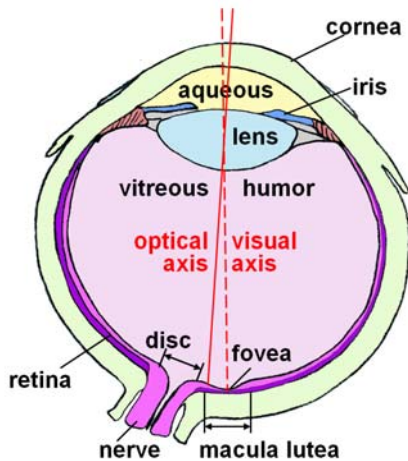


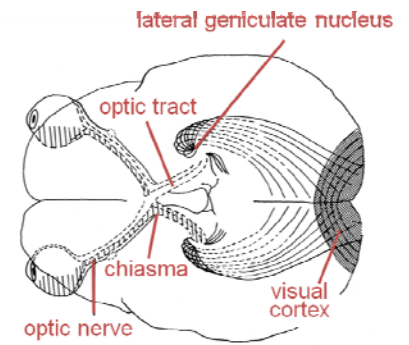
## Grundlagen der visuellen Wahrnehmung

Die Augen sind das wichtigste Sinnesorgan des Menschen. Sie nehmen rund 80% aller Informationen auf, die auf einen Menschen einwirken. Um etwas sehen zu können, benötigen wir neben dem notwendigen Licht das Auge, den Sehnerv, Muskeln und den visuellen Teil des Gehirns.

Beim Betrachten des Auges fällt sofort der farbige Teil des Auges auf: die

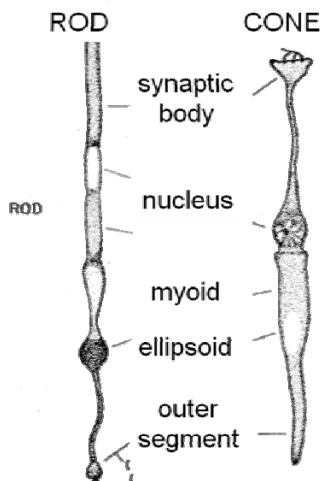


*Regenbogenhaut (Iris)*. Die Iris ist von einem Muskel umgeben, der durch Verengen (Miosis) oder Weiten (Mydriasis) der Iris bestimmt, wie viel Licht in das Auge dringt. Ist es hell, verengt sich die Iris, ist es dunkel, weitet sie sich, um in idealen Lichtverhältnissen etwas erkennen zu können. Die runde, schwarze Öffnung in der Mitte der Iris heißt *Pupille*. Durch die Pupille tritt das Licht in das Auge. Um das Auge zu schützen, wird es von einer durchsichtigen Schicht, der *Hornhaut (Kornea)*, bedeckt. Eine weitere Aufgabe der Kornea ist es, das eintretende Licht zu brechen. Hat das Licht die Pupille passiert, so trifft es auf die *Linse*. Die Linse bündelt das einfallende Licht, damit die Strahlen im Fokus auf der Netzhaut auftreffen. Durch diesen Vorgang entsteht ein scharfes Bild. Die Linse ist an Fasern und Muskeln befestigt, um ihre Form und damit den Brechungswinkel zu verändern.



Auf der Rückseite des Auginneren befindet sich die *Netzhaut (Retina)*. Die Retina beinhaltet auch zahlreiche Blutgefäße, die so einzigartig miteinander verflochten sind, dass die Retina eine Person ebenso eindeutig identifiziert wie ein Fingerabdruck. Daher werden immer häufiger Retina-Scans in Authentifizierungssystemen eingesetzt. Die Retina enthält auf einer 0,25 mm dünnen Fläche von 1,1 cm<sup>2</sup> ca. 200 Millionen Nervenzellen, die großteils lichtempfindlich sind und das eintreffende Licht in Nervensignale umwandeln.

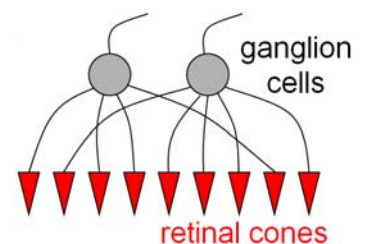
Es gibt zwei Arten von solchen lichtempfindlichen Nervenzellen: *Zapfen* und *Stäbchen*. Stäbchen ermöglichen das „Schwarz-Weiß-Sehen“, während die Zapfen für das Farbsehen zuständig sind. Diese Nervenzellen sind so empfindlich, dass sie sogar einzelne Photonen erkennen!



Die *Stäbchen (Rods)* stellen mit einer Anzahl von 100 bis 120 Millionen Stück pro Auge den häufigsten Sehzellentypus dar. Sie sind sehr lichtempfindlich und ermöglichen uns nach einer gewissen Zeit in der Dunkelheit, Gegenstände bei extrem schwachem Licht wahrzunehmen. Bei reinem „Stäbchensehen“ (Scotopic-Vision) ist es nicht möglich, Farben zu erkennen.

Bei Tageslicht sind die hoch empfindlichen Stäbchen vollständig gesättigt und daher nicht in der Lage Informationen zu verarbeiten. Unter diesen Bedingungen sehen wir farbig aufgrund der *Zapfen (Cones)*. Zapfen sind bis zu 100.000-fach weniger lichtempfindlich als Stäbchen und kommen mit etwa 5 bis 6 Millionen Stück pro Auge auch wesentlich seltener vor.

Die Stäbchen und Zapfen sind mittels Ganglienzellen miteinander verbunden. Diese Zellen erfüllen Aufgaben wie das Trennen der Farben und das Verstärken von Kanten. Ein Auge enthält ungefähr eine Million Ganglion-Zellen.

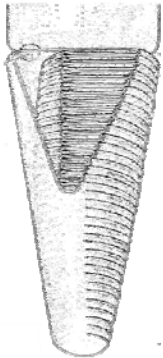


## Stäbchen (rods)

Stäbchen sind dermaßen lichtempfindlich, dass ein an die Dunkelheit gewohntes Auge das Licht einer Kerze in einer klaren Nacht aus einer Entfernung von 50km sehen kann. Die maximale Empfindlichkeit der Stäbchen liegt bei einer Wellenlänge von 496nm.

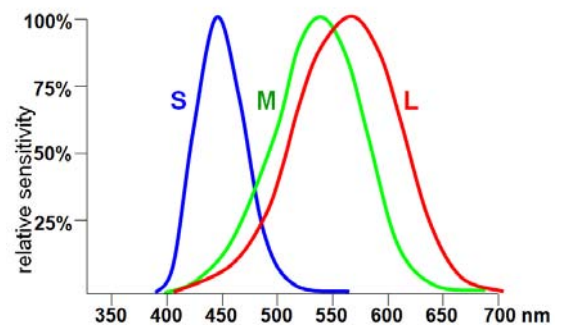
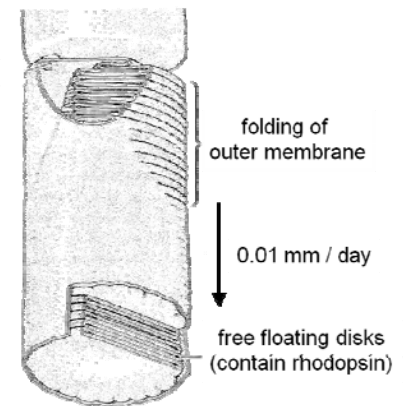
## Zapfen (cones)

Trifft Licht auf die Zapfen so werden eine Reihe von chemischen Reaktionen („bleaching“) durchgeführt. Diese Reaktion verändert die elektrische Ladung der Zellen, wodurch ein Signal generiert und zum Gehirn weitergeleitet wird. Das Gehirn kombiniert die eingehenden Signale und produziert normales Farbsehen.



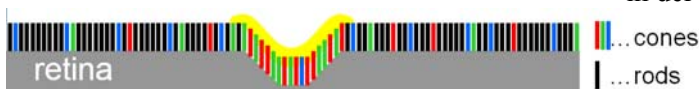
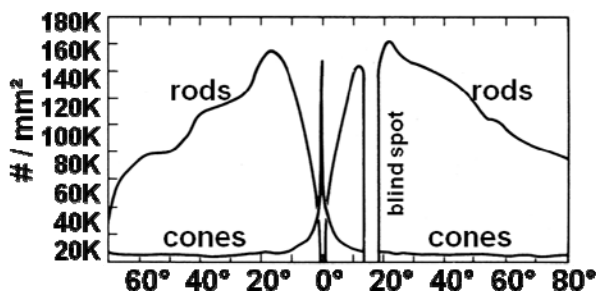
Es gibt 3 verschiedene Typen von Zapfen:

- ▶ die *L-Zapfen* (long) sind empfindlich auf Licht langer Wellenlänge, also auf **rotes Licht** (max. Empfindlichkeit liegt bei ~558 nm),
- ▶ die *M-Zapfen* (medium) sind empfindlich auf Licht mittlerer Wellenlänge, also auf **grünes Licht** (max. bei ~531 nm) und
- ▶ die *S-Zapfen* (short) sind empfindlich auf Licht kurzer Wellenlänge, also auf **blaues Licht** (max. bei ~419 nm).

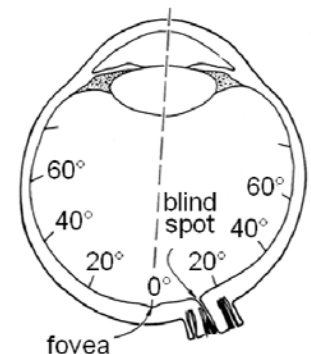


## Stäbchen & Zapfen - Verteilung

Es gibt etwa 100 bis 120 Millionen Stäbchen und 5 bis 6 Millionen Zapfen. Angaben, wie die Zapfen untereinander verteilt sind, sind sehr unterschiedlich. Die durchschnittliche Verteilung liegt bei ungefähr: S:M:L = 1:5:10 (originale Werte in der Literatur liegen zwischen 1:4:4 bis 1:20:40).



Die Fovea (Gelber Fleck) ist der einzige Bereich des Auges, wo es nur Zapfen gibt. In diesem Bereich sind ein Großteil der Zapfen untergebracht. Die Zapfen, die nicht in der Fovea untergebracht sind, sind häufiger S-Zapfen.



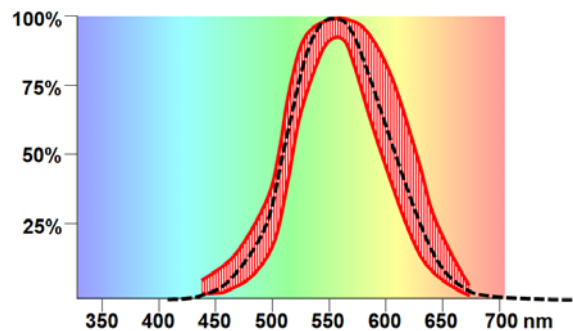
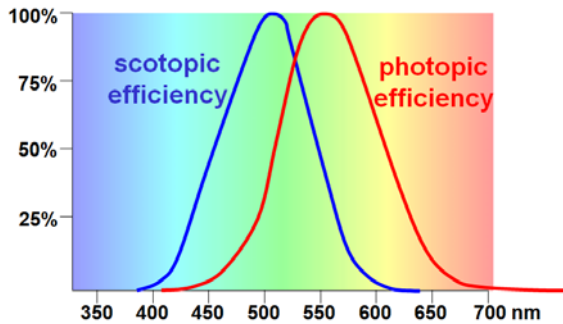
Aufgrund dieser Verteilung können wir bei Dunkelheit nicht scharf sehen. Der Bereich, an dem der Mensch am schärfsten sieht, ist der **Gelbe Fleck (Fovea)**, in dem keine Stäbchen untergebracht sind. Dieser Bereich fällt daher beim Sehen in der Dunkelheit vollkommen weg.

## Stäbchen & Zapfen – Helligkeitsempfindlichkeit

Es gibt drei verschiedene Adaptionsniveaus, wie wir etwas Sehen können:

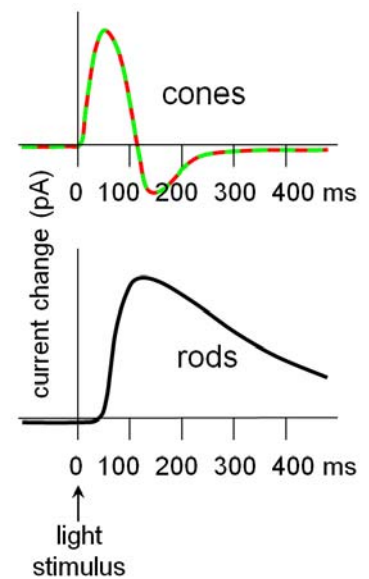
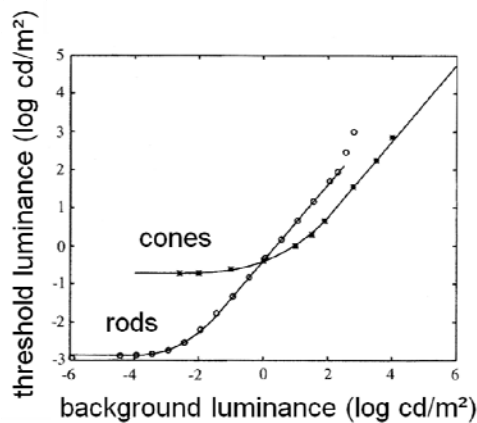
- ▶ *Photopisch* – ist das Sehen des Auges unter guten Lichtverhältnissen (Tageslicht), wird durch die Zapfen ermöglicht. Unter diesen Lichtverhältnissen sind die Menschen am sensibelsten auf Licht mit grünlich-gelber Farbe.
- ▶ *Skotopisch* – ist das Sehen des Auges bei sehr schlechten Lichtverhältnissen (Dunkelheit bei Neumond). Das Sehen in der Dunkelheit ist ausschließlich durch die Stäbchen möglich. Am sensibelsten reagieren die Menschen bei skotopischem Sehen auf grünlich-blaues Licht.
- ▶ *Mesopisch* – ist das Sehen unter schlechten, aber nicht komplett dunklen Lichtverhältnissen (Dunkelheit bei Vollmond). Es ist eine Mischung aus dem photopischem und skotopischem Sehen. In diesen Bereich fallen zum Beispiel die Lichtverhältnisse des Abend bzw. Nachtverkehrs.

Das Wechseln der Lichtaufnahme zwischen Zapfen auf Stäbchen nennt sich *Purkinje-Effekt* oder *Dunkel-Adaption*. Da jedes Auge, wie jeder Mensch, einzigartig ist, reagieren verschiedene Menschen unterschiedlich auf diverse Lichtverhältnisse. Dadurch gibt es eine weite Skala, in welchen Bereichen das Licht aufgenommen werden kann (rechte Grafik).



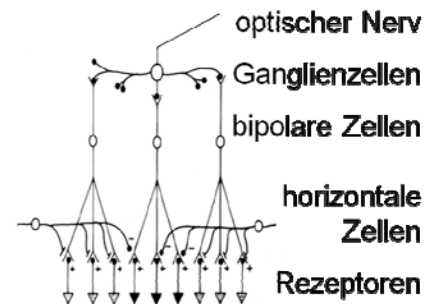
**Stäbchen & Zapfen - Sensibilität vs. Signal**

Stäbchen sind bei schwachen Lichtverhältnissen sensibler, während Zapfen die Möglichkeit des Farbsehens nur bei Tag gewährleisten. Stäbchen sind beim Produzieren eines Signals für das Gehirn langsamer und liefern ein längeres Signal, Zapfen sind viermal so schnell und liefern dafür ein kürzeres Signal.

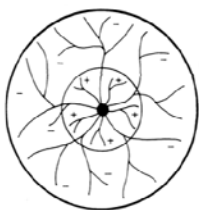


**Ganglienzellen**

Ganglienzellen sind Zellen, die mit mehreren Rezeptoren (Zapfen und Stäbchen) verbunden sind. Diese Zellen verarbeiten im Vorhinein diverse Informationen und leiten diese mittels Nerven an das Gehirn weiter. Jede Ganglienzelle verfügt über einen bestimmten Bereich auf der Retina (rezeptives Feld), aus welchem sie Informationen erhält. Die rezeptiven Felder werden durch konvergierende Informationsweiterleitung ermöglicht:

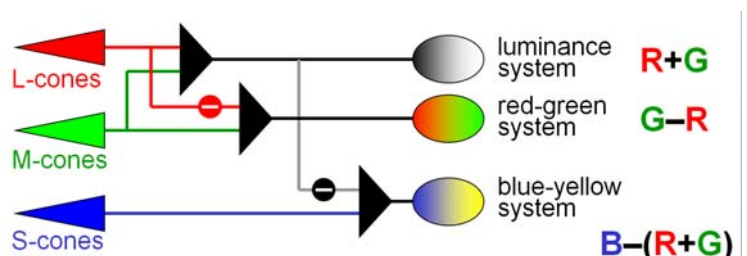


Viele Stäbchen und mehrere Zapfen leiten in der Regel auf eine einzige Ganglienzelle ab. Durch das starke Überlappen der rezeptiven Felder der Ganglienzellen ist es möglich, Kanten beim Sehen zu identifizieren.



**Organisation d. Rezeptionsfeldes einer Ganglienzelle**

Weiters ist es die Aufgabe der Ganglienzellen, die auf den Rezeptoren eingegangenen Rot-, Grün- und Blau-Informationen in eine Helligkeitsinformation und zwei Farbdifferenzsignale umzuwandeln. Diese Umrechnung erfolgt durch Subtraktion und Addition, und das Ergebnis ist der Farbrepräsentation im L\*a\*b\*-Farbraum sehr ähnlich.



### Dunkel-Adaption – Anpassung an die Dunkelheit

Das Auge benötigt ungefähr 20 bis 30 Minuten um sich vollständig von Sonnenlicht an die Dunkelheit anzupassen. Dabei reagiert das Auge ca. 10.000 bis 1.000.000 mal sensibler auf Lichtphotonen als bei Sonnenlicht. Bei diesem Vorgang verändert sich ebenfalls das Farbsehen.

Eine Anpassung an helle Lichtverhältnisse ist schon nach wenigen Sekunden möglich, der vollständige Vorgang dauert ungefähr fünf Minuten.

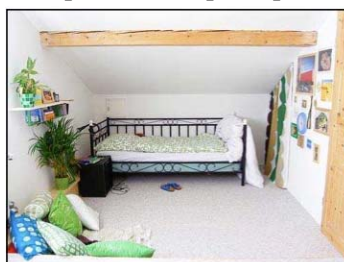
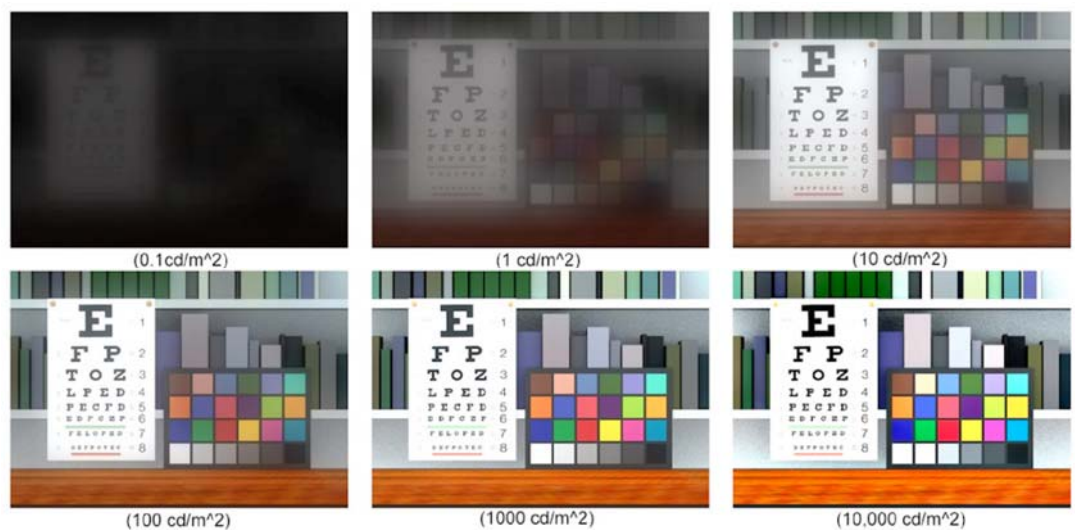
*Hell-Adaption* ist der Spezialfall des Tagsehens, wenn das gesamte visuelle System sich an Leuchtdichten oberhalb 3,4 cd/m<sup>2</sup> angepasst hat. *Dunkel-Adaption* ist der Spezialfall, wenn das visuelle System sich an Leuchtdichten unter 0,034 cd/m<sup>2</sup> angepasst hat.

*Transiente-Adaption* ist ein Spezialfall, der eintritt, wenn das Auge wiederholt zwischen einem niedrigen und einem hohen Lichtniveau hin und her wechseln muss. Dieser Zustand führt sehr schnell zur Ermüdung der Augen.

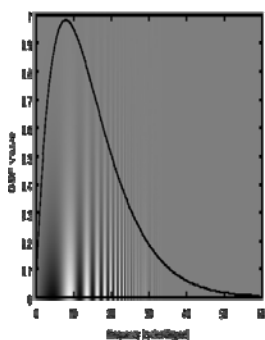
### Beispiele für Hell- bzw. Dunkel-Adaption

Beim Sehen mit Hilfe der Zapfen erhalten wir ein scharfes und farbiges Bild. Beim reinen Stäbchen-Sehen erhalten wir ein graues und verschwommenes Bild.

Das verschwommene, unscharfe Bild kommt daher, dass im Bereich des schärfsten Sehens (Gelber Fleck) keine Stäbchen, sondern nur Zapfen untergebracht sind und wir diese in der Dunkelheit auf Grund ihrer geringen Lichtempfindlichkeit nicht nutzen können. Das Bild rechts zeigt sehr schön den Übergang vom skotopischen auf photopisches Sehen.



Von den vier Vorschlägen für ein dunkel-adaptiertes Bild des Zimmers entspricht das rechte obere (unscharf, wenig Farben erkennbar) unserem Sehen:



### Kontrast-Sensitivitätsfunktion

Der Helligkeitsunterschied (Kontrast), der notwendig ist um Dinge zu unterscheiden, ist abhängig von der Größe dieser Dinge, also von der räumlichen Frequenz des Bildsignales. Die Kontrast-Sensitivitätsfunktion (Contrast Sensitivity Function CSF) beschreibt diesen Zusammenhang. Bei einer Bildfrequenz von etwa 8 Perioden pro Grad des visuellen Feldes ist unser Auge am sensibelsten, oberhalb von 60 Perioden pro Grad können wir keine Strukturen mehr erkennen. Mittels Versuchen hat man die heuristische Formel

$$A(f) = 2,6 \cdot (0,0192 + 0,114 \cdot f) \cdot \exp(-(0,114 \cdot f)^{1,1}) \text{ dafür abgeleitet.}$$