

Physik des Lichts

Information aus Licht

Information über externe Umwelt wird aus regelmäßiger zeitlich/räumlicher Strukturierung des Sinnesreizes gewonnen
Information hat keinen Energiegehalt, kann aber gemessen werden in Form der

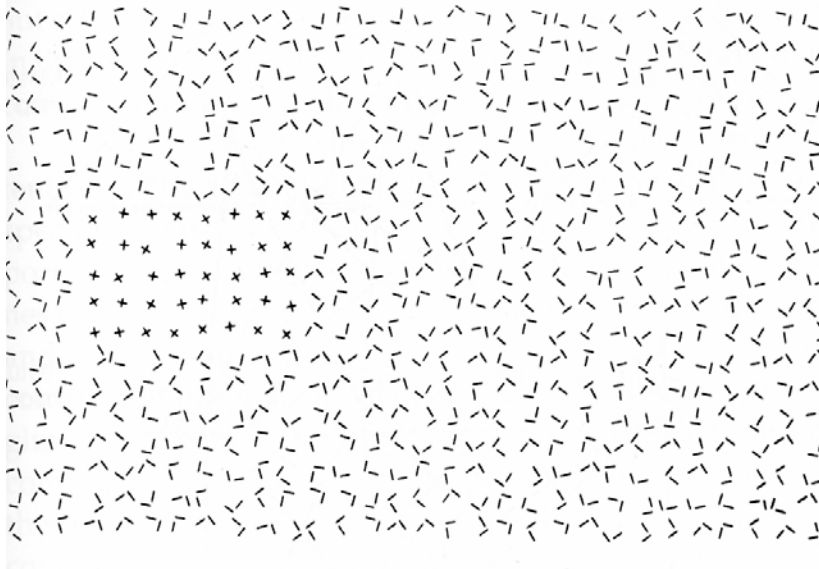
Entropie (Unordnungsgrad):

Sinnesreize homogen und zufallsverteilt: wenig Information, hohe Entropie

Sinnesreize hochstrukturiert: viel Information, geringe Entropie

Signale und Rauschen

Reize welche für das Tier keinen Signalcharakter (Informationsgehalt) haben bezeichnet man als **Rauschen**. Rauschen ist damit eine subjektive Größe, im Regelfall besteht es aus unstrukturierter zufallsverteilter Reizenergie (**physikalisches Rauschen**).



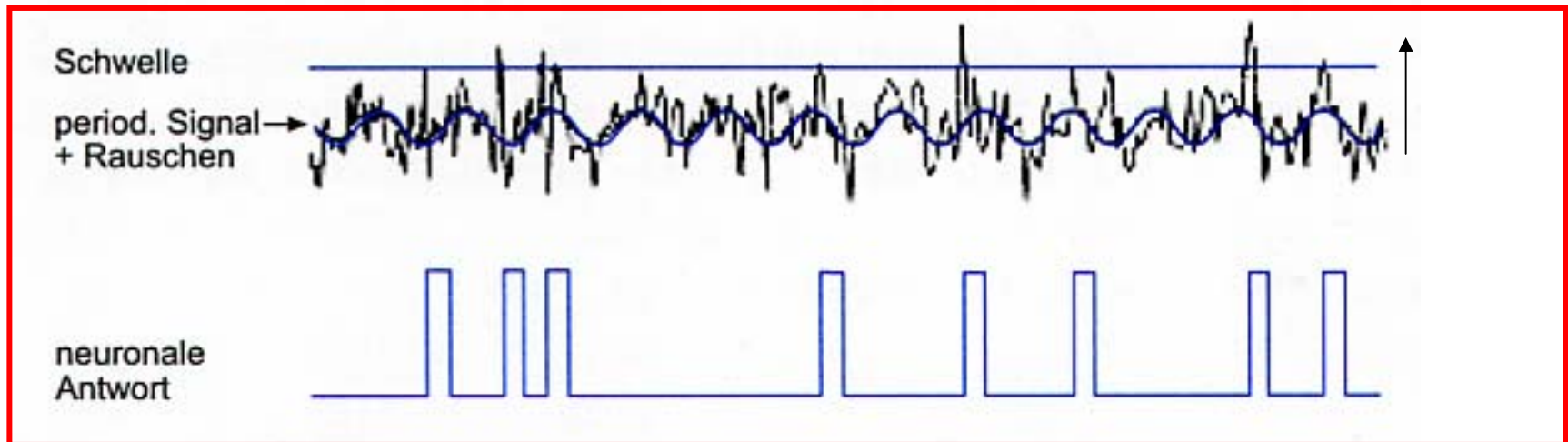
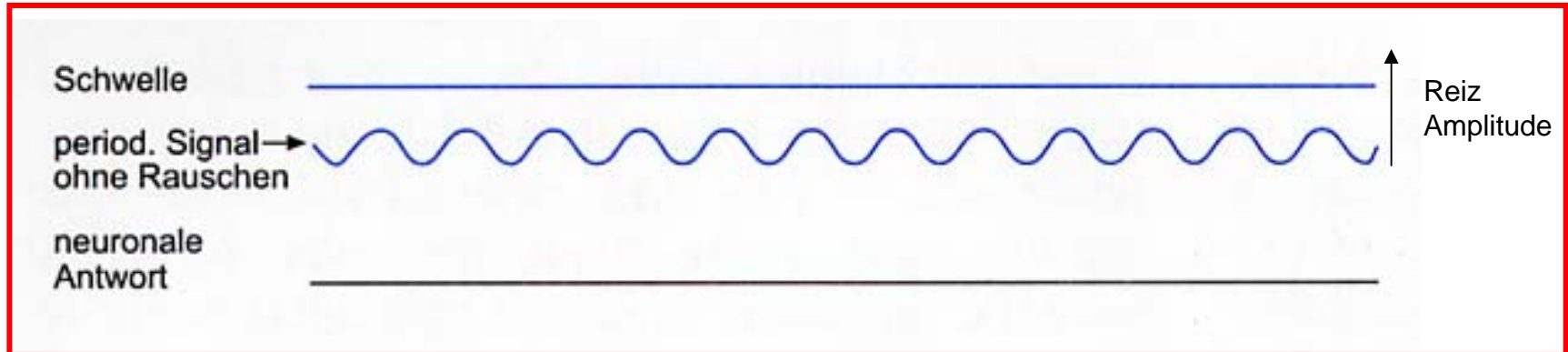
Die Signaldetektion für physikalisches Rauschen hängt ab vom:

Signal/Rausch-Verhältniss S/N (N = Noise) Wenn $S/N \ll 1$ dann ist Signaldetektion schwierig

Aber auch wenn eine prinzipiell Informationshaltige Struktur aufgrund einer zentralnervösen Bewertung nicht wahrgenommen wird, verfällt sie zu Rauschen (**perzeptuelles Rauschen**)

Signale und Rauschen

Es gibt es einen Sonderfall, bei welchem physikalisches Rauschen die Signaldetektion verbessert: **stochastische Resonanz**



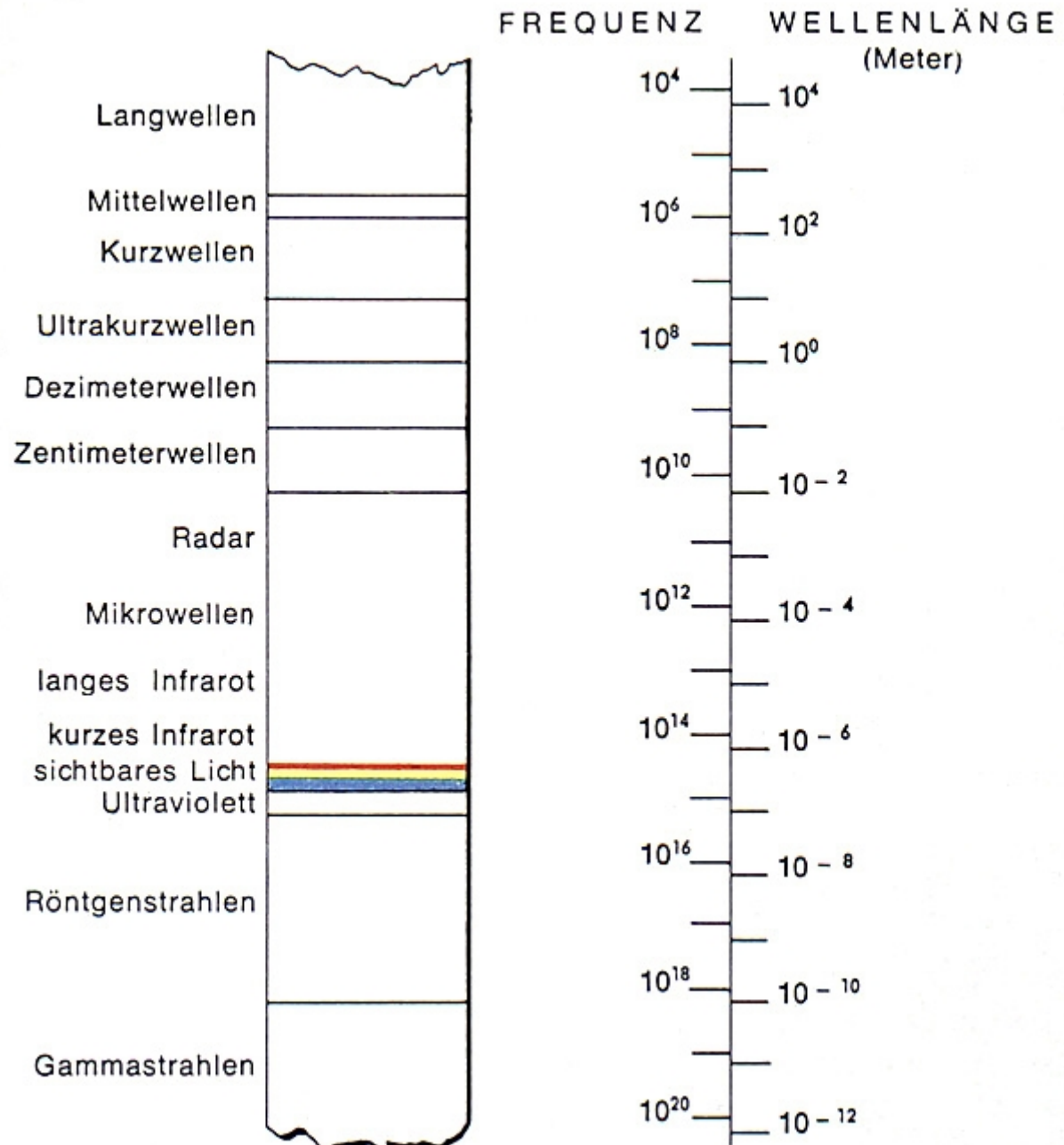
5 ms

Physik des Lichts

**Licht =
elektromagnetische
Wellen**

**Farbe =
Wellenlänge**

Mensch:
sichtbarer Bereich
von **ca. 400 nm (blau)**
bis **ca. 700 nm (rot)**



Weitere Eigenschaften von Licht

Licht als Welle (Maxwell)

Transversalwelle: Schwingebene von elektrischem und magnetischem Feldvektor senkrecht zur Ausbreitungsrichtung
Beide Vektoren stehen auch senkrecht zueinander
Elektrisches Feld induziert magnetisches Feld u. umgekehrt

Kohärentes Licht: von einer Punktquelle(z.B. Laser)
Phasenlage der Schwingung ist genau definierbar

Inkohärentes Licht: viele Punktquellen (Glühlampe)
Phasenlage ändert sich zufallverteilt

polarisiertes Licht: Transversale Schwingebene des Lichtes (elektrischer Feld-Vektor) bleibt konstant, z.B. durch Polarisationsfilter. Licht aus Glühlampe ist unpolarisiert. Sonnenlicht hat polarisierte Komponenten

Licht als Partikel (Planck)

Lichtquanten oder auch **Wellenpakete**

$E = h \cdot c / \lambda$ h : Plancksches Wirkungsquantum: $6.625 \times 10^{-34} \text{ J s}$;
 c Lichtgeschwindigkeit; λ Wellenlänge

Reizquantität und Qualität

Tabelle 1.1. Reizparameter

Reiz	Quantität [Maßeinheit]	Qualität [Maßeinheit]
Licht	Lichtfluss [Photonen/cm ² /s/nm]	Wellenlänge [nm]
Schall	Schalldruck [μPa] ^a	Frequenz [Hz]
Duft	Stofffluss [Moleküle/cm ³ /s]	Molekülart

Information ist enthalten in der zeitlichen und räumlichen Veränderung von Quantität und Qualität

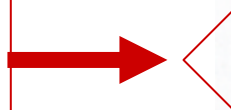
Wie wird Licht durch das Transportmedium verändert ?

Licht ist idealer Informationsträger da es sich instantan (300 000 km/s) ausbreitet und Ausbreitungsgeschwindigkeit nicht vom Medium abhängt. Außerdem ist es durch Sonne überall verfügbar und hat aufgrund der kurzen Wellenlängen (300-700 nm) sehr gute Abbildungseigenschaften
Aber: es wird abgeschwächt und gefiltert durch das Medium:

Tabelle 1.2. Abschwächungsdistanzen

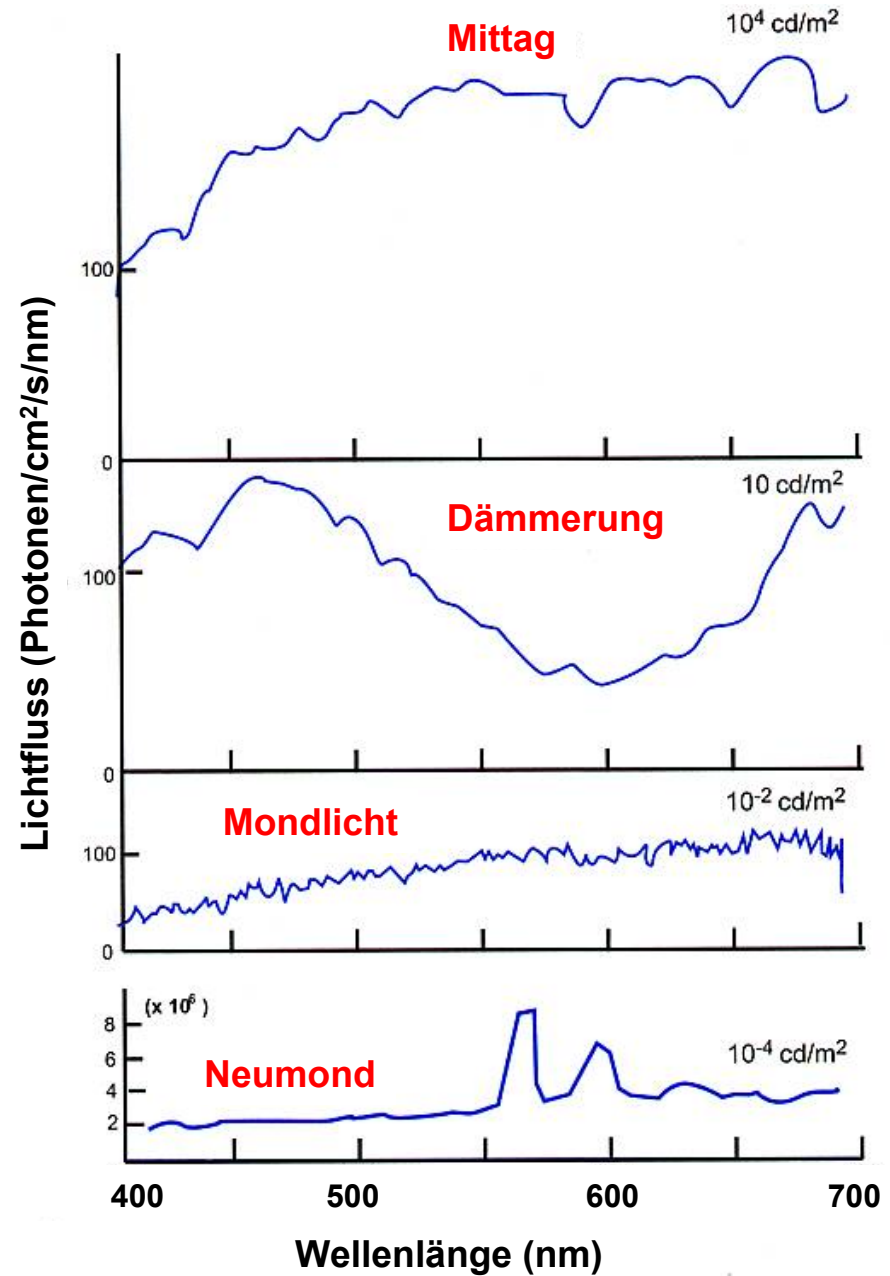
Reiz	im Medium		
	Luft ^a	Wasser	Schlamm
Licht			
UV 300 nm	> 1 km	1,5 m	< 1 mm
Blau 400 nm	> 10 km	17 m	< 1 mm
Grün 500 nm	> 10 km	40 m	< 1 mm
Rot 700 nm	> 10 km	1,7 m	< 1 mm
IR 1000 nm	> 1 km	0,03 m	< 1 mm
Schall			
20 Hz	200 km	ca. 10 000 km	20 km
1 kHz	1 km	ca. 100 km	5 km
50 kHz	3 m	ca. 1 km	1 km

Biologisch
relevant



Abschwächungsdistanz = Entfernung in der die Reizintensität auf 37% abgesunken ist

Lichtfluss bei Tag und Nacht



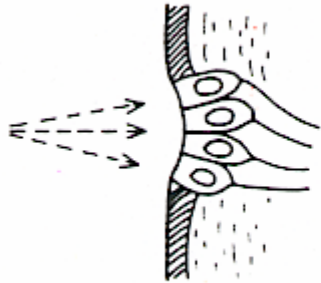
Zusammenfassung: **Physik des Lichts**

- Strukturierte Sinnesreize niedriger Entropie haben hohen Informationsgehalt
- **Signal/Rausch-Verhältniss** S/N-Ratio
- Licht als **Transversalwelle** oder als **Quanten**
- Lichtquantität /qualität → **Photonenfluss /Wellenlänge**
- Biologisch relevanter Wellenlängenbereich 400-700 nm hat beste Ausbreitungseigenschaften in unserer Umwelt.

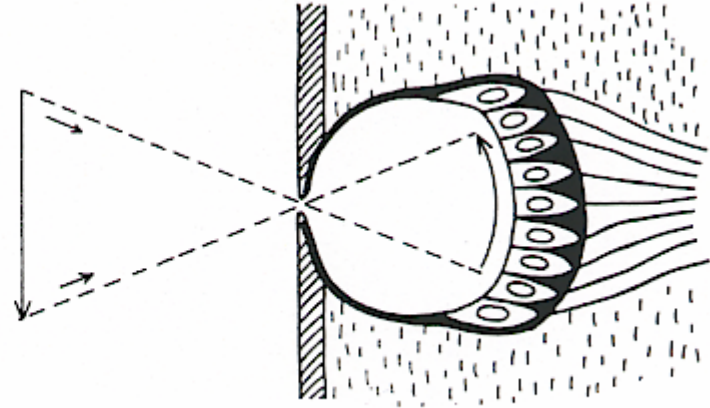
Augentypen Augenstellung

Augentypen

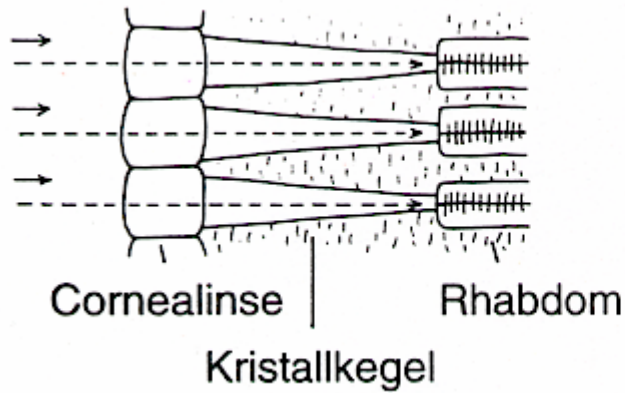
Punktauge



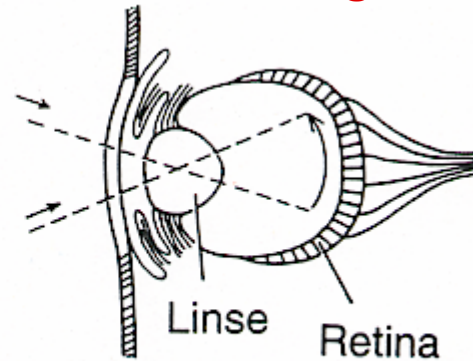
Lochkameraauge



Komplexauge

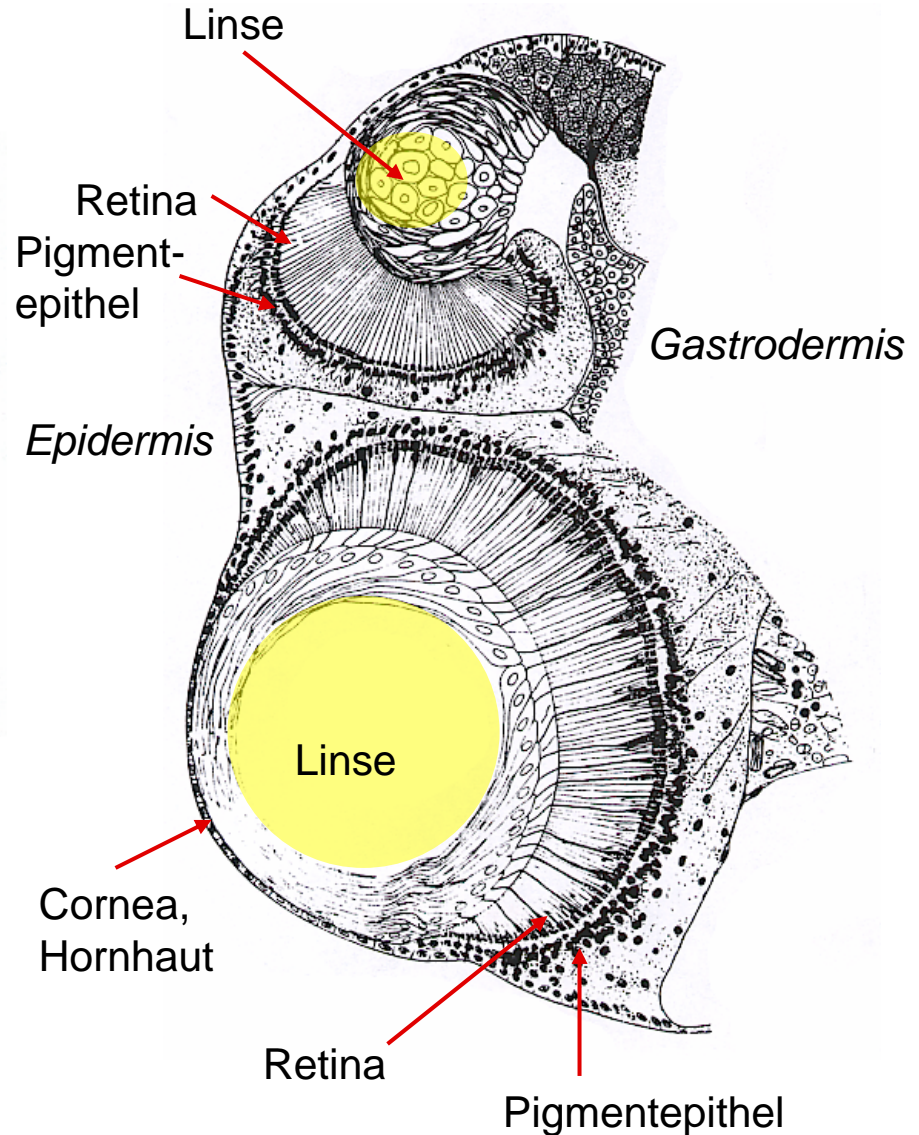
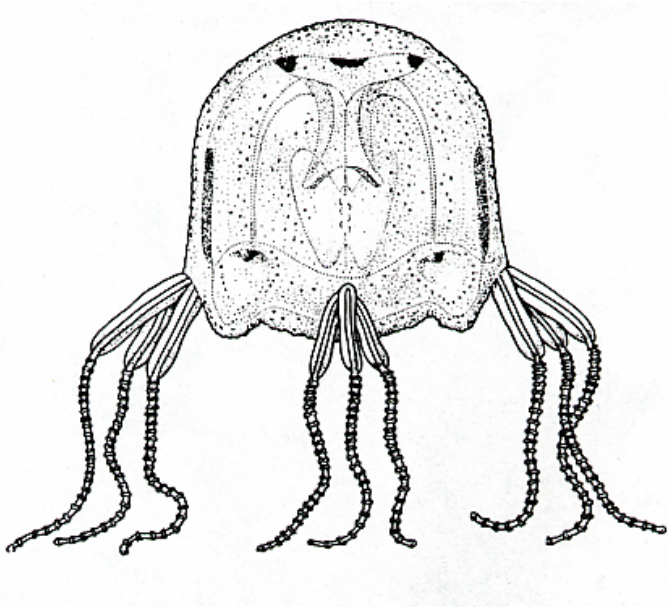


Linseauge

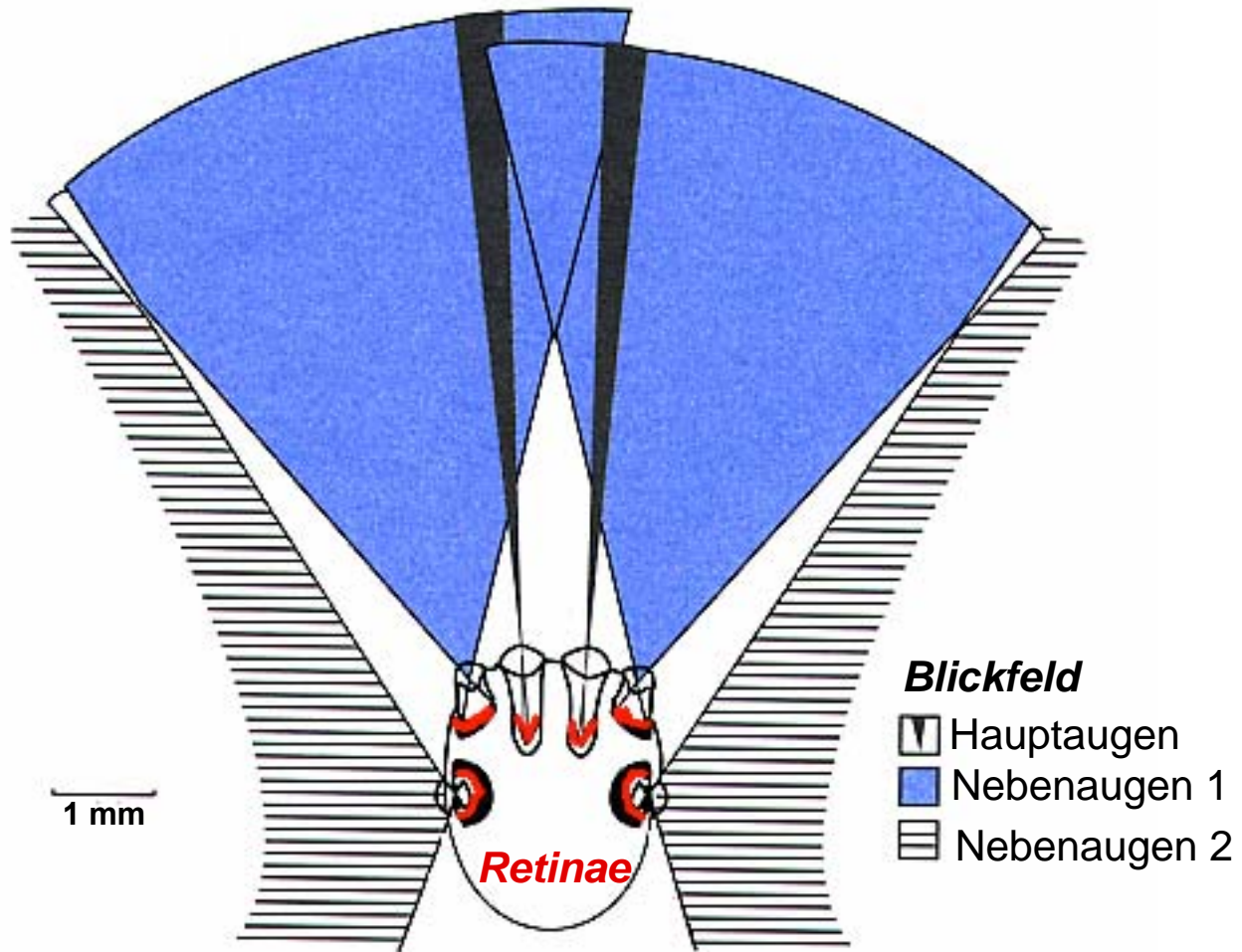


Linseaugen bei Cnidariern

Würfelqualle mit Augenfeldern

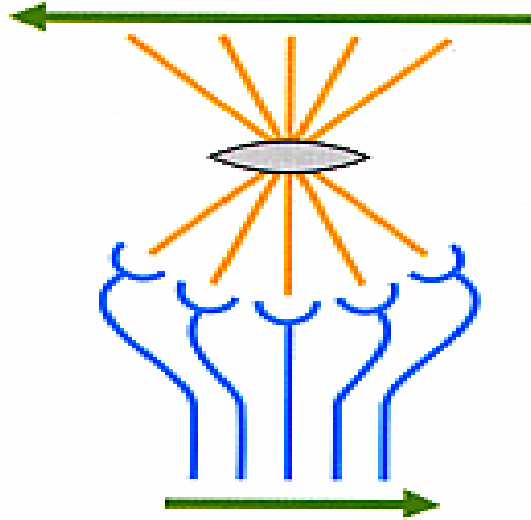


Linsenaugen bei Spinnen

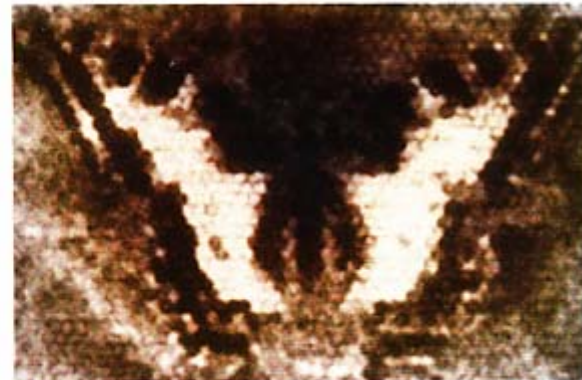
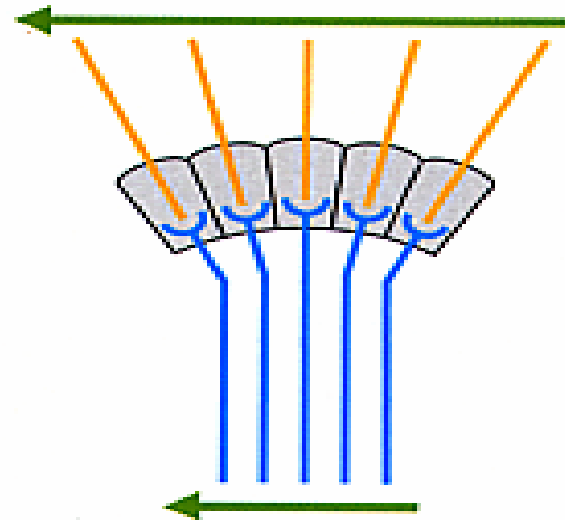


Komplexaugen

Bildentstehung im Linsenauge

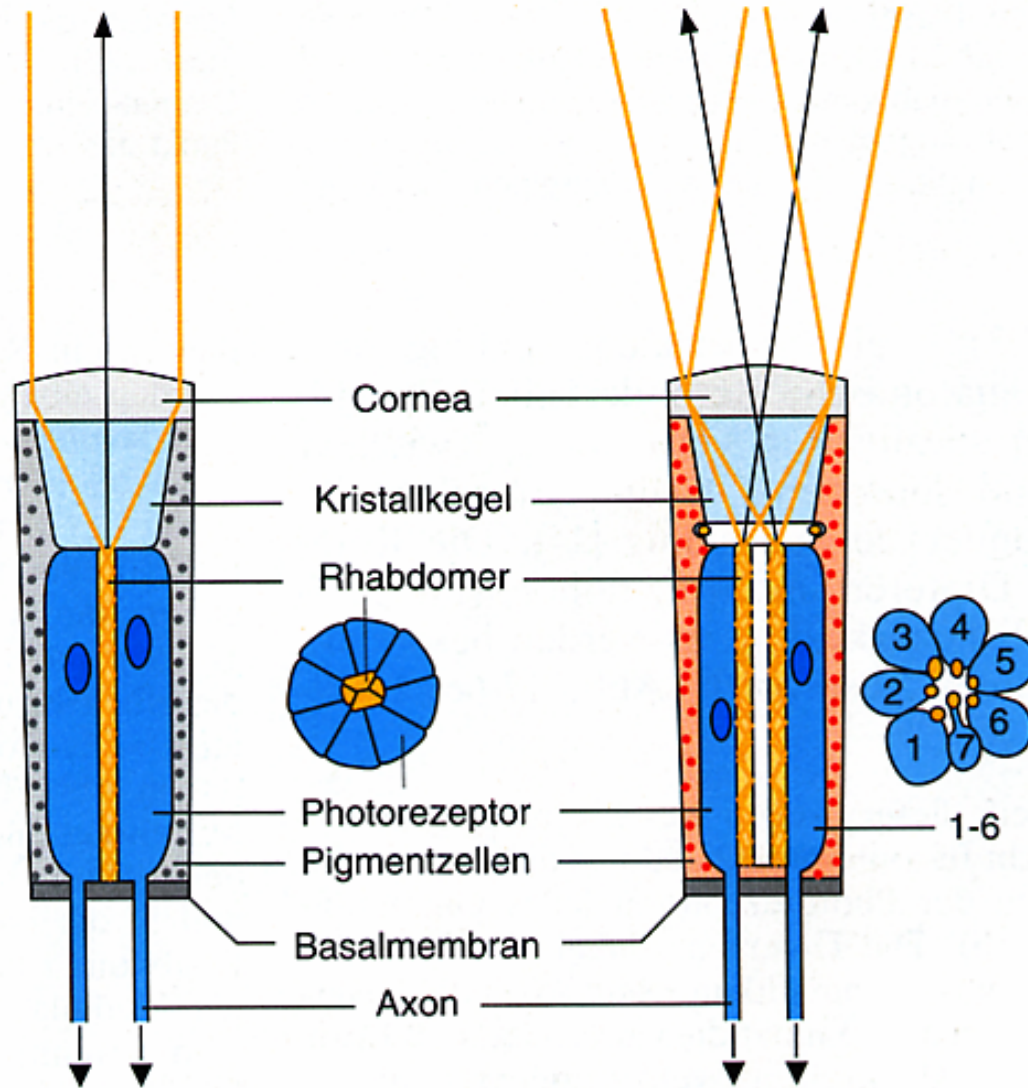


im Komplexauge



die einzelne Facette – das Ommatidium

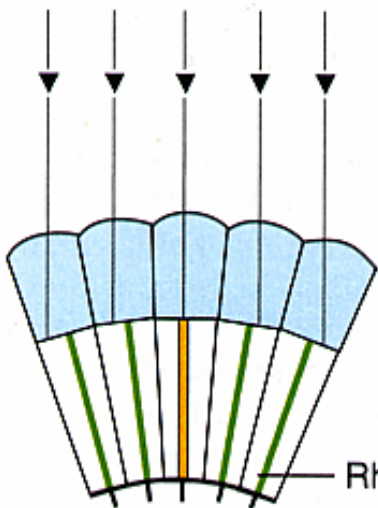
Biene:
fusioniertes
Rhabdom,
wirkt als
ein Lichtleiter



Musca:
unfusioniertes
Rhabdom,
Rhabdomere
divergieren in
ihren optischen
Achsen

Typen von Komplexaugen

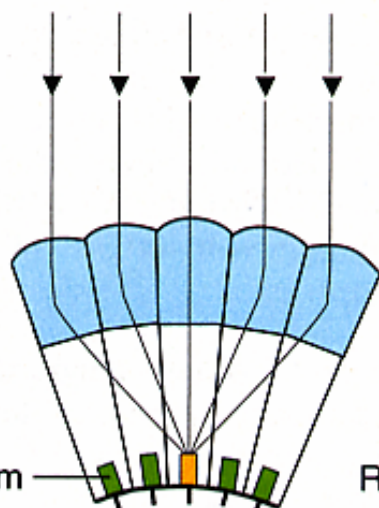
Appositions- auge



typisch für tagaktive
Insekten:
Hymenoptera
Odonata
Coeloptera

und Crustacea

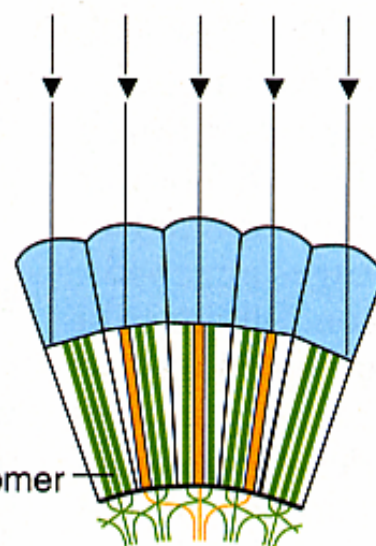
optisches Superpositions- auge



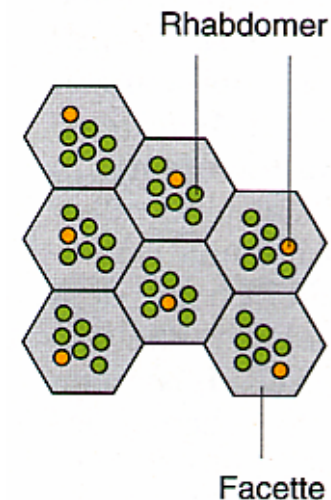
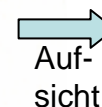
bei nachtaktiven
Insekten:
Coeloptera
Lepidoptera

und Crustacea

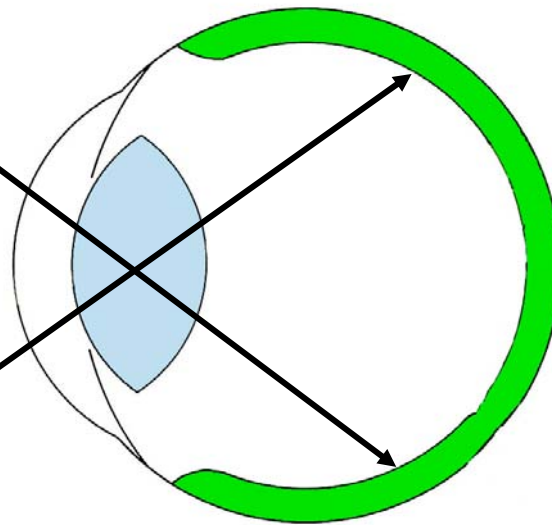
neurales Superpositions- auge



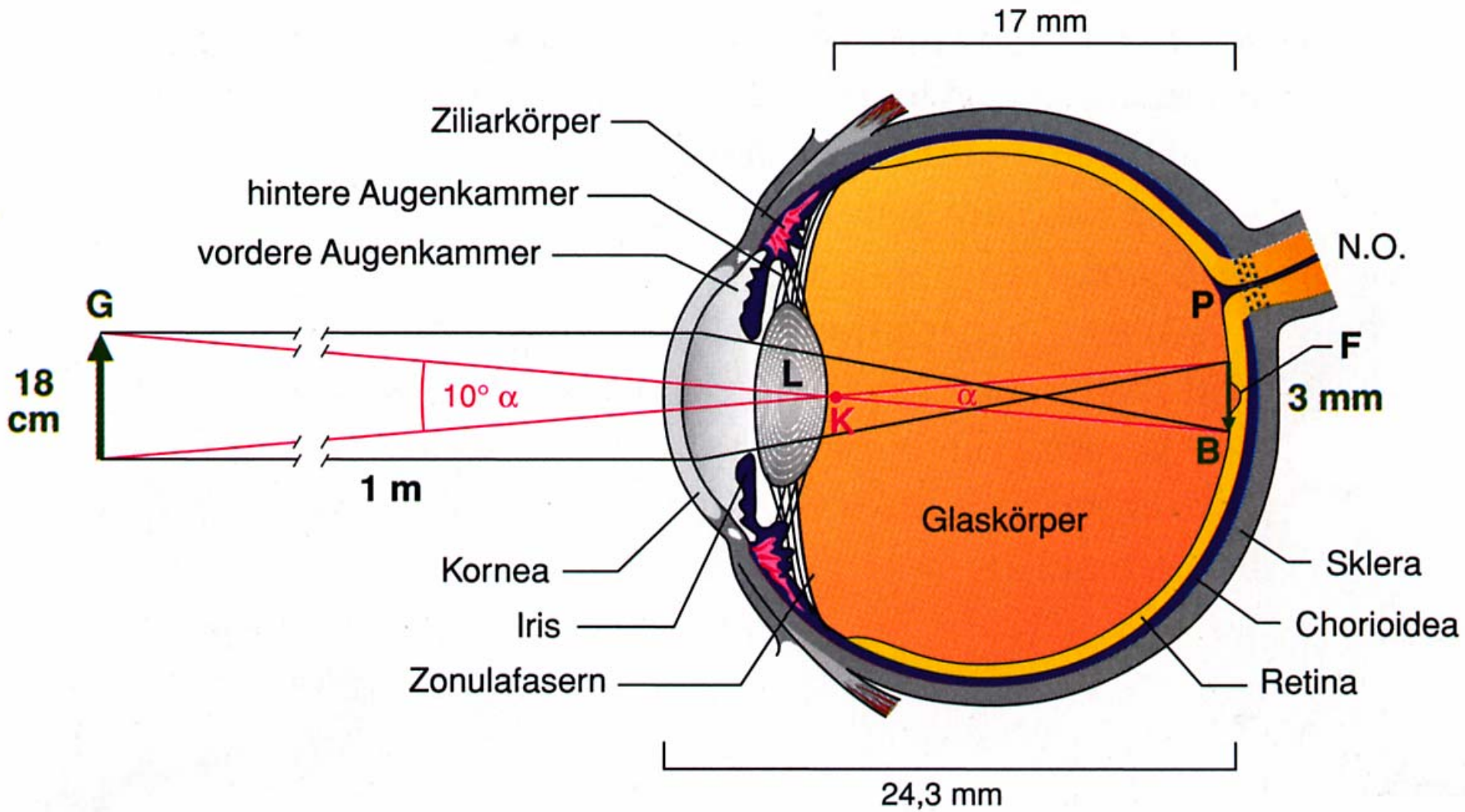
bei höheren
Dipteren:
Musca, Drosophila



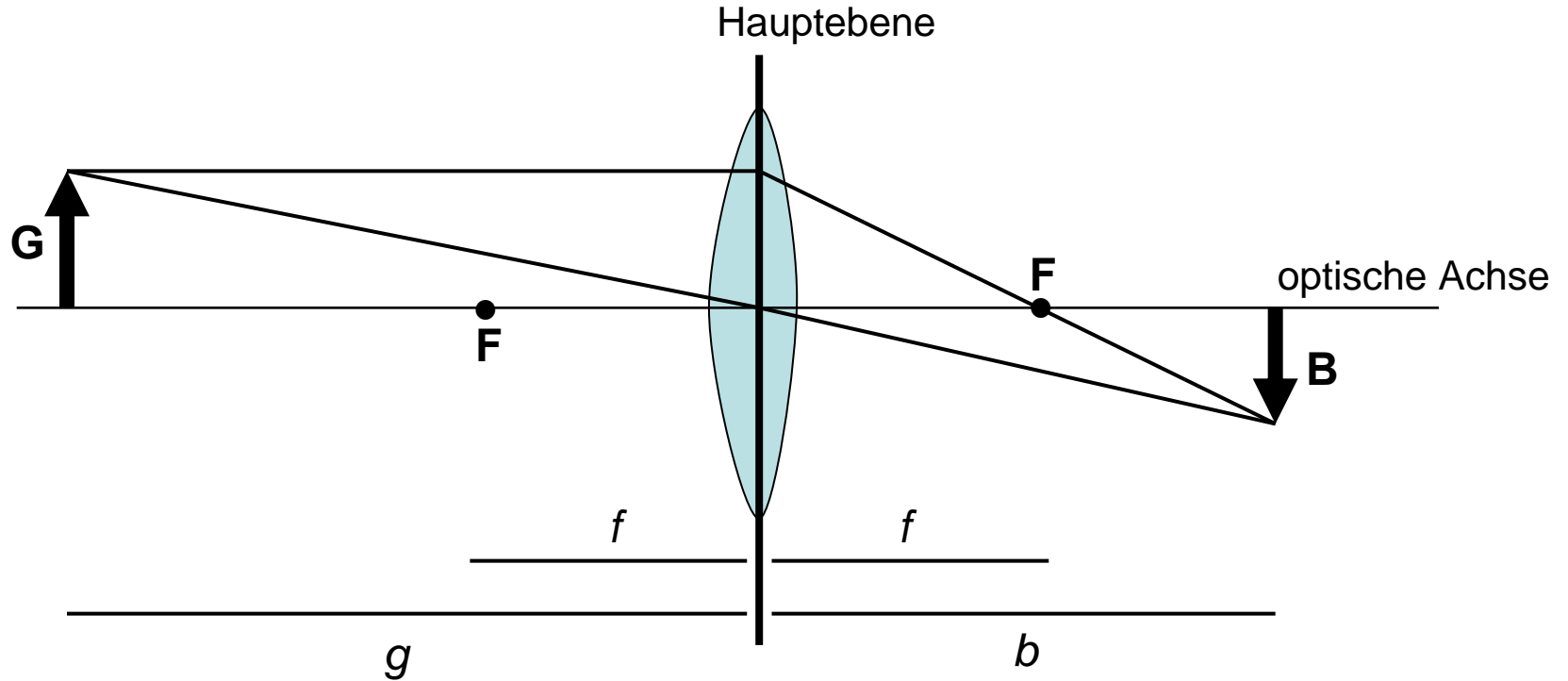
Augenoptik: umgekehrtes, verkleinertes Bild auf der Netzhaut



menschliches Auge



Strahlengang Linse



$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

g = Gegenstandsweite

b = Bildweite

f = Brennweite [m]

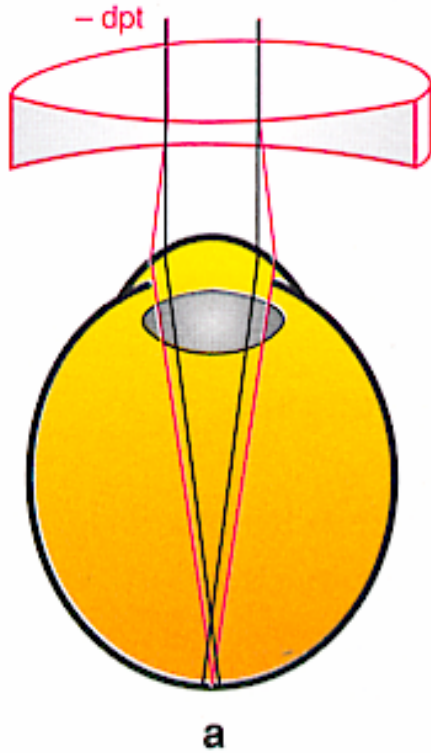
1/f = Brechkraft [Dioptrien, D = 1/m]

z. B.: $f = 0,25 \text{ m} \rightarrow 4\text{D}$

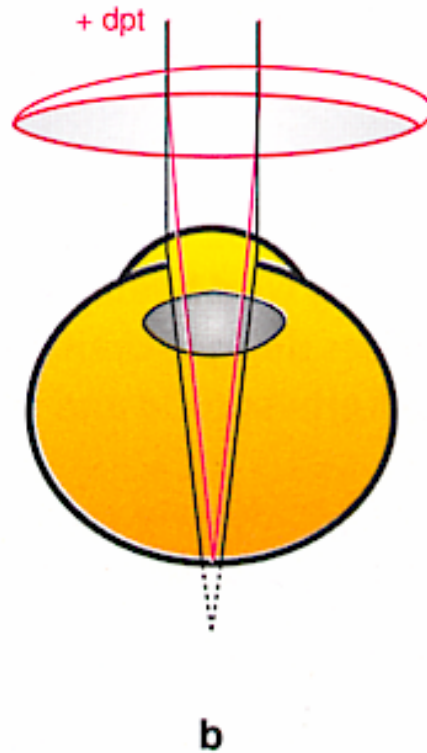
Mensch: $f = 1,7 \text{ cm} \rightarrow 58\text{D}$

Augenfehler

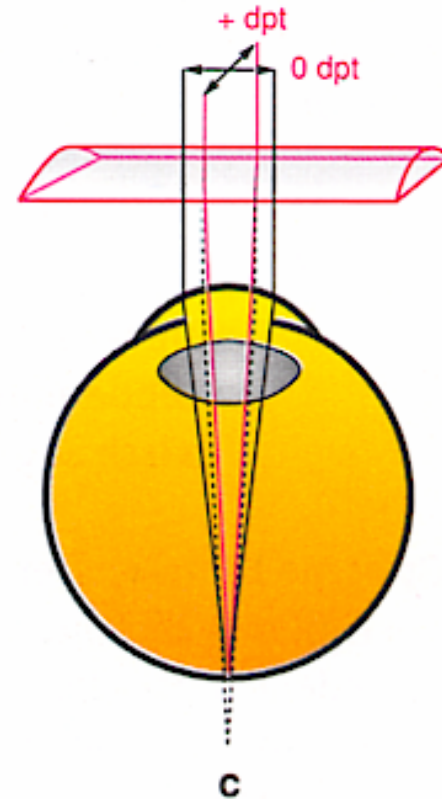
Kurzsichtigkeit



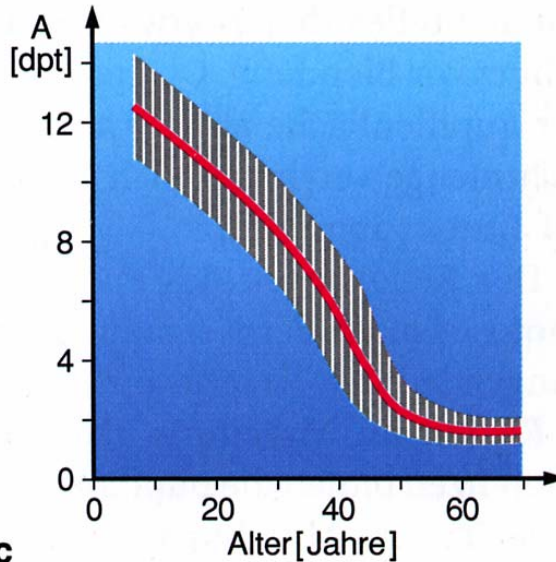
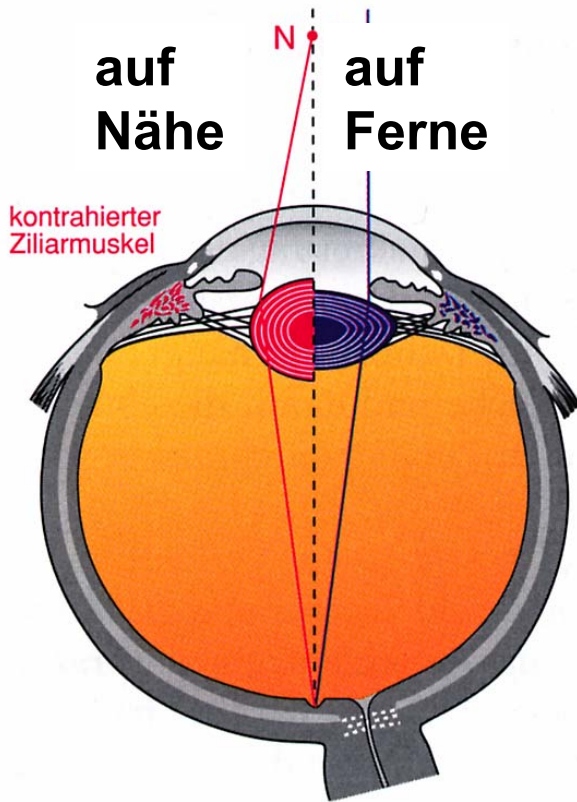
Weitsichtigkeit



Astigmatismus



Akkommodation



Gesamtbrechkraft
fern akkom. (∞) 58 D

Kornea 42 D
Linse 16 D

Gesamtbrechkraft
nah akkom. (10cm) 70 D

Kornea 42 D
Linse 28 D

Akkommodationsbreite der Linse: ~12 D (altersabhängig)

Gesichtsfeld



Panoramisches Gesichtsfeld

= beidäugiges

Gesamtgesichtsfeld

200°

Monokulares

Gesichtsfeld

160°

Binokularer

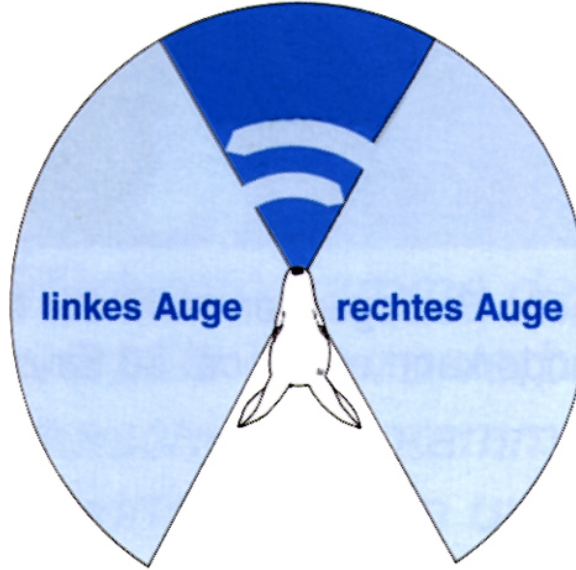
Überlappungsbereich

120°

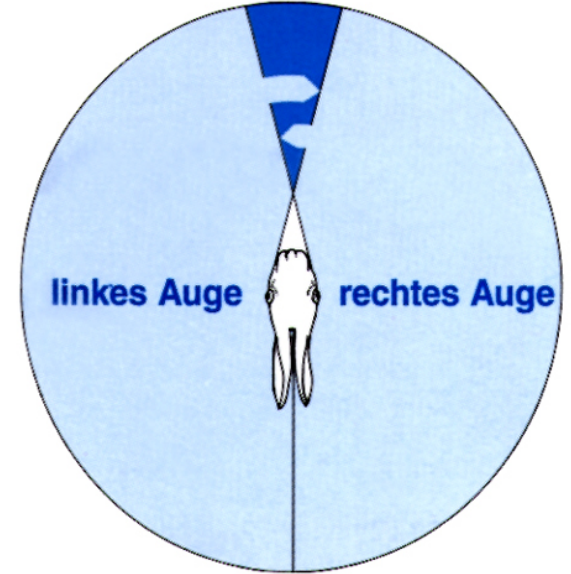
Gesichtsfeld und Augenstellung



Hund, Katze,...



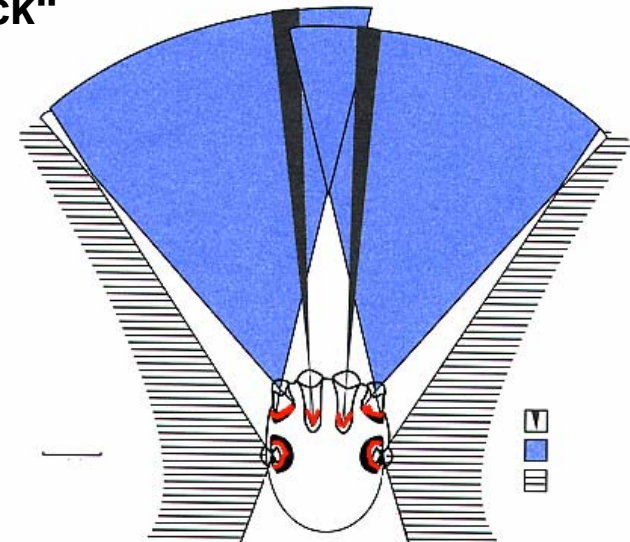
Reh, Pferd,...



Hase

Verschiedene Säuger haben unterschiedlichen „Rundblick“
(verschieden große panoramische Gesichtsfelder)

Großer Rundblick = kleiner binokularer Bereich
= schlechtes räumliches Sehen

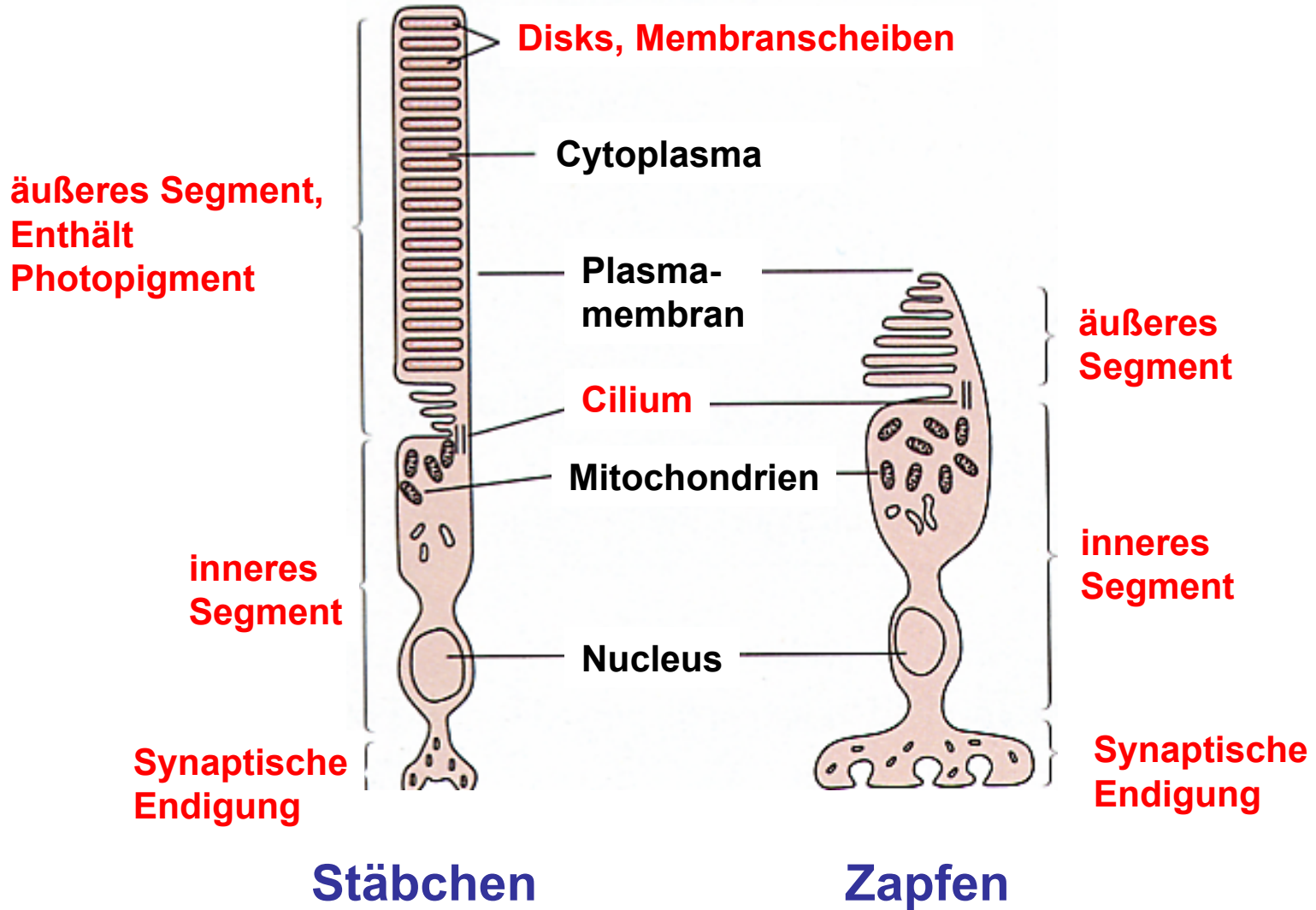


Zusammenfassung: **Augentypen, Augenstellung**

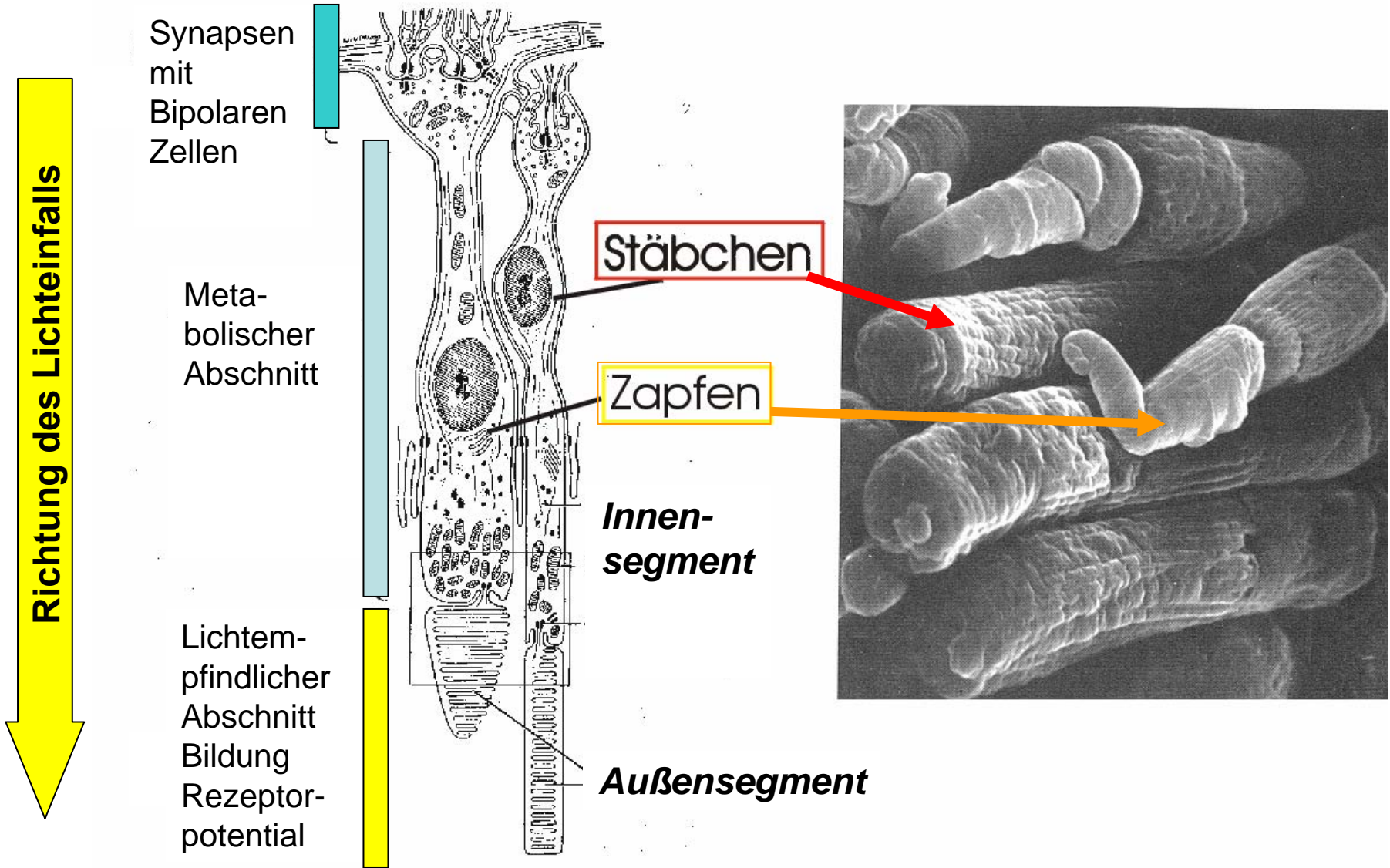
- **Punktauge Lochkammerauge Linsenauge Komplexauge**
- **Komplexauge**: einzelne Facette(**Ommatidium**) aus mehreren Zellen, deren Sehpigment-Kompartimente (**Rhabdomere**) fusioniert oder unfusioniert sein können
Typen: **Appositionsauge** oder **Superpositionsauge**
- **Linsenauge**: Gegenstandsweite, Bildweite, Brennweite, Brechkraft (Dioptrin)
Akkommodation, Kurz/Weitsichtigkeit ? Astigmatismus ?
- **Augenstellung** und das **monokulare Gesichtsfeld** jedes Auges bestimmen das **binokulare Gesichtsfeld**

Photorezeptoren und Phototransduktion

Photorezeptoren - Wirbeltiere



Photorezeptorzellen



Stäbchen

Spezialisiert auf Nachtsehen

Hohe Sensitivität

Viel Photopigment
(Perzeption einzelner Photonen)

Geringe zeitliche Auflösung

Geringe räumliche Auflösung

Achromatisch

1 Pigment
schwarz/weiss-Sehen

Nicht in Fovea vorhanden



Zapfen

Spezialisiert auf Tagsehen

Geringere Sensitivität

Weniger Photopigment

Hohe zeitliche Auflösung

Hohe räumliche Auflösung

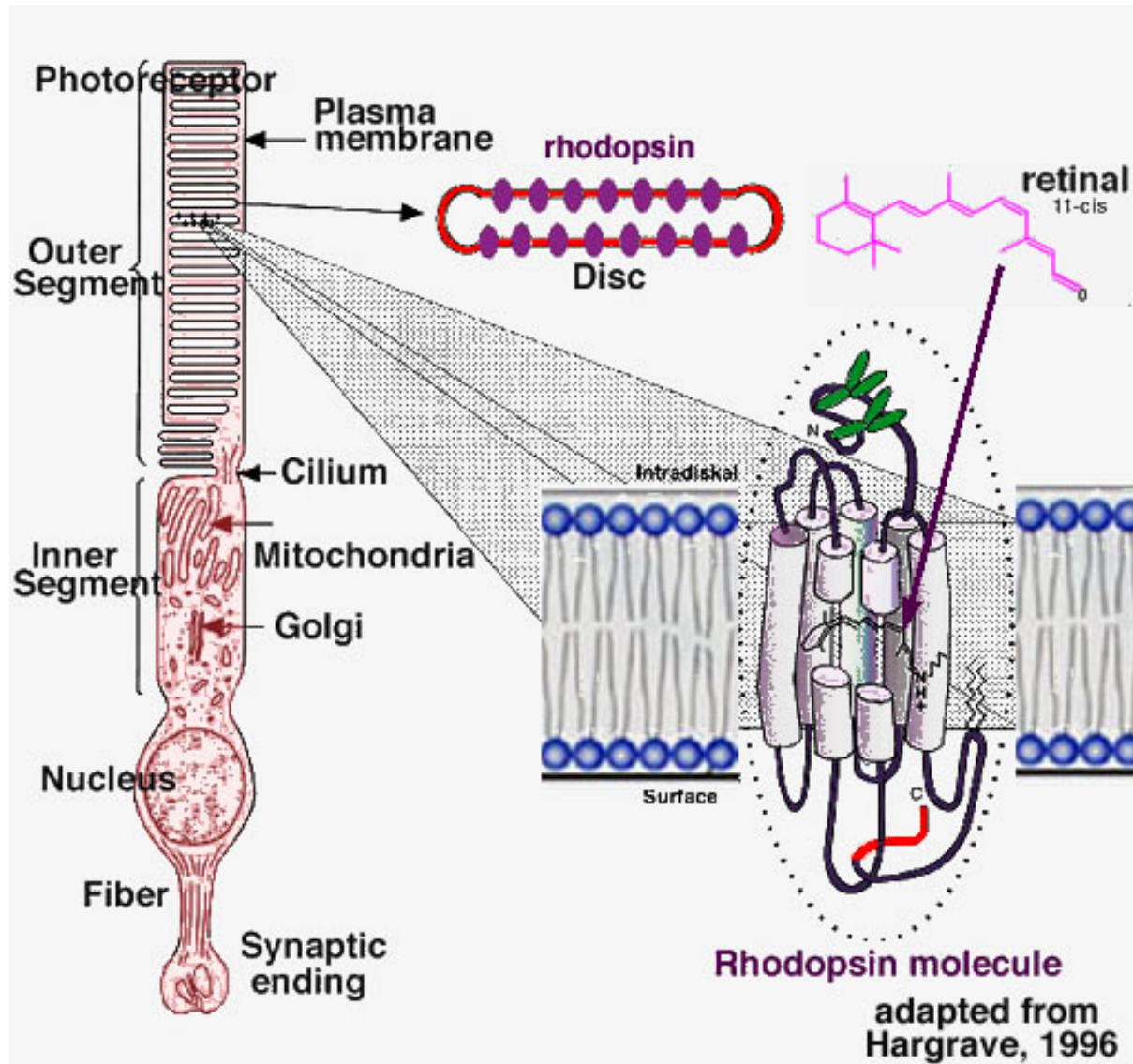
Chromatisch

3 Pigmente- 3 Zapfentypen
Farbsehen

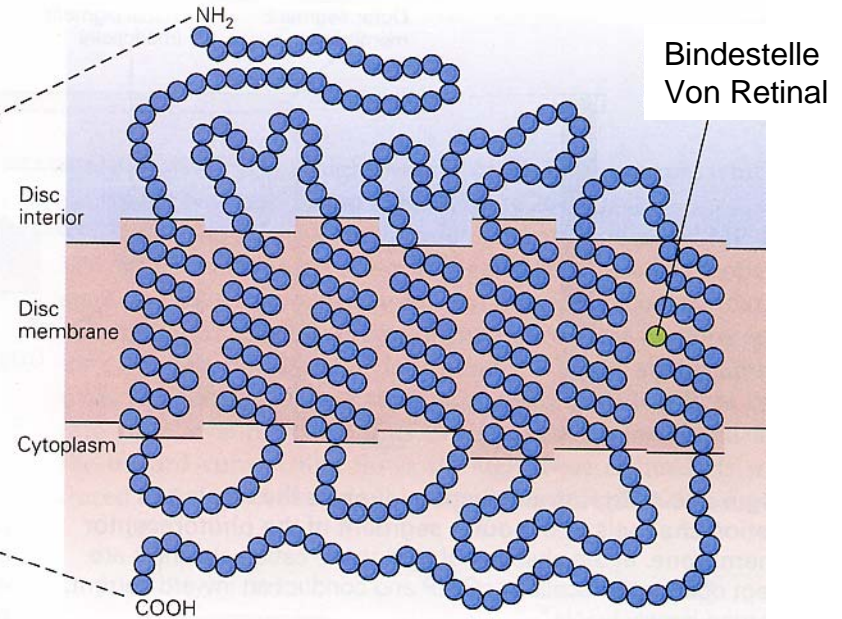
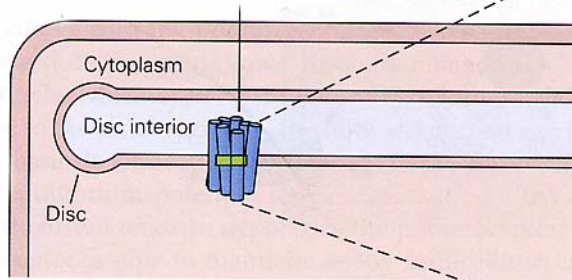
konzentriert in der Fovea



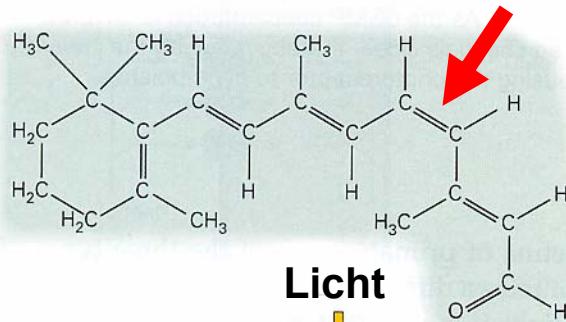
Rhodopsin als Lichtrezeptormolekül



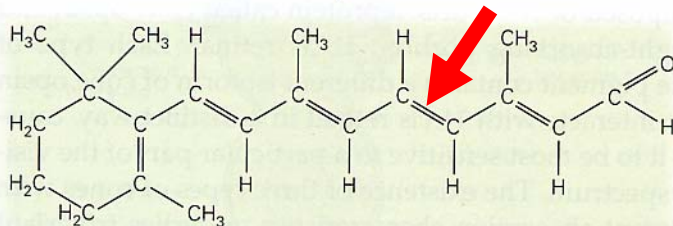
Rhodopsin-Aktivierung



11-cis Retinal



Licht



All-trans Retinal

Absorption eines Photons

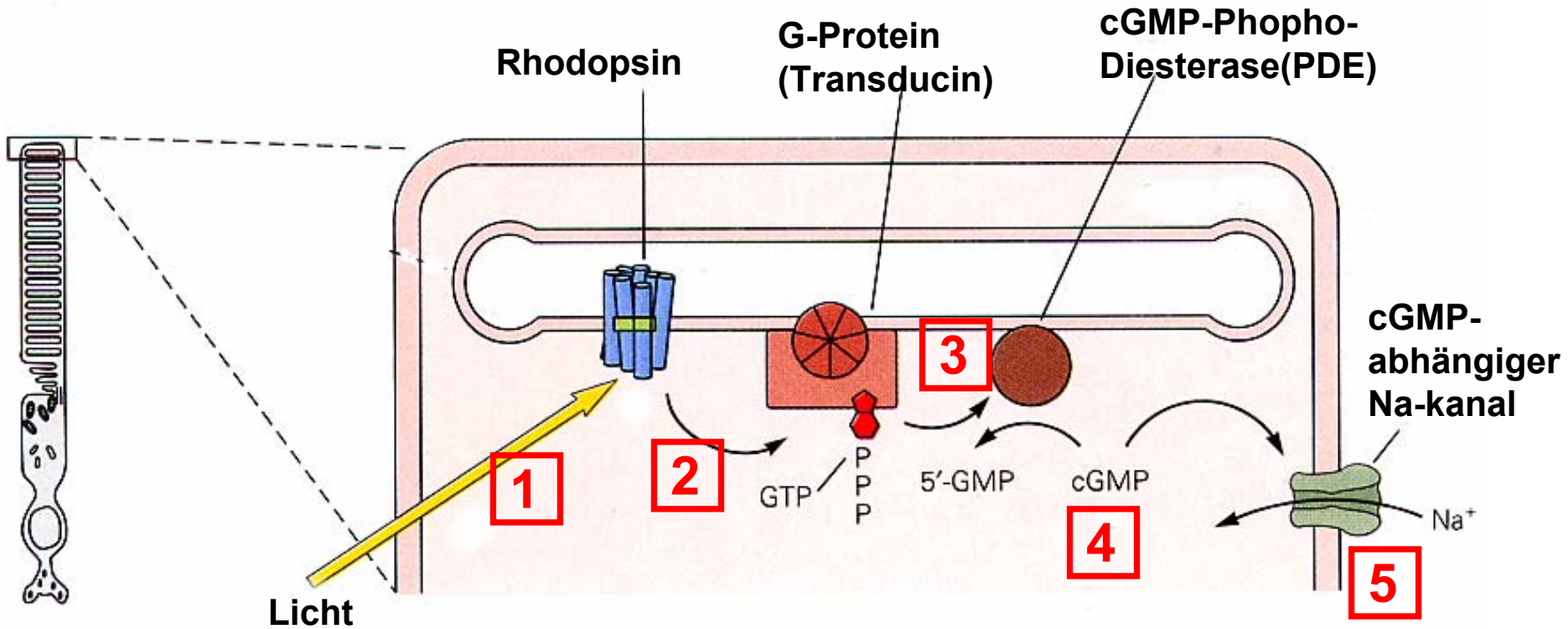
→ Rotation eine C-C Doppelbindung

→ Übergang von 11-cis in stabilere All-trans Konfiguration

→ Konformationsänderung im Opsin

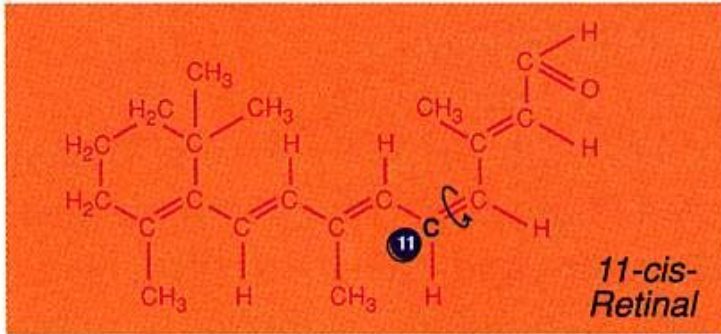
Rhodopsin → Metarhodopsin II

Phototransduktionskaskade - Wirbeltiere

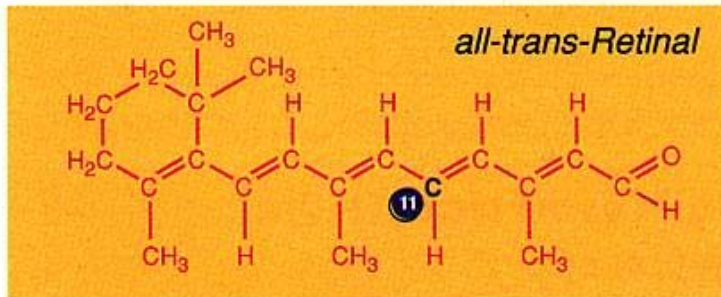


- 1** Licht: Rhodopsin \rightarrow Metarhodopsin II (R^*)
- 2** Aktivierung von Transducin ($T_{\alpha\beta\gamma}$) durch R^* : T_{α} bindet GTP und spaltet sich ab
- 3** T_{α} -GTP aktiviert PDE
- 4** PDE hydrolisiert cGMP zu 5'-GMP
- 5** cGMP abhängiger Na-Kanal schließt sich \rightarrow Hyperpolarisation

Dunkel-Adaptation

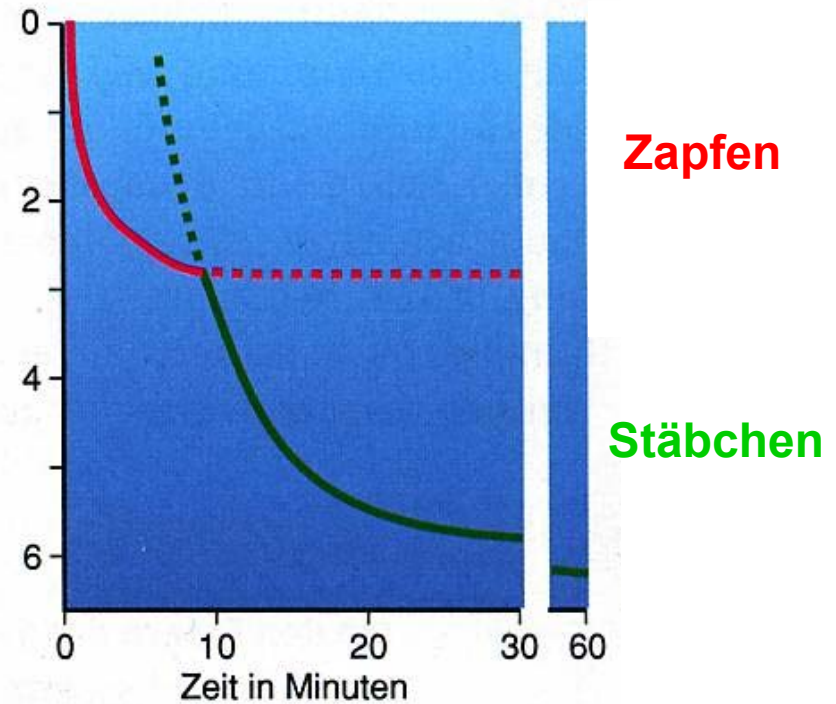


hell ⇄ dunkel

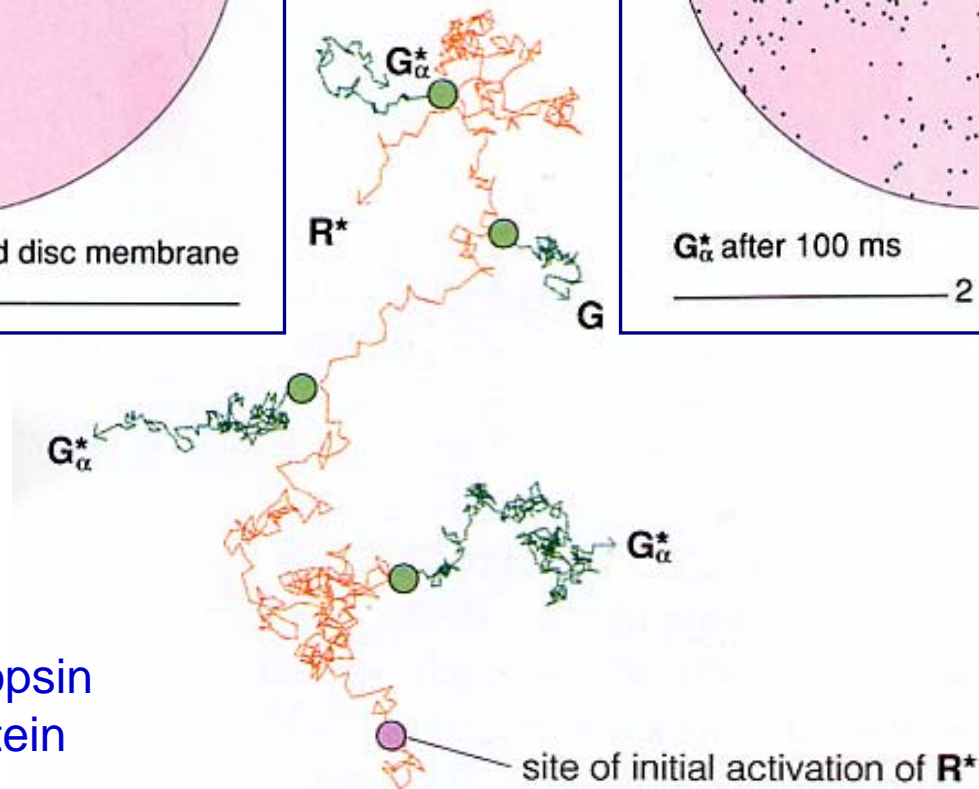
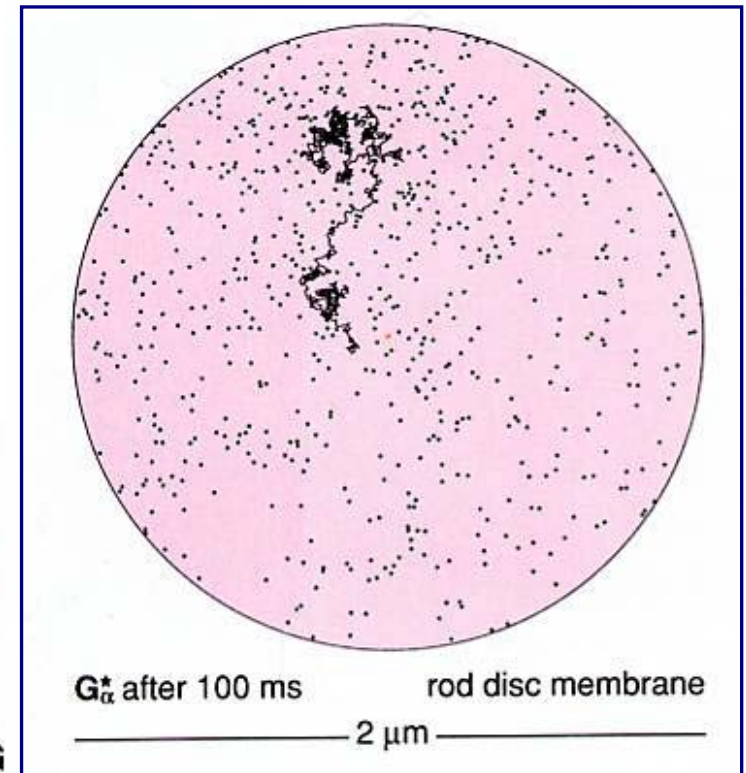
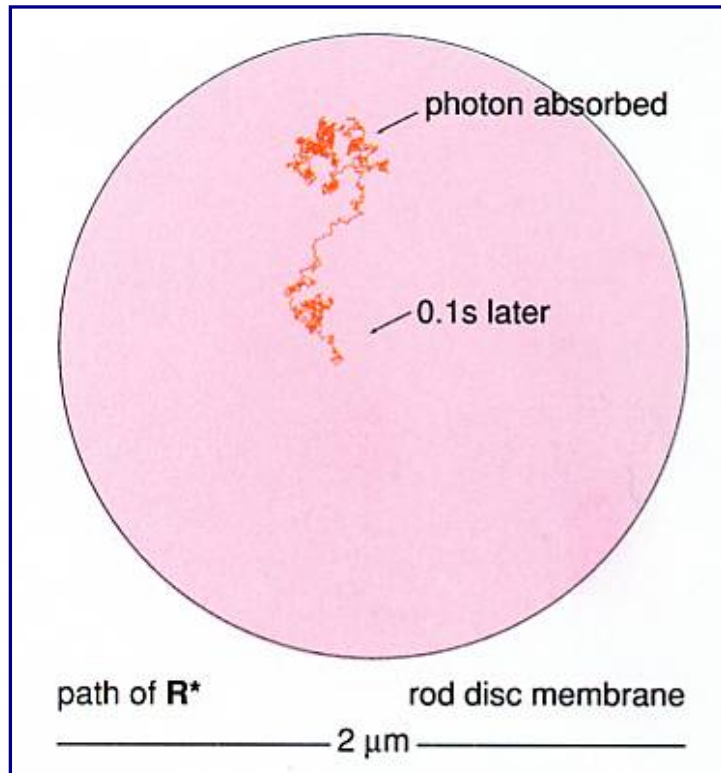


Zeitverlauf der Adaptation:

log rel Empfindlichkeit



Einzelne Photonen aktivieren Rhodopsin



R^* aktiviertes Rhodopsin
 G^* aktiviertes G-protein

Verstärkung durch Photo-Kaskade

1. 1 Photon \rightarrow ca. 700 G^*
2. 1 G^* \rightarrow 1 PDE aktiviert
3. 1 PDE kann max. 1000-4000 cGMP hydrolisieren

Gesamtverstärkung etwa 10^6

Zur Öffnen eines Na-Kanals werden 3 cGMP benötigt
Unter Berücksichtigung der Konz. freien cGMP im Cytoplasma:

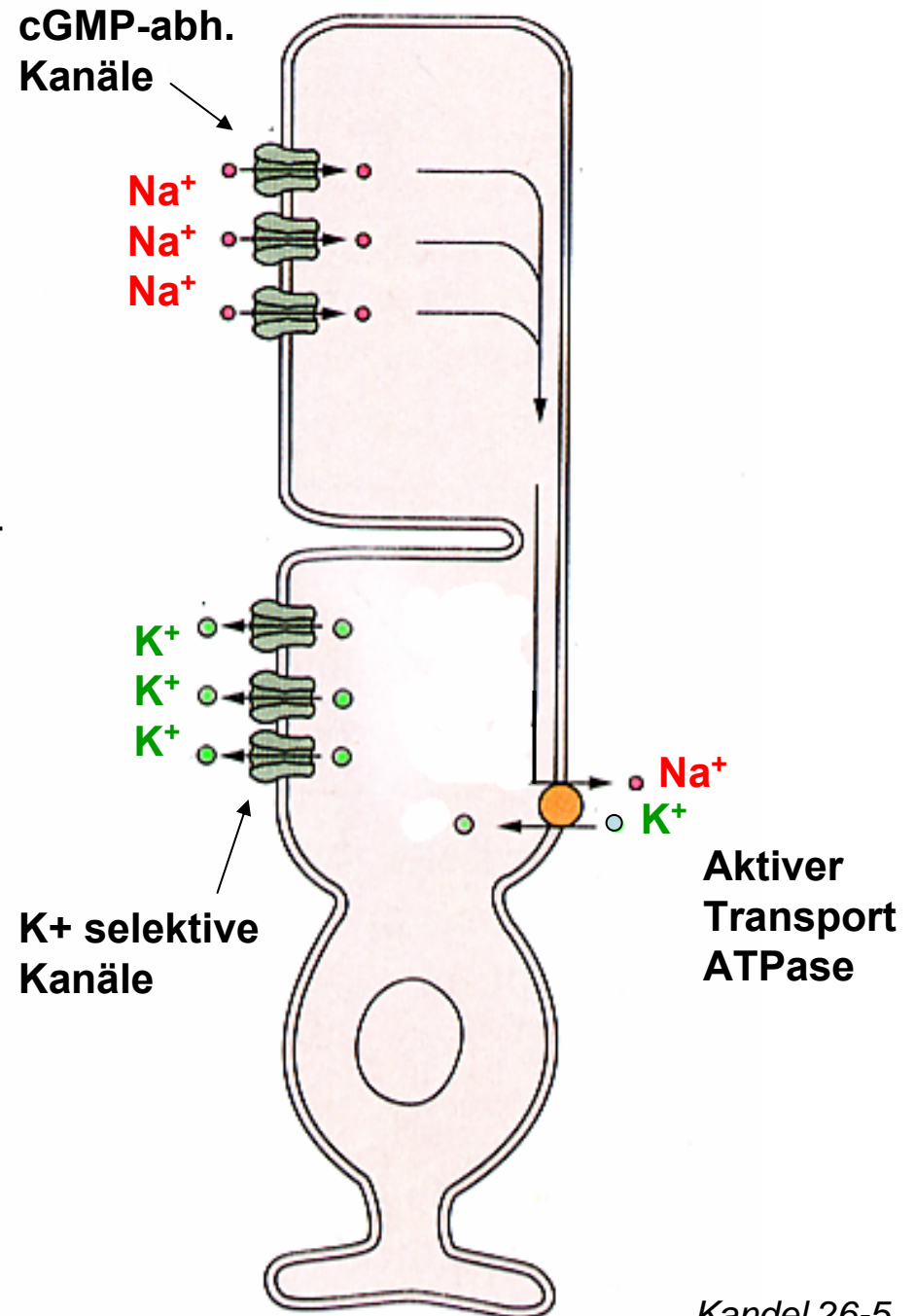
\rightarrow 1 Photon bewirkt etwa die Schließung von 5000 Na-Kanälen
Verminderung des Na-Einstroms um 1 pA (um 5%)
Membranpotential wird um 3% hyperpolarisiert (Rezeptorpotential)

Rezeptorpotential erreicht sein Maximum in Stäbchen allerdings erst 1 s nach Photoneneinschlag

In Zapfen ist Kaskade sehr viel schneller, aber weniger verstärkt

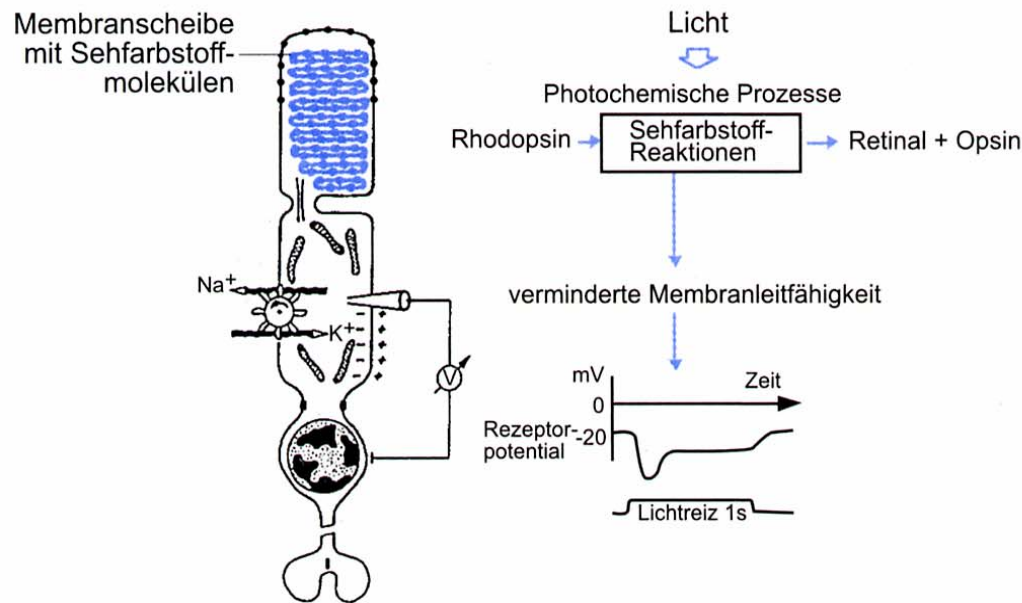
Der Dunkelstrom

- Grundlage für Rezeptorpotential bei Wirbeltieren
- depolarisiert das Membranpotential von -60 mV auf -30 mV
- Na wird aktiv im über Na/K-Austausch-Pumpen in der Membran des Innensegments nach aussen transportiert
- K⁺-Kanäle sorgen für Ladungsgleichgewicht



Wirbeltiere

Zapfen, Stäbchen

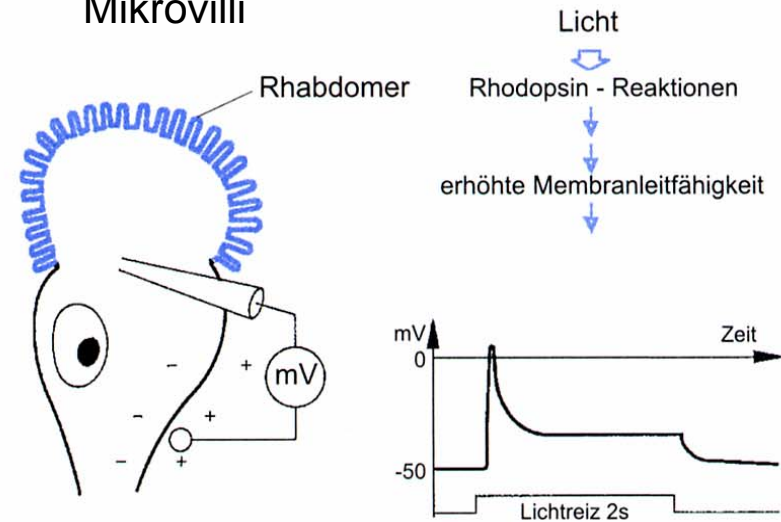


Hyperpolarisation

PDE → cGMP
→ Na Kanäle zu

Arthropoden

Retinula-zellen mit Rhabdomer aus Rhodopsin-haltigen Mikrovilli



Depolarisation

PhospholipaseC → IP3
→ Ca⁺⁺ → Na Kanäle offen

Zusammenfassung:

Photorezeptoren und Phototransduktion

- Wirbeltiere: **Stäbchen** (Achromatisch, sehr sensitiv, langsam) und **Zapfen** (chromatisch, unsensitiv, schnell)
- Mechanismen der **Dunkeladaptation**
- Phototransduktionskaskade (Wirbeltiere):
 1. Photon bewirkt: **11-cis-Retinal** → **all-trans-Retinal**
Rhodopsin → **Metarhodopsin II**
 2. Transducin wird aktiviert: **T α -GTP** spaltet sich ab
 3. T α -GTP aktiviert **PDE**
 4. PDE hydrolisiert **cGMP**
 5. **cGMP-abhängiger Na-Kanal** schließt sich → **Hyperpolarisation**
- Phototransduktion bei Arthropoden: **Depolarisation** bei Lichteinfall aufgrund der Bildung von **IP₃** und Öffnung von Ca-abhängigen Na-Kanälen