

Farbmechanismus des Auge

präsentiert von Christian Montag

Seminar: Visuelle Wahrnehmung / Prof. Gegenfurtner

Grundlage: Denis Baylor „Colour Mechanisms of the Eye“

Grundfrage des Referates:

Wie kommt es dazu, dass wir Farben sehen?



Aufbau des Referates:

1. Grundlagen über das Thema Licht
2. Wo und wie entsteht Sehkraft?
 - a) Stäbchen (rods)
 - b) Zapfen (cones)
3. Ganglienzellen
4. Aufbau der Rezeptorpigmente und Entstehen von elektrischen Signale
5. Trichromatische Theorie des Sehens
6. Molekulare Struktur und Genetik der Zapfen
7. Farbblindheit
8. Zusammenfassung



Grundlagen zum Thema Licht

Licht wird durch zwei Dimensionen bestimmt:

- a) Intensität
- b) Wellenlänge

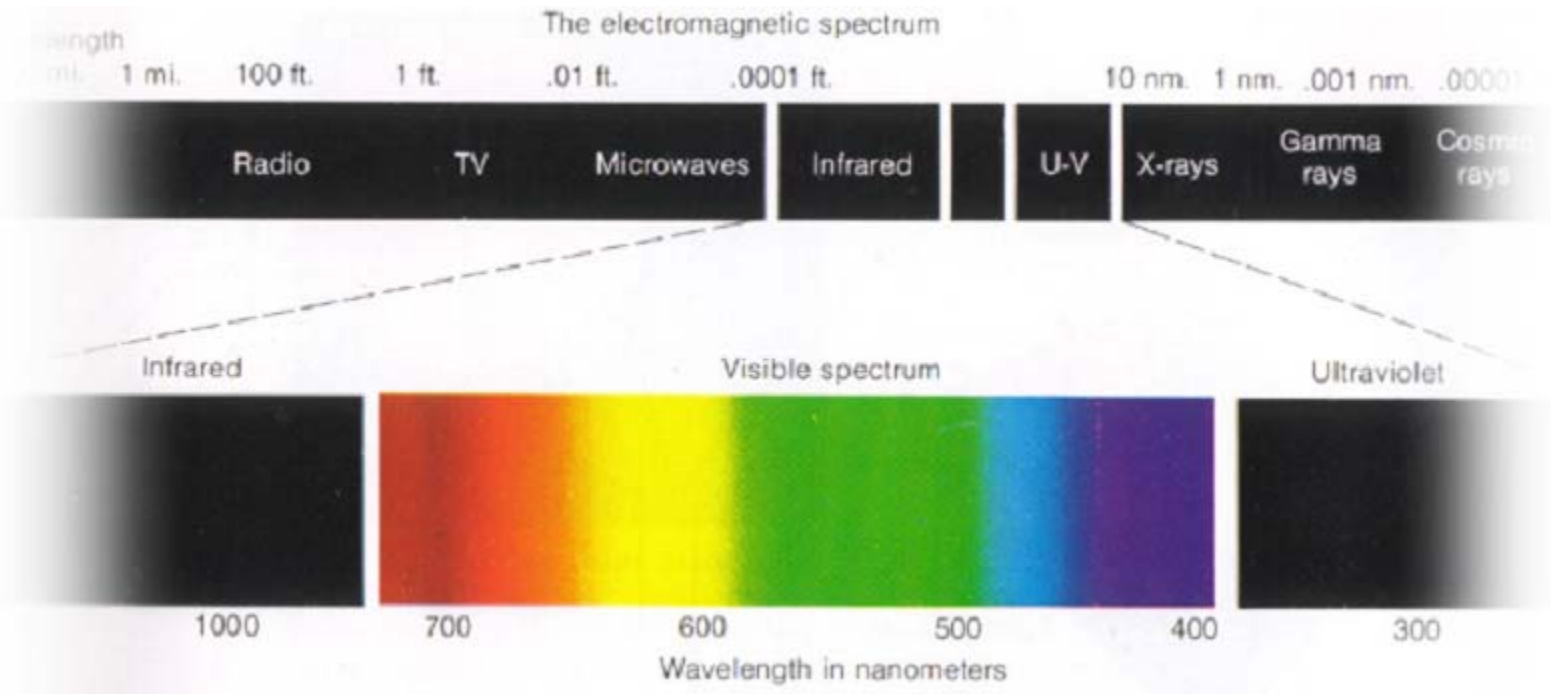
zu a) Intensität beschreibt die Anzahl von Photonen, die auf eine bestimmte Fläche zu einem bestimmten Zeitpunkt fallen (Wie hell ist es?)

zu b) Licht lässt sich entweder als Wellenlänge beschreiben oder als Bündel von Quanten / Photonen.

Stichwort: Wellen / Teilchen Dualismus

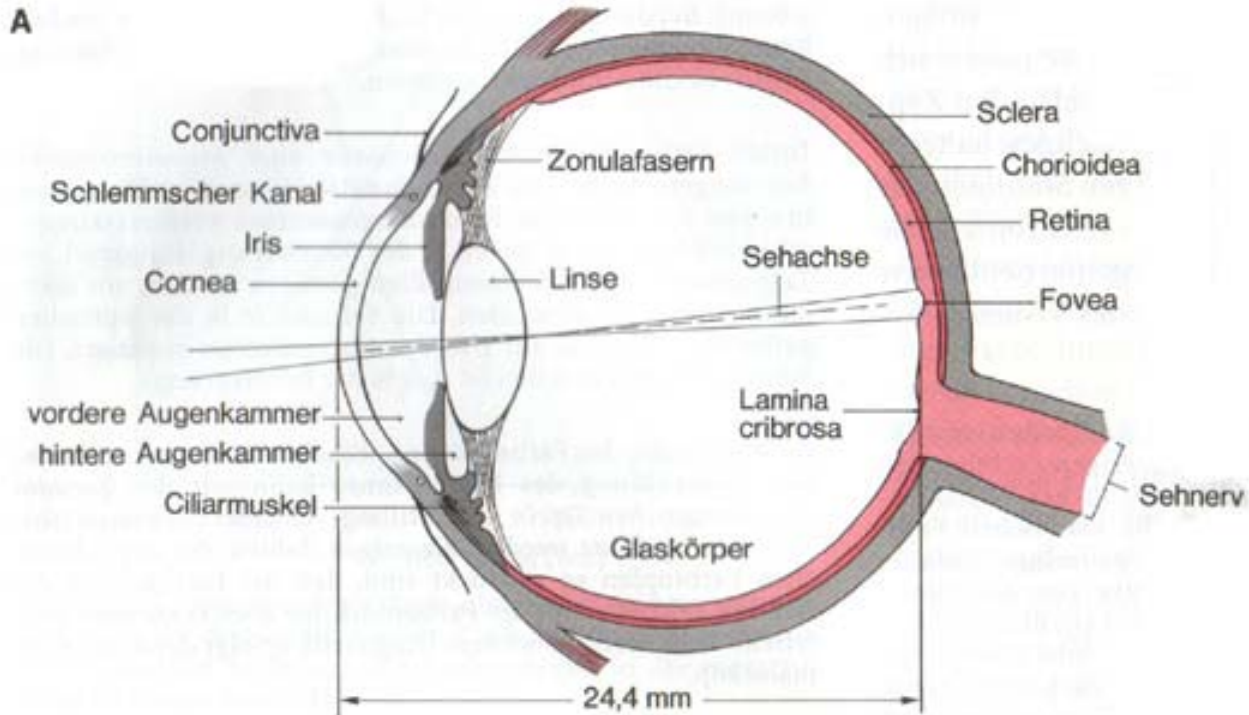
Die Einheit von Wellenlängen wird in Nanometern gemessen. (1 nm = 10^{-9})

Wellenlängen



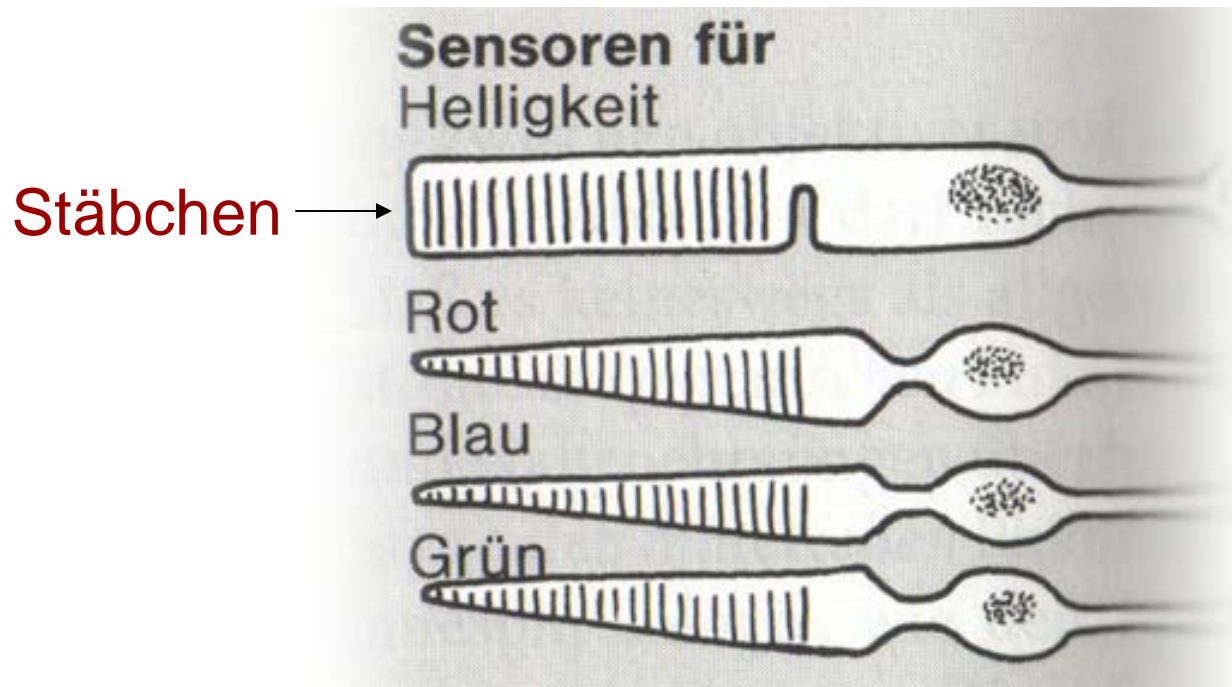
- Wellenlängen werden vom menschlichen Auge zwischen 400 nm und 700 nm wahrgenommen
- kleine Unterschiede auf dem Wellenlängen-Parameter haben große Auswirkungen auf die Farbwahrnehmung (Beispiel: 550 nm erscheinen grün – 580 nm erscheinen gelb)

Wie entsteht Sehkraft?



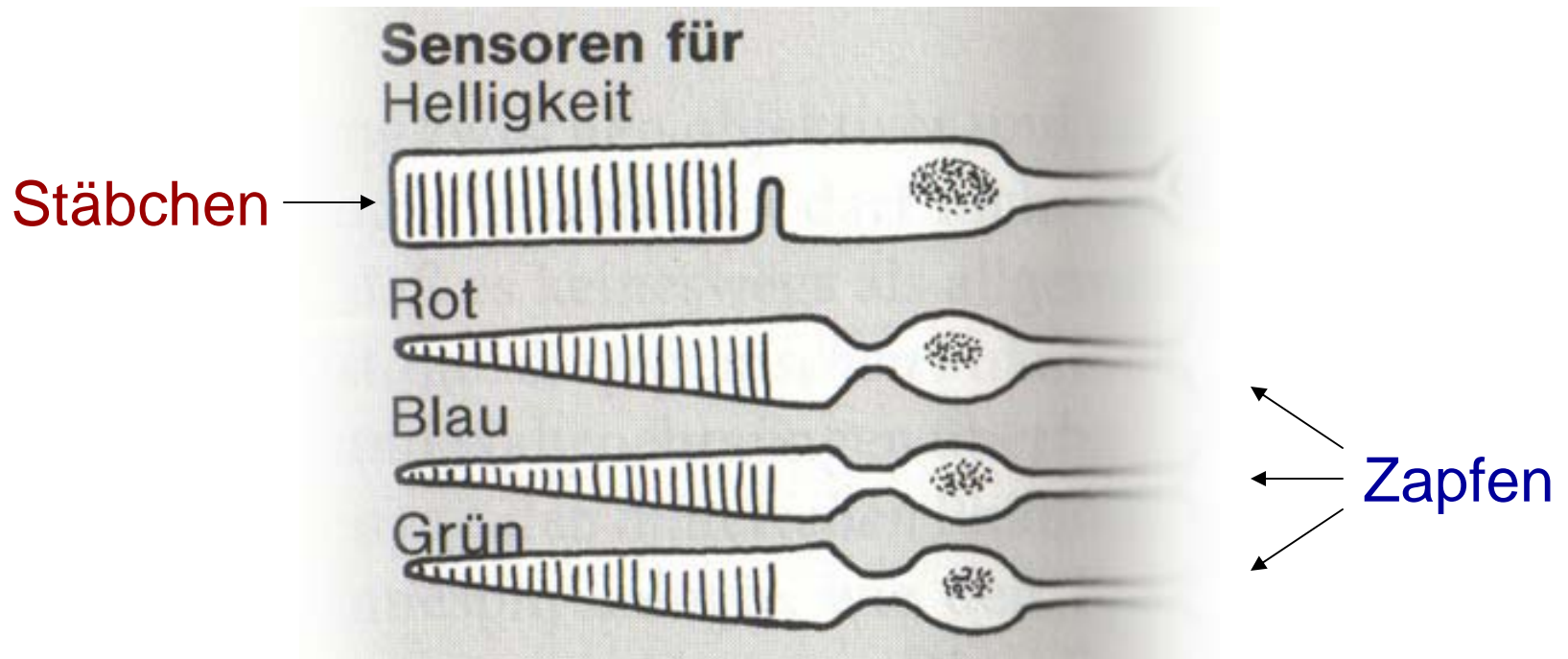
Nachdem das Licht durch die Linse gefallen ist, fällt es auf die Retina (Netzhaut). Auf der Netzhaut sitzen Photorezeptoren, die Licht absorbieren und dann neuronale Signale erzeugen.

Photorezeptoren: **Stäbchen** und Zapfen



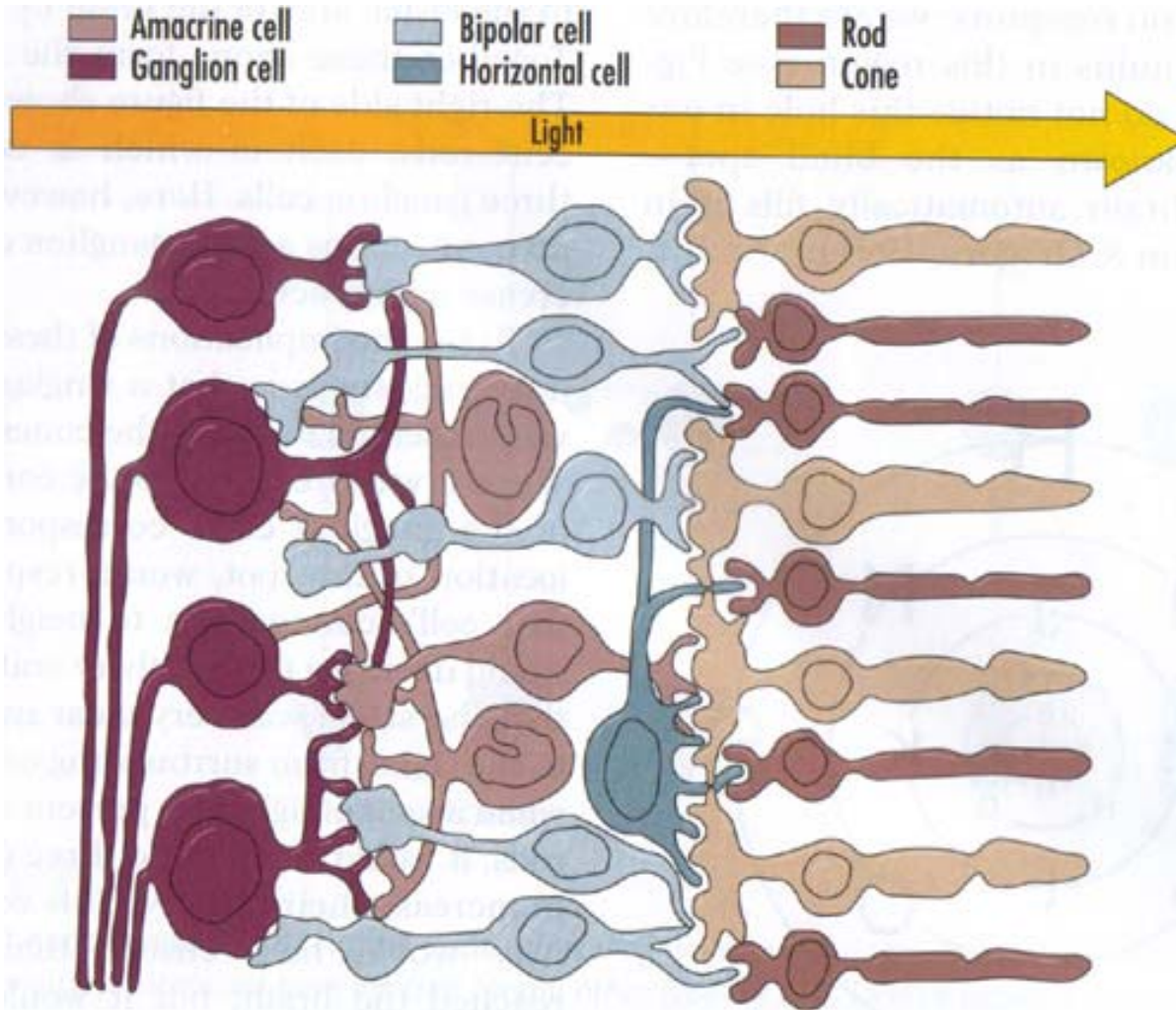
Stäbchen: extrem empfindlich, signalisieren die Absorption von jedem einzelnen Photon / Stäbchen sorgen dafür, dass der Mensch nachts sehen kann. Pigmentmolekül in den Stäbchen: Rhodopsin. (skotopisches Sehen)

Photorezeptoren: Stäbchen und Zapfen



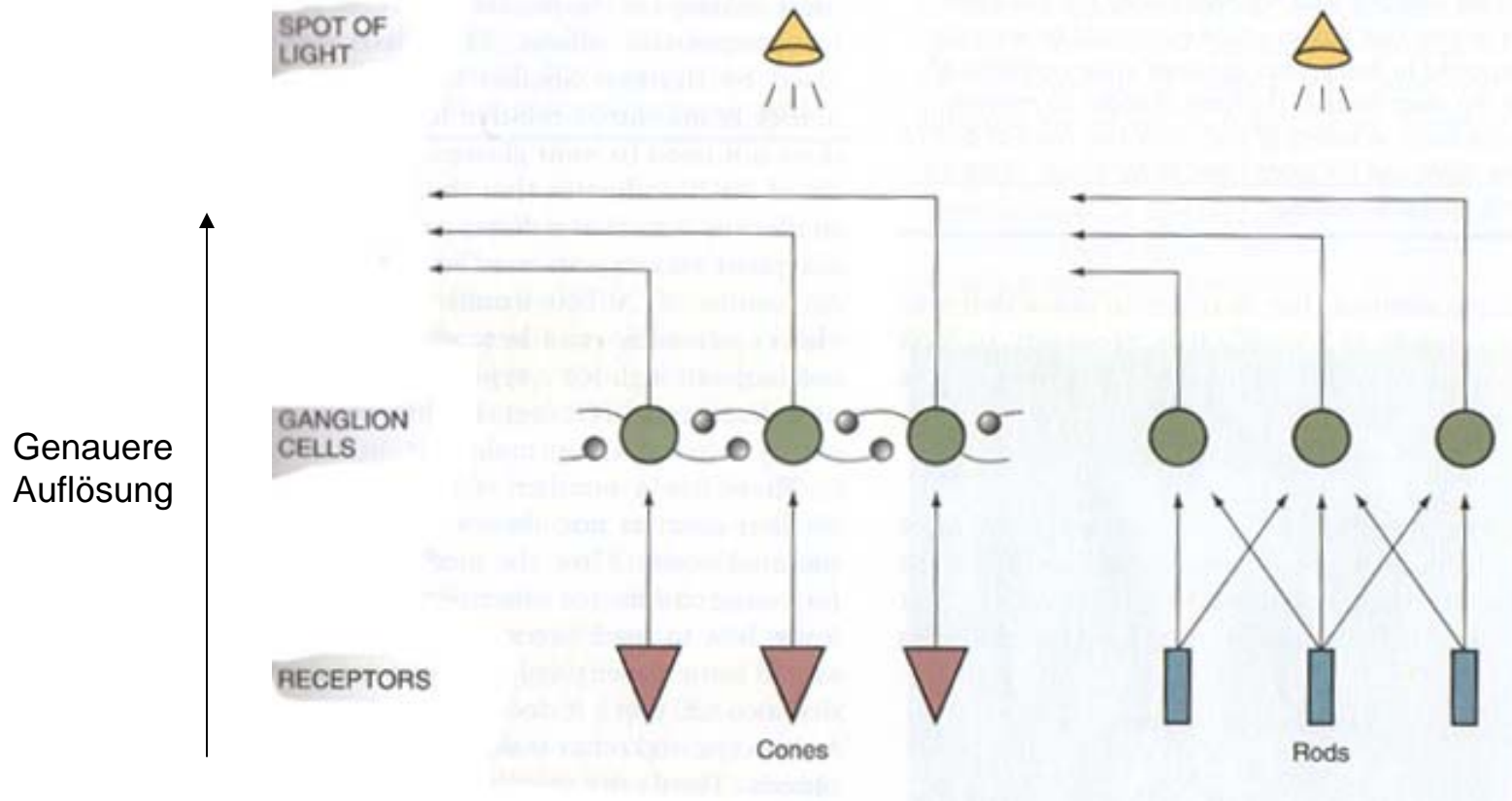
Zapfen sorgen dafür, dass wir bei Tageslicht Farben und Details sehen. Das Licht wird in den Zapfen von drei verschiedenen Pigmenten absorbiert. Der Einfachheit halber nennen wir diese Pigmente einfach rot, blau und grün. (photopisches Sehen)

Was passiert, wenn das Licht auf die Netzhaut fällt?



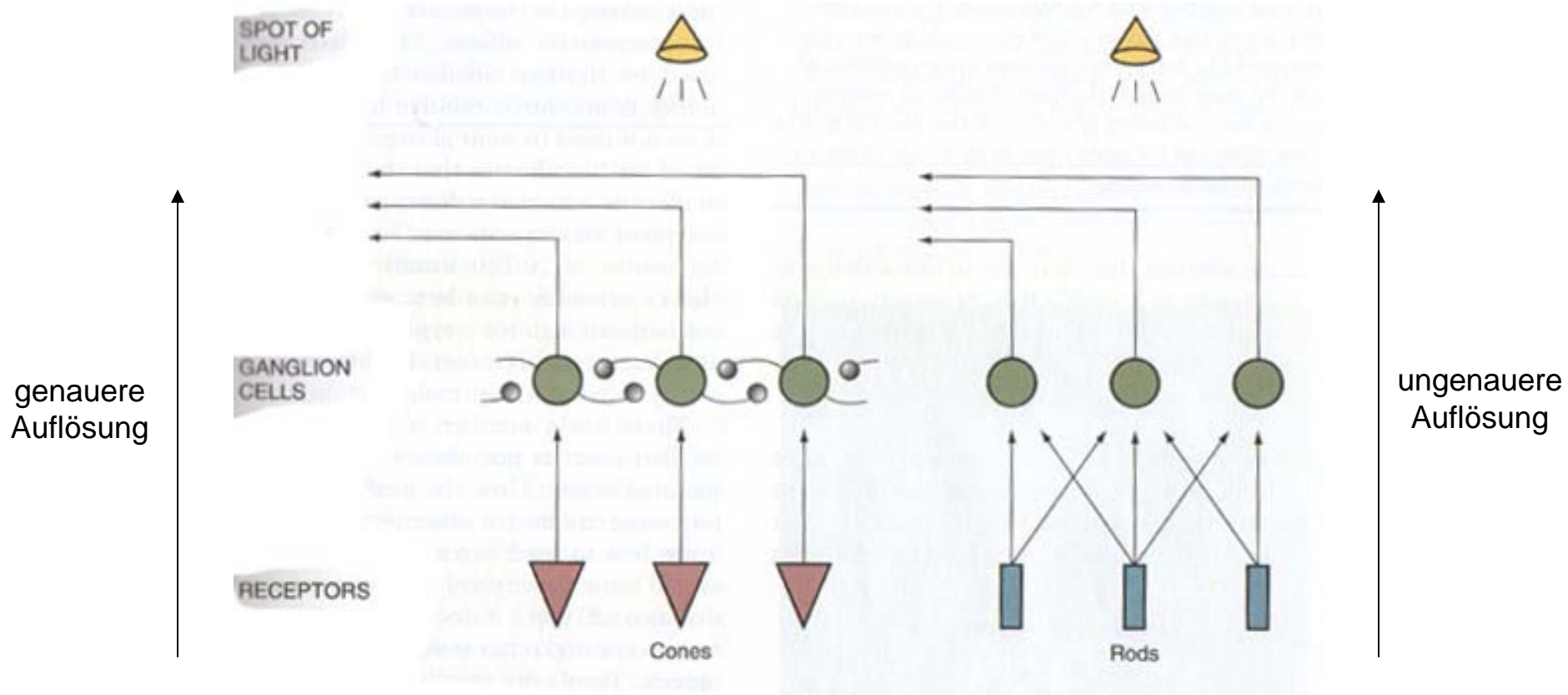
- Aufbau der Photorezeptoren: im äußeren Segment sitzen die Pigmentmoleküle.
- An der gegenüberliegenden Seite der Rezeptoren sitzen Synapsen, die bipolare und horizontale Zellen über das absorbierte Licht informieren.
- Bipolare Zellen leiten visuelle Informationen an Ganglienzellen weiter. Diese leiten die Infos, über ihre Axone (optischen Nerv) an das Gehirn weiter.
- Amakrinenzellen und Horizontalzellen regulieren den Informationsfluss zwischen Photorezeptoren und Bipolarzellen als auch zwischen Bipolarzellen und Ganglienzellen.

Verbindung zwischen Stäbchen/Zapfen und den Ganglienzellen



Zapfen: deutlichere Auflösung der Umwelt wird an das Gehirn weitergeleitet, da jeder Zapfen seinen Reiz an nur eine Ganglienzellen weitergibt und diese sich gegenseitig untereinander hemmen
Aber Achtung: gilt nur für die Fovea!

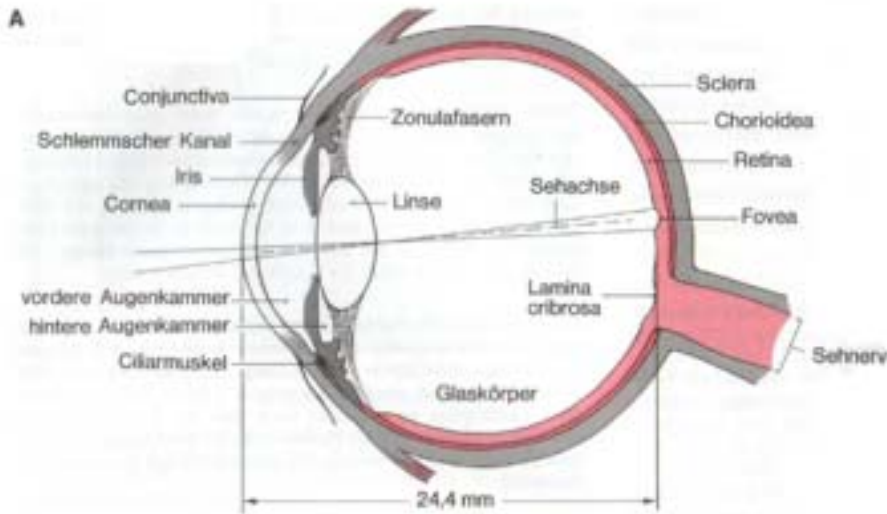
Verbindung zwischen Stäbchen/Zapfen und den Ganglienzellen



Stäbchen: fällt Licht auf die Stäbchen, so leiten sie diesen Reiz nicht an eine einzelne Ganglienzelle weiter, sondern an mehrere, damit überhaupt ein Signal im Gehirn ankommt

Aufgaben der Ganglienzellen

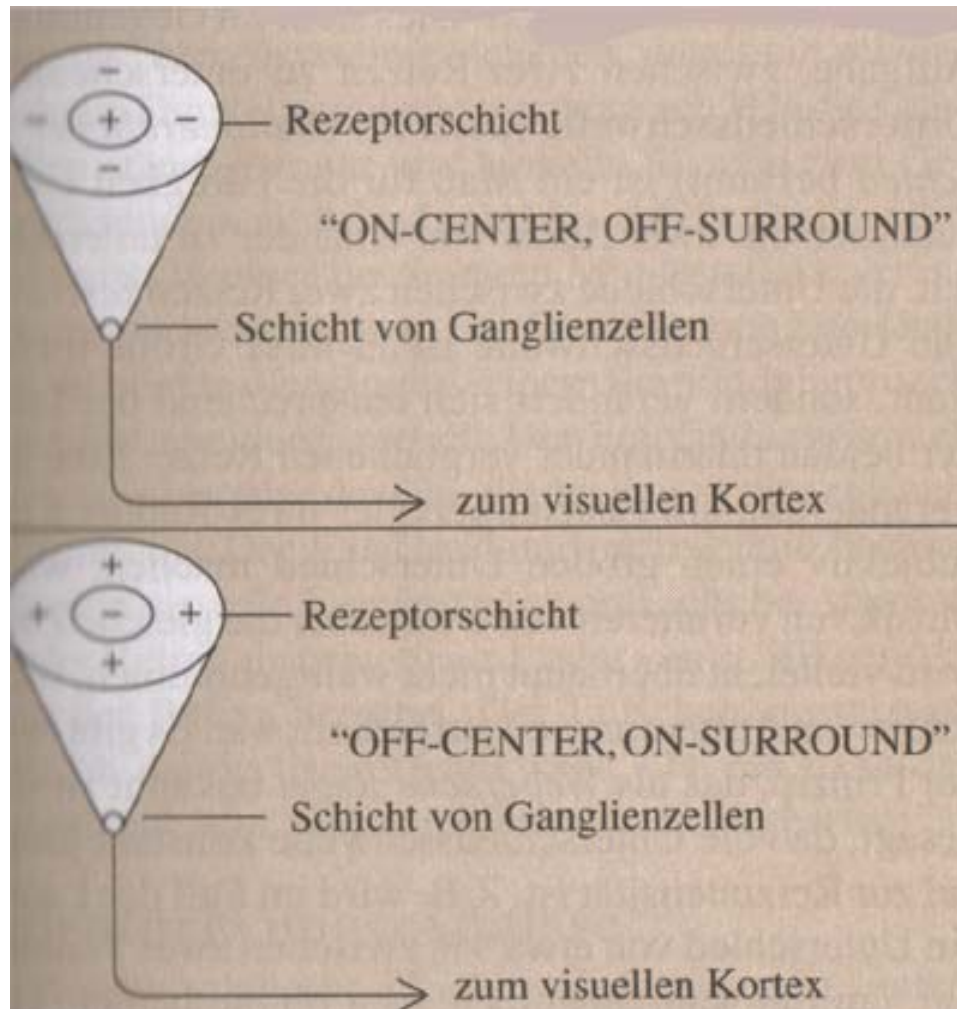
Im Unterschied zu den anderen Nervenzellen der Netzhaut, verlassen die Axone der Ganglienzellen das Auge. Außerdem bilden die Ganglienzellen im Gegensatz zu den anderen Zellen im Auge Aktionspotentiale aus, die über den Sehnerv die visuelle Information in das Gehirn trägt. Es werden also Impulsmuster an das Gehirn weitergeleitet.



1 Millionen Ganglienzellen erhalten Informationen von 8 Millionen Zapfen und 120 Millionen Stäbchen. Eine Ganglienzelle sammelt also den Input von 128 Rezeptoren.

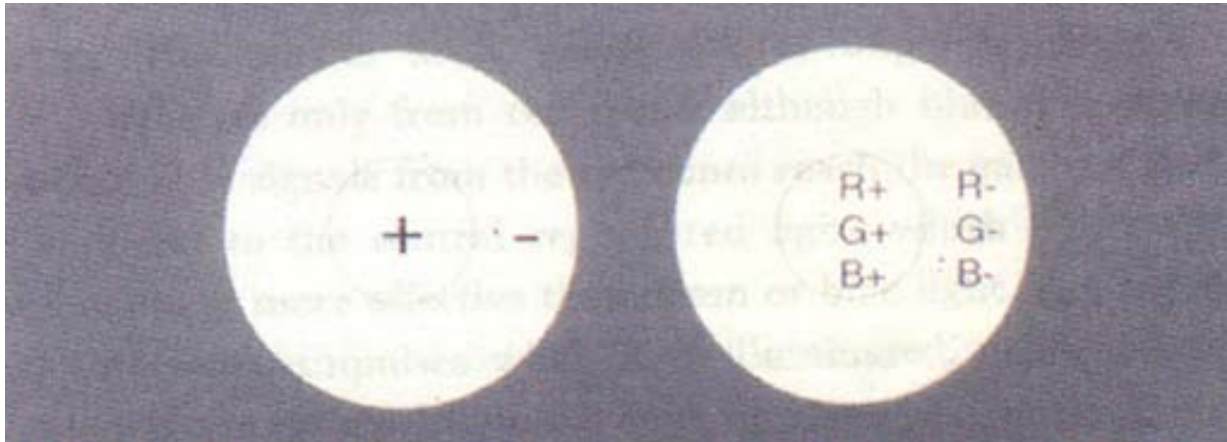
Die Organisation der Ganglienzellen ist bemerkenswert simpel. Sie zeichnet sich bei den verschiedenen Klassen dieser Zellen dadurch aus, dass deren Aktivität durch Lichtreize auf einem kleinen kreisrunden Fleck der Retina verändert wird, während Belichtung in einem darum liegenden Feld die gegenteilige Wirkung hat. (RF - Zentrum / RF - Peripherie)

Ganglienzellen: Unterschied- oder Kontrastdetektoren



- jede Ganglienzelle ist indirekt mit einem kreisförmigen Rezeptorbereich auf der Retina verbunden (rezeptive Felder)
- das kreisförmige Feld wird in eine zentrale und die sie umgebende Region eingeteilt
- diese beiden Regionen wirken gegensätzlich auf die Ganglienzelle
- „zwei Arten“ von Ganglienzellen (+/-) und (-/+)
- oben: Lichtstrahl in die Mitte erzeugt eine Erregung der Ganglienzelle; Lichtstrahl in die Peripherie eine Hemmung
- unten: entgegengesetzte Wirkung
- dadurch wird die Aktivität einer Ganglienzelle nicht stark von einem gleichförmigen Licht beeinflusst, das das ganze rezeptive Feld ausfüllt, da erregende und hemmende Einflüsse einander ausgleichen
- durch den Input von zwei unterschiedlichen Ganglienzellen (Antagonisten) wird Kontrast- und Detailsehen möglich

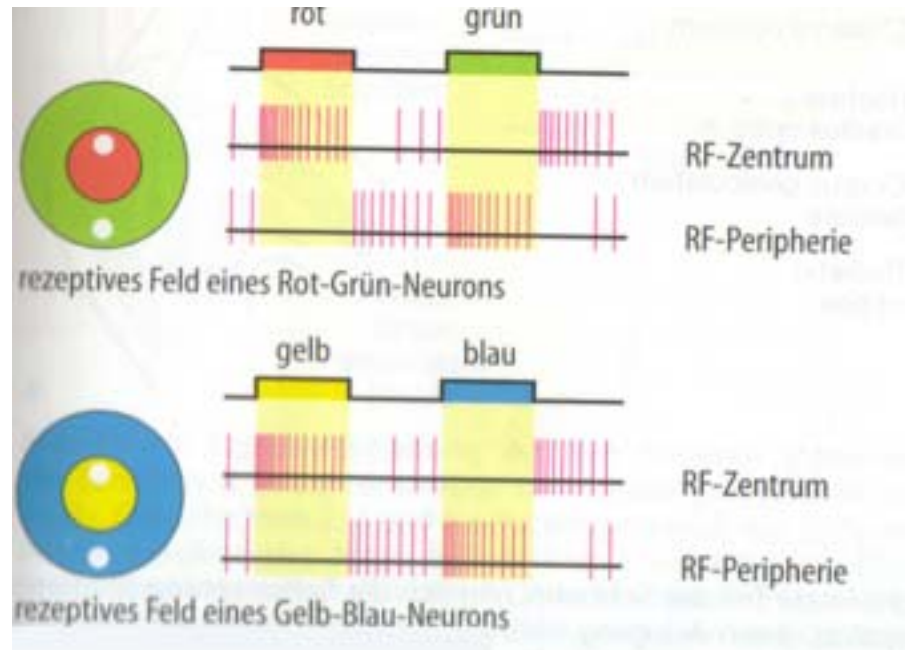
Ganglienzellen in sechs verschiedenen Ausprägungen



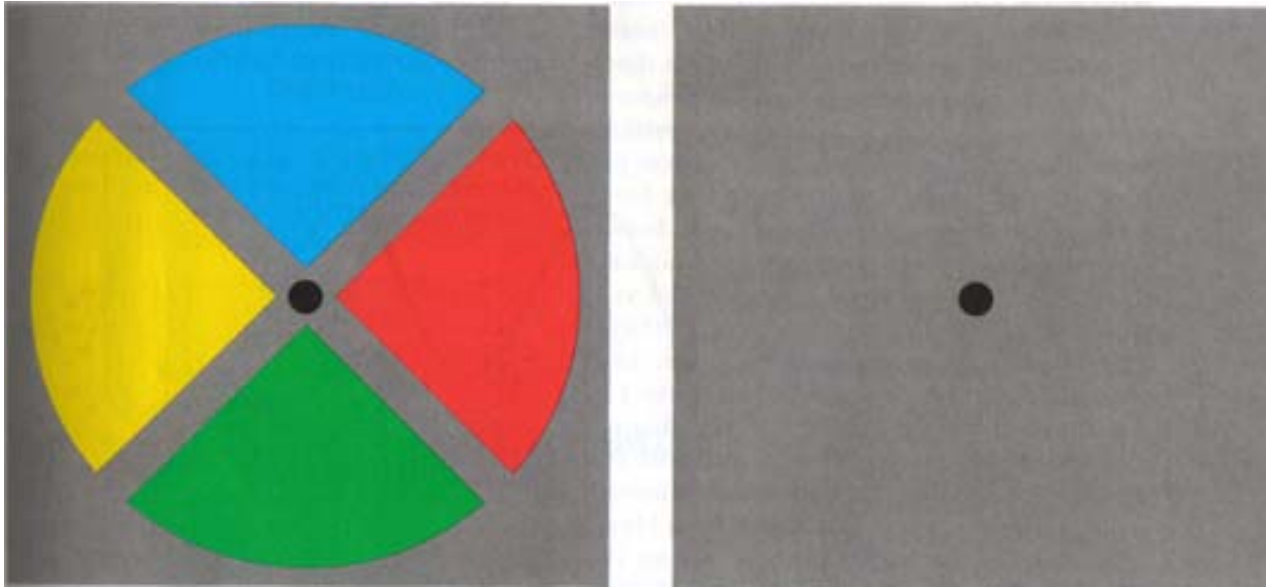
Schwarz-Weiß Sehen

Verarbeitung farbiger
Lichtreize

Farbkontrast-Sehen

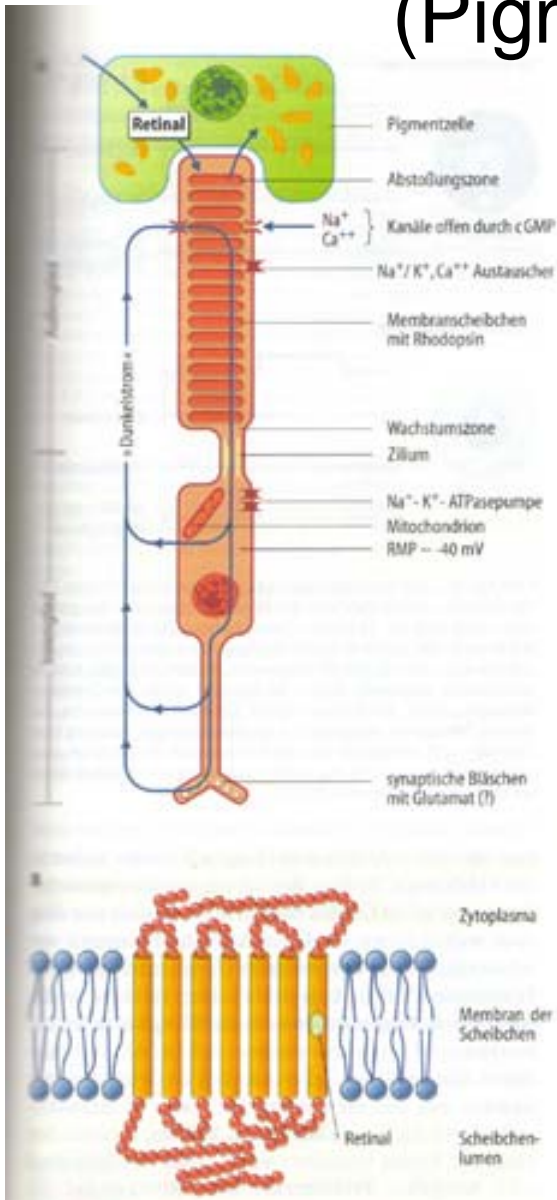


Komplementäre Nachbilder



Schaut eine Minute auf den Punkt zwischen den Farben. Dann lasst Euren Blick zum rechten Punkt schweifen. Ihr solltet nun Gegenfarben sehen.

Aufbau des Pigment Rhodopsin (Pigment in den Stäbchen)

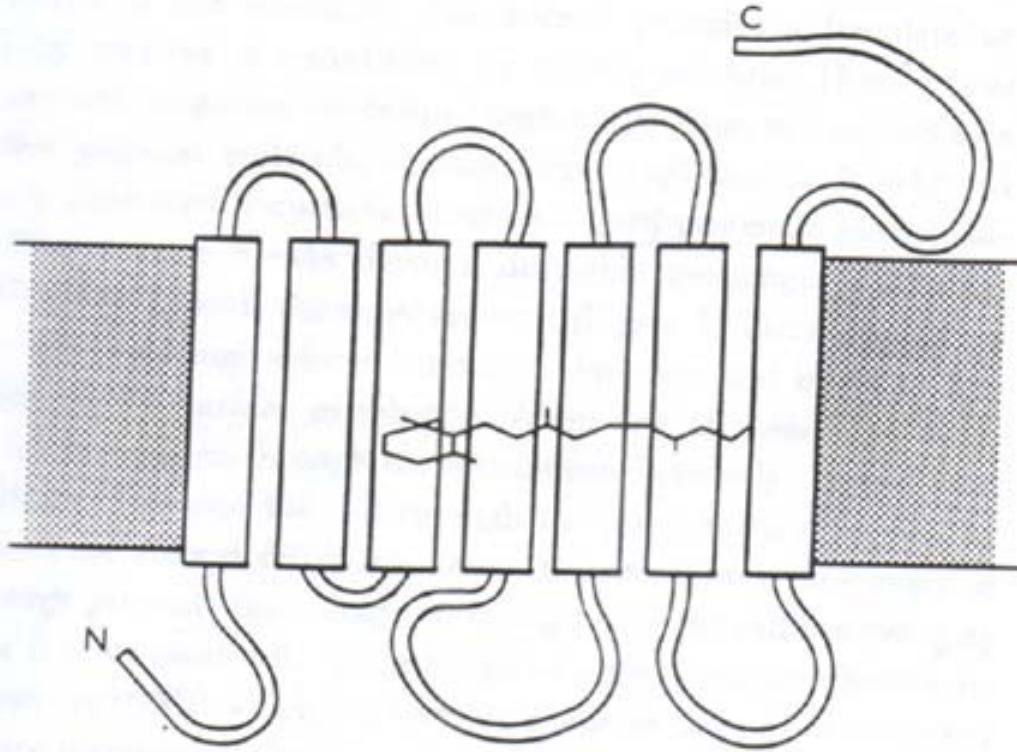


← Pigmentzelle

← Membranscheibchen
mit Rhodopsin

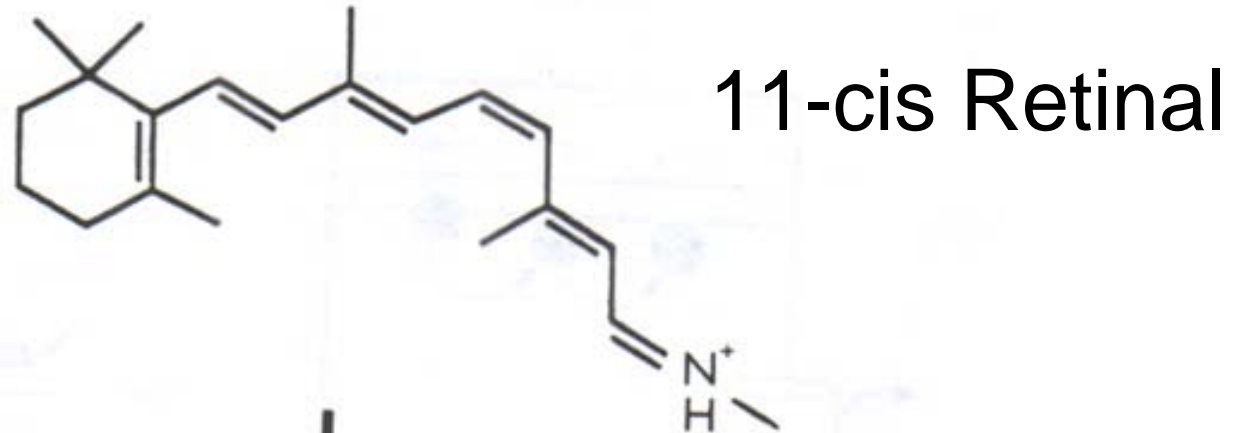
← Rhodopsinmolekül
mit sieben hydrophoben
Aminosäuresequenzen

Aufbau des Pigment Rhodopsin (Pigment in den Stäbchen)

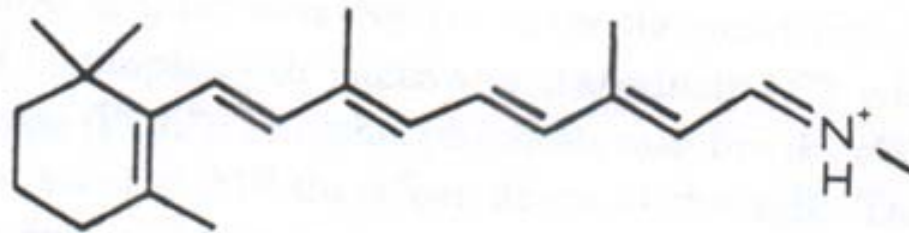


Einzelne Aminosäure ist in einer Lipidmembran eingebettet.
Aminosäure ist mehrfach in eine zylinderförmige Struktur gefaltet
und durchquert die Membran siebenmal.
In der Mitte der Membran sitzt das Retinal.

Aufbau des Retinal

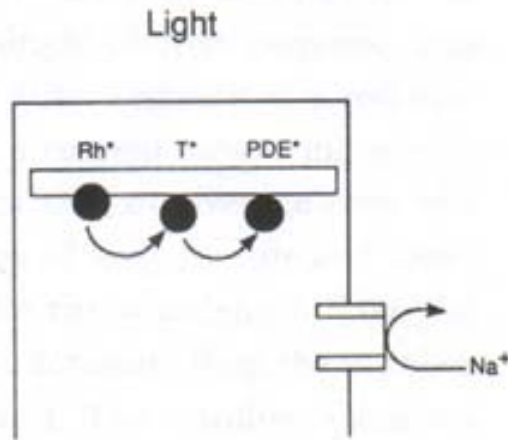


11-trans Retinal



Das Retinal verändert bei Lichteinfall die Form seiner Struktur: am C-Atom 11 kommt es zu einer Rotation – die Seitenkette richtet sich auf. Dieser Vorgang nennt sich Photoisomeration.

Aktivierung von Transducin und PDE

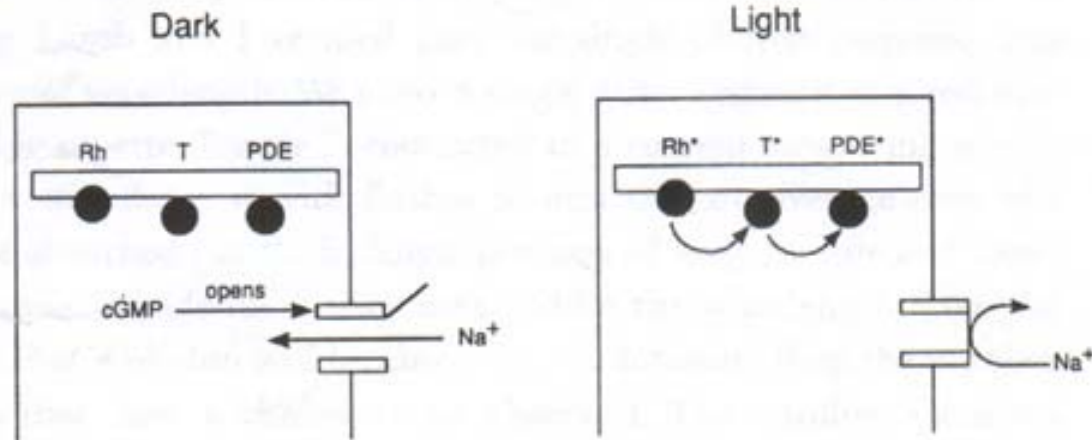


Retinal „drückt“ auf das Protein und ändert seine dreidimensionale Struktur. Dadurch aktiviert das Pigmentmolekül ein weiteres Molekül: Transducin. (T)

Durch ein aktiviertes Pigment werden 100erte von Transducin Molekülen aktiviert, so dass die Wirkung eines einzelnen absorbierten Photons enorm verstärkt wird.

Das Transducin aktiviert wiederum ein weiteres Protein: Phosphodiesterase. (PDE)

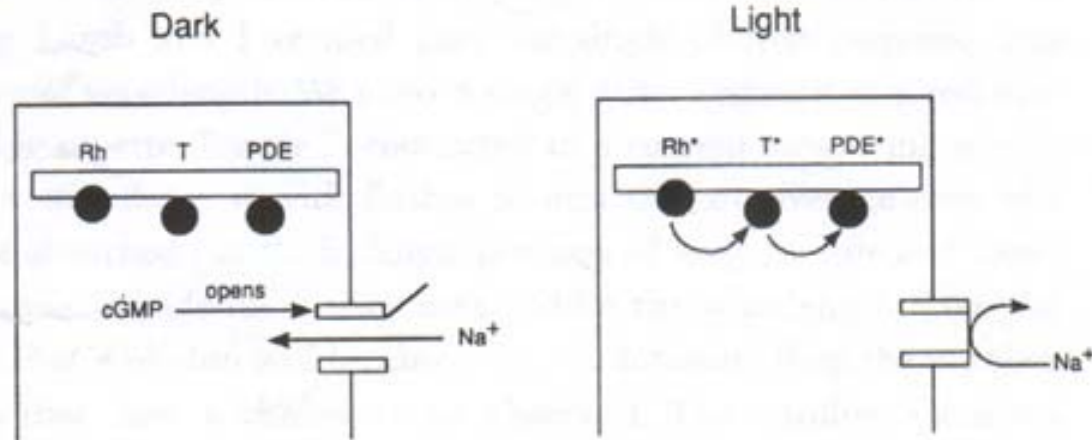
(De-)Aktivierung von cyclic GMP (cGMP)



Das Protein PDE deaktiviert nun die Messenger Substanz cGMP.

Bei Dunkelheit ist das cGMP in hoher Konzentration vorhanden und geht an bestimmten Stellen der Membranoberfläche Bindungen ein. Daraufhin öffnen sich kleine Löcher in der Membran und positiv geladene Natrium-Teilchen fließen in die Zelle ein und verhindern, dass die Ladung der Zelle so negativ wie die der meisten Zellen wird.

(De-)Aktivierung von cyclic GMP (cGMP)

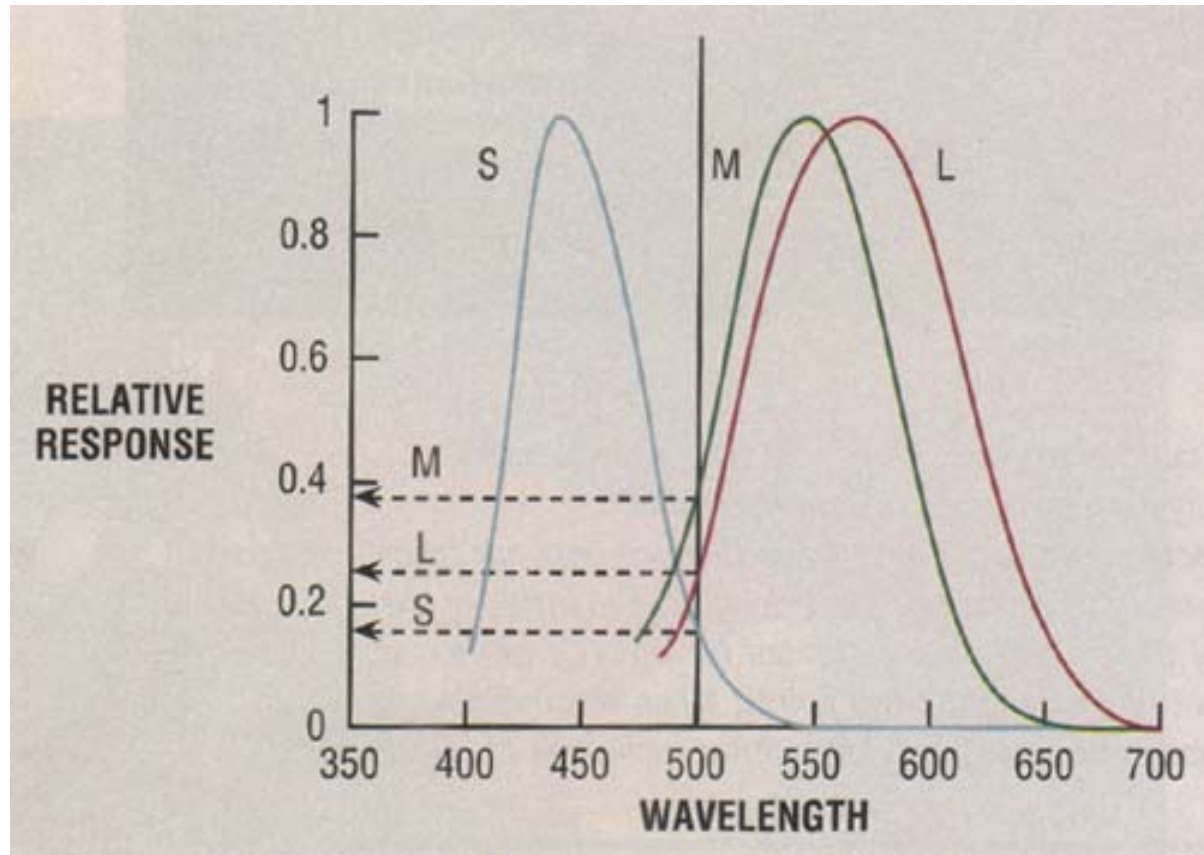


Durch Licht wird cGMP in eine neue Form zerlegt, in der sie keine Bindungen mehr mit der Membran eingehen kann. Die Poren werden wieder geschlossen und Natrium kann nicht mehr in die Zellen einfließen. Die Zelle wird dadurch negativer als ihre Umgebung. Diese Ladungsveränderung wird von der Zelle an seine Synapsen weitergeleitet.

Die negative Ladung verringert die Rate mit der die synaptische Transmittersubstanz Glutamat an die Bipolarzellen und Horizontalzellen abgesondert wird.

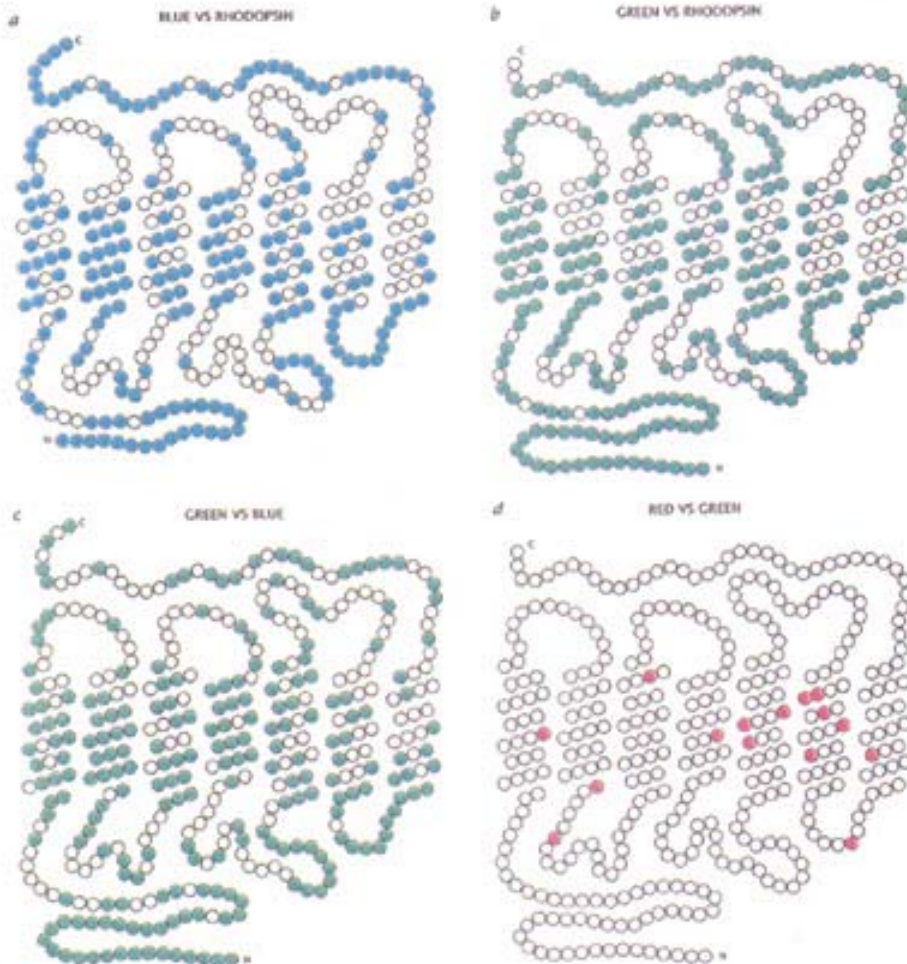
Die Konzentration des Glutamats gibt an in welchem Umfang Licht von einem Pigment absorbiert wurde.

Die Pigmente der Zapfen und die trichromatische Theorie des Sehens



Es gibt drei verschiedene Rezeptoren, wobei jeder besonders von einem Wellenlängenbereich angesprochen wird. Das Licht einer bestimmten Wellenlänge stimuliert die drei Rezeptoren unterschiedlich und die Reaktionen werden vom Gehirn zu einer bestimmten Farbe zusammengesetzt.

Molekulare Struktur und Genetik der Zapfen-Pigmente

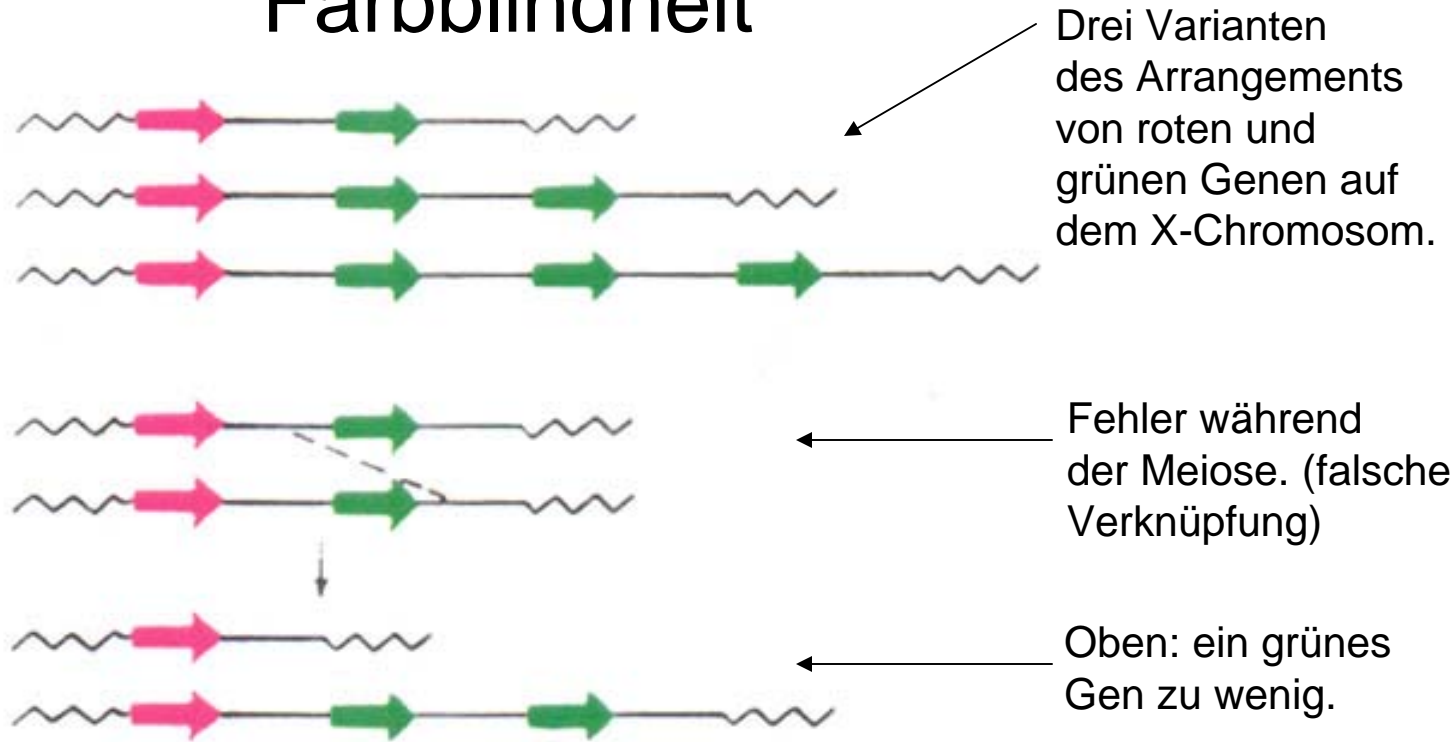


- Wie das Rhodopsin besteht jedes Pigment der Zapfen aus einer langen Kette von ca. 350 Aminosäuren.
- Stäbchen- und Zapfen-Pigmente sind in etwa 40% identisch. (Farbpunkte sind Unterschiede)
- Vergleicht man das rote und grüne Pigment miteinander, so stellt sich heraus, dass diese zu 96% übereinstimmen.

Genetik:

- Das blaue Pigment liegt auf Chromosom sieben.
- Das rote und grüne Pigment sind nah beieinander auf dem X-Chromosom gefunden worden.

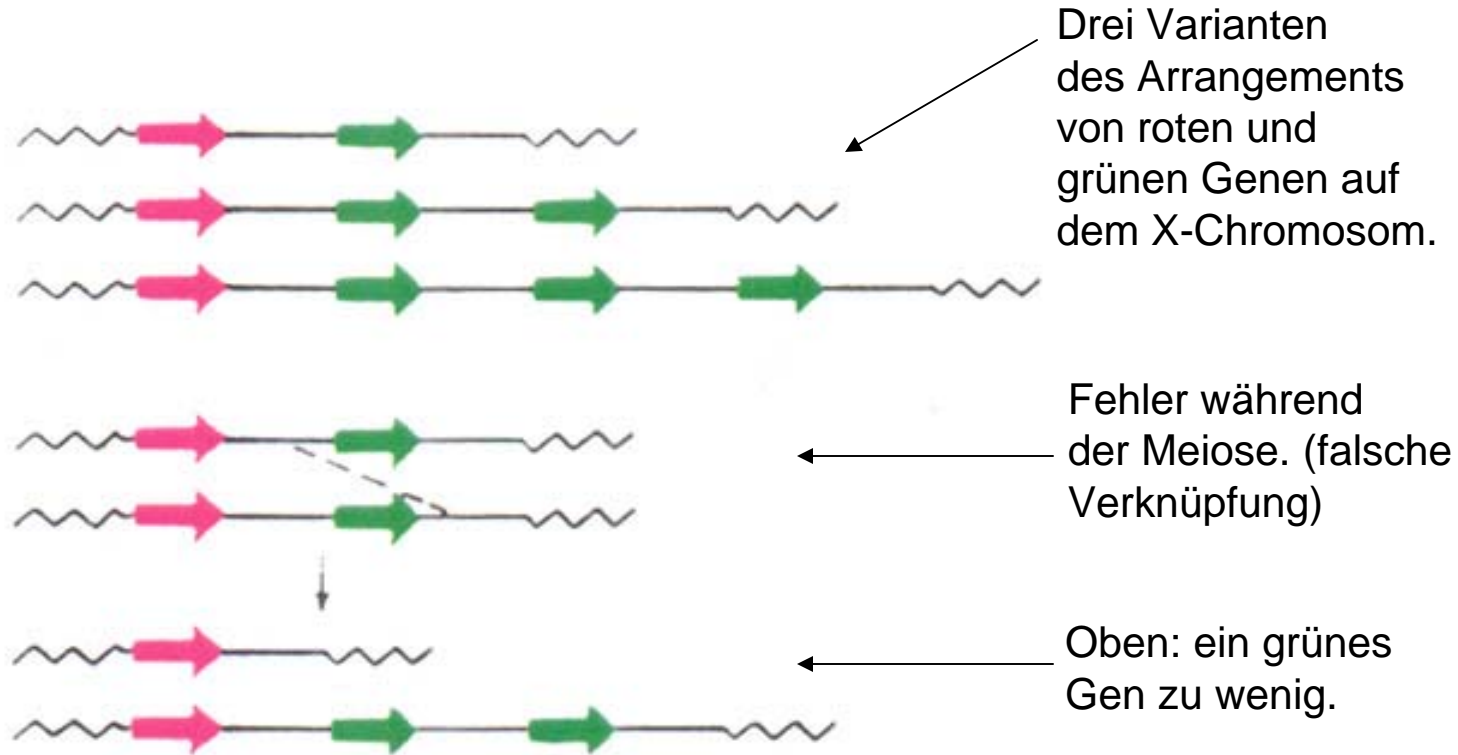
Farbblindheit



Da die beiden Gene so ähnlich sind und so nah beieinander liegen, kann es zu Fehlern bei der Duplikation während der Meiose kommen. Während der Meiose werden die beiden Stränge der DNA in einem Chromosom von einem Enzym geteilt und dann kreuzverknüpft.

Durch die Ähnlichkeit von der roten und grünen Codierungsfrequenz wird die Chance erhöht, dass der Schnitt an der falschen Stelle gemacht wird.

Farbblindheit: ein Männerproblem?



Männer haben nur ein X-Chromosom und sind deswegen von Fehlern während der Meiose wesentlich härter getroffen.

Wenn das grüne Pigment zerstört wurde, bekommt das Individuum nur wenig Informationen über die langen Wellenlängen des sichtbaren Spektrum.

Zusammenfassung

- Stäbchen, Zapfen, Ganglienzellen
- verschiedene Pigmente: Rhodopsin, etc.
- 11 cis Retinal in 11 trans Retinal, dann T, PDE und c GMP
- rezeptive Felder
- trichromatische Theorie des Sehens
- Farbblindheit durch Fehler während der Meiose