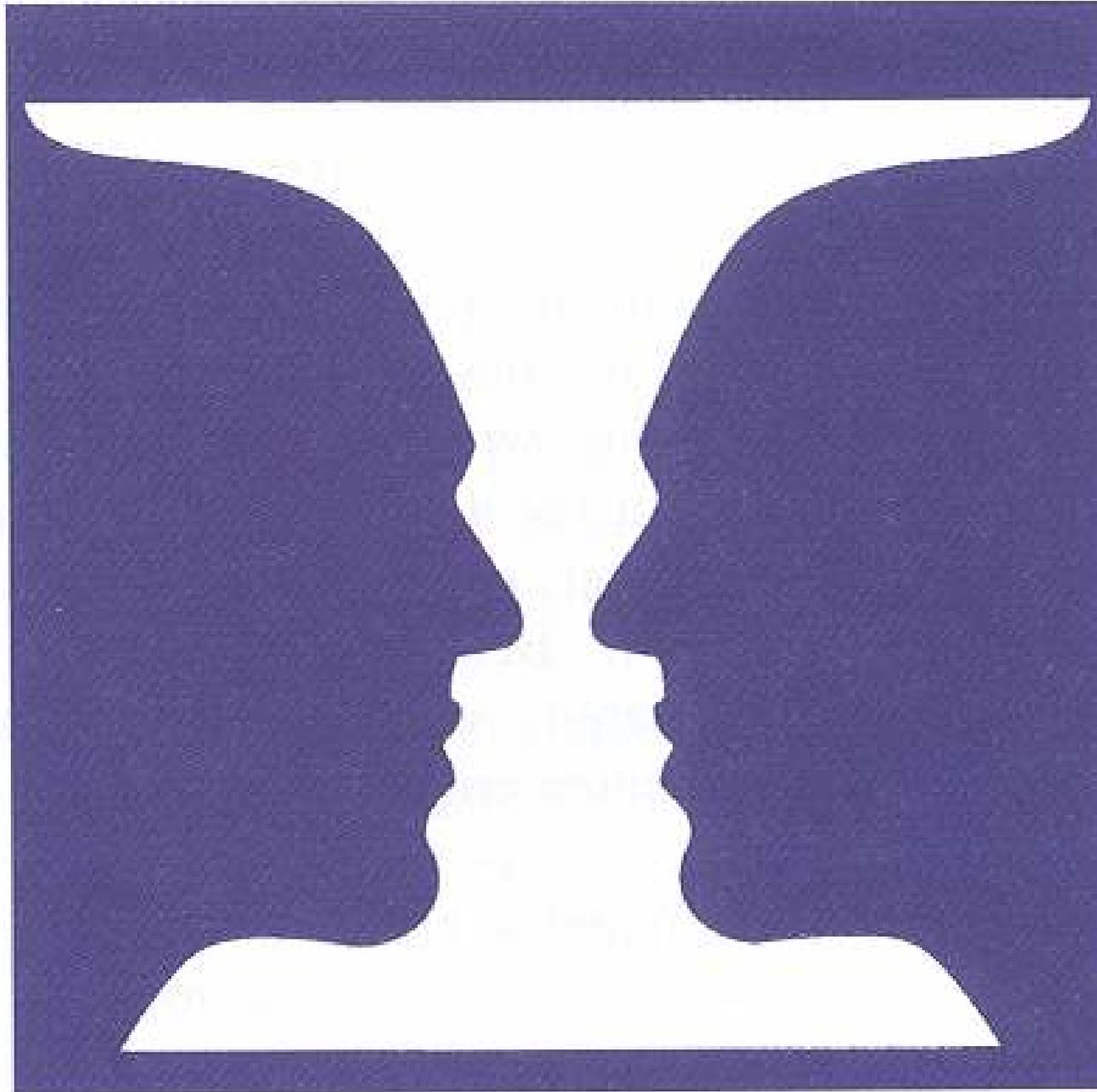


**Sehen**

***Die Wahrnehmung ist ein schöpferischer Prozess***



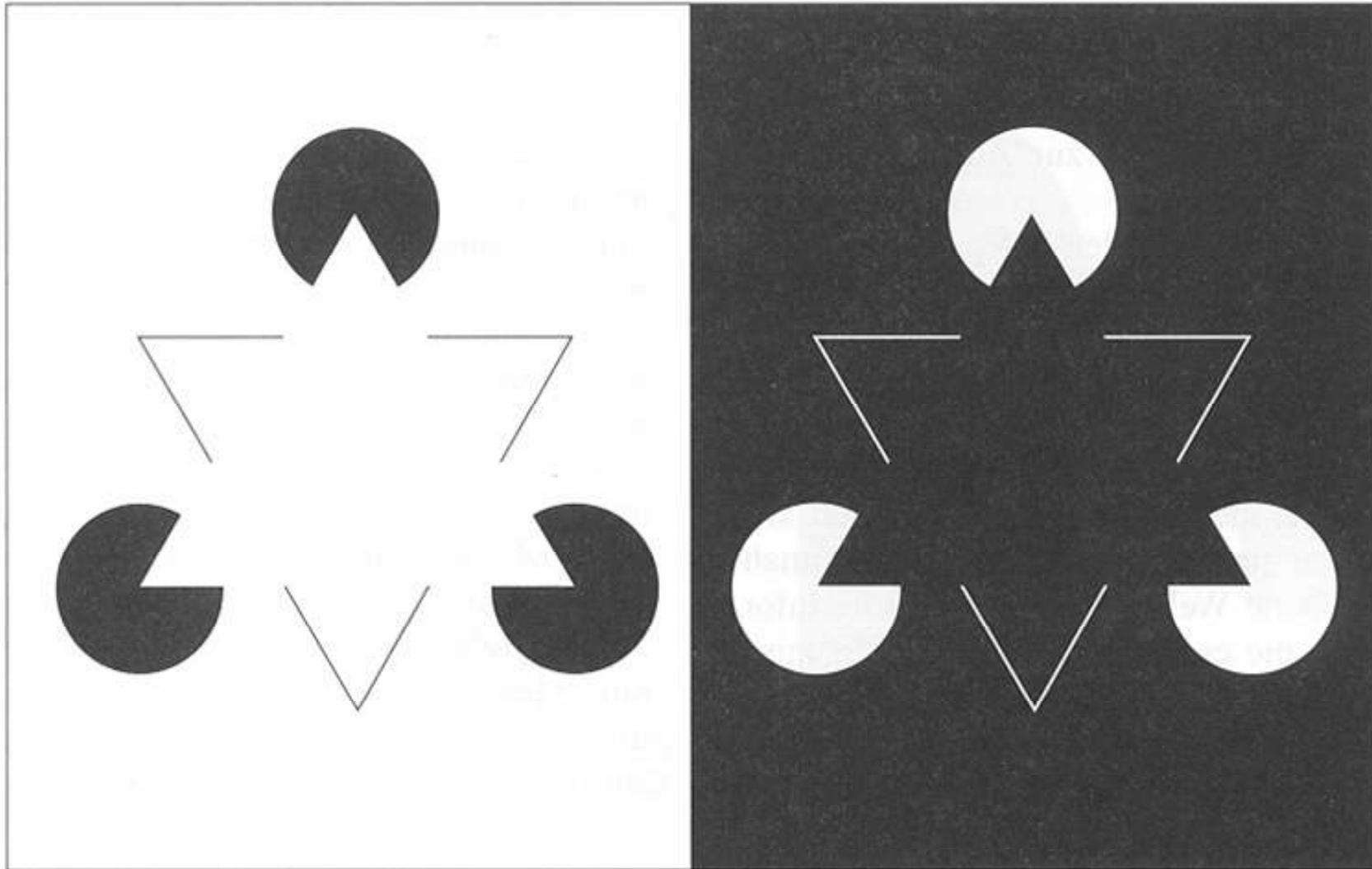
Kandel 25-2

*Vordergrund/  
Hintergrund?*



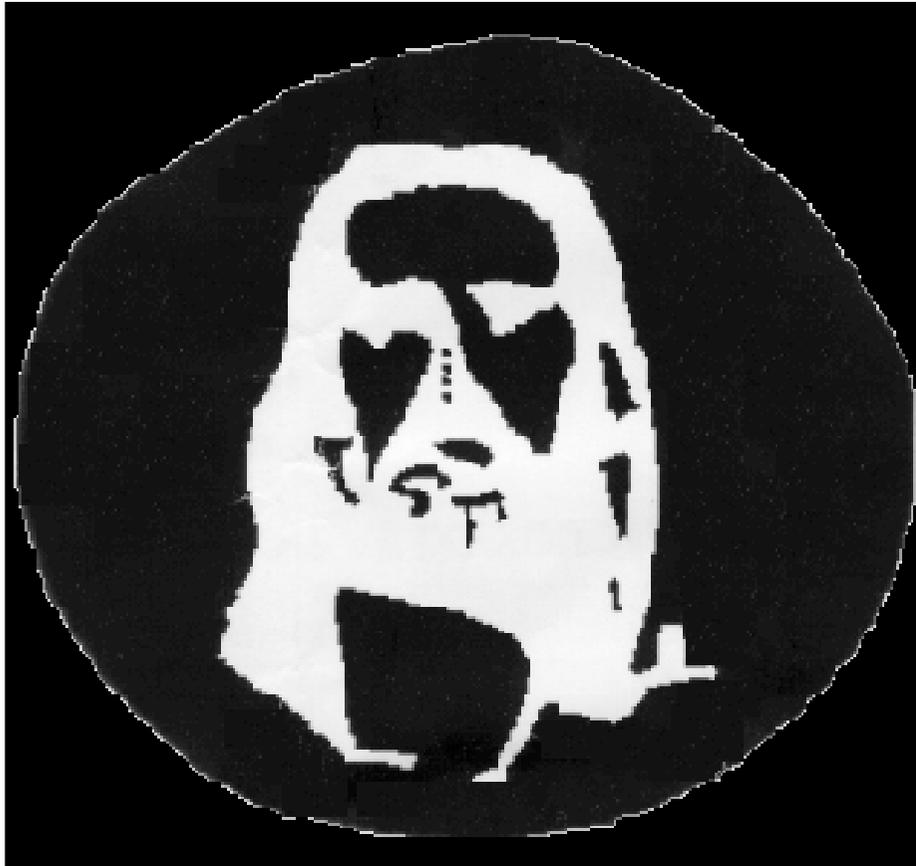
Escher

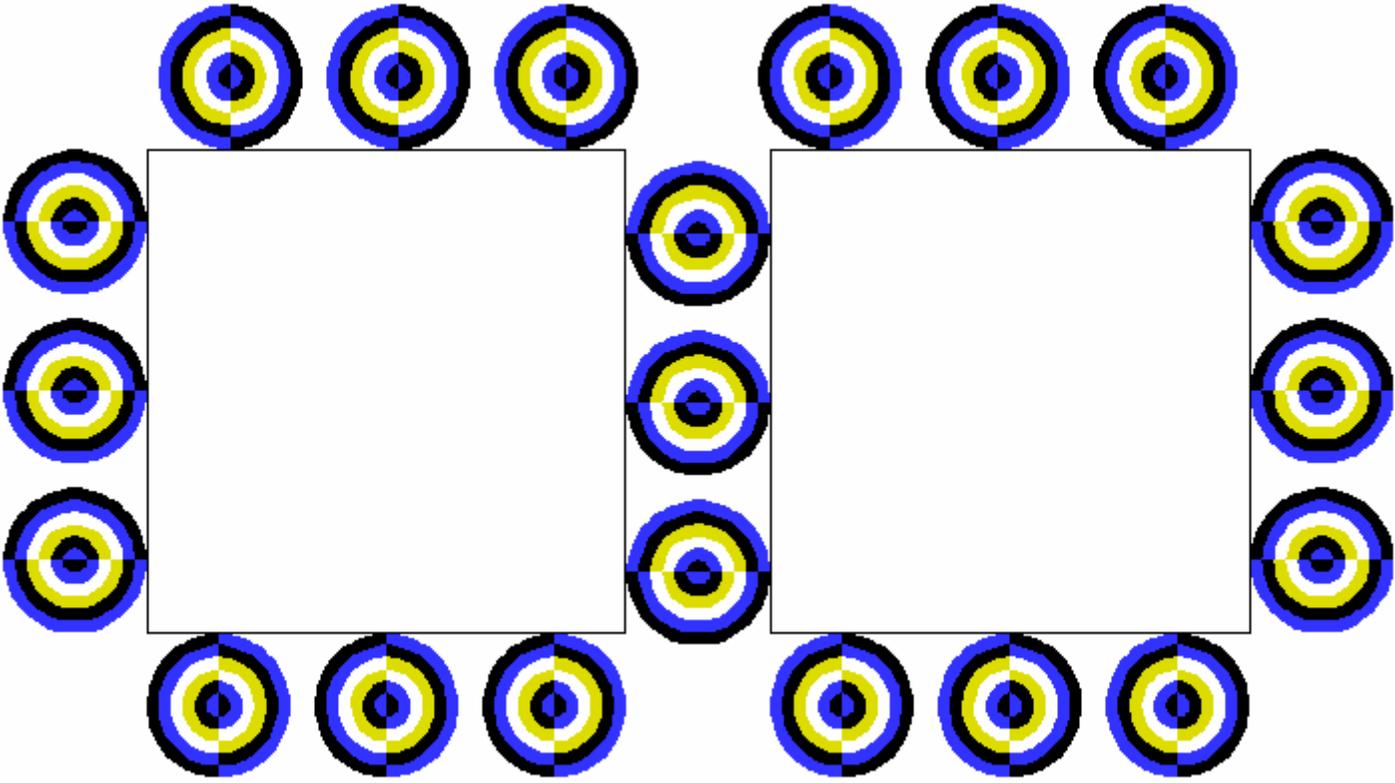
## *Kaniza Dreieck: Subjektive Konturen*



21-7 Kandel Spektrum

# Jesus - Illusion





## ***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

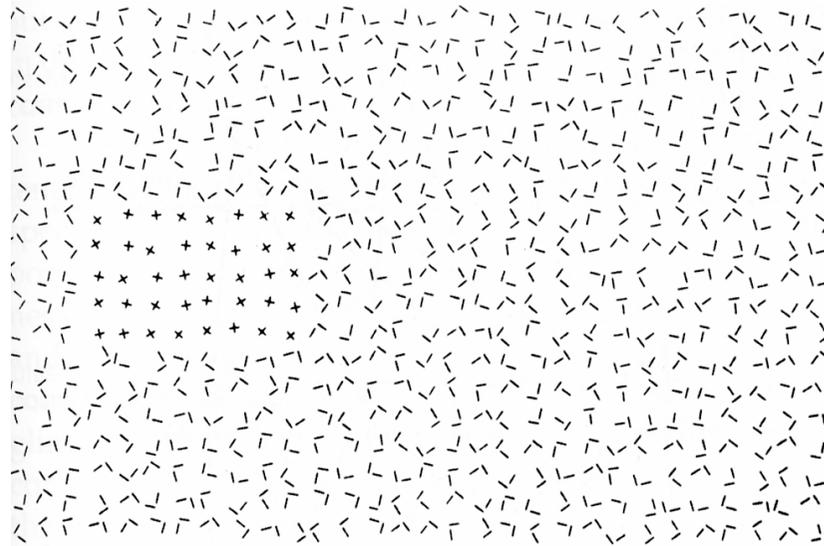
### **Entropie (Unordnungsgrad):**

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**).

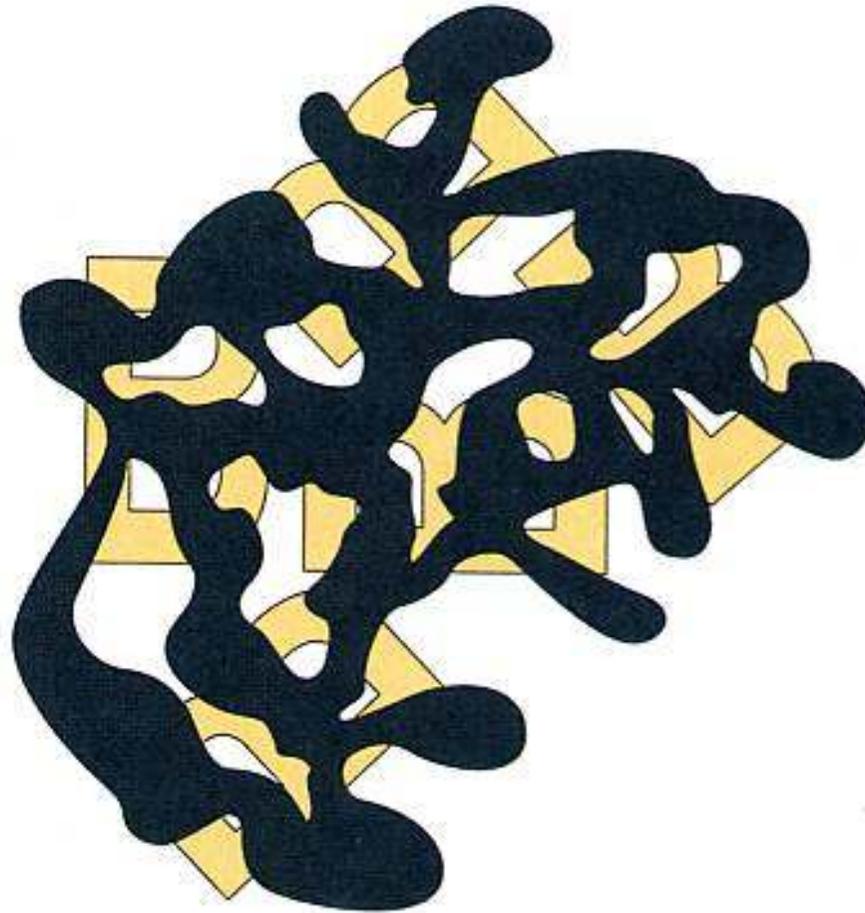


Die Signaldetektion in physikalischem Rauschen hängt ab vom:

**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*



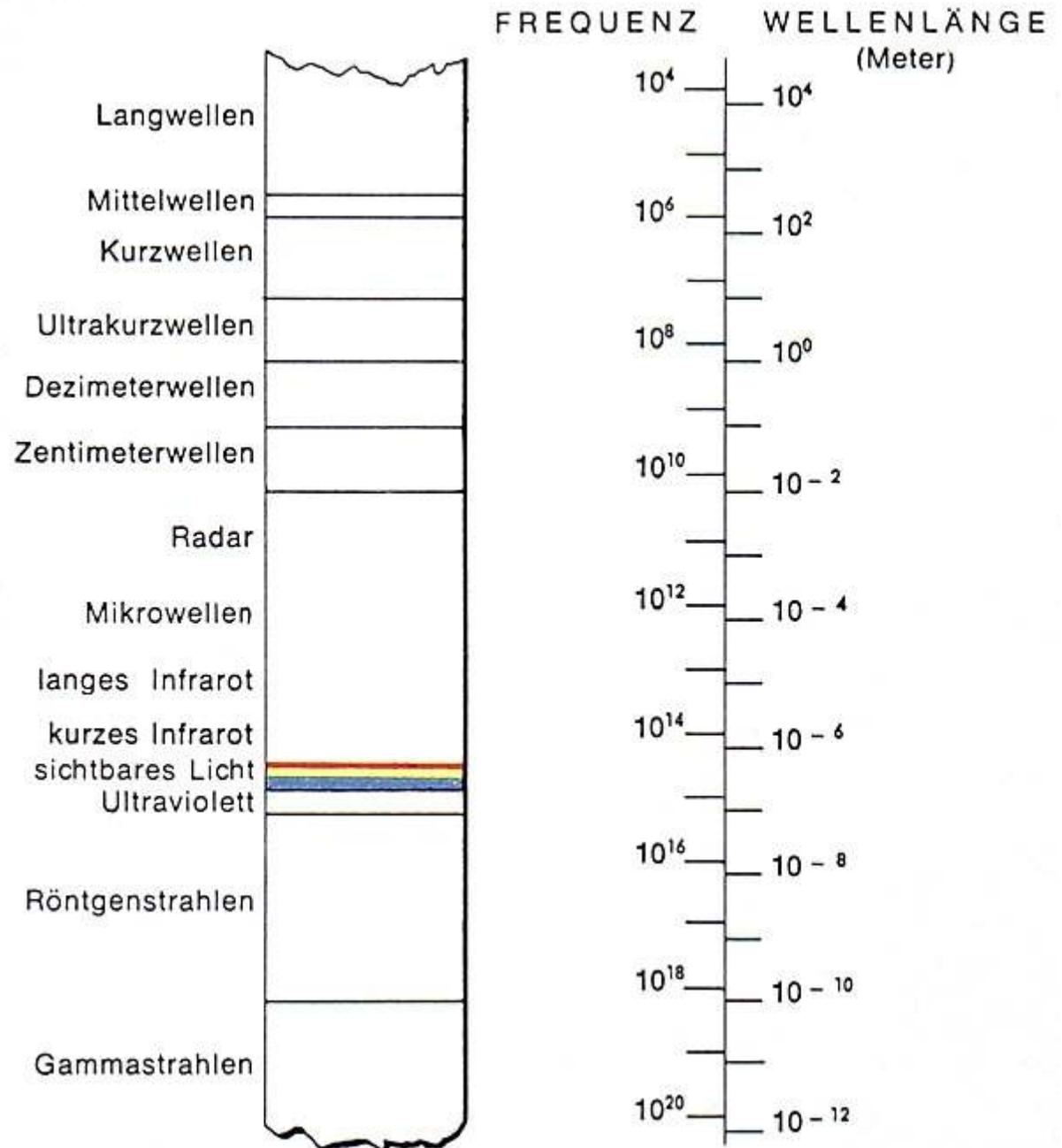
# Physik des Lichts

# Physik des Lichts

**Licht =  
elektromagnetische  
Wellen**

**Farbe =  
Wellenlänge**

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



# Lichtwelle versus Lichtquanten

## 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

## Licht als Partikel (Planck)

**Lichtquanten** oder auch **Wellenpakete**

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

## Reizquantität und Qualität

Tabelle 1.1. Reizparameter

Reiz	Quantität [Maßeinheit]	Qualität [Maßeinheit]
Licht	Lichtfluss [Photonen/cm <sup>2</sup> /s/nm]	Wellenlänge [nm]
Schall	Schalldruck [ $\mu\text{Pa}$ ] <sup>a</sup>	Frequenz [Hz]
Duft	Stofffluss [Moleküle/cm <sup>3</sup> /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 <sup>a</sup>	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

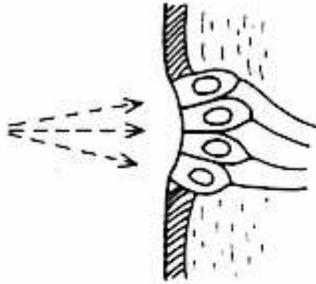


Abschwächungsdistanz = Entfernung in der die Reizintensität auf 37% abgesunken ist

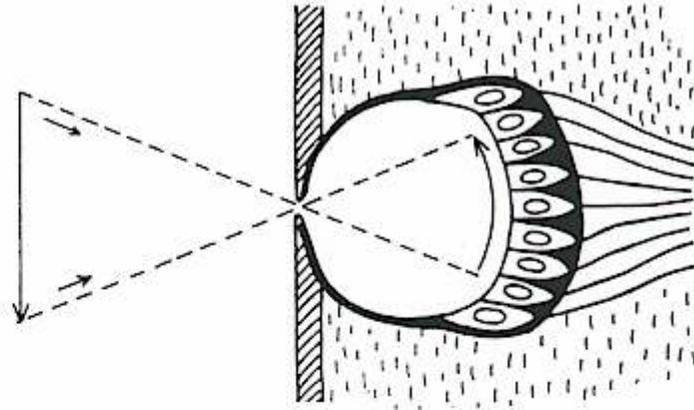
# **Augentypen Augenstellung**

# Augentypen

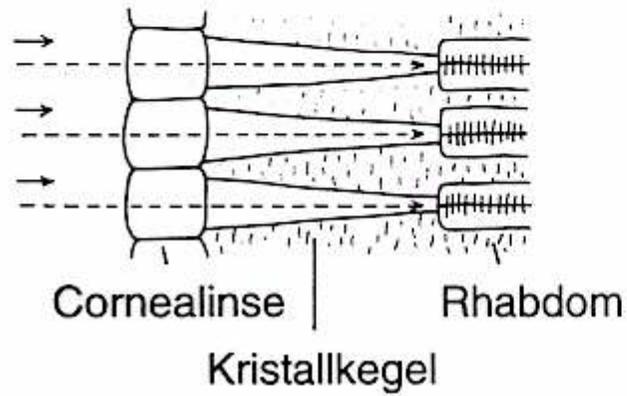
**Punktauge**



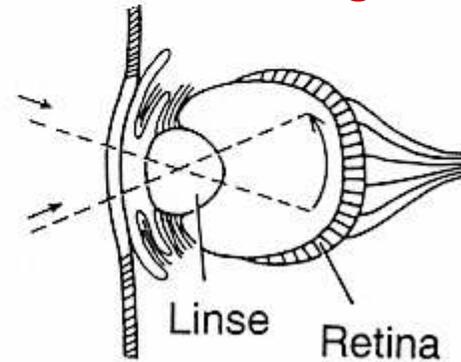
**Lochkameraauge**



**Komplexauge**

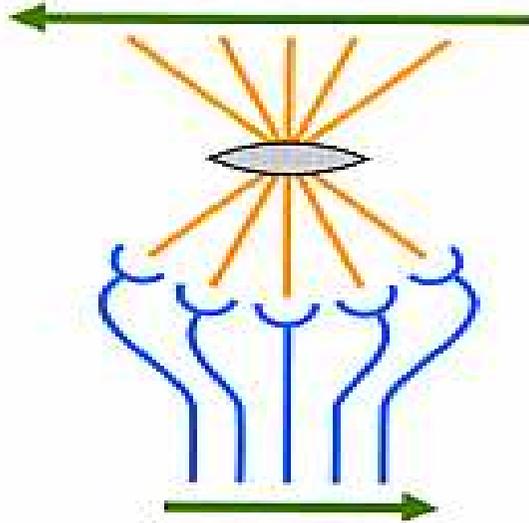


**Linseauge**

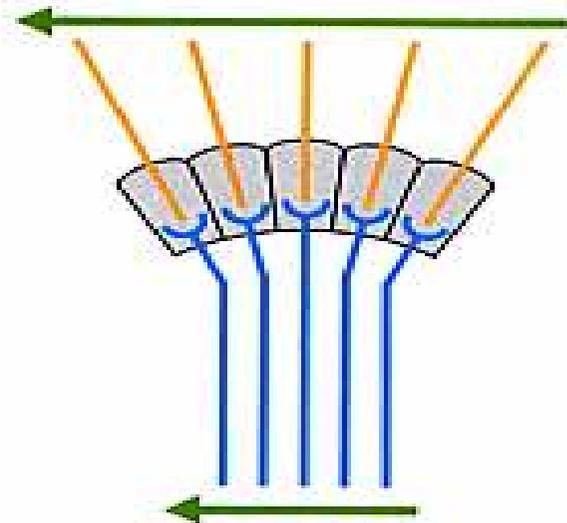


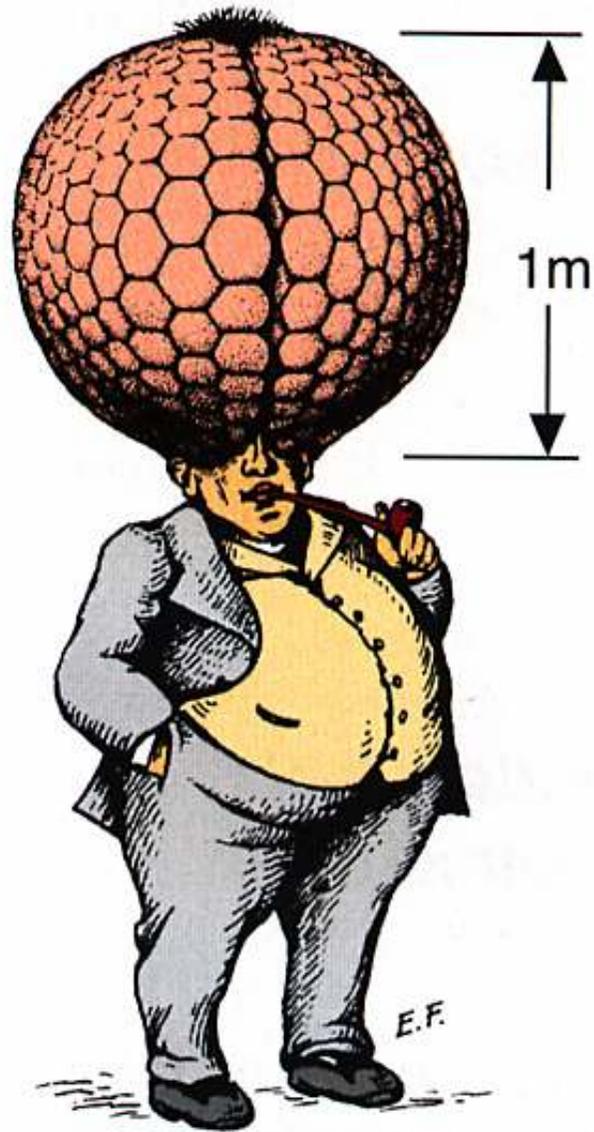
# Komplexaugen

Bildentstehung im Linsenauge



im Komplexauge

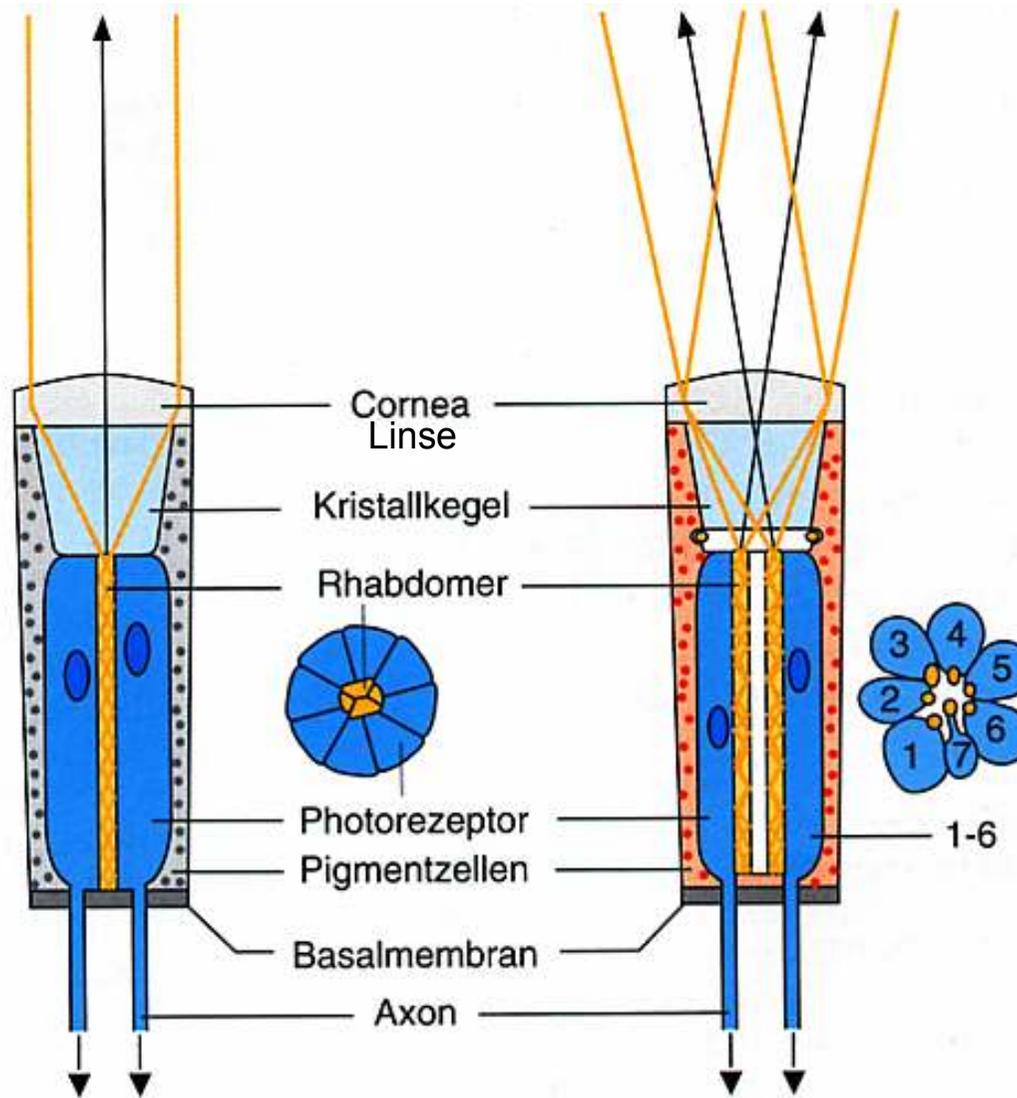




Dudel 17-4

## die einzelne Facette – das Ommatidium

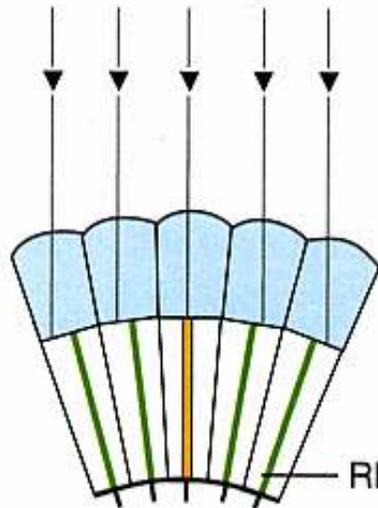
**Biene:**  
**fusioniertes**  
**Rhabdom,**  
wirkt als  
ein Lichtleiter



**Musca:**  
**unfusioniertes**  
**Rhabdom,**  
Rhabdomere  
divergieren in  
ihren optischen  
Achsen

# Typen von Komplexaugen

## Appositions- auge

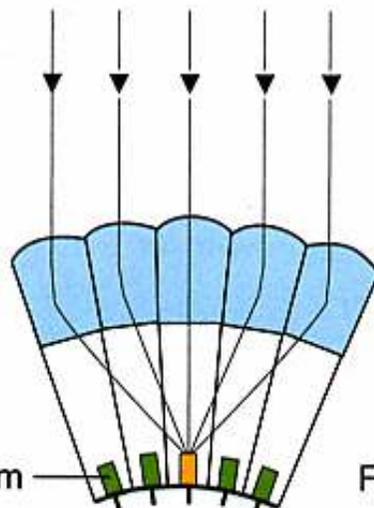


Rhabdom

typisch für tagaktive  
Insekten:  
Hymenoptera  
Odonata  
Coeloptera

und Crustacea

## optisches Superpositions- auge

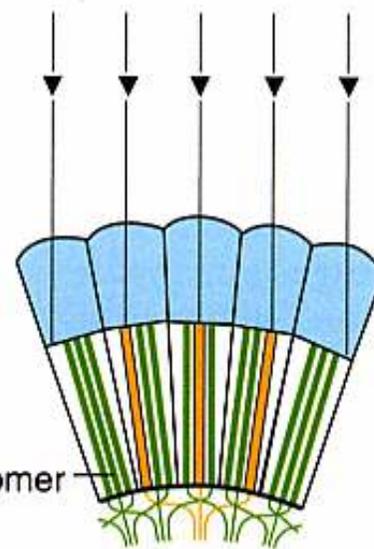


Rhabdomer

bei nachtaktiven  
Insekten:  
Coeloptera  
Lepidoptera

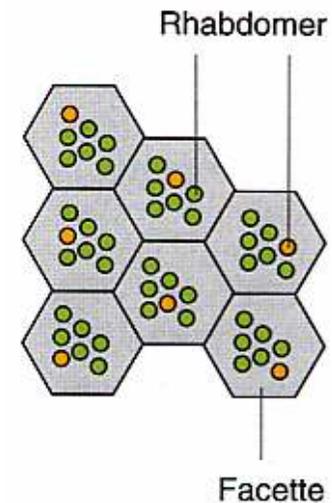
und Crustacea

## neurales Superpositions- auge



Auf-  
sicht

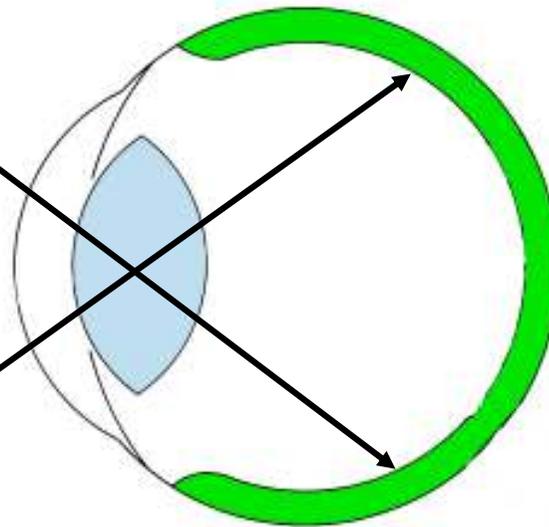
bei höheren  
Dipteren:  
Musca, Drosophila



Rhabdomer

Facette

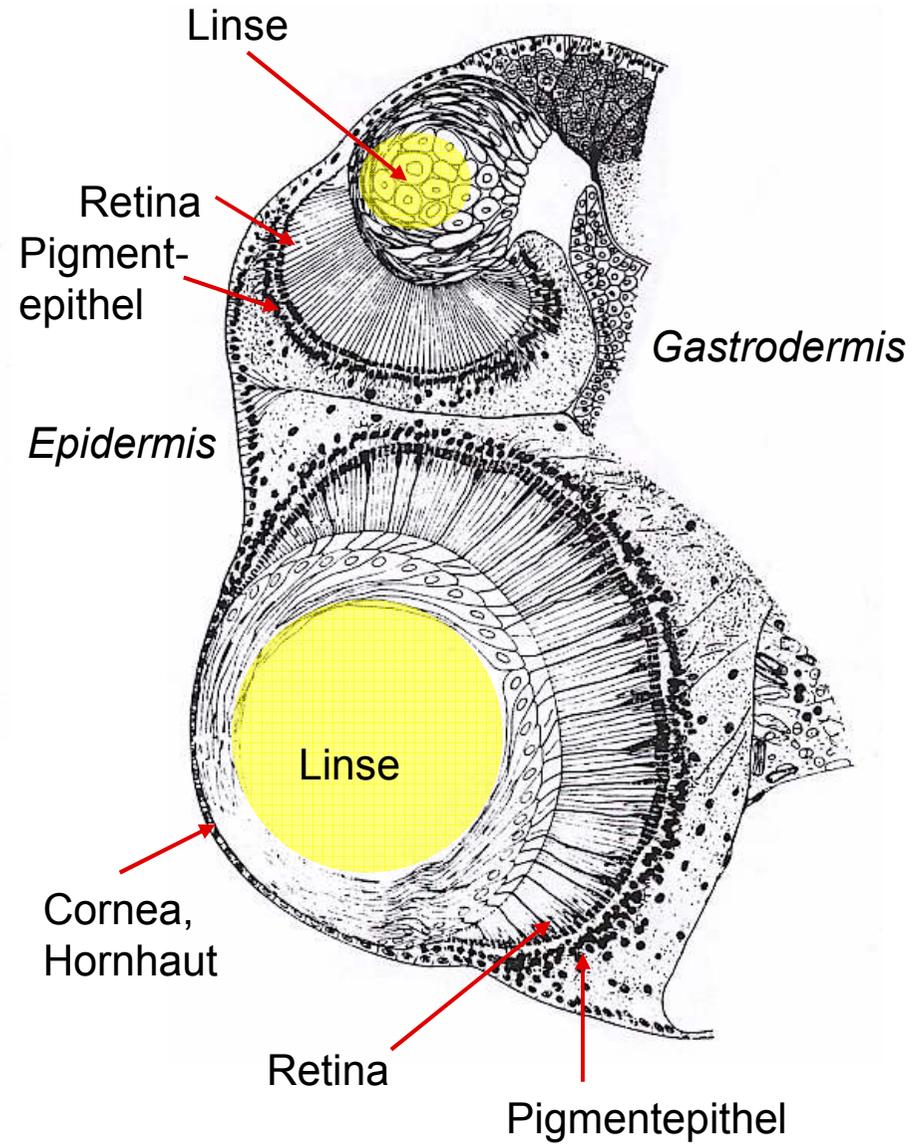
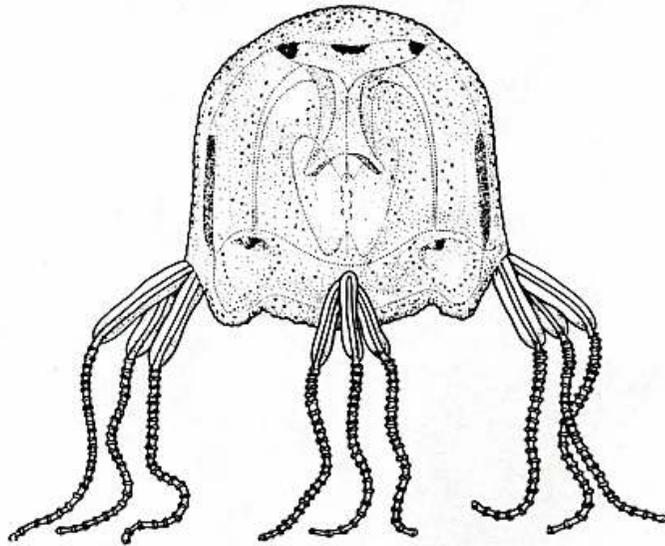
# *Linsenaugen*



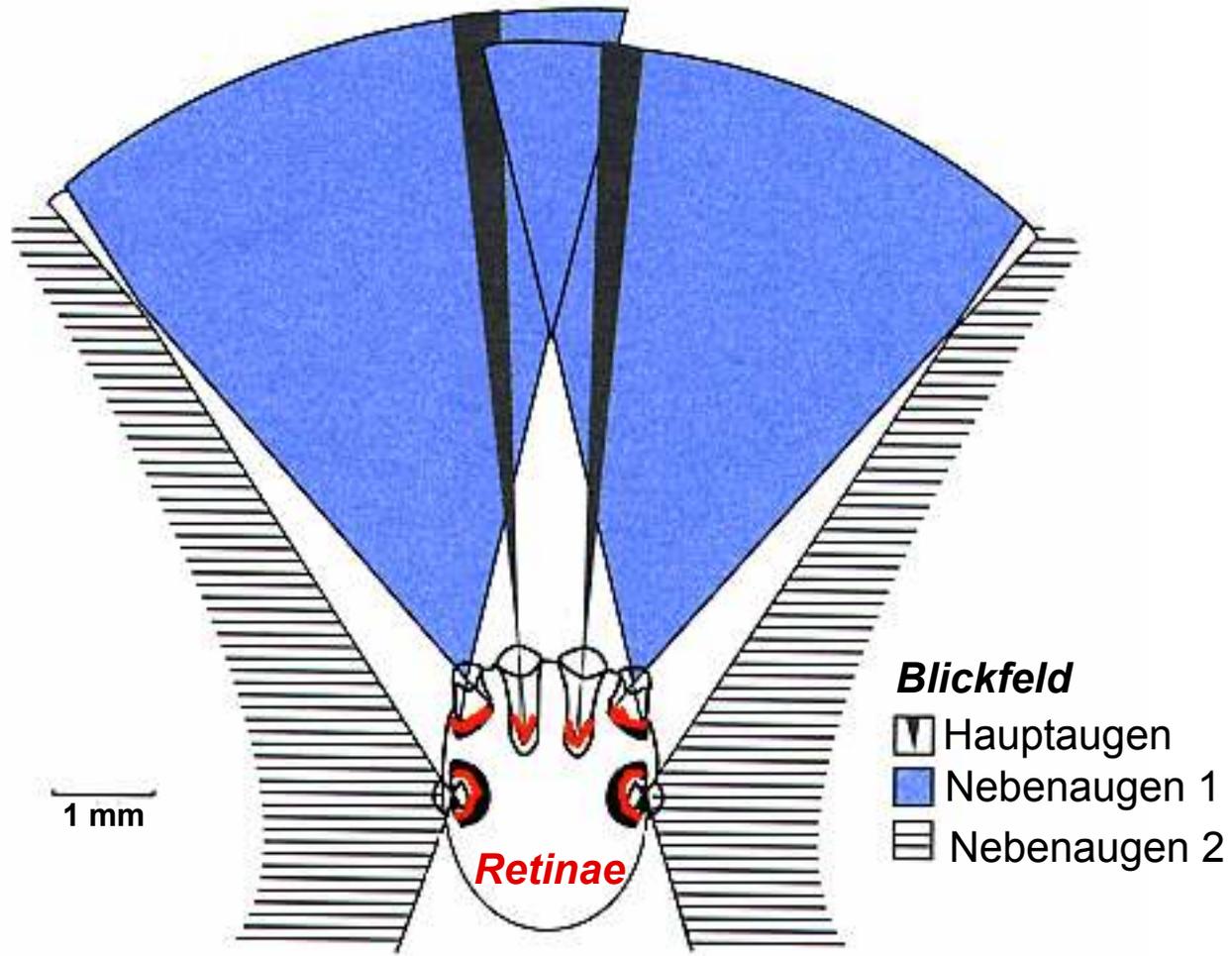
*Peichl*

# Linseaugen bei Cnidariern

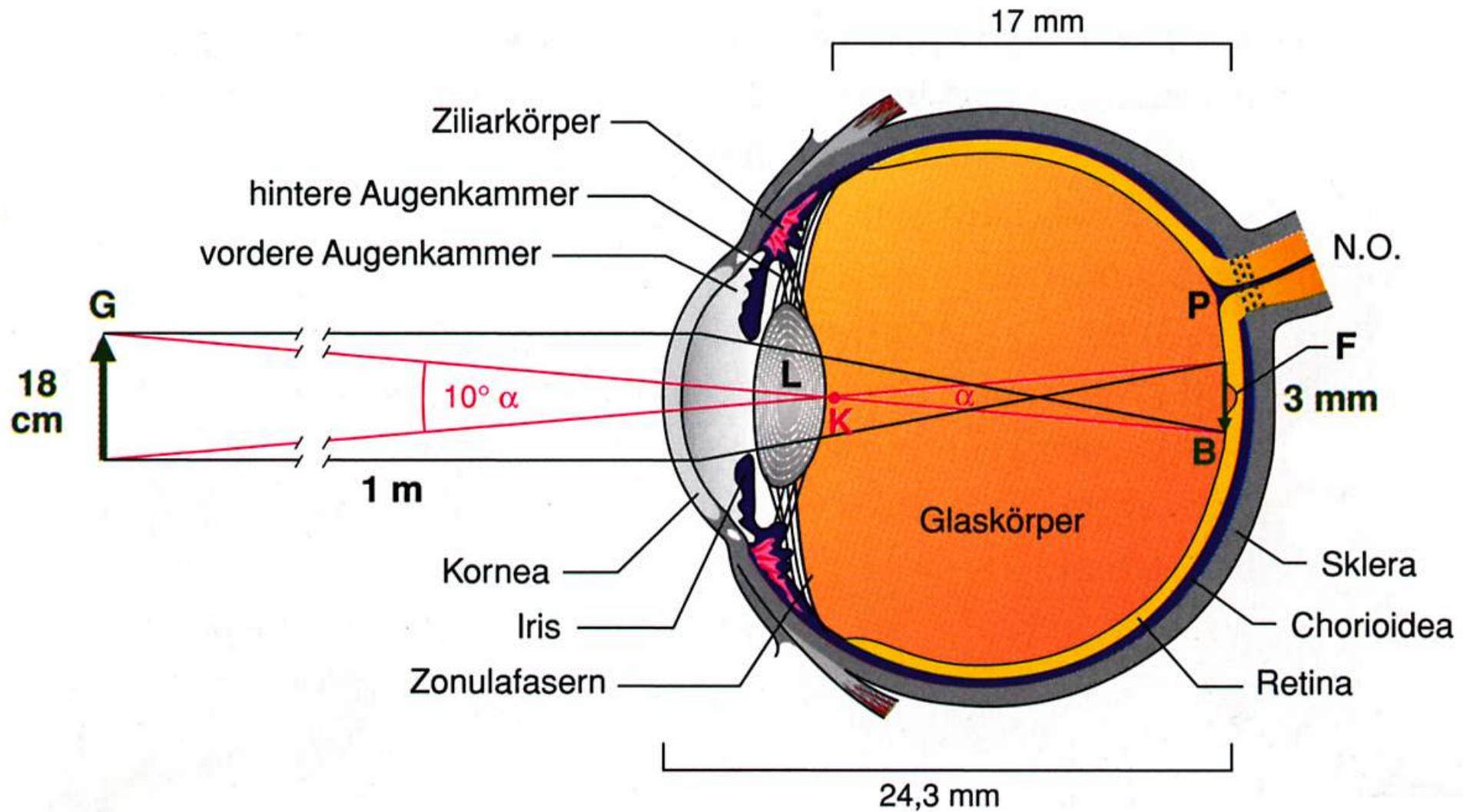
Würfelqualle mit Augenfeldern



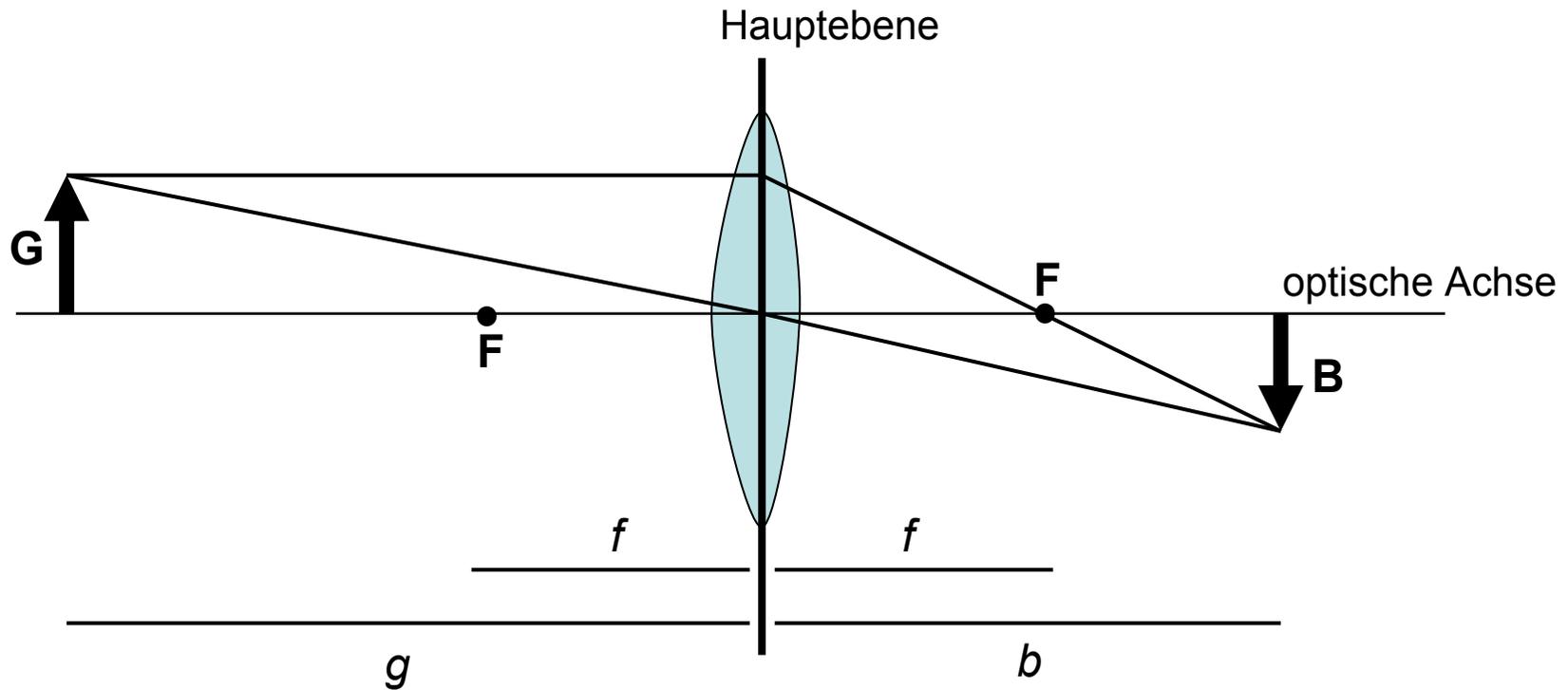
# Linsenaugen bei Spinnen



# *menschliches Auge*



# Strahlengang Linse



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

**g = Gegenstandsweite**

**b = Bildweite**

**f = Brennweite [m]**

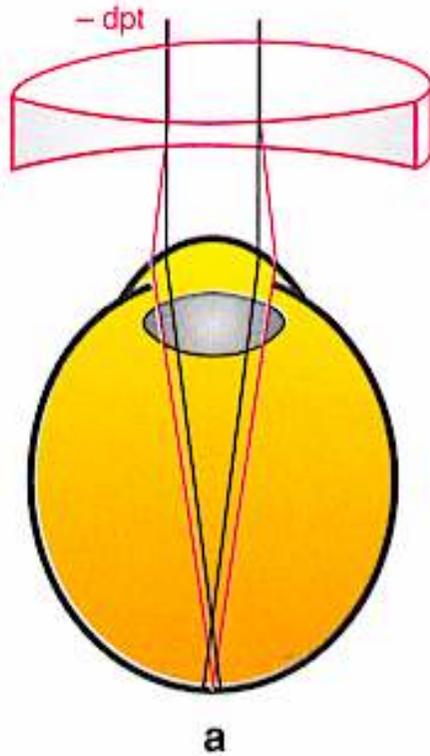
**1/f = Brechkraft [Dioptrien,  $D = 1/m$ ]**

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

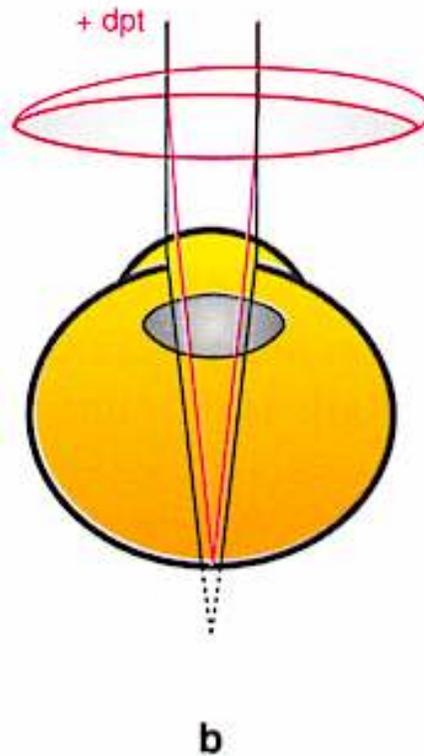
Mensch:  $f = 1,7 \text{ cm} \rightarrow 58D$

# Augenfehler

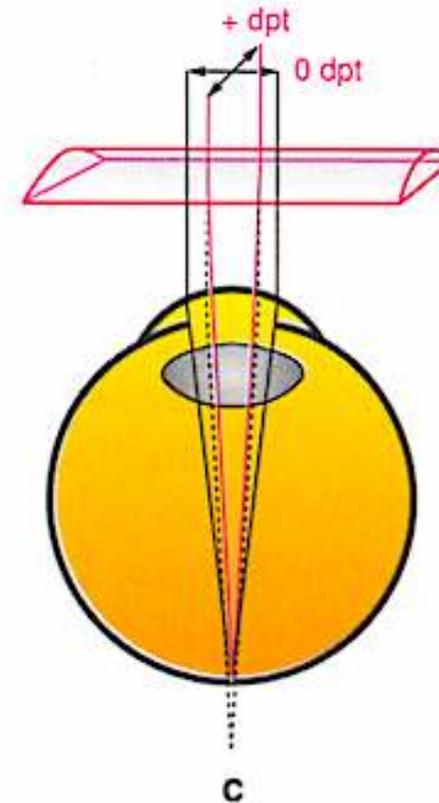
**Kurzsichtigkeit**



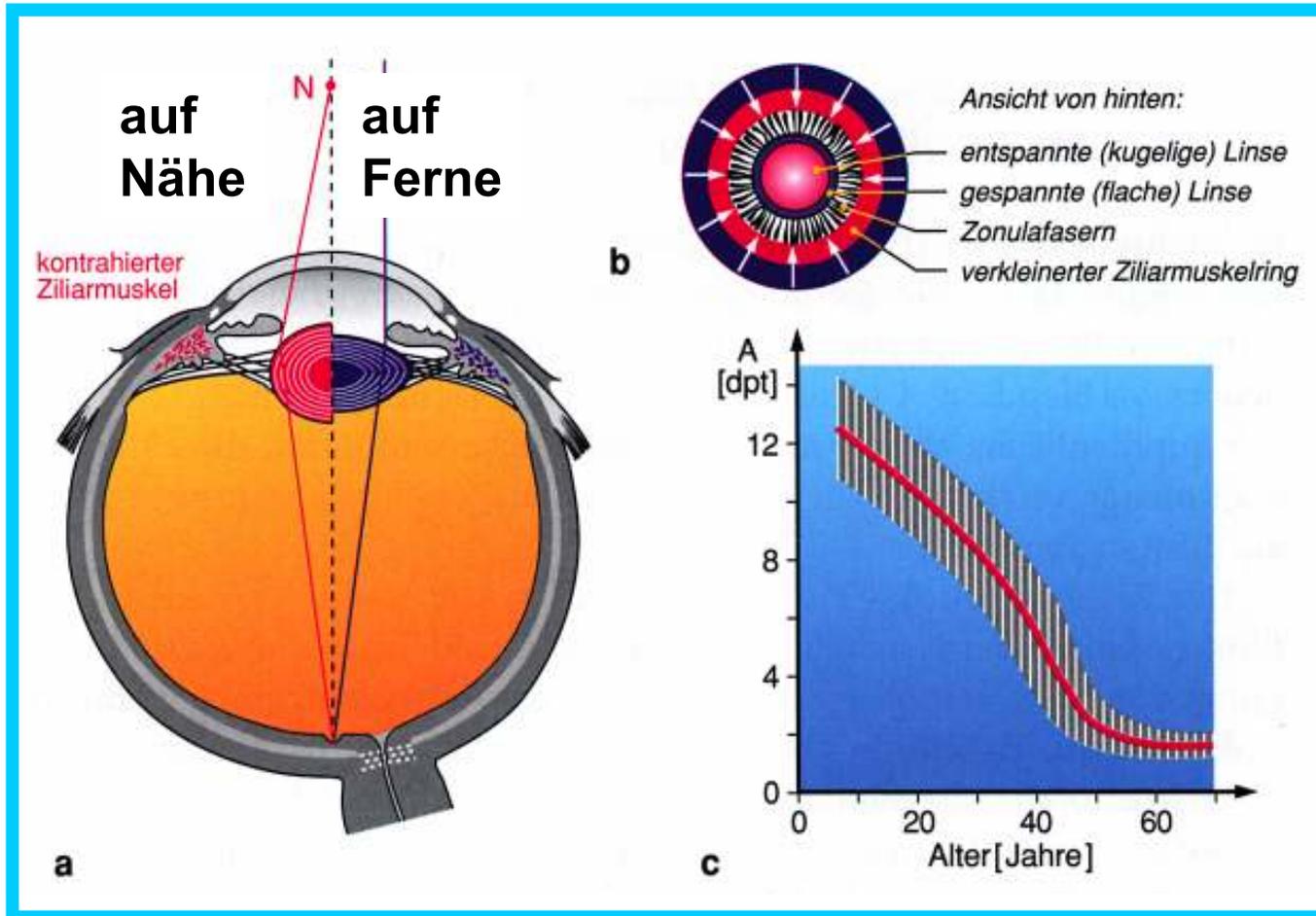
**Weitsichtigkeit**



**Astigmatismus**



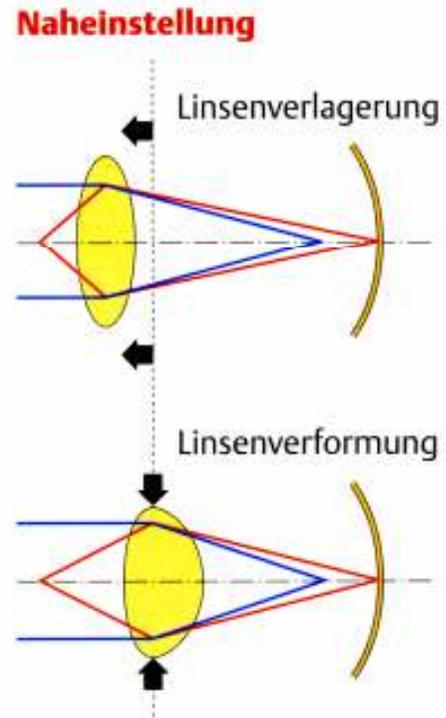
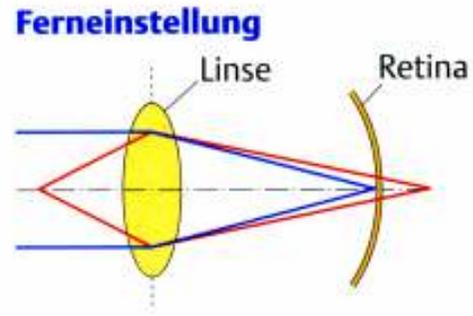
# Akkommodation



Gesamtbrechkraft fern akkom. ( $\infty$ )		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)**

# Akkommodation



Fische, Amphibien, Schlangen

andere Wirbeltiere

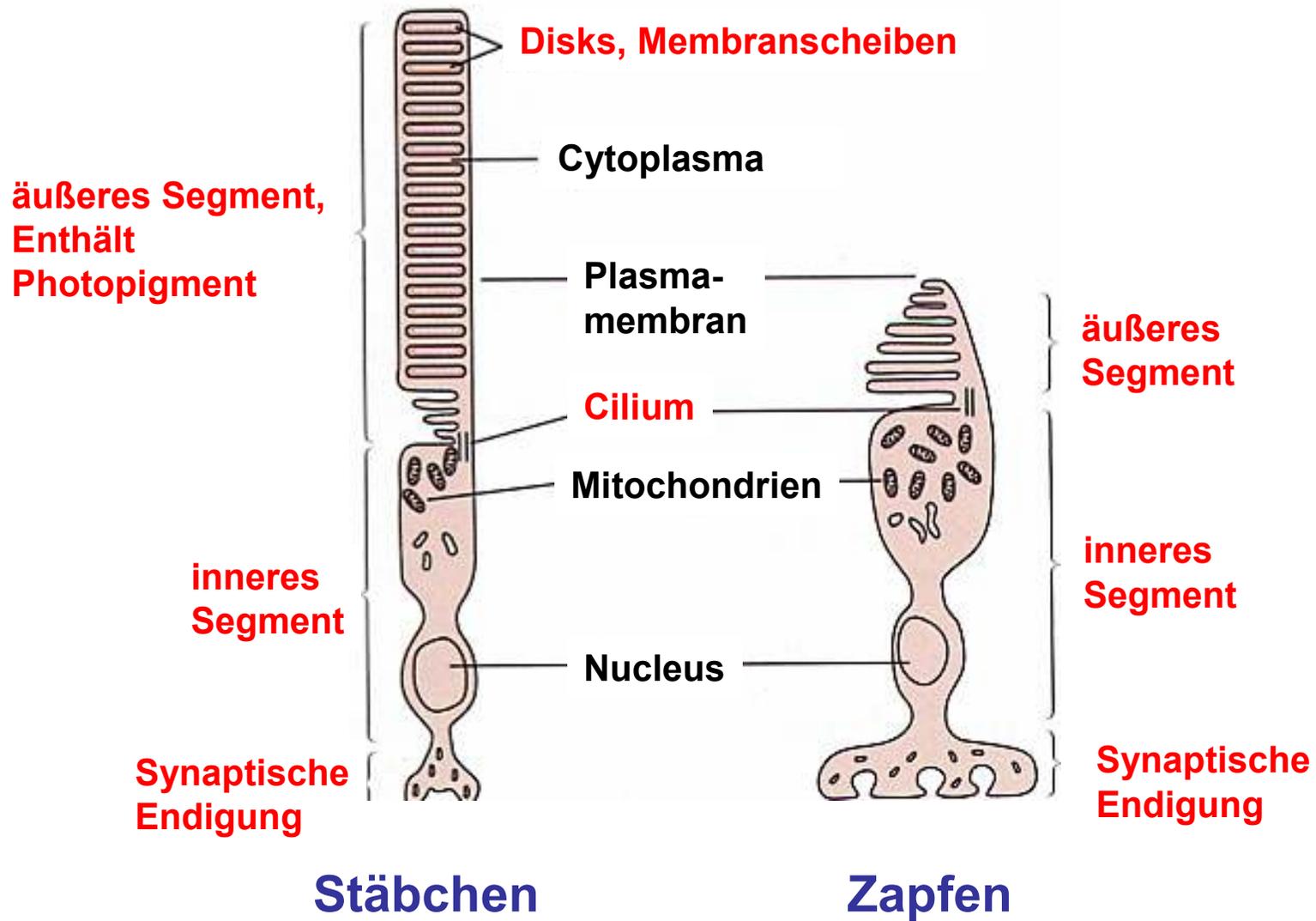
Strahlengänge blau für einen unendlich weit entfernten, rot für einen nahen Gegenstand.

# Zusammenfassung **Licht und Augentypen**

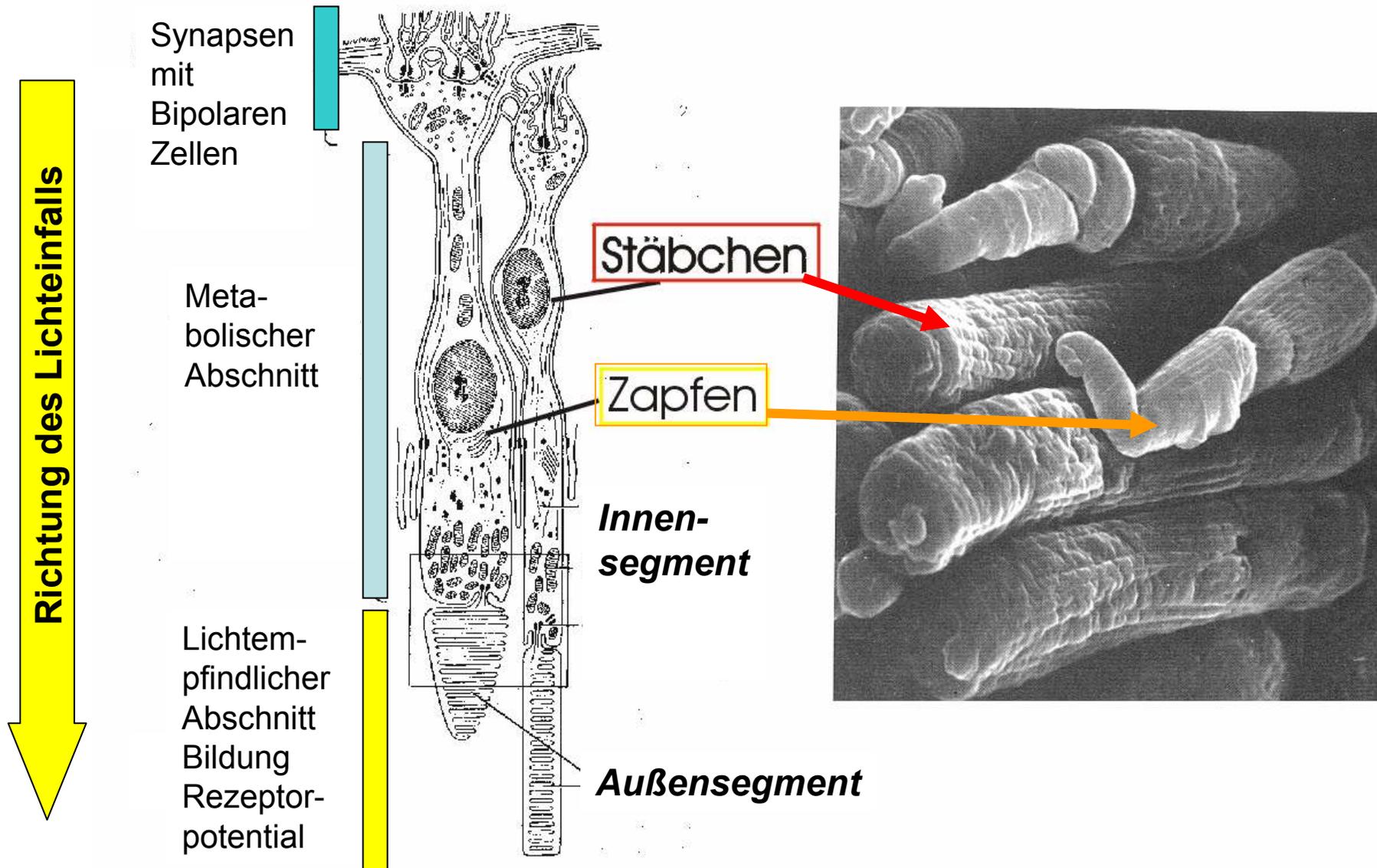
- Strukturierte Sinnesreize niedriger Entropie haben hohen Informationsgehalt
- **Signal/Rausch-Verhältniss** S/N-Ratio
- Licht als **Transversalwelle** oder als **Quanten**
- Biologisch relevanter Wellenlängenbereich **400-700 nm** hat beste Ausbreiteigenschaften in unserer Umwelt.
- **Punktauge Lochkamaerauge Linsenaug Komplexauge**
- **Komplexauge**: 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

# **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**

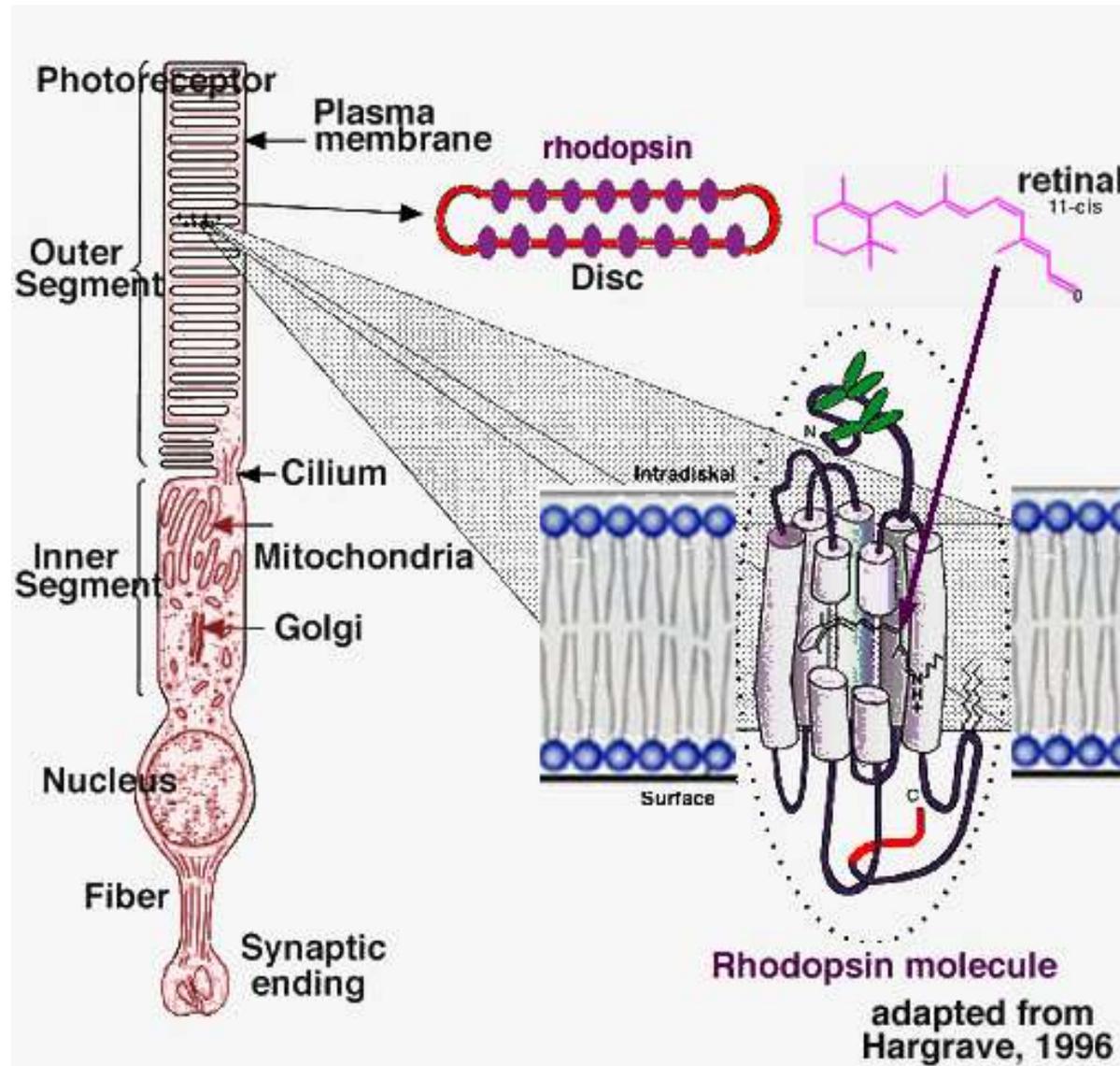
3 Pigmente- 3 Zapfentypen

Farbsehen

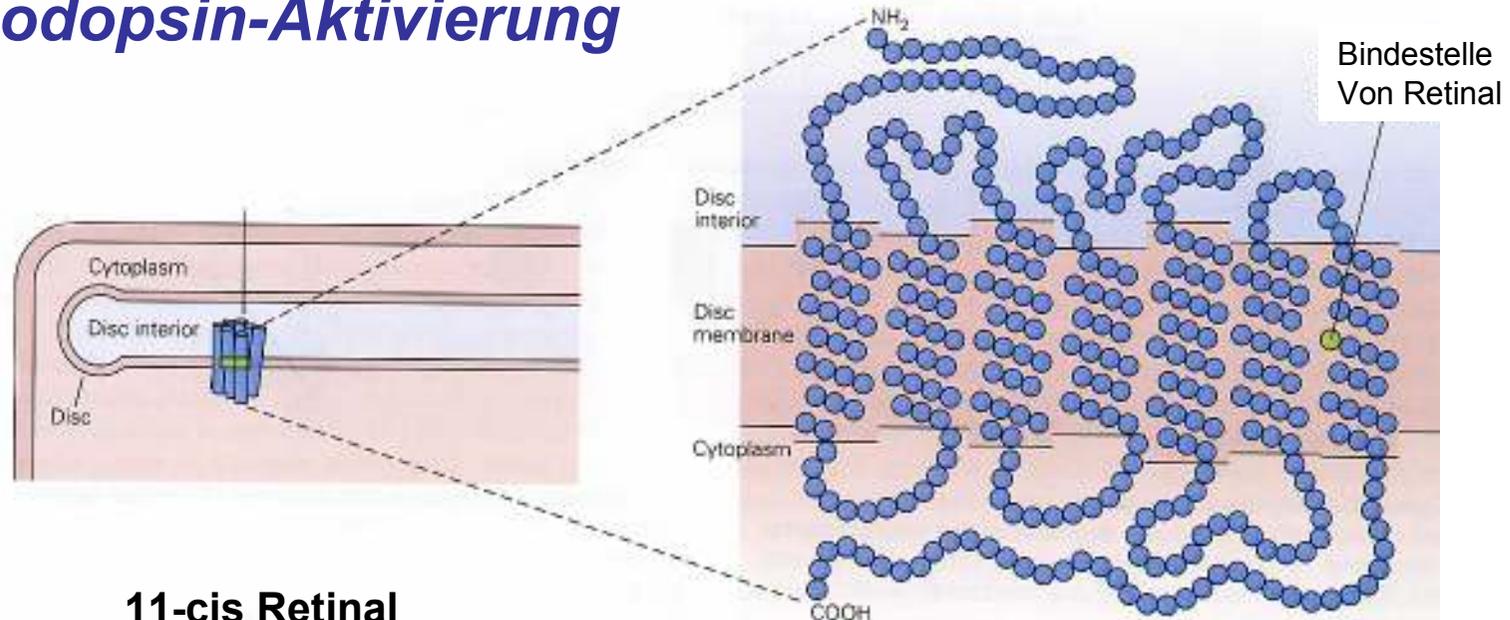
**konzentriert in der Fovea**



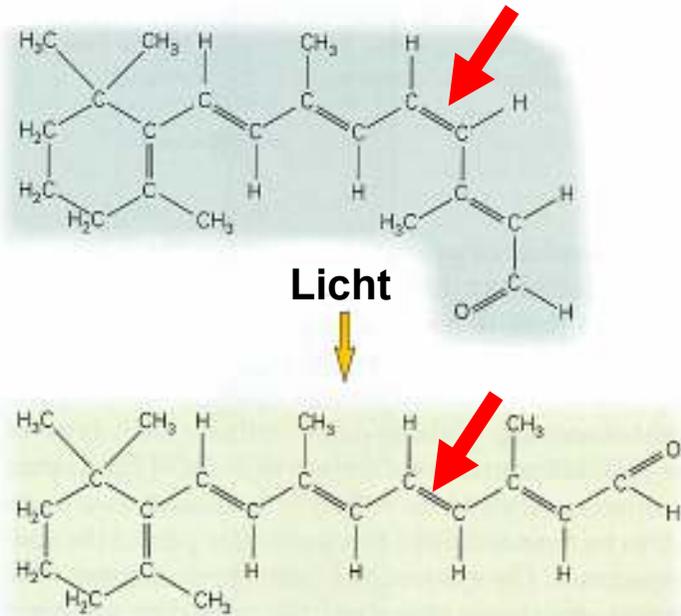
# Rhodopsin als Lichtrezeptormolekül



# Rhodopsin-Aktivierung



**11-cis Retinal**

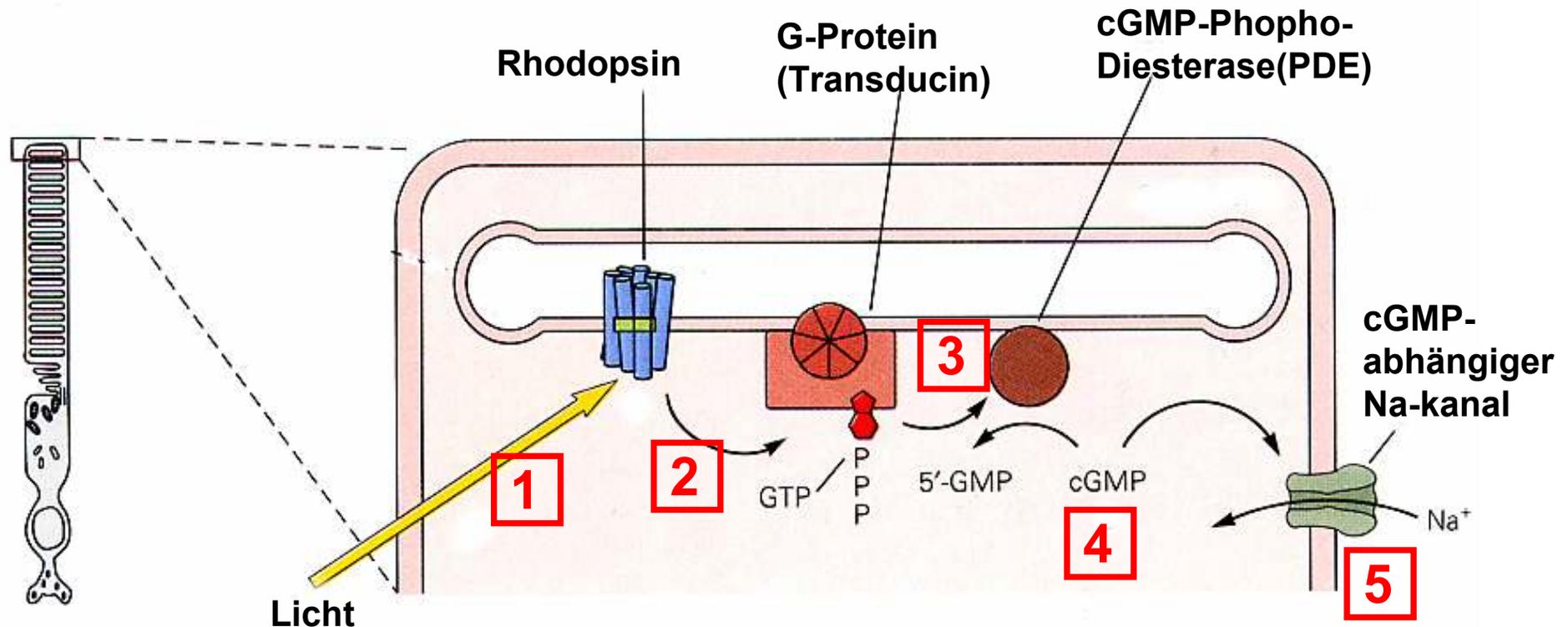


**All-trans Retinal**

- Absorption eines Photons**
- Rotation eine C-C Doppelbindung
- Übergang von 11-cis in stabilere All-trans Konfiguration
- Konformationsänderung im Opsin

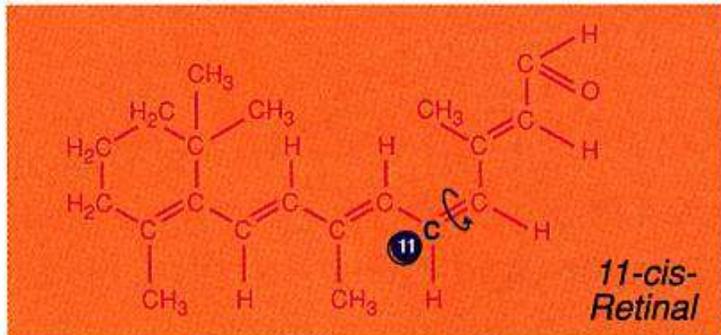
**Rhodopsin → Metarhodopsin II**

# Phototransduktionskaskade - Wirbeltiere

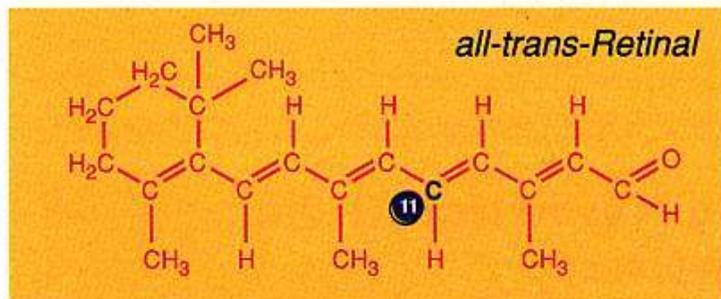


- 1** Licht: Rhodopsin  $\rightarrow$  Metarhodopsin II (R\*)
- 2** Aktivierung von Transducin ( $T_{\alpha\beta\gamma}$ ) durch R\*:  $T_{\alpha}$  bindet GTP und spaltet sich ab
- 3**  $T_{\alpha}$ -GTP aktiviert PDE
- 4** PDE hydrolysiert cGMP zu 5'-GMP
- 5** cGMP abhängiger Na-Kanal schließt sich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

# Dunkel-Adaptation

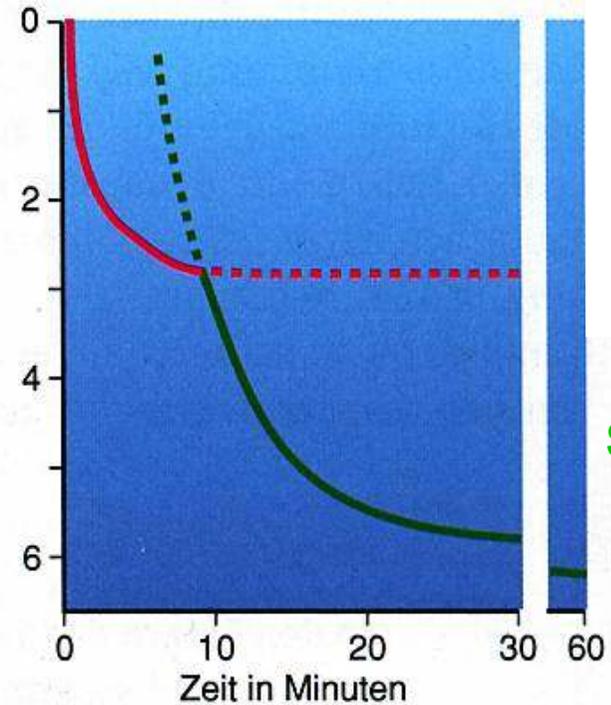


hell ⇌ dunkel



## Zeitverlauf der Adaptation:

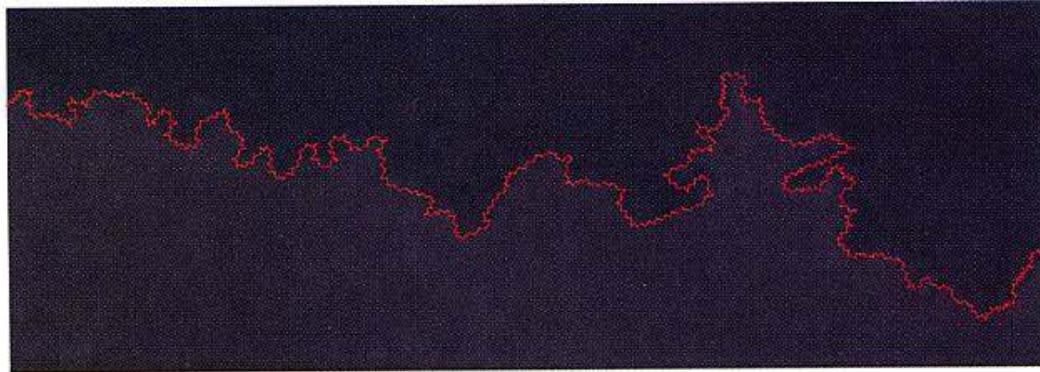
log rel Empfindlichkeit



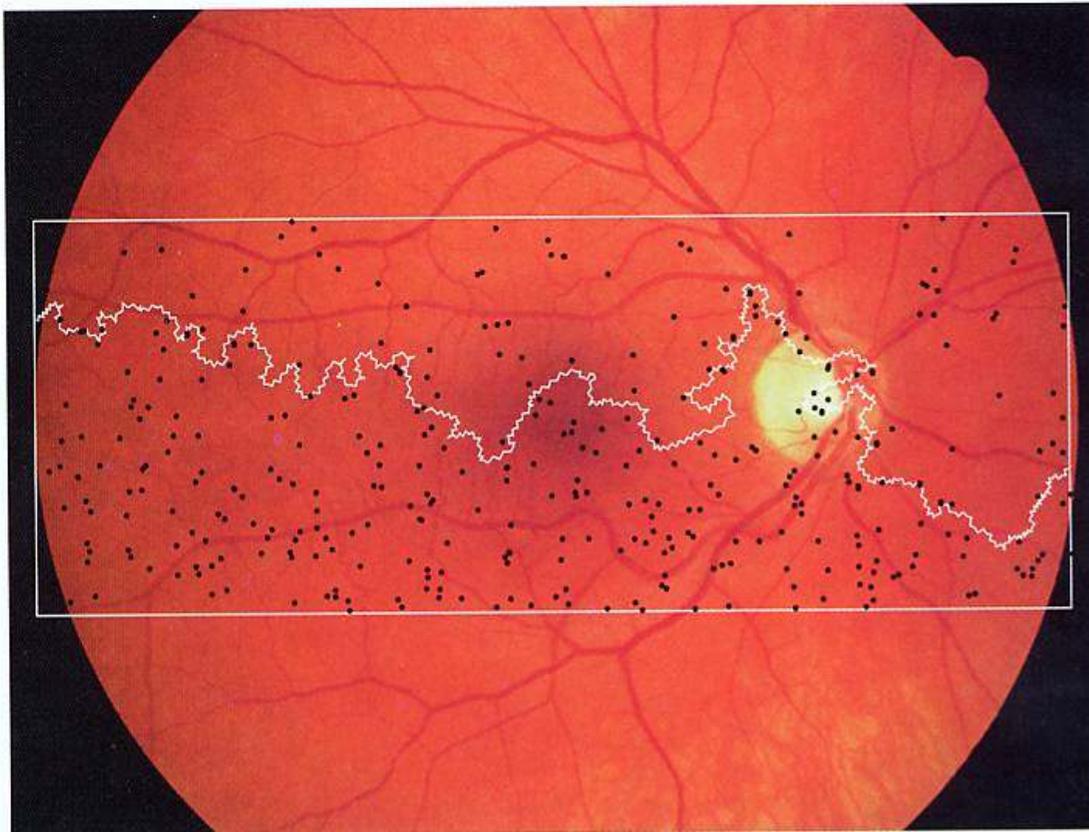
Zapfen

Stäbchen

# Photonen am Nachthimmel



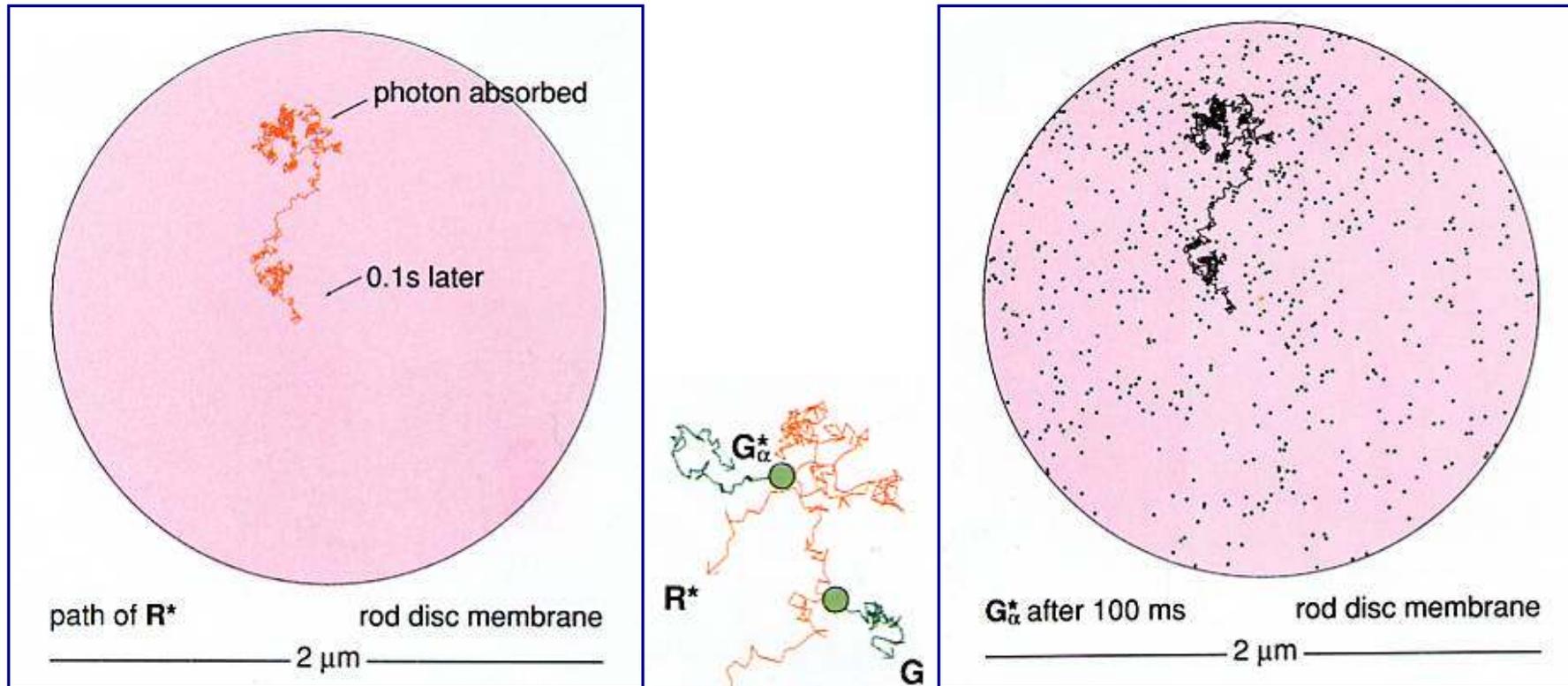
Nachthimmel mit  
Waldkontur



Photonen auf der  
Netzhaut

×5

# Einzelne Photonen aktivieren Rhodopsin



R\* aktiviertes Rhodopsin  
G\* aktiviertes G-protein

site of initial activation of R\*

## **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:

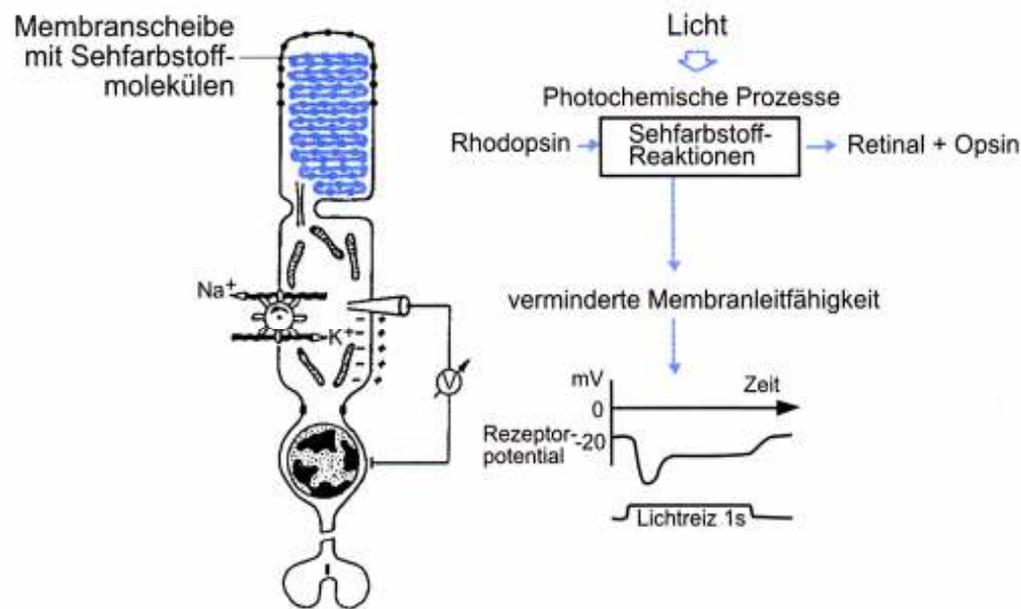
→1 Photon bewirkt etwa die Schließung von 5000 Na-Kanälen  
Verminderung des Na-Einstroms um 1 pA (um 5%)  
Membranpotential wird um 3% hyperpolarisiert (Rezeptorpotential)

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

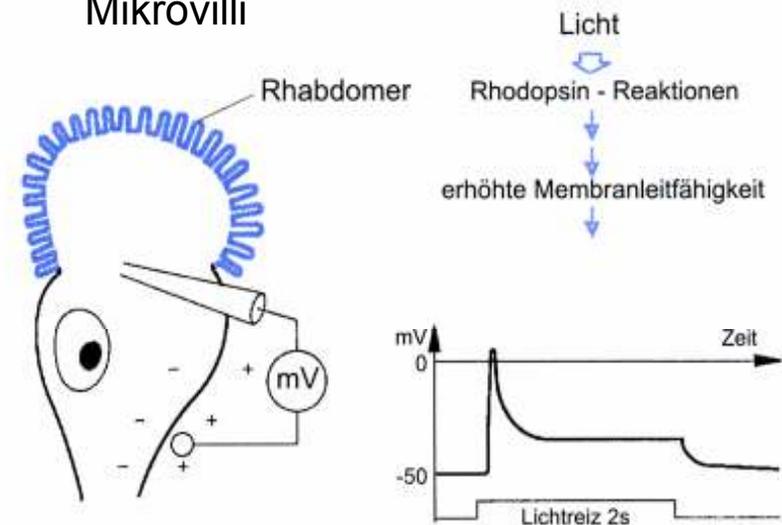


## Hyperpolarisation

PDE  $\rightarrow$  cGMP  
 $\rightarrow$  Na Kanäle zu

# Arthropoden

## Retinula-zellen mit Rhabdomer aus Rhodopsin-haltigen Mikrovilli



## Depolarisation

PhospholipaseC  $\rightarrow$  IP3  
 $\rightarrow$   $\text{Ca}^{++}$   $\rightarrow$  Na Kanäle offen