

Kapitel 05.06: Das Linsenauge der Wirbeltiere



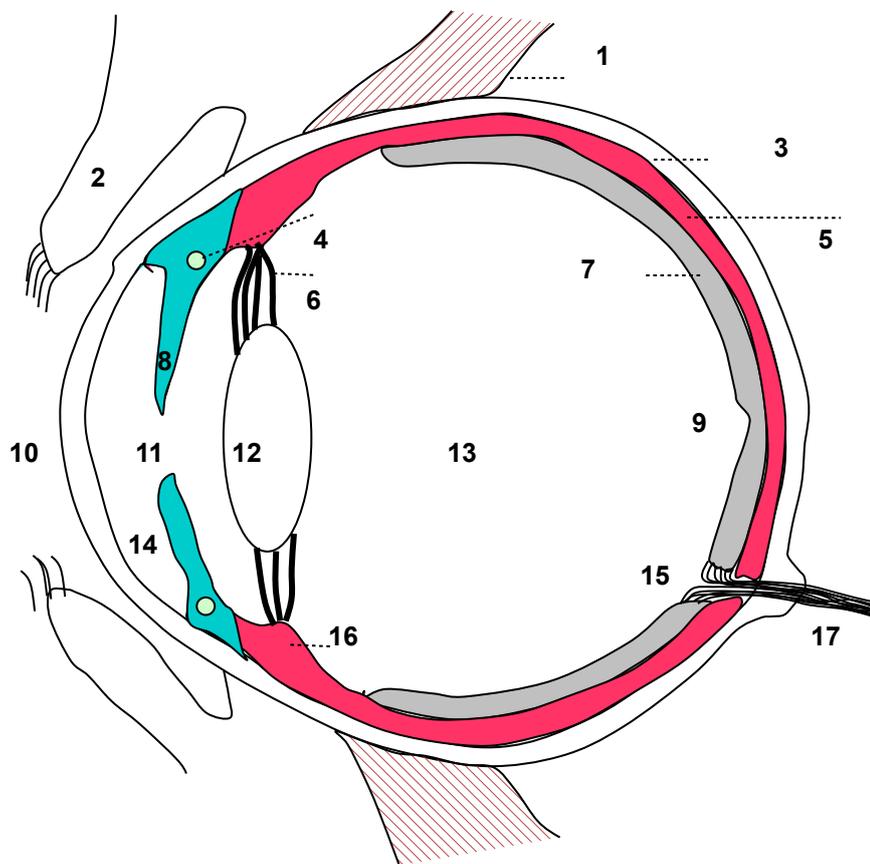
Inhalt

| | |
|---|----|
| Kapitel 05.06: Das Linsenauge der Wirbeltiere..... | 1 |
| Inhalt..... | 2 |
| Aufbau des Auges..... | 3 |
| Beschriftung des Auges mit Funktion:..... | 4 |
| Funktionsweise des Auges in Stichworten..... | 5 |
| Schutzeinrichtungen des Auges..... | 6 |
| Sehfähigkeit bei Tieren:..... | 6 |
| Das Auge..... | 7 |
| Sezieren eines Schweine- oder Rinderauges..... | 9 |
| Folgende Strukturen des Auges sind gut erkennbar:..... | 9 |
| Sezieren eines Schweineauges:..... | 10 |
| Der Weg des Kammerwassers..... | 13 |
| Funktionen des Kammerwassers..... | 13 |
| Die Pupille..... | 14 |
| Die Netzhaut..... | 15 |
| Der Aufbau der Netzhaut: Die Lichtsinneszellen der Wirbeltiere..... | 16 |
| Die Netzhaut besteht aus vier Zellschichten:..... | 16 |
| Stäbchen..... | 16 |
| Oberstufe: Die Funktionsweise des Rhodopsins..... | 18 |
| Farbsehen: Die Absorptionsmaxima der menschlichen Sehzellen..... | 19 |
| Farbsehen beim Mensch:..... | 19 |
| Wie sieht man andere als die drei Grundfarben?..... | 20 |
| Der elektrochemische Sehvorgang :..... | 20 |
| Farbsehen bei anderen Wirbeltieren:..... | 20 |
| Verknüpfung der Sehzellen in der Netzhaut..... | 21 |
| Stäbchen (grün) und ein Zapfen (gelb) Verschaltung der Sehzellen..... | 21 |
| Grundlagen der Akkomodation:..... | 22 |
| Anpassung der Linse..... | 23 |
| Akkomodation der Linse..... | 24 |
| Fehlsichtigkeit..... | 26 |
| Nah- und Fernakkomodation..... | 27 |
| Das Auge bei Fehlsichtigkeit..... | 28 |
| a) Kurzsichtigkeit..... | 28 |
| b) Weitsichtigkeit..... | 28 |
| Augenkrankheiten..... | 29 |
| Was sind elektromagnetische Wellen?..... | 30 |
| Die Sinusschwingung:..... | 30 |
| Beispiele für die Umrechnung von Wellenlänge in Frequenz..... | 30 |
| Der Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge..... | 30 |
| Wellenlängen und Licht..... | 31 |
| Eine Besonderheit der Evolution - auch Tintenfische haben ein Linsenauge..... | 32 |
| Insekten haben Facettenaugen (Komplexaugen)..... | 33 |
| Wiederholungsfragen zum Thema Auge..... | 34 |

Aufbau des Auges

Sinn: Welche Strukturen müssen im Auge vorhanden sein?

1. Bei einer Kamera müsste die Linse zum Fokussieren scharf gestellt werden, indem sie auf der optischen Achse bewegt wird. Beim Auge wird die Brechkraft der Linse (Brennweitenänderung) geändert.¹
2. Blende regelt bei Kamera das einfallende Licht - Auge?
Pupille (Öffnung in der Iris), durch die das Licht in das Auge eintritt. Kontrahieren die glatten Ziliarmuskeln, verengt sich die Pupille (=Pupillenreflex)
3. Linse fokussiert das durch Pupille eintretende Licht. Vergleich mit Kamera. Pupillenreflex erklären



¹ Die Linse ist an Zonulafasern aufgehängt (seitlich) diese ziehen immer etwas, was zum Abflachen der Linse führt. Soll auf ein nahes Objekt fokussiert werden, so kontrahieren die Muskelfasern des Cillarkörpers und die Zonulafasern werden vom Außenrand auf die Linse zu gezogen, das bedeutet ein Nachlassen des Zugs. => Die Linse kugelt sich etwas ab => Brennweitenverkürzung.

Hauptbrechungsanteil entfällt auf Lichtdurchtritt von Luft auf Hornhaut

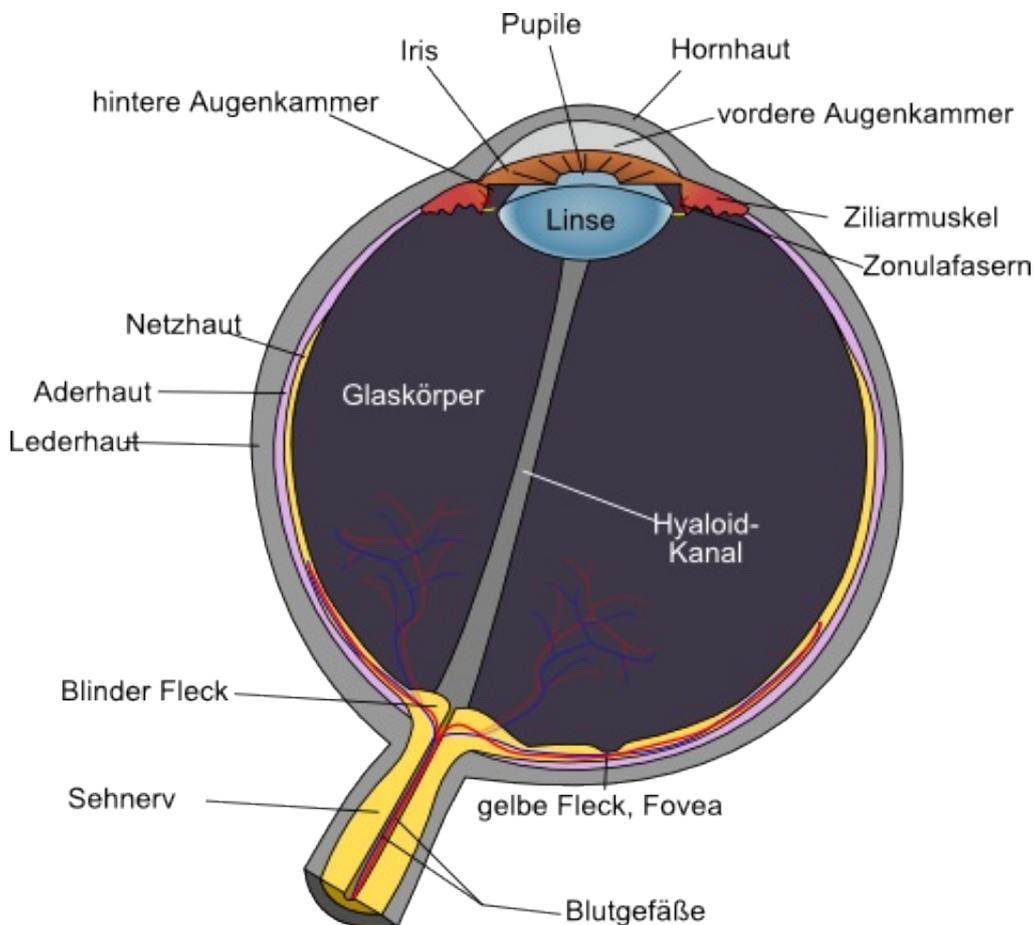
Beschriftung des Auges mit Funktion:

| Beschriftung | Funktion |
|--|---|
| 1. Sehne des Musculus rectus | Bewegung des Auges |
| 2. Augenlid mit Wimpern | Schutz, Reinigung |
| 3. Lederhaut | Mechanischer Schutz |
| 4. Schlemm'sche Kanal | Versorgung mit Flüssigkeit |
| 5. Aderhaut | Versorgung des Auges, Pigmentierung |
| 6. Zonulafasern, Linsenbänder | Regulation der Linsenkrümmung |
| 7. Netzhaut (=Retina) | Reizaufnahme (Sehsinneszellen, Nervenzellen) |
| 8. Regenbogenhaut (=Iris) | Pupillenweite, Regulation des Lichteinfalls |
| 9. Sehgrube, gelber Fleck, Fovea centralis | Stelle schärfsten Sehens, fast nur Zapfensehen! |
| 10. Hornhaut | Lichtbrechung, Schutz |
| 11. Pupille | Regulation des Lichteinfalls |
| 12. Linse | Lichtbrechung, Scharfeinstellung |
| 13. Glaskörper | Augeninnendruck, Lichtbrechung |
| 14. Vordere und hintere Augenkammer | Kammerwasser trägt zur Lichtbrechung bei |
| 15. Blinder Fleck | Austrittsstelle des Sehnervs |
| 16. Ziliarmuskel | Regulation der Linsenkrümmung |
| 17. Sehnerv | Erregungsleitung vom Auge zum Gehirn |

Zusatzinformationen

Gute Übersicht: <http://de.wikipedia.org/wiki/Kategorie:Auge>

<http://de.wikipedia.org/wiki/Linsenauge>



Quelle Bild: public domain - Wikipediauser Rhcastilhos - thank you
http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Schematic_diagram_of_the_human_eye_en.svg

Funktionsweise des Auges in Stichworten

- Die Linse des Auges ist eine Sammellinse
 - Das Bild wird von der Netzhaut aufgenommen und in Nervenimpulse umgewandelt.
 - In der Netzhaut liegen die Sehzellen. Zapfen / Stäbchen. Die Stäbchen sind etwa 10000mal lichtempfindlicher als die Zapfen. Am dichtesten liegen die Zapfen in der Sehgrube, die inmitten des gelben Flecks liegt. Der gelbe Fleck ist daher als Ort der besten Auflösung (und Farbunterscheidung) die Zone der größten Sehschärfe. In der menschlichen Netzhaut liegen etwa 125Mio. Sehzellen, dabei etwa 20mal mehr Stäbchen als Zapfen.
 - Die Netzhaut nimmt das Bild auf und wandelt es in Nervenimpulse um, die über den Sehnerv zum Gehirn gelangen. Dazu befinden sich in der Netzhaut zwei verschiedene Typen von Sehzellen: Zapfen und Stäbchen.
 - Die Stäbchen sind etwa 10000mal lichtempfindlicher als die Zapfen. Mit ihrer Hilfe kann man auch bei Dunkelheit noch schwache Lichtsignale erkennen (allerdings nur in schwarz-weiß).
 - Die Zapfen sind für das Farbsehen verantwortlich. Es gibt drei verschiedene Typen (Blaurezeptor (Absorptionsmaximum bei ca. ca. 430 nm), Grünrezeptor (max. bei ca. 530 nm), Rotrezeptor (max. bei ca. 560 nm)), so dass Lichtimpulse aller Farben aufgenommen werden können. Die Zapfen befinden sich vor allem in der Sehgrube, die inmitten des gelben Flecks liegt. Diese Region ist somit die Stelle der besten Auflösung, Farbunterscheidung und Sehschärfe.
 - In der menschlichen Netzhaut sind ca. 125 Mio. Sehzellen vorhanden,
 - Das Verhältnis von Stäbchen : Zapfen ist ca. 20 :1
-
- Die Fovea centralis ist ein Bereich im „Gelben Fleck“ (lat. Macula lutea) des Auges. Sie die Stelle des schärfsten Sehens im Auge. Dies wird durch eine hohe Anzahl an Zapfen erreicht. Der ca. im Durchmesser 5mm große gelbe Fleck befindet sich in der Mitte der Netzhaut.
 - Damit alle Bereiche unseres Gesichtsfeldes scharf gesehen werden, werden durch die ständige Augenbewegung immer alle Bereiche der Umgebung „scharf“ abgetastet und im Gehirn dann zu einem insgesamt scharfen Gesamtbild zusammengesetzt.
-
- Der Rest der Netzhaut enthält wesentlich mehr Stäbchen. Deren Anzahl nimmt zum Rande der Netzhaut deutlich zu.
 - Das menschliche Auge sieht vor allem Dinge, die in Bewegung sind.
 - Menschen hingegen habe die Fähigkeit, die Umgebung, vor allem wenn viele Menschen da sind, zu überprüfen und zu erfassen.

Das vor dem Auge sichtbare Bild wird über die Linse auf die Netzhaut projiziert. Dort wird es in Nervenimpulse umgewandelt. Diese Aufgabe übernehmen die in der Netzhaut liegenden Sehzellen.

Insgesamt verfügt ein Mensch pro Auge über ca. 125Mio. Sehzellen. Dabei kann man unterscheiden zwischen Stäbchen als Zapfen. Von den Zapfen gibt es drei verschiedene Typen (für blaues, grünes und rotes Licht).

Die Stäbchen sind wesentlich lichtempfindlicher (ca. 10000mal) als die Zapfen. Mit ihrer Hilfe kann man auch bei Dunkelheit noch schwache Lichtsignale erkennen (allerdings nur in schwarz-weiß). Die Anzahl der Stäbchen nimmt zum Rande der Netzhaut deutlich zu.

Die Zapfen können hingegen Farben unterscheiden. Sie sind für unser Sehen wesentlich wichtiger. Die Zapfen sind nicht gleichmäßig über die Netzhaut verteilt. Die größte Dichte liegt in der 5mm großen Sehgrube (=Fovea centralis) vor. Folglich ist die Sehgrube der Ort der besten Auflösung und der größten Sehschärfe.

Damit alle Bereiche unseres Gesichtsfeldes scharf gesehen werden und nicht nur die direkt vor uns liegenden Dinge, bewegen sich die Augen permanent! So wird durch diese ständige Augenbewegung die Umgebung abgetastet und im Gehirn dann zu einem insgesamt scharfen Gesamtbild zusammengesetzt.

Zusatzinformationen:

<http://de.wikipedia.org/wiki/Auge>

http://de.wikipedia.org/wiki/Gelber_Fleck_%28Auge%29

http://de.wikipedia.org/wiki/Stäbchen_%28Auge%29

http://de.wikipedia.org/wiki/Zapfen_%28Auge%29

Schutzeinrichtungen des Auges

- **Hinteraugenfett** und knöcherner **Augenhöhle** bilden einen mechanischen Schutz
- Die **Augenlider** schützen vor grellem Licht, Windstößen u.ä.
Sie reinigen das Auge („Scheibenwischer“)
- Die **Tränendrüsen** tragen zur Reinigung bei
- Die **Wimpern** bewirken bei Berührung den Lidschlussreflex
- **Augenbrauen** halten Schweiß ab

Aufgaben zum Thema Auge:

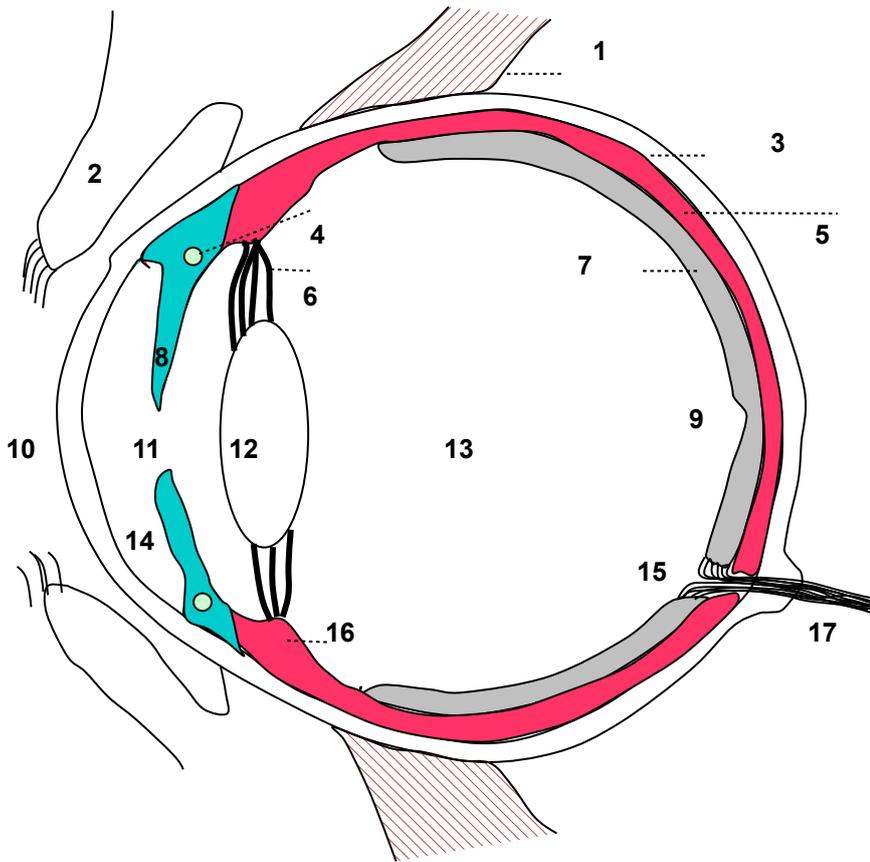
1. Beschreibe die Funktion des Ziliarmuskels.
2. Erkläre die Funktion des Schlemm'schen Kanals.
3. Wie wird die Linsenbrechkraft verändert?
4. Nenne Position, Aufgabe und Unterschiede von blindem Fleck und Sehgrube.
5. Welche Aufgaben haben die vordere und die hintere Augenkammer?
6. Welche Aufgabe hat die Aderhaut?
7. Welche Aufgabe hat die Pupille?
8. Im Alter lässt die Kraft des Ziliarmuskels nach, weiterhin erschlaffen die Zonulafasern. Nenne Folgen.

Sehfähigkeit bei Tieren:

- Heuschreckenkrebs hat Augen, die 12 Grundfarben statt wie (beim Menschen 3) sehen (12 Zapfentypen)
- Chameleon kann die Augen unabhängig bewegen
- Raubtiere wie der Adler sehen scharfer. Er kann Beute aus 6km Entfernung sehen
- Adler sehen alles 7 mal größer und das Auge ist 5mal lichtempfindlicher.

Das Auge

1. Beschrifte folgende Skizze (falls Du nicht alles beschriften kannst, nimm Dein Heft zur Hilfe)



- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.
- 6.
- 7.
- 8.
- 9.
- 10.
- 11.
- 12.
- 13.
- 14.
- 15.
- 16.
- 17.

2. Vervollständige:

Das Bild wird von der aufgenommen und in Nervenimpulse umgewandelt. In der Netzhaut liegen die Sehzellen und Die Stäbchen sind etwa 10000mal lichtempfindlicher als die Zapfen. Am dichtesten liegen die Zapfen in der 5mm großen (=Fovea centralis). Sie ist daher als Ort der besten Auflösung die Zone der größten In der menschlichen Netzhaut liegen etwa 125Mio. Sehzellen, dabei etwa 20mal mehr als

Die Stäbchen sind etwa 10000mal als die Zapfen. Mit ihrer Hilfe kann man auch bei noch schwache Lichtsignale erkennen (allerdings nur in schwarz-weiß).

Die Zapfen sind für das verantwortlich. Es gibt drei verschiedene Typen (für blaues, grünes und rotes Licht), so dass Lichtimpulse aller Farben aufgenommen werden können. Die Zapfen befinden sich vor allem in der Sehgrube, die inmitten des gelben Flecks liegt. Diese Region ist somit die Stelle der besten Auflösung, Farbunterscheidung und Sehschärfe.

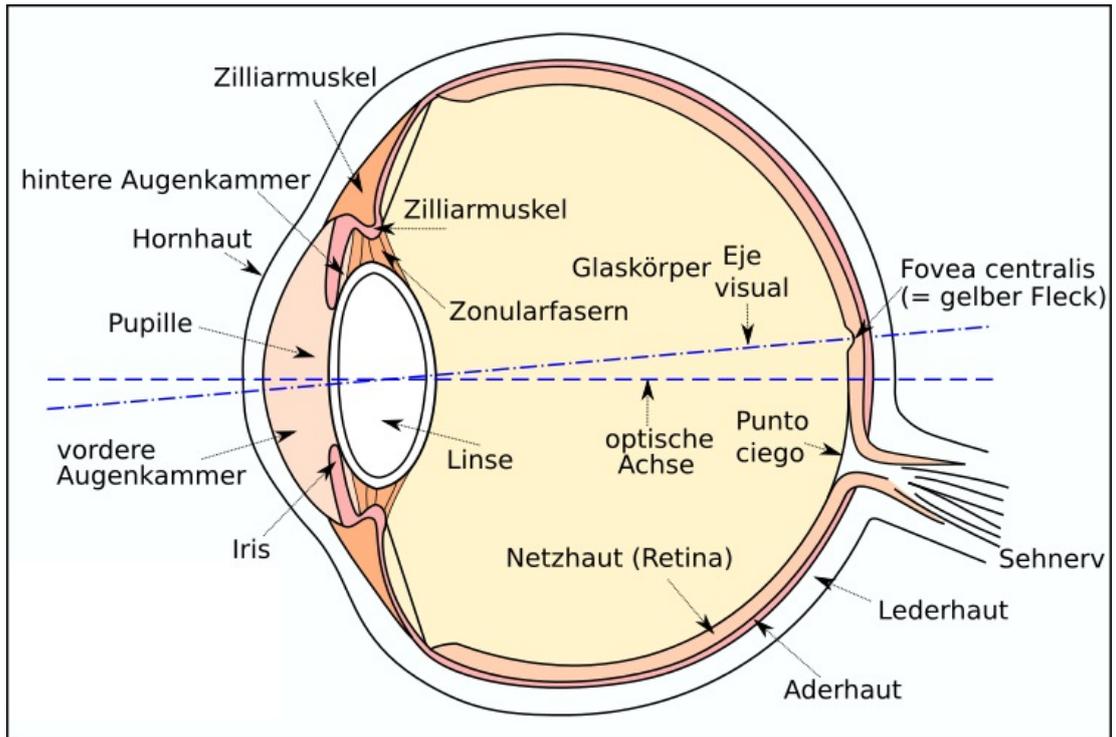
Damit alle Bereiche unseres Gesichtsfeldes scharf gesehen werden, werden durch die ständige immer alle Bereiche der Umgebung „scharf“ abgetastet und im Gehirn dann zu einem insgesamt scharfen Gesamtbild zusammengesetzt.

Der Rest der Netzhaut enthält wesentlich mehr Stäbchen. Deren Anzahl nimmt zum Rande der Netzhaut deutlich zu.

3. Nenne zu jedem der aufgeführten Stichpunkte die entsprechende Aufgabe:

Ziliarmuskel, Schlemm'sche Kanal, blinder Fleck, Sehgrube, vordere und die hintere Augenkammer, Aderhaut, Pupille

4. Beschreibe, wie die Linsenbrechkraft verändert wird.



Quelle Bild: public domain - Wikipediauser Sathiyam2k - thank you <http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:EyeSection-es.svg>

Sezieren eines Schweine- oder Rinderauges

Durchführung:

Es liegen 2 frische Schweineaugen vor. Eines der Augen ist tiefgefroren, das andere Auge wurde in Wasser aufbewahrt, um Turgorverlust zu vermeiden.

Das **tiefgefrorene Auge** wird mit einer feinen (Eisen)-Säge zerlegt (Schnitt durch die Linse) und zur Hälfte bis zum Unterrichtseinsatz wieder in das Gefrierfach gelegt. Im Unterricht kann nun die aufgetaute und die gefrorene Hälfte gezeigt werden, indem beide mit der Schnittfläche nach unten in eine Petrischale gelegt werden. Im Vergleich dieser beiden Hälften, aufgetaut und gefroren, lassen sich Strukturen unterschiedlich gut erkennen. Durch das Glas können nun die Anordnung und die Maße des dioptrischen Apparates (**Hornhaut, Augenkammern, Linse, Ziliarkörper**), sowie die **Iris** demonstriert werden.

Das **ungefrorene Auge** wird in eine vordere und eine hintere Hälfte aufgeschnitten. Die vordere Hälfte wird auf die Hornhaut gelegt. Bei guter Beleuchtung ist die eindrucksvolle **Durchsichtigkeit des Glaskörpers** gut zu erkennen. Die Linse ist noch mit dem Ziliarkörper verbunden und kann jetzt freipräpariert werden. Der Vergrößerungseffekt der Linse ist jedoch auch zu sehen, wenn sie auf ein Stück Zeitungspapier gelegt wird; die Buchstaben erscheinen dann deutlich vergrößert. Hebt man die Augenhälfte hoch und beleuchtet vom Auginneren her nicht zu hell, so sieht man von unten her deutlich die **Pupillenöffnung** und von der Seite die vor gewölbte **Hornhaut**, bzw. die zwischen **Hornhaut** und **Iris** eingeschlossene vordere **Augenkammer**.

Folgende Strukturen des Auges sind gut erkennbar:

| Längsschnitt durch die Linse | Querschnitt |
|---|---|
| Hornhaut Augenkammern Linse Ziliarkörper Iris | Ansatz der Augenmuskel Sehnerv <u>auf der Hornhaut liegend:</u> Glaskörper Linse (Vergrößerungseffekt) Pupille (bei Gegenlicht von hinten) Hornhaut, Augenkammer Pigmentschicht |

Sezieren eines Schweineauges:

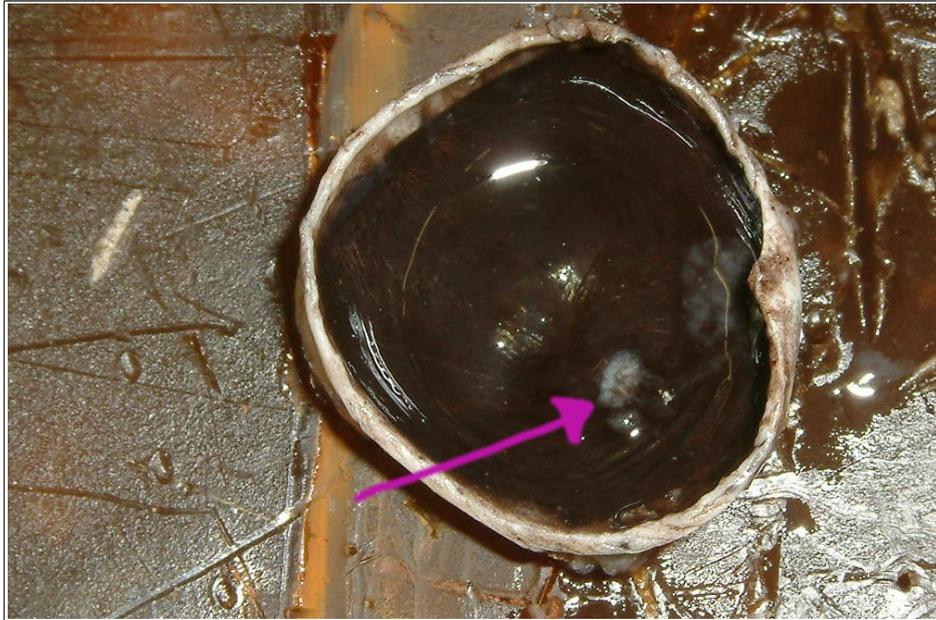
Das Auge vor dem ersten Schnitt. Erkennbar sind außen die Starke Augenmuskeln



Nach dem Freilegen der Linse erkennt man gut die Zonulafasern rund um die Linse:



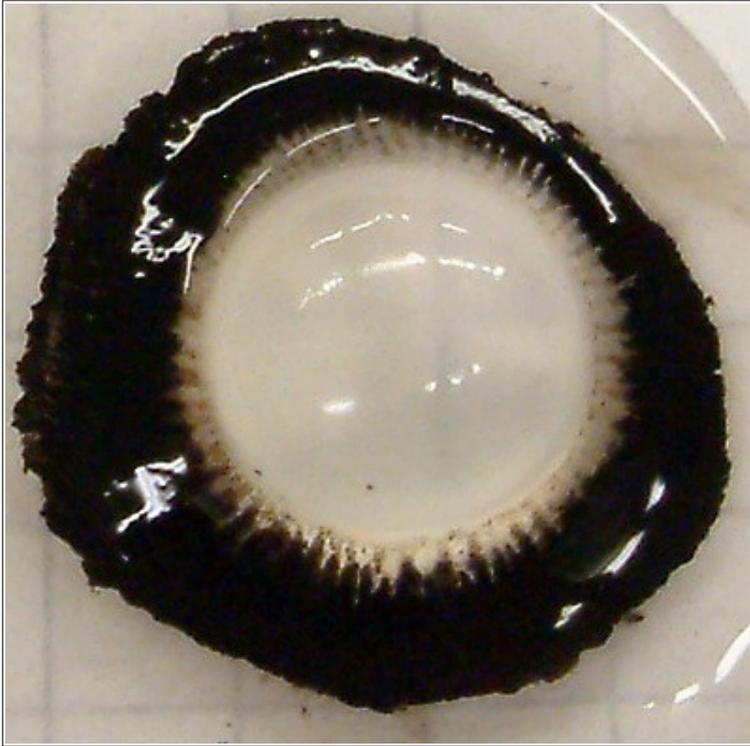
Auf der Rückseite ist der blinde Fleck gut erkennbar:



Die freipräparierte Linse hat eine hohe Brechkraft. Das Bild wird wie bei einer Lupe vergrößert:



Linse und Zonulafasern:



Der Weg des Kammerwassers

Das Kammerwasser ist ein wichtiger Bestandteil des Auges. Es erfüllt wichtige Funktionen. Es besteht aus flüssigen Blutbestandteilen. Damit es nicht verunreinigt wird, ist das Augengewebe (Vergleichbar mit der Blut-Hirn-Schranke) mit einer Zellschicht, der Blut-Kammerwasser-Schranke, geschützt.

Das Kammerwasser wird an den Ziliarfortsätze produziert und fließt dann von der hinteren Augenkammer zwischen Iris und Linse hindurch zur vorderen Augenkammer. Der Weitertransport führt von der Kammerbucht und Kammerwinkel zum Schlemm'schen Kanal, der es aus dem Auge hinaus transportiert und letztlich in die Venen abgibt.

Funktionen des Kammerwassers

- Verstärkung der Lichtbrechung
- Versorgt Hornhaut und Linse mit Nährstoffen
- Aufrechterhaltung des (hydrostatischen) Augeninnendrucks.

Außerdem befinden sich im Kammerwasser gelöste Immunabwehrstoffe (Cytokine), so dass das Kammerwasser eine antibakterielle Wirkung hat.

Liegen Störungen der Kammerwasserfunktion vor, kommt es zu Augenkrankheiten:

- Grüner Star: der Kammerwasserstoffwechsel ist gestört, dadurch steigt der Augeninnendruck, was zu einer Glaukombildung führen kann (Grüner Star).
- Ein Druckabfall bedingt durch zu wenig Kammerwasser (z.B. nach einem Unfall) kann zur Aderhautablösung führen.
- Mangelnde Cytokinproduktion für das Kammerwasser führt zu steigenden Infektionen am Auge.

Zusatzinformation:

<http://de.wikipedia.org/wiki/Kammerwasser>

Die Pupille

Die Pupille ist die Öffnung, welche den Lichteinfall in das Linsenauge steuert.

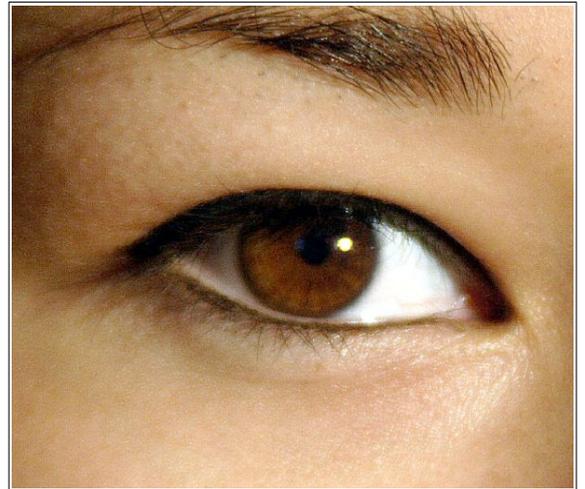
V: Schau einmal ins Dunkle und dann schnell in eine helle Lampe - währenddessen beobachtet ein Mitschüler Deine Pupille.

B: Bei starkem Licht ist die Pupille eng, bei wenig Licht ist sie weit geöffnet.

S: Helle Licht:

Zu helles Licht würde die Sinneszellen im Auge überlasten - das Auge passt sich durch eine Verengung der Pupille an, denn so fällt weniger Licht ins Auge - die Lichtsinneszellen werden nicht überlastet.

Eine enge Pupille ermöglicht übrigens ein schärferes Sehen.



Dunkles Licht:

Damit in der Dunkelheit überhaupt etwas von den Lichtsinneszellen wahrgenommen wird, müssen besonders viele Restlichtstrahlen in das Auge gelangen, dazu wird die Pupille weit geöffnet.



Aufgaben:

1. Vergleiche die Blende einer Spiegelreflexkamera mit der Pupille.

Zusatzinformationen:

<http://de.wikipedia.org/wiki/Pupille>

Die Netzhaut

An die Tafel werden geometrische Figuren verschiedener Farben geklebt. Diese sollen vom Schüler im abgedunkelten Raum unterschieden werden.

Bei Dunkelheit, z.B. bei einer Wanderung bei Mondschein kann man, wenn man vorher noch im Hellen war zuerst gar nichts erkennen und dann nach ca. 10 min. immer mehr sehen. Man sieht dann zwar viele Strukturen, aber nicht mehr die Farben der Gegenstände. Der Volksmund sagt sogar:

„Nachts sind alle Katzen grau“

Warum ist das so? Sehen wir denn nicht immer gleich gut?

Informationen zur Netzhaut:

Dicke der Netzhaut: 0,4mm

Dichte der Stäbchen: Mensch 400 000/ mm², Eule: 1 000 000/mm²

3-6 Mio. Zapfen => **Farbsehen**, geringe Lichtempfindlichkeit

125 Mio. Stäbchen => **Schwarz-weiß-sehen**, lichtempfindlich

=> Die Netzhaut erlaubt von ihrem Aufbau, dass Farben nur bei stärkerem Lichteinfall unterschieden werden können. Dazu sind v.a. in der Sehgrube die Zapfen verantwortlich.

Bei Schwachlicht (z.B. bei Wanderungen im Mondschein) können zwar Form und Größe, nicht jedoch die Farbe wahrgenommen werden. Dies ermöglichen die Stäbchen, welche Lichtempfindlich sind, allerdings nur S/W Sehen erlauben.

=> Die Netzhaut der Säugetiere ist invers². In ihr sind die Sehzellen durch Nerven stark miteinander vernetzt (=Neuronennetz). Die Austrittsstelle des Sehnervs ist der blinde Fleck

² (Evers bei Tintenfischen, da es sich um eine Ausstülpung des Zwischenhirns handelt)

Der Aufbau der Netzhaut: Die Lichtsinneszellen der Wirbeltiere

In der Netzhaut des Menschen findet man ca. 6 Millionen Zapfen und 120 Millionen Stäbchen. Sie sind zusammen für das Sehen des Menschen verantwortlich und werden auch als Sinneszellen des Auges bezeichnet. In Stäbchen und Zapfen findet man die üblichen Organellen (Zellkern, Mitochondrien usw). An ihrer Unterseite ist ein axonähnlicher Fortsatz, mit dem die Informationen der Lichtsignale weitergeleitet werden.

An der synaptische Endigung dieser Fortsätze liegt eine Verschaltung (über Synapsen) mit Bipolarzellen und Horizontalzellen statt.

Die Netzhaut besteht aus vier Zellschichten:

| Schichten (v. außen nach innen) | Aufgabe | Besonderheit |
|--|--|---|
| Pigmentschicht | Lichtundurchlässige Schicht, Schutz vor Reflektionen | durchlässig für Nährstoffe der Aderhaut |
| Schicht der Sehzellen | Das Bild der Umwelt wird hier in Einzelpunkte übersetzt (Raster) | enthält Stäbchen und Zapfen ³ |
| Bipolarzellen (=zwei-armige NZ) | Verschaltung von Sehzelle und NZ | In der Sehgrube liegt eine Verschaltung von 1:1 vor |
| Ganglienzellen | Fortleitung zum Gehirn | Austritt = Blinder Fleck |

Es liegt auch eine Querverschaltung vor => erste Informationsverarbeitung

- 120 Millionen Stäbchen und 6 Millionen Zapfen.
- Zapfen sind in der Regel (indirekt) mit einer Ganglienzelle verbunden 1:1 (=> weniger lichtempfindlich),
- Stäbchen sind 1000fach lichtempfindlicher⁴ und im Mittel 1:130 (Tiger 1.2500) mit GZ verschaltet
- Eine Bogenminute entspricht 0,0046 mm

Stäbchen

Das Außensegment der Stäbchen besteht aus ca. 1000 übereinander liegenden Scheiben (=discs), welche durch Einfaltungen und Abschnürungen der Zellmembran entstehen und durch eine weitere Membran ummantelt sind.

Dieser Stapel wird von der Oberflächenmembran der Zelle völlig umhüllt

In der Membran der Discs sind die Sehpurpormoleküle (wie das Rhodopsin) über Proteine in die Membran eingelagert. Sie sind für die eigentliche Umwandlung von Licht in elektrische Signale verantwortlich. Vereinfacht kann man sagen, dass das purpurne Rhodopsin durch Licht entfärbt wird und so elektrischen Strom freisetzt. Bei Dunkelheit wird es dann wieder regeneriert.

³ Hinweis: (Dämmerungs)-Tiere (Eule, Igel, Tiger) haben bes. viele Stäbchen

⁴ wird auch nur ein Stäbchen gereizt, werden gleich mehrere GZ inerviert => Verstärkungseffekt

Verteilung der Sehzellen:

Wie sind eigentlich nun die 120 Millionen Stäbchen und 6 Millionen Zapfen in der Netzhaut verteilt?

V1: Farbstifte werden vom Ohr her um den Kopf zum Gesichtsmittelpunkt geführt. Die Farbe soll so schnell wie möglich bestimmt werden, ohne dabei den Stift anzuschauen!

=> **Der Stift wird gesehen, Farbbestimmung ist jedoch noch nicht möglich.**

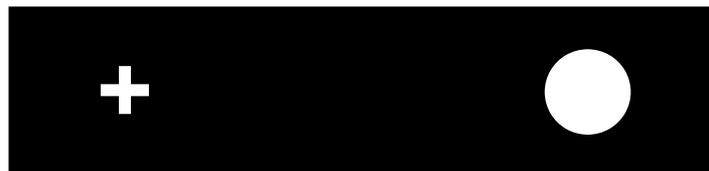
=> **in den äußeren Bereichen des Augapfels befinden sich viele Stäbchen und wenig Zapfen**

V2: helle Punkte bei Schwachlicht fixieren (verschwinden)

Symptom: entfernte Sterne beobachten, wenn man direkt hinschaut, sind sie nicht mehr zu sehen

=> **in der Sehgrube befinden sich vor allem Zapfen und wenig Stäbchen**

V3: Versuch zum blinden Fleck:



Oberstufe: Die Funktionsweise des Rhodopsins

Die Farbstoffmoleküle des Rhodopsins reichen durch die Membran des Discs hindurch. Sie sind gebunden an ein Farbprotein (=Chromoprotein: Proteinanteil = Opsin), welches den Farbstoff Retinal (das Aldehyd des β -Carotin, verwandt mit Vitamin A) enthält.

Retinal ist eine Verbindung mit cis/trans-Isomerie. 11-cis-Retinal absorbiert einfallendes Licht und verändert dabei seine Struktur zu all-trans-Retinal. Nun passt es nicht mehr exakt zum Proteinanteil (Opsin) und verformt diesen ein wenig. Es bildet sich das instabile Metarhodopsin II.

Diese chemische Reaktion sehr schnell. Vermutlich eine der schnellsten biochemischen Reaktionen überhaupt, da sie in ca. $2 \cdot 10^{-15}$ Sekunden abläuft.

Durch die Umwandlung des Rhodopsins wird nun eine biochemische second-Messenger-Kaskade angestoßen, welche viele Tausend weiterer Moleküle reagieren lässt und so die second-Messenger-Moleküle c-AMP und c-GMP spalten. Dabei entsteht eine zunehmende Hyperpolarisierung der Zellmembran. (Lichtsinneszellen sind also Dunkelrezeptoren!)

Anschließend muss Rhodopsin unter ATP-Verbrauch wieder hergestellt werden.

Ein starker Vitamin-A Mangel führt übrigens zum Verlust der Sehfähigkeit. Ist er genetisch verursacht, so kann er besonders am Abend seine Auswirkungen haben, weil über den Tag das ganze Rhodopsin verbraucht wurde. Man spricht dann von Nachtblindheit.

Farbsehen: Die Absorptionsmaxima der menschlichen Sehzellen

Während Stäbchen besonders lichtempfindlich sind, so haben sie doch einen großen Nachteil: Sie reagieren nur auf Helligkeitsunterschiede - Farben können durch sie nicht unterschieden werden.

Farbsehen beim Mensch:

Zum Farbsehen hat der Mensch drei verschiedene Typen von Zapfen. Die verschiedenen Zapfentypen enthalten jeweils unterschiedliche Sehfärbstoffe, welche Iodopsine genannt werden. Iodopsin ist dabei eine Sammelbezeichnung für sämtliche Farbpigmente der Zapfen von Tier und Mensch. Sie enthalten einen Farbstoff und ein Protein. Mit diesen beiden Bestandteilen absorbieren Sie Licht verschiedener Wellenlängen.

Zum Vergleich: Das öfter genannte und bekanntere Rhodopsin ist hingegen der Sehfärbstoff der Stäbchen. Er wird auch Sehpurpur genannt. Man findet es interessanterweise nicht nur in der Netzhaut (Retina) von Wirbeltieren, sondern auch bei wirbellosen Tieren. Beim Menschen ist es für das Hell-Dunkel-Sehen verantwortlich. Es besteht ebenfalls aus einem Farbstoff (11-cis-Retinal) und einem Protein, dem Opsin.

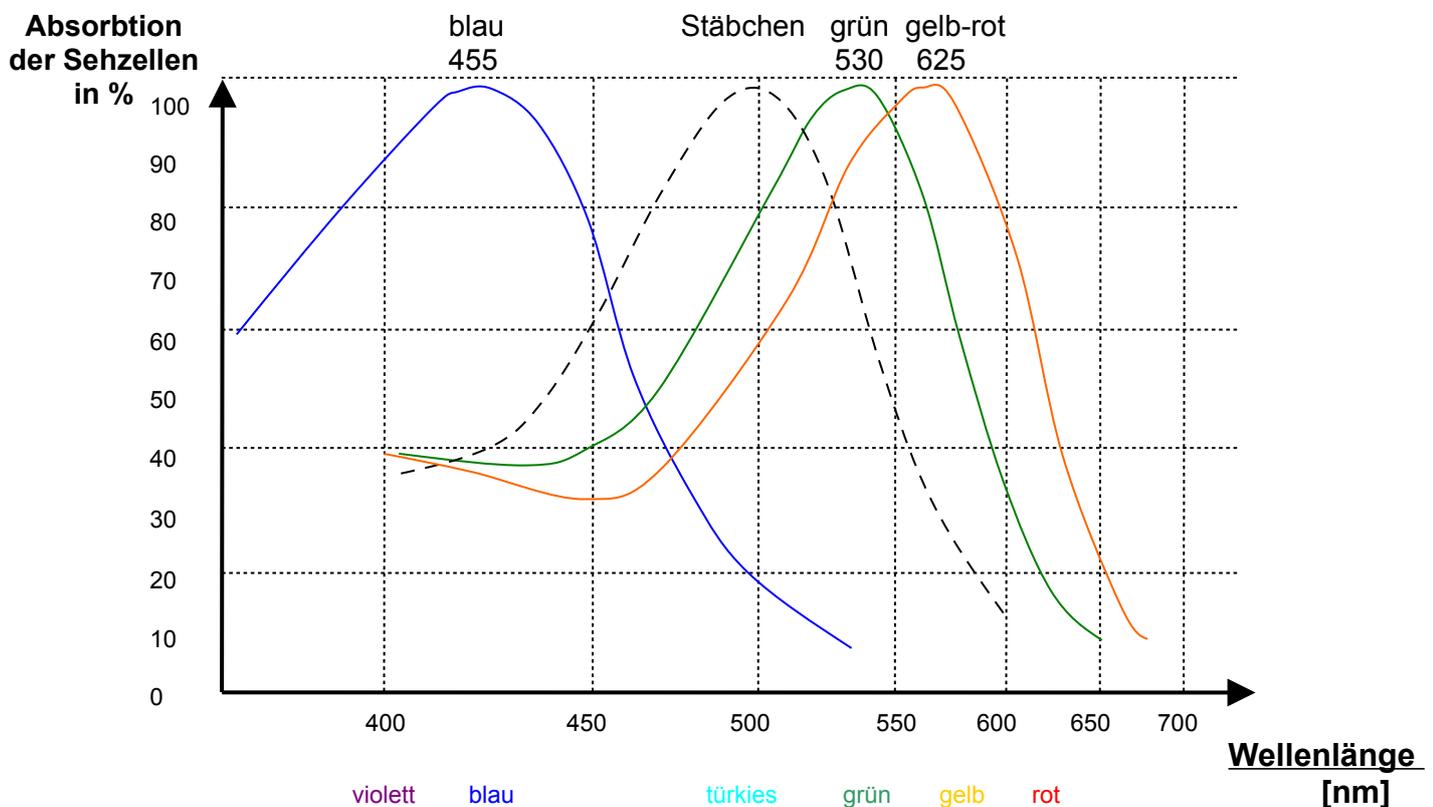
Die drei Zapfentypen haben die beste Lichtabsorption bei jeweils anderen Wellenlängen:

430nm - 480nm => blau

500nm - 530nm => grün

600nm - 750nm => rot

Für Mischfarben, wie gelb, orange oder grün absorbieren mehrere Zapfen gleichzeitig das Licht. => Jede Farbe wird durch eine Mischung der drei Spektralfarben blau, grün und rot dargestellt. Bei weißem Licht absorbieren alle drei Zapfentypen gleich stark.



Wie sieht man andere als die drei Grundfarben?

Wenn man beispielsweise die Farbe gelb sieht, zu der es keinen eigenen Rezeptor gibt, dann empfangen sowohl die Zapfen für orange-rotes Licht und für grünes Licht ein Signal! Beide Zapfenarten leiten diese Information an das Gehirn weiter.

Somit interpretiert das Gehirn daraus die Information, dass die richtige Farbe wohl dazwischen liegt und somit gelb ist!

Der elektrochemische Sehvorgang :

Am Stäbchen ist dieser Vorgang sehr gut untersucht: Stäbchen enthalten den Sehfärbstoff Rhodopsin. Der Körper bildet diesen übrigens aus Vitamin A .

Fällt nun Licht auf ein Stäbchen, dann zerfällt Rhodopsin in zwei Bestandteile: 11-cis-Retinal und Opsin.. Dadurch wird ein elektrisches Signal erzeugt, welches an die verschalteten Nervenzellen übertragen wird. Nach kurzer Zeit werden die beiden Rhodopsinbestandteile wieder zusammengesetzt und somit stehen sie wieder zur Verfügung.

Farbsehen bei anderen Wirbeltieren:

Fische und Vögel haben vier verschiedene Zapfentypen.

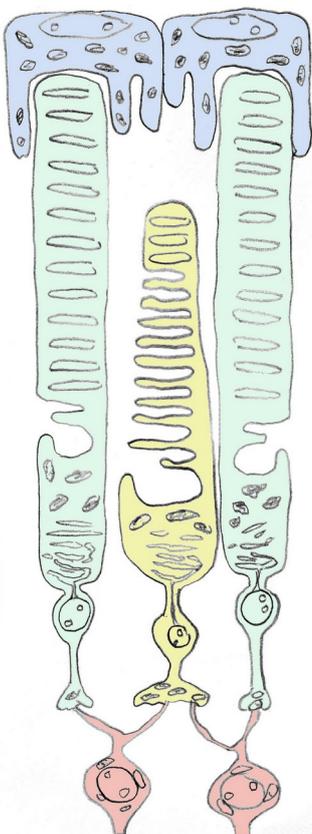
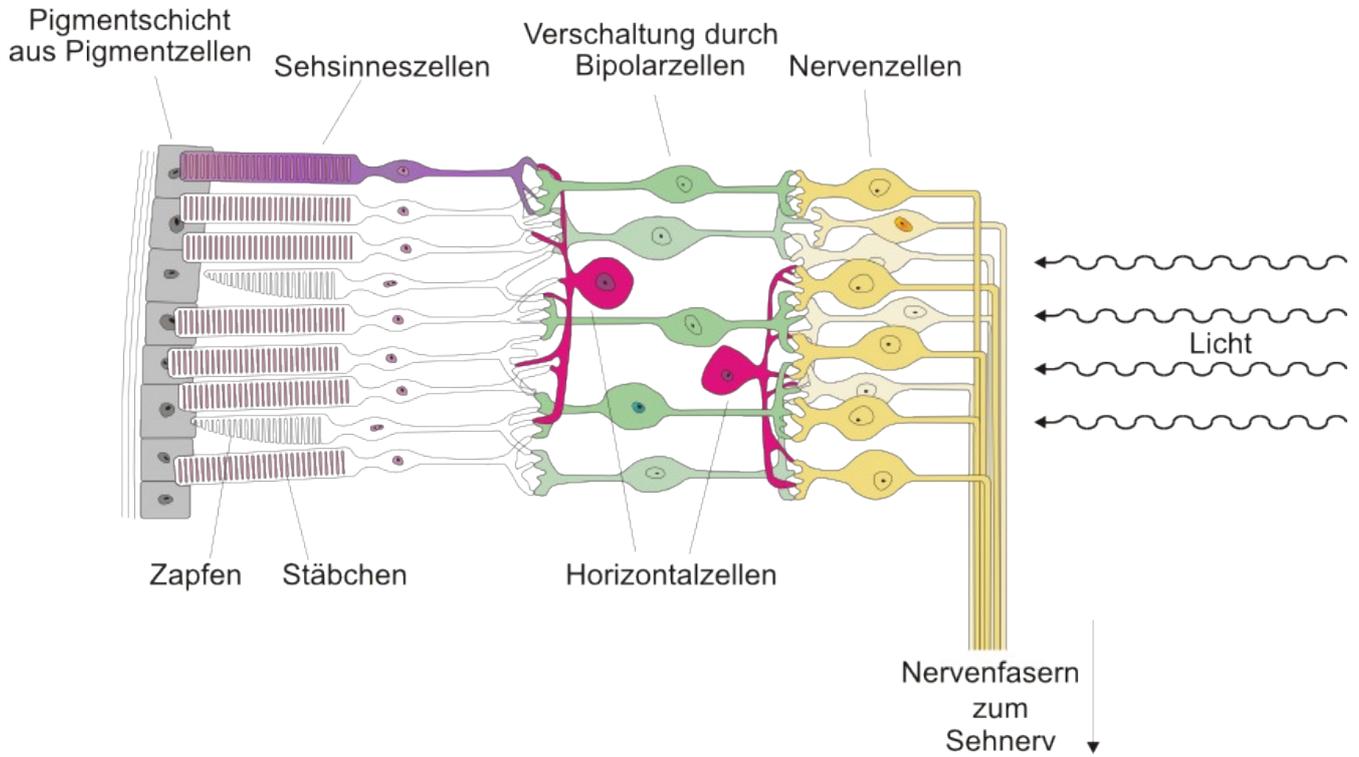
Honigbienen haben drei verschiedene Zapfentypen, allerdings nicht so wie die Menschen. Ihnen fehlt der Zapfentyp für rotes Licht. Dafür können sie viel weiter im blauen Lichtbereich sehen. Der dritte Typ bei Honigbienen absorbiert das für Menschen unsichtbare UV-Licht.

Aufgaben:

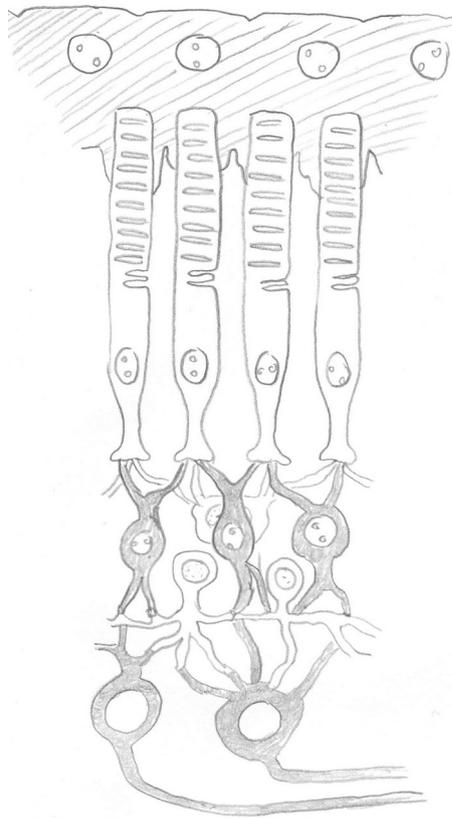
1. Fasse den Text mit Deinen Worten zusammen
2. Hunde verfügen nur über zwei Zapfentypen. Die Zapfen im roten Bereich fehlen. Dafür haben Hunde wesentlich mehr Stäbchen in der Netzhaut. Beschreibe, wie Hunde die Welt wahrnehmen.

Verknüpfung der Sehzellen in der Netzhaut

Querschnitt durch die Netzhaut



Stäbchen (grün) und ein Zapfen (gelb)



Verschaltung der Sehzellen

Grundlagen der Akkomodation:

Wenn man mal über den Daumen durchs Fenster in den Garten schaut, merkt man, dass je nach Akkomodation entweder der Daumen oder der Garten scharf fokussiert ist.

1) Aus der Physik: Bedingungen für die Entstehung scharfer Bilder:

Welche Strukturen sind für die Bildentstehung notwendig?

- Linse, Leinwand/ Schirm

Schüler wird aufgefordert opt. Bank so aufbauen, dass ein scharfes Bild auf dem Schirm entsteht. Schüler erklärt Strahlengang (Objekt muss außerhalb der einfachen Brennweite stehen)

V: Strahlengang einer Kerze auf der optischen Bank

| V | B | S |
|---|---|---|
| Abbildung der Kerze auf der „Netzhaut“ | Das Bild wird auf dem Kopf stehend projiziert | Gehirn muss Netzhautbild „umrechnen“ |
| Abbildung ohne Linse | Bild ist unscharf | dioptrischer Apparat ¹ dient als Sammellinse |
| Einsetzen einer Sammellinse mit höherer Brennweite | Entfernte Bilder sind scharf | Für entfernte Objekte muss sich die Brennweite der Linse ändern |

Auf die Netzhaut wird ein reelles, verkleinertes, seitenverkehrtes und auf dem Kopf stehendes Bild projiziert.

2) Das Netzhautbild:

Problem: Wie kann man gleichzeitig nahe und entfernte Objekte fokussieren, ohne die Sammellinse zu verschieben?

- Brechkraft der Linse muss verändert werden

Folie: Brechkraftänderung der Linse

Die Linse ist kein starres Gebilde. Sie wird durch die sie umgebenden, ringförmigen Ziliarmuskeln in ihrer Form und Brechkraft angepasst (= Akkomodation = Einstellung des Auges auf die Entfernungen)

Anpassung der Linse

Die aktive Brechkraftveränderung der Linse wird auch Akkommodation genannt. Sie ist folgendermaßen zu erklären:

- Der Wissenschaftler Hermann von Helmholtz (19Jh.) beschreibt nach anatomischen Untersuchungen die Linsenverformung während der Akkommodation. Da die Augenlinse verformbar ist, wird bei einem Blick in die Ferne der ringförmige Augenmuskel entspannt. Dadurch werden die Zonulafasern angezogen und gespannt, welches die Linse in eine Ellipsenform ausgespannte, elliptische Form bringt. **Die Folge ist eine Abnahme der Brechkraft.**

Ferneinstellung: Ziliarmuskel schlaff => Linsenbänder gespannt => Linse flach (Ruhestellung)

- Bei Sicht auf nahe Gegenstände, spannt der Augenmuskel an (merkbar durch den „Muskelschmerz in der Augenregion, bei langer Computerarbeit), was zu einer Entspannung der Zonulafasern führt. Die Linse kugelt sich dadurch in ihre kugelförmigere Ruheform ab (=> mechanischer Memory-Effekt). **Die Folge ist eine Zunahme der Brechkraft.**

Naheinstellung: Ziliarmuskel kontrahiert => Linsenbänder entspannt => Linse gekrümmt

- Bei der Kurzsichtigkeit und bei der Weitsichtigkeit ist dieses Gleichgewicht gestört.
- Mit zunehmendem Alter verliert die Linse Elastizität und der Muskel Spannkraft: Die Folge ist Altersweitsichtigkeit
- Die Theorie des US-amerikanischen Wissenschaftlers Ronald A. Schachar fügt der bisherigen Theorie zusätzlich eine Vorverlagerung der Augenlinse bei der Akkommodation zu. Dies ist mittlerweile experimentell bewiesen.

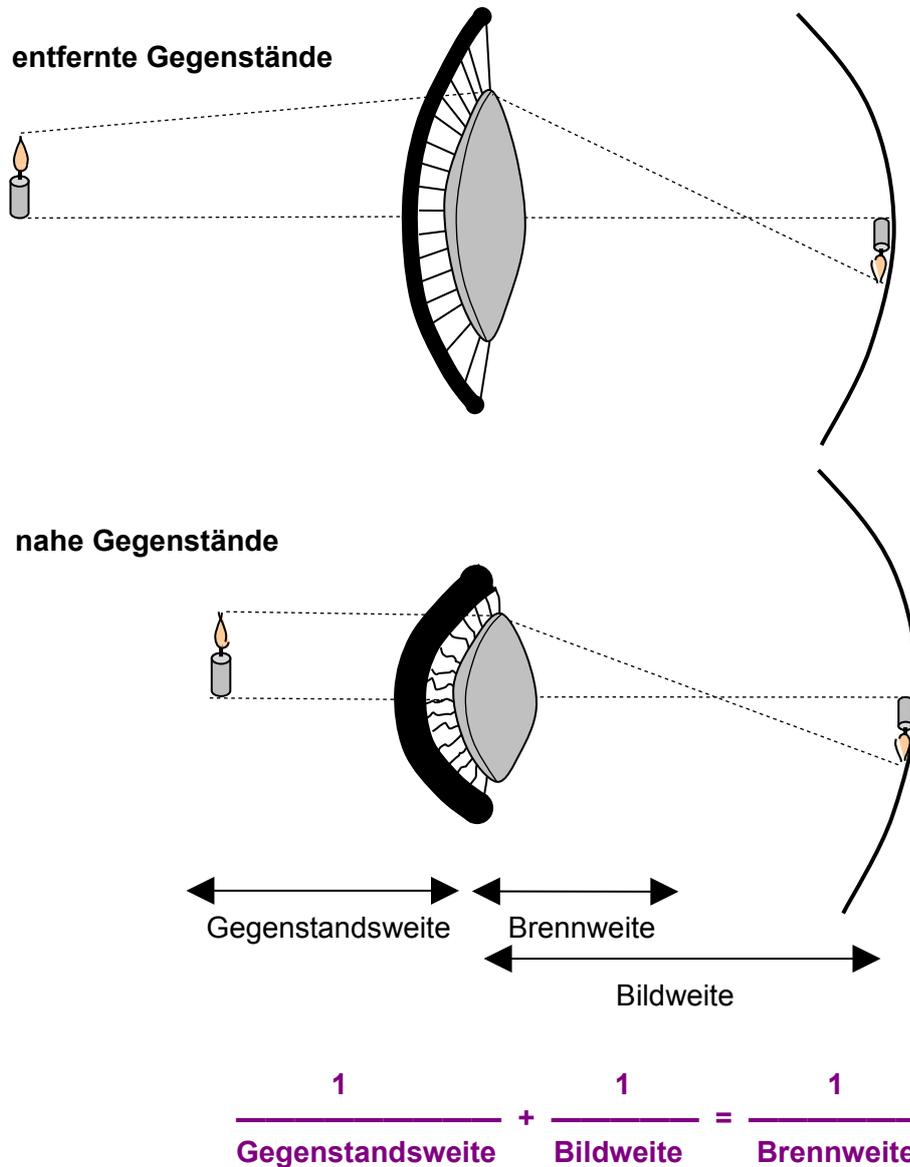
Zusatzinformationen:

http://de.wikipedia.org/wiki/Akkommodation_%28Physiologie%29

http://de.wikipedia.org/wiki/Corpus_ciliare

Akkommodation der Linse

Die Linse ist kein starres Gebilde. Sie wird durch die sie umgebenden, ringförmigen Ziliarmuskeln in ihrer Form und Brechkraft angepasst (=Akkommodation).



Betrachtung entfernter Gegenstände (>5m):

Ziliarmuskel entspannt sich => Zonulafasern sind straff => Linse wird abgeflacht => geringe Brechkraft

Betrachtung naher Gegenstände:

Ziliarmuskel kontrahiert => Zonulafasern entspannen => Linse krümmt sich (durch nat. Elastizität)
=> hohe Brechkraft

Def: Brechkraft [dpt] = 1/ Brennweite (Kehrwert der Brennweite)

=> 1 dpt = 1/ m

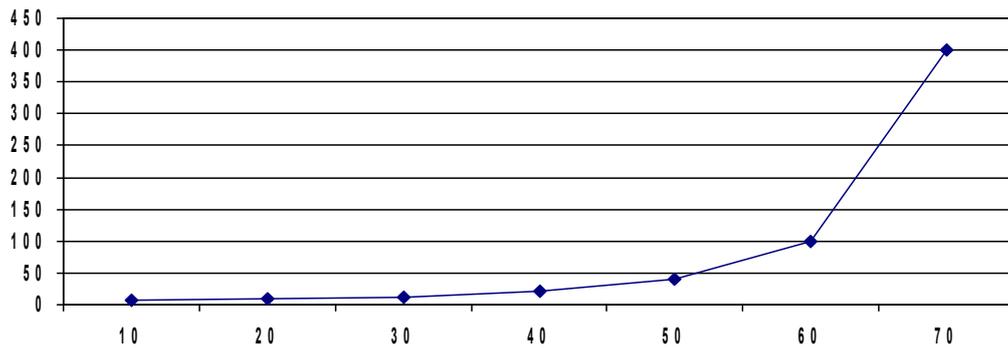
Hornhaut und Augenkammer: 43 dpt
Linse : 18 -26 dpt
=> **max. Brechkraft : 69 dpt**

c) Nahpunktbestimmung:

Versuch: Punkt, an dem sich eine den Augen nähernde Bleistiftspitze in zwei Spitzen aufteilt (mit unterlegtem Lineal)

**Der Punkt, der gerade noch scharf gesehen wird, ist der Nahpunkt.
Er nimmt mit zunehmendem Alter ab.**

Nahpunkt in Abhängigkeit vom Alter



| [cm] | [a] |
|------|-----|
| 7 | 10 |
| 10 | 20 |
| 17 | 40 |
| 100 | 60 |

Aufgabe:

1. Welche Dioptrinzahl entspricht der Nah-, welche der Ferneinstellung?

Fehlsichtigkeit

Es gibt mehrere Sehfehler. Sie alle haben organische Ursachen im Auge.

Typische Sehfehler sind: Kurzsichtigkeit, Weitsichtigkeit, (Astigmatismus, Hornhautverkrümmung), Farbblindheit.

Weißt Du, wie sie entstehen? Welche Ursachen kann es z.B. haben, wenn entfernte Bilder nicht mehr scharf gesehen werden?

V3 Simulation der Sehfehler an der optischen Bank:

| Versuchsdurchführung | Beobachtung | Schlussfolgerung |
|--|-------------------|---|
| Auge wird auseinander gezogen (zu langer Augapfel) | Bild ist unscharf | Kurzsichtigkeit: Bild entsteht bereits vor der Netzhaut. => Korrektur mit Zerstreuungslinse |
| Auge wird zusammen geschoben (zu kurzer Augapfel) | Bild ist unscharf | Weitsichtigkeit: Bild entsteht hinter der Netzhaut. => Sammellinse als Brille |

Kurzsichtigkeit: Dieser Augenfehler führt dazu, dass man in der Nähe alles scharf sieht, aber entfernte Gegenstände nur unscharf wahrgenommen werden können.

Ursache: Der Augapfel ist zu lang. Auch bei maximaler Abflachung der Linse ist deren Brechkraft noch zu groß. Gründe für einen zu langen Augapfel können Entwicklungsstörung während des Wachstums sein bzw. eine Kurzsichtigkeit, die durch stundenlanges Sehen auf kurze Entfernungen (z.B. auf den Computermonitor) entsteht. Bei dieser Form findet eine Anpassung des Auges an ständige Nahakkommodation statt. Im Grunde passt sich das Auge der kurzen Entfernung (durch Ermüdungserscheinungen an). Dies ist nur in seltenen Fällen wieder rückgängig zu machen.

Weitsichtigkeit: Entfernte Gegenstände werden scharf gesehen, nahe Gegenstände erscheinen unscharf.

Ursache: Der Augapfel ist zu kurz. Selbst die maximale Linsenwölbung reicht nicht aus, um genügend Brechkraft für eine scharfe Projektion auf der Netzhaut zu erzeugen.

Altersweitsichtigkeit: Mit fortschreitendem Alter nimmt die Elastizität der Linse aufgrund einer Ermüdung des Gewebes (vor allem Ziliarmuskel und Zonulafasern erschlaffen) ab. Die Linsenwölbung erreicht bei Naheinstellung nicht mehr das Maximum.

Störung der Farbwahrnehmung: Der Mensch hat 3 verschiedene Zapfentypen - fällt einer dieser Zapfentypen aus (z.B. durch einen genetischen Defekt - siehe auch im Kapitel - Genetik-Erbkrankheiten), so kann der entsprechende Farbbereich nur noch durch Stäbchen (also grau) wahrgenommen werden. Die häufigste Art der Farbblindheit ist die Rot-Grün-Blindheit. Sie wird als Erbkrankheit über das X-Chromosom vererbt.

Nur bei vollständigem Fehlen der Farbwahrnehmung spricht man von Farbenblindheit.

Zusatzinformationen:

<http://de.wikipedia.org/wiki/Fehlsichtigkeit>

Nah- und Fernakkommodation

Betrachtung naher Gegenstände:

Zillarmuskel => Zonulafasern sind => Linse krümmt sich (durch ihre natürliche Elastizität)
=> hohe Brechkraft

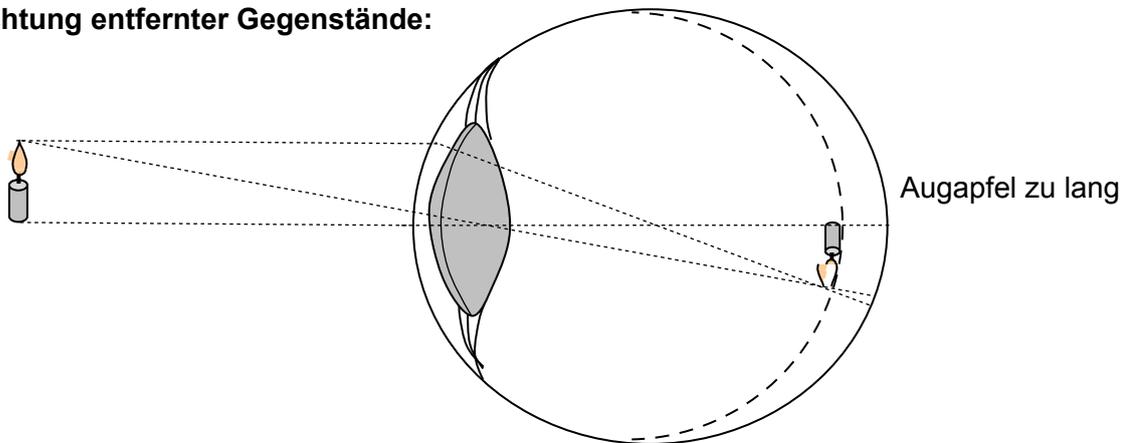
Betrachtung entfernter Gegenstände (>5m):

Zillarmuskel sich => Zonulafasern sind => Linse wird abgeflacht => geringe Brechkraft

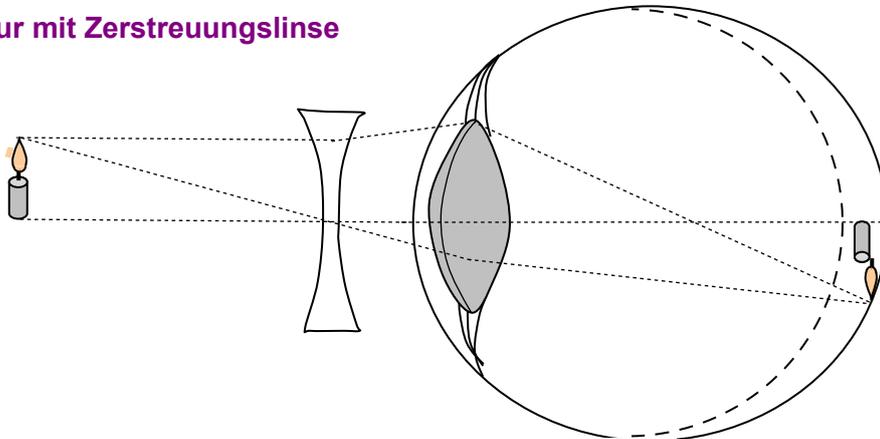
Das Auge bei Fehlsichtigkeit

a) Kurzsichtigkeit

Bei Betrachtung entfernter Gegenstände:

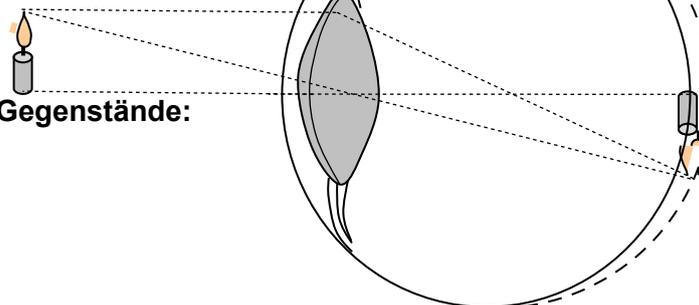


=> Korrektur mit Zerstreuungslinse

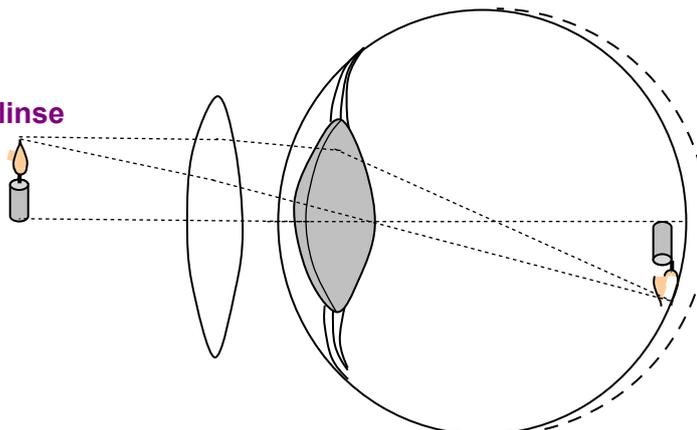


b) Weitsichtigkeit

Bei Betrachtung naher Gegenstände:



=> Korrektur mit Sammellinse

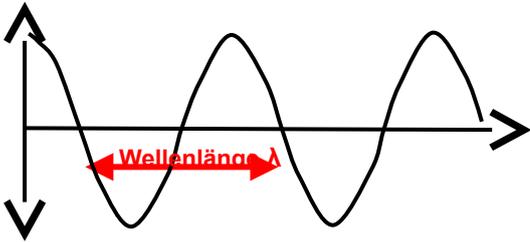


Augenkrankheiten

- Entzündungen der Bindehaut, Hornhaut, des Lidrandes, der Netzhaut usw.
- Starkerkrankungen:
 - a) grauer Star (Eintrübung der Linse, kann operativ behoben werden)
 - b) grüner Star (Erhöhung des Augeninnendrucks (Glaukom), welcher auf den Sehnerv wirkt und somit schleichend diesen erst beeinträchtigt, und dann zerstört)
- Hornhautverkrümmung (Astigmatismus)
- Kurzsichtigkeit (Myopie) (z.B. durch Computerarbeit/ Fernsehen/ Lesen)
- Weitsichtigkeit (Hyperopie)
- Schielen (Strabismus)
- Netzhautablösung
- Einblutungen (durch geplatzte Äderchen, geht übrigens auch ohne Faustkampf)
- trockenes Auge (Conjunctivitis sicca)
- Maculadegeneration (Sehzellen der Sehgrube werden schlechter durchblutet und sterben ab)
- Retinitis pigmentosa, Sehzellen der Netzhaut sterben von außen nach innen ab.

Was sind elektromagnetische Wellen?

Die Sinusschwingung:



Die Wellenlänge hängt von der Frequenz ab. Diese wird in Hertz angegeben [Hz]

$$1 \text{ Hz} = \frac{1}{\text{s}}$$

Die Frequenz gibt also an, wie viele Schwingungen pro Sekunde stattfinden

Beispiele für die Umrechnung von Wellenlänge in Frequenz

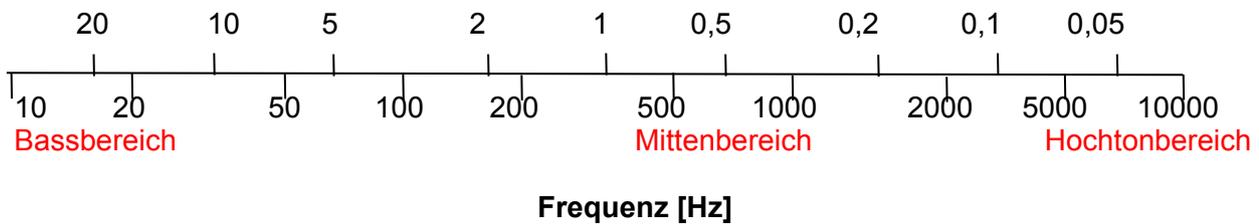
$$f = \frac{c}{\lambda}$$

f = Frequenz
 λ = Wellenlänge
 c = Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwellen
 (bzw. Lichtwellen, Röntgenstrahlen usw...)

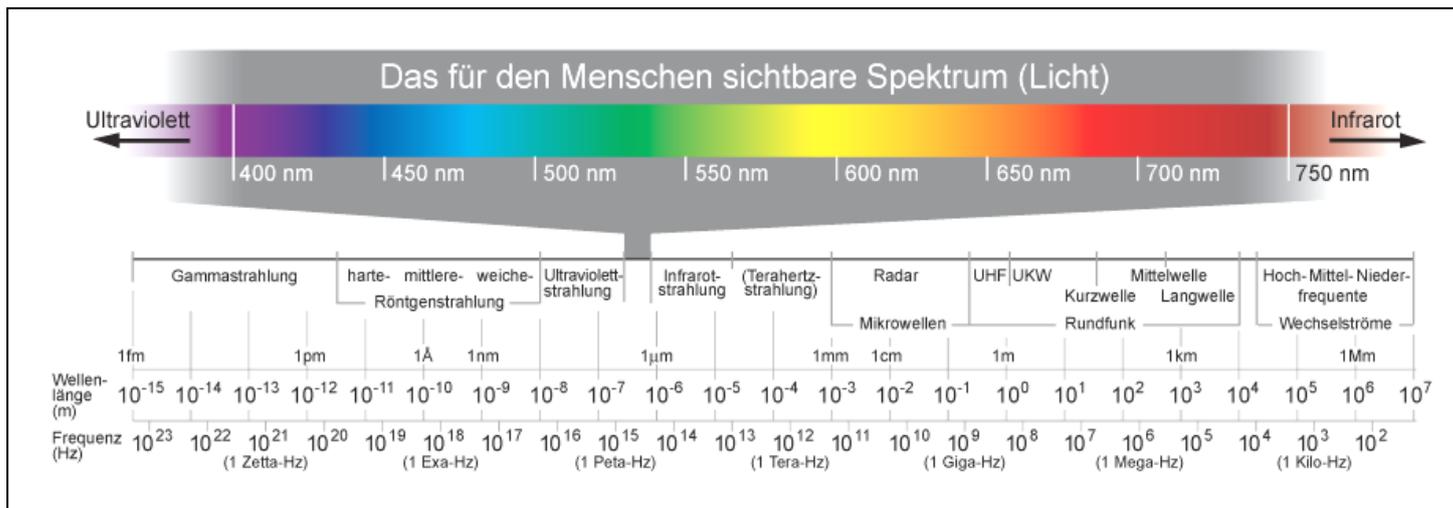
| Wellenlänge [m] | Frequenz [Hz] |
|-----------------|----------------------------|
| 1 | 343 |
| 2 | 171.5 |
| 10 | 34.3 |
| 17.15 | 20 (Hörgrenze Bass) |
| 0.0172 | 20 000 (Hörgrenze Hochton) |

Der Zusammenhang zwischen

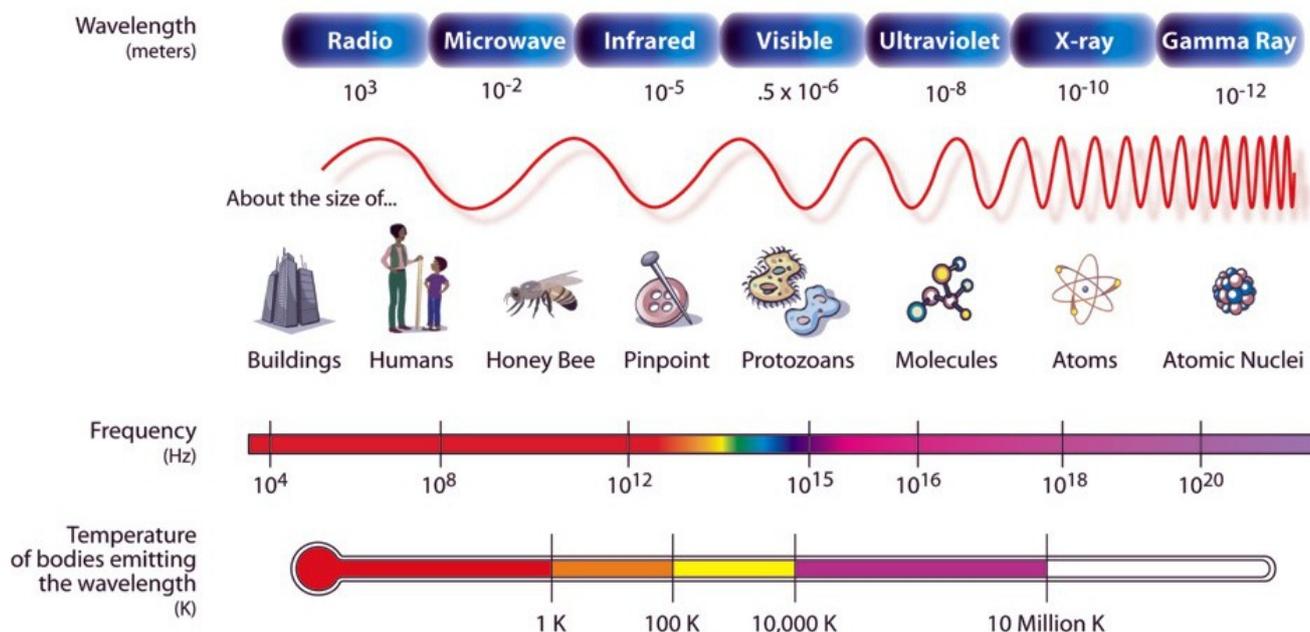
Wellenlänge λ [m]



Wellenlängen und Licht



Quelle: [Creative-Commons-Lizenz „Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 3.0 nicht portiert“ & GNU-Lizenz für freie Dokumentation](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum_-_de.svg), Version 1.2 by Wikicommonsuser Horst Frank and Jailbird, Thank you; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum_-_de.svg



Quelle Bild: Pubic domain by Nasa; Thank you; http://mynasadata.larc.nasa.gov/images/EM_Spectrum3-new.jpg ; http://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_Spectrum3-new.jpg

Alternativgrafik unter GNU und cc-by-sa 3.0 alike unported: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_Spectrum_Properties_edit.svg

Zusatzinformationen:

http://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Wellenspektrum

Eine Besonderheit der Evolution - auch Tintenfische haben ein Linsenauge

In der Biologie gilt eigentlich fast immer die Regel, dass eine „Erfindung“, also ein Organ oder eine besondere Eigenschaft nur einmal gemacht wird und dann im Stammbaum an höher entwickelte Arten weiter vererbt wird (oder manchmal auch nicht!).

So haben Wirbeltiere beispielsweise ein einfaches Zweikammerherz entwickelt, was in vielen Millionen Jahren sich weiter zum Vierkammerherz entwickelt hat.

Das Linsenaug ist eine Besonderheit, es wurde zweimal „erfunden“. Einmal bei einigen Weichtieren (den Kopffüßern), wie dem Tintenfisch und später nochmal bei den Wirbeltieren. Anhand einiger Merkmale kann man übrigens sehen, dass dieses Auge nicht identisch mit unserem Linsenaug ist. Während unser Auge eine Ausstülpung des Zwischenhirns ist (ein inverses Auge, da die Sinneszellen nach Innen zeigen), ist das Auge der Kopffüßer evers - die Sinneszellen ragen nach außen. Das Auge eines Kopffüßers entsteht übrigens während des Wachstums durch eine Einfaltung der embryonalen Außenhaut, welche erst später im Wachstum mit Nervenzellen vom Gehirn versorgt wird. Das everse Auge hat also einen anderen Gewebeansprung⁵. Aber es gibt viele Gemeinsamkeiten; neben einer Linse besitzen Kopffüßer z.B., auch eine Retina.



⁵ Ektoderm beim Kopffüßer, entoderm beim Wirbeltier

Insekten haben Facettenaugen (Komplexaugen)

Insekten und Krebse haben so genanntes Komplexaugen (=Facettenaugen). Ein Komplexauge setzt sich aus einer Vielzahl von Einzelaugen (=Ommatidien) zusammen. Jedes Einzelauge besitzt nur 8 Sinneszellen, sodass die Abbildungsleistung eines einzelnen Auges nur schwach ist. Die Vielzahl der Einzelaugen ermöglicht dem Insekt dadurch aber dann doch eine recht gute Abbildungsleistung - wobei das Gesamtbild kein perfektes Bild, sondern eher ein Mosaik aus Einzelbildern ist.



Da Facettenaugen sehr klein sind, liegen insgesamt nur sehr wenige Sehzellen vor (je nach Insekt 100-10000), das Gesamtbild wird also dementsprechend wenig detailreich sein, auch eine Anpassung durch eine Linse liegt nicht vor. Allerdings können Facettenaugen viel mehr Bilder pro Sekunde wahrnehmen, als das Linsenaugen können. Bis zu 250 Bilder pro Sekunde können einzeln wahrgenommen werden. Beim Menschen sind es ca. 16!

Dies ermöglicht Insekten eine extrem hohe Reaktionsgeschwindigkeit.

Weitere besondere Leistungen des Insektenauges sind die Wahrnehmung von ultraviolettem Licht (also Licht was jenseits der Farbe Violett im Farbspektrum auftaucht). Außerdem können sie polarisiertes Licht sehen.

Zusatzinformationen:

http://de.wikipedia.org/wiki/Linsenaug#Facettenaugen_.28Komplexaugen.29

Wiederholungsfragen zum Thema Auge

1. Erkläre den Aufbau des Auges.
2. Beschreibe den Aufbau der Netzhaut.
3. Erkläre die Funktionsweise des Auges in Stichworten
4. Nenne Schutz Einrichtungen des Auges.
5. Wozu dient der Ziliarmuskel? Wozu dient der Schlemm'sche Kanal?
6. Beschreibe den Vorgang der Akkomodation.
7. Wie wird die Linsenbrechkraft verändert?
8. Was ist der blinde Fleck? Wozu dient die Sehgrube?
9. Welche Aufgaben haben die vordere und die hintere Augenkammer?
10. Welche Aufgabe hat die Aderhaut? Welche hat die Pupille?
11. Im Alter lässt die Kraft des Ziliarmuskels nach, weiterhin erschlaffen die Zonulafasern. Was sind die Folgen?
12. Warum sind Nachts alle Katzen grau?
13. Erkläre die anatomischen Voraussetzungen für Fehlsichtigkeit
14. Welche Augenkrankheiten kennst Du?
15. Was sind elektromagnetische Wellen? Welche Frequenzen spielen für den Menschen eine Rolle?
16. Welche Abschnitte des Linsen Auges sind für die Lichtbrechung verantwortlich?
17. Vergleiche das Auge mit einer Kamera - was entspricht dabei dem Digitalsensor/ Film?
18. Stelle die Funktion der Akkomodation mithilfe einer Zeichnung dar
19. Worauf ist es zurückzuführen, das ein Blick in die Weite entspannend ist?
20. Bei Patienten, die an grauem Star operiert werden, wird die Augenlinse durch eine Kunststofflinse ersetzt. Welche Sehprobleme ergeben sich daraus für den Operierten?
21. Ist die folgende Aussage richtig? Begründe
„Tintenfische haben ein everses Auge, bei den das Licht nicht die Sehzellen durchdringen muss - beim menschlichen Auge muss das Licht aber genau dies tun“



Illusion?