

5) Das Auge

5.1 Aufbau und Übersicht

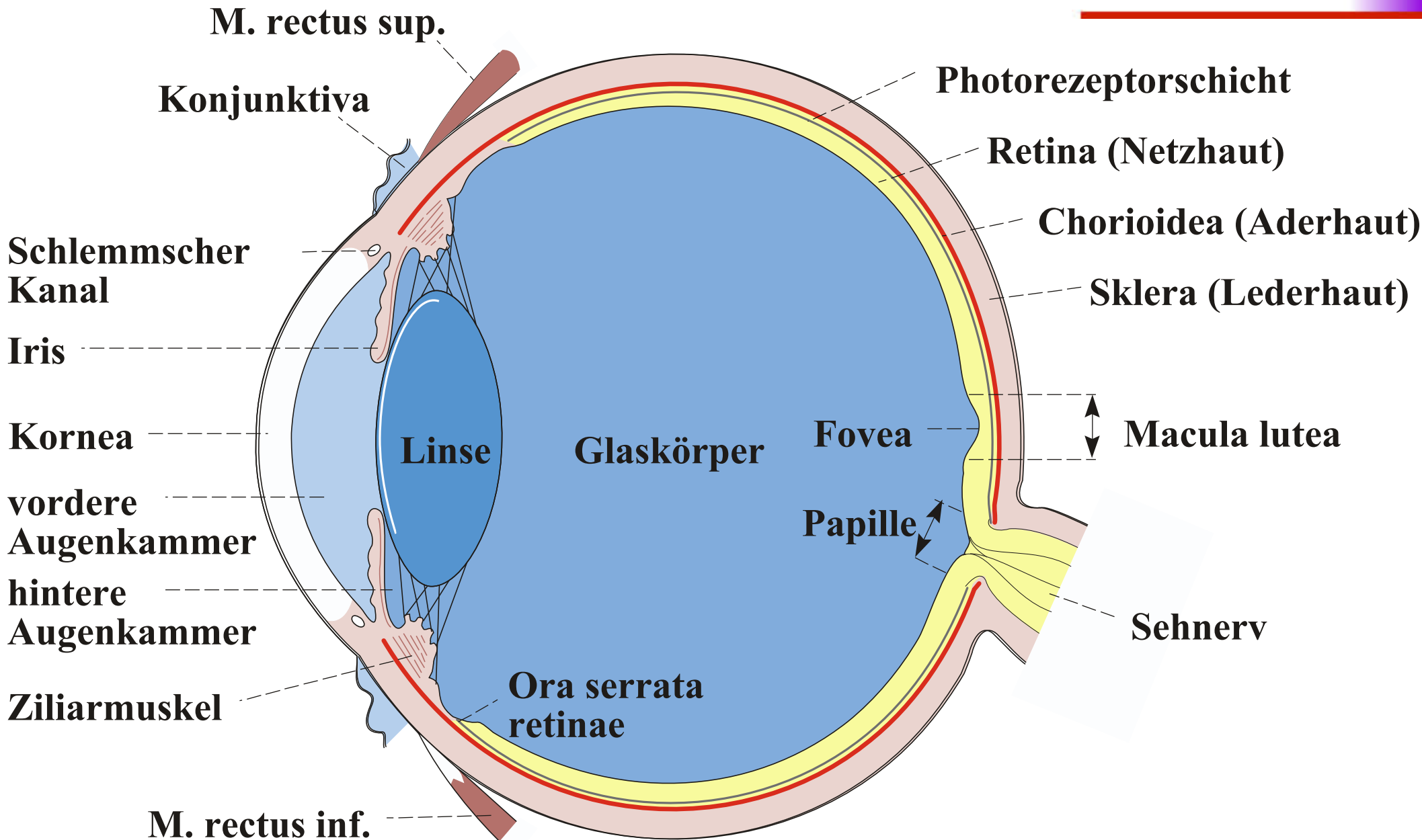
5.2 Geometrische Optik

5.3 Bildentstehung

5.4 Signalverarbeitung

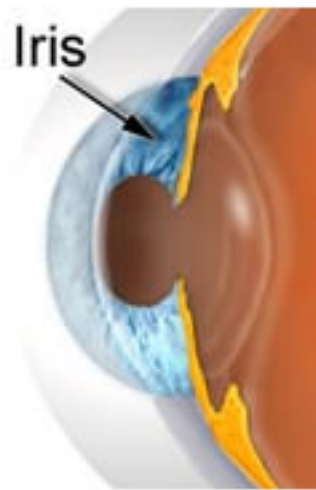


Aufbau

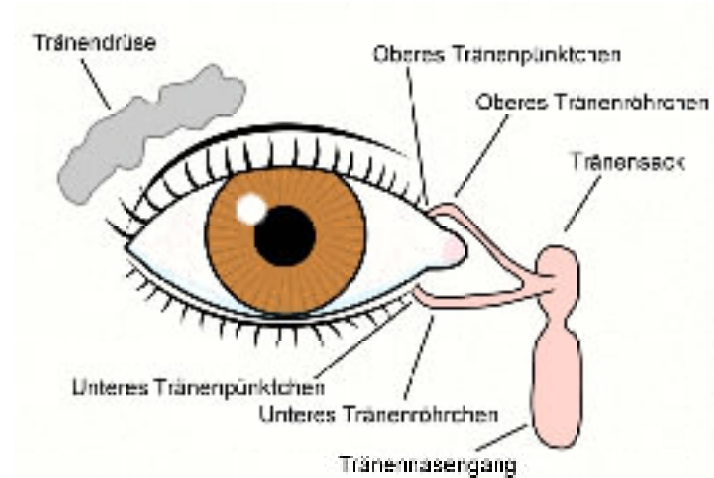


Aufbau

**Eigentliches Sehorgan:
Augapfel mit Sehnerv;**



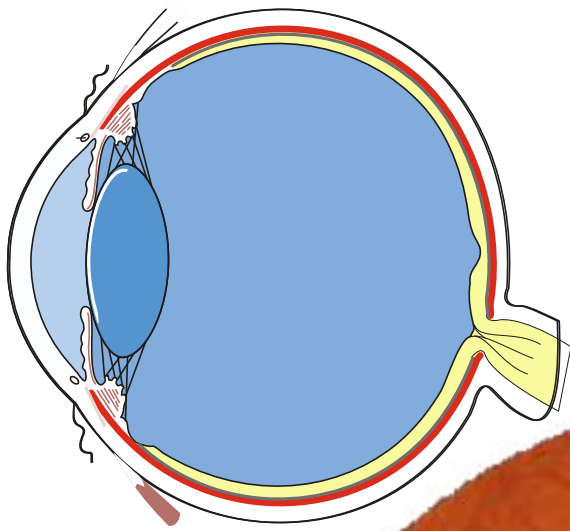
**Glaskörper
Augeninnendruck 2-3 kPa**



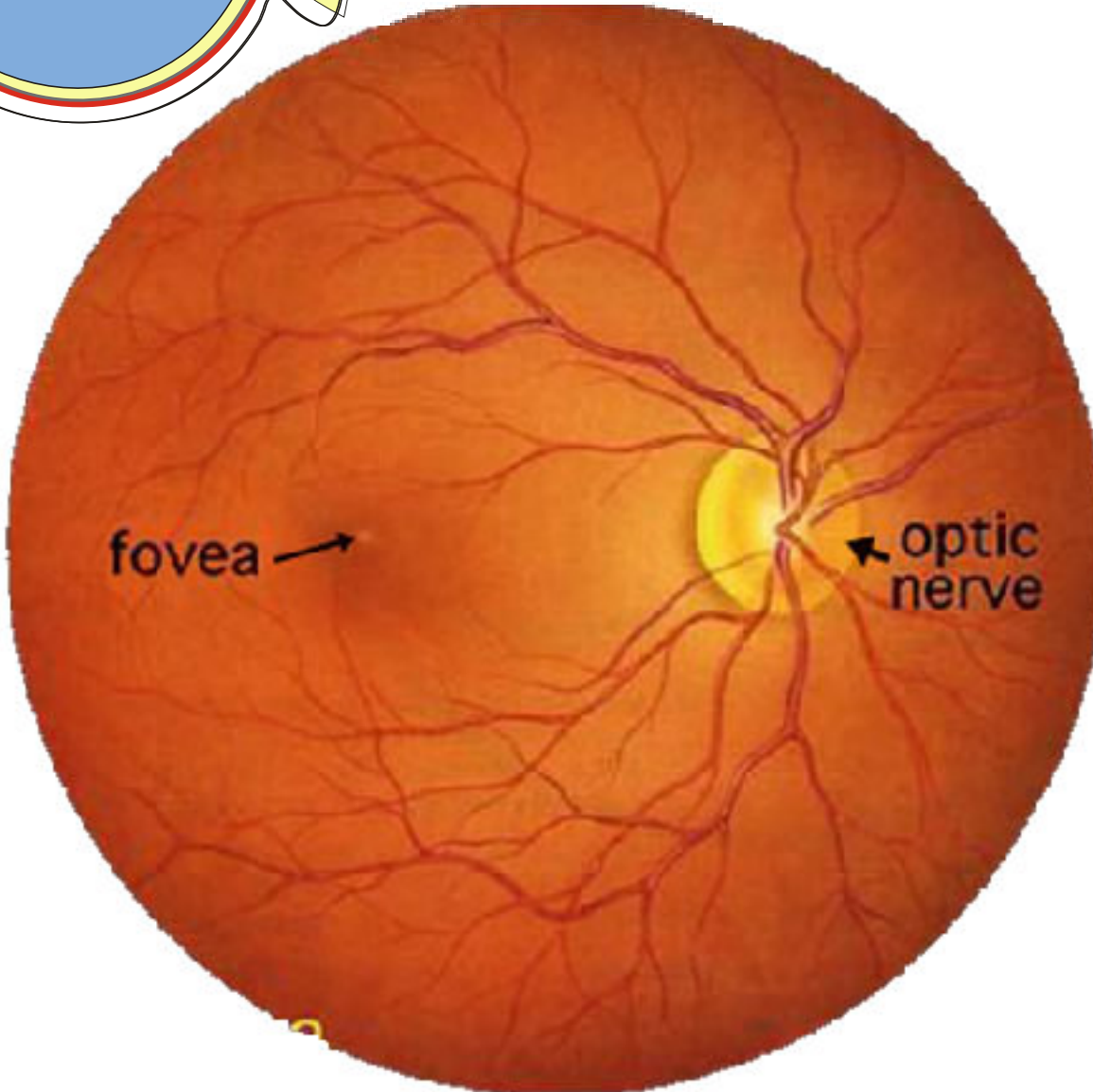
**Hilfseinrichtungen wie
Augenlider, Tränenapparat,
äußere Augenmuskeln**

**Netzhaut:
Umwandlung Licht -> elektrische Impulse**

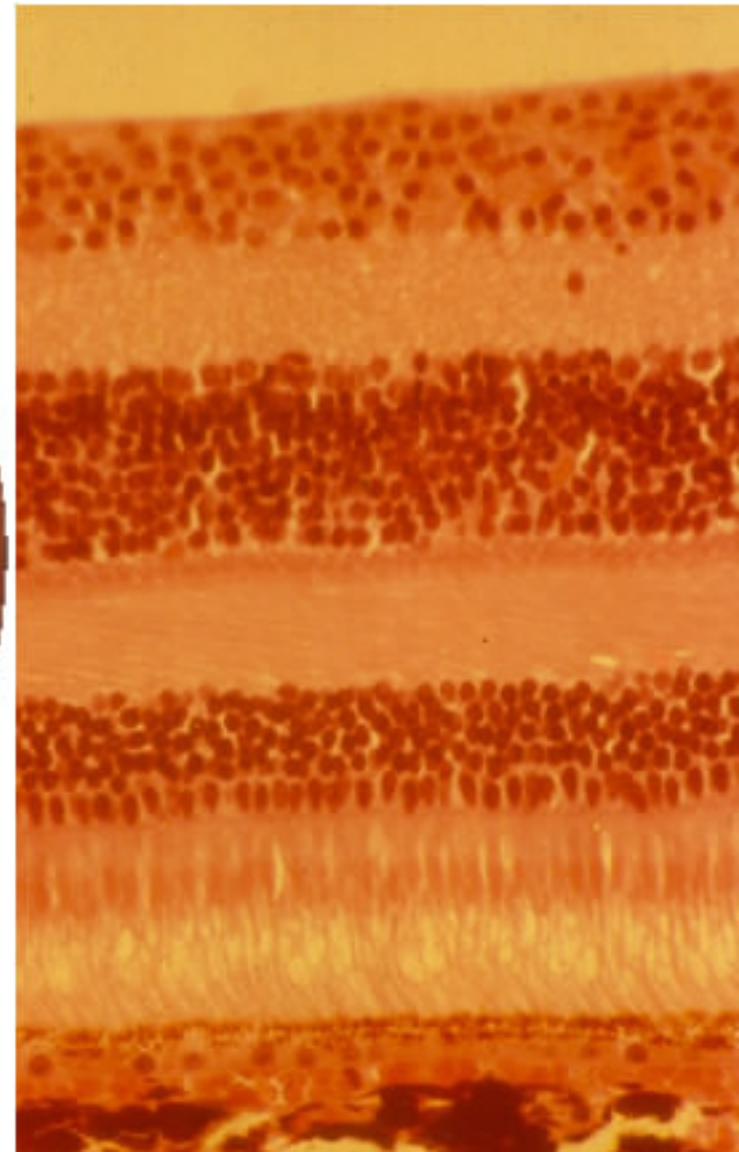
Netzhaut (Retina)



**Menschliche Retina
durch Ophthalmoskop**

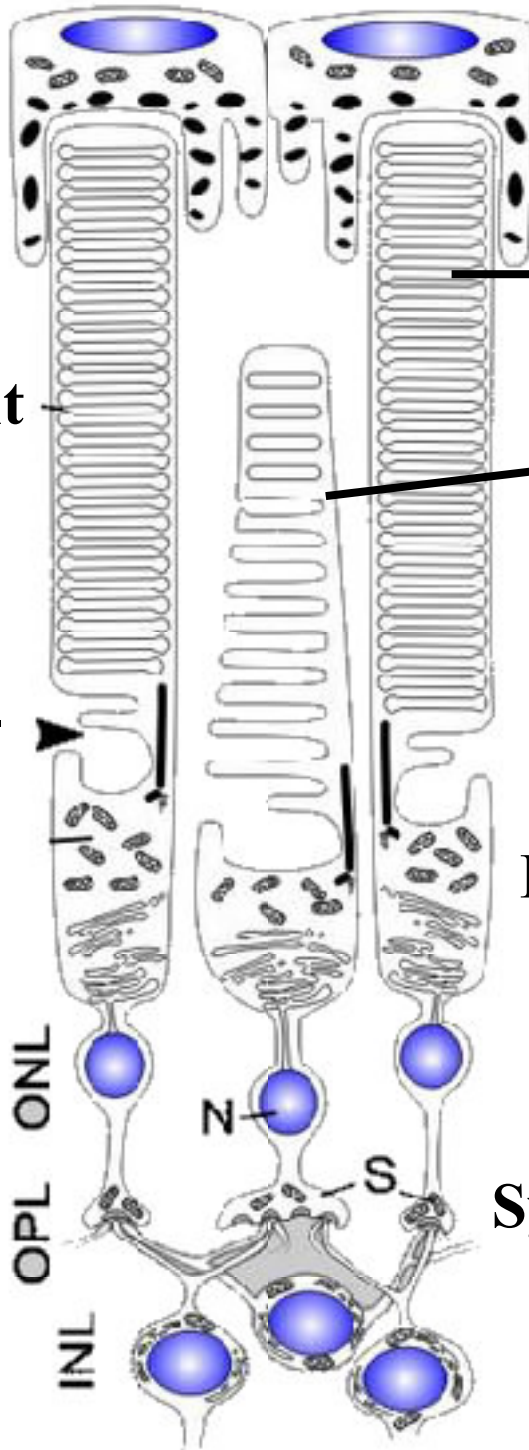


Querschnitt



Sehzellen

retinales
Pigmentepithel



Außensegment

Verbindungs-
cilium

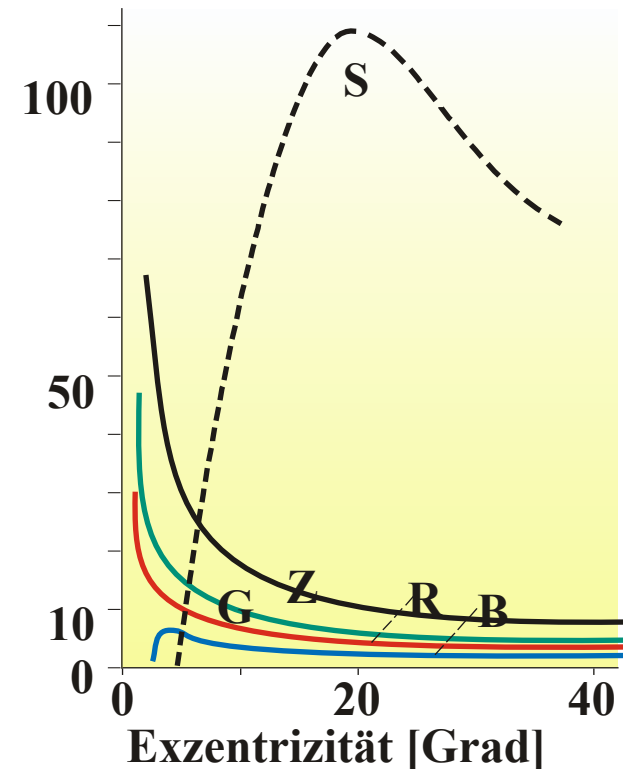
Inneres Segment

Synapsen

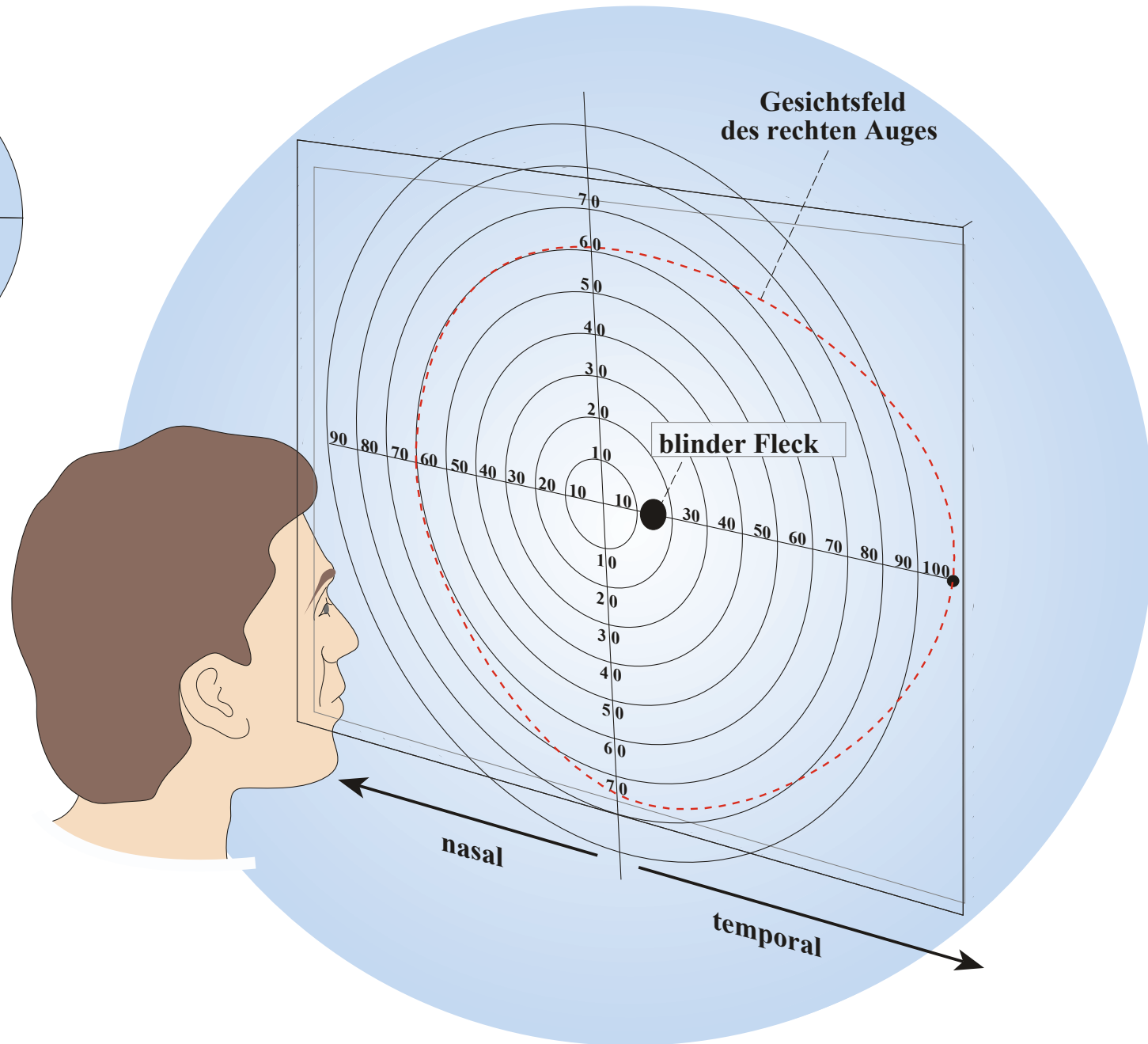
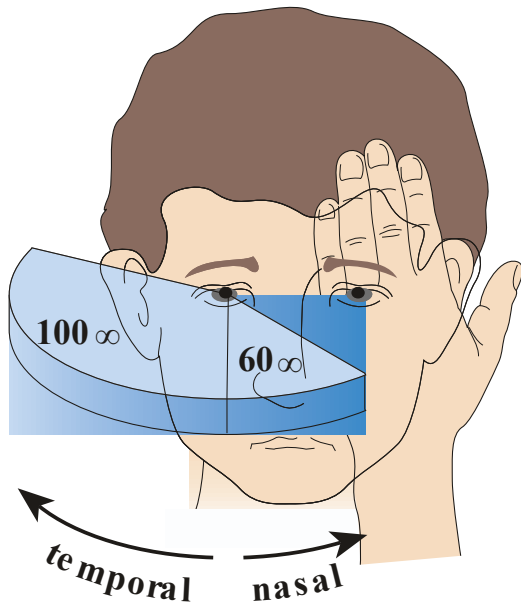
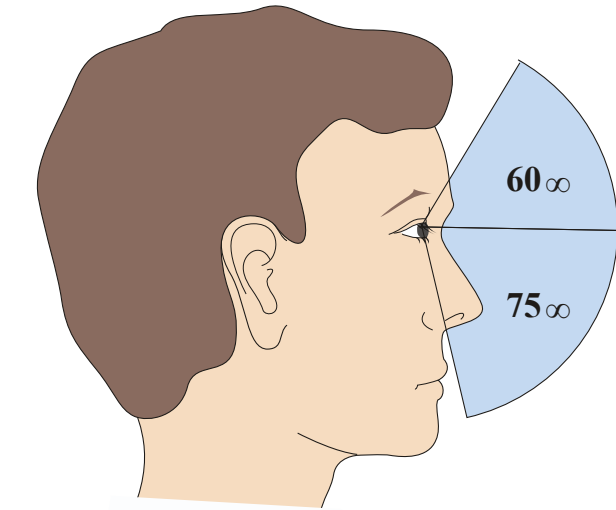
Stäbchen : Hell/Dunkel
ca. 110 Mio

Zapfen: Farbsehen
ca. 6 Mio, v.a. im gelben Fleck

Photorezeptorendichte
· [1000 = Rezeptoren pro mm²]



Gesichtsfeld



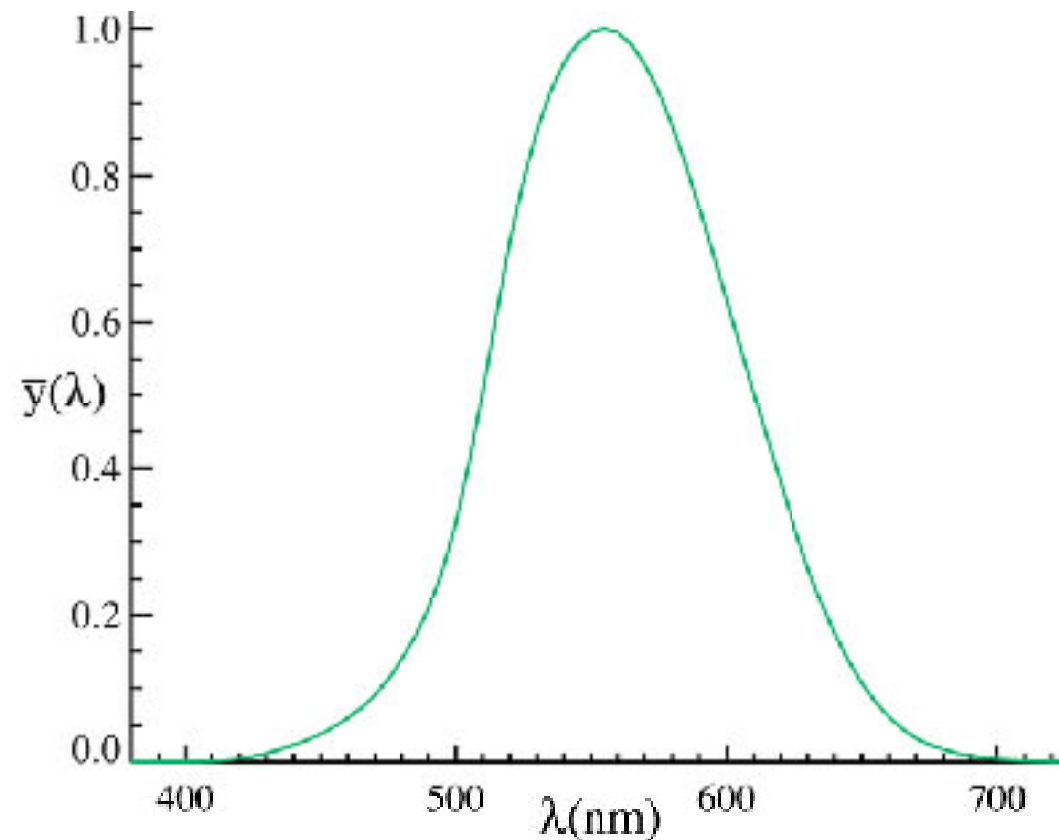
Lichttechnische Größen

physikalische Größe	physikalische Einheit	Physiologische Größe	Physiologische Einheit
Strahlungsleistung	W	Lichtstrom	Lumen (lm)
Strahlungsstärke	$W/srad$	Lichtstärke	$1lm/srad = 1Candela (cd)$
Bestrahlungsstärke	W/cm^2	Beleuchtungsstärke	$lm/m^2 = Lux$
Êmissionsdichte	$W/srad cm^2$	Leuchtdichte	cd/m^2

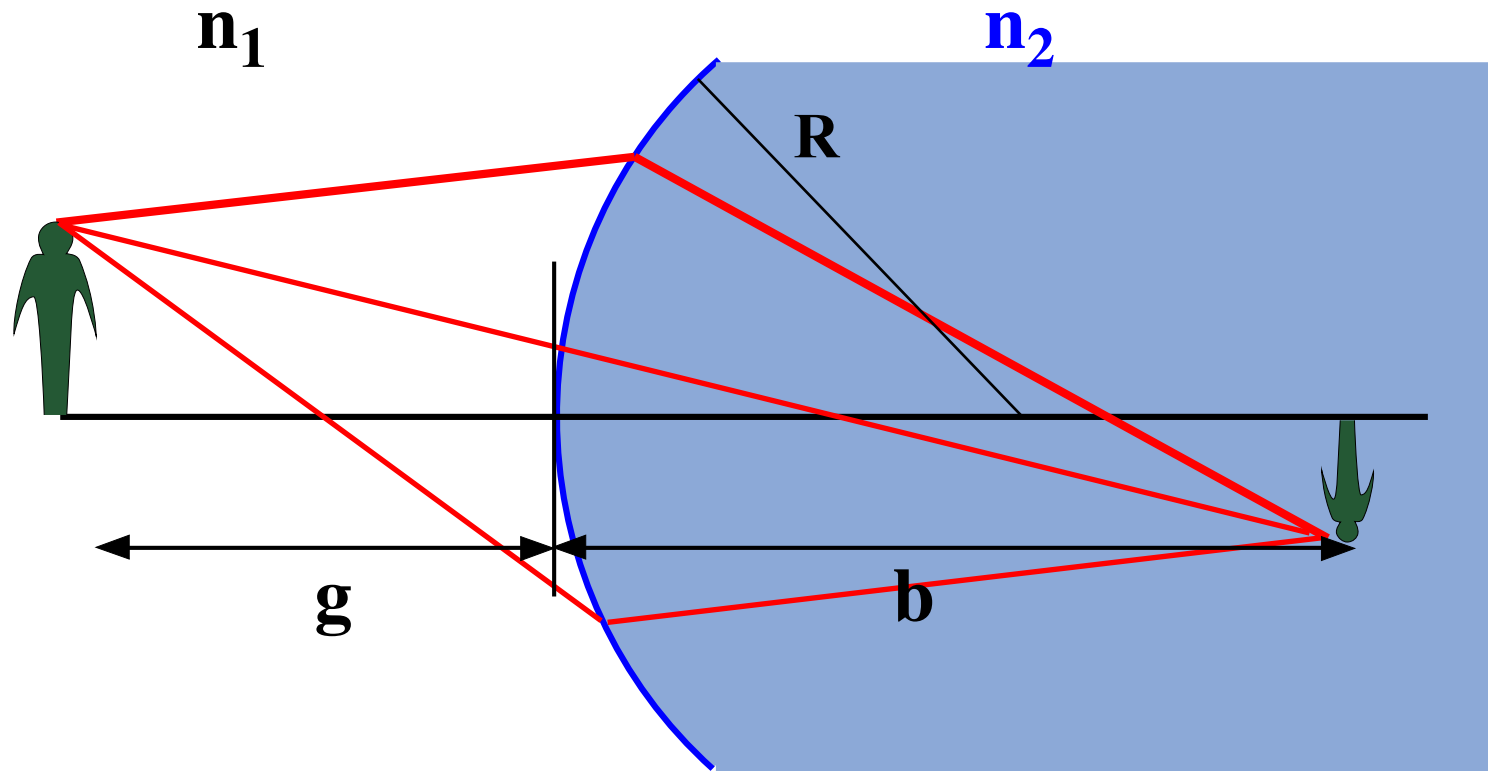
Umrechnung:

bei 555 nm: $1W = 683 lm$.

Standard Wellenlängenabhängigkeit

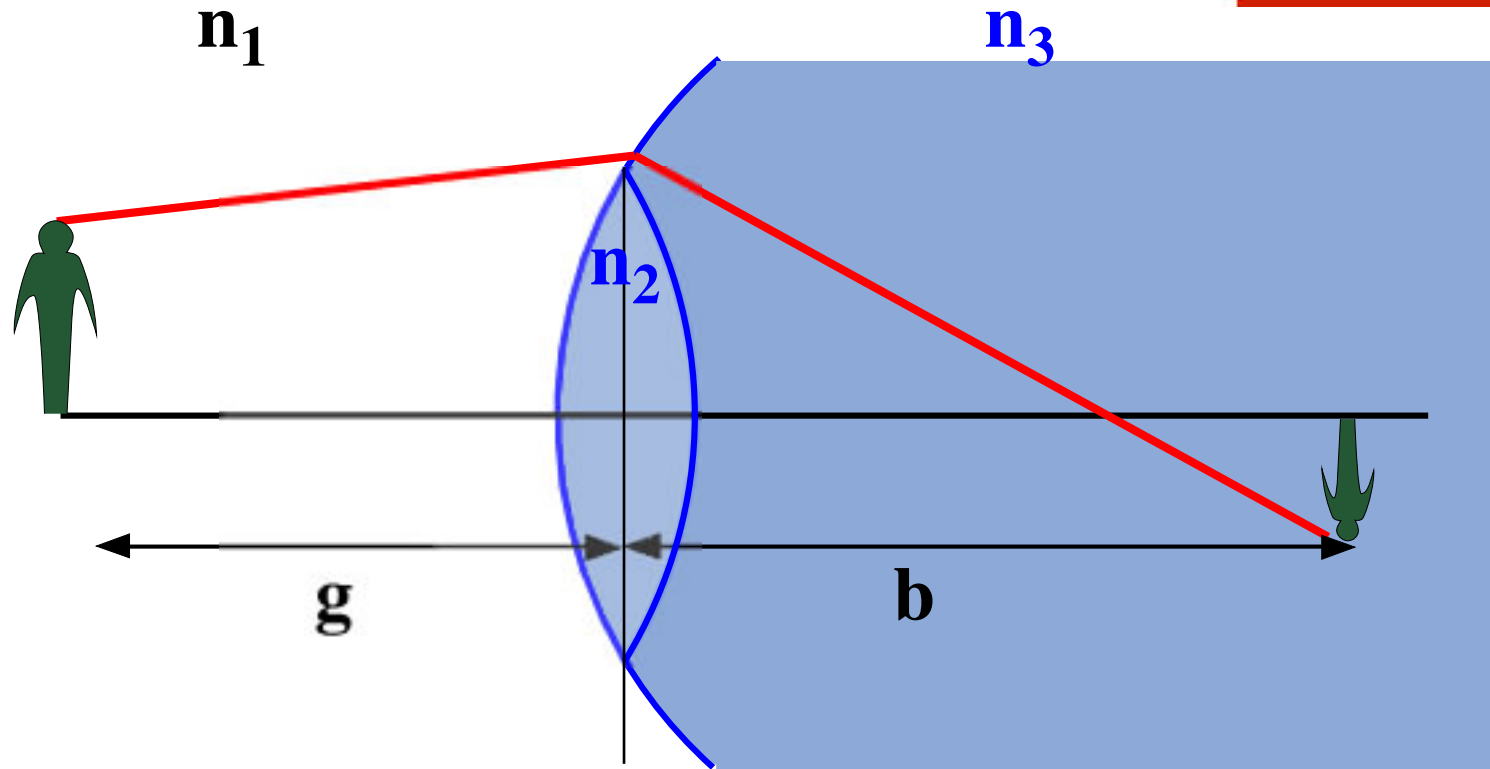


Brechung an sphärischer Oberfläche



$$\frac{n_1}{g} + \frac{n_2}{b} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

Abbildung



Abbildungsformel:

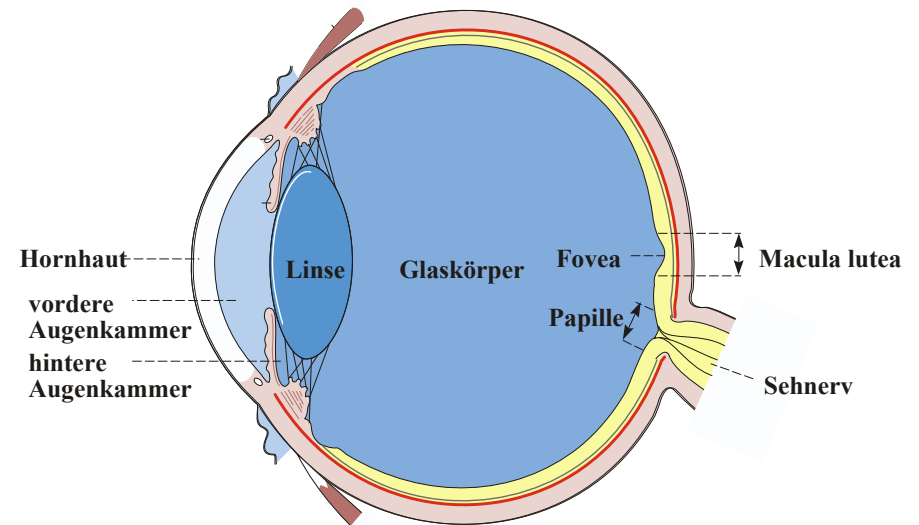
$$\frac{n_1}{g} + \frac{n_3}{b} = \frac{n_2 - n_1}{r_1} + \frac{n_3 - n_2}{r_2}$$

Brechkraft : $\frac{\Delta n}{r}$

Einheit : $\text{m}^{-1} = \text{Dioptrie}$

Optische Konstanten

Optische Konstanten des schematischen Auges Durchschnittswerte für erwachsene Europäer



Krümmungsradius [mm]

Vorderfläche der Hornhaut	7,72
Rückfläche der Hornhaut	6,5
Vorderfläche der Linse	10,2
Rückfläche der Linse	-6

Dicke [mm]

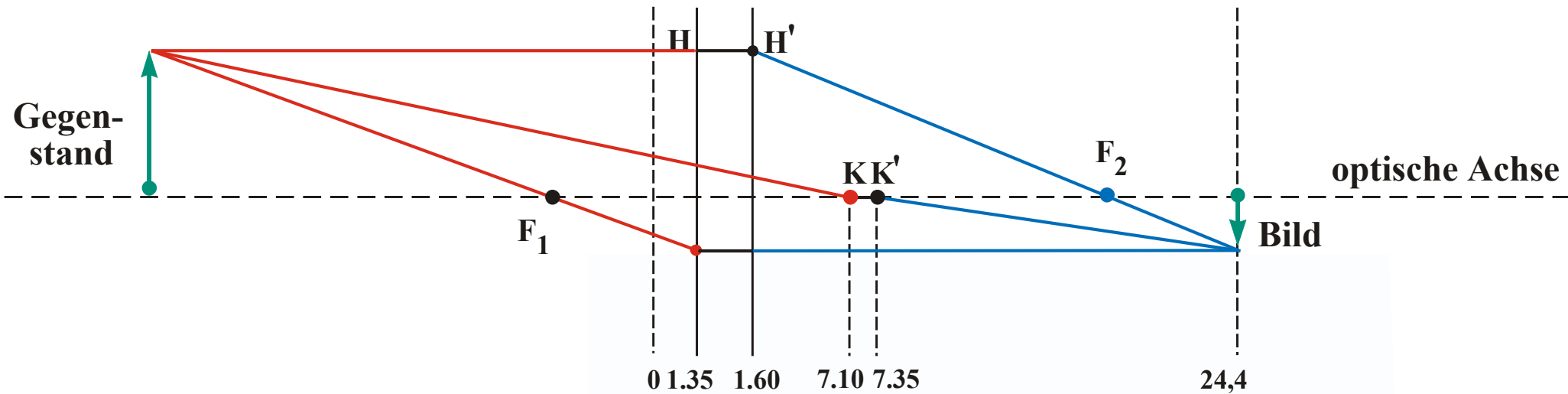
Hornhaut	0,55
vordere Augenkammer	3,05
Linse	4
Glaskörper	16,4

Brechungsindex

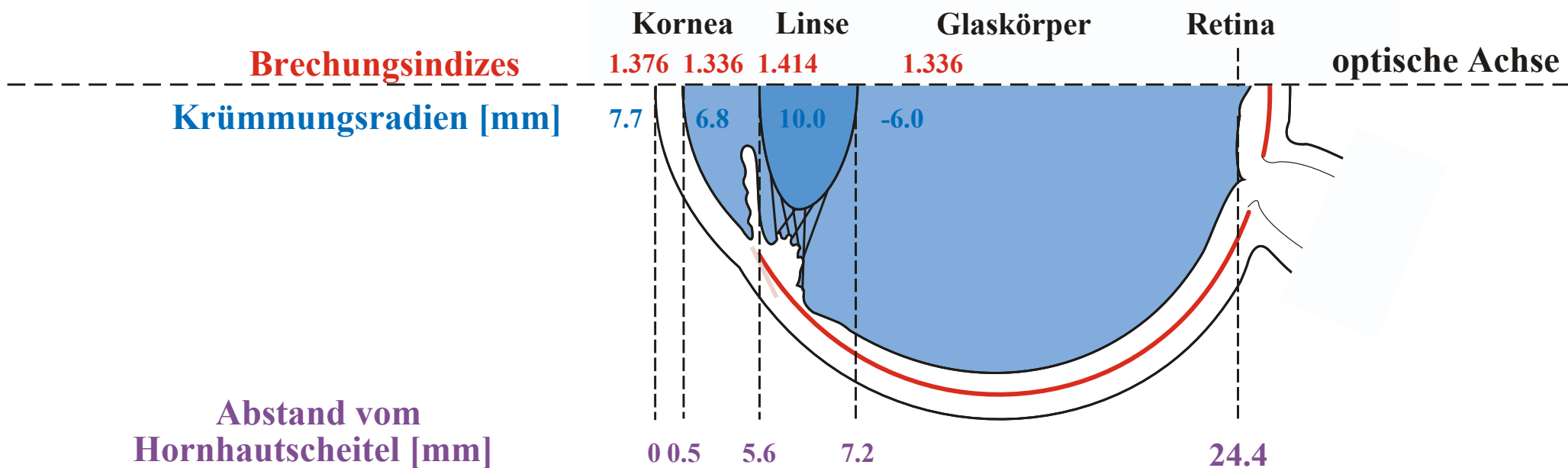
Hornhaut	1,3672
vordere Augenkammer	1,3374
Linse	1,42
Glaskörper	1,336

Das schematische Auge

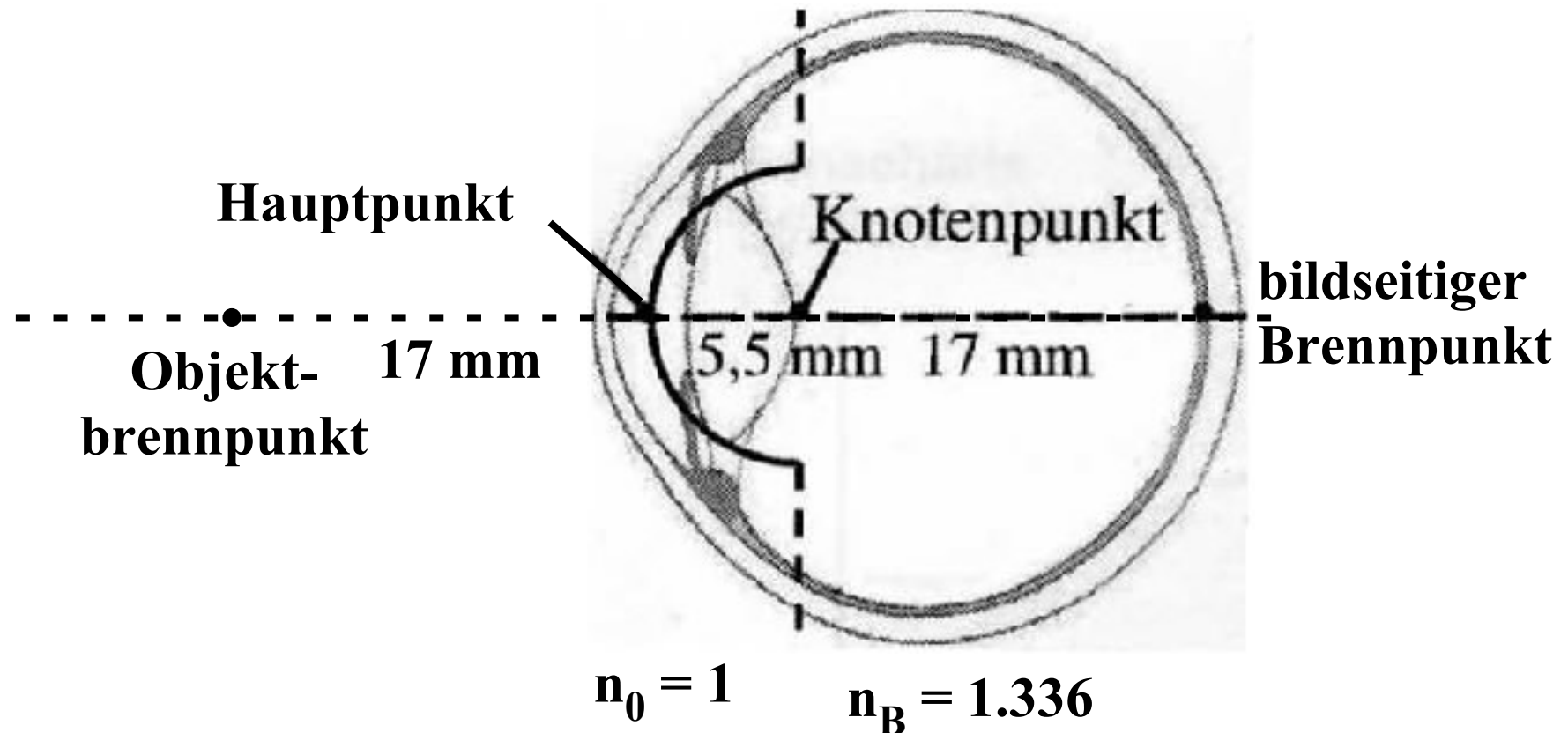
Kardinalpunkte



Geometrie des Auges

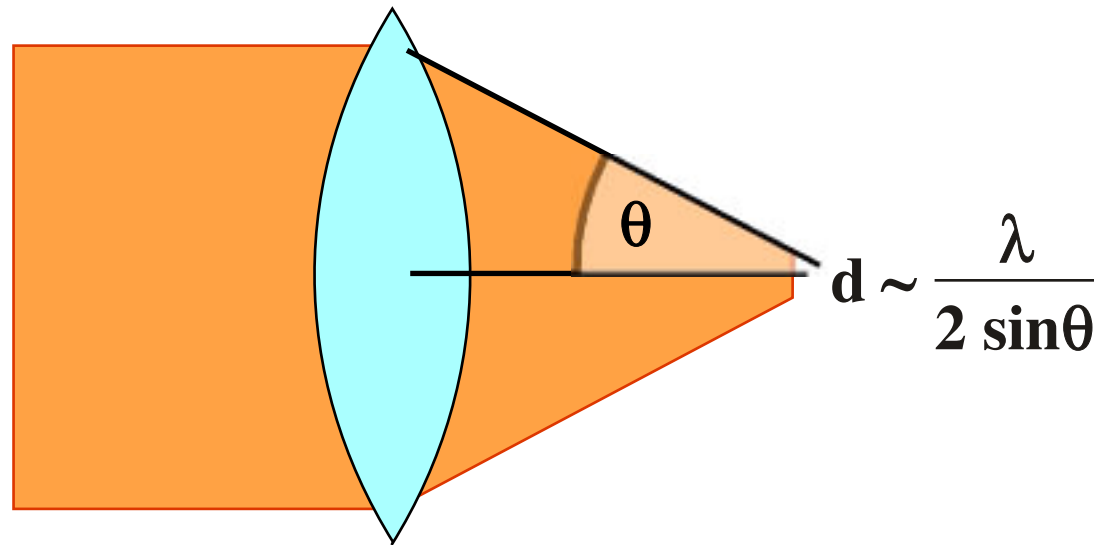


Das reduzierte Auge



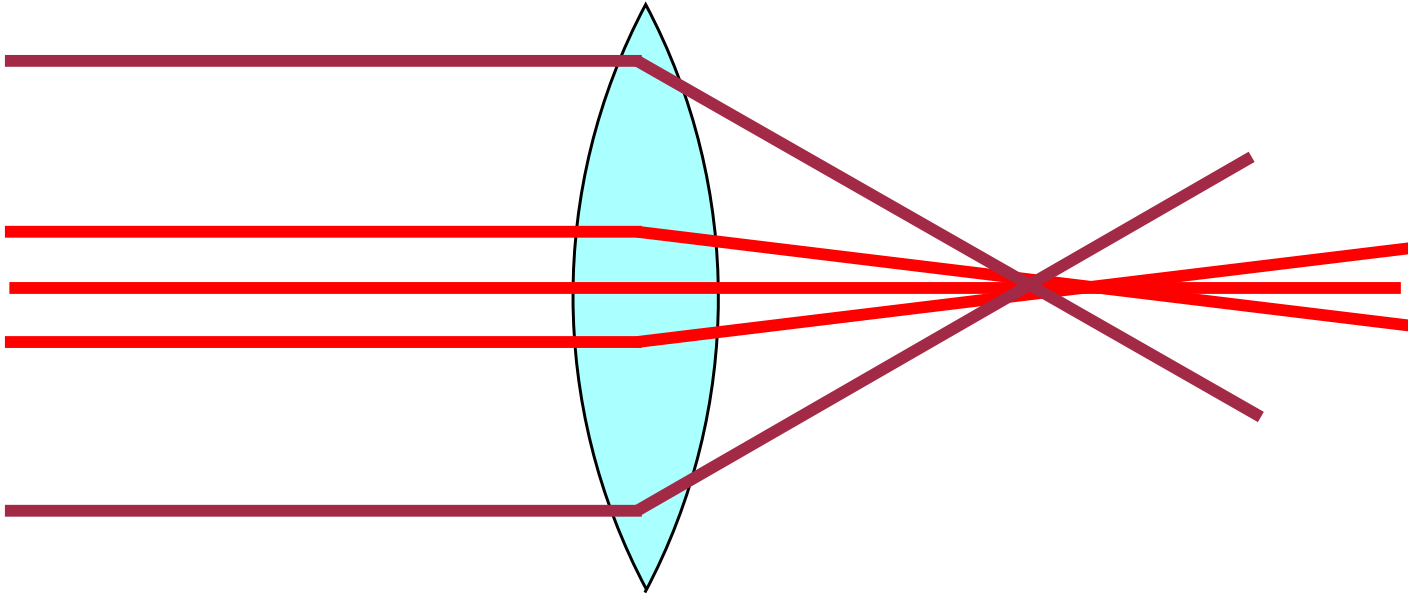
Auflösungsgrenze

Beugungsbegrenzung

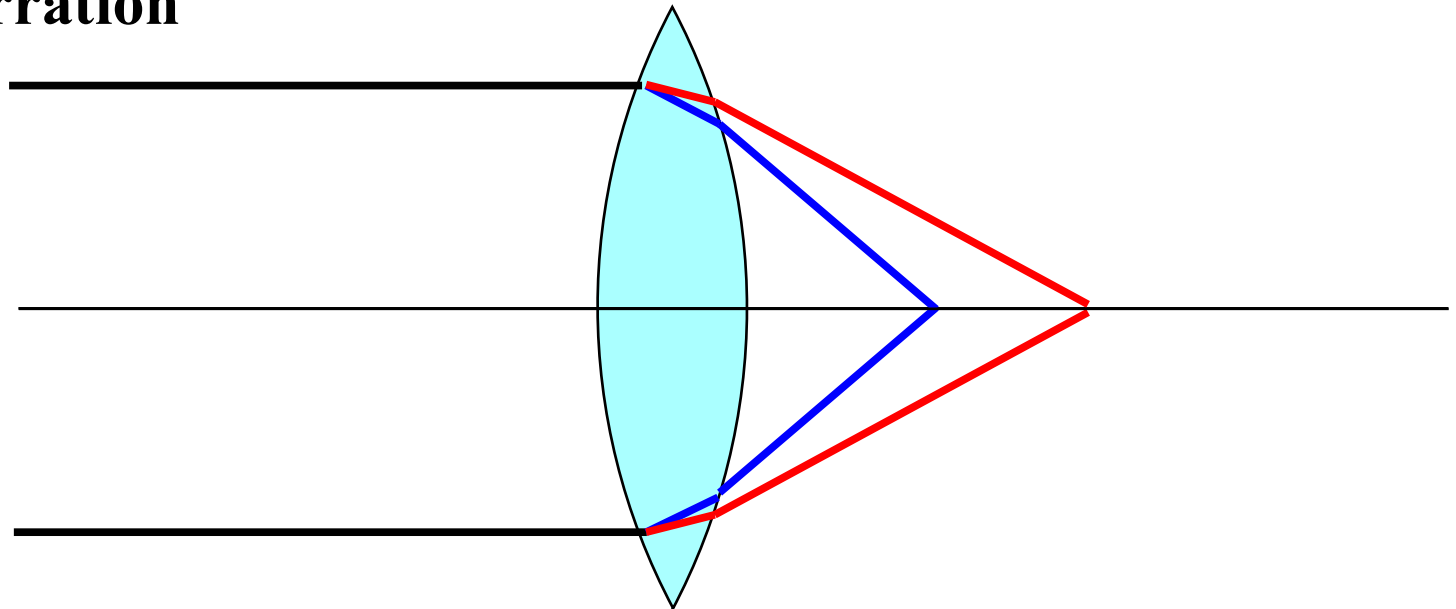


Abbildungsfehler

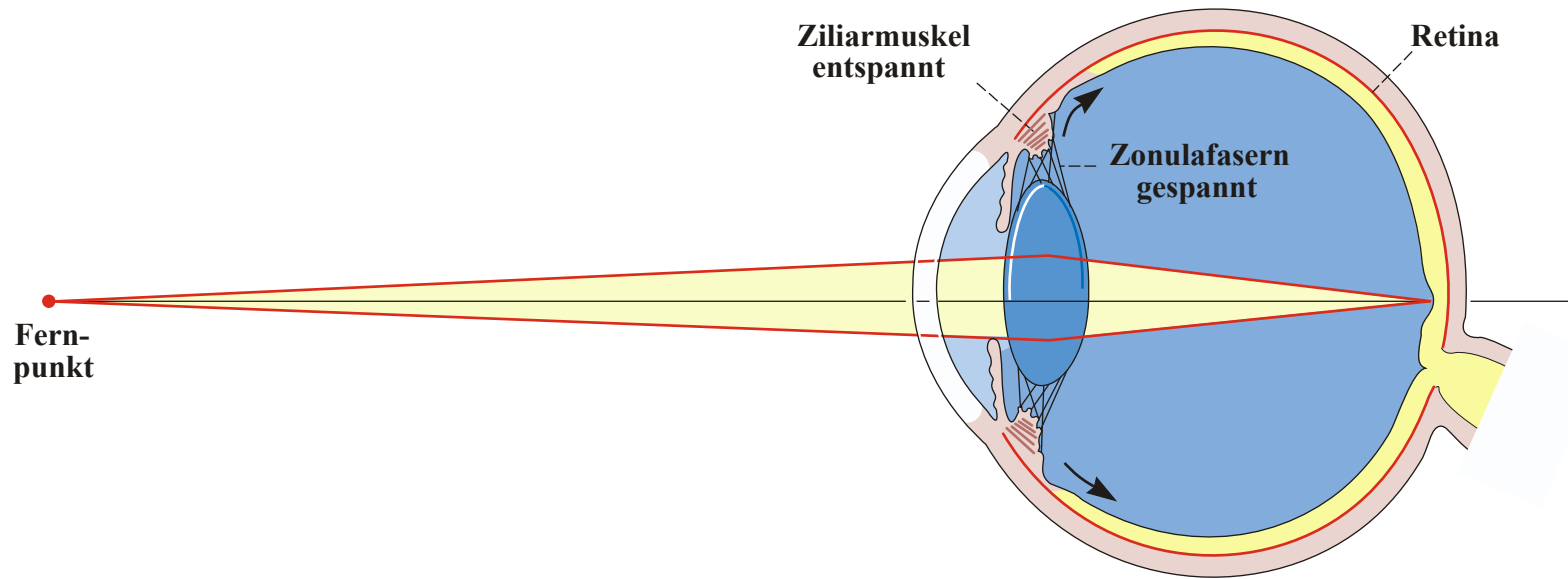
Sphärische Aberration



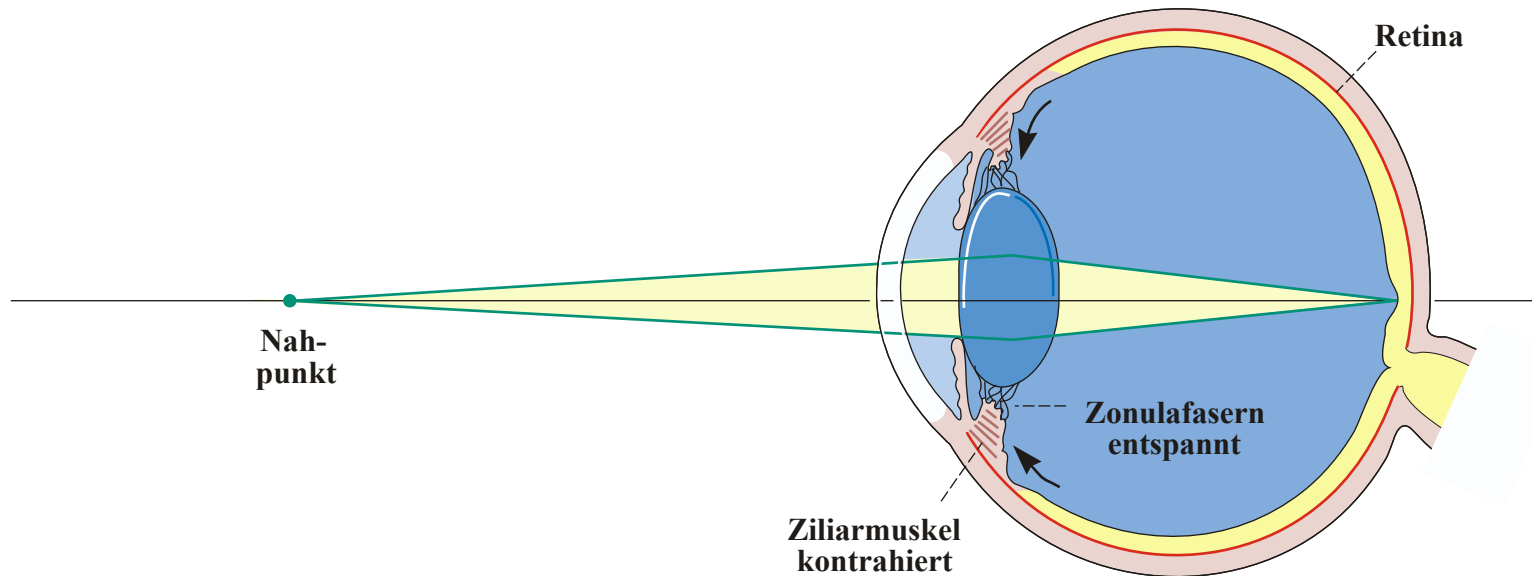
Chromatische Aberration



Akkommodation



Nahakkommodation



Akkommodation

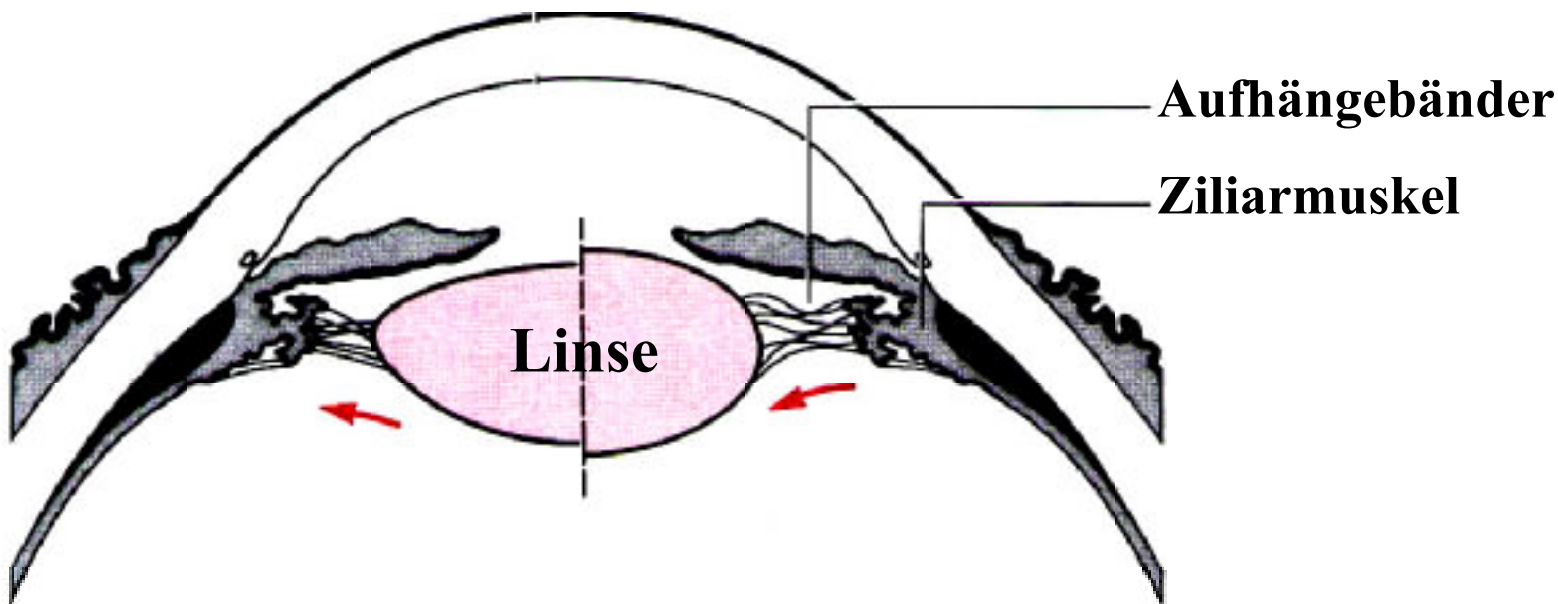
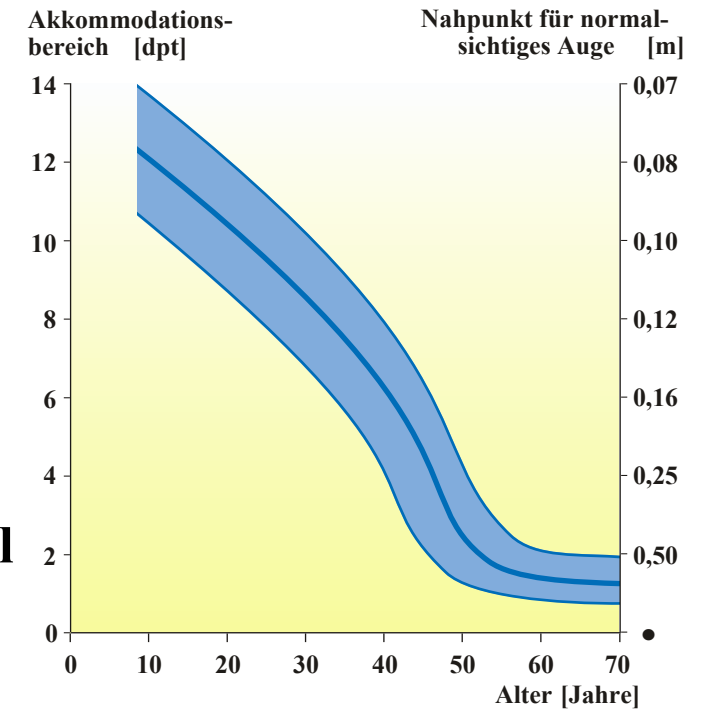
Formveränderung Linse

=> Brechkraft variieren

**=> unterschiedlich weit entfernte Objekte
scharf auf Netzhaut abbilden**

**Ferneinstellung:
erschlaffter Ziliarmuskel
angespannte Aufhängebänder
flache Linse**

**Naheinstellung:
angespannter Ziliarmuskel
lockere Aufhängebänder
stärker gewölbte Linse**



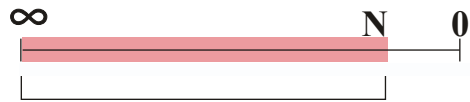
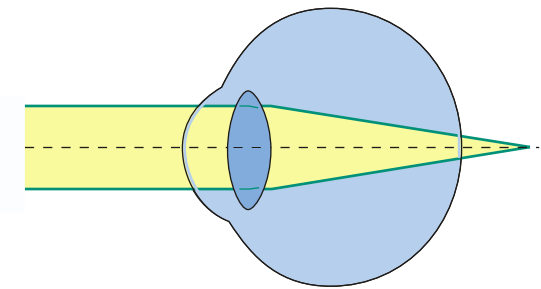
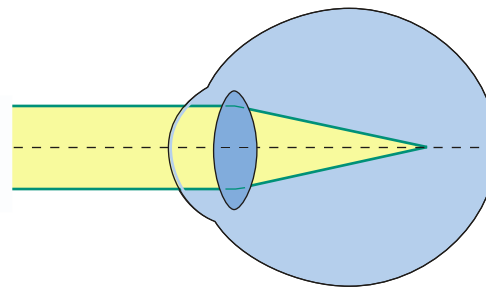
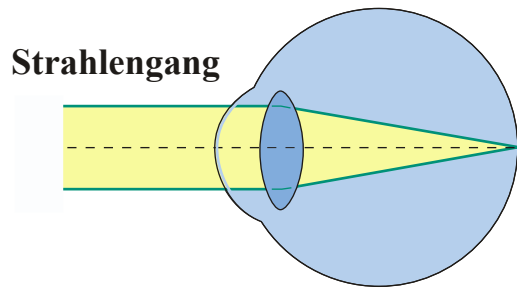
Fehlsichtigkeit

emmetrop
(normalsichtig)

myop
(kurzsichtig)

hyperop
(weitsichtig)

Strahlengang

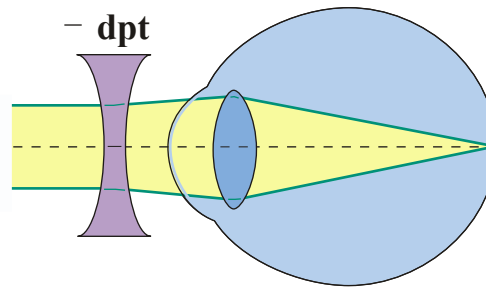


Akkommodationsbereich
(Bereich des scharfen Sehens)

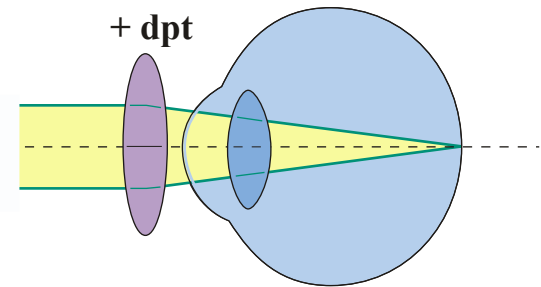


korrigiert

- dpt

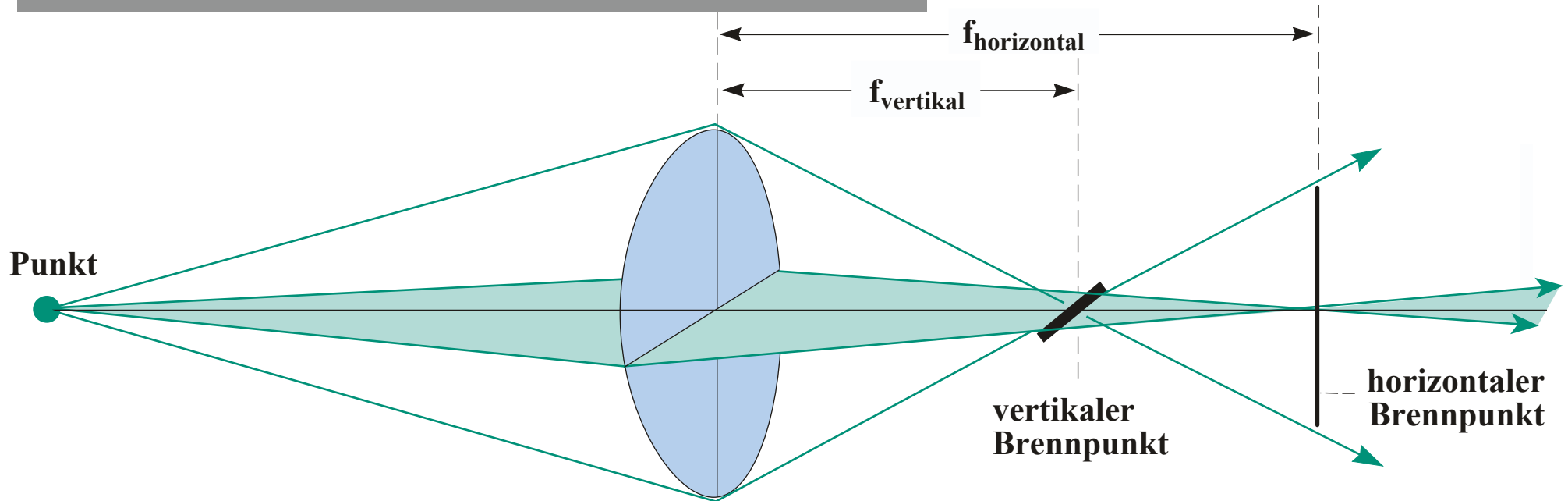


+ dpt

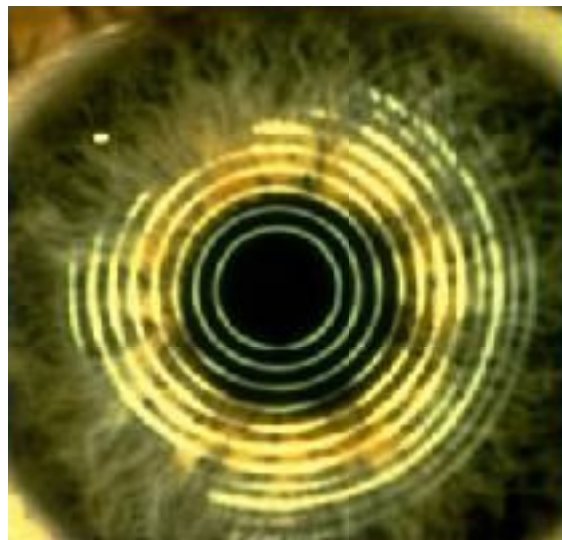


Astigmatismus

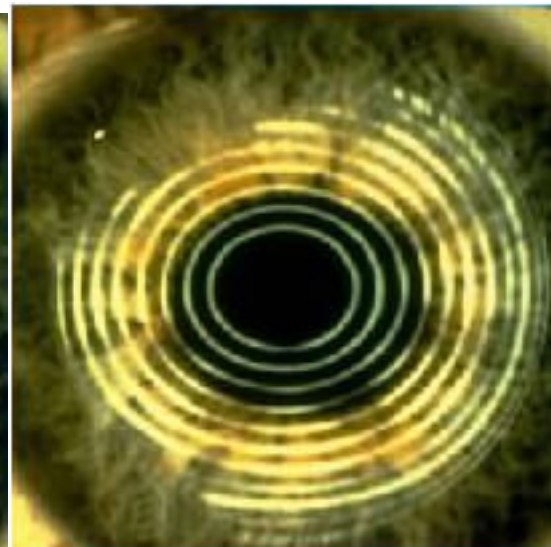
astigmatische Linse: Krümmungsradius $r_{\text{vertikal}} < r_{\text{horizontal}}$



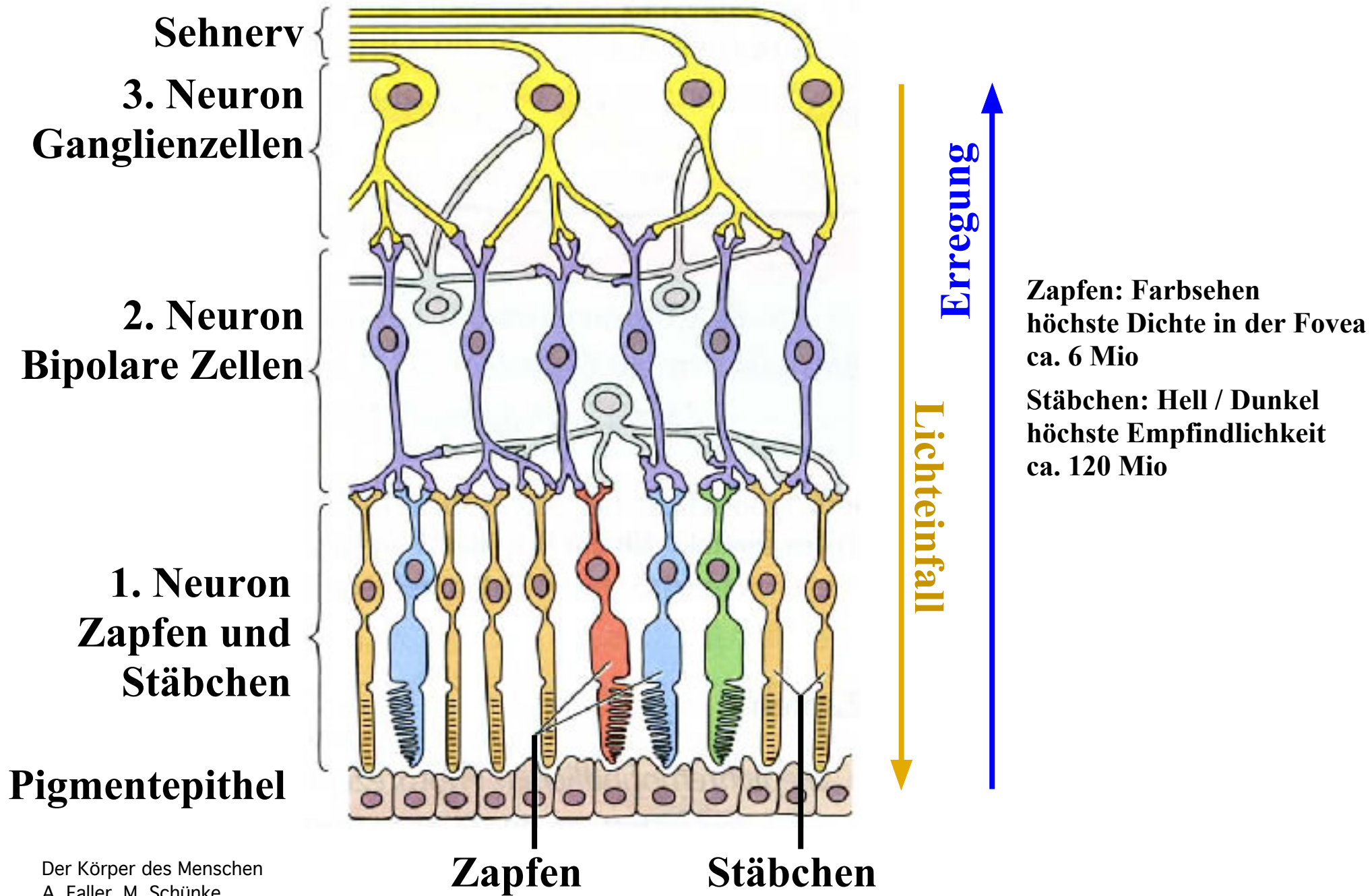
Normales Auge



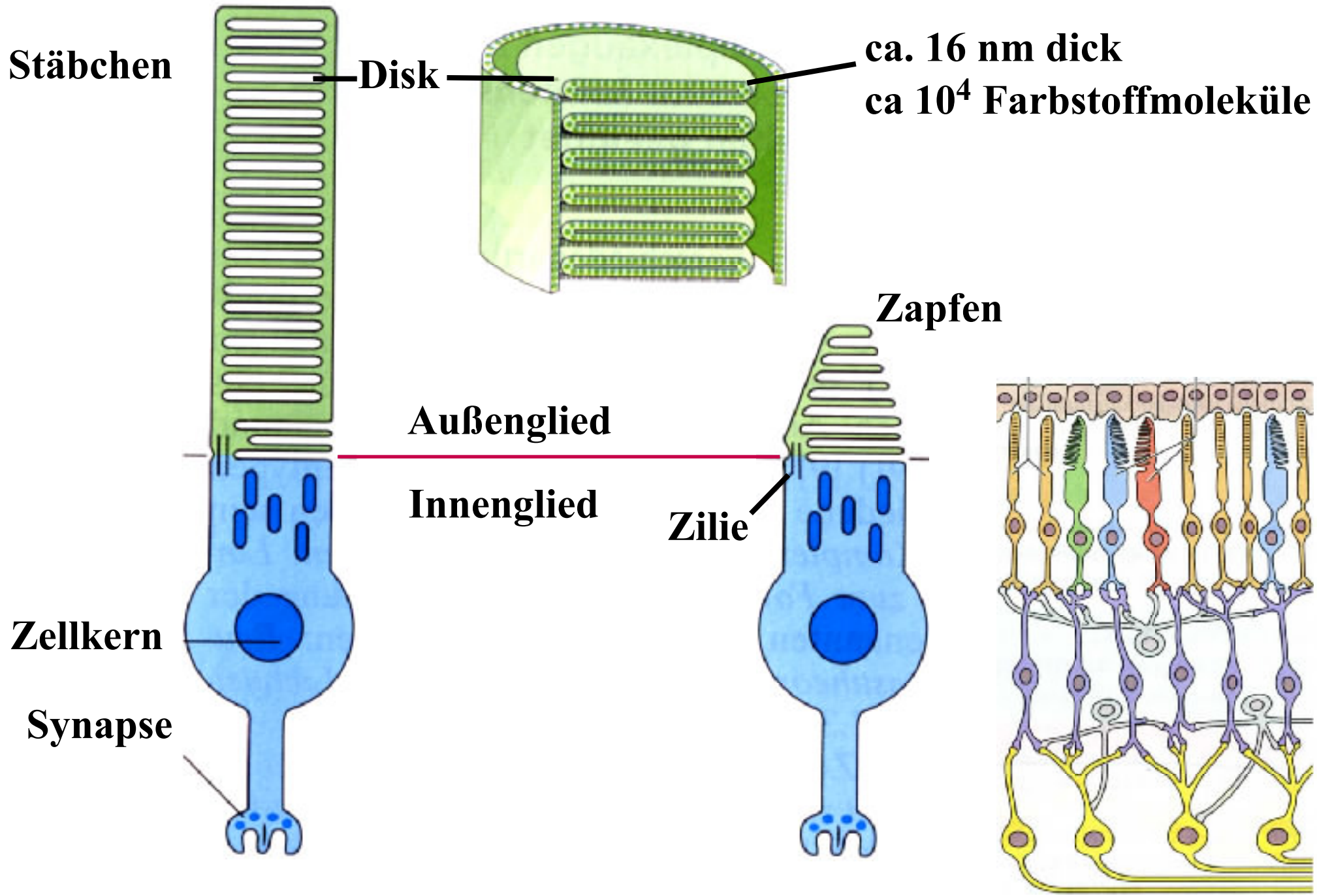
Astigmatisches Auge



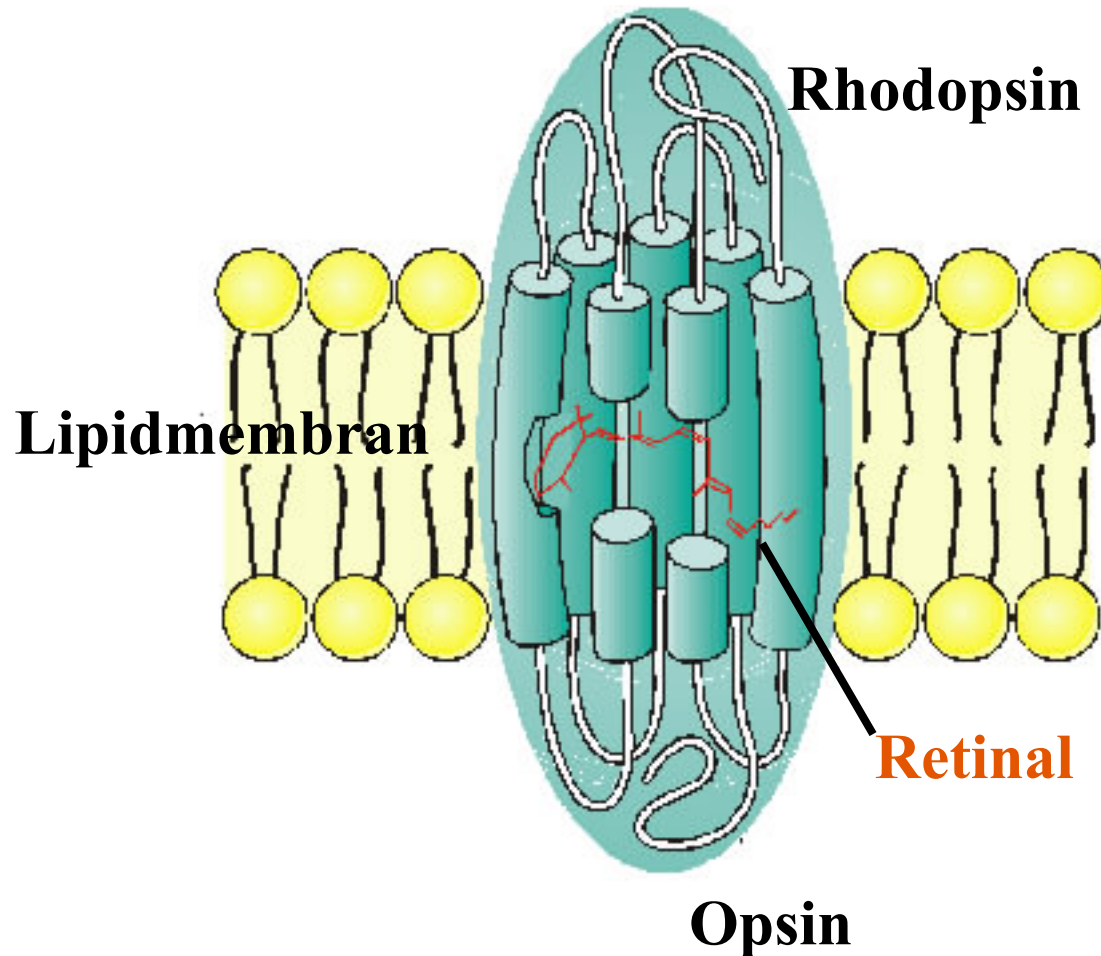
Zellen der Netzhaut



Struktur der Sehzellen

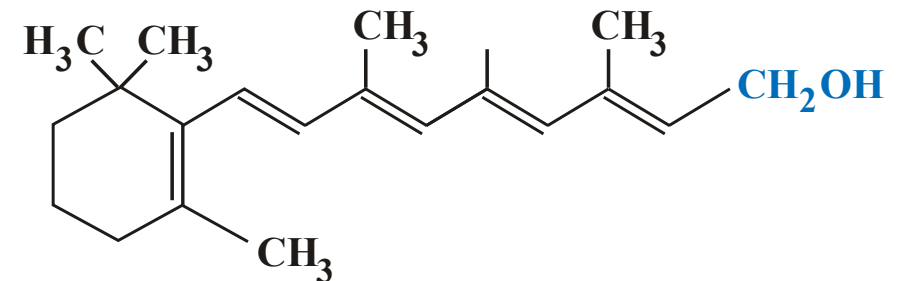
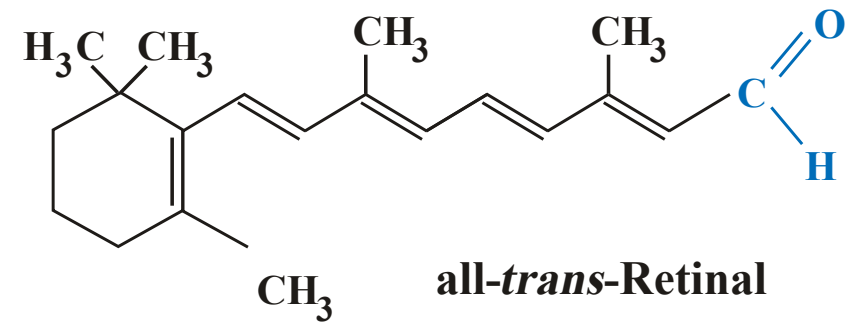
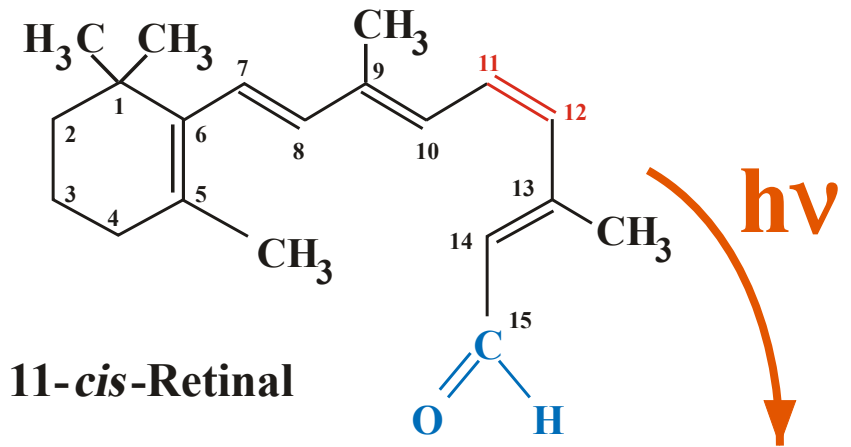


Sehpigment der Stäbchen



Stäbchen: Sehpurpur (Rhodopsin)
Zapfen: 3 Farbstoffe mit unterschiedlichen Absorptionsspektren

Farbstoffe



all-*trans*-Retinol (Vitamin A)

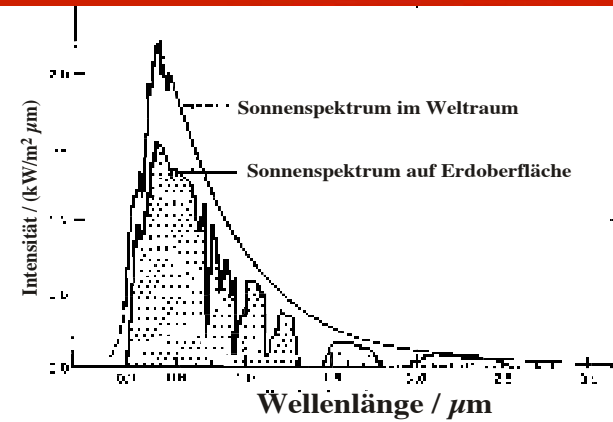
Spektrale Empfindlichkeit

Spektrum des Tageslichtes

wird bestimmt durch

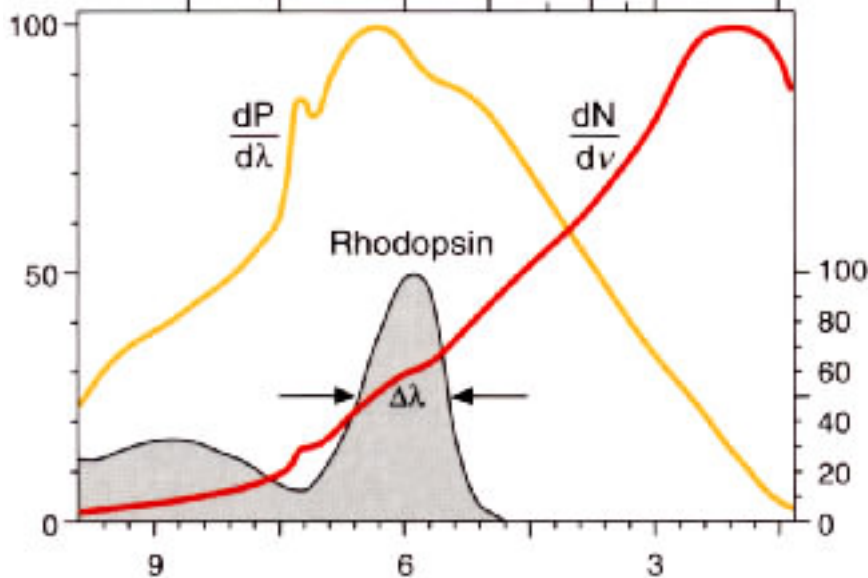
- Planck'sches Gesetz
- Absorption in der Atmosphäre

$$P \sim \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1}$$



Wellenlänge / nm

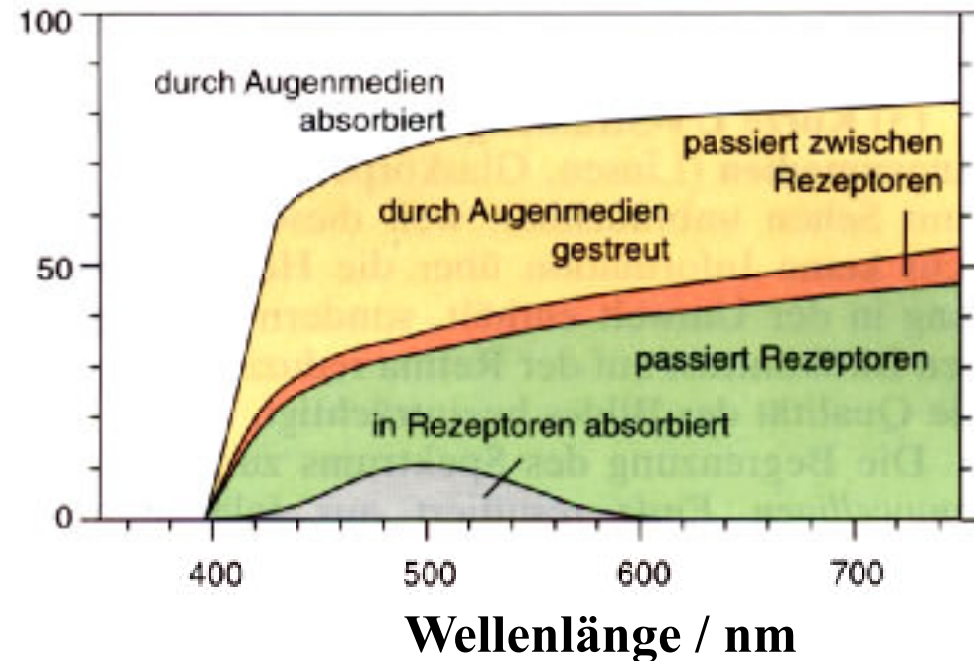
350 400 500 600 800 1000 2000



Frequenz / 10^{14} Hz

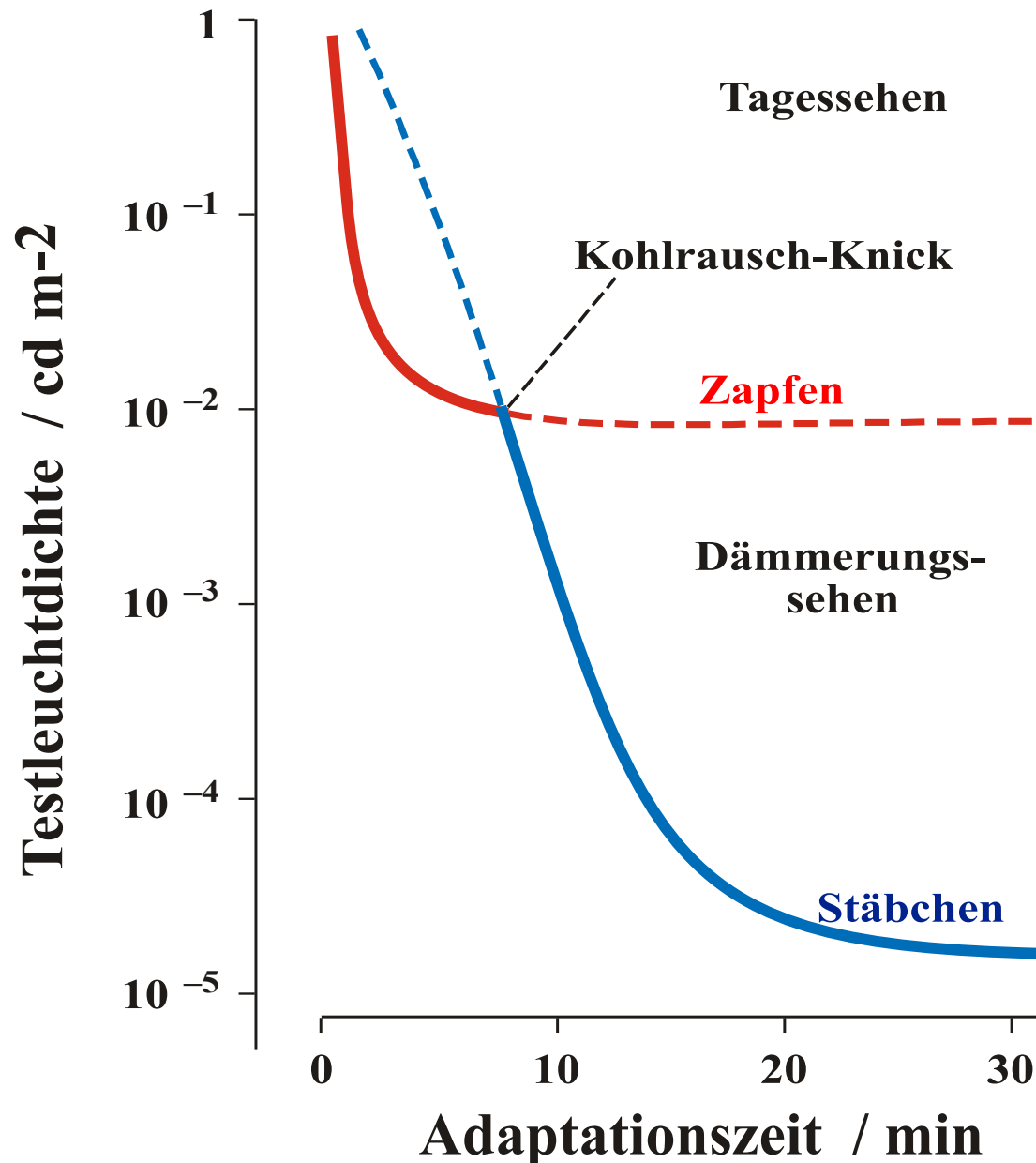
Verluste im Auge sind wellenlängenabhängig

auf die Cornea auftreffendes Licht / %



Wellenlänge / nm

Hell-Dunkel Adaptation



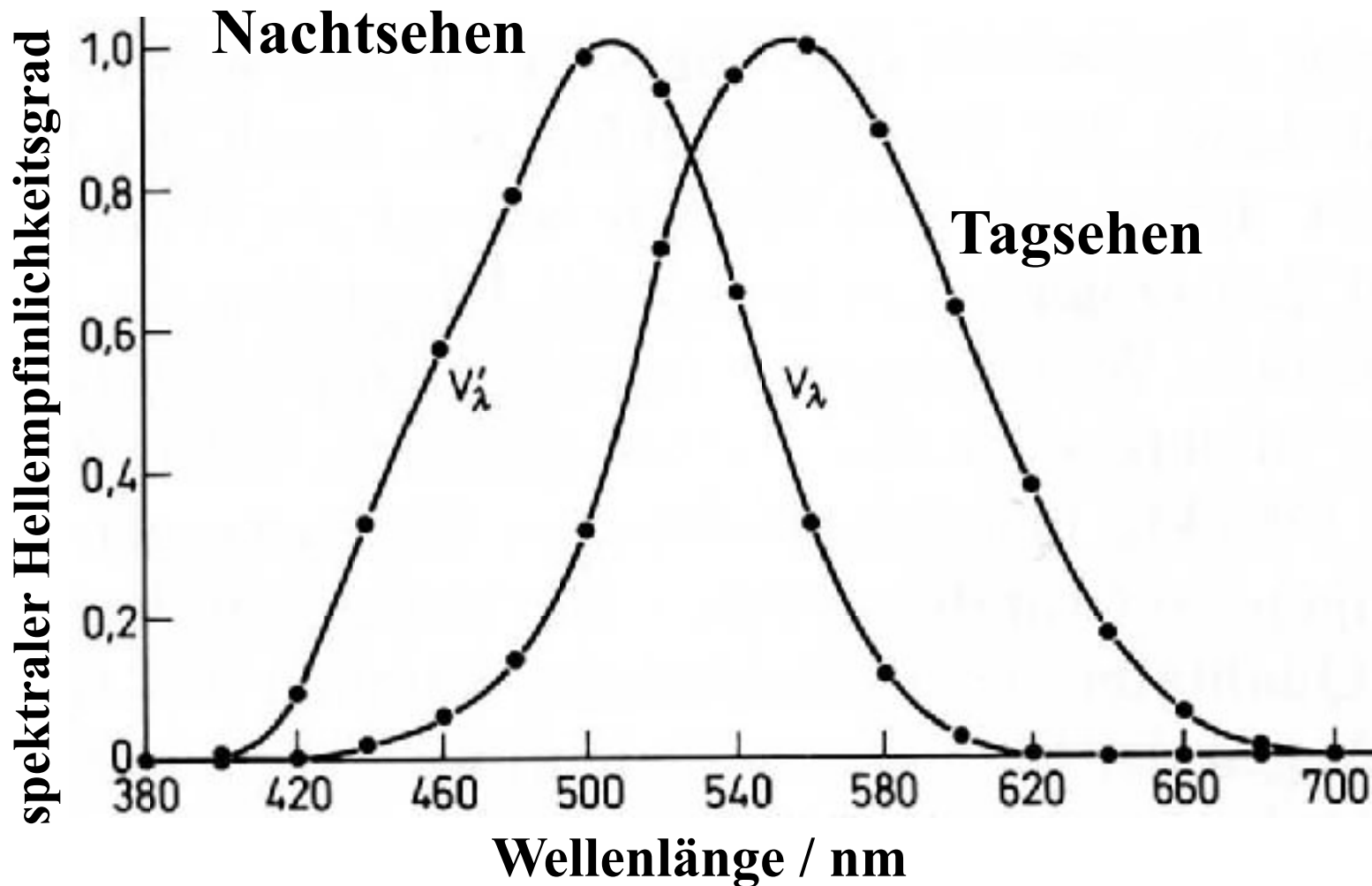
Pupille:

Durchmesser 1 - 4 mm
Lichtmenge variiert
um Faktor 16

Empfindlichkeit der
Sinneszellen variiert um 10^4

Spektrale Empfindlichkeit

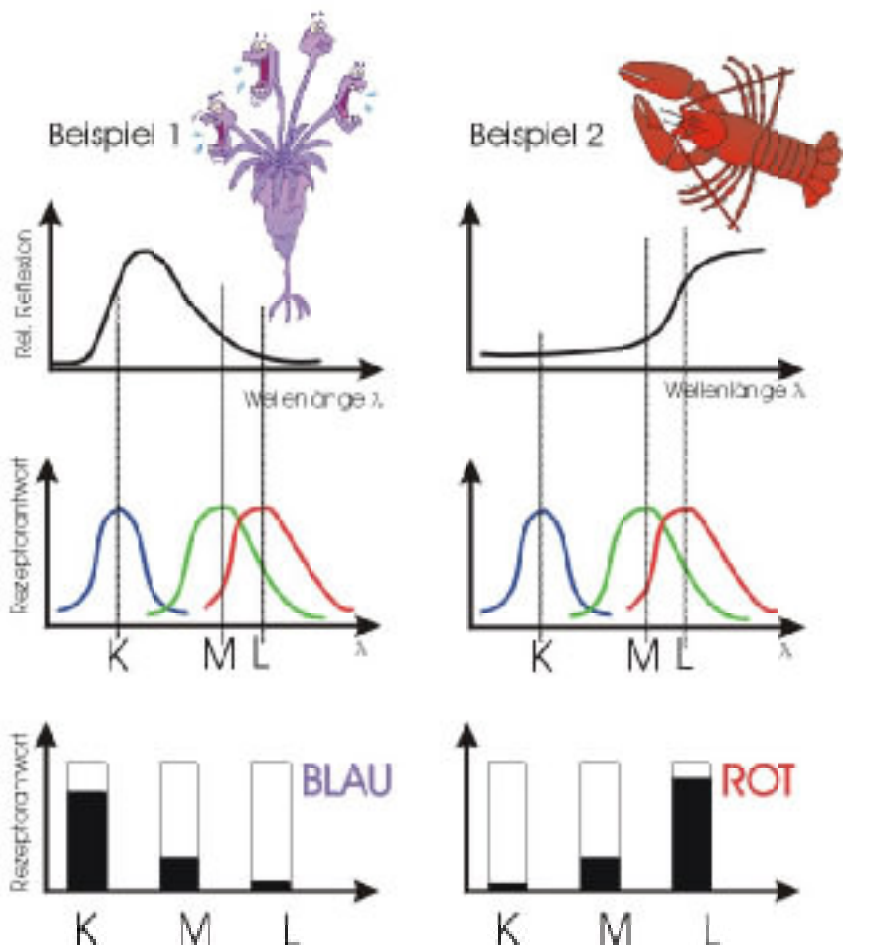
Augenempfindlichkeit: 350..700nm



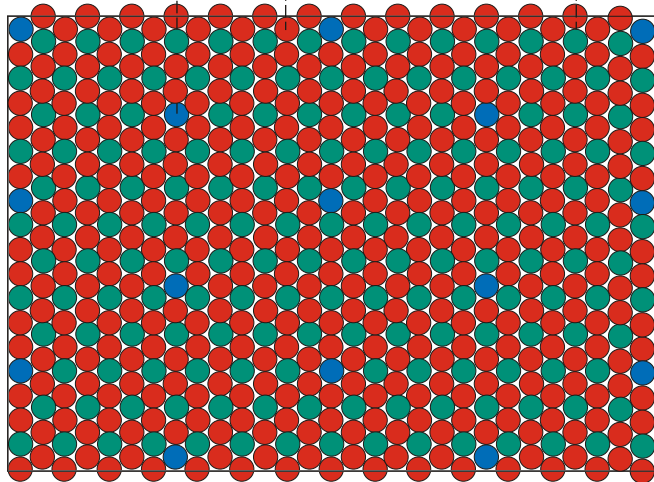
Experimentalphysik Band 7 Optik
Bergmann, Schäfer

**Purkinje Effekt (nach Jan Evangelista Purkinje):
unterschiedliches Helligkeitsempfinden von Farben bei Tag und Nacht**

Farbsehen

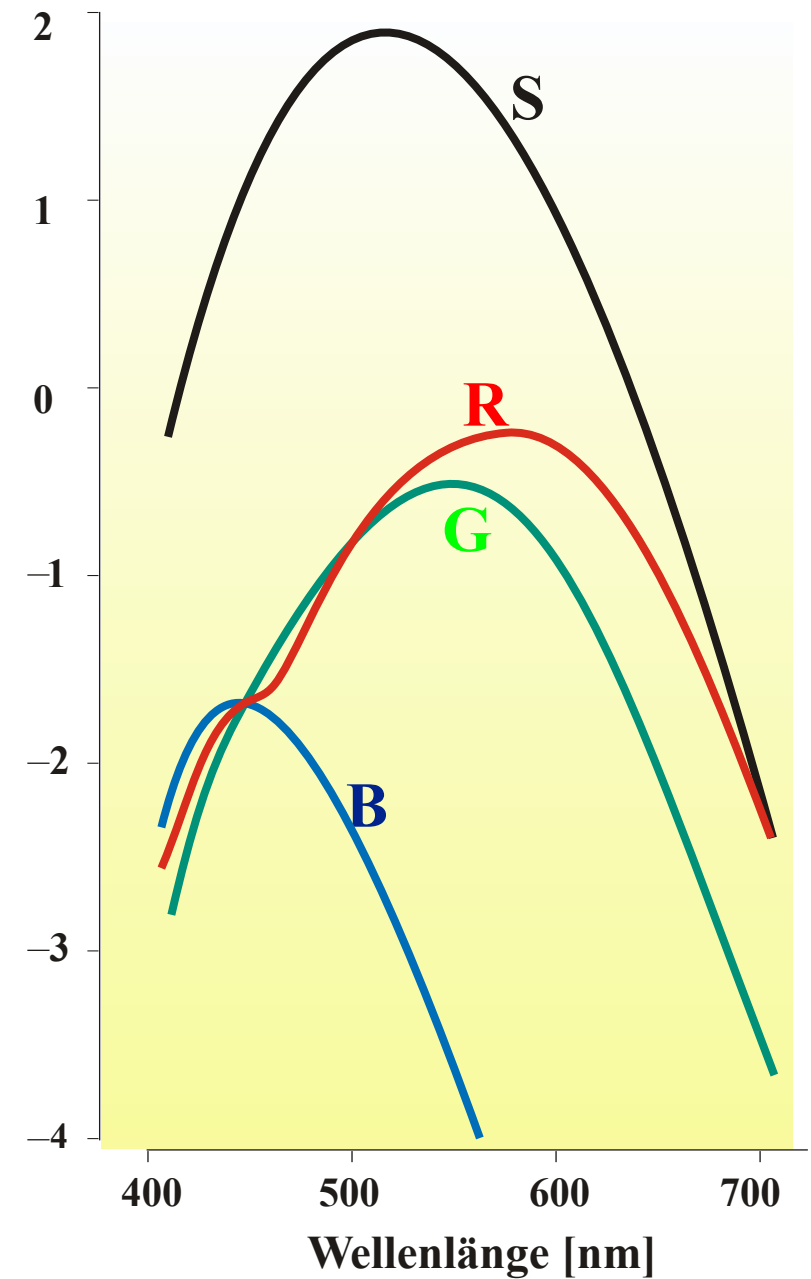


blauempfindlich rotempfindlich grünempfindlich



schematisiertes Mosaik der drei Zapfentypen

log. rel. spektrale Empfindlichkeit



Farbblindheit

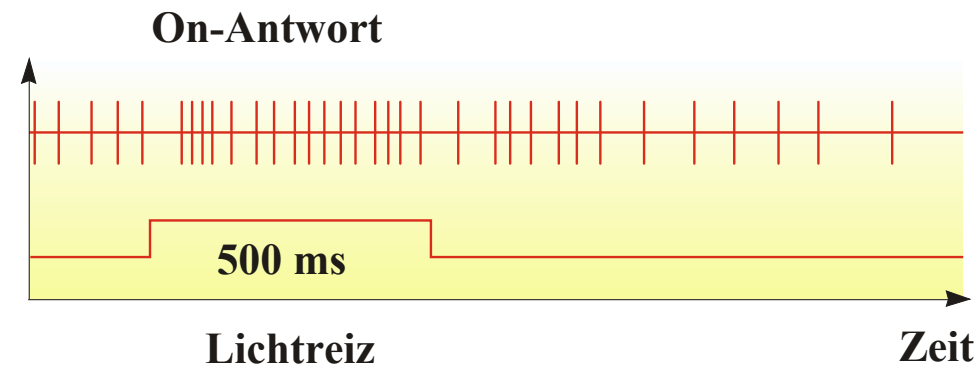
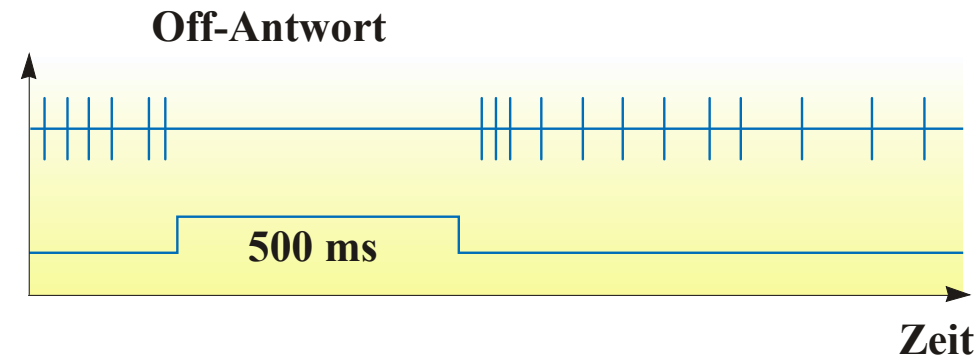
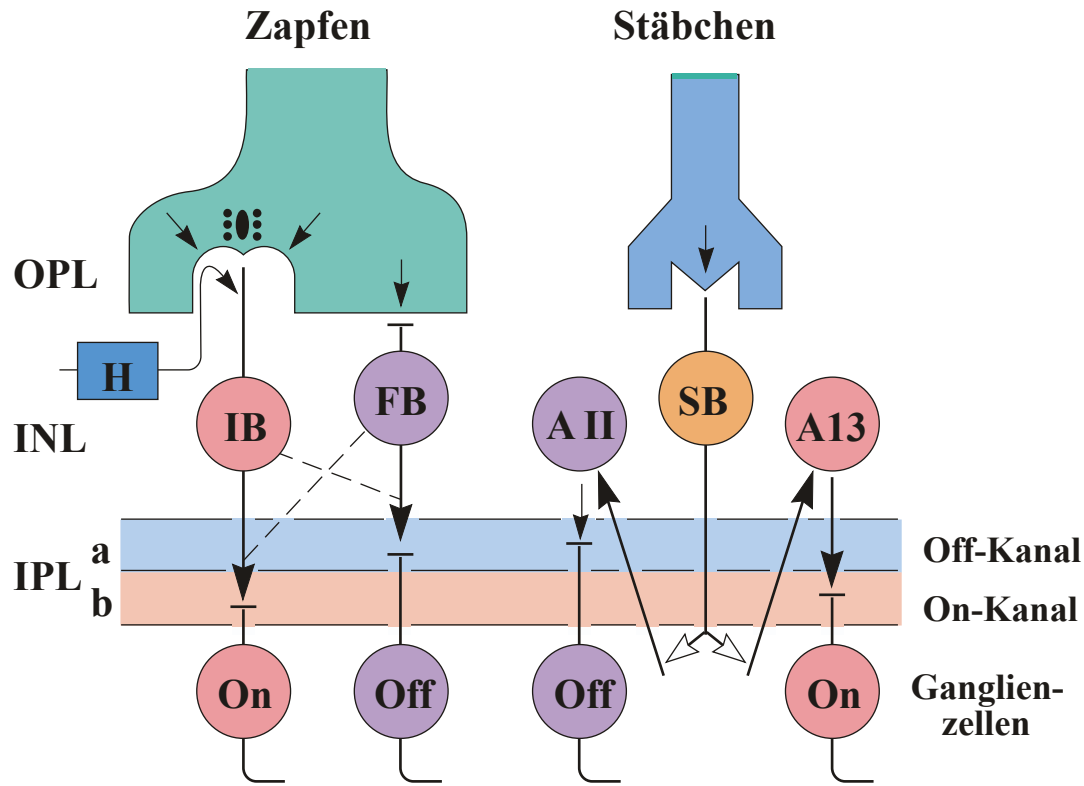
- Ein Zapfensystem fehlt

**Protanopen / Deuteranopen / Tritanopen
bei Ausfall des 1. / 2. / 3. farbempfindlichen Systems**

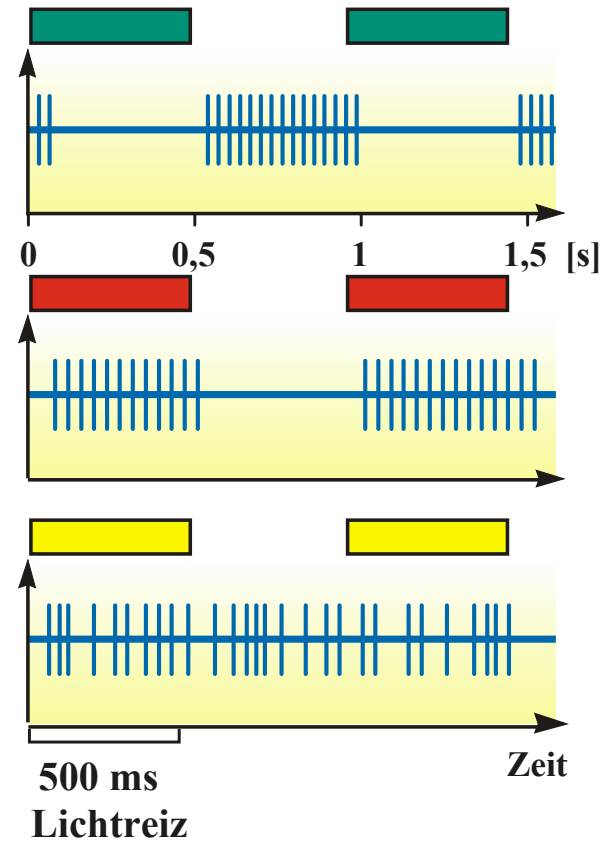
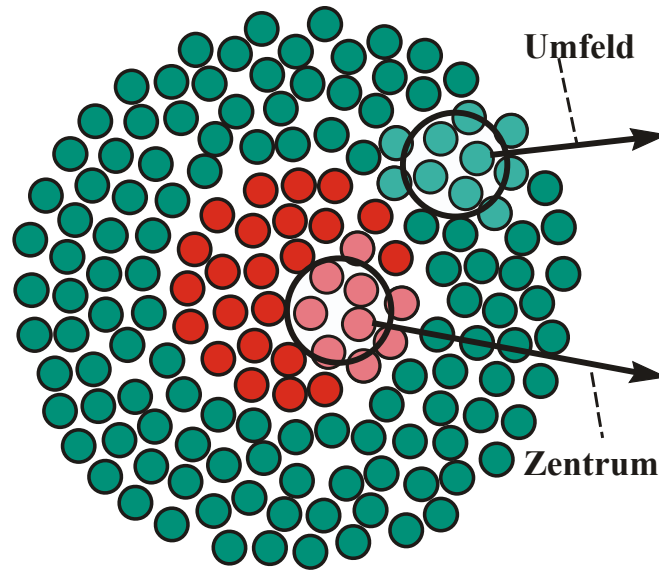
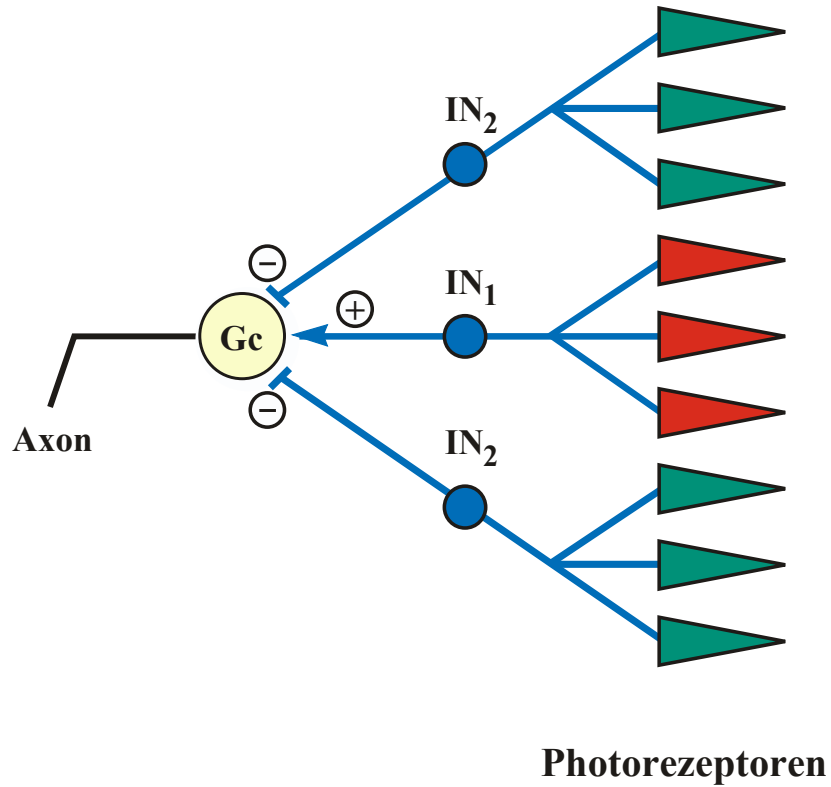
- **Reduzierte Empfindlichkeit eines Zapfensystems**

**Rot-Grün-Sehschwäche, -Blindheit:
>99% der Farbfehlsichtigkeiten, die
umgangssprachlich als Farbblindheit
bezeichnet werden;
angeboren (9% aller Männer, 0,8%
aller Frauen)**

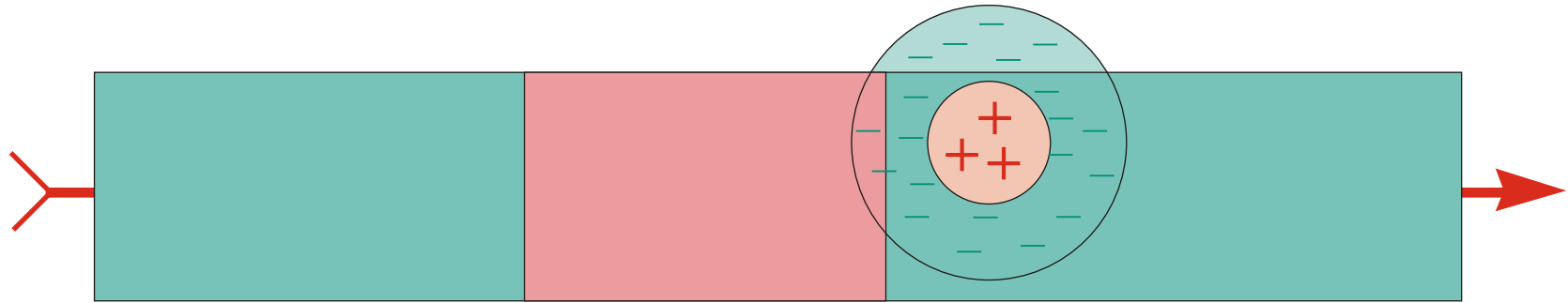
Signalweiterleitung



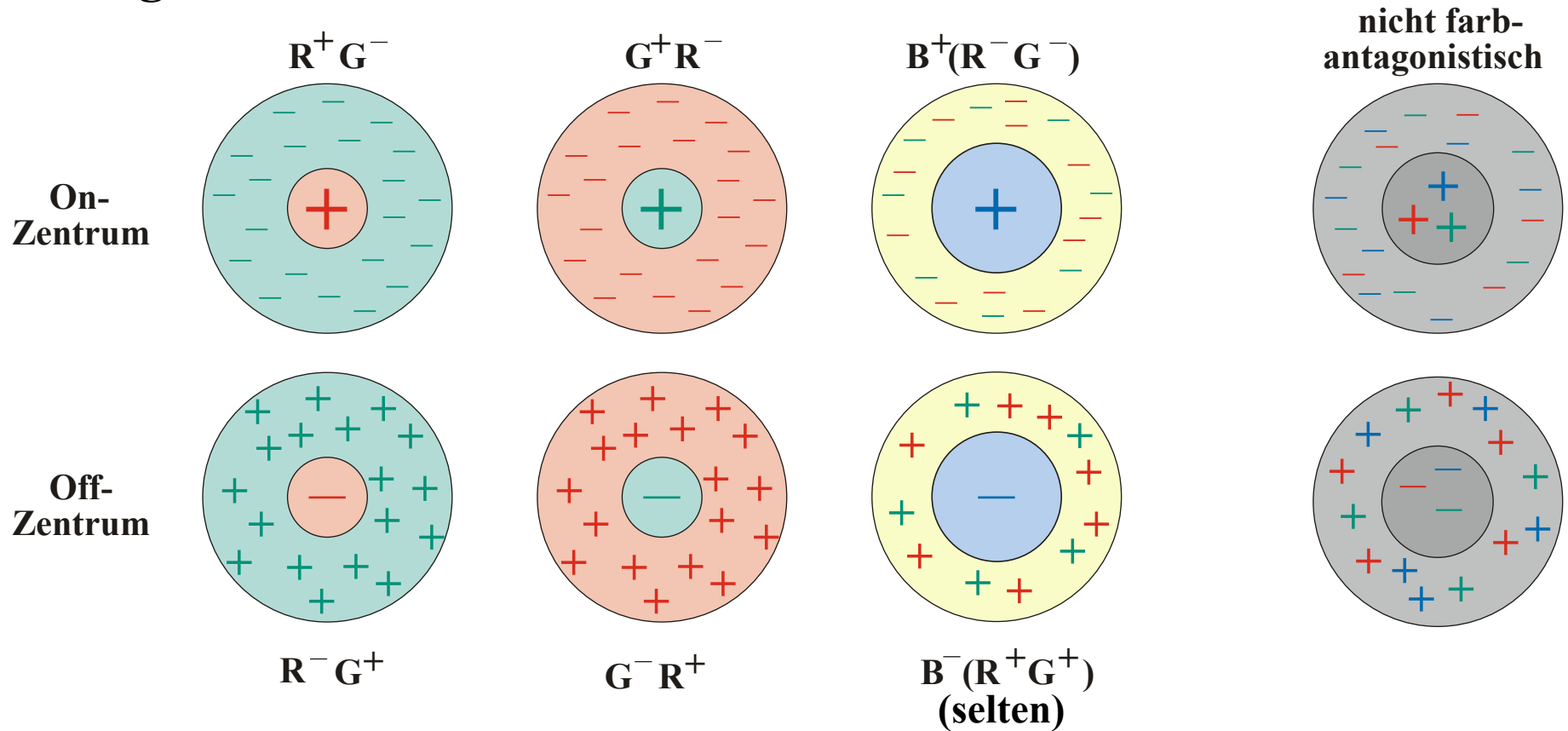
Rezeptives Feld



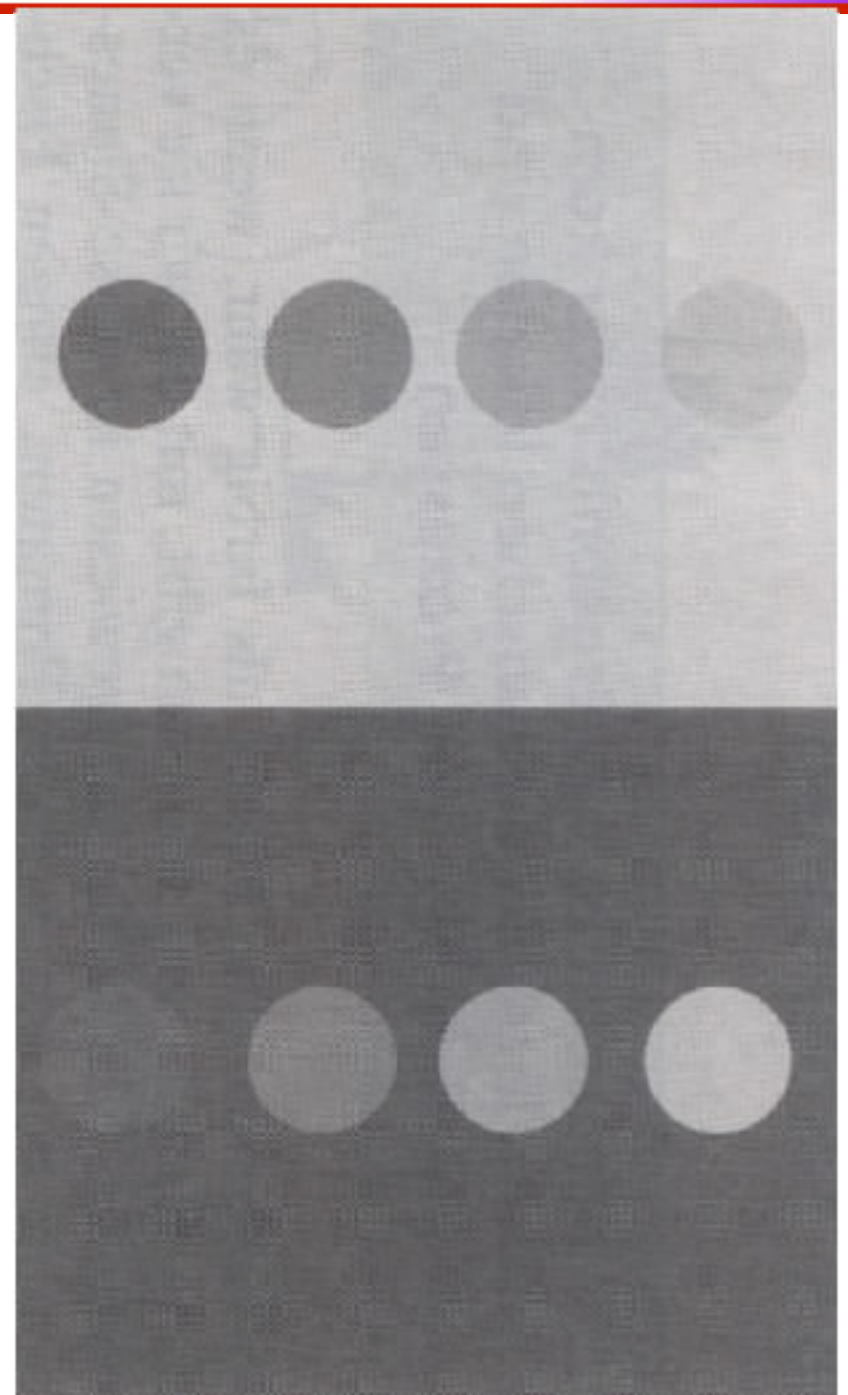
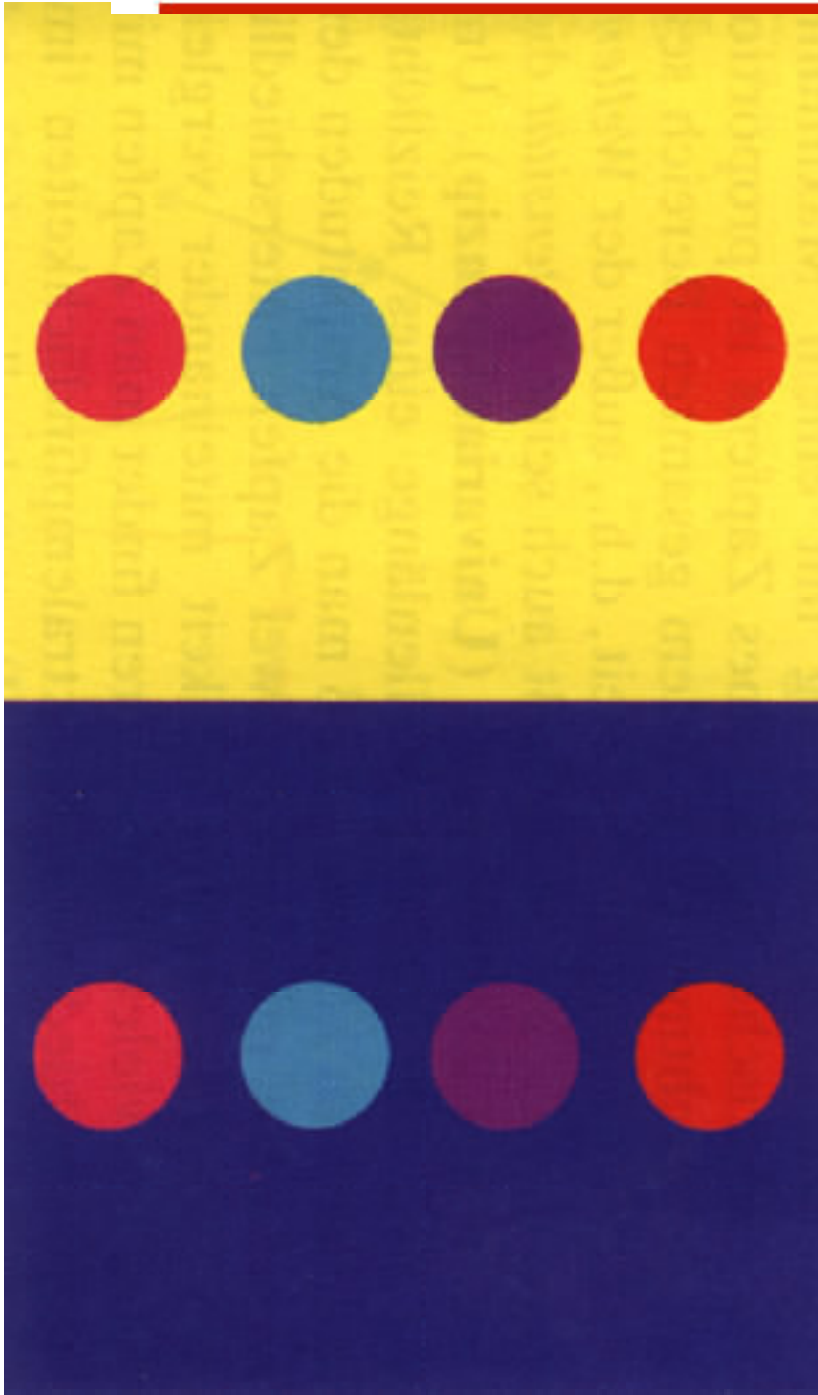
Kontrast und Bewegung



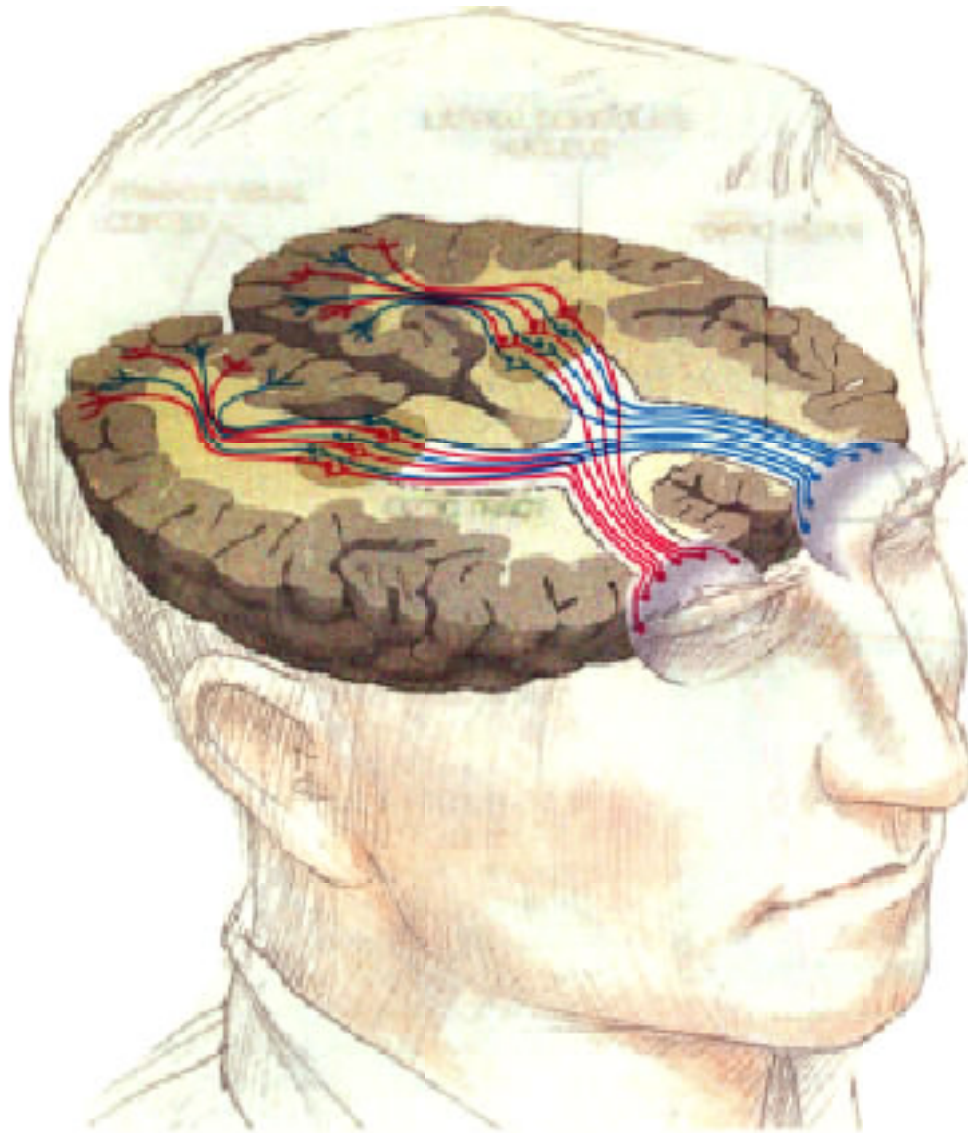
Die häufigsten Farbkombinationen



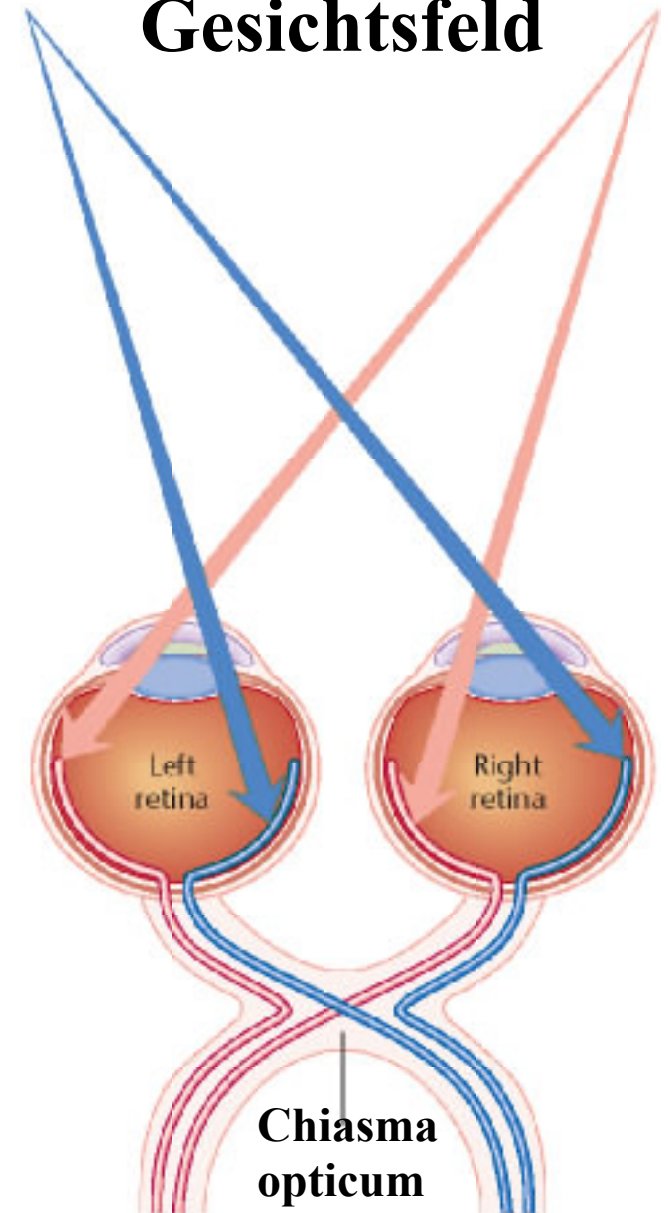
Differenzielle Wahrnehmung



Sehbahn

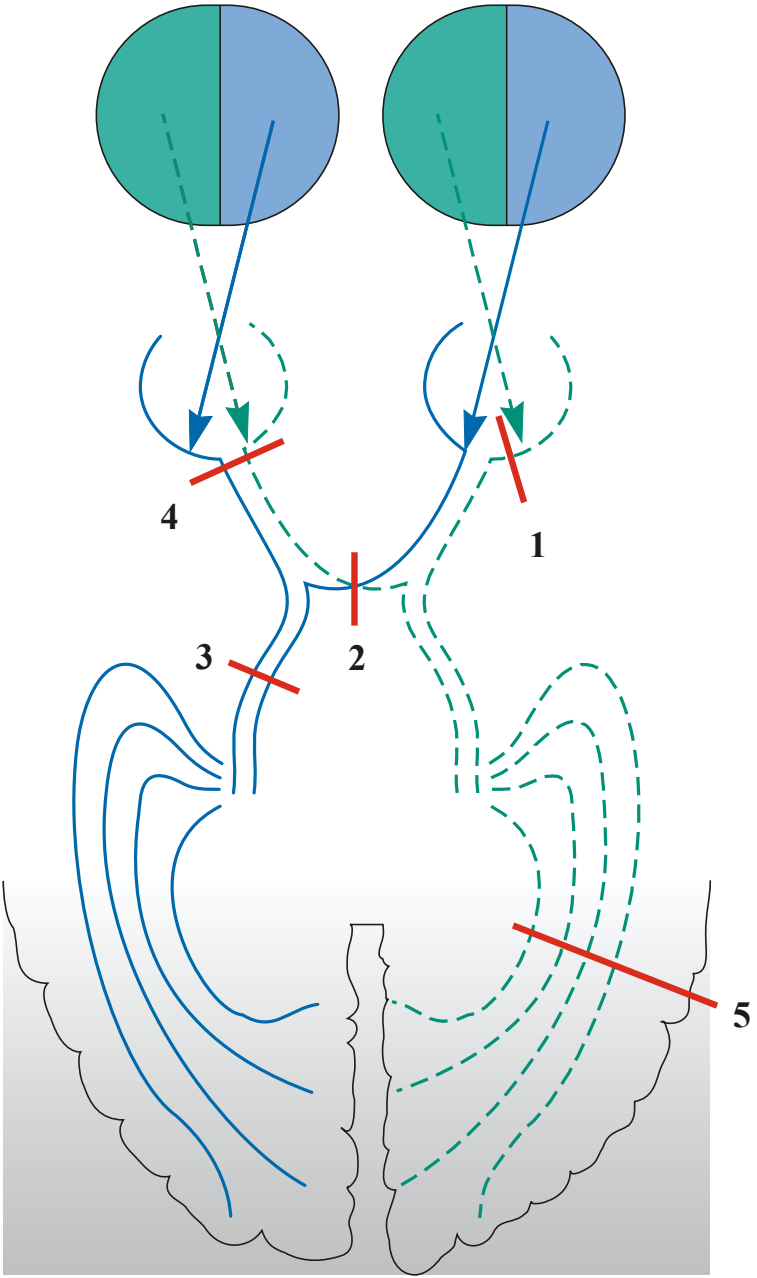


Gesichtsfeld



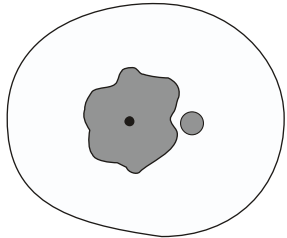
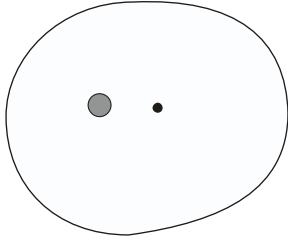
Gehirn

Gesichtsausfälle

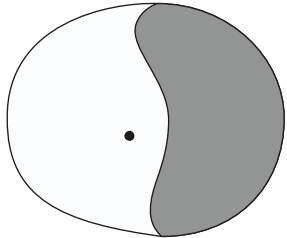
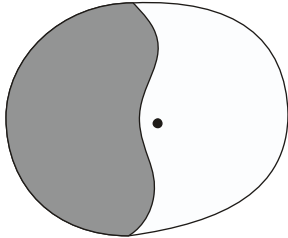


linkes Auge

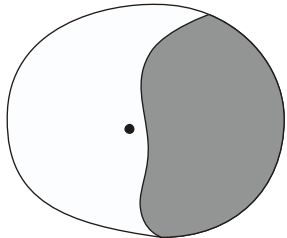
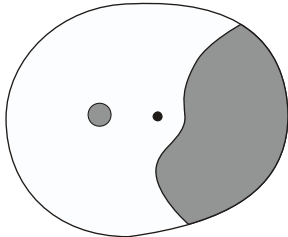
rechtes Auge



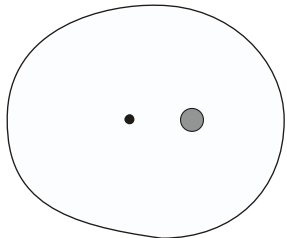
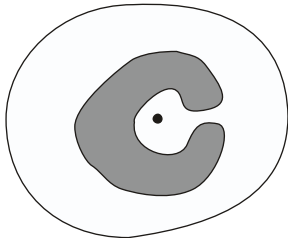
1



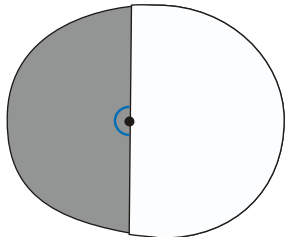
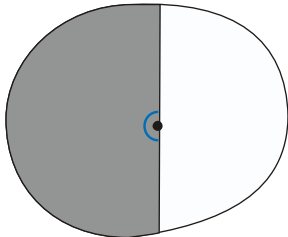
2



3

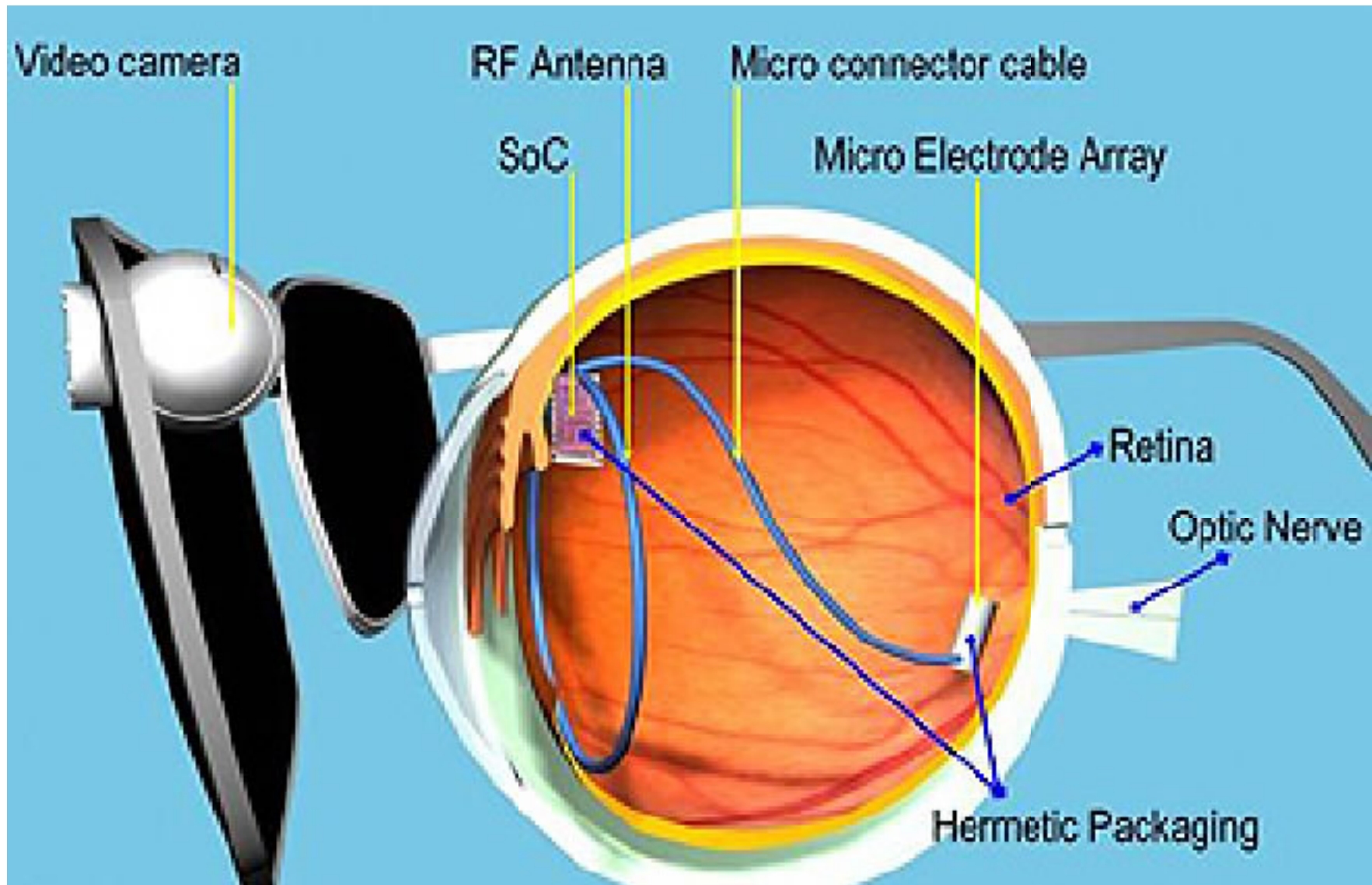


4

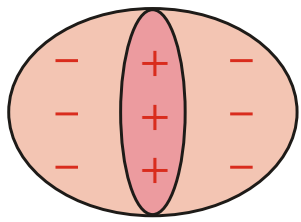


5

Künstliche Retina



Verarbeitung

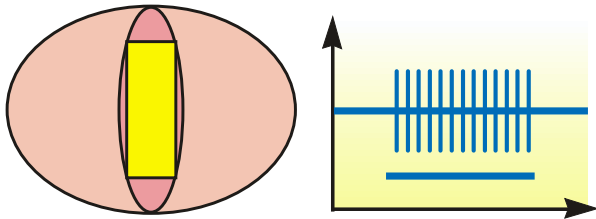


rezeptives Feld

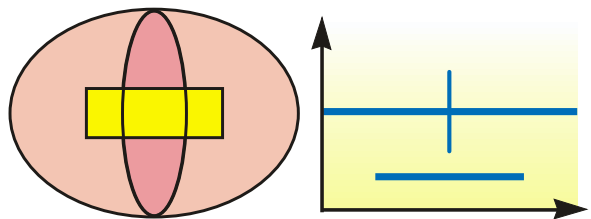
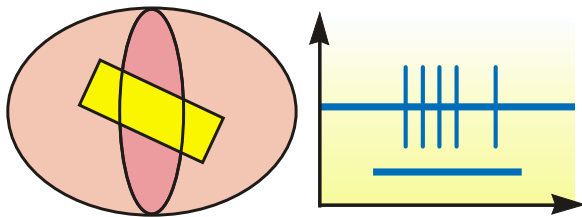


Lichtreiz

Orientierungsspezifität

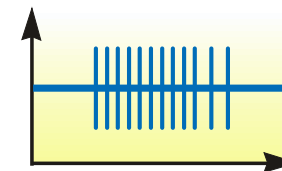
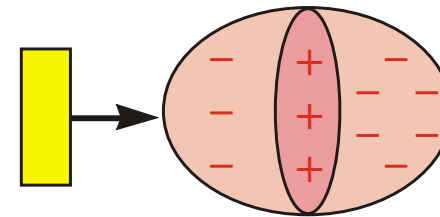


optimale Reizorientierung

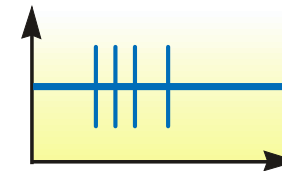
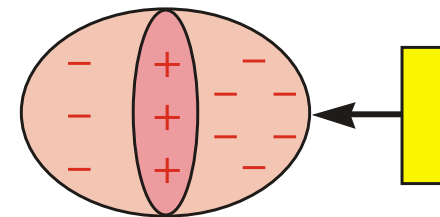


Zeit

Richtungsspezifität



optimale
Bewegungsrichtung



Zeit