

Medizinische Biophysik

10. Vorlesung
2016. 11. 07.

Licht in der Medizin

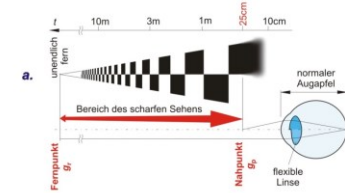
VIII. Das Auge und das Sehen

1. Entwicklung des Sehorgans
2. Aufbau des menschlichen Auges
3. Optik des menschlichen Auges
 - a) Brechkraft des Auges
 - b) Akkomodation (Brechkraftänderung)
 - c) Augenfehler (Myopie, Hyperopie, Presbyopie, sphärische und chromatische Aberration)
 - d) Bildentstehung im Auge (reduziertes Auge)
 - e) (räumliche) Auflösung des Auges
4. Wechselwirkungen des Lichts bis zum Augenfundus
 - Adaptation
 - Reflexion
 - Streuung (Graustar)
 - Absorption
5. Absorption in den Rezeptorzellen der Netzhaut - Empfindlichkeit
6. Spektrale Empfindlichkeit des Auges - Farbsehen
7. Raumsehen

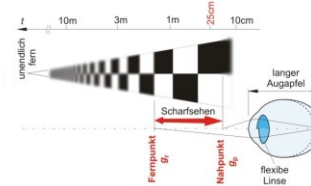
1

c) Augenfehler :

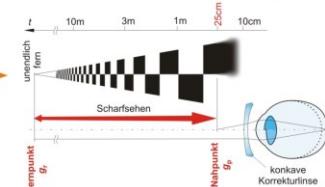
NORMALSICHTIGES AUGE (Emmetropie)



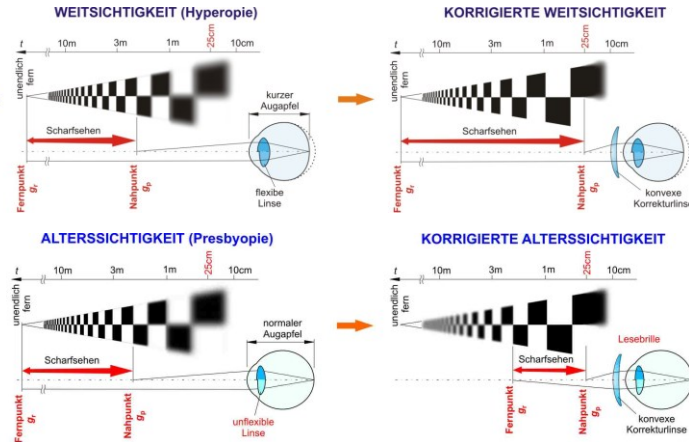
KURZSICHTIGKEIT (Myopie)



KORRIGIERTE KURZSICHTIGKEIT

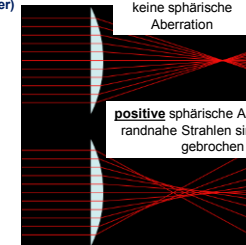


2



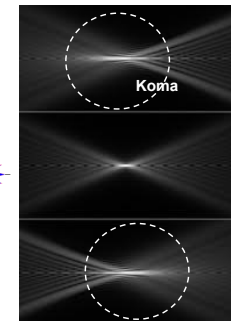
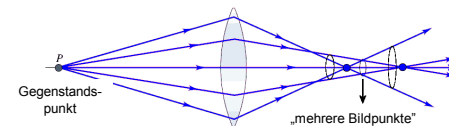
3

Sphärische Aberration (Öffnungsfehler)

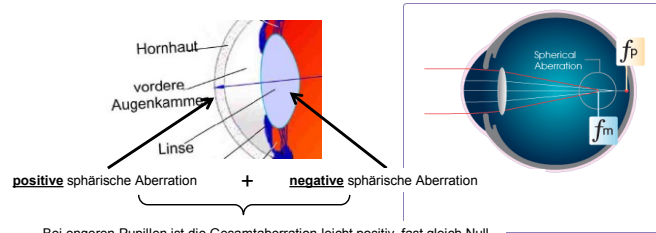


positive sphärische Aberration =
randnahe Strahlen sind **stärker**
gebrochen

negative sphärische Aberration =
randnahe Strahlen sind **weniger**
gebrochen



4



Bei engeren Pupillen ist die Gesamtaberration leicht positiv, fast gleich Null.

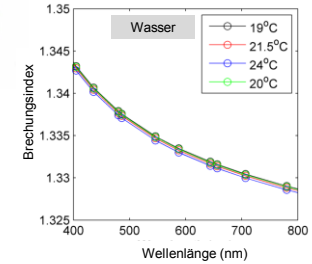
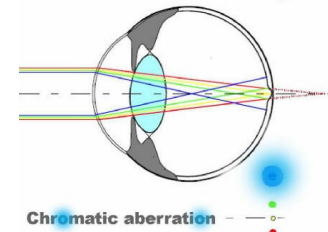
Bei weiten Pupillen ist die Gesamtaberration stärker positiv.

Nachtmyopie (Nachtkurzsichtigkeit)



5

Chromatische Aberration (Farbfehler)

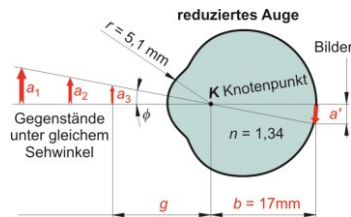
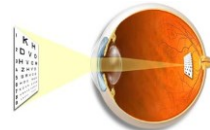


Wie viel Dioptrie ist die Brechkraftdifferenz zwischen Blau und Rot?
(s. übernächste Dia)

6

d) Bildentstehung im Auge

- Reduziertes Auge



> Brechkraft des reduzierten Auges:

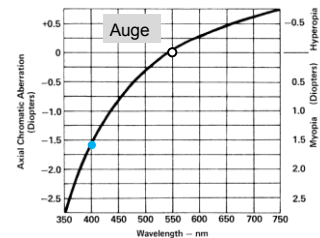
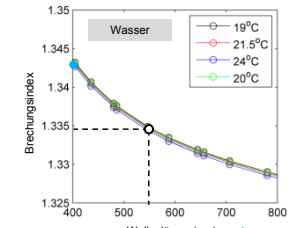
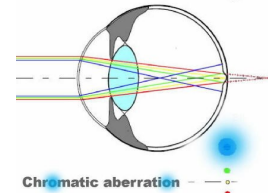
$$D = \frac{n_2 - n_1}{r} = \frac{1.34 - 1}{0.0051} = 66.7 \text{ dpt}$$

> Bild: — verkleinert (a')
— reell
— umgekehrt

Sehwinkel ϕ : $\phi \text{ (rad)} = \frac{a}{g} = \frac{a'}{17 \text{ mm}}$

7

Chromatische Aberration (Fortsetzung)



$D_{550 \text{ nm}} = \frac{1.5343 - 1}{0.0051} = 651.6 \text{ dpt}$

$D_{400 \text{ nm}} = \frac{1.373 - 1}{0.0051} = 67.3 \text{ dpt}$

8

e) (räumliche) Auflösung des Auges

Sehwinkelgrenze (α):

Der minimale Sehwinkel unter welchem man zwei Gegenstandspunkte noch gerade getrennt sieht.

Referenzwert der Sehwinkelgrenze: $1'$ (1 Winkelminute)

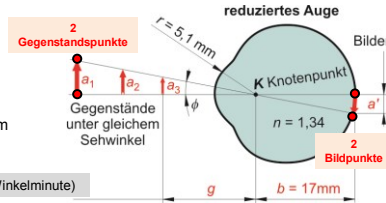
$$\text{Auflösungsvermögen} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{1}{r} \right)$$

Referenzwert des Auflösungsvermögens: $= \frac{1}{1'}$

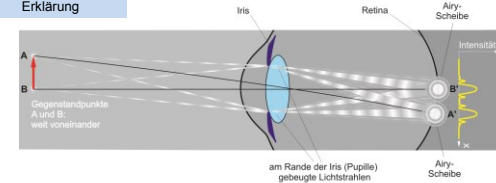
$$\text{Sehschärfe (Visus)} = \frac{\text{Auflösungsvermögen des Patienten}}{\text{Referenzwert des Auflösungsvermögens}} = \frac{\frac{1}{\alpha(\cdot)}}{\frac{1}{1'}} = \frac{1'}{\alpha(\cdot)} (\cdot 100\%)$$

Erklärung:

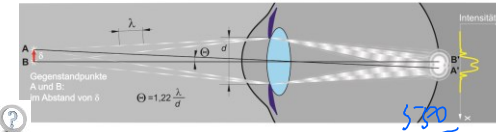
- > physikalisch
- > biologisch



Physikalische Erklärung

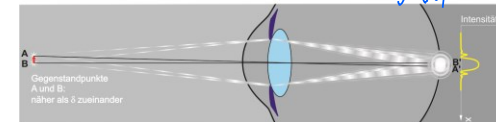


Seien A und B weit voneinander, so sind die Airy-Scheiben A' und B' voneinander getrennt.



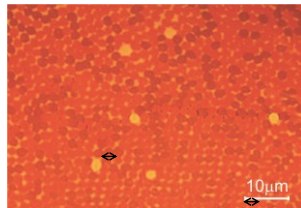
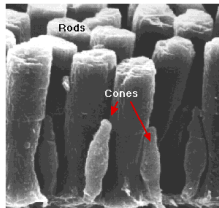
Seien A und B im kritischen Abstand voneinander, überlappen die Airy-Scheiben einander, aber sie sind zu unterscheiden.
 δ minimale aufgelöste Entfernung
 Θ Sehwinkelgrenze infolge Lichtbeugung.

Sehwinkelgrenze infolge Lichtbeugung (Θ): $= 1,22 \frac{580}{500000} = 0,15$



Sei der Abstand zwischen A und B kleiner als δ , bilden zwei Airy-Scheiben eine Bläuse.
Das Bild von zwei Gegenstandspunkten ist nicht aufzulösen.

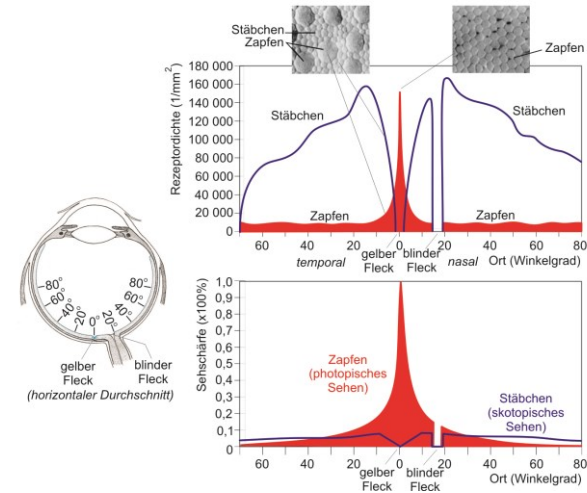
Biologische Erklärung



Gegenstandspunkte	Bildpunkte	Empfindung

Sehwinkelgrenze infolge Rezeptordichte (α):

$$\alpha = \frac{3 \mu m}{17000 \mu m} = 0,175'$$



3. Wechselwirkungen des Lichts bis zum Augenfundus → Lichtmenge auf der Retina!

Adaptation

Wir wird die eingelassene Lichtleistung reguliert?

$$\frac{P_{\max}}{P_{\min}} = \frac{E \cdot A_{\max}}{E \cdot A_{\min}} = \frac{r_{\max}^2 \cdot \pi}{r_{\min}^2 \cdot \pi} = \left(\frac{r_{\max}}{r_{\min}}\right)^2 = 4^2 = 16$$



Reflexionen in dem Auge

An welcher Grenzfläche ist die Reflexion am stärksten und wie groß ist ρ ?

$$\rho = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}\right)^2 = \left(\frac{1,37 - 1}{2,37}\right)^2 = 0,02 = 2\%$$

Brechzahlwerte:
Luft (1,00)
Hornhaut (1,37)
Kammerwasser (1,33)
Linse (1,41)
Glaskörper (1,34)

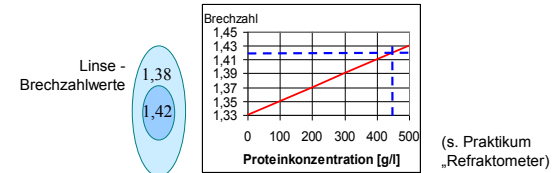
13

Streuung in dem Auge

Wo ist die Brechzahl am höchsten?
Wie wird diese hohe Brechzahl erreicht?

Linse
hohe Konzentration von Proteinen

Brechzahlwerte:
Luft (1,00)
Hornhaut (1,37)
Kammerwasser (1,33)
Linse (1,41)
Glaskörper (1,34)

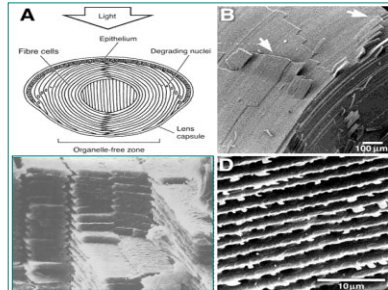


400-500 g/l !!!

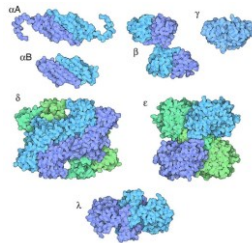
Wie wird die Linse trotz dieser hohen Proteinkonzentration durchsichtig sein?

14

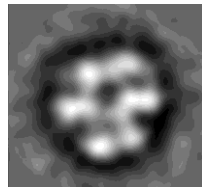
Aufbau der Linse:



Spezielle Linsenproteine: Kristalline



Alpha-Kristallin
--- hat den größten Anteil
--- besitzt eine Chaperone-Funktion



(elektronenmikroskopische Aufnahme von Alpha-Kristallin)

15

Und wenn die Linsenproteine doch koagulieren und sich ausscheiden würden?

Rayleigh-Streu $\sigma \sim \frac{d^6}{\lambda^4}$
Linse - Graustar



Sicht ohne Linsentrübung (Computersimulation).



Sicht mit Linsentrübung (Computersimulation).



Dies ist ein Textbeispiel

Wie man sieht, ist die Schriftgröße ein wichtiges und entscheidendes Kriterium, wenn es um die Erkennbarkeit bzw. Lesbarkeit von Text bei verschiedenen Sehhindernissen geht.

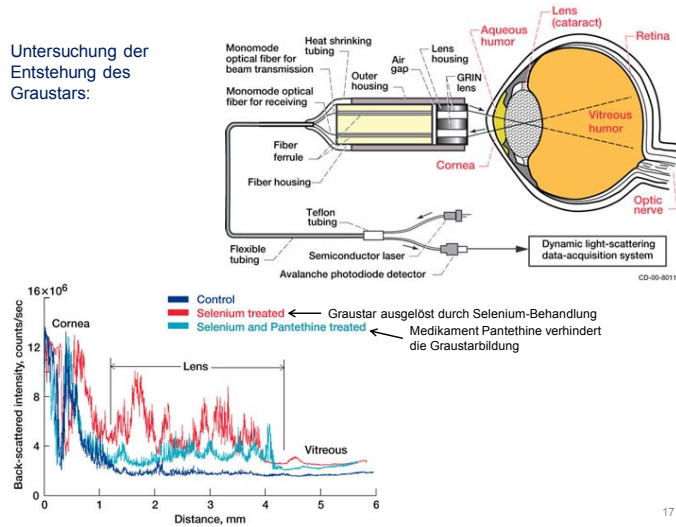


Dies ist ein Textbeispiel

Wie man sieht, ist die Schriftgröße ein wichtiges und entscheidendes Kriterium, wenn es um die Erkennbarkeit bzw. Lesbarkeit von Text bei verschiedenen Sehhindernissen geht.

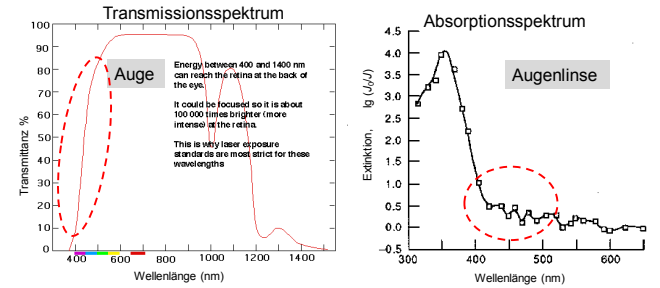
16

Untersuchung der Entstehung des Graustars:



17

Absorption in dem Auge

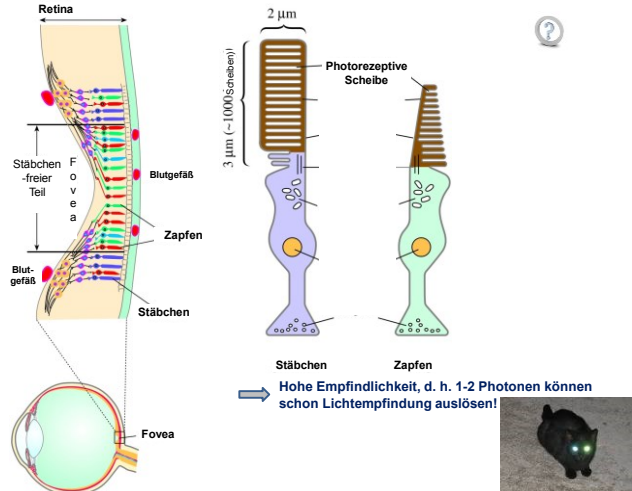


→ keine starke Absorption in dem sichtbaren Bereich

→ mittelmäßige Absorption in dem blauen/violetten Bereich → Verminderung der Auswirkungen der chromatischen Aberration

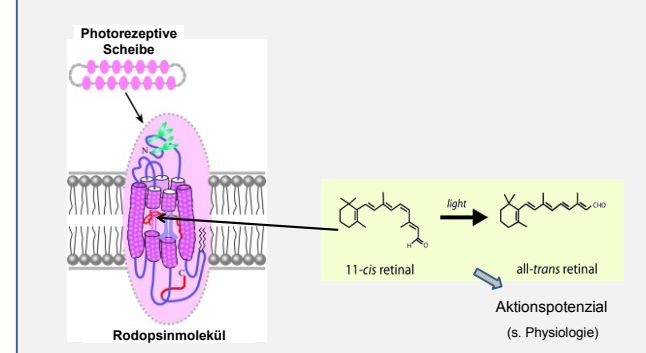
18

4. Absorption in den Rezeptorzellen der Netzhaut - Empfindlichkeit



19

Was folgt auf die Absorption?



20

„Technische Probleme“ im Auge
(ähnlich zu den Problemen in technischen Lichtdetektoren):

- Dunkelstrom/Rauschen

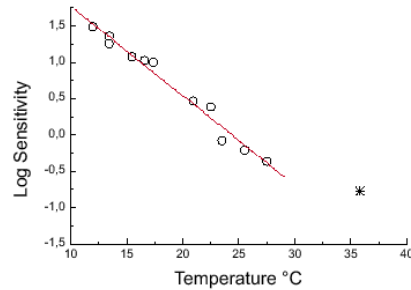
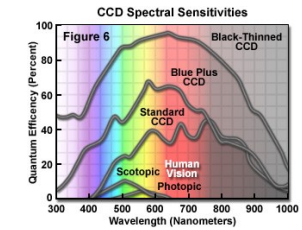


Figure 1. Dark adapted scotopic sensitivity in two frog species (○) and humans (□) as a function of temperature. Ordinate, log sensitivity = -log threshold (threshold intensity at cornea (quanta $\text{mm}^{-2}\text{s}^{-1}$). Modified from Aho *et al.* (1993b) and Donner (1998).

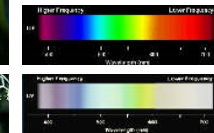
21

„Technische Probleme“ im Auge
(ähnlich zu den Problemen in technischen Lichtdetektoren):

- Effizienzkurve
(Empfindlichkeitskurve)



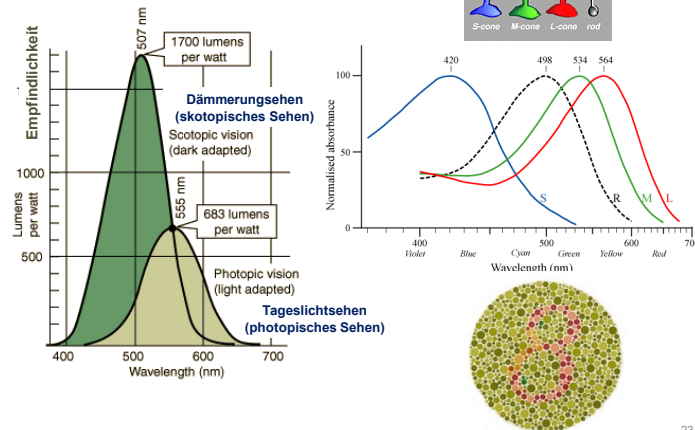
Mensch



Katze

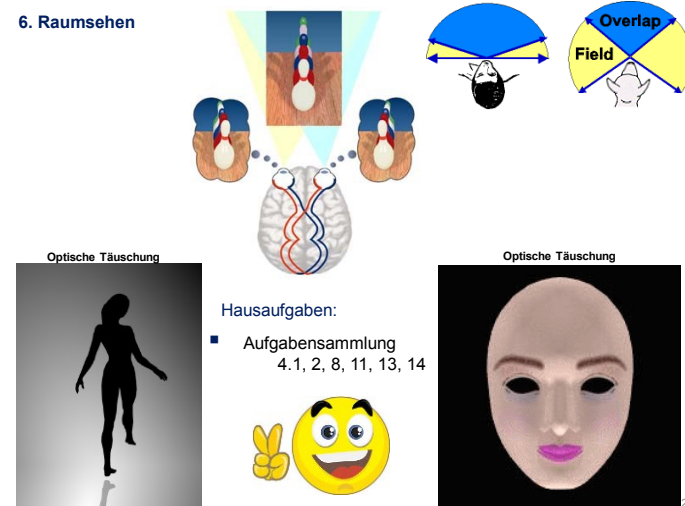
22

5. Spektrale Empfindlichkeit des Auges - Farbsehen



23

6. Raumsehen



24