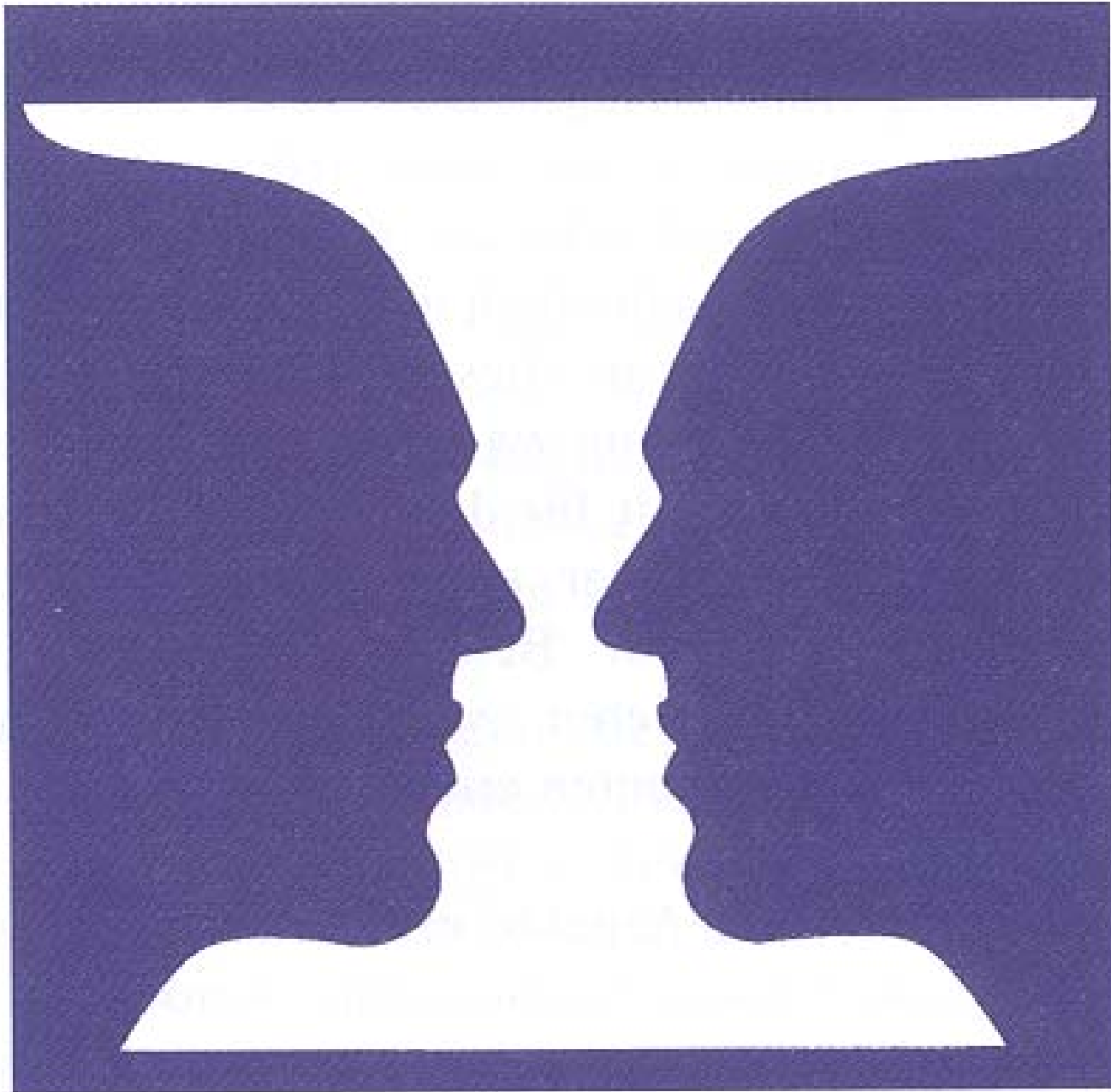
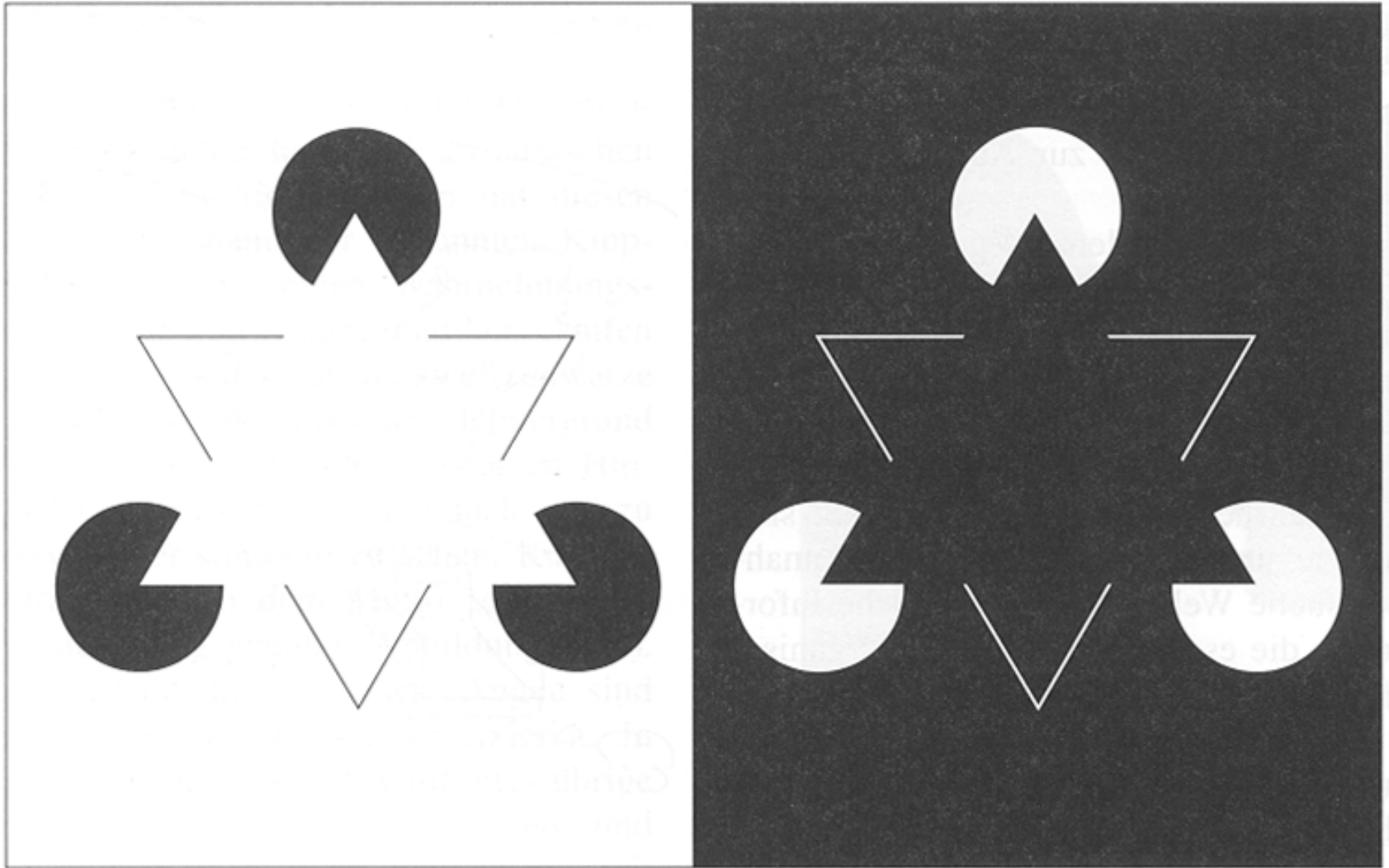


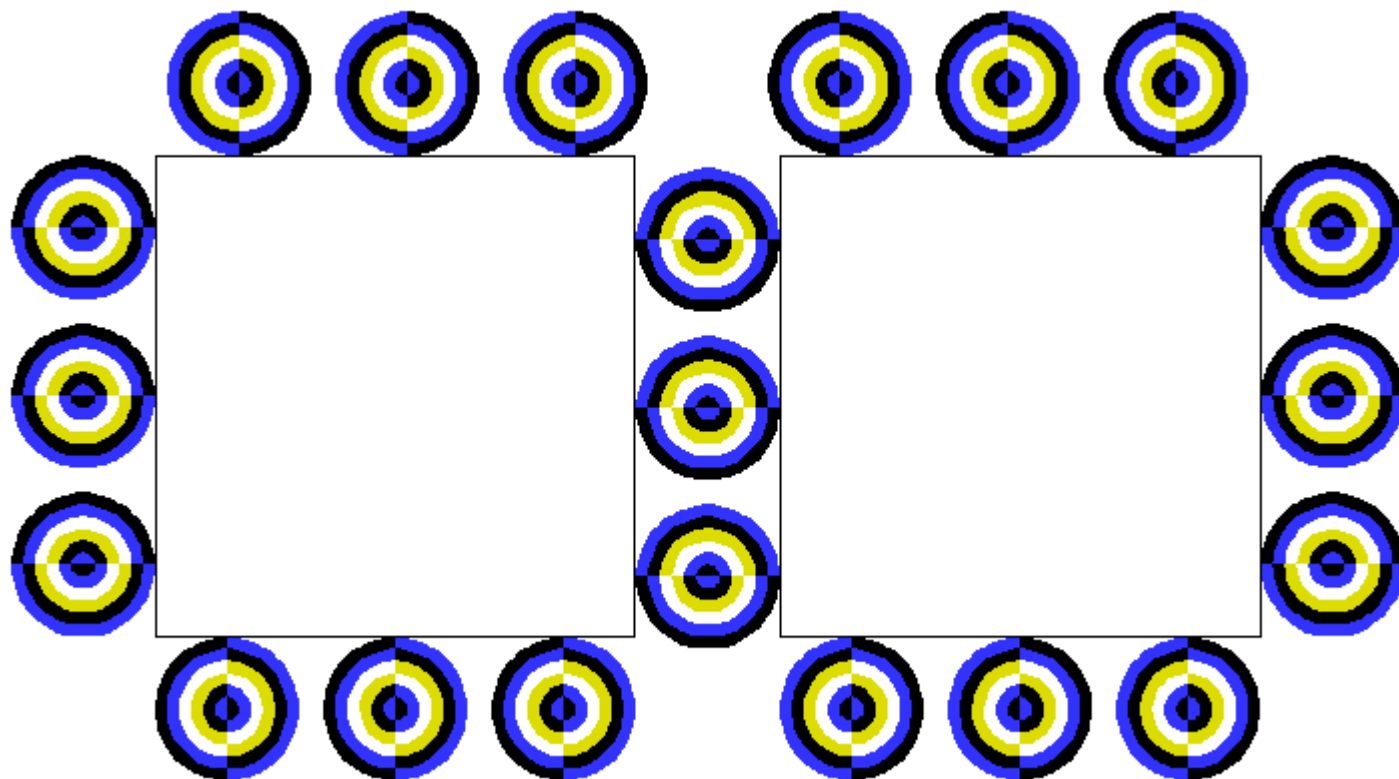
Sehen

Die Wahrnehmung ist ein schöpferischer Prozess



Kaniza Dreieck: Subjektive Konturen





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

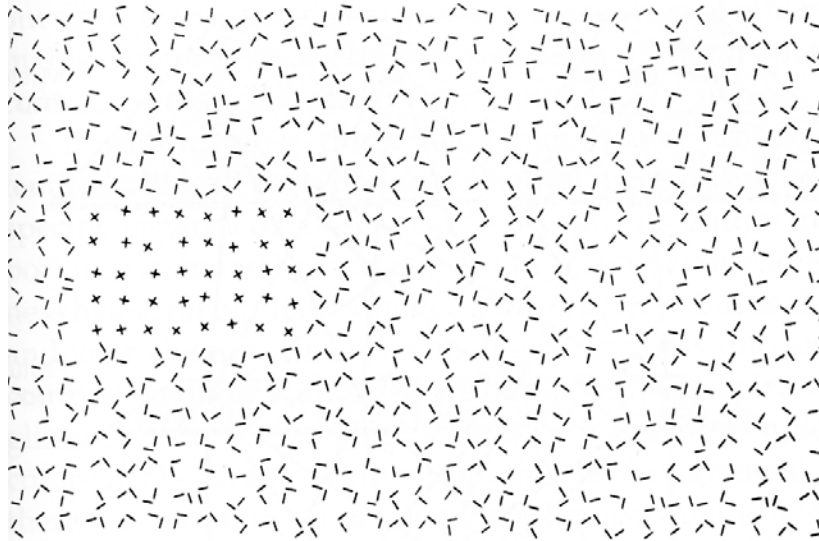
Entropie (Unordnungsgrad):

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**).

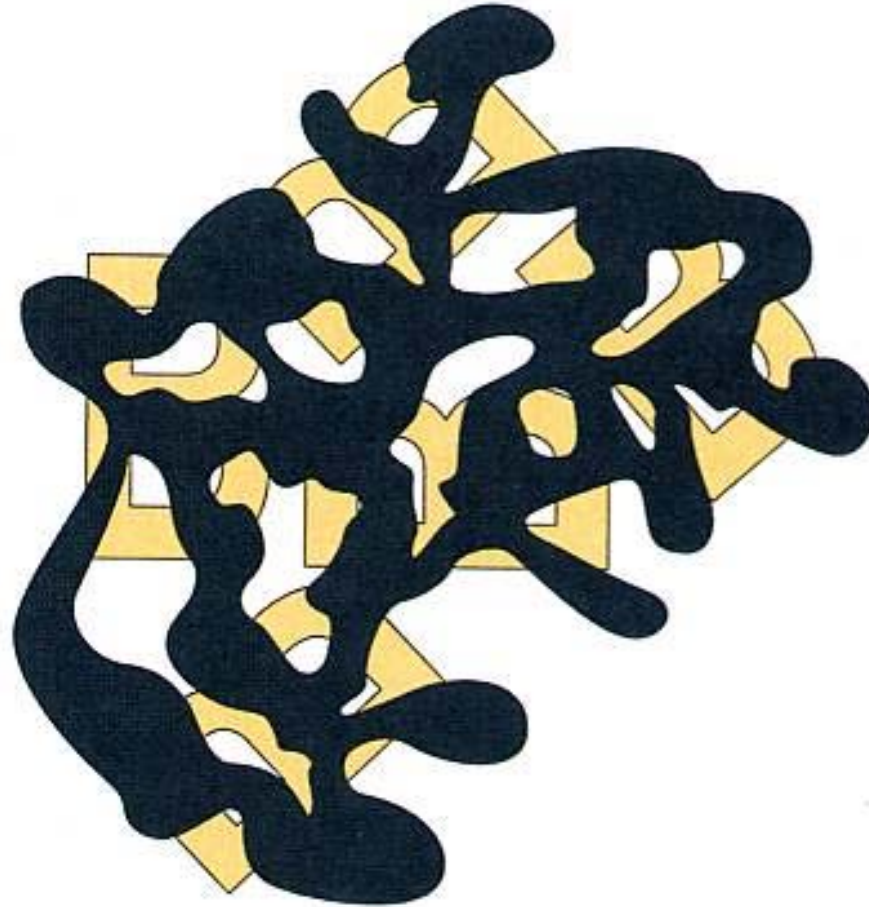


Die Signaldetektion in physikalischem Rauschen hängt ab vom:

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



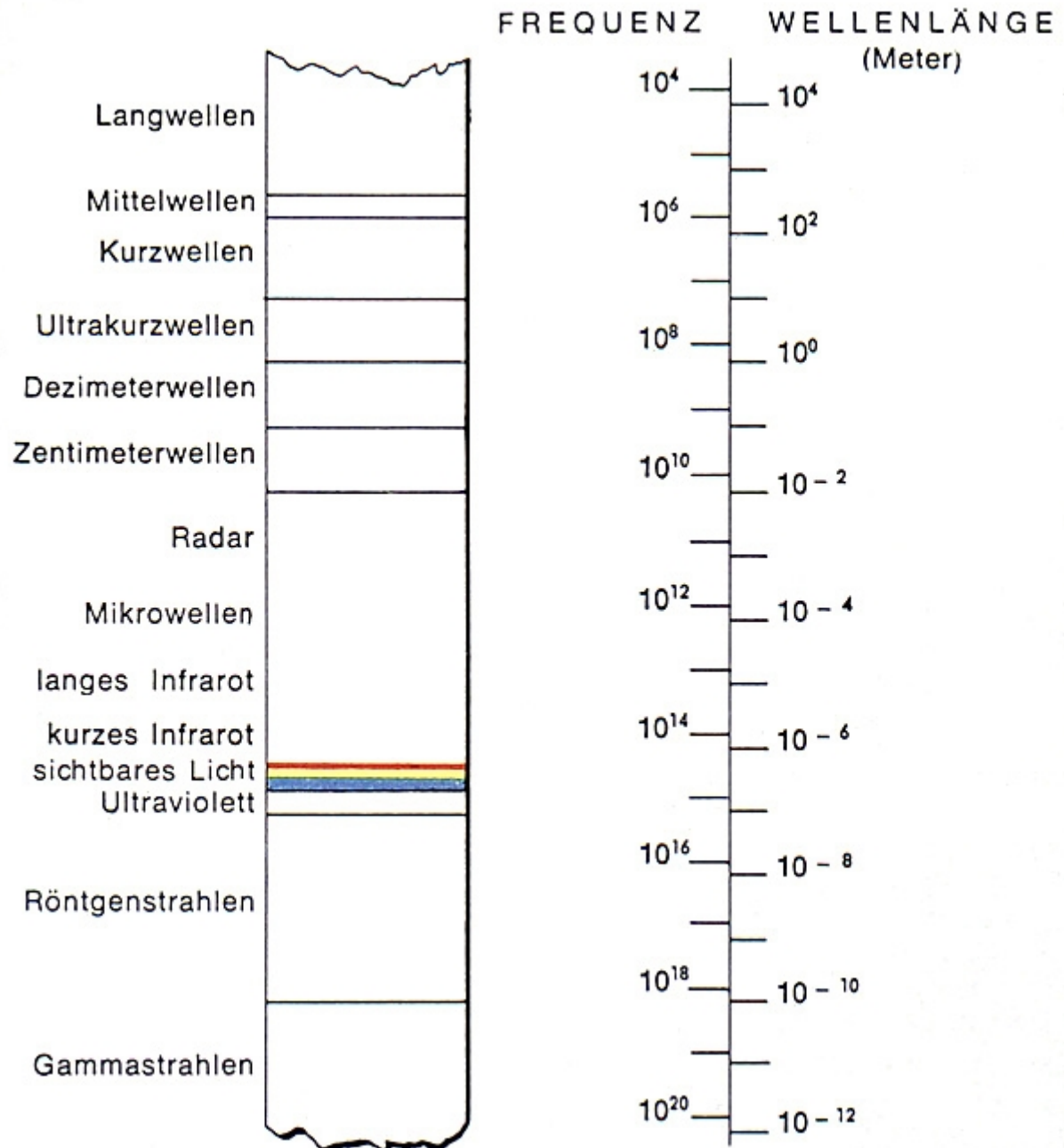
Physik des Lichts

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 polarisiert. 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 [μ Pa] ^a	Frequenz [Hz]
Duft	Stofffluss [Moleküle/cm ³ /s]	Molekülart

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

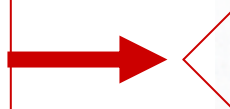
Wie wird Licht durch das Transportmedium verändert ?

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

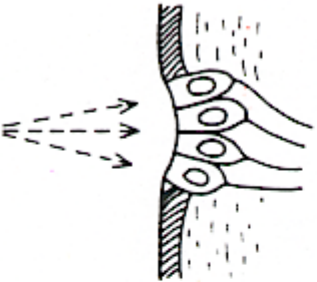


Abschwächungsdistanz = Entfernung in der die Reizintensität auf 37% abgesunken ist

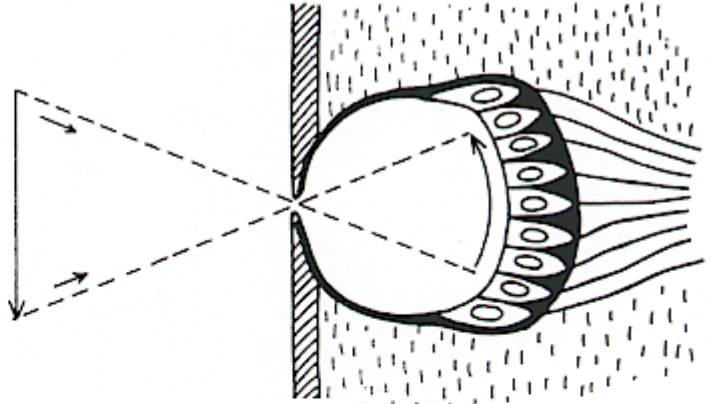
Augentypen Augenstellung

Augentypen

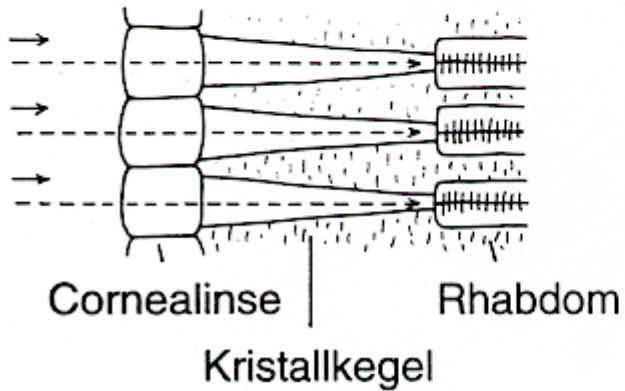
Punktauge



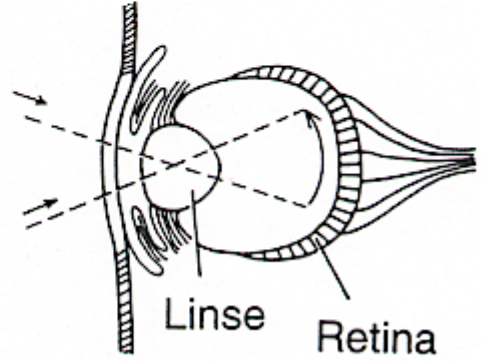
Lochkameraauge



Komplexauge

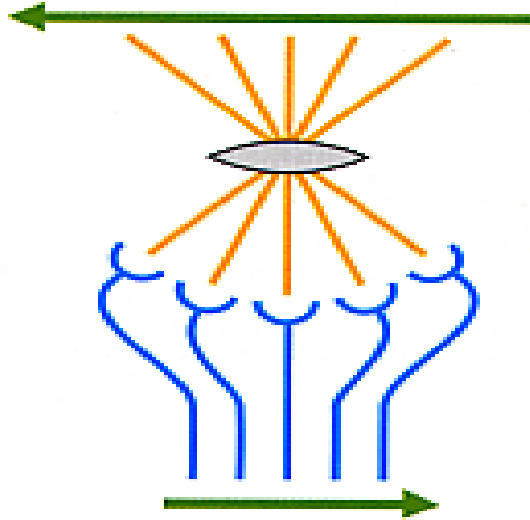


Linseauge

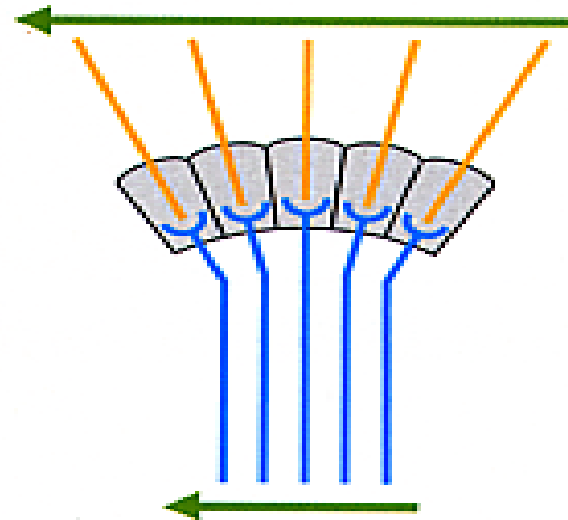


Komplexaugen

Bildentstehung im Linsenauge

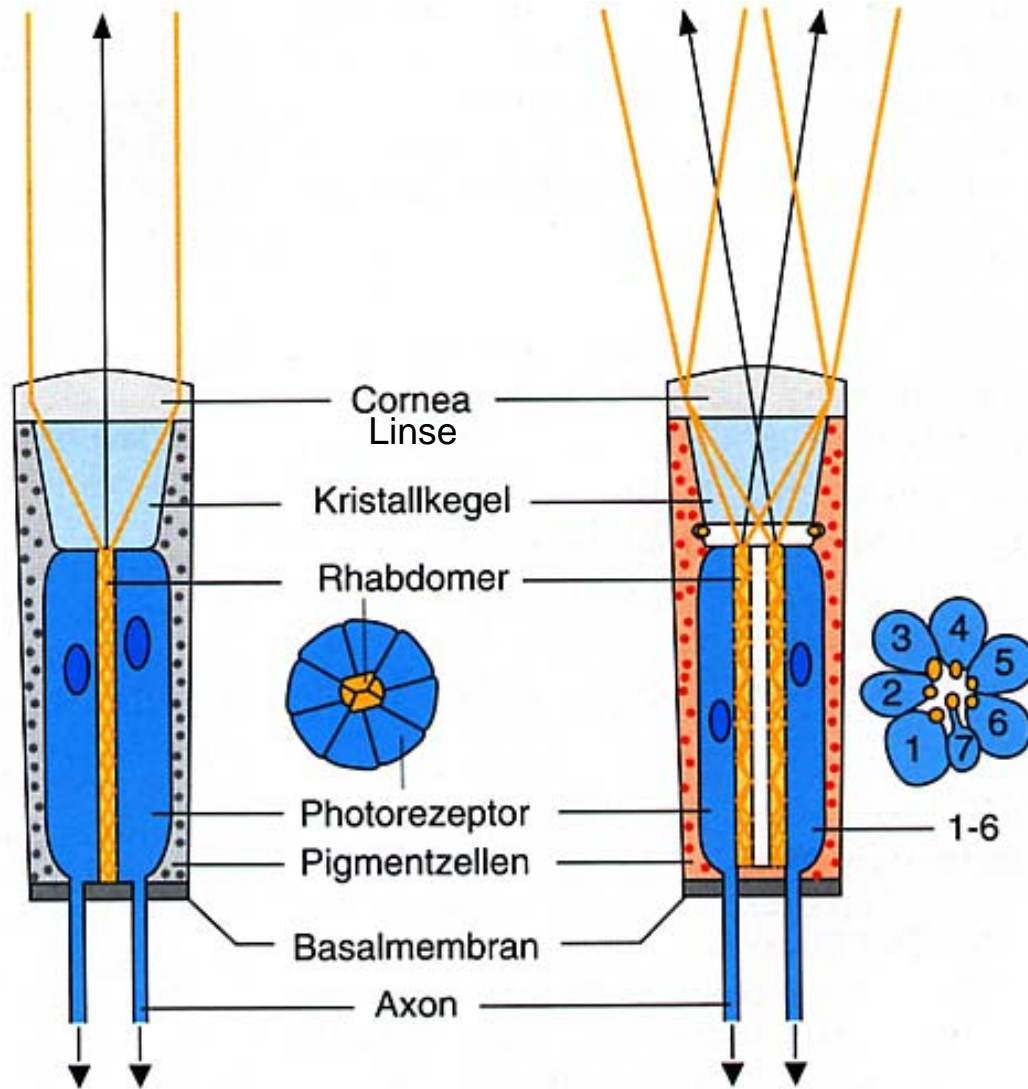


im Komplexauge



die einzelne Facette – das Ommatidium

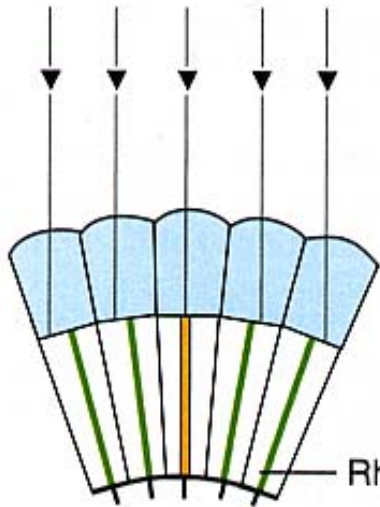
Biene:
fusioniertes
Rhabdom,
wirkt als
ein Lichtleiter



Musca:
unfusioniertes
Rhabdom,
Rhabdomere
divergieren in
ihren optischen
Achsen

Typen von Komplexaugen

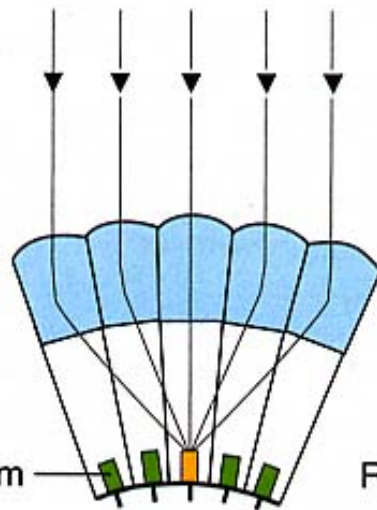
Appositions- auge



typisch für tagaktive
Insekten:
Hymenoptera
Odonata
Coeloptera

und Crustacea

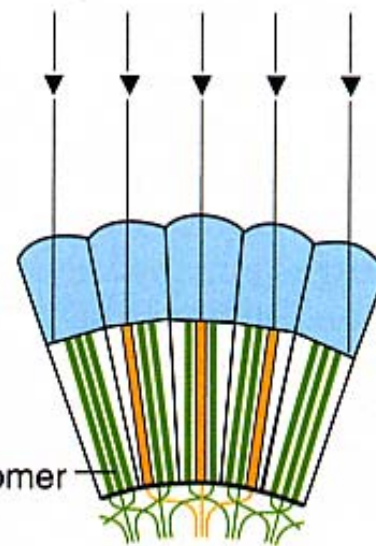
optisches Superpositions- auge



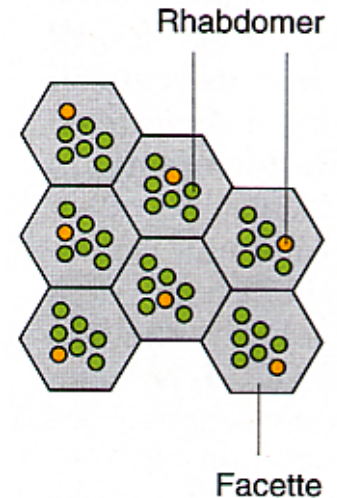
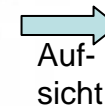
bei nachtaktiven
Insekten:
Coeloptera
Lepidoptera

und Crustacea

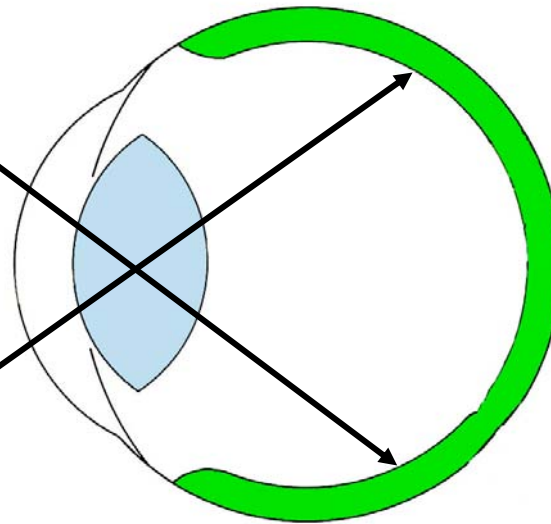
neurales Superpositions- auge



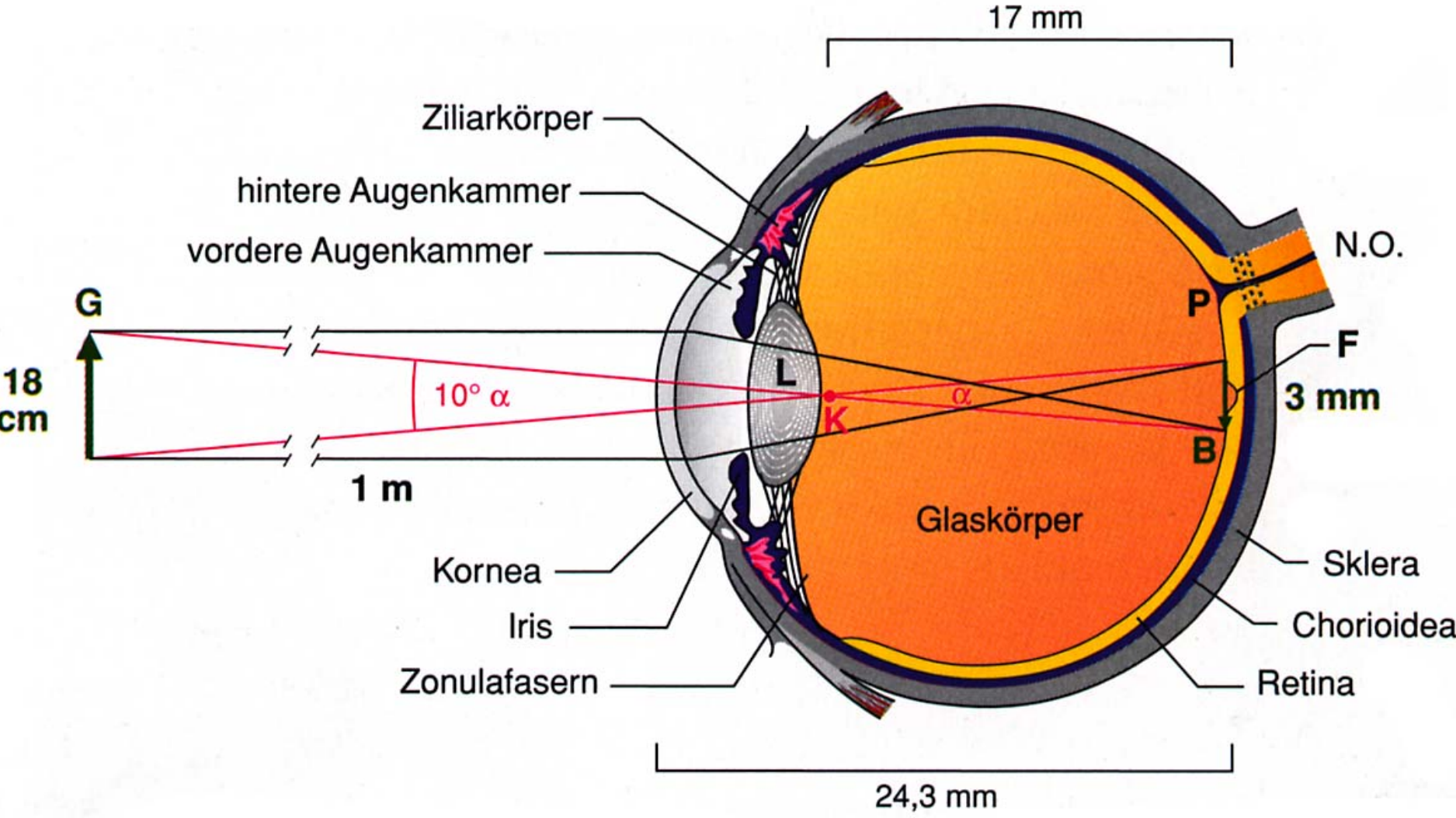
bei höheren
Dipteren:
Musca, Drosophila



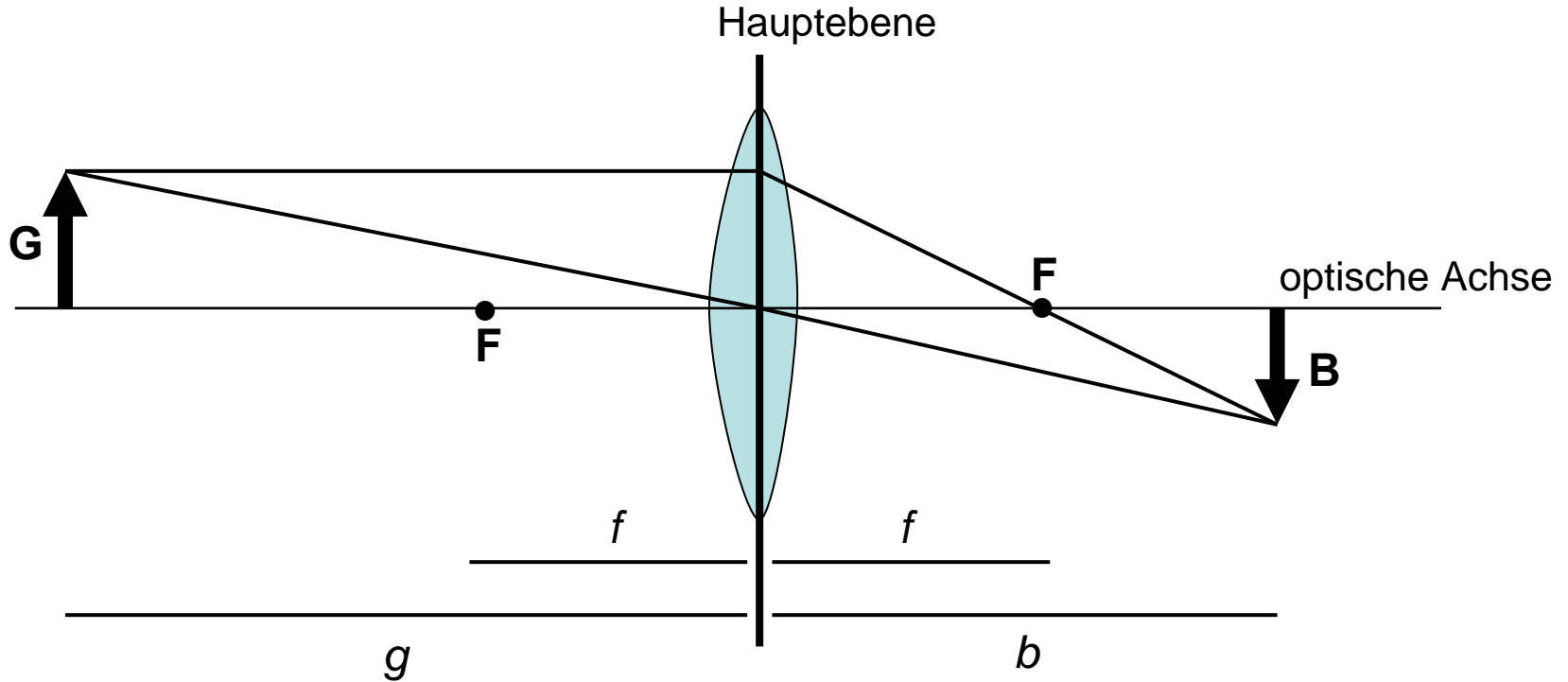
Augenoptik: umgekehrtes, verkleinertes Bild auf der Netzhaut



menschliches Auge



Strahlengang Linse



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

g = Gegenstandsweite

b = Bildweite

f = Brennweite [m]

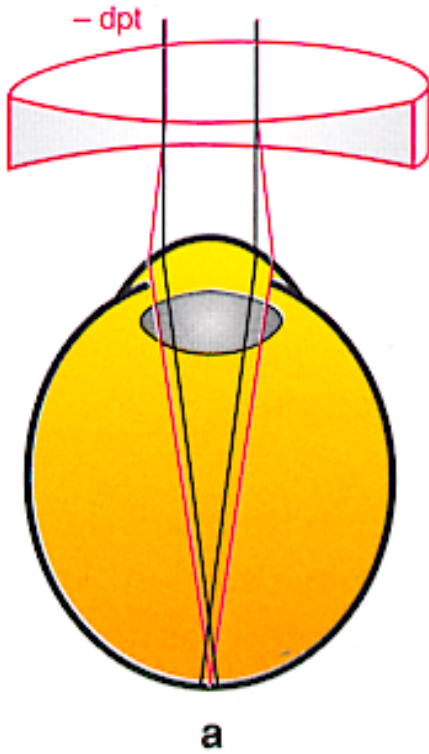
$1/f$ = Brechkraft [Dioptrien, $D = 1/m$]

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

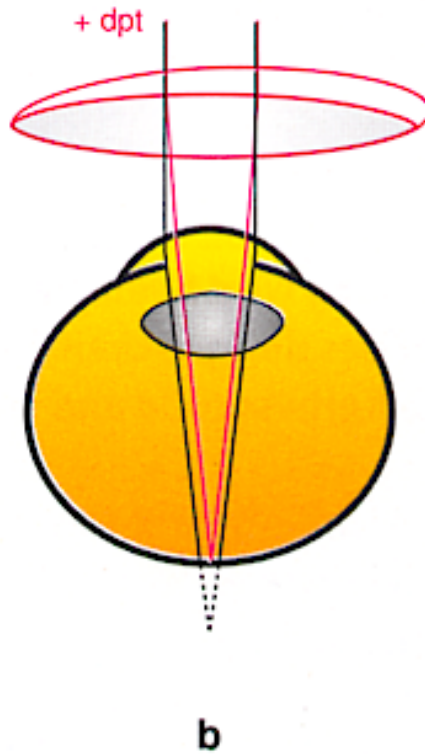
Mensch: $f = 1,7 \text{ cm} \rightarrow 58D$

Augenfehler

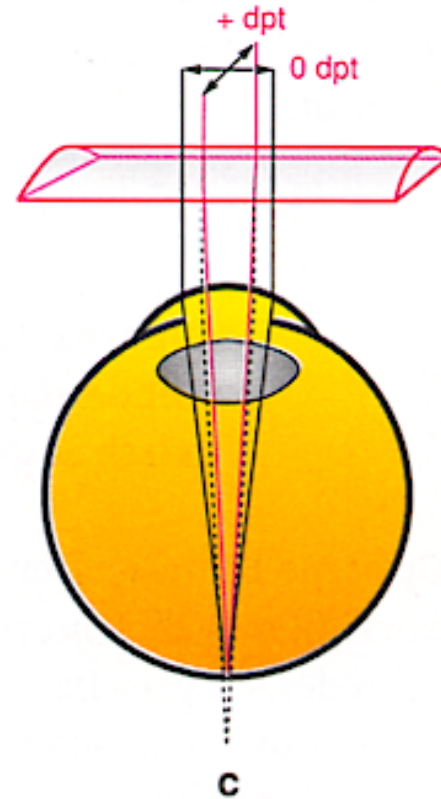
Kurzsichtigkeit



Weitsichtigkeit

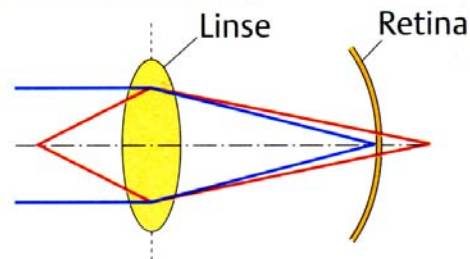


Astigmatismus

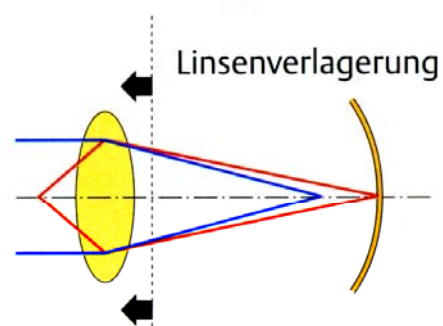


Akkommodation

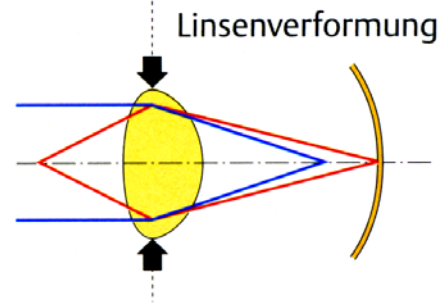
Ferneinstellung



Naheinstellung



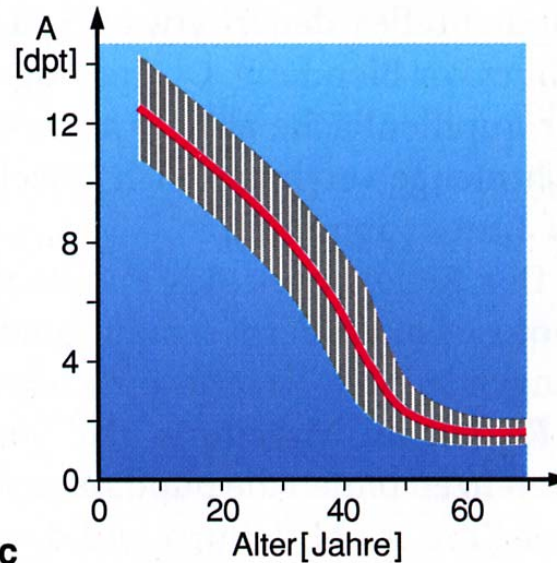
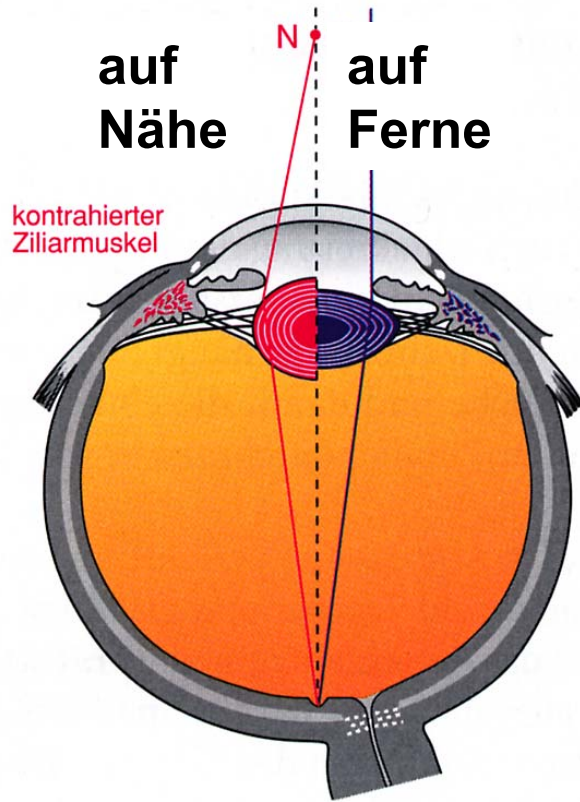
Fische, Amphibien, Schlangen



andere Wirbeltiere

Strahlengänge blau für einen unendlich weit entfernten, rot für einen nahen Gegenstand.

Akkommodation



Gesamtbrechkraft
fern akkom. (∞) 58 D

Kornea 42 D
Linse 16 D

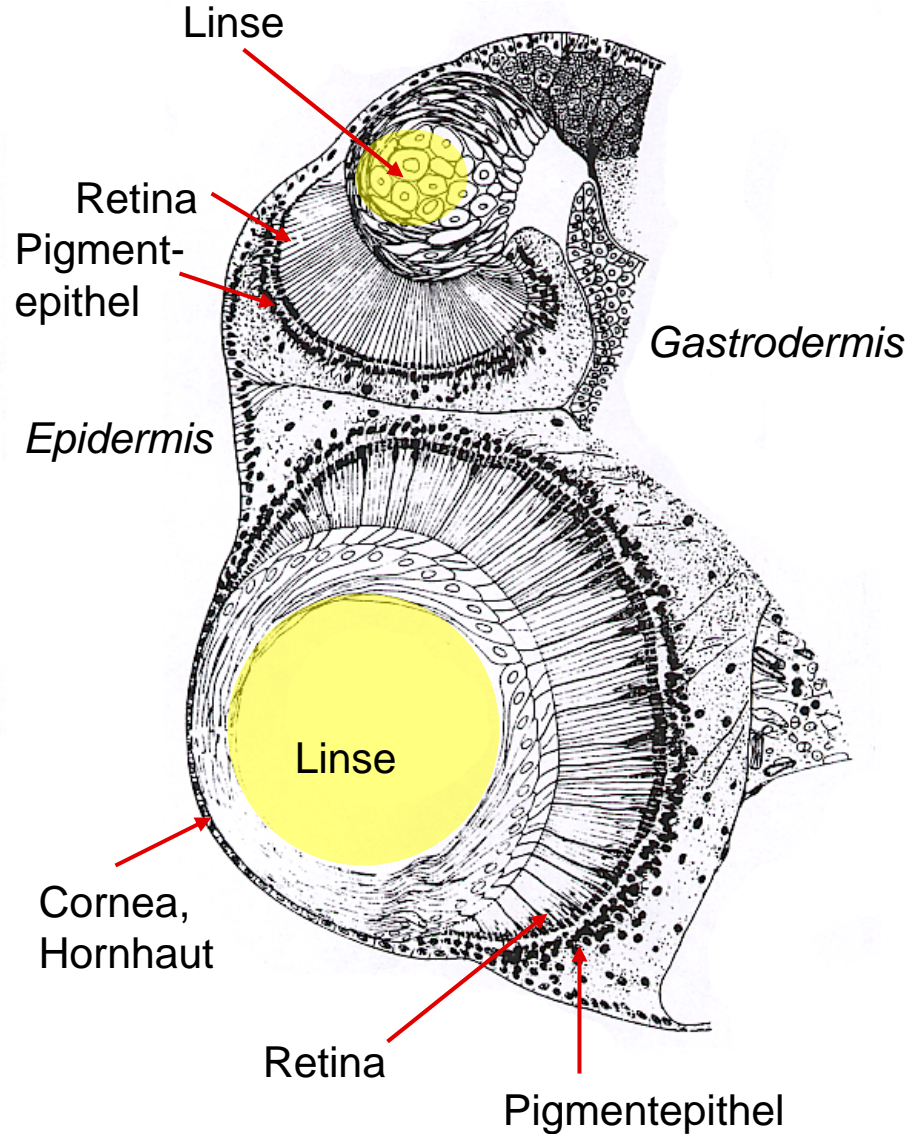
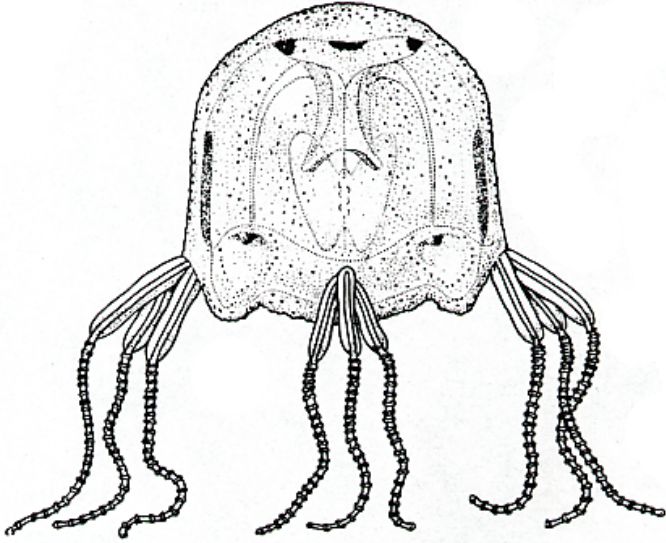
Gesamtbrechkraft
nah akkom. (10cm) 70 D

Kornea 42 D
Linse 28 D

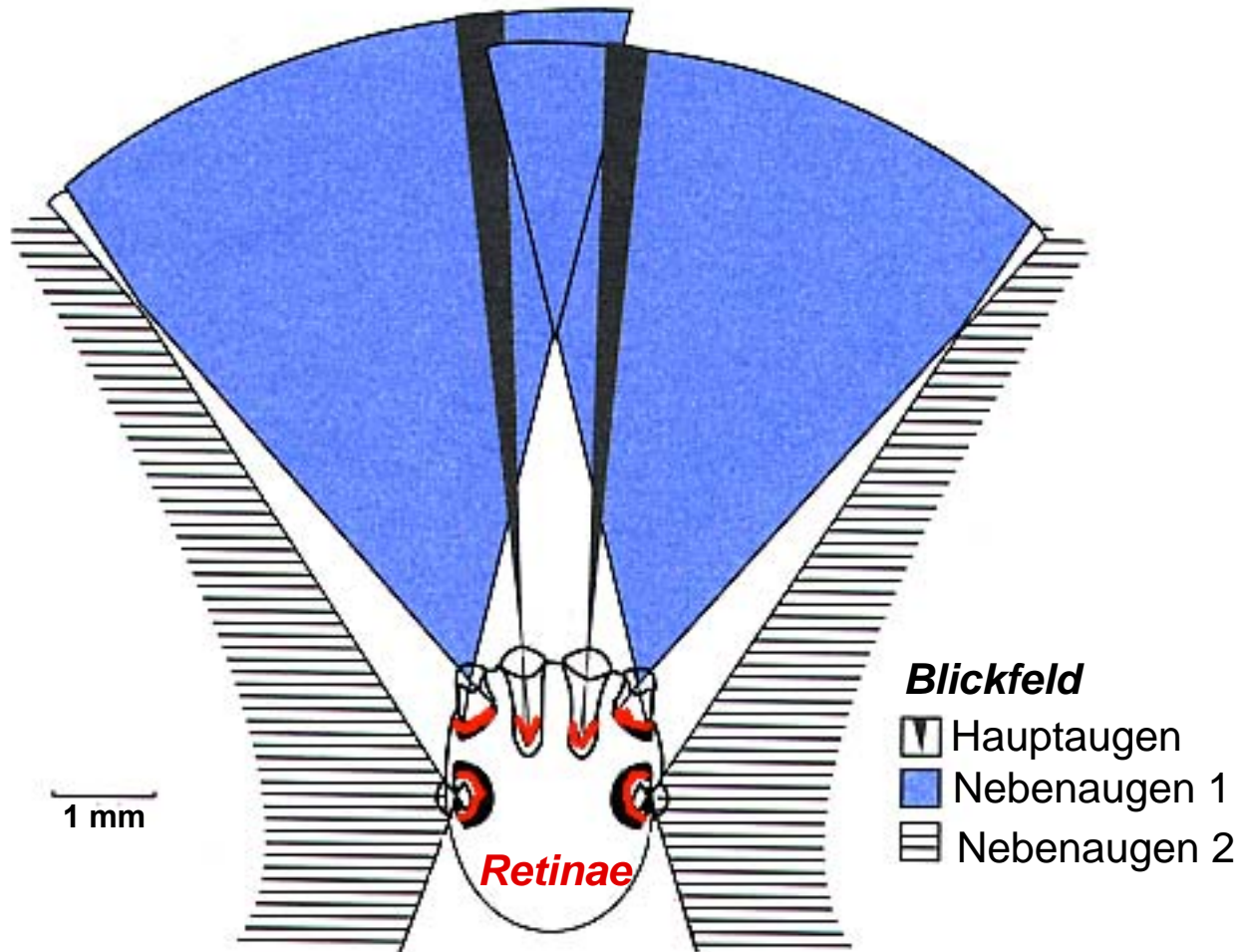
Akkommodationsbreite der Linse: ~12 D (altersabhängig)

Linseaugen bei Cnidariern

Würfelqualle mit Augenfeldern



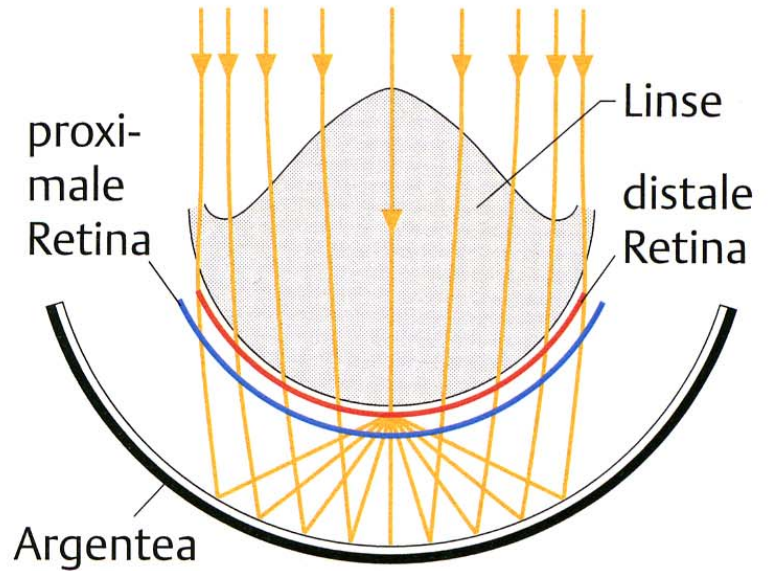
Linsenaugen bei Spinnen



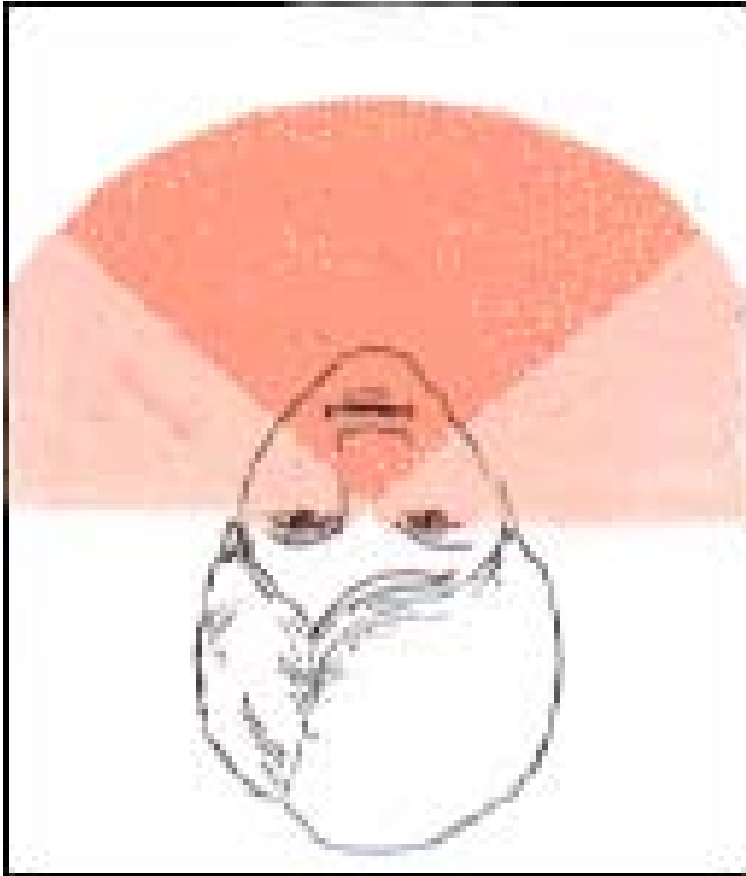
Linsenaugen bei Kammmuscheln



Am Mantelrand schöne blaue Augen



Gesichtsfeld



Panoramisches Gesichtsfeld

= beidäugiges

Gesamtgesichtsfeld

200°

Monokulares

Gesichtsfeld

160°

Binokularer

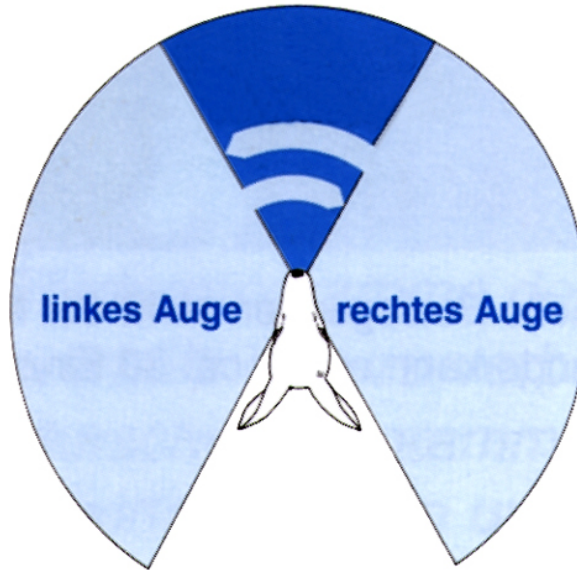
Überlappungsbereich

120°

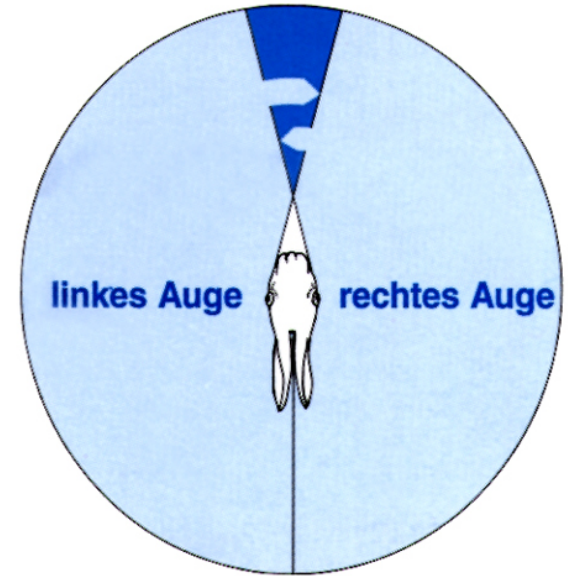
Gesichtsfeld und Augenstellung



Hund, Katze,...



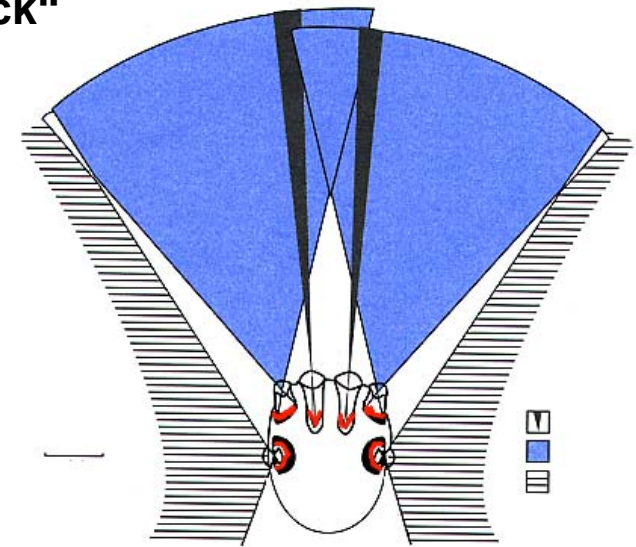
Reh, Pferd,...



Hase

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

Großer Rundblick = kleiner binokularer Bereich
= schlechtes räumliches Sehen

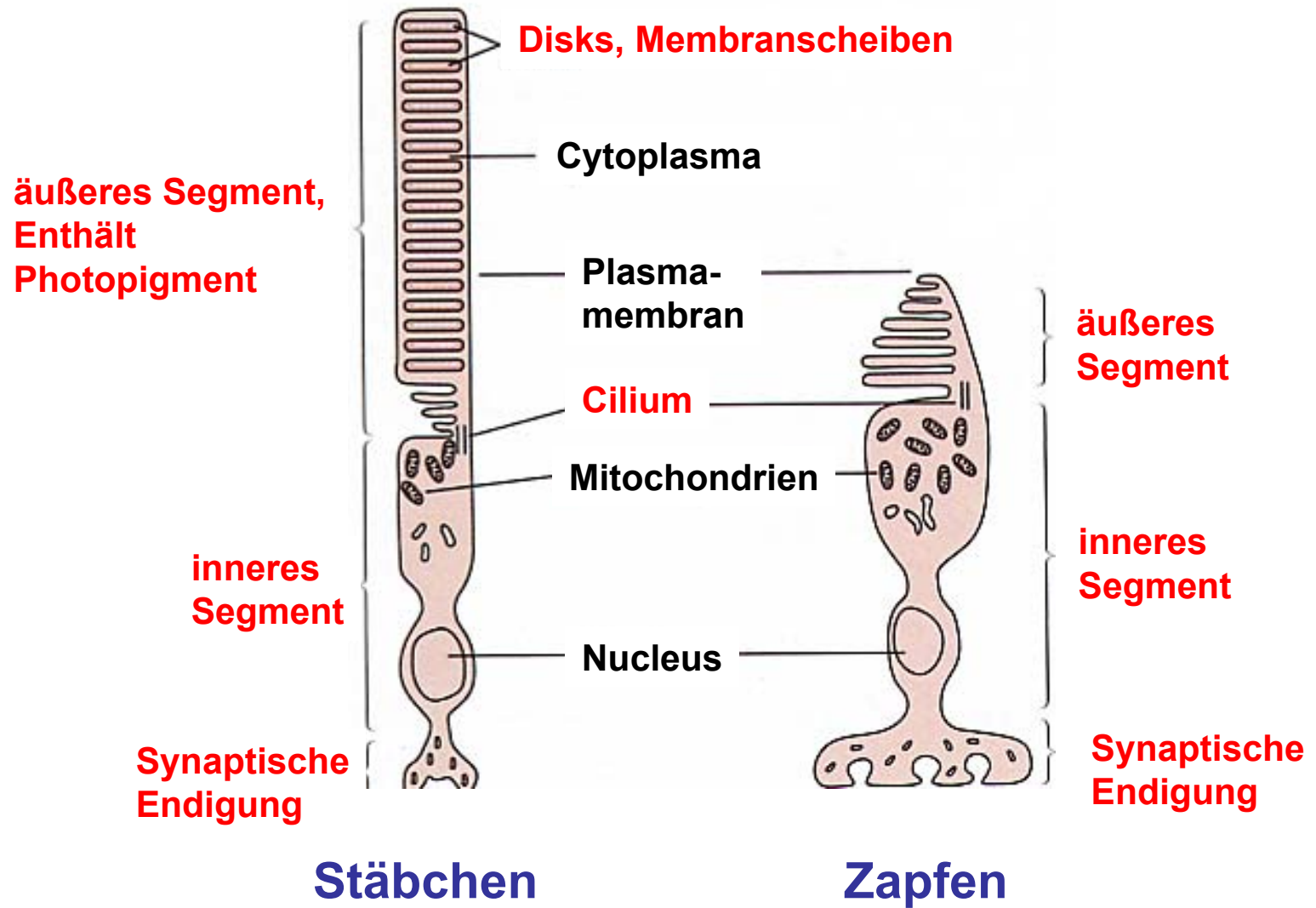


Zusammenfassung **Licht und Augentypen**

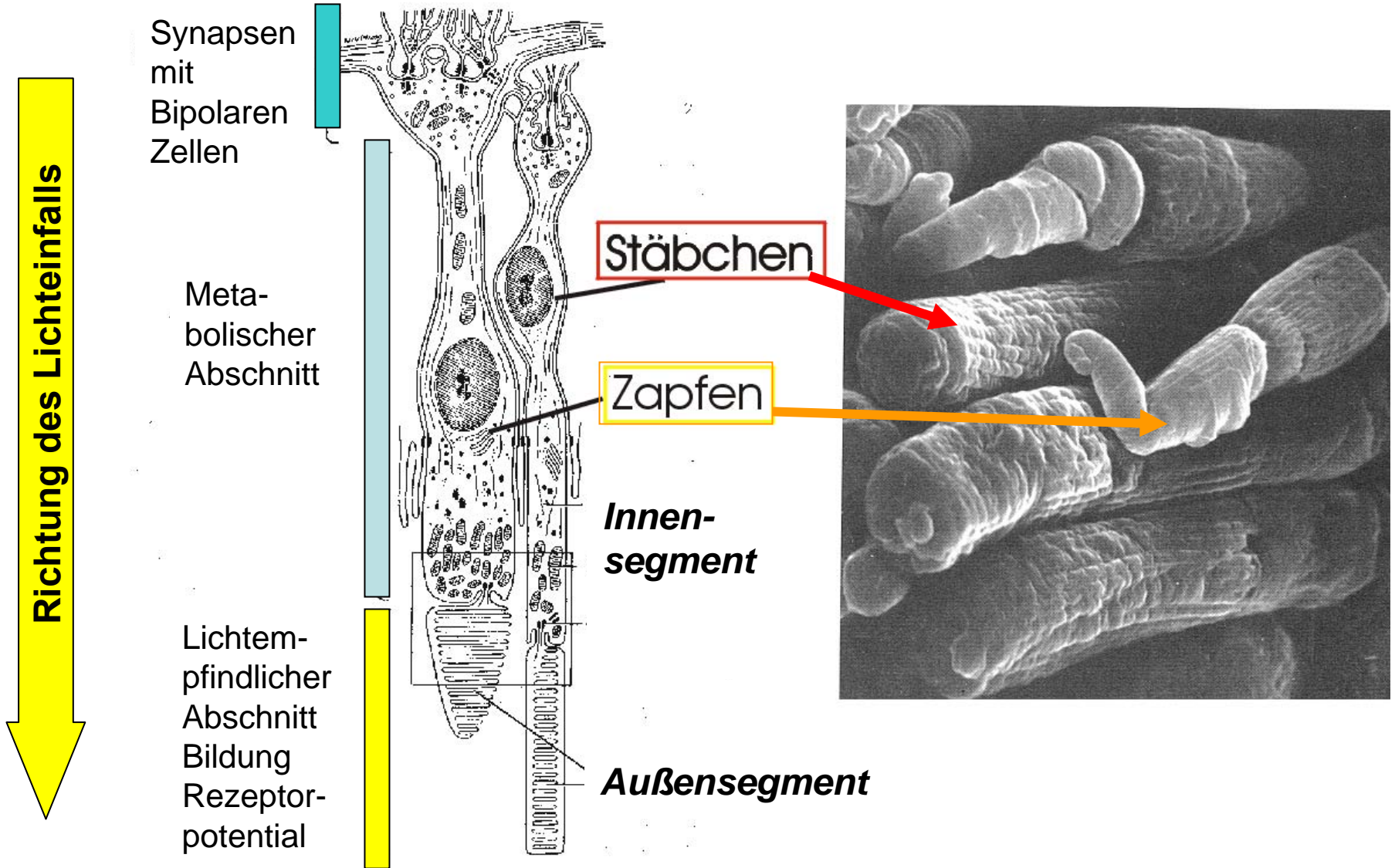
- Strukturierte Sinnesreize niedriger Entropie haben hohen Informationsgehalt
- **Signal/Rausch-Verhältniss** S/N-Ratio
- Licht als **Transversalwelle** oder als **Quanten**
- Biologisch relevanter Wellenlängenbereich **400-700 nm** hat beste Ausbreiteigenschaften in unserer Umwelt.
- **Punktauge Lochkamaerauge Linsenaug Komplexaug**
- **Komplexaug**: einzelne Facette(**Ommatidium**) aus mehreren Zellen, deren Sehpigment-Kompartimente (**Rhabdomere**) fusioniert oder unfusioniert sein können
Typen: **Appositionsaug** oder **Superpositionsaug**
- **Linsenaug**: Gegenstandsweite, Bildweite, Brennweite, Brechkraft (Dioptrin)
- **Akkomodation**, Kurz/Weitsichtigkeit, Astigmatismus
- **Augenstellung** und das **monokulare Gesichtfeld** jedes Auges bestimmen das **binokulare Gesichtfeld**

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

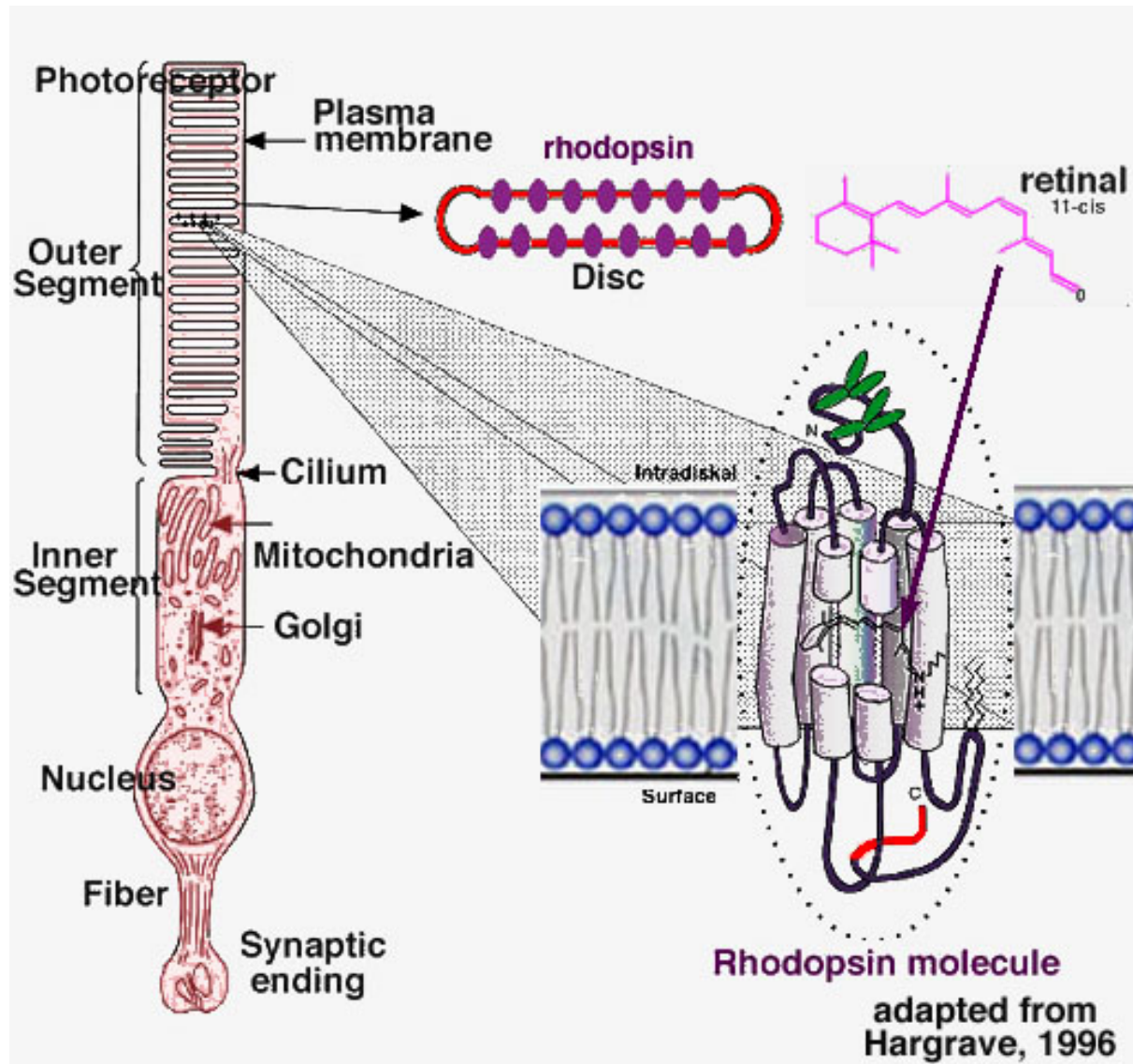
Chromatisch

3 Pigmente- 3 Zapfentypen
Farbsehen

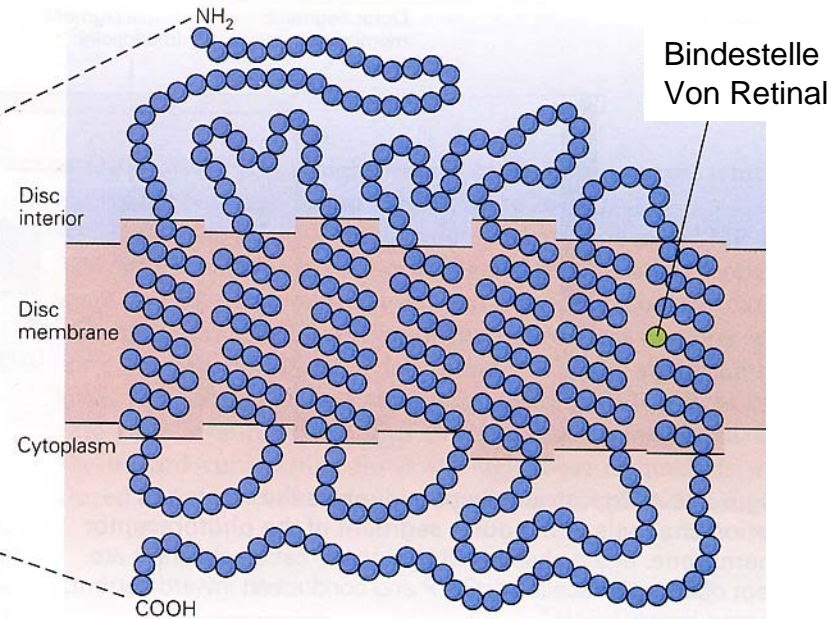
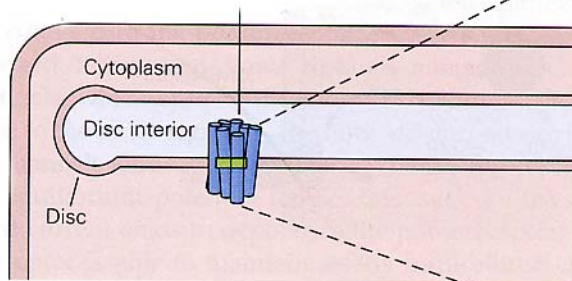
konzentriert in der Fovea



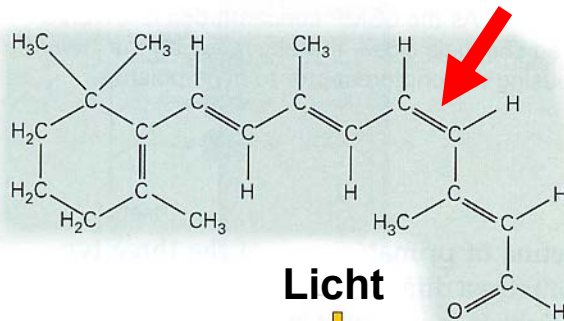
Rhodopsin als Lichtrezeptormolekül



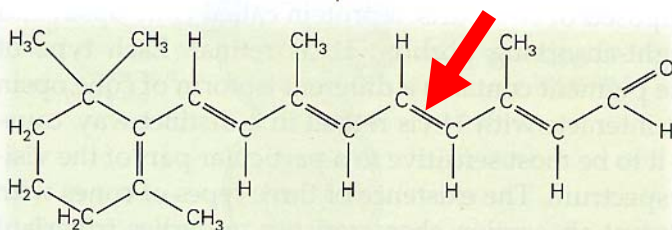
Rhodopsin-Aktivierung



11-cis Retinal



Licht



All-trans Retinal

Absorption eines Photons

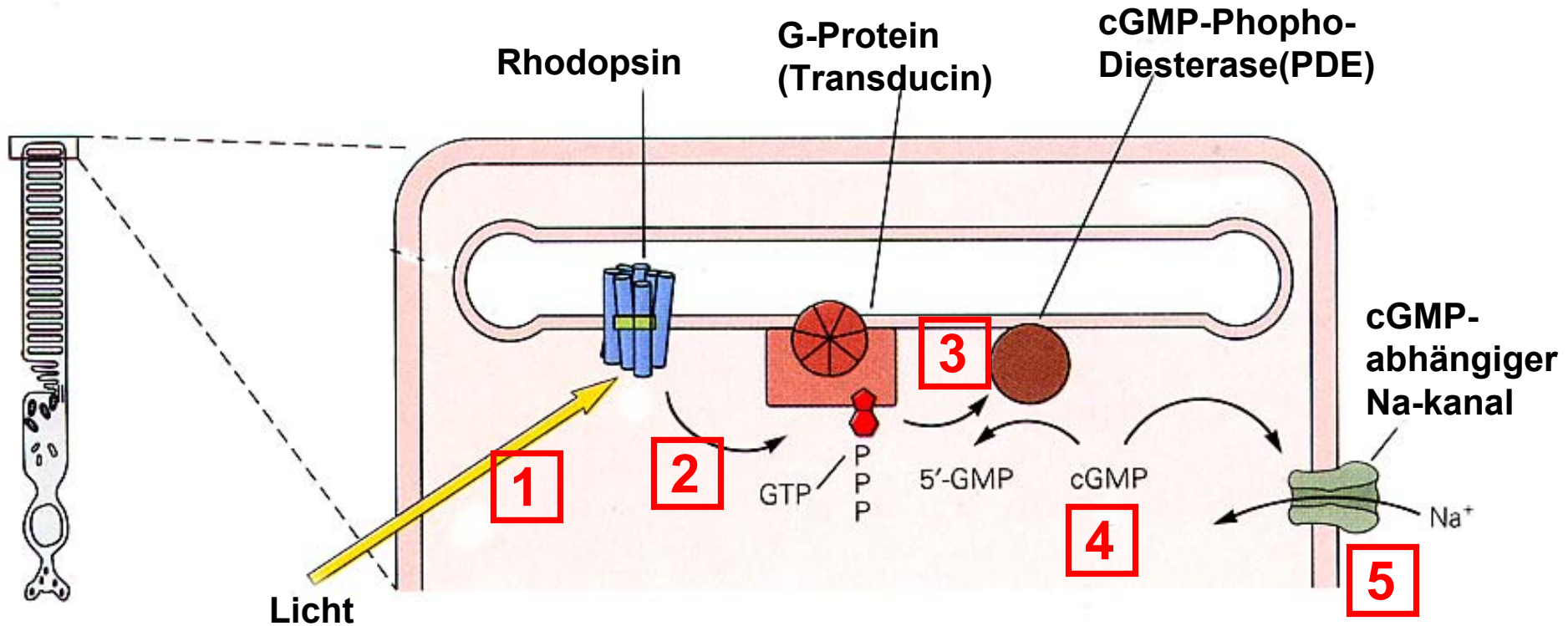
→ Rotation eine C-C Doppelbindung

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

→ Konformationsänderung im Opsin

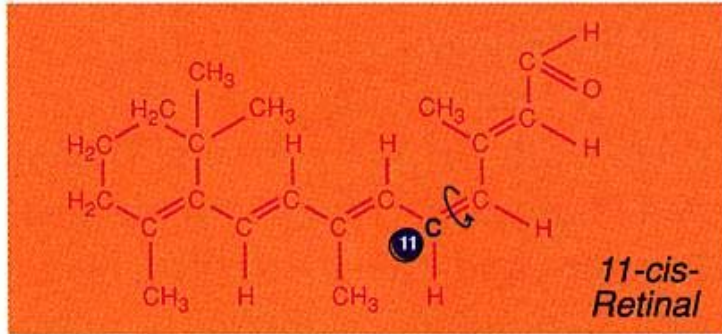
Rhodopsin → Metarhodopsin II

Phototransduktionskaskade - Wirbeltiere

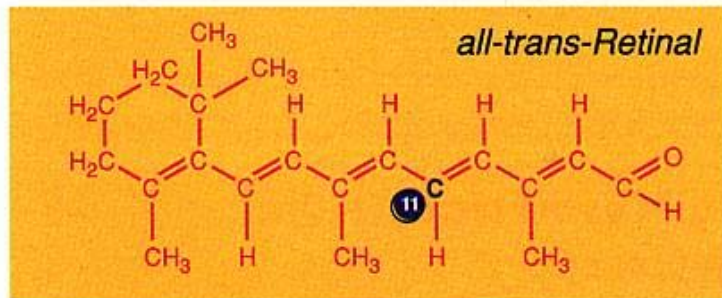


- 1** Licht: Rhodopsin \rightarrow Metarhodopsin II (R^*)
- 2** Aktivierung von Transducin ($T_{\alpha\beta\gamma}$) durch R^* : T_{α} bindet GTP und spaltet sich ab
- 3** T_{α} -GTP aktiviert PDE
- 4** PDE hydrolysiert cGMP zu 5'-GMP
- 5** cGMP abhängiger Na-Kanal schließt sich \rightarrow Hyperpolarisation

Dunkel-Adaptation

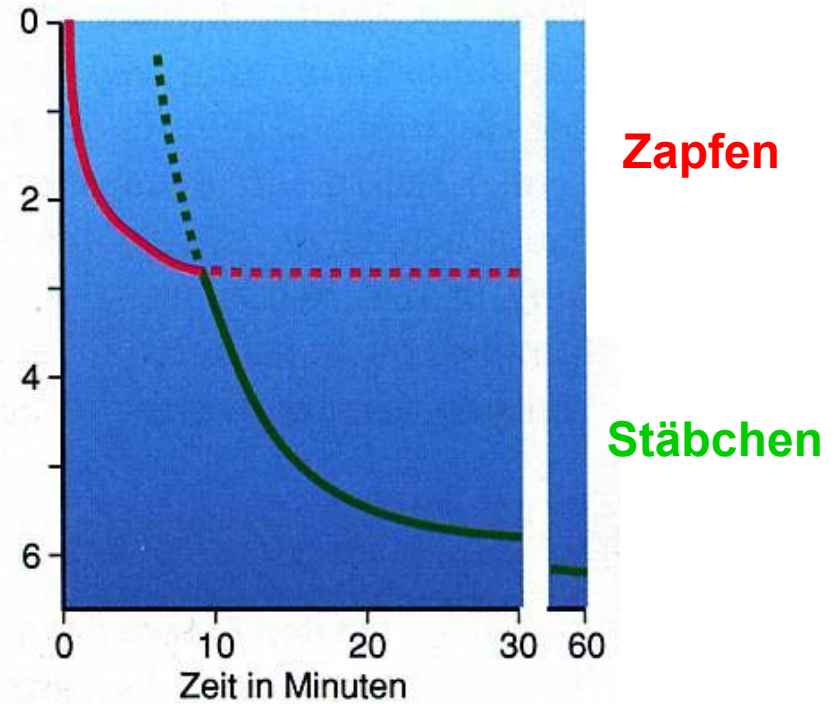


hell \rightleftharpoons dunkel

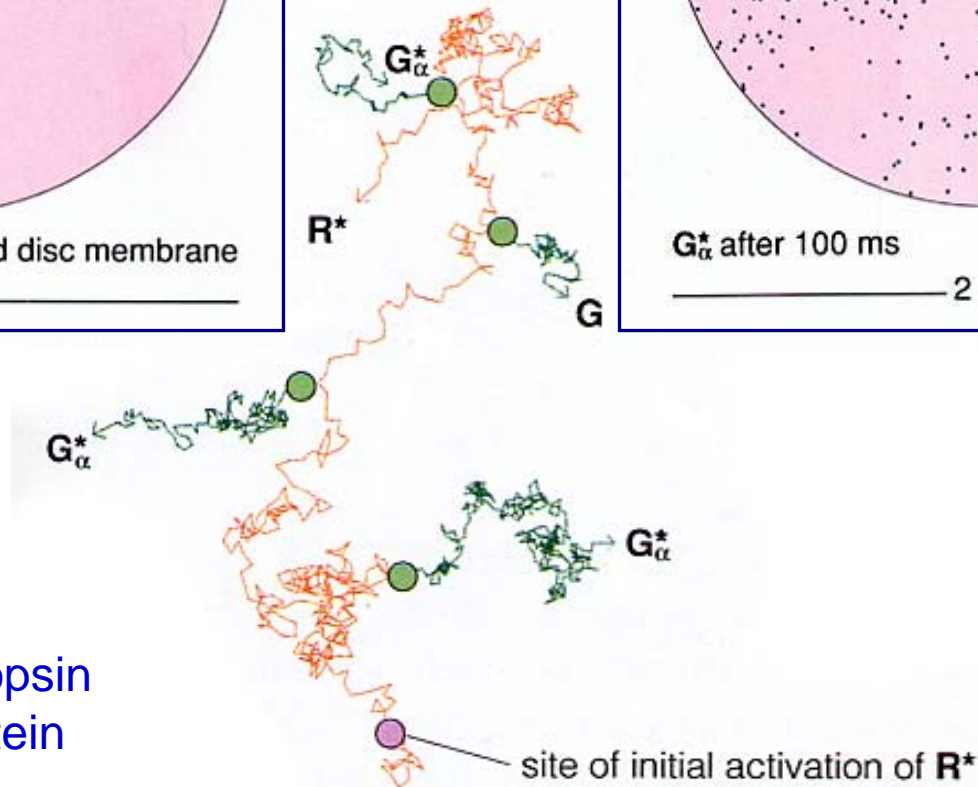
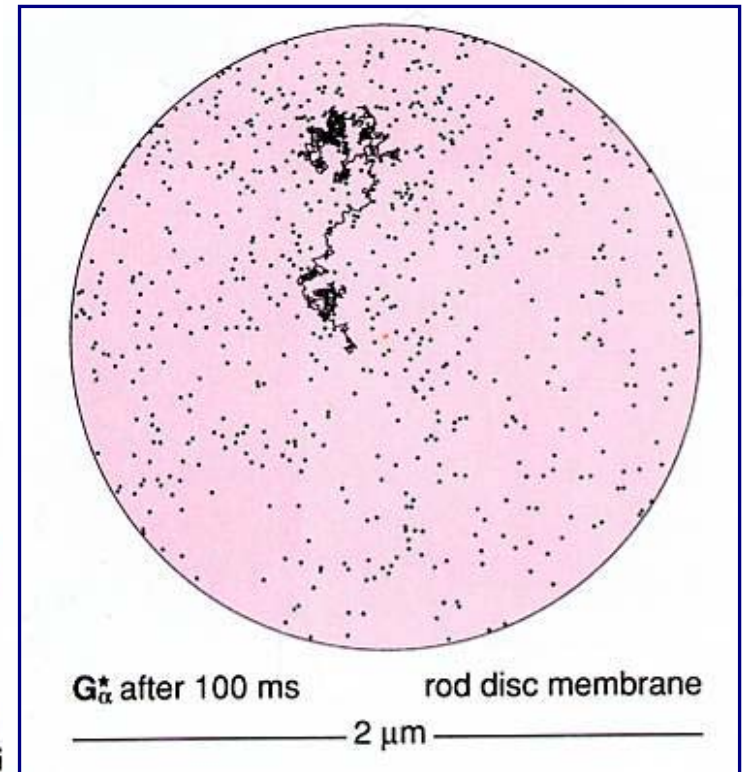
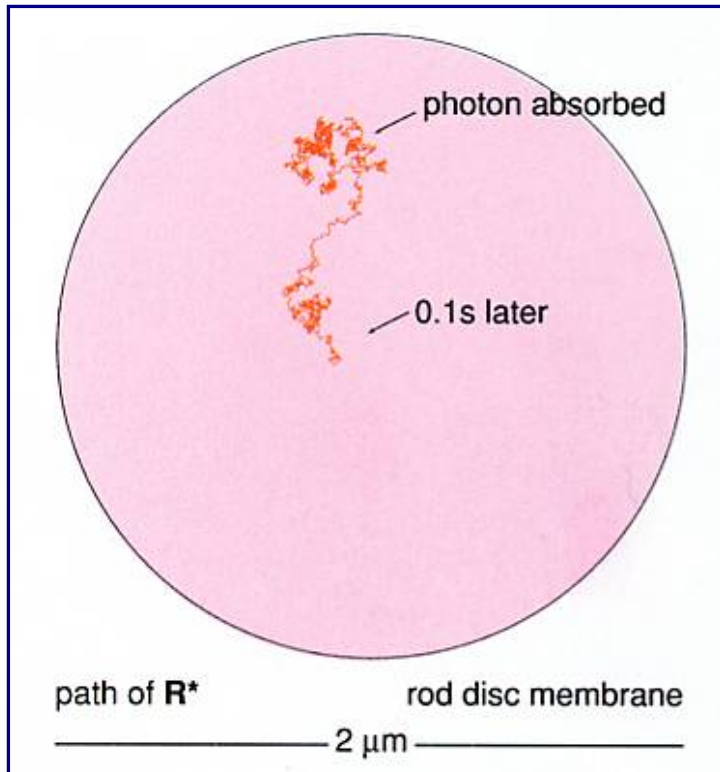


Zeitverlauf der Adaptation:

log rel Empfindlichkeit



Einzelne Photonen aktivieren Rhodopsin



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

Verstärkung durch Photo-Kaskade

1. 1 Photon → ca. 700 G*
2. 1 G* → 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:**

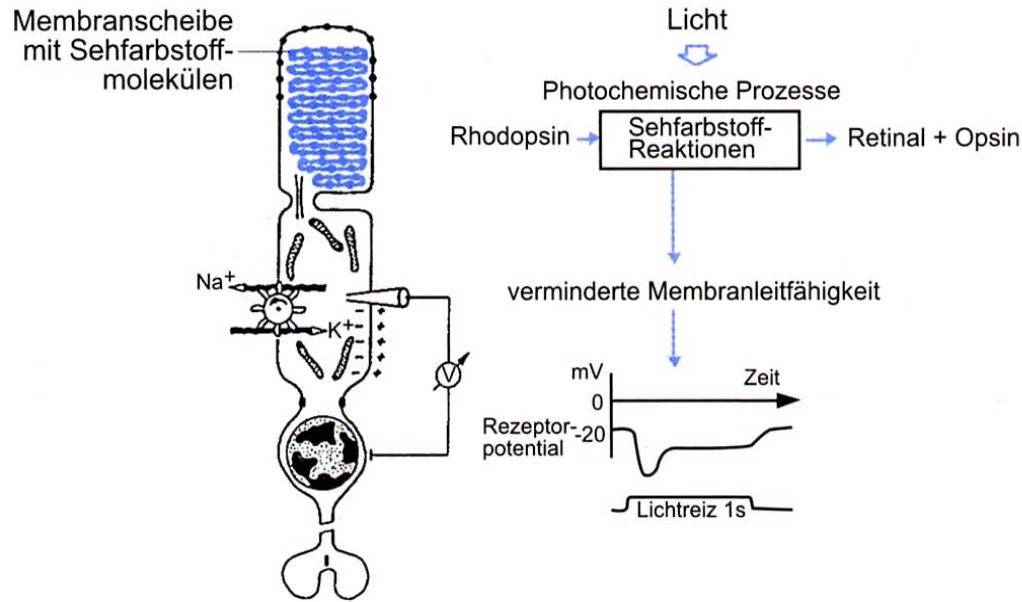
**→1 Photon bewirkt etwa die Schließung von 5000 Na-Kanälen
Verminderung des Na-Einstroms um 1 pA (um 5%)
Membranpotential wird um 3% hyperpolarisiert (Rezeptorpotential)**

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

In Zapfen ist Kaskade sehr viel schneller, aber weniger verstärkt

Wirbeltiere

Zapfen, Stäbchen

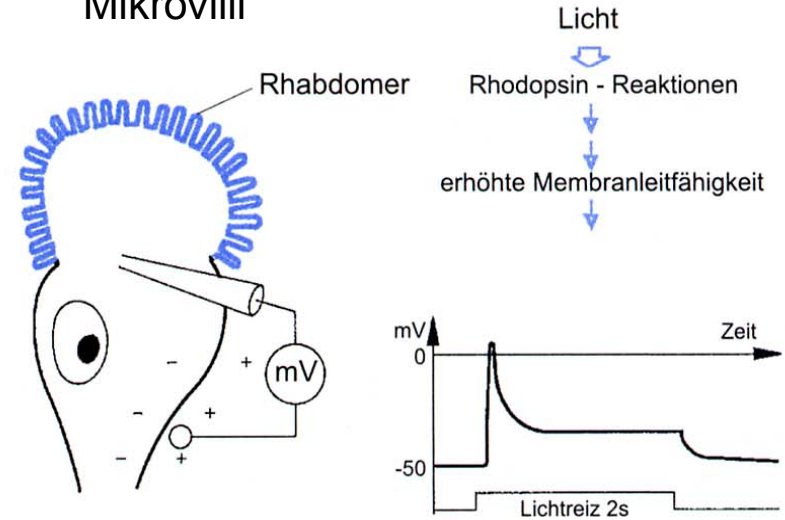


Hyperpolarisation

PDE → cGMP
→ Na Kanäle zu

Arthropoden

Retinula-zellen mit Rhabdomer aus Rhodopsin-haltigen Mikrovilli



Depolarisation

PhospholipaseC → IP3
→ Ca⁺⁺ → Na Kanäle offen