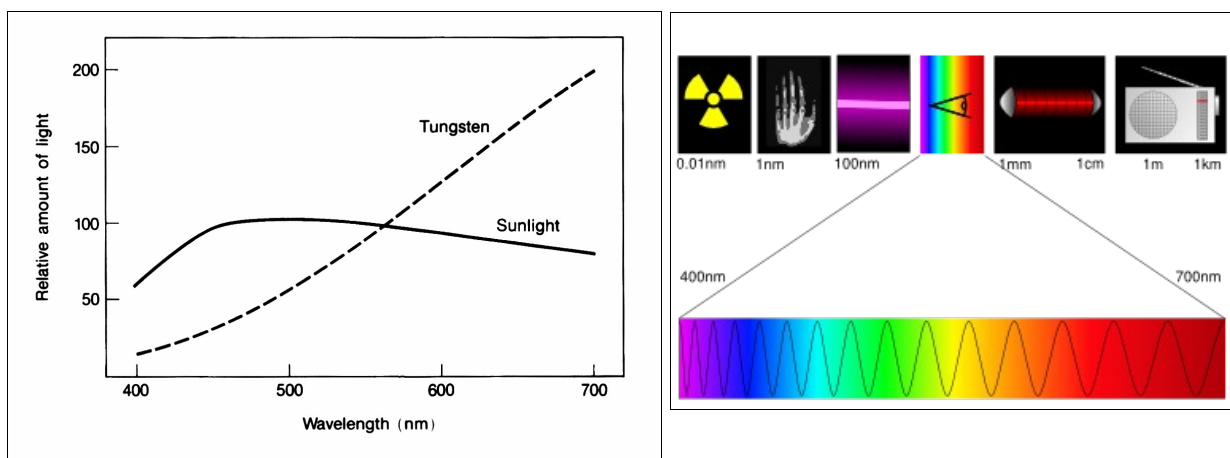


1. Sehen

1.1 Wie sieht das Spektrum von Sonnenlicht aus?

- Das *elektromagnetische Spektrum* beschreibt die verschiedenen Arten elektromagnetischer Wellen. Geordnet nach der Wellenlänge, befinden sich an dem einen Ende des Spektrums die Radiowellen, deren Wellenlänge von wenigen Zentimetern bis zu vielen Kilometern reichen. Am anderen Ende des Spektrums sind die sehr kurzwelligen und damit energiereichen Gammastrahlen, deren Wellenlänge bis in atomare Größenordnungen reicht.
- Das elektromagnetische *Spektrum der Sonne* weist im Bereich des sichtbaren Lichtes, d.h. im Wellenlängenbereich von 400nm bis 700nm eine relativ gleichmäßige Intensität auf. Im Gegensatz dazu ist das *Spektrum einer Glühlampe* in Richtung gelb verschoben, soll heißen, es hat im Gelbbereich eine höhere Intensität.



- Farbtemperatur: Dieser Effekt läßt sich mit dem Begriff ‚Farbtemperatur‘ modellieren. Die *Farbtemperatur* einer Lichtquelle ist die Temperatur, die ein Schwarzer Körper nach dem *Plancksche Strahlungsgesetz* haben müßte, damit dessen Licht denselben Farbeindruck erweckt wie die tatsächliche Lichtquelle. Die Farbtemperatur wird in der Einheit Kelvin (K) angegeben. Es gilt das *Wiensche Verschiebungsgesetz*. Während die Sonne eine Farbtemperatur von ca. 5500 Kelvin hat, liegt sie bei einer gewöhnlichen Glühlampe bei 2600 bis 3000 K. Besser sind hier Leuchtstoffröhren oder Xenon-Lampen mit einer Farbtemperatur von 4000 bis 5000 K geeignet, d.h. sie erscheinen deutlich weißer als das Tungsten-Licht einer Glühlampe.
- Physikalischer Hintergrund: Der Glühfaden strahlt entsprechend dem **Planckschen Strahlungsgesetz**, so daß sich dessen Strahlung mit steigender Temperatur gemäß dem **Wienschen Verschiebungsgesetz** zu kleineren Wellenlängen hin verschiebt. Die Wellenlänge maximaler Strahlungsleistung verschiebt sich also einfach umgekehrt proportional zur absoluten Temperatur des Schwarzen Strahlers: Verdoppelt sich die Temperatur des Strahlers, so tritt die größte Strahlungsleistung bei der halben Wellenlänge auf.
- Tungsten-Licht: Um eine möglichst hohe Ausbeute an sichtbarem Licht zu erhalten und auch, damit das Licht möglichst natürlich „weiß“ erscheint, strebt man danach, das Strahlungsmaximum durch Temperaturerhöhung aus dem Bereich der langwelligen Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung) in den Bereich des sichtbaren Lichtes zu verschieben. Die Höchsttemperatur wird allerdings durch die Eigenschaften des Glühfadenmaterials begrenzt. Um möglichst hohe Temperaturen zu ermöglichen, verwendet man heute für Glühfäden das hochschmelzende Metall Wolfram (Schmelztemperatur = 3422 °C). Allerdings läßt sich auch mit diesem Material die für weißes Licht wünschenswerte Temperatur von etwa 6200 K nicht erreichen, da Wolfram bei dieser Temperatur bereits flüssig beziehungsweise gasförmig ist. Bei den praktisch erreichbaren Temperaturen von etwa 2300 bis 2900 °C erreicht man kein weißes Licht und auch nicht die Farbe von Tageslicht, Glühlampenlicht ist daher immer deutlich gelb-rötlicher als weißes oder Tageslicht.

1.2 Wozu dient die Pupille?

- **Funktion:** Verbesserung der Abbildungsschärfe (Schärfentiefe) durch Verkleinerung. Die Verkleinerung des Pupillendurchmessers schützt zudem die Photorezeptoren auf der Retina vor übermäßiger Beleuchtung.
- **Schärfentiefe:** Der als Schärfentiefe (auch als Abbildungstiefe, umgangssprachlich oft auch als Tiefenschärfe) bezeichnete Schärfebereich ist die Ausdehnung des scharf abgebildeten Bereichs entlang der optischen Achse eines optischen Systems. Als scharf empfindet ein Betrachter ein Bild dann, wenn Linien und Kanten klare Grenzen aufweisen. Die Schärfentiefe ist quasi jener Bereich, der einem normalsichtigen Auge vor und hinter der Scharfstellebene noch scharf erscheint (Stichwörter: Zerstreuungskreise, Beugungsscheibchen)
- **Anatomie:** kreisrund und gleich groß, normaler Durchmesser bei 3-5mm, Miosis (Helligkeit, Schlaf, Ermüdung, Narkose, Morphinum, reflektorische Pupillenstarre) bei 1mm und Mydriasis (Dunkelheit, Schmerzen, Arousal, Migräneanfall, Glaukomanfall, absolute Pupillenstarre) bei 8mm
- **Funktionsweise:** umgekehrt proportionale Anpassung des Pupillendurchmessers je nach Stärke des Lichteinfalls (analog zur Aperturblende eine Kamera) mit Hilfe der beiden inneren Augenmuskeln (parasymphatische Verengung durch m. sphincter pupillae, sympathische Dilatation durch m. dilatator pupillae)
- **Pupillenreflex:** nicht-bewußte Anpassung über den nicht-genikulären Pfad der Sehbahn (Ausfall weist auf Schädigung des Di- bzw. Mesencephalon hin)

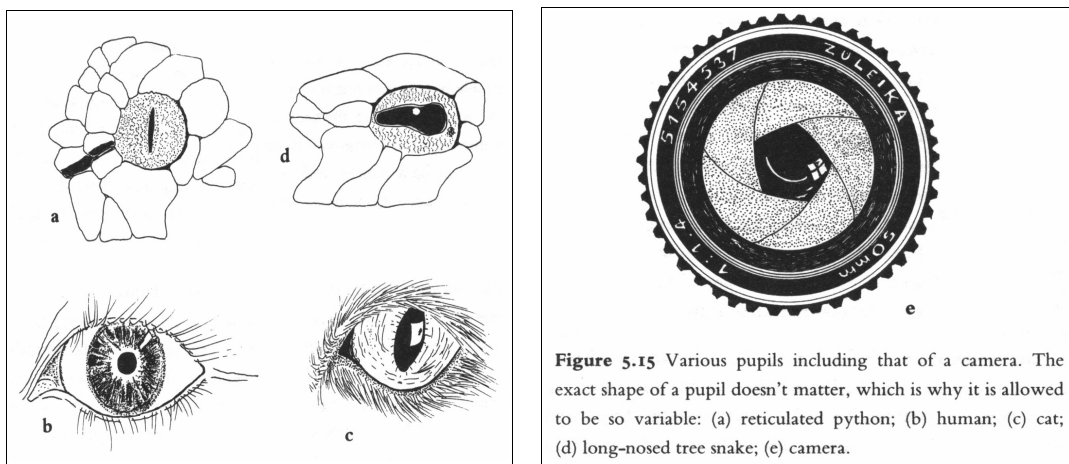
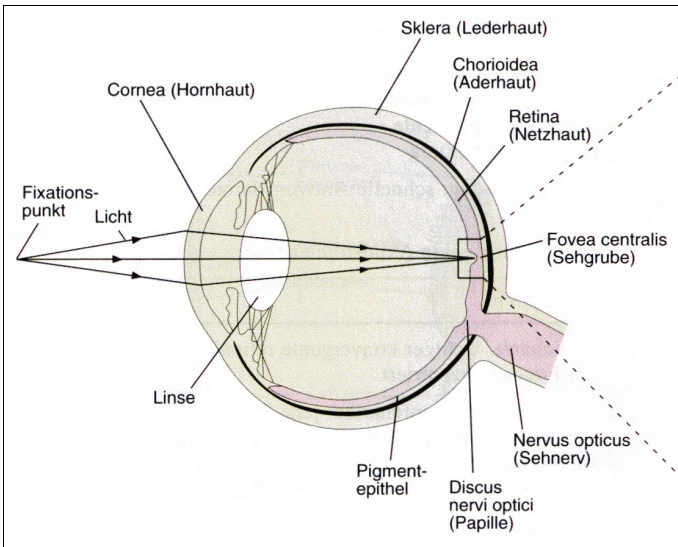


Figure 5.15 Various pupils including that of a camera. The exact shape of a pupil doesn't matter, which is why it is allowed to be so variable: (a) reticulated python; (b) human; (c) cat; (d) long-nosed tree snake; (e) camera.

1.3 Welche Vor- und Nachteile hat eine weit geöffnete Pupille?

- **Vorteil:** Möglichkeit des Sehens auch bei geringer Leuchtstärke
- **Nachteil:** geringe Tiefenschärfe (analog zum großen Durchmesser einer Aperturblende)

1.4 Beschreiben Sie anhand einer Skizze den Aufbau des menschlichen Auges!



1.5 Welche Ähnlichkeiten bestehen zwischen dem Aufbau des menschlichen Auges und dem einer Kamera!

Funktion	Auge	Kamera
allgemein	Abbildung der Umwelt	
Lichtbrechung	Linse und Hornhaut	Linse
Regulation Brennpunkt	Veränderung der Linsenform	Bewegung der Linse
Regulation Lichteinfall	Pupillendurchmesser	Blende
Bilderzeugung	Photorezeptoren	Filmmaterial/digital

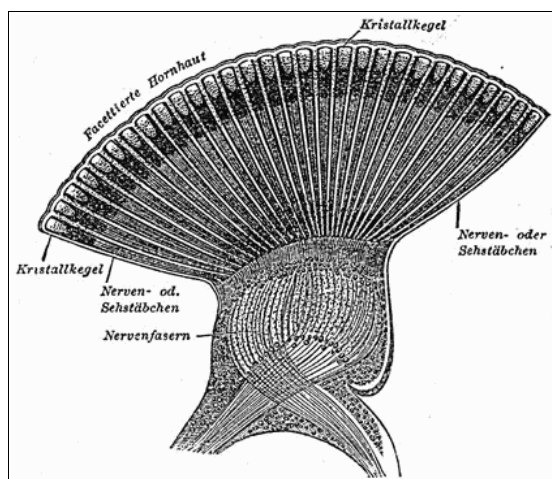
- Beachte nach Hübner: Während das menschliche Auge optische Informationen aktiv verarbeitet, bildet die analoge Kamera optische Informationen nur passiv ab (anders ist das natürlich bei der Digitalkameras).

1.6 Schildern Sie anhand eines kurzen Beispiels aus dem Tierreich, inwieweit die Anatomie des Auges an die Bedürfnisse angepasst ist!

- **Raubtiere:** Augen beide nach vorne gerichtet > Überlagerung der Sehfelder beider Augen > 3D-Sehen > Abschätzen von Entfernungen > Präzision bei der Jagd
- **Beutetiere:** Augen eher seitlich am Kopf > vergrößertes Gesichtsfeld > rechtzeitiges Wahrnehmen von Gefahr
- **Fische:** rundere Linsen > zusätzliche Brechkraft > besseres Unterwassersehen
- **Katze** haben einen größeren Pupillendurchmesser > größere Lichtmenge (Leuchtdichte) > besseres Nachtsehen

1.7 Beschreiben Sie den Unterschied zwischen Linsen- und Facettenauge.

- **Linsenauge:** Eine Linse sammelt Licht aus einem weitem Gesichtsfeld und fokussiert es auf konkave Rezeptoroberfläche
- **Facettenauge:** eine kleine Linse pro *Ommatidium* sammelt Licht aus kleinen Bereichen und fokussiert es auf konvex angeordnete Rezeptoren > benötigt im Vergleich zum Linsenauge mehr Platz und hat geringe räumliche Auflösung, aber dafür höhere zeitliche Auflösung (250 Bilder pro Sekunde bei fliegenden Insekten) und größeres Gesichtsfeld
- **Einzelheiten:** Die räumliche Auflösung des Facettenauges ist durch die Anzahl der Bildpunkte begrenzt und ist somit weit geringer als etwa die Auflösung des menschlichen Linsenauges. Zudem ist die Empfindlichkeit des Facettenauges gering und nimmt mit steigender Auflösung, also mehr und damit kleineren Facetten, stark ab. Dies ist prinzipbedingt, da das von einem Objektpunkt ausgehende Licht im Idealfall nur von einer einzigen der winzigen Linsenflächen (z.B. 0.001 mm²) auf eine Sinneszelle geführt wird, während im Linsenauge die von der gesamten Linsenöffnung (etwa > 10mm² beim Menschen) empfangenen Strahlen eines Objektpunktes effektiv auf wenige Sinneszellen konzentriert werden. Ommatidien sind die Einheiten, aus denen die Facettenaugen der Insekten zusammengesetzt sind. Ein Ommatidium wird durch acht Sinneszellen gebildet, deren Mikrovillissäume nach innen der Achse zugerichtet sind und das Rhabdom bilden. Jedes Einzelauge besitzt einen dioptrischen Apparat, der aus einer stark brechenden Cornealinse besteht. Der Cornealinse schließt sich ein Kristallkegel an. Die Mikrovillissäume der Sehzellen bilden das Rhabdom. Die Ommatidien werden voneinander durch drei verschiedene Pigmentzell-Typen abgegrenzt.



1.8 Was soll mit einer möglichst guten Optik erreicht werden?

- Die Funktion einer guten *Optik* ist die für den Organismus funktionsspezifische (d.h. nicht notwendigerweise möglichst realitätsnah) Abbildung der Umwelt.

1.9 Welcher Bereich der Umwelt wird scharf wahrgenommen, wenn die Augen 'entspannt' sind?

- **Fernsehen:** Wenn der m. ciliaris entspannt und damit die Linse flach ist, werden Objekte mit in einer größeren Entfernung (ab 5m) scharf auf die Retina abgebildet.
 - **Fernpunkt** = weiteste Entfernung, bei der ein Objekt noch scharf wahrgenommen werden kann. Ein zu langer Augapfel oder eine zu starke Brechkraft der Linse/Hornhaut kann zur Myopie führen.

1.10 Wozu dient die Akkomodation?

- **Akkomodation = Brechkraftanpassung der Linse.** Die Akkomodation dient dazu, verschieden weit entfernte Objekte jeweils scharf abzubilden.
- **Nahsehen:** Wenn der m. ciliaris gespannt (parasymphatische Innervation des m. ciliaris durch n. oculomotorius > m. ciliaris zieht Choroidea nach vorn > fibrae zonulares entspannen sich > Linse wird durch Eigenelastizität rund) und damit die Linse rund ist, werden nahe Objekte (weniger als 5m) durch die nun erhöhte Brechkraft der Linse scharf auf die Retina abgebildet.
 - Anatomie der Linse: Die Linse ist bikonvex (vorderer Krümmungsradius 10mm und hinterer 6mm). Die Epithelzellen wachsen von innen nach außen, wodurch sich das Gewebe im Linseninneren immer mehr verdichtet. Dies führt zur Verhärtung der Linse im Alter.
 - Brechkraft: Die Cornea hat mit 43 Dioptrin die deutlich höhere Brechkraft im Vergleich zur Linse mit 10 bis 20 Dioptrin. Linse dient vor allem der Feineinstellung der Brechkraft.
 - **Nahpunkt = kürzeste Entfernung, bis zu der man Objekte noch scharf wahrnehmen kann.** Dieser vergrößert sich im Alter (Presbyopie). Er liegt mit 20 Jahren bei 20cm und mit 60 Jahren bei 100cm. Ursache ist die Erschlaffung des m. ciliaris und die Verhärtung der Linse (grauer Star bzw. Katarakt möglich)

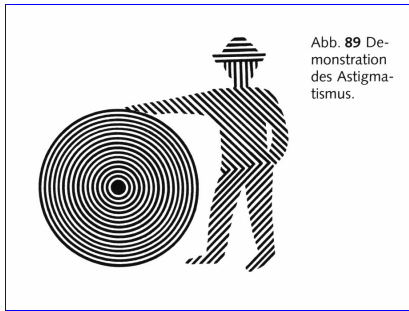
1.11 Ist bei Myopie oder Hyperopie der Augapfel zu 'lang'? Wie läßt sich das korrigieren?

- **Myopie = Kurzsichtigkeit (ferne Objekte erscheinen verschwommen, da hier der Brennpunkt vor der Retina liegt)**
 - Wir unterscheiden **refraktäre** (zu starke Brechung durch Cornea/Linse) und **axiale Myopie** (Augapfel zu lang)
 - Ursache: genetische Faktoren (Augapfel wächst zu stark, oft bei sehr großen Personen) und Umwelteinflüsse (verstärkte Arbeit im Nahbereich oder visuelle Deprivation gemäß Visual Feedback Model)
 - Behandlung: Einsatz konkaver Brillengläser oder Kontaktlinsen, welche die zu starke Brechkraft kompensieren
- **Hyperopie = Weitsichtigkeit (nahe Objekte erscheinen verschwommen, da der Brennpunkt hinter der Retina liegt)**
 - Ursache: zu kurzer Augapfel
 - Behandlung: Einsatz konvexer Brillengläser/Kontaktlinsen, um die Brechkraft zu erhöhen. Sind die Betroffenen jünger, kann aufgrund der Linsenplastizität oft noch eine ausreichende Akkomodation erreicht werden.

1.12 Wie sieht eine Person mit Astigmatismus (aber ohne Brille) einen Stern mit vielen Strahlen, wenn sie die Mitte fokussiert?

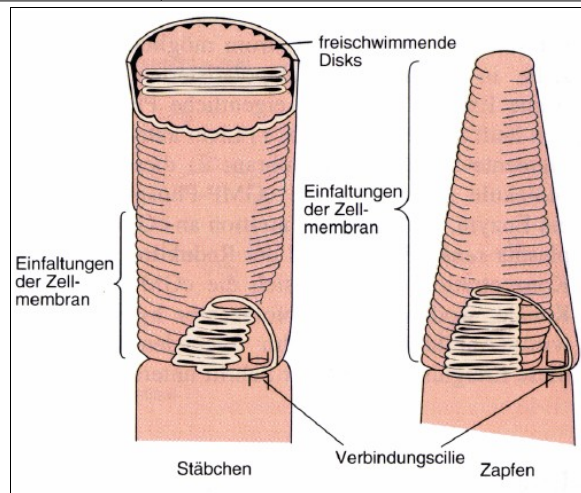
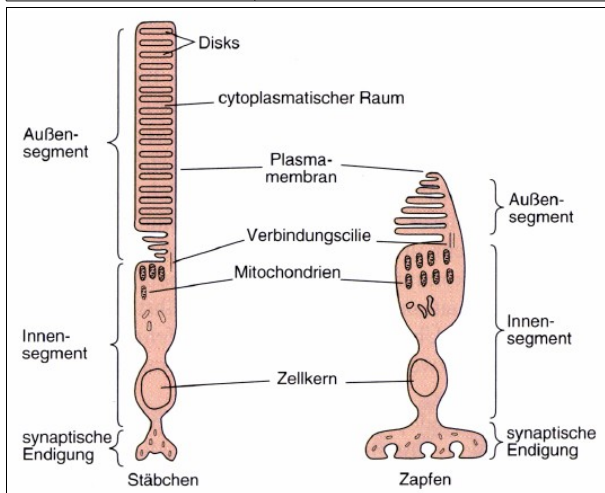
- **Astigmatismus = Hornhautverkrümmung (Stabsichtigkeit)**
 - Linien mit bestimmter Orientierung (Orientierung hängt von der Richtung des Krümmungsfehlers ab) werden als scharf wahrgenommen, die anderen als unscharf.. Wie sehr sich die Person mit Astigmatismus auch anstrengt, immer ist ein Teil des Bildes unscharf. Punkte werden als Ovale abgebildet.

- **Selbsttest:** Bei einäugiger Betrachtung erscheinen die Linien je nach Richtung verschieden hell.

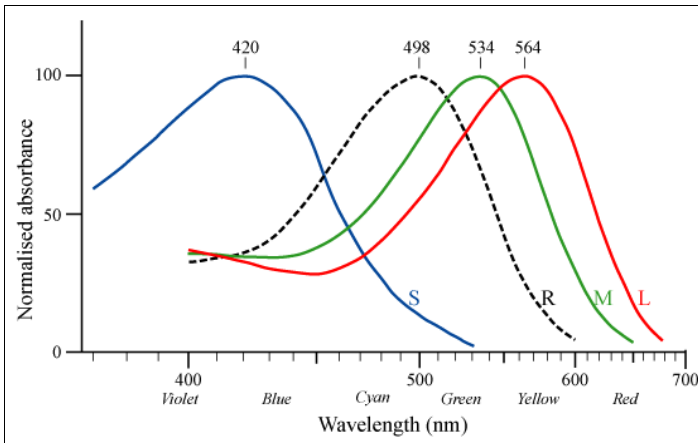


1.13 Worin unterscheiden sich Stäbchen und Zapfen?

	Stäbchen	Zapfen
<i>Verteilung</i>	100-125 Mio je Retina (nur in der Peripherie im Verhältnis 20:1 zu den dortigen Zapfen; nahe der fovea centralis bis zu 160.000 pro mm ² und weiter außen sinkend)	6-7 Mio je Retina (ca. 50.000 davon sehr dicht bis 160.000 pro mm ² in der fovea centralis – in der Peripherie nur ca. 10.000 pro mm ²)
<i>Form</i>	etwas länger und stäbchenförmig	etwas kürzer und zapfenförmig
<i>Spezifität</i>	Absorptionsmaximum bei 500nm (blau-grün)	Absorptionsmaxima bei 420nm (relativ wenig Rezeptoren), 534nm und 564nm > gemeinsames Absorptionsmaximum bei 560nm (Preisfrage: Warum langwellig verschoben?)
<i>Konvergenz</i>	hohe Konvergenz (durchschnittlich 120 Stäbchen pro Ganglienzelle)	niedriger Konvergenz (durchschnittlich 6 Zapfen pro Ganglienzelle) (1 zu 1 in der Fovea)
<i>Sensitivität</i>	sehr lichtsensitiv (Eigenschaften des Rezeptors und hohe Konvergenz, mehr Photopigment)	weniger lichtsensitiv (Eigenschaften der Rezeptoren und niedrige Konvergenz, weniger Photopigment)
<i>spatiale Auflösung</i>	geringe räumliche Auflösung	hohe räumliche Auflösung
<i>Funktion</i>	Skotopisches Sehen (Nachtsehen)	Photopisches Sehen (Farbsehen)
<i>temporale Auflösung</i>	niedrige zeitliche Auflösung (kurze Integrationszeit), max. Auflösung 12 Hz	hohe zeitliche Auflösung (kurze Integrationszeit), max. Auflösung 45 Hz
<i>Regenerationszeit</i>	lang (Rhodopsin braucht bis zu 30 min)	kurze (Farbopsine brauchen 3 bis 6 min)
<i>Einfallswinkel</i>	Empfindlicher für Streulicht	Empfindlicher für direkte axiale Bestrahlung



1.14 Wie sehen die spektralen Empfindlichkeitskurven von Zapfen und Stäbchen aus



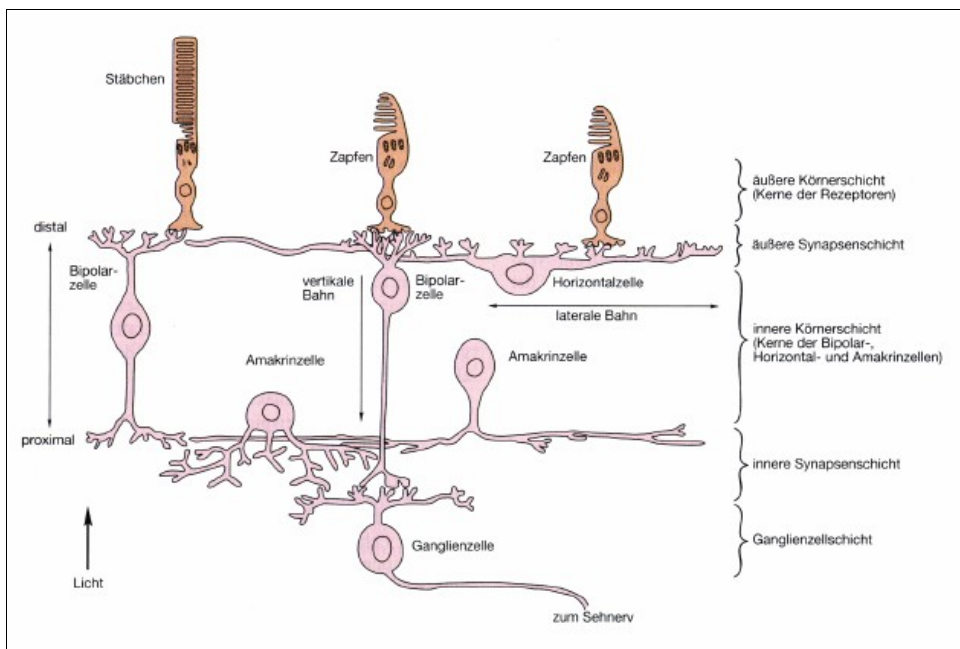
- **Stäbchen:** Maximum bei 500nm und **Zapfen:** Maximum bei 560nm. (420nm für Blau, 534nm für Grün und 564nm für Rot) Die gewichteten Anteile (mehr Grün/Rot-Zapfen!) überlagern sich dann zu gemeinsamen Maximum bei ca. 560nm)

1.15 Welche funktionale Bedeutung hat die unterschiedliche Konvergenz der beiden Rezeptortypen?

- **Zapfen:** niedrige Konvergenz > hohe spatiotemporale Auflösung
- **Stäbchen:** hohe Konvergenz > hohe Lichtempfindlichkeit

1.16 Warum ist die Retina kein Analogon zum Fotofilm? Worin liegt der Unterschied?

- Während beim visuellen System die Information schon beim Auftreffen auf die Retina aktiv verarbeitet wird (z.B. laterale Hemmung), wird der Photofilm passiv belichtet und extern entwickelt (Hinweis: Diese Analog gilt eigentlich nur bis zum cGMP im Auge bzw. zum Silberchlorid des Filmes – alles andere bedeutet Äpfel mit Birnen zu vergleichen, für Digitalkameras sowieso.)



1.17 In welchem retinalen Neuronentyp entstehen die ersten Aktionspotentiale?

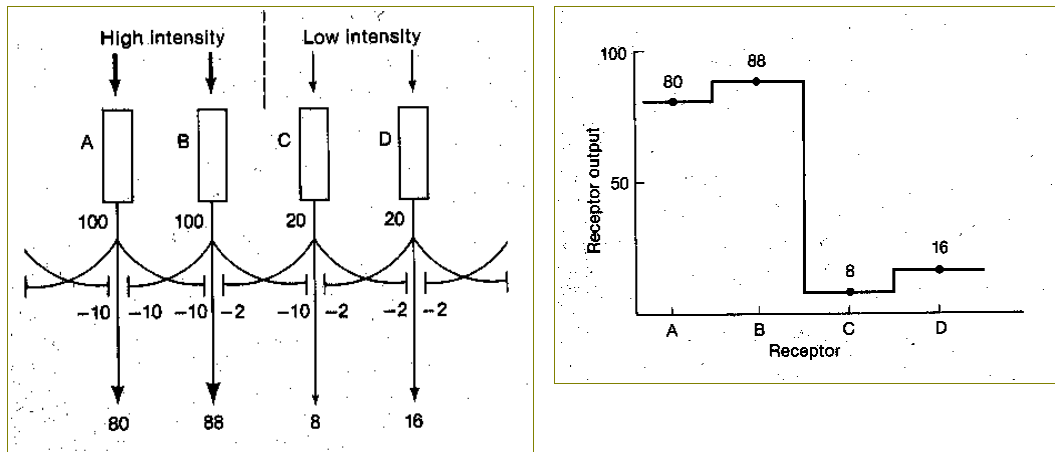
- Die ersten Aktionspotentiale entstehen in den retinalen Ganglienzellen (versus lokale Sensorpotentiale an Photorezeptoren, Amakrinen, Bipolar- und Horizontalzellen)

1.18 Nennen Sie die Stationen, die ein Lichtreiz bzw. dessen neuronale Codierung durchlaufen muss, bevor es in den Sehnerv gelangt!

- Licht: Hornhaut > Linse > Glaskörper > Photorezeptoren > dreistufige elektrochemische Transduktion via cGMP von Licht in Sensorpotentiale (Hyperpolarisierung der Photorezeptoren), elektrisch: synaptisches Terminal des Photorezeptors > Horizontalzellen/Bipolarzellen/Amakrinzellen > Ganglienzellen (Sehnerv)

1.19 Welcher Effekt tritt bei der Wahrnehmung von Machschen Bändern auf? Skizzieren Sie anhand eines Zahlenbeispiels den zugrundeliegenden physiologischen Mechanismus!

- Bei **Machschen Bändern** (einfarbig homogene Streifen unterschiedlicher Intensität) werden physikalisch identische Reize, abhängig von ihrer Umgebung unterschiedlich wahrgenommen. Konkret verstärkt sich der Hell-Dunkel-Kontrast an den Bandgrenzen.
- Die physiologische Grundlage ist die **laterale Hemmung**
 - Allgemeines Prinzip: Die laterale Hemmung ist ein allgemeines Prinzip, das überall im ZNS genutzt wird. Sie tritt in kompliziert verflochtenen Schaltkreisen auf, wie sie beispielsweise in Ganglienzellknoten oder in den oberen Schichten der Retina lokalisiert sind (dort werden die inhibitorischen Interneurone als Horizontalzellen bezeichnet. In der Retina ist die Verschaltung durch weitere Möglichkeiten der Kontrastverstärkung etwa mit Hilfe der Amakrinen bei weitem komplizierter)
 - Funktion: Das Ergebnis der lateralen Hemmung ist die Kontrastverstärkung, und damit die Herausbildung von Gestaltgrenzen, die als Grundlage der Orientierung dienen können.
 - **Beispiel auf der Retina**: Die Rezeptorzellen A-D feuern mit einer Intensität von 100 (A,B) bzw. 20 (C,D). Die Bipolarzellen leiten die Signale von den Rezeptorzellen weiter: Der Output der Bipolarzellen hängt von der Stimulation durch den Rezeptor und der Hemmung durch ihre benachbarten Bipolarzellen ab (via lateraler Hemmung über Horizontal- und Amakrinzellen). Kontrastverstärkung tritt nun an der Grenze zwischen hoher und niedriger Sensitivität auf, also zwischen B und C. Die dort liegenden Bipolarzellen werden jeweils von den benachbarten Bipolarzellen unterschiedlich gehemmt, so daß sich unterschiedliche Outputs im Vergleich zu den anderen Bipolarzellen mit gleich stark erregten Rezeptoren ergeben. So hat B bei gleichem Input wie A einen um 8 erhöhten Output, weil insbesondere die laterale Hemmung durch C (-2) schwach ist. Ebenso hat C einen um 8 niedrigeren Output als D, weil insbesondere die laterale Hemmung durch B (-10) hoch ist.



1.20 Welche retinalen Neuronentypen sind für die laterale Hemmung verantwortlich?

- **Horizontalzellen** (Synapsen im Bereich der äußeren plexiformen Schicht nahe der Photorezeptoren > laterale Hemmung und Rückkopplung des Signalfusses auf die Photorezeptoren) und die typenreichen **Amakrinzellen** (Synapsen im Bereich der inneren plexiformen Schicht nahe den Ganglienzellen > laterale Hemmung)

1.21 Was versteht man unter Adaptation und wozu dient sie?

- **Adaption** = Veränderung des Pupillendurchmessers (klein für viel Licht, groß für wenig Licht) und Regeneration der Photopigmente in den Stäbchen und Zapfen
 - **Funktion:** Anpassung des visuellen Systems an verschiedene Lichtverhältnisse
 - **Helladaptation** ist der Spezialfall des Tagsehens, wenn das gesamte visuelle System sich an Leuchtdichten oberhalb $3,4 \text{ cd/m}^2$ angepasst hat.
 - **Dunkeladaptation** ist der Spezialfall, wenn das visuelle System sich an Leuchtdichten unter $0,034 \text{ cd/m}^2$ angepasst hat.
 - **THESE:** Hell- und Dunkeladaptation der Wirbeltiere sind auch an die Retinomotorik gebunden (Bewegung der Pigmentepithelzellfortsätze und der Außenglieder der Photorezeptoren). Damit die Netzhaut bei unterschiedlichen Lichtbedingungen wie hell, dunkel und dämmrig funktionieren kann, haben sich Mechanismen entwickelt, die das Ausbleichen der empfindlichen Sehpigmente in den Sinneszellen (Stäbchen und Zapfen) verhindern sollen. Niedere Wirbeltiere wie z.B. Fische können die Weite ihrer Pupillen zur Regulation der eintretenden Lichtmenge nicht regulieren. Dafür können sowohl Photorezeptoren (Sinneszellen), als auch die Pigmentkörner des Pigmentepithels innerhalb bestimmter Gewebeschichten ‚wandern‘, und sich so dem schädlichen Einfluß des Lichtes entziehen. Dieses Phänomen nennt man Retinomotorik. Im Licht liegen die Zapfen dem einfallenden Licht näher, die Stäbchen sind zwischen den langen Ausläufern des Pigmentepithels (dunkle Körner) geschützt. Im Dunklen haben die Photorezeptoren Platz getauscht und die Stäbchen liegen frei. So können sie trotz niedriger Lichtintensität eine maximale Anzahl von Photonen absorbieren.

1.22 Wie sieht die Dunkeladaptationskurve aus, wenn Stäbchen und Zapfen zusammenwirken?

- **Dunkeladaptationskurve = Hüllkurve der Zapfen- und Stäbchenadaptation.** Die Dunkeladaptation dient der verbesserten Wahrnehmung im Dunkeln und läuft in zwei getrennten Stufen ab:
 1. Anfangs schnelle Adaption von Stäbchen und Zapfen bis zur maximalen Sensitivität der Zapfen, dem sogenannten **Kohlrauschknick** nach ca. 7 min
 2. Später weitere langsamere Stäbchenadaptation bis zu deren Sensitivitätsmaximum nach bis max. 30 min

1.23 Worin unterscheidet sich das photopische Sehen vom skotopischen Sehen?

- **Photopisches Sehen (phos, Licht) = niedrigsensitives, aber farbiges Tag- bzw. Zapfensehen mit hoher spatiotemporaler Auflösung**
- **Skotopische Sehen (skotos, Dunkelheit) = hochsensitives, aber farbloses Nacht- bzw. Stäbchensehen mit geringer spatiotemporaler Auflösung**
 - **Dämmerungssehen:** Im Übergangsbereich, dem sogenannten *mesopischen Bereich des Dämmerungssehen* tragen sowohl Zapfen als auch Stäbchen zur Bildwahrnehmung bei. Der skotopische Bereich reicht von der Wahrnehmungsschwelle bei einer Leuchtdichte von ca. $3 \cdot 10^{-6}$ cd/m² bis ca. 0.003 - 0.03 cd/m², darüber liegt der mesopische Bereich, der bis ca. 3-30 cd/m² reicht (die Grenzen sind fließend und individuell verschieden). Bei Leuchtdichten über 3-30 cd/m² tritt photopisches Sehen auf.
 - **Purkinje-Effekt:** Da die Stäbchen blauempfindlicher als die Zapfen sind und daher einen anderen Eindruck der Helligkeit verschiedener Farben als die Zapfen vermitteln, kommt es dabei zu einer geänderten Farbwahrnehmung, die vor allem in der Dämmerung merkbar ist, sobald die Dunkeladaptation einsetzt. Vor allem manche Blautöne erscheinen wesentlich leuchtender. Daher wird oft in künstlerischen Darstellungen oder auch bei der Beleuchtung für Film- und Fernsehaufnahmen, die Nachtstimmung hervorrufen sollen, ein hoher Anteil blauer Farbschattierungen verwendet. Aus dem selben Grund erscheint Mondlicht kälter (bläulicher) als Sonnenlicht, obwohl es eigentlich geringfügig rötlicher ist.
 - **Sehschärfe:** Die Sehschärfe ist beim photopischen Sehen am größten, vor allem im Bereich der Fovea centralis nahe der Mitte der Netzhaut. Beim skotopischen Sehen ist die Schärfe geringer; vor allem können Details mit geringem Kontrast nicht mehr wahrgenommen werden, weil das Auge die Helligkeit über benachbarte Stäbchen "mittelt". Da im Bereich der Fovea centralis keine Stäbchen zu finden sind, muss das Objekt beim skotopischen Sehen außerhalb der Fovea centralis sein (peripheres Sehen), man muss also "danebenschauen", um die beste Empfindlichkeit des Auges zu erreichen. Außerdem sind die Stäbchen zeitlich träger als die Zapfen (Pulfrich-Effekt).

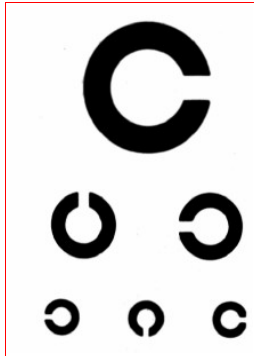
1.24 Wie kann man die Sehschärfe messen?

- Man mißt die minimale Entfernung zweier Punkte, damit man den Zwischenraum zwischen ihnen erkennen kann. Alternativ kann man auch bestimmen, wie breit schwarze und weiße Streifen eines Streifenmusters sein müssen oder wie groß die Felder eines Schachbrettes. Spezifische Varianten der Sehschärfemessung sind:

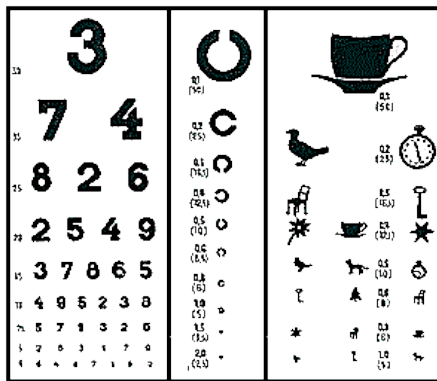


- **Sneller-Buchstaben = Buchstaben, die immer kleiner werden und die man benennen muß.** Das große A ist dabei normalerweise 88 mm groß und die Entfernung des Patienten beträgt 6 m.

- **Landolt-Ringe** = unterschiedlich große Kreise, die nicht ganz geschlossen sind und bei denen man die Stelle benennen soll, an der die Lücke im Ring ist



- Für noch geringere Visuswerte werden **Sehprobentafeln** verwendet oder auch Fingerzählen

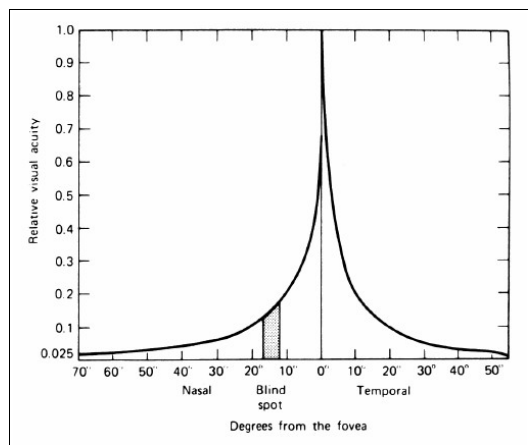
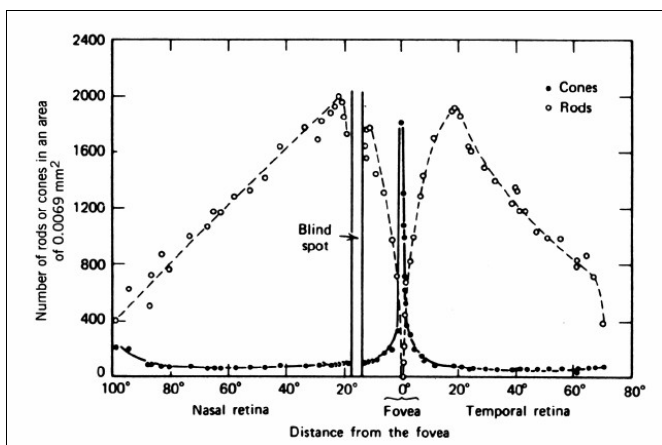


Quelle: Augenheilkunde ISBN: 3777310786

- **Visus:** Bei der Visusangabe handelt es sich entsprechend der Definition um eine dimensionslose Zahl. Der normale Visus ist altersabhängig und liegt bei einem 20jährigen Menschen bei 1.0 bis 1.6 und bei einem 80jährigen bei 0.6 bis 1.0.

1.25 Wie verteilt sich die Sehschärfe in Bezug auf die retinale Position?

- Sehschärfe ist in der Fovea Centralis am größten (nur Zapfen) und nimmt zu den Rändern hin ab (primär Stäbchen)



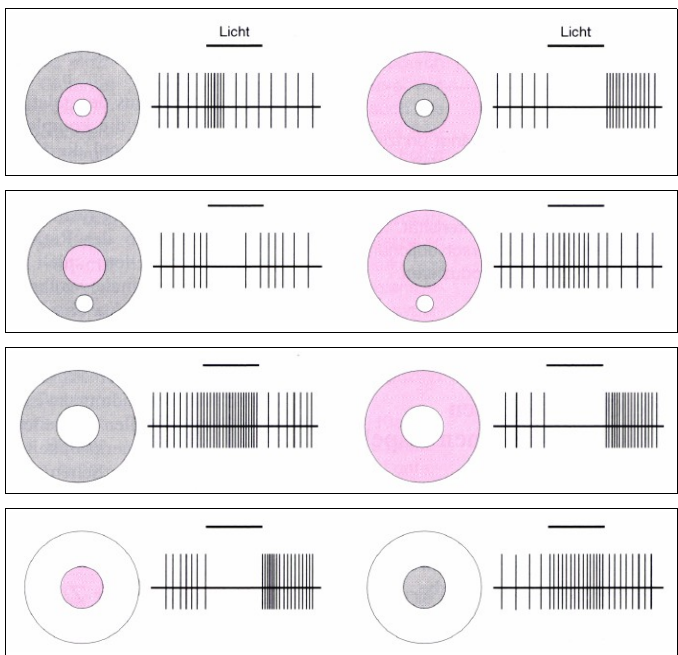
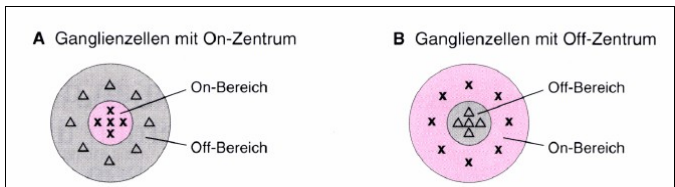
1.26 Was ist ein rezeptives Feld?

- Das **rezeptive Feld** eines sensorischen Neurons ordnet der sensorischen Information eine spezifische topographische Region zu. Beispielsweise ist das rezeptive Feld eines mechanischen Rezeptors für Berührung die Region auf der Haut, welche diesen Rezeptor innerviert (vgl. Kandel, 2000, S. 418)
- Sehsystem: Das rezeptive Feld eines Photorezeptors der Retina ist die Region des Gesichtsfeldes, die durch Projektion via Linse auf die Stelle der Retina projiziert, wo der Rezeptor sitzt. Das Gleich gilt für die retinalen Ganglienzellen und für alle weiteren sensorischen Neuronen entlang der Sehbahn.

1.27 Welche Arten von rezeptiven Feldern gibt es?

- Bezüglich des visuellen Systems unterscheiden wird grundsätzlich die rezeptiven Felder des *primär visuellen Cortex* von denen der *Corpus geniculatum laterale (CGL)* und von den rezeptiven Feldern der *retinalen Ganglienzellen*. Unter anderem bei letzteren können wir weiter zwischen **On- und Off-Zentrums-Zellen** unterscheiden, d.h. wir haben Ganglienzellen mit rezeptiven Feldern mit exzitatorischem Zentrum und inhibitorischem Umfeld (A) bzw. mit inhibitorischem Zentrum und exzitatorischem Umfeld (B).

Zelle	Merkmale
Sehnervfaser (Ganglienzelle)	Rezeptives Feld eines On-Zentrum-Neurons. Reagiert optimal auf kleine Punktflächen, jedoch auch auf andere Reize.
Corpus geniculatum laterale	Rezeptives Feld mit Zentrum und Umfeld, einer Ganglienzelle sehr ähnlich.
Einfache kortikale Zelle	Erregende und hemmende Bereiche nebeneinander angeordnet. Reagiert optimal auf Streifen einer bestimmten Orientierung.
Komplexe kortikale Zelle	Reagiert optimal auf die Bewegung eines richtig orientierten Streifens über das rezeptive Feld. Viele Zellen reagieren optimal auf eine bestimmte Bewegungsrichtung.
Endinhibierte kortikale Zelle	Reagiert auf Ecken, Winkel oder Streifen einer bestimmten Länge, die sich in einer bestimmten Richtung bewegen.



1.28 Welche Schichten unterscheidet man im Corpus Geniculatum Laterale (CGL)?

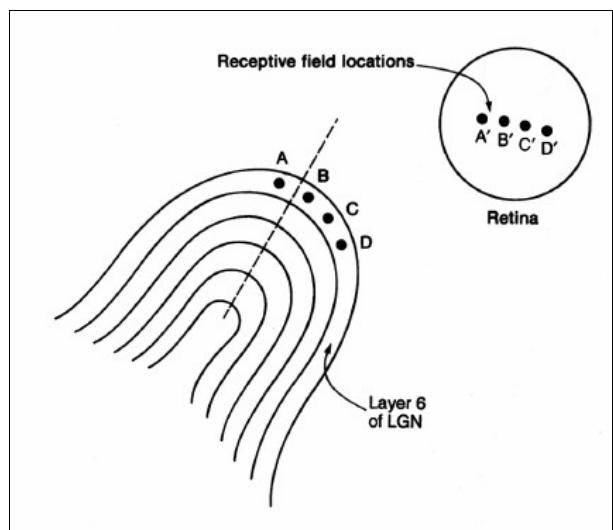
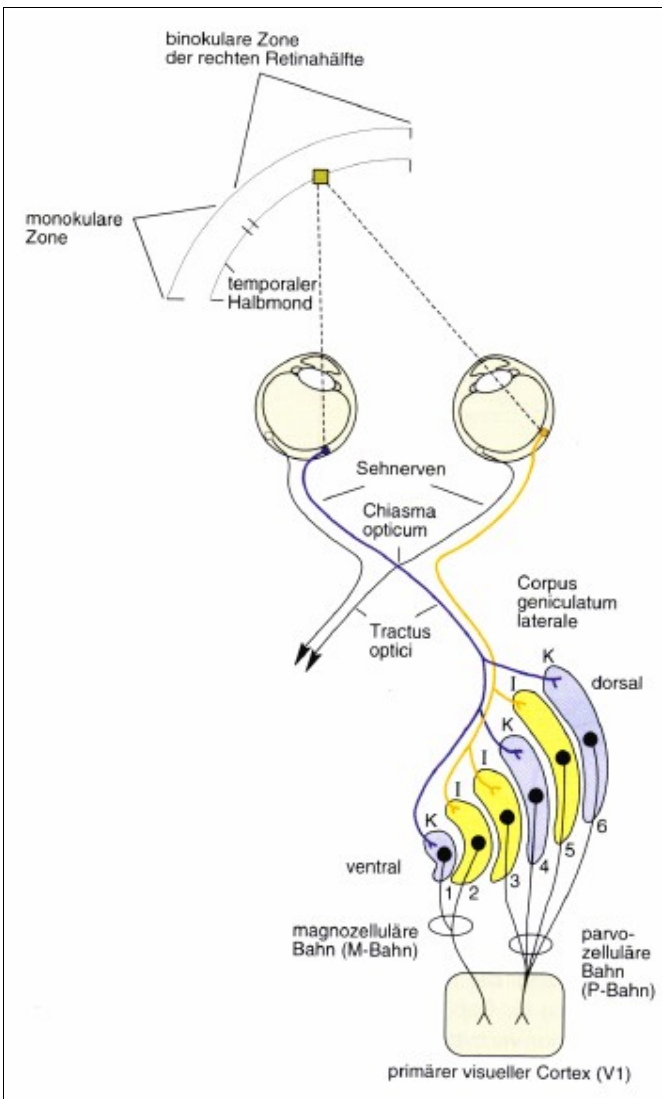
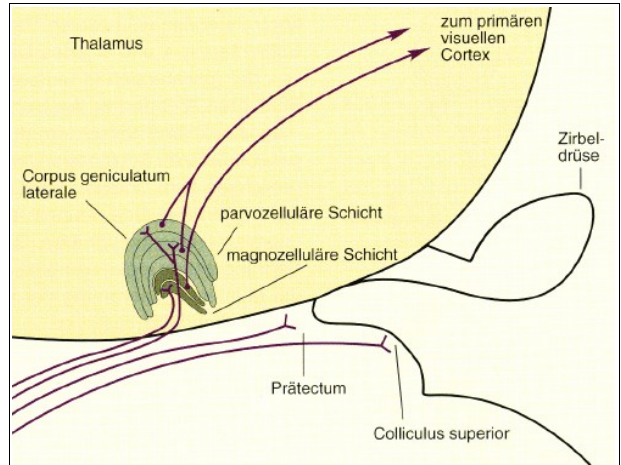
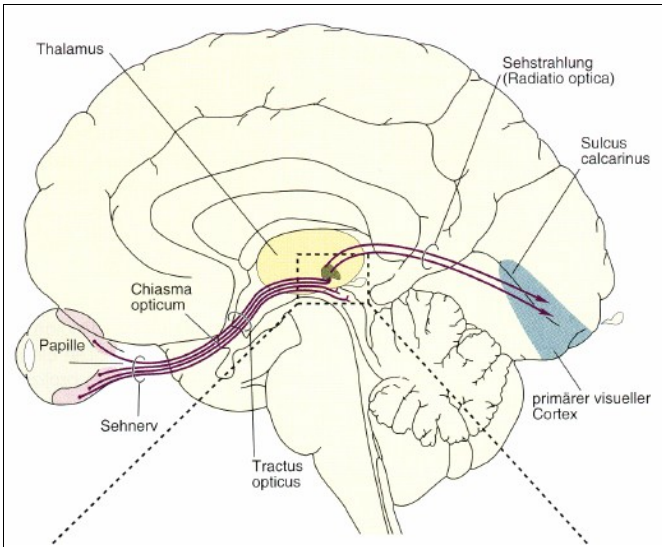


Figure 3.2
Retinotopic mapping of neurons in the LGN. The neurons at A, B, C, and D in layer 6 of the LGN have receptive fields located at positions A', B', C', and D' on the retina. The receptive fields of neurons encountered along an electrode track perpendicular to the surface of the LGN (dashed line) all have approximately the same location on the retina.

- Der CGL besteht aus *sechs je retinotropen Schichten*. Felder, die in der Retina nebeneinander liegen, sind somit auch im CGL nebeneinander angeordnet sind. Die Schichten 1,4 und 6 erhalten kontralaterale Informationen, die Schichten 2,3 und 5 ipsilaterale. Die **magnozellulären Schichten** 1 und 2 gehören der magnozellularen Bahn (Bewegung) an und die **parvozellulären Schichten** 3, 4, 5 und 6 der parvozellulären Bahn (Form und Farbe). Zwischen den parvozellulären und magnozellularen Schichten finden wir schmale **koniozelluläre Schichten** (wahrscheinlich Farbe und Integration von somatosensorischen bzw. propriozeptiven Informationen), in denen die K-Zellen der Netzhaut zur Sehrinde weiterverschaltet werden.

1.29 Was versteht man unter der magno- bzw. parvozellulären Bahn?

- **Parvozelluläre Bahn:** Übermittelt Informationen für *Farbsehen und Musteranalyse*. Kleine Zellkörper der retinalen Ganglienzellen und der zugehörigen Neurone im CGL. Projektion vom Auge via CGL in den primär visuellen Cortex (gehört also zum genikulären Teil der Sehbahn).
- **Magnozelluläre Bahn:** Übermittelt Informationen für *Bewegungssehen*. Große Zellkörper der retinalen Ganglienzellen und der zugehörigen Neurone im CGL. Projektion vom Auge via CGL in den primär visuellen Cortex (gehört also zum genikulären Teil der Sehbahn).
- **Koniozelluläre Bahn:** Übermittelt vermutlich Informationen für Farbsehen und ist womöglich verantwortlich für die Integration von somatosensorischen bzw. propriozeptiven Informationen. Projektion vom Auge via CGL in den primär visuellen Cortex (gehört also zum genikulären Teil der Sehbahn).

1.30 Wie unterscheiden sich die Neuronen der magnozellularen Bahn von denen der parvozellulären Bahn?

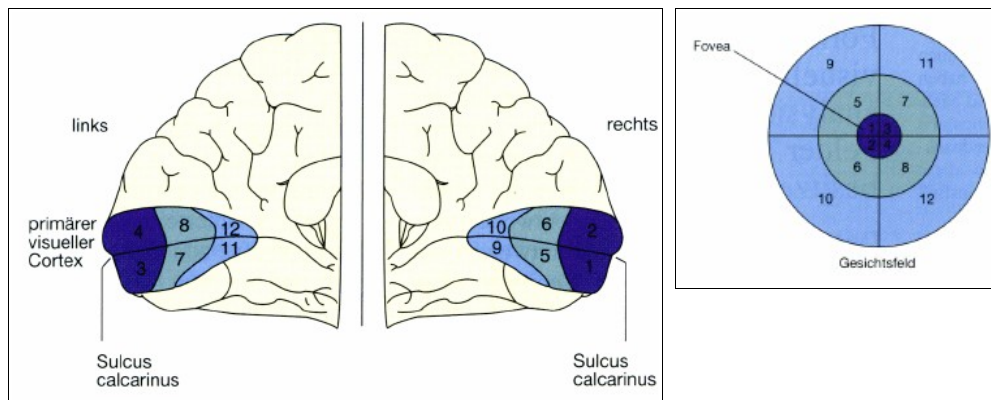
- Wir unterscheiden wir 3 Hauptganglienzellklassen in der Retina:
 1. **magnozelluläre Klasse:** Ganglienzellen mit großen Zellkörpern und großen Dendritenfeldern, auch **M-Zellen** genannt (ca. 10%). Die M-Zellen haben große rezeptive Felder. Sie antworten phasisch auf Leuchtdichteänderungen im rezeptiven Feld und dienen so vor allem dem Bewegungssehen. Fast alle M-Zellen projizieren in den CGL, ein Teil zweigt jedoch nach dem Chiasma opticum ab und führt zu den superioren Colliculi und zur prätektalen Region des Mittelhirns.
 2. **parvozelluläre Klasse:** Ganglienzellen mit kleineren Zellkörpern und kleinen Dendritenfeldern, auch **P-Zellen** genannt (ca. 80%). Die P-Zellen haben kleine rezeptive Felder. Sie antworten eher tonisch auf konstante Lichtreize, sind farbempfindlich und bieten damit eine hohe räumliche Auflösung für die Musteranalyse und die Grundlage für das Farbsehen. Die P-Zellen projizieren alle in den CGL.
 3. **heterogene Klasse:** Ganglienzellen mit kleinen Zellkörpern, aber großen spärlich verzweigten Dendritenfeldern (ca. 10%). Ein Teil davon sind die koniozellulären Zellen, kurz **K-Zellen**. Die K-Zellen sind blaufarbempfindlich und wurden erst kürzlich entdeckt. Ihre Funktion ist noch unklar. Wahrscheinlich sind sie beim Farbsehen beteiligt und bei der Integration von somatosensorischen bzw. propriozeptiven Information. Während die Ganglienzellen der heterogenen Gruppe im Allgemeinen ins Mittelhirn projizieren (nicht-genikulärer Teil der Sehbahn etwa für ‚visuellen Greifreflex‘), laufen die K-Zellen wie oben beschrieben zum CGL. Bei Katzen waren analog bereits entsprechende W-Zellen bekannt.

- **Henry und Reid „The koniocellular pathway in primate vision“:** „A neurochemically distinct population of koniocellular (K) neurons makes up a third functional channel in primate lateral geniculate nucleus. As part of a general pattern, K neurons form robust layers through the full representation of the visual hemifield. Similar in physiology and connectivity to W cells in cat lateral geniculate nucleus, K cells form three pairs of layers in macaques. The middle pair relays input from short-wavelength cones to the cytochrome-oxidase blobs of primary visual cortex (V1), the dorsal-most pair relays low-acuity visual information to layer I of V1, and the ventral-most pair appears closely tied to the function of the superior colliculus. Throughout each K layer are neurons that innervate extrastriate cortex and that are likely to sustain some visual behaviors in the absence of V1. These data show that several pathways exist from retina to V1 that are likely to process different aspects of the visual scene along lines that may remain parallel well into V1.“

- Entsprechend der retinalen Ganglienzellen, verzeichnen wir bei den Neuronen im CGL analoge Eigenschaften:
 1. **M-Schichten:** Die Neurone der M-Schichten (1,2) liegen ventral und haben einen großen Zellkörper. Sie haben größere rezeptive Felder und zeichnen sich durch eine hohe Leitungsgeschwindigkeit aus.
 2. **P-Schichten:** Die Neurone der P-Schichten (3-6) liegen dorsal und haben einen kleinen Zellkörper. Sie haben kleinere rezeptive Felder und zeichnen sich durch eine niedrige Leitungsgeschwindigkeit aus. Zudem verfügen sie über einen stärkeren Zentrum-Umfeld-Antagonismus.
 3. **K-Schichten:** noch relativ wenig bekannt.

1.31 Wie ist das Gesichtsfeld in primären visuellen Cortex (V1) repräsentiert?

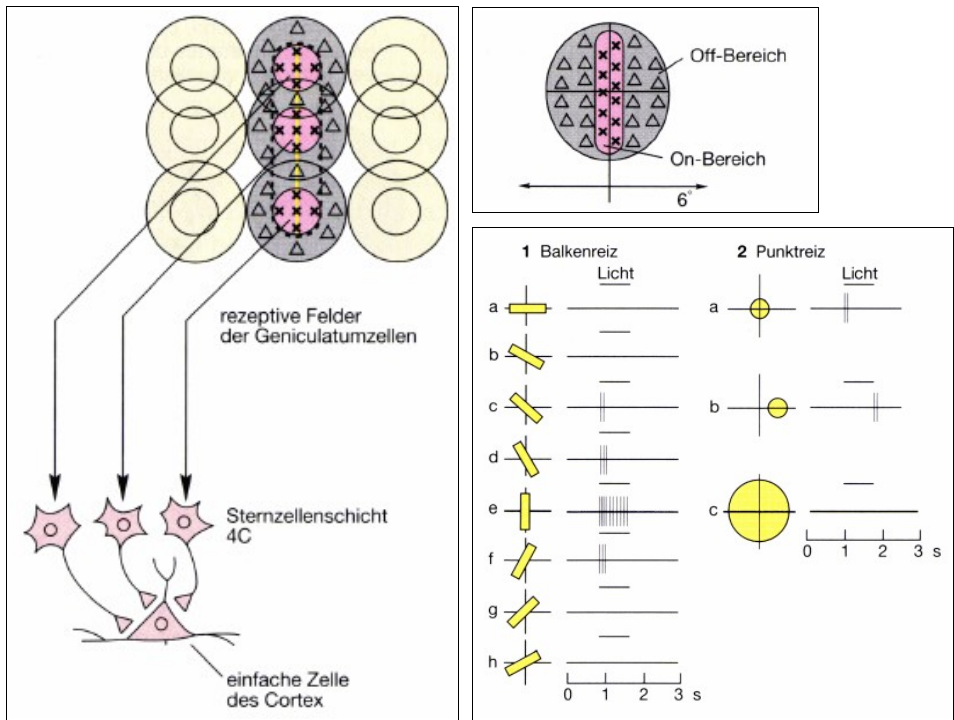
- Das Gesichtsfeld ist im primären visuellen Cortex kontralateral retinotop angeordnet, jedoch ist jetzt innen außen und oben unten. Die Fovea centralis ist bedingt durch ihre höhere Ganglienzellichte und die daraus resultierende große Zahl afferenter Fasern vergrößert repräsentiert (Gleiches gilt auch für den CGL).



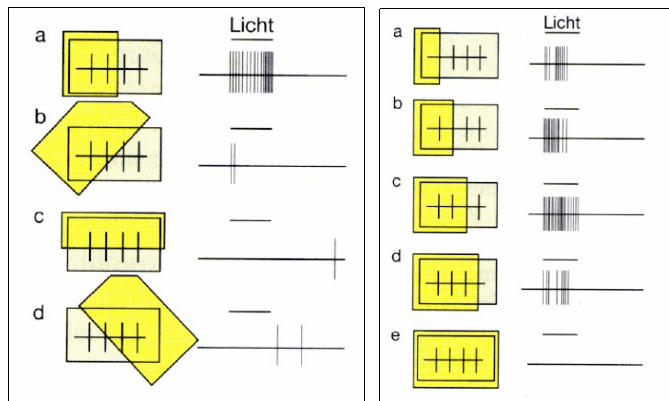
- **Primär visueller Cortex:** Liegt im Okzipitallappen und wird auch V1 oder Area 17 genannt. In einer Dicke von etwa 3 mm liegen sechs Schichten, in denen Signale vom CGL aufgenommen (Schichten 4 und 6), verarbeitet (Schichten 2 und 3) und an andere Hirnareale weitergeleitet werden (Schichten 5 und 6 mit den Pyramidalzellen führen zurück in den CGL oder in die Colliculi superiores bzw. Schichten 3 und 4, die in andere Cortexareale projizieren). Der primär visuelle Cortex wird manchmal auch *striärer Cortex* genannt

1.32 Was ist der Unterschied zwischen einfachen und komplexen Zellen?

- Einfache Zellen** haben kleine rezeptive Felder und sind wegen ihrer getrennten erregenden und hemmenden Subfelder auf die lokale Lokalisation eines Reizes spezialisiert. Sie reagieren am besten auf einen Lichtbalken einer bestimmten Orientierung. Lichtpunkte rufen nur eine schwache Reaktion hervor (für Lichtpunkte optimal erregbare Zellen finden wir nur stellenweise in Schicht 4). Die On/Off-Subfelder liegen jetzt nebeneinander (im Vergleich zur kozentrischen Anordnung bei retinalen Ganglienzellen) und entsprechen der Überlagerung der Subfelder der zugehörigen CGL-Neurone (Hubel und Wiesel, 1992).



- Komplexe Zellen** haben größere rezeptive Felder ohne getrennte Subfelder und sind von der exakten Position des Reizes unabhängig (Orstinvarianz). Sie haben aber auch eine kritische Achse, d.h. auch sie reagieren optimal auf Lichtbalken einer bestimmten Orientierung und Bewegungsrichtung. **Beispiel:** Die komplexe Zelle reagiert am besten auf einen vertikalen Balken, der sich von links nach rechts über das Gesichtsfeld bewegt.



- **Hyperkomplexe Zellen** zeigen *Endhemmung* und können sonst Eigenschaften der einfachen oder komplexen Zellen haben. Sie reagieren im Sinne der Endhemmung optimale bei Lichtbalken einer bestimmten Länge.

1.33 Erläutern Sie die Begriffe ‚Orientierungs-Tuningkurve‘ und ‚Merkmalsdetektoren‘!

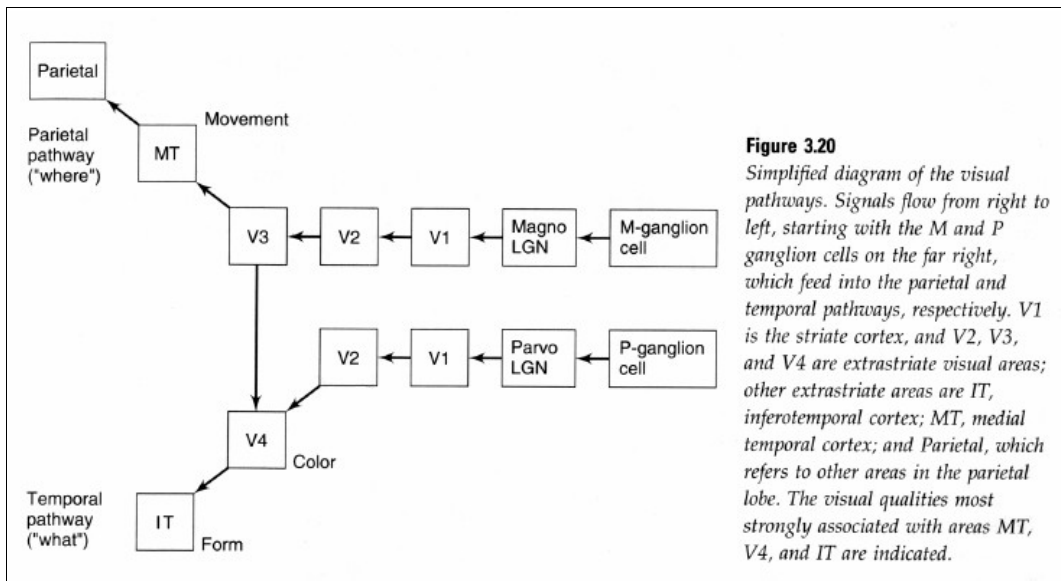
- **Orientierungs-Tuningkurve** = Die Feuerrate einer richtungssensitiven Zelle ist abhängig von der Orientierung des Reizes. Maximale Reaktion bei bevorzugter Orientierung, d.h. Stimulus in Ausrichtung der kritischen Achse.
- **Merkmalsdetektoren** = Neurone, die nur bzw. optimal auf bestimmte Merkmale wie Orientierung, Bewegungsrichtung oder Länge eines Reizes reagieren.

1.34 Wie wird die Tuningkurve einer Zelle gemessen?

- Die Tuningkurve eines Neurons (des primär visuellen Cortex) ergibt sich aus der Messung der Reizantworten der Zelle etwa durch Einzelzelleableitung auf differente Stimuli. Die Orientierungstuningkurve einer einfachen Zelle des primär visuellen Cortex zum Beispiel erhält man, wenn man die Reizantwort der Zelle bei Lichtbalken mit unterschiedlicher Orientierung ableitet. Dabei zeigt sich, dass die Zelle maximal reagiert, wenn der Reiz exakt die gleiche Ausrichtung hat wie das rezeptive Feld dieser Zelle.

1.35 Schildern Sie kurz, welche spezifischen Wahrnehmungsausfälle Personen mit Läsionen auf der ‚Was‘ bzw. ‚Wo‘-Bahn aufweisen können und begründen Sie dies kurz?

- **Wo-Bahn** = Von der mangelzellulären Bahn induzierter Pfad vom primär visuellen Cortex über den mediotemporalen Cortex (V5) in den parietalen Cortex zu den präzentralen motorischen Arealen > „*Aktion*“
 - **Bewegungsagnosie**: Kein Bewegungssehen bei Läsionen in
- **Was-Bahn** = Primär von der parvozellulären Bahn induzierter Pfad vom primär visuellen Cortex über V4 zum inferiotemporalen Cortex, zu den frontobasalen Gedächtnisstrukturen und bewußter Wahrnehmung > „*Perzeption*“
 - **Farbagnosie**: kein Farbsehen bei Läsionen in V4
- Spezialfall Prosopagnosie: kein Gesichterkennen Bei bilateralen, medial gelegenen okzipitotemporalen Läsionen



1.36 Was besagen die spezifischen Wahrnehmungsausfälle über die Organisation des Gehirns?

- Die spezifischen Ausfälle demonstrieren das Prinzip der parallelen Verarbeitung von Farbe/Muster und Bewegung im visuellen System. Darüber deuten die Ausfälle darauf hin, daß die jeweiligen Wahrnehmungsfunktionen im Gehirn speziell lokalisiert sind, d.h. verschiedene Merkmale werden an verschiedenen Teilen des Gehirns verarbeitet. Der primär visuelle Cortex (V1) erweist sich dabei als Flaschenhals, d.h. eine Läsion von V1 führt nicht zu hochspezifischen Funktionsausfällen, sondern zu einer *kortikalen Erblindung* aller Funktionen bewußter visueller Wahrnehmung.