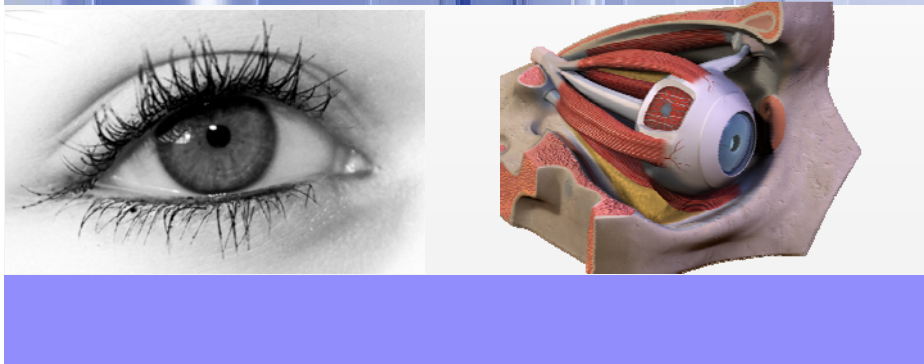


Optische Systeme in der Medizintechnik

Das menschliche Auge



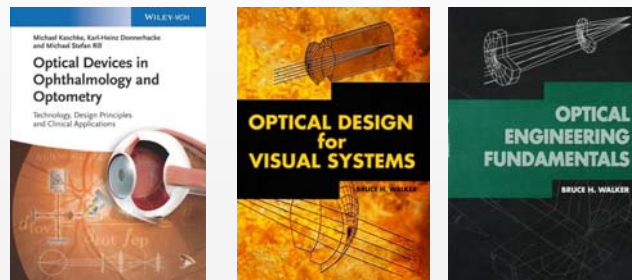
Literatur und Quellenangaben

- /2/ National Eye Institute <http://www.nei.nih.gov/index.asp>
- /4/ <http://webvision.med.utah.edu>
- /5/ F. Grehn; Augenheilkunde; Springer 2006
- /6/ D.A. Atchison, G. Smith: Optics of the Human Eye; Butterworth 2002
- /7/ M. Sachsenweger: Augenheilkunde; Thieme-Verlag 2003
- /8/ G. Smith, D.A. Atchinson: The Eye and Visual Optical Instruments; Cambridge University 1997



Literatur und Quellenangaben

- /12/ H. Gross (Hrsg.); Handbook of Optical Systems; Vol. 1, Wiley 2005; Vol. 4, Wiley 2008 (Feb)
- /14/ B. Walker ; Optical Design for Visual Systems; 2000
- /15/ B. Walker ; Optical Engineering Fundamentals; 1997



Einführung

**Ophthalmologie = Augenheilkunde**

**Das Auge ist unser wichtigstes Sinnesorgan !**

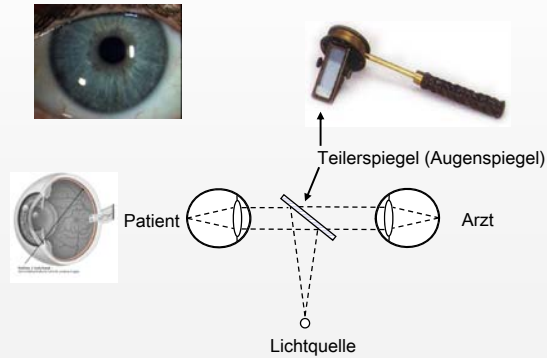
**Eine Minderung oder gar der Verlust des Sehvermögens stellt eine erhebliche Beeinträchtigung der Lebensqualität dar.**



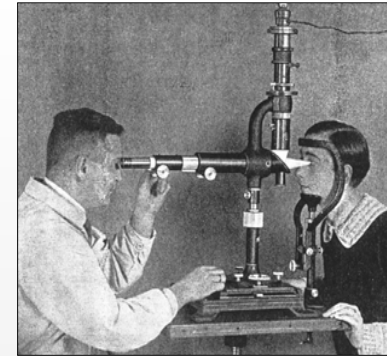
Obwohl das Auge in besonderen Maße für optische Untersuchungsmethoden zugänglich ist, waren bis Ende des vorigen Jahrhunderts die diagnostischen Möglichkeiten des Augenarztes sehr eingeschränkt.

## Einführung

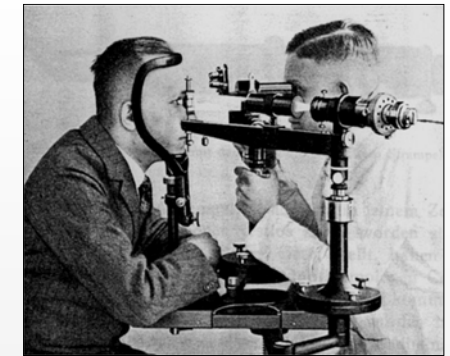
Erst 1850 erfindet Herrmann von Helmholtz den Augenspiegel, der den Blick in das Innere des lebenden Auges ermöglicht. Das war der Beginn der modernen Augenheilkunde und die Geburtsstunde des ophthalmologischen Gerätebaus.



## Großes Ophthalmoskop und Spaltlampe - zwei Klassiker



Großes Ophthalmoskop  
nach Gullstrand /11/  
1911

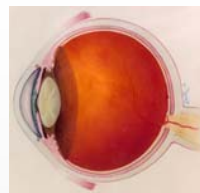


Nitrasspaltlampe  
nach Gullstrand /11/  
1915

## Einsatzspektrum ophthalmologischer Geräte

Ophthalmologische Geräte werden heute verwendet für die

- Untersuchung / Diagnose des vorderen und hinteren Auges
- Therapie von Erkrankungen des Auges
- Prüfung des Sehvermögens (Brillenbestimmung, Kontaktlinsenanpassung,...)
- Vermessung des Auges (Hornhautdicke, Augenlänge,...)



### Für kein anderes Organ werden so viele unterschiedliche Geräte benötigt !

Das Auge ist auf Grund seiner Funktion in besonderem Maße für optische Methoden leicht zugänglich.

Daher basiert die überwiegende Mehrzahl der in der Augenheilkunde eingesetzten Diagnose- und Therapie- Geräte auf

- opto-elektronischen Prinzipien und / oder
- lasertechnische Verfahren

**Die Ophthalmologie ist das bei weitem erfolgreichste Einsatzgebiet medizinischer Laser !**

## Auge und Ophthalmologische Medizintechnik

Anspruchsvolles aber zugleich sehr reizvolles Arbeitsgebiet im Grenzbereich zwischen:

- Optik, Optoelektronik, Lasertechnik und
- medizinischer Applikation auf dem Gebiet Augenheilkunde und Augenoptik

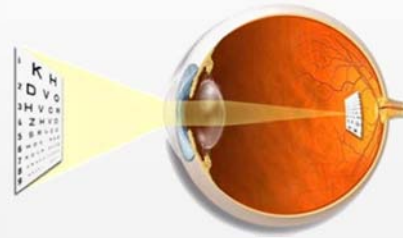
Die erfolgreiche Entwicklung ophthalmologischer optischer Geräte setzt voraus:

- Anwendungsbereites Wissen auf den Gebieten Laser- und Optotechnologien
- Kenntnisse über das Auge (Anatomie, applikative Besonderheiten, wichtigste Fehlfunktionen und Erkrankungen)
- Von Anfang an eine enge Zusammenarbeit mit dem Augenarzt bzw. Augenoptiker

## Licht und Mensch - Wahrnehmung

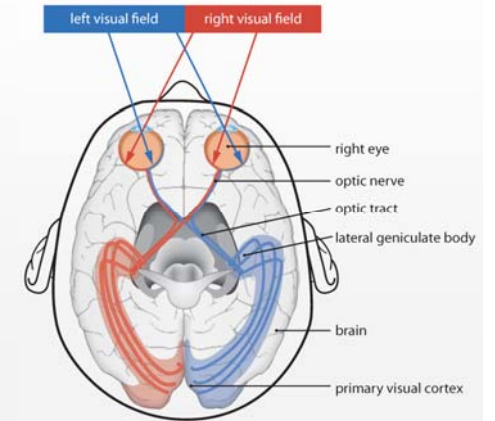
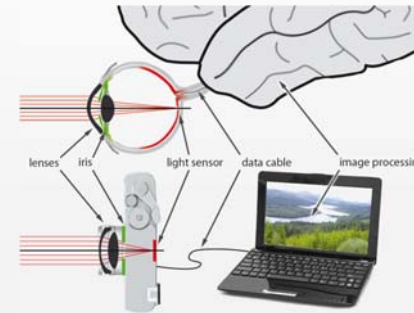
Über 80% der Informationen über unsere Umwelt nehmen wir über das Auge auf. Die Verarbeitungskapazität beträgt 10 Mbit/s und der Dynamikbereich 11 Zehnerpotenzen.

Sehen ist aber mehr als die einfache Projektion der Umwelt auf einen passiven Schirm.



## Licht und Mensch - Wahrnehmung

Das Auge ist eine optisch einfach aufgebaute „Kamera“ mit optimal angepassten intelligenten „Sensor“ und mit sehr leistungsfähiger „Bildverarbeitungs-Software“



## Licht und Mensch - Wahrnehmung

**Lesen ist mehr als einzelne Buchstaben erkennen und aneinanderfügen**

Gmäß eneir Sutide eneir elgnihcesn Uvinisterät, ist es nchit withcg in wlechr Rneflogheie die Bstachuebn in enem Wrot snid, das ezniige was wcthiig ist, ist daß der estre und der letzte Bstabchue an der ritihcegn Pstioion snid. Der Rset knan ein ttoaelr Bsinöldn sien, tedztorm knan man ihn onhe Pemoblre lseen.

## Neuronale Sensorik des Auges

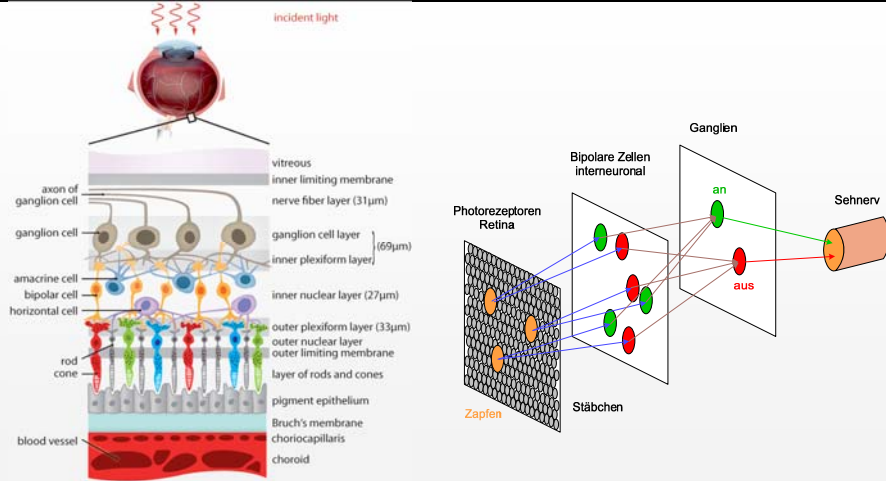
Bildkorrektur im Gehirn

Bild auf der Retina

Bild im Gehirn



### Neuronale Sensorik des Auges



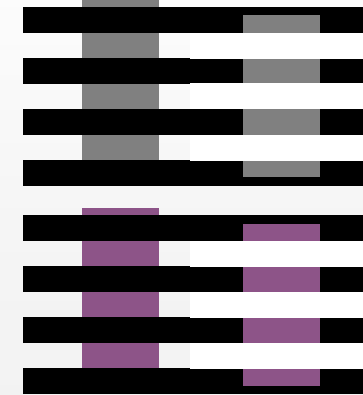
Aufbau und Verteilung des neuronalen Netzwerks am Auge

### Optische Täuschungen

**Umgebungshelligkeit:**

1. Der linke Balken erscheint jeweils dunkler

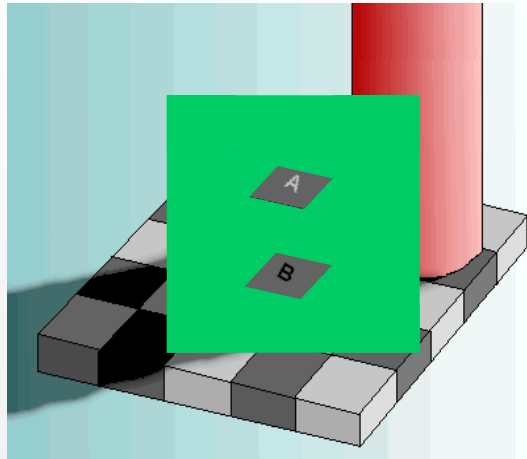
2. Das graue Quadrat links erscheint dunkler



### Optische Täuschungen

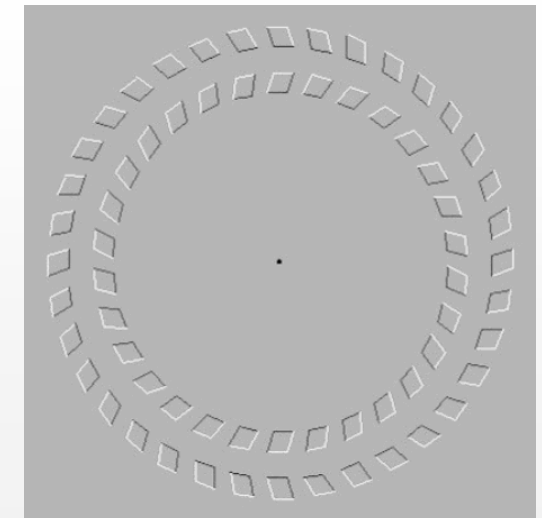
**Umgebungshelligkeit:**

Die mit A und B bezeichneten Felder haben dieselbe Grundfarbe



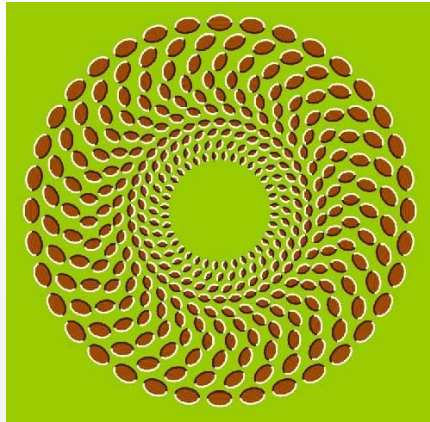
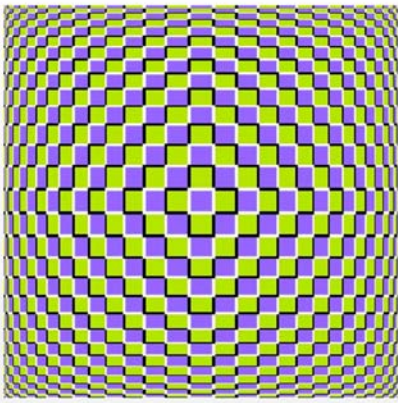
### Optische Täuschungen

Punkt im Zentrum fixieren  
vor und zurück bewegen  
Die Ringe scheinen sich zu drehen



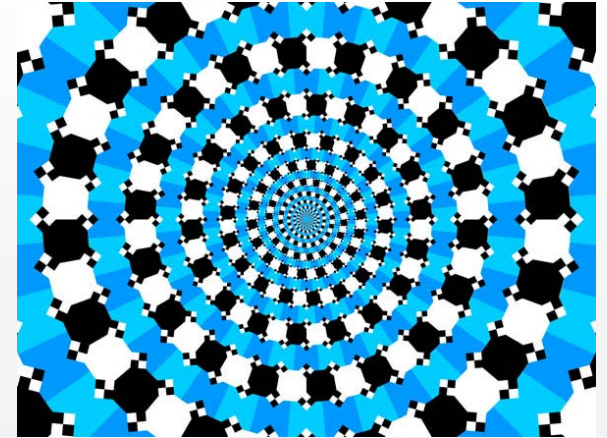
### Optische Täuschungen

Dies sind keine Animationen!!



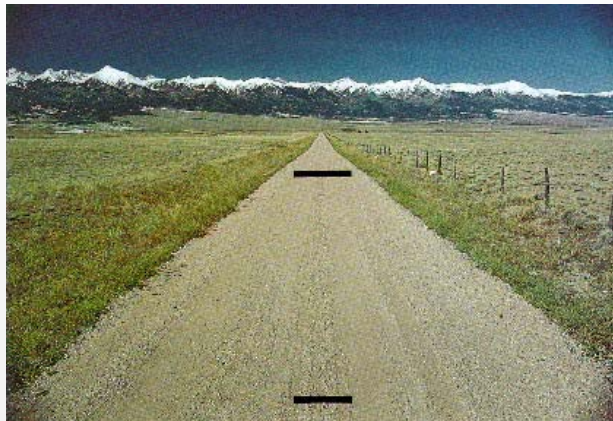
### Optische Täuschungen

Ist das eine blaue Spirale?  
Oder doch konzentrische  
Kreise?

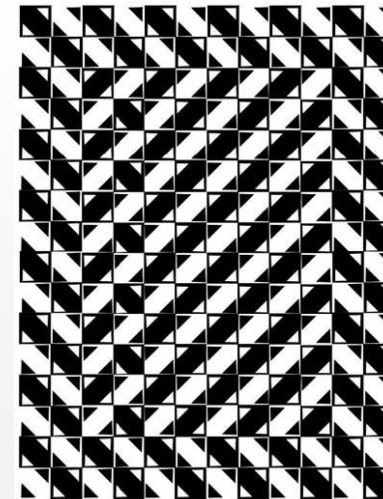


### Optische Täuschungen

Ponzo-Täuschung durch zusammenlaufende Linien  
Die Striche sind gleich lang, das Gehirn interpretiert das Bild in die Tiefe



### Optische Täuschungen



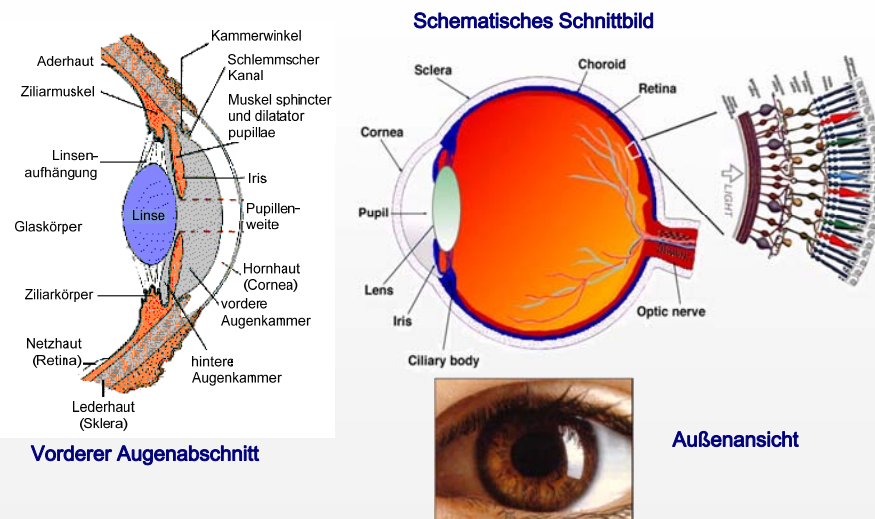
### Fakten rund ums Sehen

- **41 Millionen Deutsche** brauchen eine Brille, 35% sind weitsichtig, 25% kurzsichtig, 14% nachtblind.
- **Kurzsichtigkeit** nimmt weltweit zu, in **Asien** bereits bei **60%**.
- Es praktizieren in Deutschland **6500 Augenärzte** (zu wenige!)
- **10.000 Optiker** verkaufen in Deutschland **32 Millionen Brillengläser** pro Jahr
- **570.000 Deutsche** erhalten dieses Jahr eine Kunstlinse nach einer **Katarakt-OP**
- Immer noch sind **37 Millionen Menschen weltweit blind**. Nach Schätzungen der WHO leben 90% aller blinden und sehbehinderten Menschen in Entwicklungsländern.
- Viele Augenkrankheiten sind **Alterskrankheiten**. Sie sind weltweit im Zunehmen begriffen (vor allem in Industrienationen aufgrund der Demographie).
- **1920** brachte Carl Zeiss die erste serienmäßige **Kontaktlinse** der Welt auf den Markt.
- **1987** wurde erstmals ein **Laser** zur Hornhautchirurgie eingesetzt.

### Die Optik und Anatomie des Auges

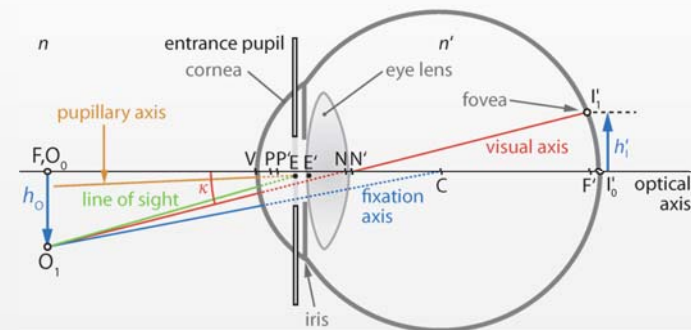


### Vorderer- und hinterer Augenabschnitt

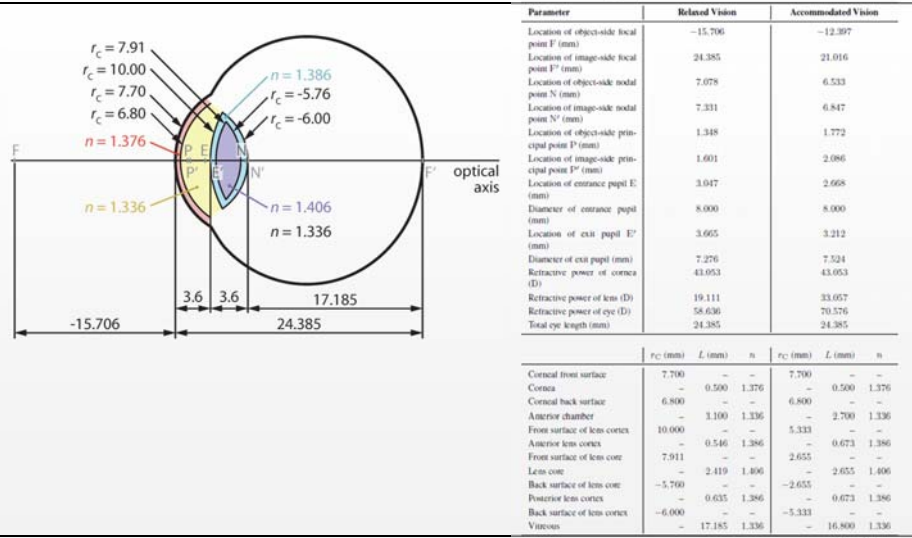


### Achsen des Auges

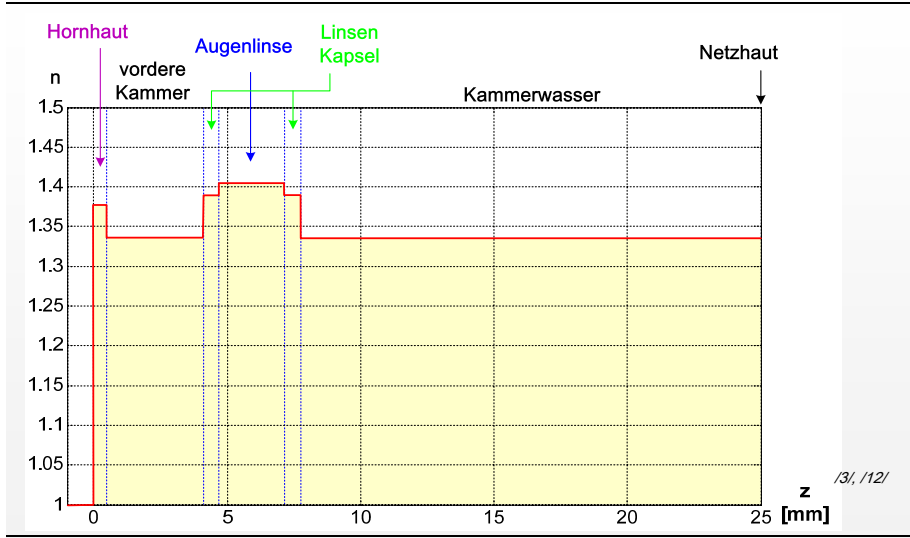
1. Optische Achse (optical axis): Senkrechte auf Cornea im Scheitel, geom. Symmetrie
2. Pupillen-Achse (pupillary axis): Senkrechte der Cornea → Pupillenzentrum
3. Sehachse (line of sight): Objekt → Knotenpunkt (nodal point)
4. Blick-Achse (fixation axis): Objekt → Pupillenzentrum



### Augendimensionen – Überblick (Gullstrand Auge)



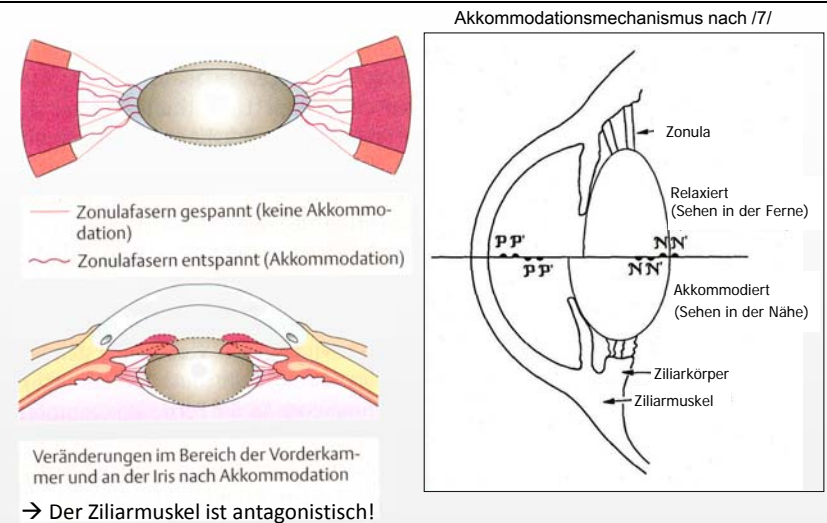
### Brechungsindizes - Verlauf von n entlang der optischen Achse



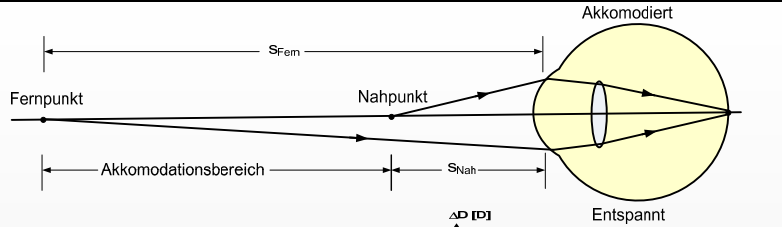
### Optische Daten des Auges

- Pupillendurchmesser: 1.5 mm (Sonne)  
8.0 mm (Nacht)
- Maximaler Feldwinkel (voll, Fovea): 5°  
Maximaler Feldwinkel (voll, Auge): 108°
- Wellenlänge größter Empfindlichkeit: 555nm
- Abbezahl der Materialien (ca.): 50.23
- Vordere Brennweite (PF):  $f = -17.185$  mm  
Hintere Brennweite (P'F):  $f' = 22$  mm
- Lage Eintrittspupille:  $s = -3.047$  mm
- Gesamtbrechkraft  $D = 1/F = n/F'$  ( $n=1,336$  Glaskörper)  $D_A = 59$  dpt
- Brechkraft Cornea  $D_C = 43$  dpt  
Brechkraft Linse  $D_L = 19$  dpt
- Entfernung Scheitel-Drehpunkt: 13.5 mm  
Entfernung Knotenpunkt-Scheitel: 7.33 mm  
Entfernung Hauptebene-Scheitel: 1.60 mm

### Akkommodation



### Akkommodation



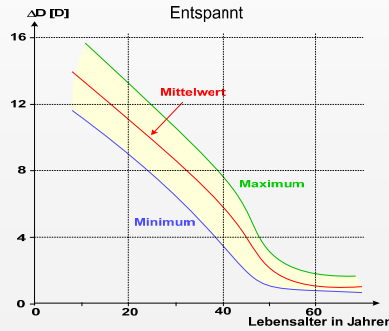
Akkommodationsbreite: max: 14 dpt

$$D_{akk}^{(Breite)} = \frac{1}{S_{fern}} - \frac{1}{S_{nah}}$$

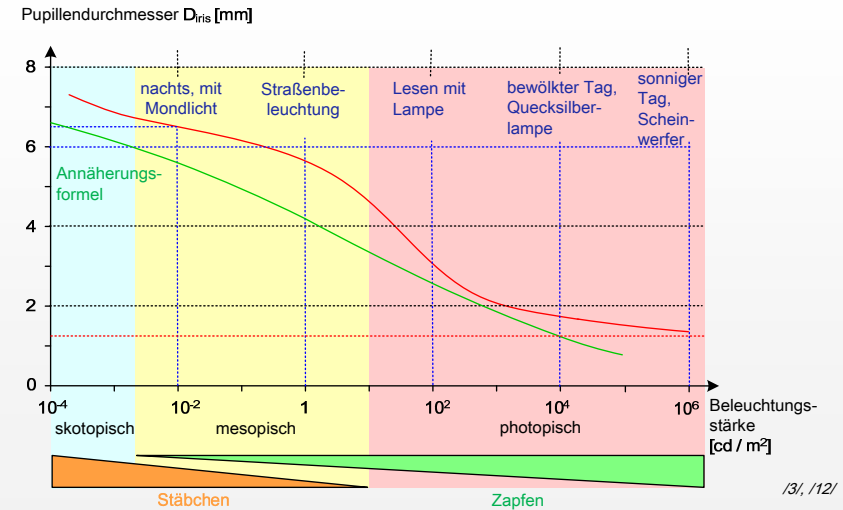
Brechkraft = Differenz der inversen Schnittweiten im Bezug auf den Fernpunkt

Die Akkomodationsamplitude AD ist dann:

$$D_{akk} = \frac{1}{S_{fern}} - \frac{1}{S}$$

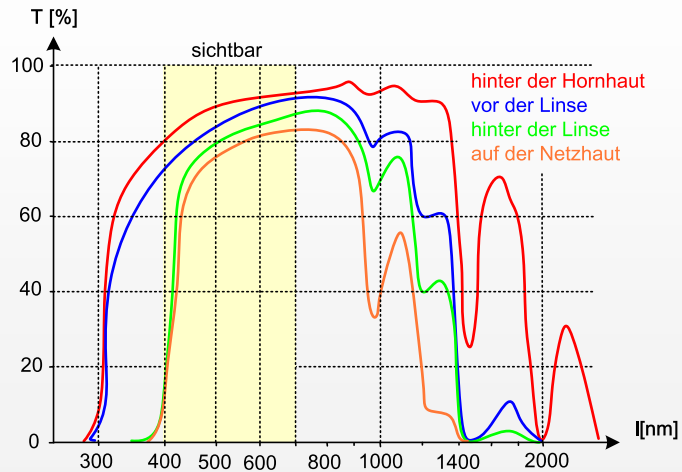


### Adaptation (Anpassung der Pupille an die Beleuchtungsstärke)



### Spektrale Transmission des Auges

Absorption der Augenmedien verhindern Retinaschäden, speziell (UV und IR)



### Auflösungsvermögen Optischer Instrumente - Rayleigh Kriterium

Es gelten zwei Lichtpunkte als aufgelöst, wenn der Abstand der beiden Hauptmaxima nicht geringer ist als der vom Maximum einer Beugungsfigur zu ihrem ersten Minimum:

$$\Delta x \geq \frac{0.61 \cdot \lambda}{NA} = R_{Airy}$$

$$NA = N.A. = n \cdot \sin \alpha \approx \frac{d}{2f}$$

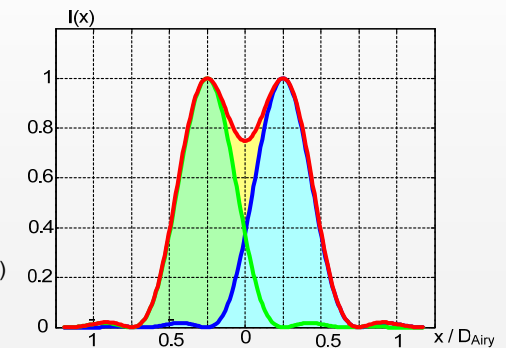
Für Auge:

Für  $\lambda = 550\text{nm}$ ,  $f = 17\text{mm}$ ,  $d = 4\text{ mm}$

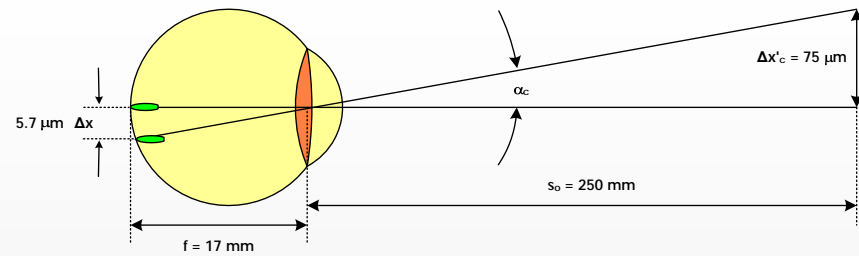
Durchmesser Airy-Scheibchen:

$$\Delta x = 2 \cdot 1.22 \cdot \lambda \cdot f / d = 5.7 \mu\text{m}$$

(Beugungsbegrenzte Auflösung des Auges)



### Winkelauflösung und Sehschärfe



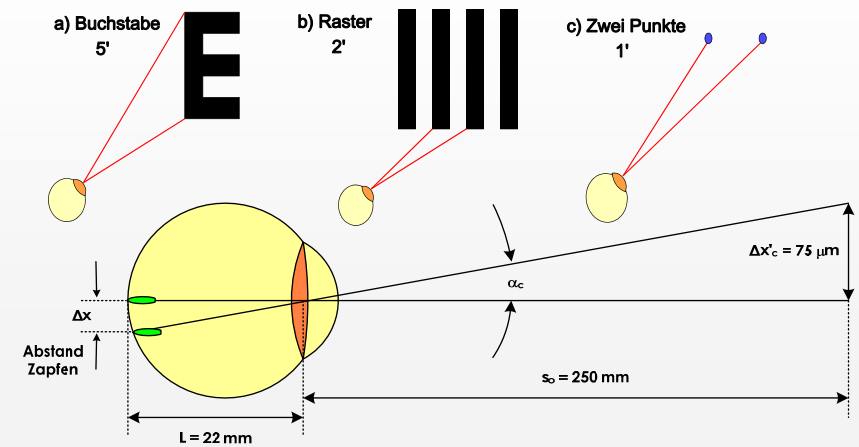
Sehschärfe  $\text{Visus} = 1 / \alpha$

Der Visus ist der Kehrwert der (in Winkelminuten gemessenen) angularen Sehschärfe.

Sehschärfewert **1,0 (Normalvisus)** entspricht einem angularen Auflösungsvermögen von einer **Winkelminute**.

### Auflösung des Auges, Sehschärfe

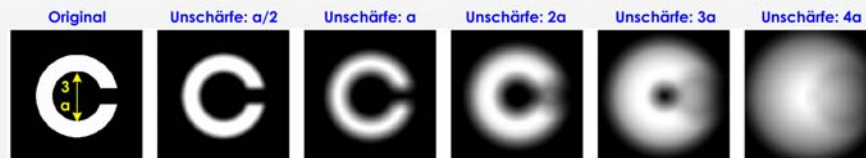
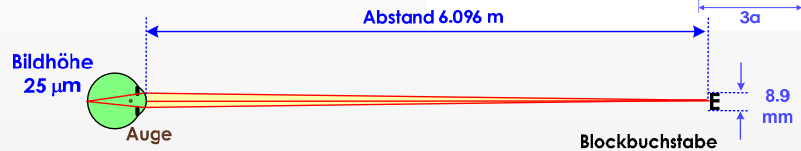
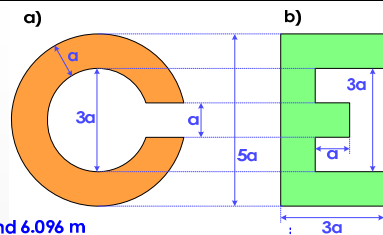
Quantitative Messung als Winkel, Näherungswert ca. 1'



### Sehschärfe (Visual Acuity)

Erkennung geometrischer Formen

- a) Landolt Ring
- b) Buchstabe E



### Sehschärfe

Visus des Auges hängt von verschiedenen Faktoren ab, nicht nur von der Optik:

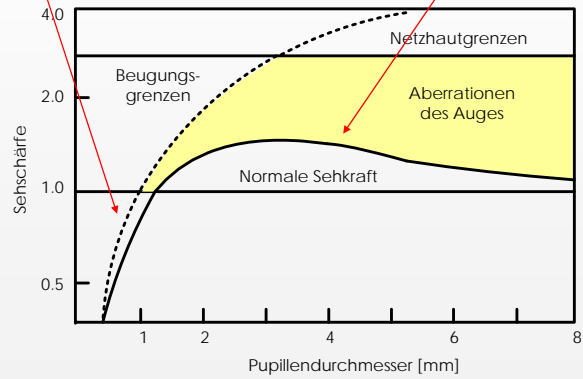
1. Geometrie : Form der Objektdetails
2. Physikalisch : Leuchtdichte und Farbe
3. Optisch : Qualität der Abbildung bzw. des Bildes auf der Retina
4. Anatomisch : Bildort auf der Retina, Lebensalter
5. Physiologisch : Adaptionszustand und Zustand des Sehnervs
6. Psychologisch : Aufmerksamkeit und Gewöhnung

### Sehschärfe und Pupillendurchmesser $d$

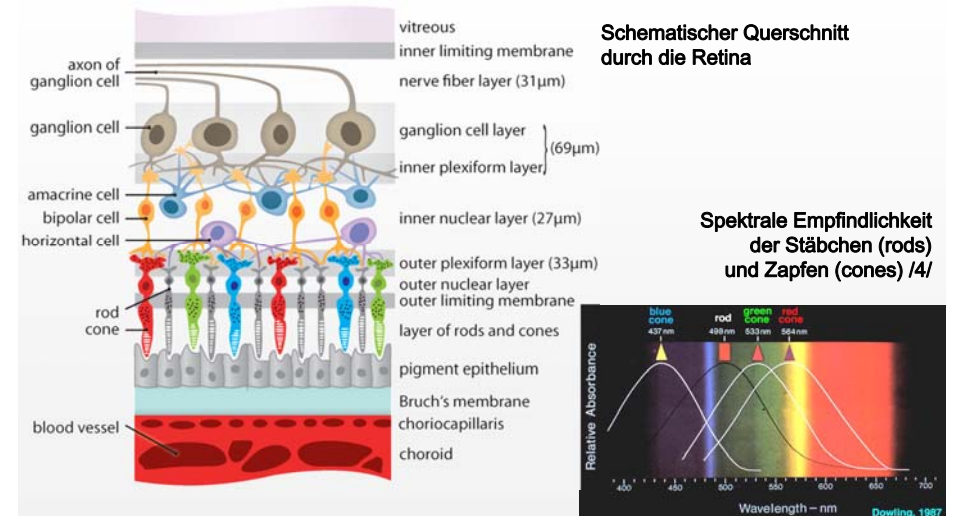
$Visus = 1/\alpha$     Angulare Sehschärfe:  $\alpha = 1,22 \cdot \lambda/d$

$Visus \sim d$  für kleine Pupille

Wachsender Pupillendurchmesser:  
Einfluss sphärischer Aberration, Visus stagniert bzw. geht zurück



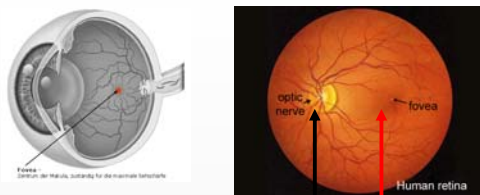
### Retina - Bildsensor des Auges



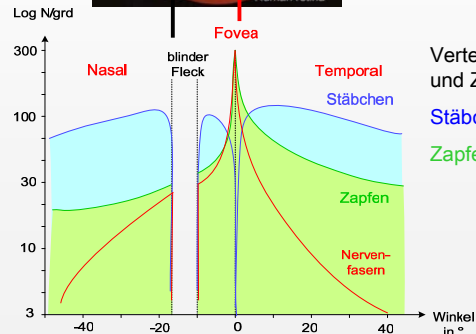
Schematischer Querschnitt durch die Retina

Spektrale Empfindlichkeit der Stäbchen (rods) und Zapfen (cones) /4/

### Retina - Verteilung der Rezeptoren (Stäbchen und Zapfen)



Fundusbild mit Fovea und Sehnervenkopf



Verteilung von Stäbchen und Zapfen auf der Retina.  
Stäbchen (rods)  
Zapfen (cones)

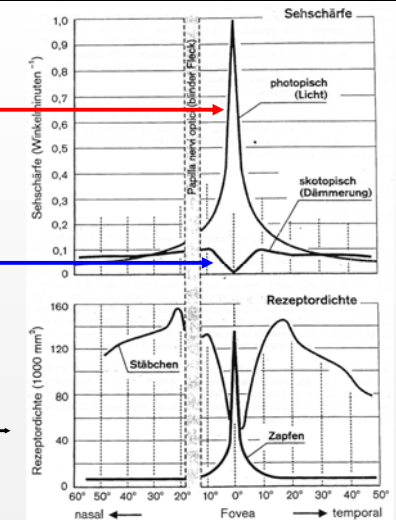
### Tages- und Dämmerungs - Sehschärfe

Bei **guter Umgebungshelligkeit** (Tagsehen = photopisch) Sehvermögen durch Zapfen

⇒ **maximale Sehschärfe in der Fovea**

Bei **geringer Umgebungshelligkeit** (Dämmerungssehen = skotopisch) Sehvermögen nur durch Stäbchen

Zapfen sind zu unempfindlich!  
⇒ **maximale Sehschärfe außerhalb der Fovea**



Rezeptorenverteilung sowie photopische und skotopische Sehschärfe /1/

### Augenkrankheiten

REFRAKTIONSFEHLER KATARAKT



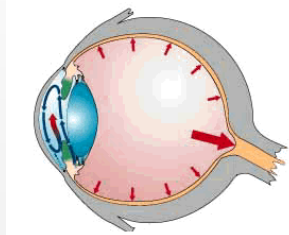
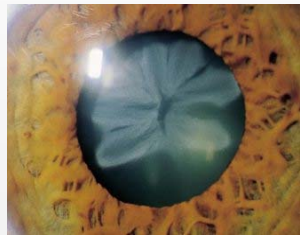
NORMALES SEHEN



RETINA-ERKRANKUNGEN GLAUKOM

## Optische Systeme in der Medizintechnik

### Augenkrankheiten



### Refraktionsfehler: Seheindruck bei Fehlsichtigkeit



#### Myopie

- scharfe Abbildung in der Nähe
- verschwommenes Sehen in der Ferne



Zum Vergleich ist das Sehen bei **Emmetropie** gezeigt.



#### Hyperopie, Presbyopie

- scharfe Abbildung in der Ferne
- verschwommenes Sehen in der Nähe



#### Astigmatismus

- verzerrtes Sehen in der Ferne und Nähe (Stabsichtigkeit)

### Abbildungsfehler des Auges

#### 1. Kurzsichtigkeit ( Myopia ) :

Man kann nur in der Nähe scharf sehen, für größere Entfernungen kann das Auge nicht mehr akkomodieren. Grund: Auge zu lang oder Augenlinse hat zu kurze Brennweite.

#### 2. Weitsichtigkeit ( Hyperopia ) :

Man kann nur in der Ferne scharf sehen. Grund: Auge zu kurz oder Brechkraft der Augenlinse zu klein. Tritt im Alter auf, wenn die Akkomodationsfähigkeit des Auges nachlässt.

#### 3. Astigmatismus :

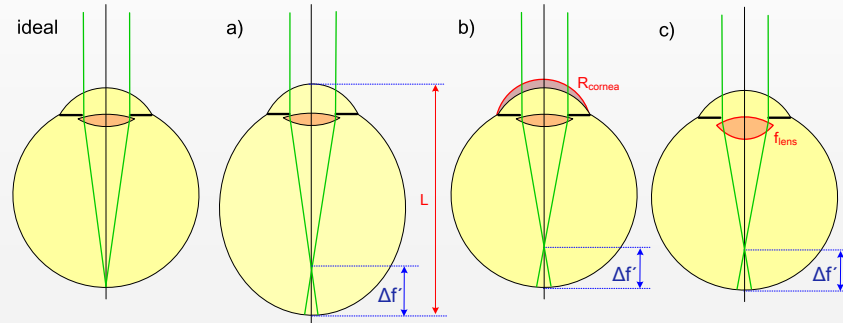
Unterschiedliche Brechkraft des Auges im Horizontal- bzw. Vertikalschnitt.

#### 4. Aniseikonia :

Unterschiedliche Vergrößerung beider Augen.

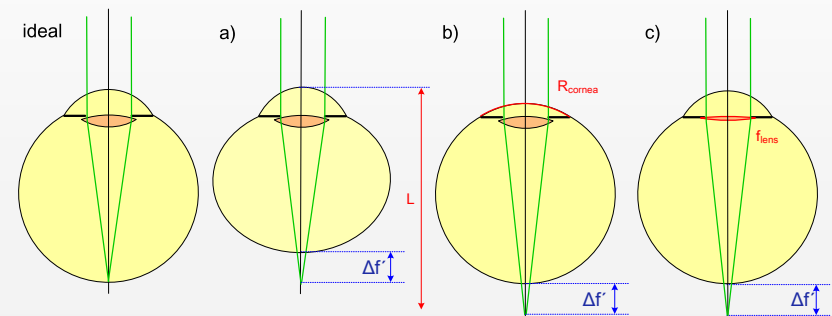
### Myopie (Kurzichtigkeit)

- a) Auge zu lang
  - b) Krümmung der Cornea zu stark
  - c) Brennweite der Linse zu klein
- Korrektur mit negativer Linse.



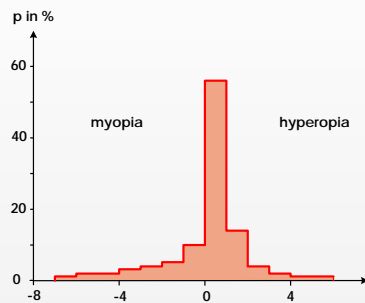
### Hyperopie (Weitsichtigkeit)

- a) Auge zu kurz
  - b) Krümmung der Cornea zu schwach
  - c) Brennweite der Linse zu lang
- Korrektur mit positiver Linse, teilweise Eigenkorrektur durch Akkomodation.

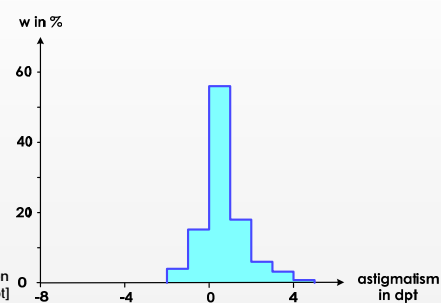


### Statistik der Refraktionsfehler

Wahrscheinlichkeit für Refraktionsfehler



Wahrscheinlichkeit für Astigmatismus



### Katarakt (Cataract), Grauer Star

KATARAKT

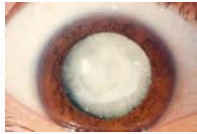


NORMALES SEHEN



20 Millionen Operationen jährlich!

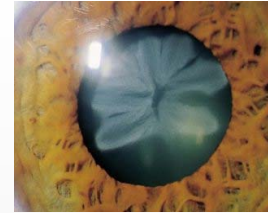
### Woher kommt der Name „Grauer Star“ ?



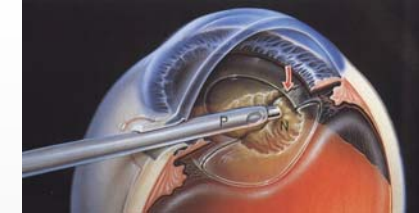
Der augenheilkundliche Begriff „Star“, verselbständigt aus „starblind“ (abgeleitet vom starren Blick der Blinden). Der Begriff ist verwandt mit nhd. „starr“ – bezeichnet heute nur noch die Augenkrankheiten „grauer Star“ (Katarakt) und „grüner Star“ (Glaukom).



### Katarakt-Operation



Eintrübung der Augenlinse



Entfernen der getrübten Linse



Grauer Star (Katarakt)



Einsetzen der Kunst-Linse (IOL)

### Erkrankungen des hinteren Augenabschnitts (DR, AMD, Glaukom)



NORMALES SEHEN



RETINA-ERKRANKUNGEN GLAUKOM

Erkrankungen des hinteren Augenabschnittes

**Diabetische Retinopathie (DR):** Netzhauterkrankung als Folge von Zuckerkrankheit

**Altersbedingte Makula-Degeneration (AMD):** Erkrankung an der Stelle des schärfsten Sehens

**Grüner Star oder Glaukom:** druckinduzierte Schädigung der retinalen Sehnervenfasern

### Altersbedingte Makuladegeneration (AMD)

Schädigung der **Makula** des Auges, d.h. an der Stelle des **schärfsten** Sehens AMD mindert zwar das Sehvermögen im zentralen Teil der Netzhaut, beeinträchtigt jedoch nicht das periphere Sehvermögen des Auges. Betroffene sind nicht völlig blind aber stark sehbehindert.

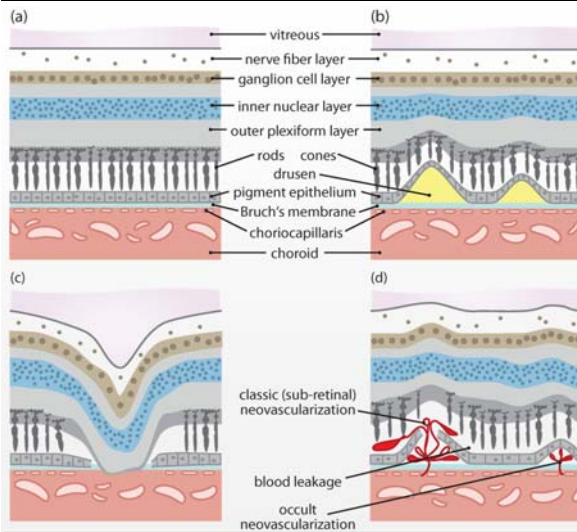
AMD ist stark alterskorreliert (Teil des natürlichen Alterungsprozesses des Körpers !?)

Die beiden häufigsten Arten altersbedingter makulärer Degeneration sind die "**trockene**" und "**feuchte**" AMD.

Die meisten Menschen haben "trockene" makuläre Degeneration, die durch den Alterungsprozess des Makulagewebes hervorgerufen wird. Der Sehverlust findet normalerweise allmählich statt.

Die "feuchte" makuläre Degeneration betrifft etwa 10 % aller Fälle. Sie entsteht, wenn sich im Bereich der Aderhaut krankhafte Blutgefäße bilden. Aus diesen neuen Blutgefäßen sickert Flüssigkeit oder Blut unter und in die Netzhaut des Sehentrums. Sie machen das zentrale Sehen verschwommen. Die Folge ist u.U. rapider und starker Sehverlust.

### Altersbedingte Makula-Degeneration (AMD)



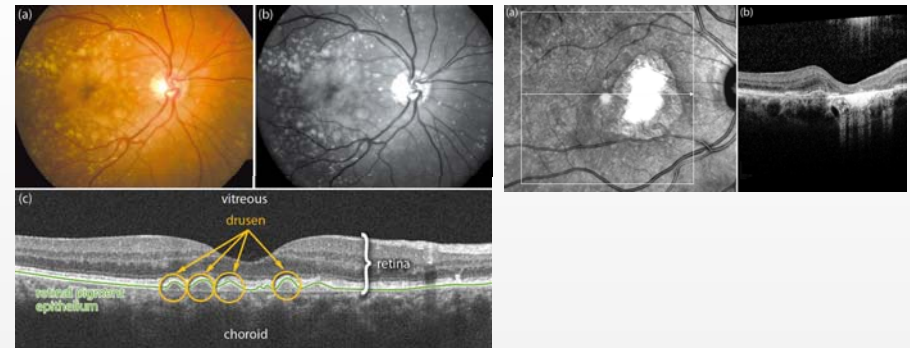
With macular degeneration, print may appear distorted, and the size of words may be missing.



### Altersbedingte Makula-Degeneration (AMD)

Makulopathie (Vorstufe/Frühstadium)

Trockene AMD



### Diabetische Retinopathie (DR)

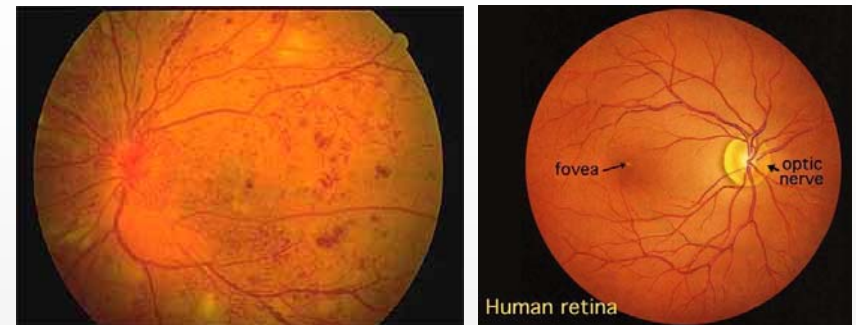
Als diabetische Retinopathie werden krankhafte Veränderungen (Blutungen, Gefäßneubildungen) der Netzhautgefäße infolge langandauernder Zuckerkrankheit (Diabetes) bezeichnet.

Nach 20-jährigem Bestehen eines Diabetes muss bei 80-90% der Diabetiker mit dem Auftreten von Netzhautveränderungen gerechnet werden. Ca. 2% aller Diabetiker erblinden.

Die DR ist nach der altersbedingten Makuladegeneration (AMD) die zweithäufigste Erblindungsursache im Erwachsenenalter.

Durch konsequente Blutzuckerkontrolle kann die Eintrittswahrscheinlichkeit einer DR stark vermindert werden. Durch Laserkoagulation der betroffenen Netzhautareale kann das Erblindungsrisiko deutlich reduziert werden.

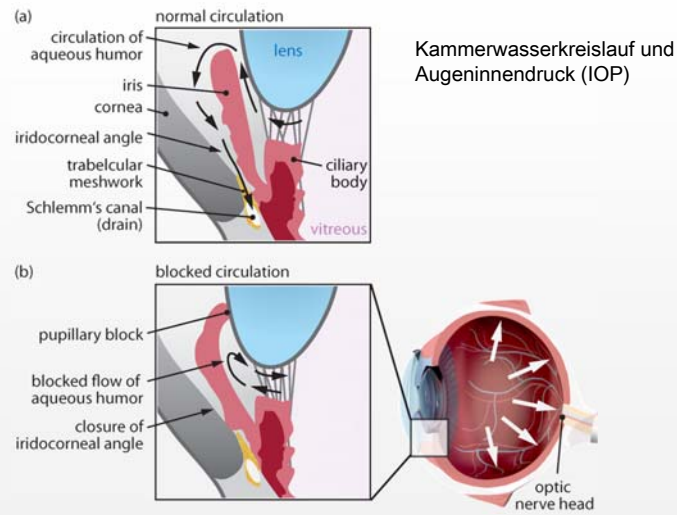
### Diabetische Retinopathie (DR)



Fundusbild bei DR  
- Mikro-Aneurysmen  
- Blutungen

Normaler Fundus

### Glaukom, Grüner Star



### Glaukom, Grüner Star

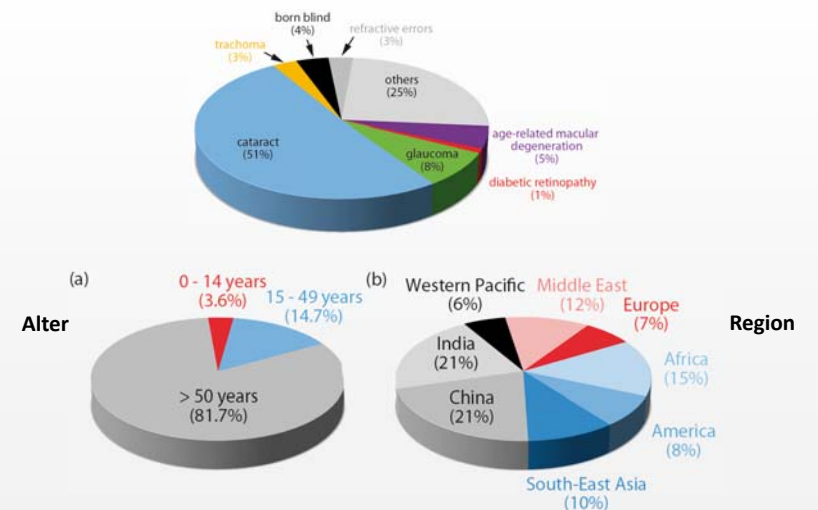


### Haupterblindungsursachen (Industrienationen)

Erkrankungen des hinteren Augenabschnitts (meist altersbedingt!) sind gegenwärtig die Haupterblindungs-ursachen in den **Industrieländern**, da die therapeutischen Möglichkeiten begrenzt sind.

→ Zur Diagnostik und Therapie dieser Erkrankungen werden viele unterschiedliche opto-elektronische und Laser-Geräte eingesetzt.

### Haupterblindungsursachen und Verteilungen (weltweit)



## Exercises

## Pl.1. Size of the retinal image

The retinal image size can be calculated via

$$|h_i| = \kappa \cdot \overline{NT}_0 \quad (3.7)$$

$$|h_i| = |h_o| \cdot \frac{\overline{NT}_0}{\overline{O_1R}} \quad (3.8)$$

with  $\kappa = -\frac{h_o}{\overline{O_1R}}$  (Section 2.1.3).

For an object which is located at infinity (relaxed eye) and with a mean refractive power of the eye of 60 D, we can derive the relation

$$|h_i| \approx 16.667 \text{ mm} \cdot \kappa \quad (3.9)$$

If  $\kappa$  is given in degrees, the relation can also be expressed by:

$$|h_i| \approx 0.291 \text{ mm} \cdot \kappa^\circ \quad (3.10)$$

with  $\kappa = -\frac{h_o}{\overline{O_1R}}$  (Figure 2.3).

- Derive Eq. (3.9) and (3.10).
- Calculate the size of the retinal image for a tower (50 m high at a distance of 1 km), a person (1.8 m high at a distance of 10 m), a thumb (diameter of 2 cm at a distance of 60 cm), and for the full moon ( $\kappa = 0.5^\circ$ ).

## Exercises

## Pl.3. Reflectance of the cornea:

Calculate the reflectance of the cornea at the vertex using the Fresnel equations (A4).

**Solution:**

The Fresnel equation (A.4) is derived from the more general Fresnel equation (A.65) for the special case of a normal incident ray ( $\gamma = 0^\circ$ ) and neglected absorption by:

$$R = \left( \frac{n - n'}{n + n'} \right)^2$$

For the cornea, we have  $n = 1$  and  $n' = 1.376$  according to Exact Gullstrand Eye #1 (Fig. 21.3).

$$R = \left( \frac{n - n'}{n + n'} \right)^2 = \left( \frac{1 - 1.376}{1 + 1.376} \right)^2 = 0.025.$$

Thus, the reflectance of the cornea at the vertex for a normal incident ray is 2.5%.

## Exercises

## Pl.4. Radius of curvature

Variations of the corneal radius of curvature  $\Delta r_c$  mean a change of the corneal refractive power  $\Delta D$  which can be calculated via

$$\Delta D' \approx -\frac{\Delta r_c \cdot D_c^2}{n_c - 1} \quad (3.11)$$

where  $D_c'$  is the refractive power of the corneal front surface and  $n_c$  the refractive index of the cornea.

- Derive Eq. (3.11).
- Verify the following statement for an emmetropic Gullstrand Eye: A variation of the corneal radius of curvature by  $\pm 0.1 \text{ nm}$  changes the eye's refractive power by approximately  $\mp 0.6 \text{ D}$ .

## Exercises

## Pl.7 Resolving power of the eye

- In order to determine the refraction of an eye, the standard letter "E" is placed at a distance of 2 ft (= 6096 mm) from the eye. Calculate the size of the letter for a visual acuity of  $V = 1$ .



- The retinal image resembles the image shown in the Figure 3.19. Calculate the image size on the retina and compare the result to the distance of the retinal cones (in the fovea).
- Sometime in the future, we will be visited by aliens from the planet XIR2050 whose star emits light only in the red and infrared spectral range and whose atmosphere allows only near-infrared light (wavelengths between 1 and 1.5  $\mu\text{m}$ ) to pass through. The eyes of the aliens are adapted to these conditions and the aliens' visual acuity is similar to that of our eyes. How will they fare on Earth? If you were to be selected to travel to XIR2050, how would you prepare for your visit? What should you expect to be faced with on this planet?