

Physiologie und Anatomie I

5.1. Sinnesorgane - Auge

Prof. Dr. Werner Nahm



Nach dem Studium dieses Kapitels...

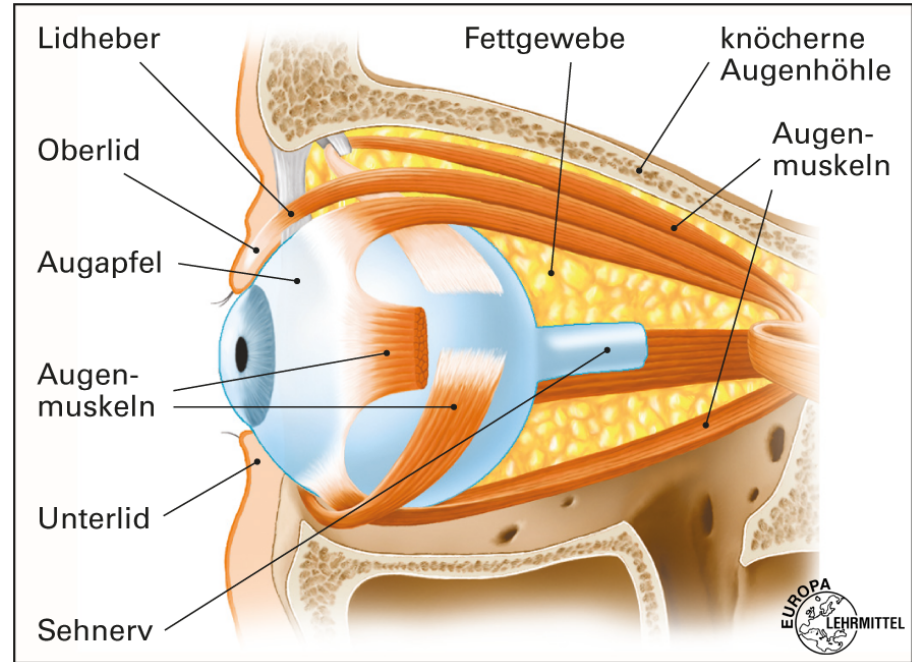
...sollten Sie in der Lage sein...

- die Anatomie des menschlichen Auges und die Komponenten des vorderen und hinteren Abschnitts zu beschreiben
- Die Funktionen des vorderen und des hinteren Abschnitts zu erklären
- Den Aufbau der Retina (Netzhaut) beschreiben
- Die Funktion der Photorezeptoren erklären
- Die Abläufe bei der Adaption und Akkommodation des Auges erklären

Anatomie des menschlichen Auges

Zum Sehorgan des Menschen gehören:

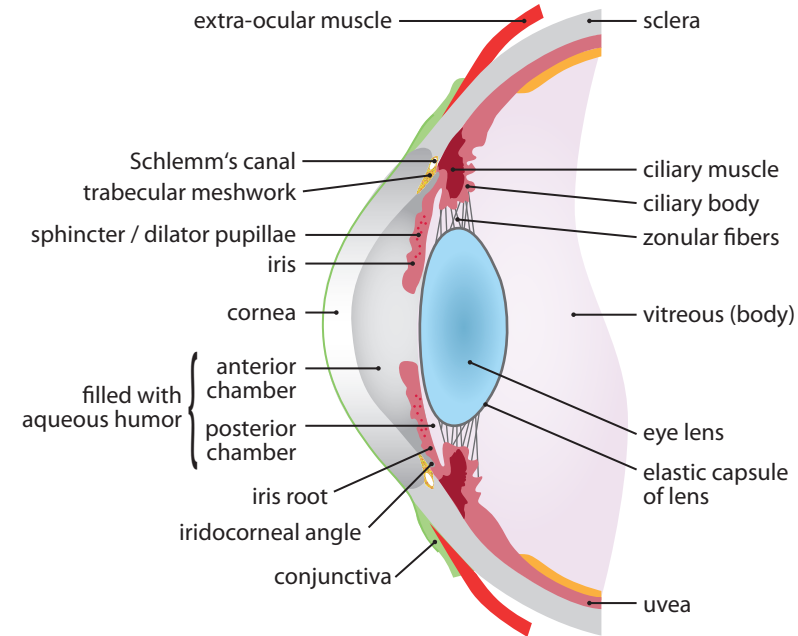
- Der Augapfel
 - annähernd kugelförmig, ca. 24mm lang.
 - Funktionelle Unterteilung in Vorderabschnitt und Hinterabschnitt.
 - liegt eingebettet in Fett- und Bindegewebe in der knöchernen Augenhöhle.
- Die Anhangsorgane
 - Tränenapparat
 - Augenmuskeln (4 schräge und 4 gerade Muskeln)
 - Bindehaut (Konjunktiva)
 - Augenlider (mit Muskulatur)
- Die Sehbahn
 - Netzhaut (Retina)
 - Neuronale Nervenbahn
 - Visuelle Cortex



Bildquelle: Europa Lehrmittel

Vorderabschnitt des menschlichen Auges

- **Das optischen System** (dioptrisches System) des Vorderabschnitts besteht aus:
 - Cornea (Hornhaut), Linsenfunktion
 - Iris, Blendenfunktion mittels Ringmuskulatur (Sphinkter), Öffnung = Pupille
 - Augenlinse, Fokusfunktion mittels Ziliarmuskel, Ziliarfasern und LinsenkapSEL
- **Das Kammersystem** des Vorderabschnitts besteht aus:
 - Vorderkammer, mit Kammerwasser gefüllter Raum zwischen Cornea und Pupille, ca 4 mm tief.
 - Hinterkammer, mit Kammerwasser gefüllter Raum hinter der Iris bis zum Glaskörper (Vitreus)
 - Das Kammerwasser wird in der Hinterkammer im Ziliarkörper gebildet, zirkuliert zwischen Iris und Linse in die Vorderkammer und fließt im Kammerwinkel über das Trabekelnetzwerk und den Schlemm'schen Kanal in das venöse Gefäßsystem ab.
 - Über den Abflusswiderstand wird das Kammerwasservolumen und somit Augeninnendruck geregelt.

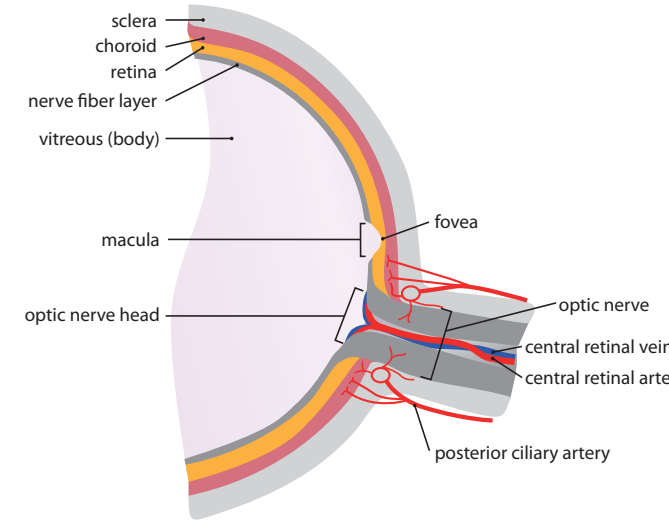


Bildquelle: Kaschke

Hinterabschnitt des menschlichen Auges

Der Augenabschnitt hinter der Linse besteht aus

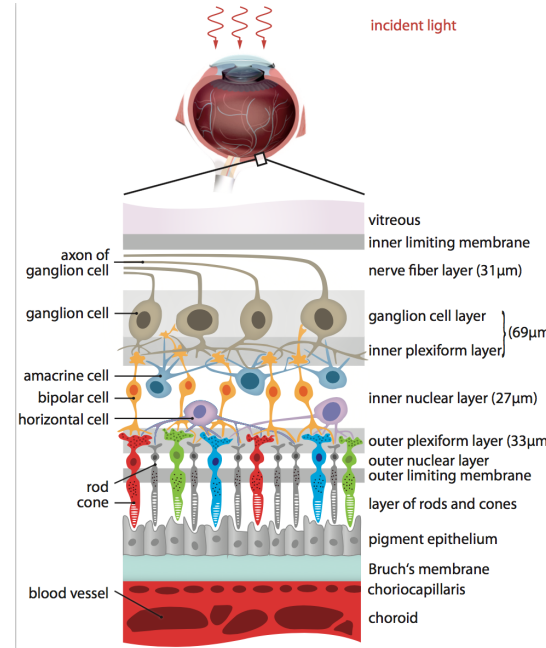
- **Dem Glaskörper** (Vitreus), bestehend aus:
 - Kollagenfasernetz (stroma vitreum)
 - Wässrige Flüssigkeit (humor vitreus), 98% Wasser, Hyaluronsäure (Glykosaminoglykane)
 - Glaskörpermembran (membrana vitrea), Außenhülle des Glaskörpers, dichtes Kollagenfasernetz
 - Vereinzelte Zellen, Hyalozyten, Fibroblasten
 - Funktion des Vitreus: Mechanische Stabilität des Augapfels, optischer Brechungsindex
- **Der Augenhaut**, bestehend aus:
 - Lederhaut (Sclera)
 - Gefäßarmes Kollagenbindegewebe
 - Aderhaut (Choriodea)
 - Elastisches Bindegewebe und dicht vernetztes Gefäßsystem (roter Augenhintergrund!), Abgrenzung zur Retina durch die Basalmembran (Bruch'sche Membran)
 - Funktion: Versorgung des retinalen Pigmentepithels und der Vorderkammern
 - Netzhaut (Retina)
 - Schichtstruktur aus
 - Pigmentepithel
 - Neuronen, Nervenfasern
 - Retinalen Blutgefäßen (Versorgung der Neuronen)
 - Funktion: Bildsensor



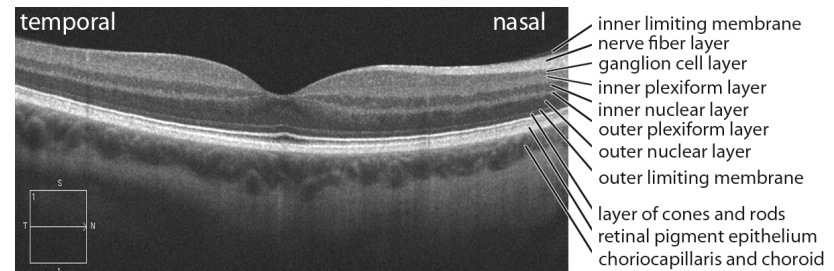
Bildquelle: Kaschke

Aufbau der Retina

- **Die Netzhaut (Retina)**, reicht vom Rand der Pupille bis zum Austrittspunkt der Sehnervs. Sie besteht aus schichtweise hochdifferenziertem Nervengewebe. In den **10 Schichten** kommen charakteristische Zelltypen vor:
 - **Photorezeptive Zellen:** Hierzu zählen die Zapfen und Stäbchen. Sie wandeln Lichtreize in Nervenimpulse um. Die Stäbchen sind dabei für das Dämmerungssehen, die Zapfen für das Farbsehen verantwortlich.
 - **Interneurone** (Horizontalzellen, Bipolarzellen, Amakrinzellen): Verschalten die fotorezeptiven Zellen mit den Ganglienzellen und untereinander (horizontale Informationsverarbeitung) und können die Lichtreize so modulieren.
 - **Ganglienzellen:** Bilden den “Ausgang” der Netzhaut und leiten die visuellen Reize ihres **rezeptiven Feldes** über den Sehnerv weiter.
- Die hochgradige Schichtordnung entsteht durch eine Abfolge von:
 - Schichten, in denen Zellkerne vorkommen
 - Schichten, in denen Nervenfasern und Synapsen vorkommen
 - Membranschichten
- Die Schichtstruktur kann mittels **Optischer Kohärenztomographie (OCT)** in vivo dargestellt werden.

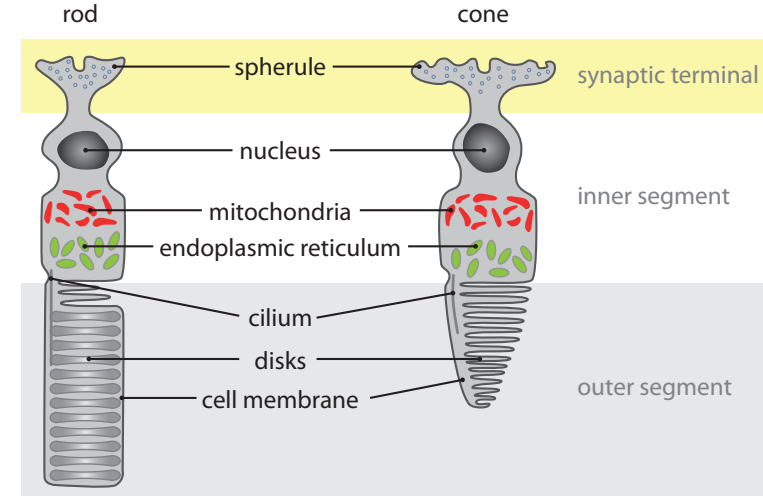


Bildquelle: Kaschke



Photorezeptoren

- **Photorezeptive Zellen (Photorezeptoren):**
 - **Zäpfchen (Cones)**
Ermöglichen das Farbsehen bei Tageslicht
 - **Stäbchen (Rods)**
Ermöglichen das Dämmerungssehen (schwarz-weiß)
Hohe Empfindlichkeit: Reizauslösung bei 5 Photonen innerhalb 20ms.
- Die laterale Anordnung bildet drei axiale Funktionsschichten:
 - **Äußeres Segment:**
Scheibenförmig gestapelte Falten der Zellmembran mit eingelagerten Chromophoren.
 - **Inneres Segment:**
Zellkörper der Rezeptorzellen. Im oberen Bereich sind die Zellkerne angeordnet (Äußere Körnerschicht).
 - **Synaptische Endplatten:**
Synapsen zu den 1. und 2. Neuronen. (Äußere Plexiforme Schicht).

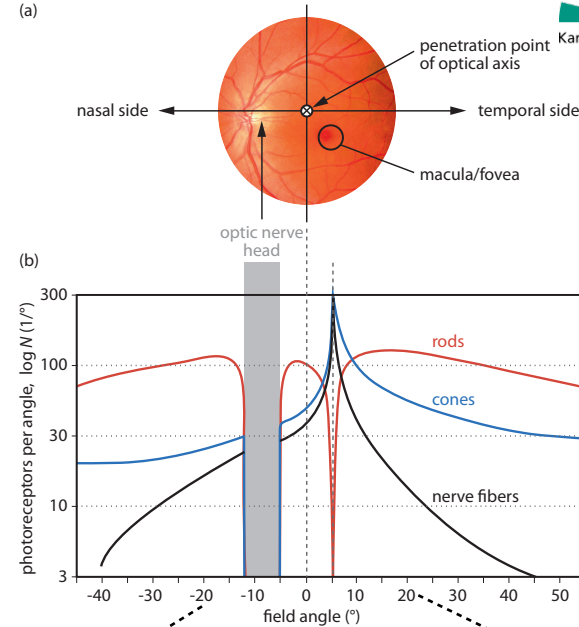
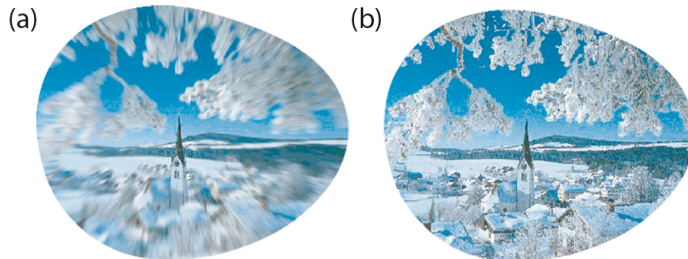


Bildquelle: Kaschke

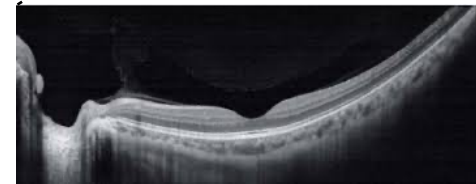
Verteilung der Photorezeptoren

Die räumliche Dichte und die Zusammensetzung der Rezeptoren variieren an verschiedenen Orten der Retina

- Im peripheren Bereich der Retina dominieren die Zäpfchen
- Im zentralen Bereich der Retina befindet sich die **Macula** (auch Gelber Fleck, ca. 3-5mm Durchmesser) -> **Bereich der höchsten Zäpfchendichte**
- Im Zentrum der Macula befindet sich die trichterförmige **Fovea centralis** (d: ca. 1,5mm) -> **Ort der höchsten Sehschärfe**
 - Zäpfchen am dichtesten gepackt
 - 1:1-Verschaltung auf die Ganglienzellen
 - die über den Rezeptoren liegenden Zellschichten sind zur Seite gedrängt
 - avaskuläre Zone
- Es wird immer nur ein kleiner Abschnitt des Gesichtsfelds scharf gesehen (a). Durch ständige Augenbewegung entsteht im visuellen Cortex der Eindruck eines scharfen Gesamtbilds (b).



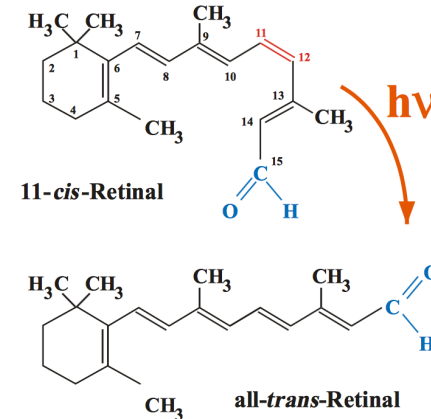
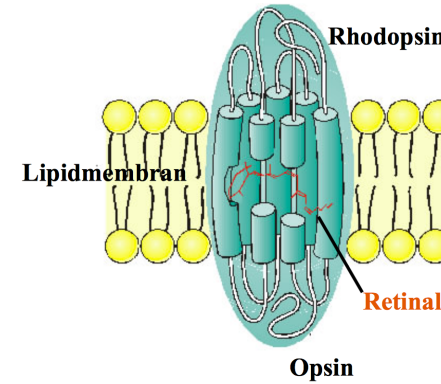
Bildquelle: Kaschke



OCT B-Scan durch die Verbindungsebene zwischen Macula und Papille

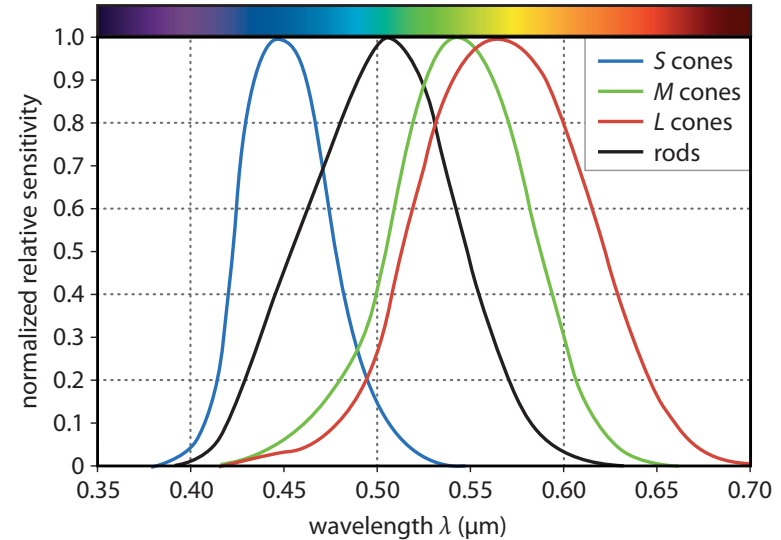
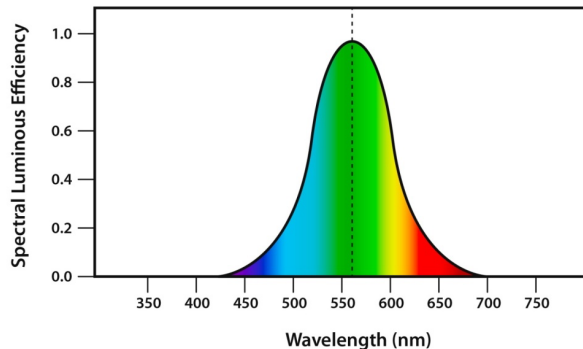
Pigmentmoleküle

- Das Pigmentmolekül (Rhodopsin) bestehen aus 2 Komponenten:
 - **Opsin (Proteinkomponente)**
Transmembranprotein
 - **11-cis-Retinal (Chromophor-Komponente)**
Derivat des Retinols (Vitamin A₁)
- Die **visuelle Signaltransduktion** läuft in folgenden Schritten ab:
 - Im **Ruhezustand (dunkel)** schüttet die Photorezeptorzelle präsynaptisch den Neurotransmitter Glutamat aus.
 - Dies bewirkt eine andauernde **postsynaptische Hemmung** der nachgeschalteten bipolaren ON-Neuronen.
 - 11-cis-Retinal **absorbiert ein Photon** und isomerisiert zu all-trans-Retinal (Bleaching)
 - dadurch **verändert sich die räumliche Struktur** des Rhodopsins
 - Über eine intrazelluläre Signalkaskade schließen sich Kationen-Kanäle in die Zellmembran. Es kommt zu einer **Hyperpolarisation der Photorezeptorzelle**
 - Die Freisetzung von Glutamat **verringert sich** und dadurch auch **die Hemmung** der bipolaren Neuronen.
 - Die bipolaren ON-Neuronen können **Aktionspotentiale der nachgeschalteten Ganglienzellen** auslösen.
 - Die Regeneration von 11-cis-Retinal erfolgt im Pigmentepithel



Spektrale Empfindlichkeit der Retina

- Die Pigmentmoleküle von Stäbchen und Zäpfchen haben unterschiedliche spektrale Empfindlichkeiten:
 - Stäbchen**
 - Rhodopsin
Maximum bei 498nm (Grün)
 - Zäpfchen**
 - S-Photopsin Blau
 - M-Photopsin: Grün
 - L-Photopsin: Rot
- Die Empfindlichkeit des menschlichen Auges hat ihr Maximum im grünen Spektralbereich!

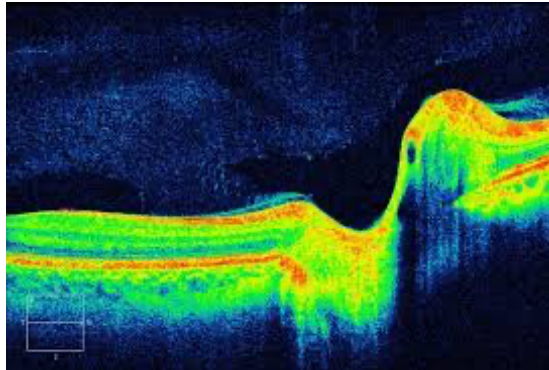
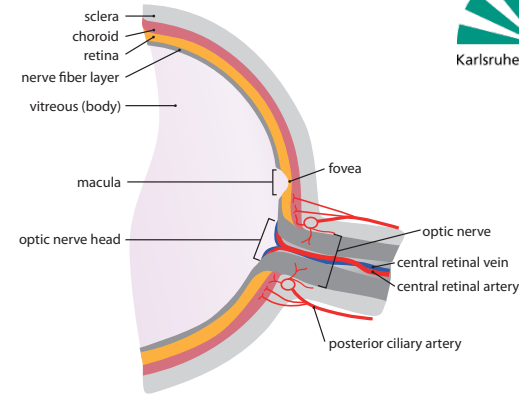


Bildquelle: Kaschke

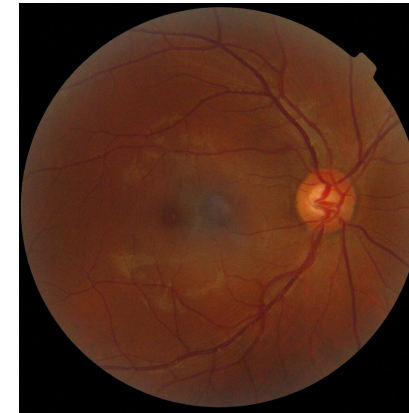
Papille

Die Papille (Sehnervkopf) ist die Austrittsstelle des Sehnervs

- Die Nervenfasern der Ganglienzellen verdichten sich zum Sehnerv
- Es sind keine Photorezeptoren vorhanden (Blinder Fleck, pigmentfrei)
- Im zentralen Bereich des Sehnervs treten die retinalen Blutgefäße aus
- Die Dicke der Nervenfaserschicht um die Papille gibt Aufschluss über den Zustand des Sehnervs



OCT B-Scan durch die Papille



Kamerabild des Augenhintergrunds (Fundus)

Adaption

Adaption ist die Anpassung des Auges an unterschiedliche Lichtverhältnisse
= Leuchtdichten im Gesichtsfeld

Zum enormen Dynamikbereich (ca. 10^{12}) des menschlichen Auges tragen mehrere Mechanismen bei:

- **Irisreflex**

- schnelle Anpassung an plötzliche Helligkeitswechsel durch Veränderung des Pupillendurchmessers (2-6mm)
- Reaktionsgeschwindigkeit < 2s
- Dynamikbereich 10^1

- **Dunkeladaption der Zäpfchen und Stäbchen**

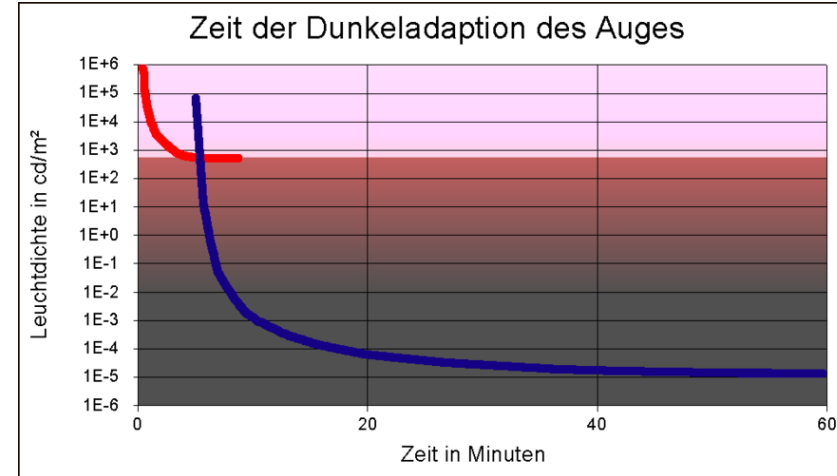
Stäbchen haben eine geringere Reizschwelle (größere Empfindlichkeit als Zäpfchen. Bei normalen Lichtverhältnissen liegt Rhodopsin überwiegend im gebleichten Zustand vor.

Ein Verringerung der Lichtstärke führt zu:

- Erhöhung der Chromophorkonzentration durch Akkumulation
- Steigerung der Chromophor-Regenerationsrate
- Reaktionsgeschwindigkeit: Zäpfchen 7min, Stäbchen 30min
- Es erfolgt ein Wechsel vom Zäpfchensehen (Photopisch) zum Stäbchensehen (Skotopisch), bei Unterschreitung der Reizschwelle der Zäpfchen

- **Neuronale Adaption**

- Vergrößerung der rezeptiven Felder durch Zusammenschaltung benachbarter Photorezeptoren (räumliche Summation)
- Verlangsamung der Augenbewegungen (zeitliche Summation)



Bildquelle: [https://de.wikipedia.org/wiki/Adaptation_\(Auge\)/#/media/Datei:Hdadaptrp.png](https://de.wikipedia.org/wiki/Adaptation_(Auge)/#/media/Datei:Hdadaptrp.png)

Das optische System des Auges

Ein vereinfachtes Modell zu Beschreibung der Abbildungseigenschaften des Auges ist das Gullstrand-Auge

- 6 refraktive (lichtbrechende) Flächen mit den entsprechenden Radien r
 - 2 Hornhautflächen
 - 4 Linsenflächen (Nukleus und Cortex)
- 3 Abstände (Augenlänge d_L , Vorderkammertiefe d_K , Linsendicke)
- den entsprechenden optischen Brechungsindizes n

Die Brechkraft einer Linse D entspricht der reziproken Brennweite f [m]:

$$D = \frac{1}{f'}$$

Zur Berechnung der Brechkraft des Auges müssen die Brechkräfte von Cornea und Linse kombiniert werden (Näherung 2-Linsen-Formel):

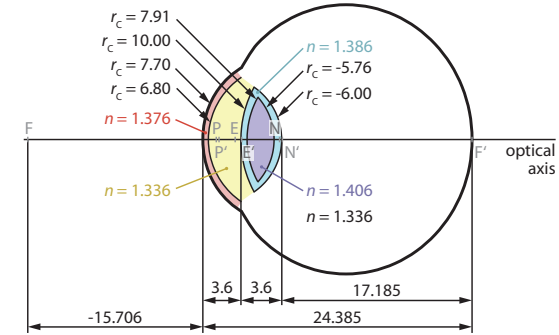
$$D'_A = D'_C + D'_L - d_K D'_C D'_L$$

Emmetropes (rechtsichtiges) Auge: $1/D'_A = d_L$

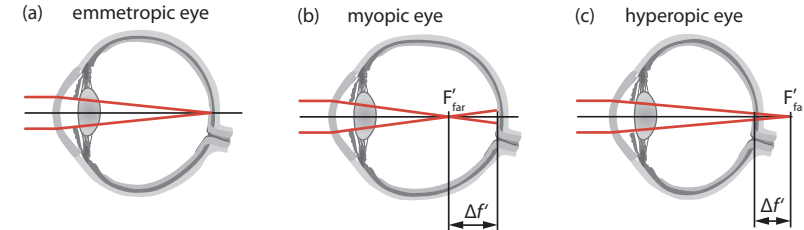
Myopes (kurzsichtiges) Auge: $1/D'_A < d_L$

Hyperopes (übersichtiges) Auge: $1/D'_A > d_L$

Junge Menschen können eine moderate Hyperopie durch Akkommodation kompensieren.



Bildquelle: Kaschke



Akkommodation

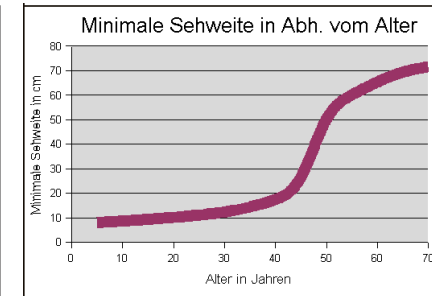
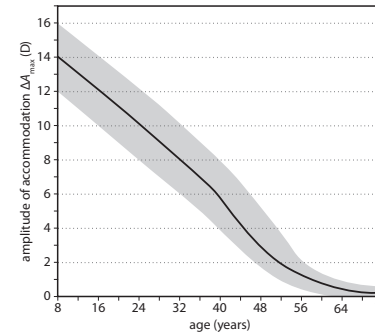
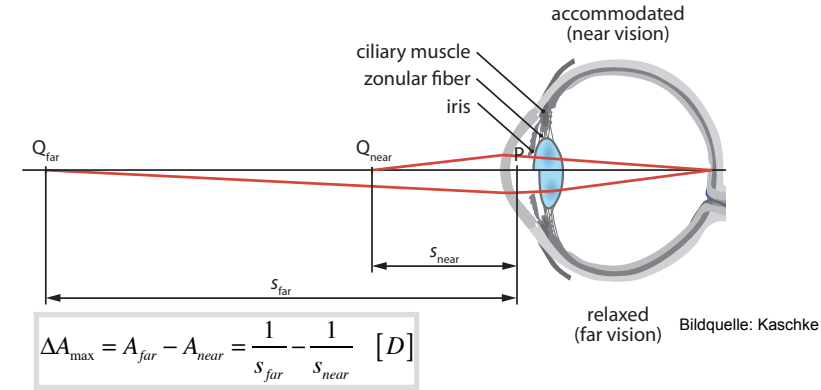
Akkommodation ist die Anpassung des Auges an verschiedene Sichtweiten. Dazu kann das Auge seine Brechkraft dynamisch verändern (Akkommodationsamplitude ΔA).

Helmholtz'sche Theorie der Akkommodation (heute größtenteils bestätigt):

- Fernakkommodation = entspanntes Sehen
 - Die ringförmigen Ziliarmuskeln sind entspannt
 - Der Muskelring ist dilatiert
 - Die Zonulafasern sind gespannt und ziehen die Linse auseinander
 - Die Linse ist abgeflacht (großer Radius)
 - Die Brechkraft der Linse ist gering
- Nahakkommodation = angespanntes Sehen
 - Die Ziliarmuskeln sind angespannt
 - Der Muskelring ist kontrahiert
 - Die Zonulafasern sind entspannt. Die Linse kann sich elastisch zusammenziehen
 - Die Linse wird dicker (kleiner Radius)
 - Die Brechkraft der Linse ist hoch

Im Alter nimmt die Elastizität der Linse deutlich ab. Es ergeben sich folgende Konsequenzen:

- Die Linse lässt sich nicht mehr auseinanderziehen und kann sich weniger zusammenziehen, sie verbleibt in einem Zwischenzustand und
 - die Akkommodationsamplitude nimmt ab und damit die Fähigkeit zur dynamischen Anpassung der Sehweite
 - die minimale Sehweite nimmt zu. Ein scharfes Sehen auf kurze Distanz wird unmöglich (Alterssichtigkeit, Presbyopie)



Bildquelle: [https://de.wikipedia.org/wiki/Akkommodation_\(Auge\)#/media:Datei:Akkomodbreiterp.png](https://de.wikipedia.org/wiki/Akkommodation_(Auge)#/media:Datei:Akkomodbreiterp.png)

Bildquellen

Bücher

Internetseiten

Angaben jeweils an der entsprechenden Abbildung

Alle verwendeten Abbildungen unterliegen dem Copyright des jeweiligen Autoren/Verlages.