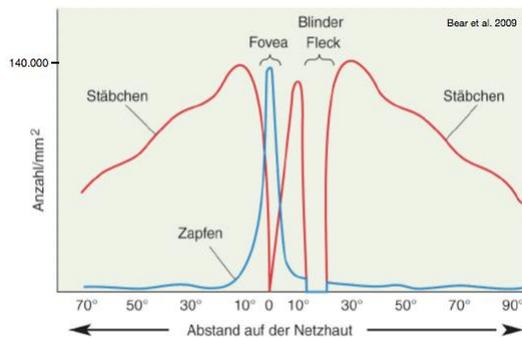
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (November 2014)

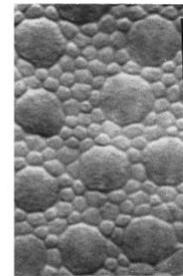
72

## Biologische Sehwinkelgrenze

- Der errechnete Wert gilt an dem gelben Fleck (Stelle mit der höchsten Rezeptordichte)
- Am Rand des gelben Flecks nimmt die Rezeptordichte wieder ab



Fovea



Peripherie

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Bear, Mark F., Connors, Edgar C., Held, Andreas: Neurowissenschaften. Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie. 3. Aufl., Heidelberg: Spektrum Akadem. Verl., 2007.

73

## (IV) Wechselwirkungen des Lichts bis zum Augenfundus

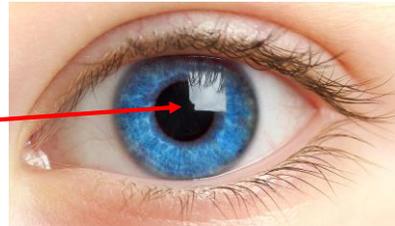
Karim Kouz

WS 2016/2017 1. Semester Biophysik

# Pupille

- Von der Iris umgebene Öffnung
- Nur durch diese Öffnung gelangt Licht in das Auge
- Durch Verkleinern (**Miosis**) und Vergrößern (**Mydriasis**) wird der Lichteinfall auf die Retina angepasst (mittels Irismuskulatur)
- Der Vorgang der Regelung wird Adaptation genannt

Pupille



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Verändert nach: <http://www.natol.com.ua>

75

# Adaptation

- Die Querschnittsfläche der Pupille kann um bis zum 16-fachen verändert werden:

$$\frac{d_{max}}{d_{min}} = \frac{8 \text{ mm}}{2 \text{ mm}} = 4 \rightarrow \frac{A_{max}}{A_{min}} = 4^2 = 16$$

- Leistung, die die Retina erreicht:

$$P = E \cdot A$$

- Leistungsveränderung:

$$\frac{P_{max}}{P_{min}} = \frac{E \cdot A_{max}}{E \cdot A_{min}} = \frac{A_{max}}{A_{min}} = 16$$

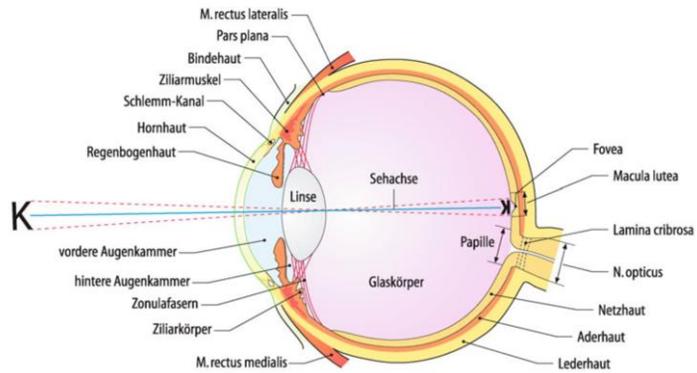
Veränderung der Leistung um mehr als eine Größenordnung.

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

76

## Weitere Lichtverluste beim Strahlengang

1. Reflexion
2. Absorption
3. Streuung



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Gern. Augenheilkunde, 31. Auflage, Springer-Verlag.

77

## Reflexion

- An jeder Grenzfläche, die das Licht passiert, findet Reflexion statt
- Größter Verlust ist an der Grenzfläche Luft-Hornhaut, da Brechzahl Differenz am größten ist:

$$\rho = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} \approx 2,4 \%$$

- Ca. 3 % Verlust ist eher als gering einzustufen
- In der Realität noch kleiner, da der Tränenfilm die Hornhaut benetzt ( $\rho \approx 2,1 \%$ )

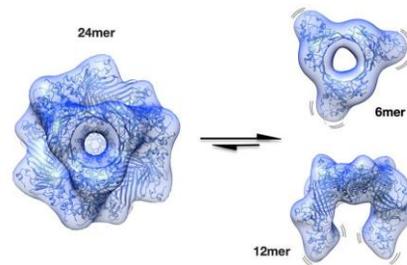
Lichtverlust durch Reflexion an allen Grenzschichten zusammen: 3 – 4 %.

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

78

# Streuung

- Streuung tritt in den Gebieten auf, in denen die Konzentration an gelösten Stoffen am größten ist: Linse ( $n = 1,42$  im Linsenkern)
- Protein-Konzentration ist hier fast 500 g/l, obwohl die Linse noch durchsichtig ist
- Möglich durch:
  - Spezielle Zellen, die wie Säckchen aufgebaut sind und Proteinlösung beinhalten
  - Proteine sind sogenannte Kristalline (größtenteils Alpha-Kristalline mit Chaperon-Funktion), die sehr kleine Aggregate bilden (ca. 20 nm)
  - Proteine tragen negative Oberflächenladung
  - Heat-shock-Proteine/Chaperone kommen ebenfalls vor



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <https://www.tum.de/de-sum/aktuelles/pressemitteilungen/kurzmitteilung/3113/>

79

# Grauer Star (Katarakt)

- Proteine werden einmalig in der Embryonalentwicklung angelegt und müssen ein Leben lang im gelösten Zustand gehalten werden
- Bestimmte Einflüsse können für eine Aggregation der Proteine in der Linse sorgen:
  - UV-Strahlung
  - Diabetes Mellitus
  - Cortison
  - Drogen
  - Trauma
  - Wärme
- Streuung nimmt durch wachsende Aggregate enorm zu, sodass kaum noch Licht in das Auge treten kann
- Physiologischer Weise und in frühen Stadien des Katarakts findet Rayleigh-Streuung, in späteren Stadien dann schließlich Mie-Streuung statt



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Grew, Augenheilkunde, 31. Auflage, Springer-Verlag.

80

## Grauer Star (Katarakt)



Wirklichkeitsgetreue Gegenüberstellung der Bildqualität vor und nach Kataraktoperation. Die Patientin hatte eine beidseitige kortisonbedingte Katarakt mit Visus bds. 0,2. Einen Tag nach der Operation des ersten Auges wurde ihr das unverfälschte (brillante) Bild (a) am noch nicht operierten Auge präsentiert und simultan dem operierten Auge dasselbe Bild angeboten, dessen Unschärfe, Farbverfälschung und Grauschleier sie mit dem operierten Auge so einstellen sollte, dass es mit der Bildwahrnehmung des noch nicht operierten Auges übereinstimmte. Dadurch lässt sich wirklichkeitsgetreu die Wahrnehmung mit dem noch nicht operierten Kataraktauge nachahmen (b)

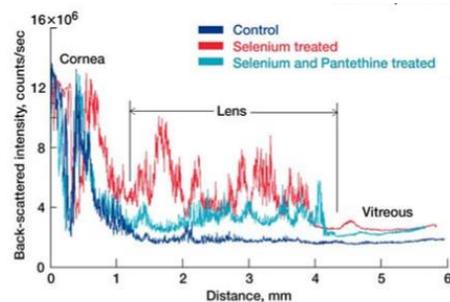
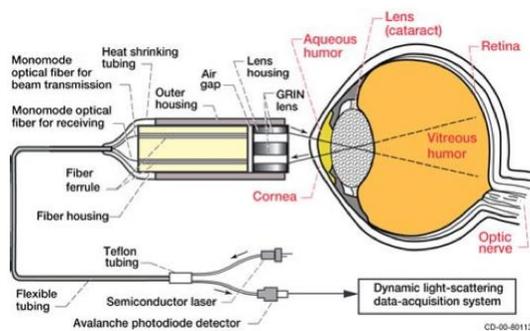
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Gem. Augenhelms, 31. Auflage, Springer-Verlag.

81

## Untersuchung der Kataraktentstehung

- Dynamische Lichtstreuungsmessung



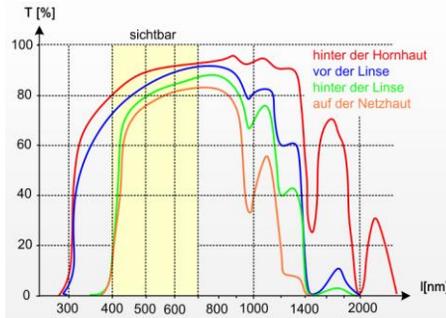
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik WS2016, Semmelweis Universität Budapest

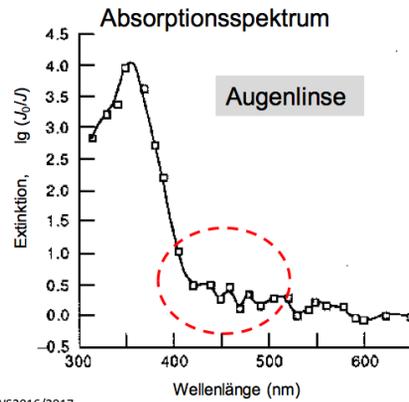
82

# Absorption und Transmission des Auges

- Hohe Transmission und niedrige Absorption des Lichts im sichtbaren Bereich
- Mittelmäßige Absorption im blauen/violetten Bereich – Verminderung der Auswirkungen der chromatischen Aberration



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

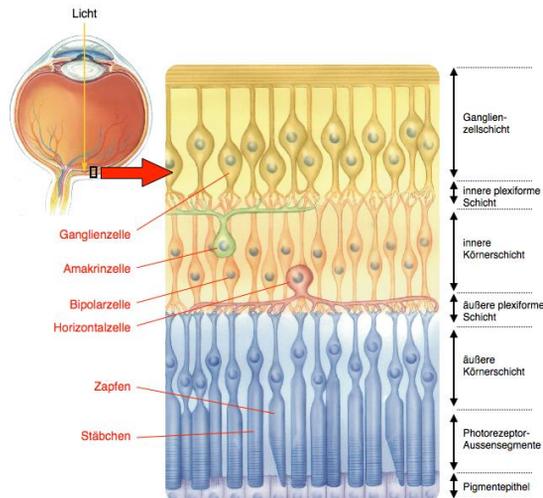


Quelle: <http://www.larckie-medical.de/Vorlesung%20WS2016.pdf>; Vorlesungstext Biophysik WS2016, Semesterversuch Universität Bayreuth

83

# Aufbau der Retina

- 3 Schichten:
  - Photorezeptoren
  - Bipolar-, Horizontal- und Amakrinzellen
  - Ganglienzellen
- Licht muss alle Schichten durchdringen, um zu den am weitesten außen liegenden Rezeptoren zu gelangen



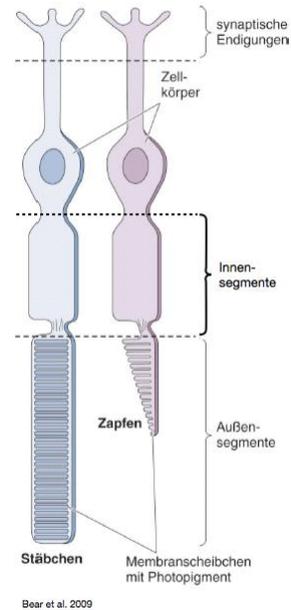
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Bear, Auk, F. Connors, Fagel, Andreas C. Held, Andreas Neurowissenschaften Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie, 3. Aufl., Heidelberg: Spektrum Akad. Verl.

84

# Rezeptoren der Netzhaut

- 2 Photorezeptortypen:
  - Stäbchen:
    - Nachtsehen/Dämmerungssehen
    - Sind bereits bei geringen Lichtintensitäten aktiv
    - Ermöglichen nur skotopisches Sehen (schwarz-weiß)
  - Zapfen:
    - Tagessehen
    - 3 Subtypen: S-, M- und L-Zapfen (blau, grün, gelb(grün))
    - Ermöglichen photopisches Sehen bei ausreichenden Lichtverhältnissen (Farb-Sehen)



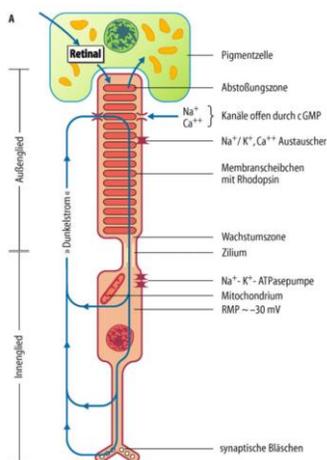
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Bear et al. 2009

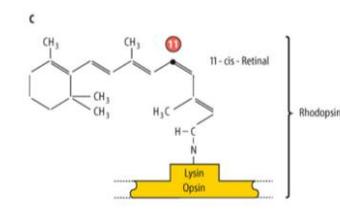
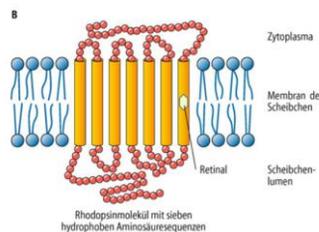
Quelle: Bear, Mark F., Connors, Leigh, Ardes, L., Hess, Andreas: Neuroanatomie. Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie. 3. Aufl., Heidelberg Spektrum Akadem. Verl.

85

# Absorption in der Retina



- Damit auf die Retina einfallendes Licht registriert werden kann, muss dieses vom 11-cis-Retinal absorbiert werden
- Bereits 1-2 Lichtphotonen bewirken dabei eine Änderung der Molekülstruktur des 11-cis-Retinals in das all-trans-Retinal
- Dies löst eine Signalkaskade aus, die letztendlich zu einem Aktionspotential führt



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Physiologie des Menschen, Schmidt, Lang, 31. Auflage, Springer Verlag

86

## „Technische“ Probleme des Auges

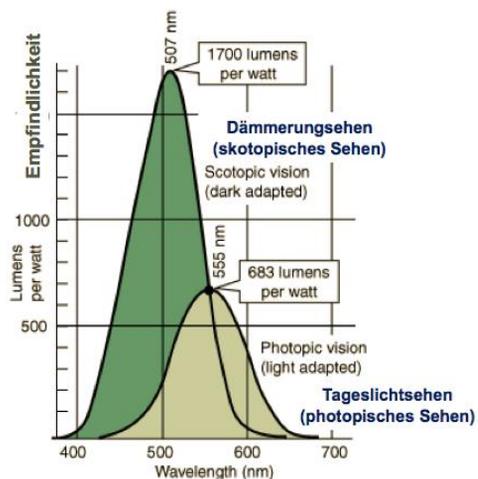
- Trotz völliger Dunkelheit kommen Reizsignale/Aktionspotenziale zustande
- Eine Konformationsänderung des 11-cis-Retinals ist z.B. auch durch thermische Einflüsse möglich (spielt beim Menschen mit nahezu konstanter Körpertemperatur eine nicht so große Rolle)
- Auch die Affinität des menschlichen Auges ist wellenlängenabhängig
- Am besten sieht das menschliche Auge bei einer Wellenlänge von **550 nm (gelb-grün)**, am schlechtesten bei 400 nm

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

87

## Spektrale Empfindlichkeit

- Stäbchen sind empfindlicher als Zapfen (Dämmerungssehen)
- Spektrale Verschiebung ist zu beobachten:
  - Im Dunklen kann man am besten im Bereich des blauen Lichtes sehen
  - Bei Tageslicht kann man am besten im gelb-grünen Bereich sehen



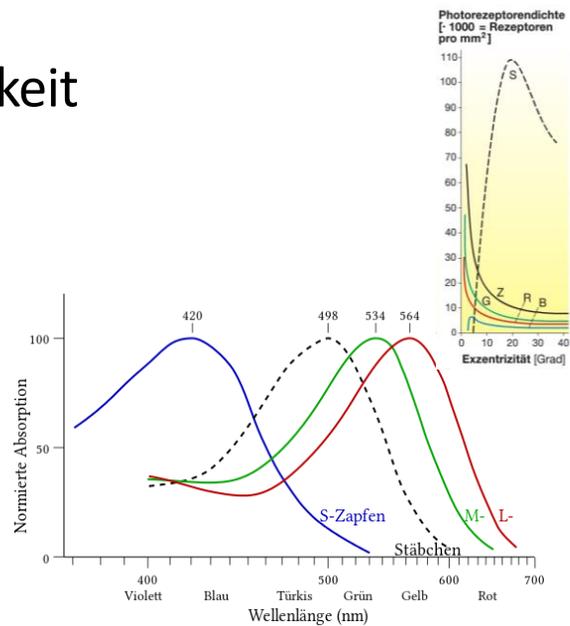
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik WS2014, Semmelweis Universität Budapest.

88

# Spektrale Empfindlichkeit

- Die drei Zapfentypen haben unterschiedliche Empfindlichkeiten (hier normiert) bei unterschiedlichen Wellenlängen
- Blaue Zapfen kommen prozentual wenig vor
- Die Summe der drei Kurven ergibt die Empfindlichkeitskurve der Zapfen
- Für Stäbchen ist ein Unterschied bei der Wellenlänge bei maximaler Empfindlichkeit zu verzeichnen – dies liegt daran, dass die 498 nm für Rhodopsin in einer Rhodopsin-Lösung, also nicht in einem physiologischen Milieu gelten



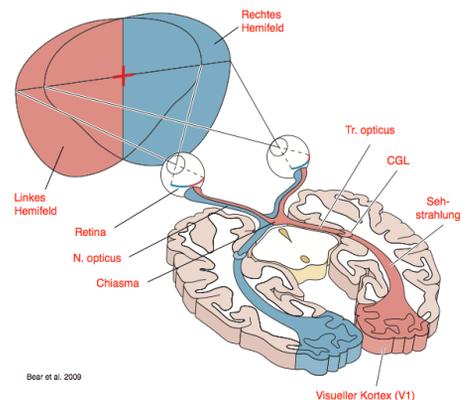
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Spekmann, Psychologie 6. Auflage, München: Elsevier, Urban & Fischer; [https://de.wikipedia.org/wiki/Zapfen\\_\(Augen\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Zapfen_(Augen))

89

# Raumsehen

- Die beiden Augen nehmen unterschiedliche Informationen wahr
- Fasern aus der nasalen Retinahälfte von beiden Augen kreuzen im Chiasma
- Durch Kreuzung der Fasern werden Informationen von sich entsprechenden Stellen des linken und rechten Auges zusammengebracht – Stereosehen



Bear et al. 2009

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Bear, Mals, F. Connors, Fegert, Andreas K., Hied, Andreas Neurowissenschaften Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie, 3. Aufl., Heidelberg: Spektrum Akad. Verl.

90