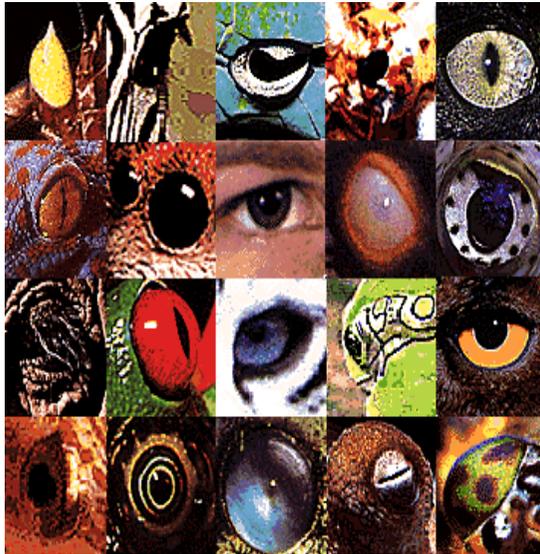


# BIOPHYSIK

10. Vorlesung

## Sehen, Optik des Auges



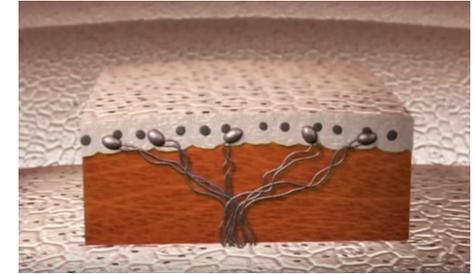
1

## Entwicklung des Sehorgans 1.

Regenwurm  
hat keinen Augen



Nur im Haut eingelagerte  
lichtempfindliche Zellen

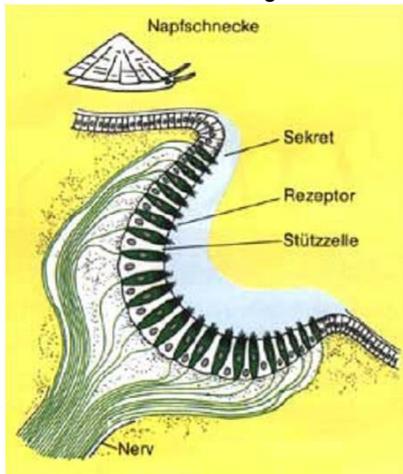


„seht“ nur dunkel oder hell

2

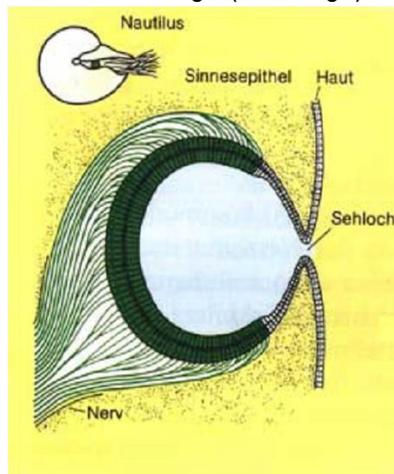
## Entwicklung des Sehorgans 2.

Grubenaug



Richtungssehen ist möglich

Blasenaug (Lochaug)

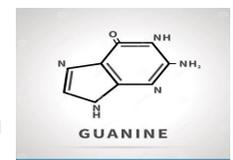
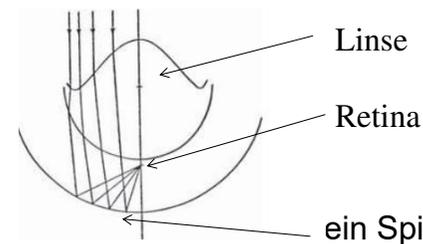


funktioniert wie eine Lochkamera

3

## die Augen von Muscheln

- haben etwa 200 kleine Augen

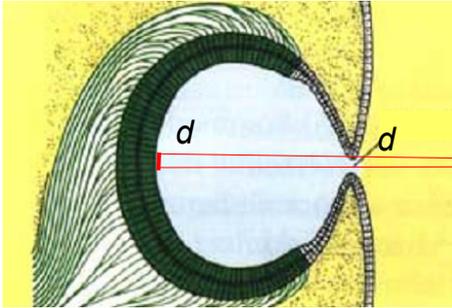


4

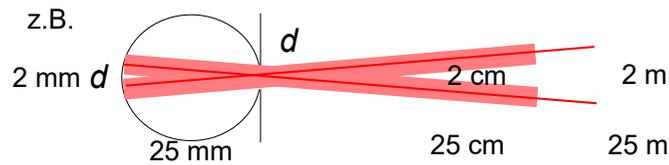
Auflösung des Blasenauges:

Nachteile:

- ⊗ geöffnet
- ⊗ nicht punktförmige Abbildung
- ⊗ schwache Auflösung



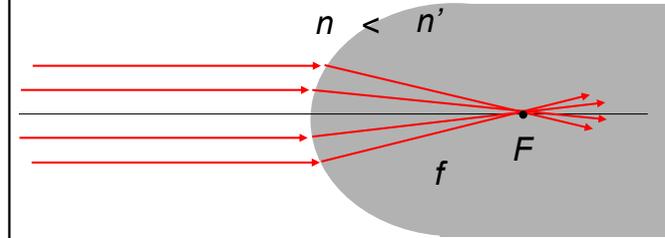
Ausbreitung des Fleckes  $\approx$  Sehlochweite ( $d$ )



$\Rightarrow$  kleinere  $d$  ist notwendig für bessere Auflösung

$\Rightarrow$  Intensitätsverlust und Beugung

## Lichtbrechung an einer gekrümmten Grenzfläche



für achsennahe Strahlen:

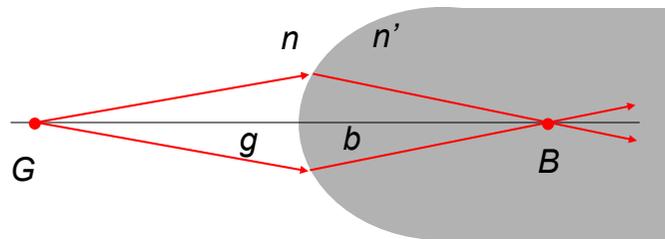
$$f = R \frac{n'}{n' - n}$$

Brechkraft der Grenzfläche ( $D$ ):  $D = \frac{n'}{f} = \frac{n' - n}{R}$

$n$  : Brechzahl des 1. Mediums  
 $n'$  : Brechzahl des 2. Mediums  
 $R$  : Krümmungsradius  
 $> 0$  für konvexe Fläche  
 $< 0$  für konkave Fläche

$D > 0 \Rightarrow$  Sammlung  
 $D < 0 \Rightarrow$  Zerstreuung  
 der Lichtstrahlen

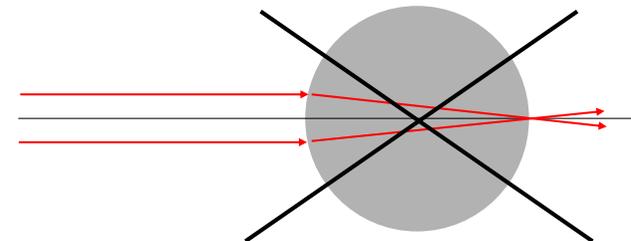
## Bildentstehung durch eine gekrümmte Grenzfläche



$$D = \frac{n}{g} + \frac{n'}{b}$$

Abbildungsgleichung

## Einfache Kugel als Auge?

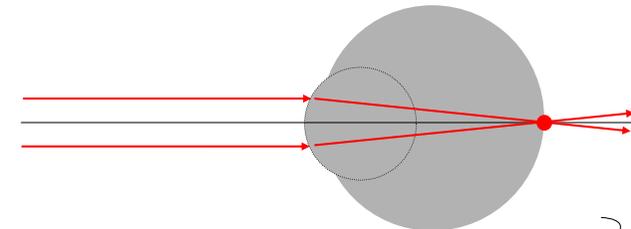


$$f \leq 2R$$

$$f = R \frac{n'}{n' - n} \leq 2R$$

$$n = 1 \Rightarrow n' \geq 2!!$$

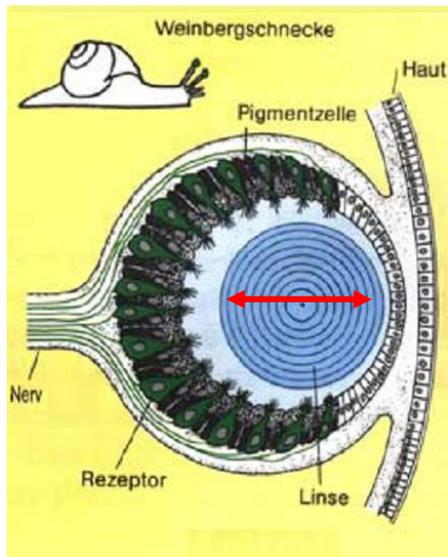
Das müsste  
Diamant sein



$$\left. \begin{array}{l} n' = 1,333 \\ f = 2R = 25 \text{ mm} \end{array} \right\} \Rightarrow r \approx 6,25 \text{ mm}$$

## Entwicklung des Sehorgans 3.

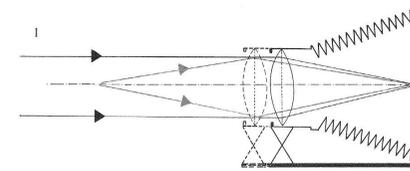
### Linsenauge



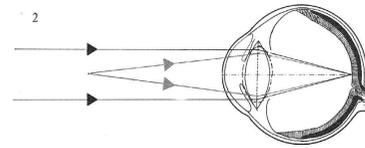
Akkomodation  
Focus ist fix  
Linse bewegt sich  
vorne und hinter

9

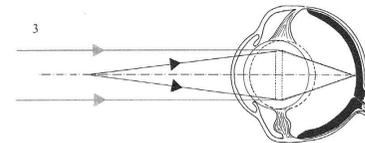
## Die Augen von Fische



*mechanisches Modell*



*Mensch*

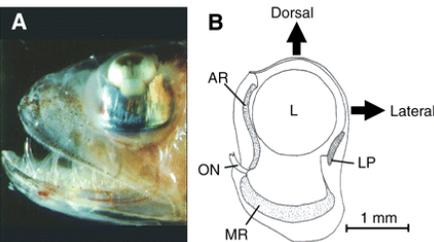


*Fisch*

## Tiefsee Fische haben interessante Augen



*Scopelarchus analis*  
*teleskopische Augen*  
*tubular eye*



von der Seite sieht nicht  
scharf  
nur von unten

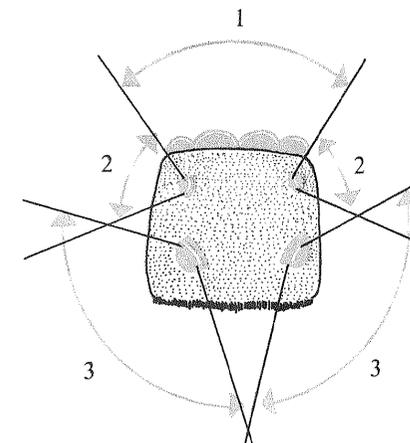
*J Exp Biol August 2007 vol.*  
*210 no. 16 2829-2835*

(A) Photograph of the tubular eye, courtesy of Prof S. Collin. (B) Diagram of a vertical section through the eye. AR, accessory retina; L, lens; LP, lens pad; MR, main retina; ON, optic nerve. .

## Die 8 Augen von Springspinne



Schwarze-Springspinne  
*Evarcha arcuata*



1 Kopfaugen in die ferne zu sehen  
2 Stirn- und Seitenaugen vorne und seitlich zu sehen  
3dimensional  
3 Nebenaugen, grosswinklig global zu sehen

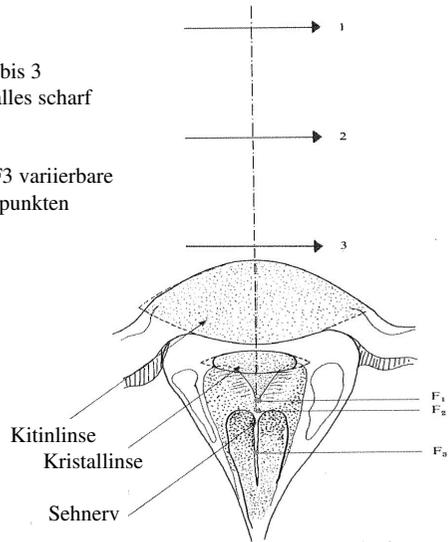
<http://www.natur-lexikon.com/Texte/MZ/001/00099-schwarze-Springspinne/MZ00099-Schwarze-Springspinne.html>

# Die Augen von Isia Isabella Raupe

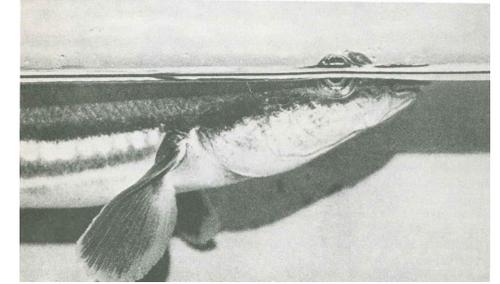


von 1 bis 3  
sieht alles scharf

F1 – F3 variierbare  
Fokuspunkte

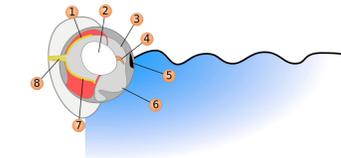
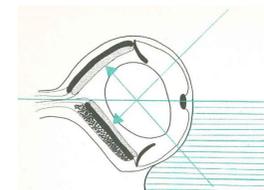


# Vierauge



Vierauge (*Anableps anableps*)

lebt in Brasilien und Mittelamerika



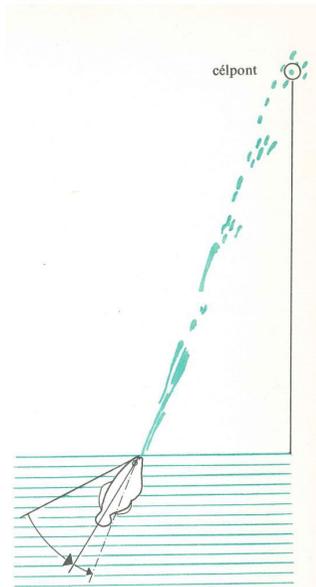
Aufbau des Auges: 1. Unterwasserretina 2. Linse  
3. Luftpupille 4. Scheidewand 5. Iris 6.  
Unterwasserpupille 7. Luftretina 8. Nerv

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

# Jagdtechnik von Schützenfish



Winkel: etwa 70 - 80 grad – keine grosse Lichtbrechung  
Startgeschwindigkeit vom Wasser: 4 m/s  
Genau bis: 120 cm



# Akkomodation?

**Fernsicht:**

$$g_f = \infty$$

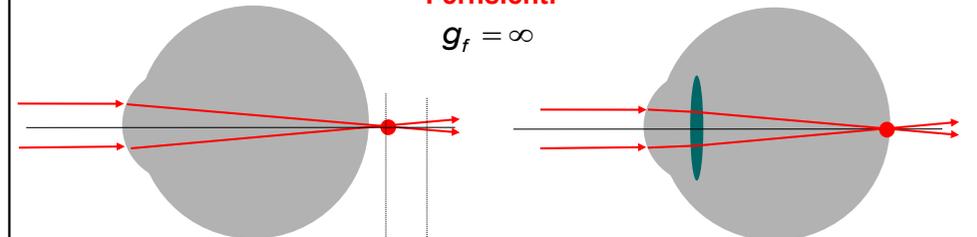
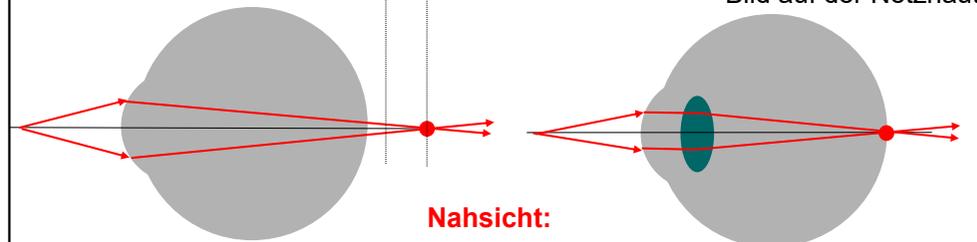


Bild auf der Netzhaut

**Nahsicht:**

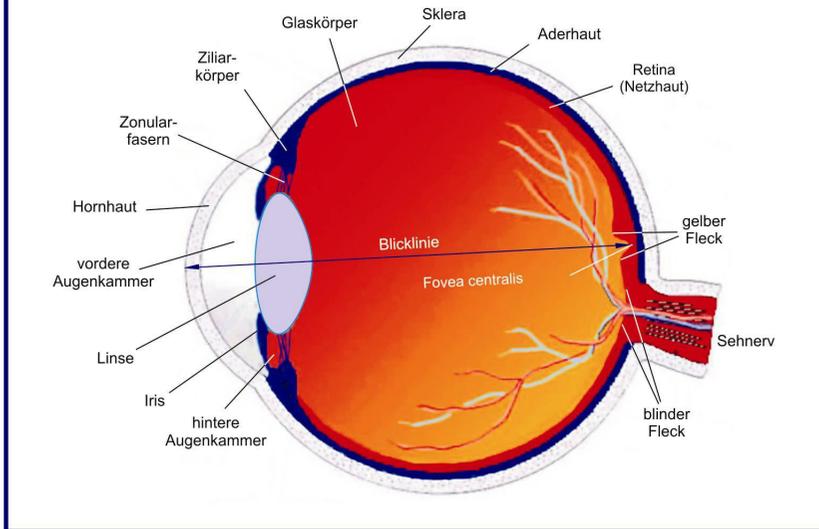
$$g_n \ll \infty$$



Das Auge muss seine Brechkraft variieren können.

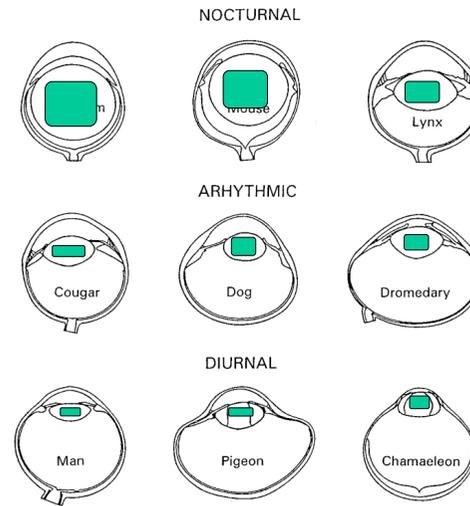
## Aufbau des Auges

### AUFBAU DES AUGES



17

## Linsengrößen



Nachtaktive Tiere  
Nocturnal haben die  
grösste Augenlinsen  
Opossum, Maus, Luchs

“Arhythmic” Tiere  
Puma, Hund, Dromedar

tägliche Lebewesen  
Mensch, Taube,  
Chamäleon die  
kleinste Augenlinsen

## $D = \frac{n' - n}{R}$ Brechkraft des menschlichen Auges

$D$ : Brechkraft (dpt)

$n$ : Brechzahl des 1. Mediums

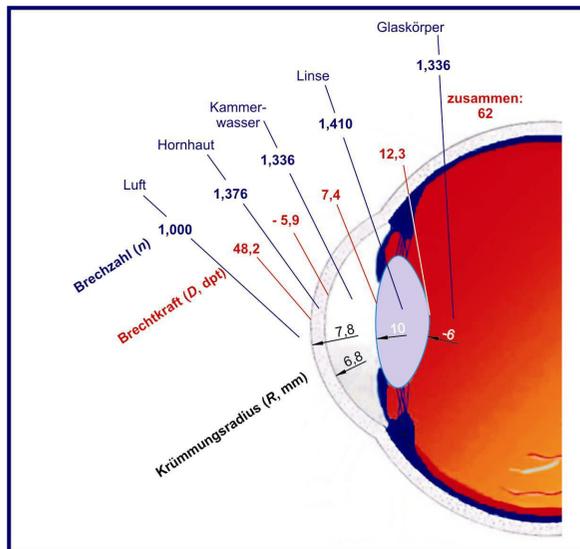
$n'$ : Brechzahl des 2. Mediums

$R$ : Krümmungsradius (m)  
+ für konvexe Fläche  
- für konkave Fläche

z.B Luft-Hornhaut

$$D = \frac{1,376 - 1}{0,0078} = 48,2 \left( \frac{1}{m} \right)$$

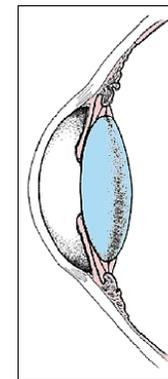
Resultierende Brechkraft bei  
dünnen Linsen mit kleinem  
Abstand:  $D_r = D_1 + D_2 + \dots + D_n$



Zahlen sind für

19

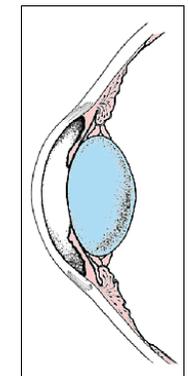
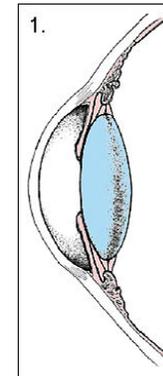
## Akkommodation



Ferneinstellung

Fernpunkt:  $g_f$

Entspannte Muskelfaser



Naheinstellung

Nahpunkt:  $g_n$

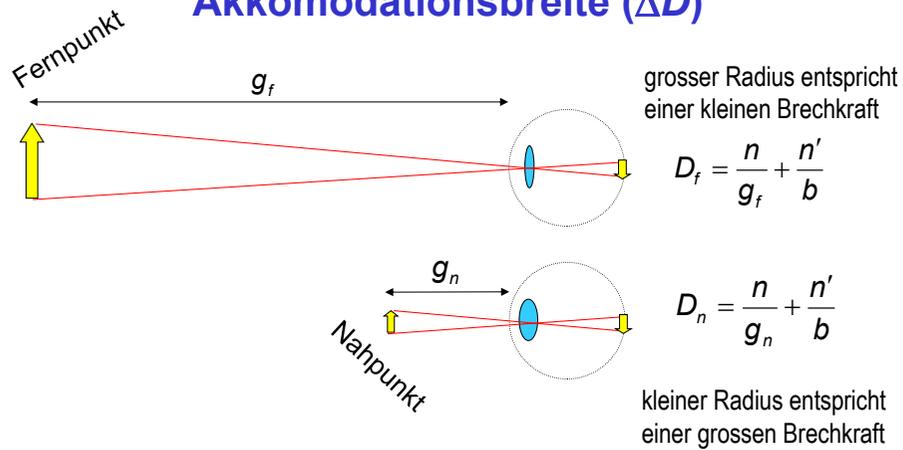
Gespannte Muskelfaser

Das Auge muss seine Brechkraft um 8-10 dpt variieren können.

Das Auge verändert die Brechkraft durch Veränderung des Linsenradius  
(vg. Linsenschleifergleichung).

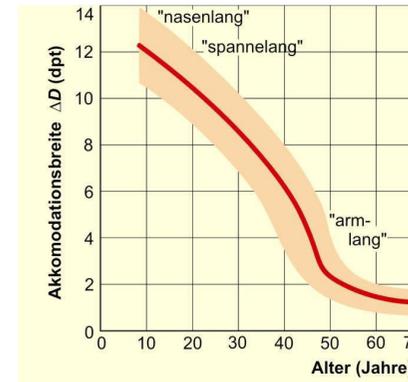
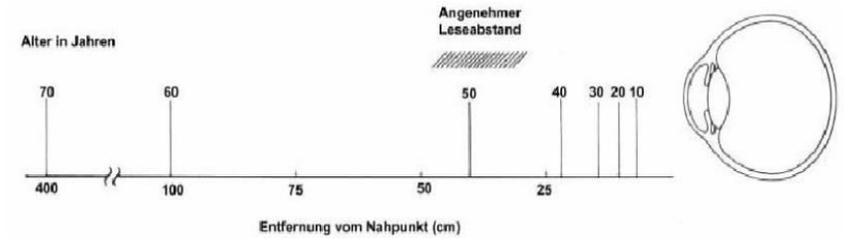
20

# Akkommodationsbreite ( $\Delta D$ )



z.B.  $\left. \begin{matrix} g_f = \infty \\ g_n = 0,1\text{m} \end{matrix} \right\} \Rightarrow \Delta D = 10 \text{ dptr}$

$$\Delta D = D_n - D_f = \frac{1}{g_n} - \frac{1}{g_f}$$



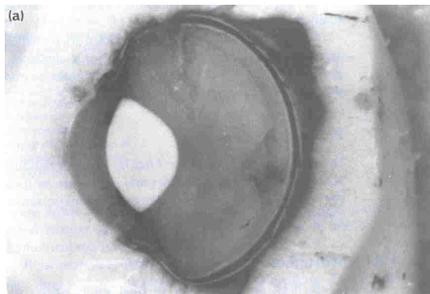
Der Nahpunkt verschiebt sich mit dem Alter in immer Grössere Entfernungen.

Die Akkomodationsbreite verkleinert sich mit dem Alter.

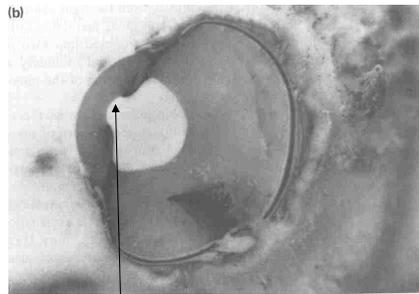
## Extremes Beispiel: Induzierte Akkomodation einer Ente



Stockenten-Paar (Anas platyrhynchos)



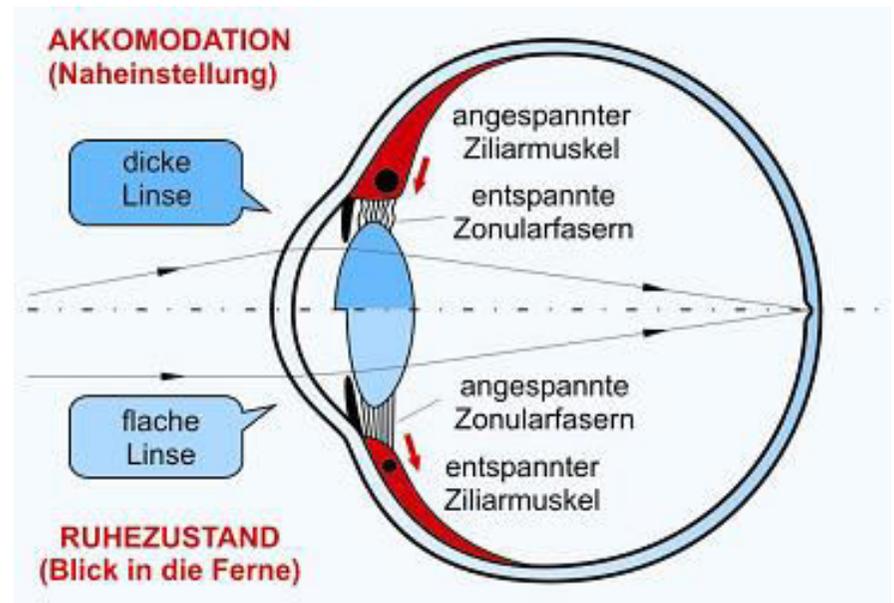
auf dem Land

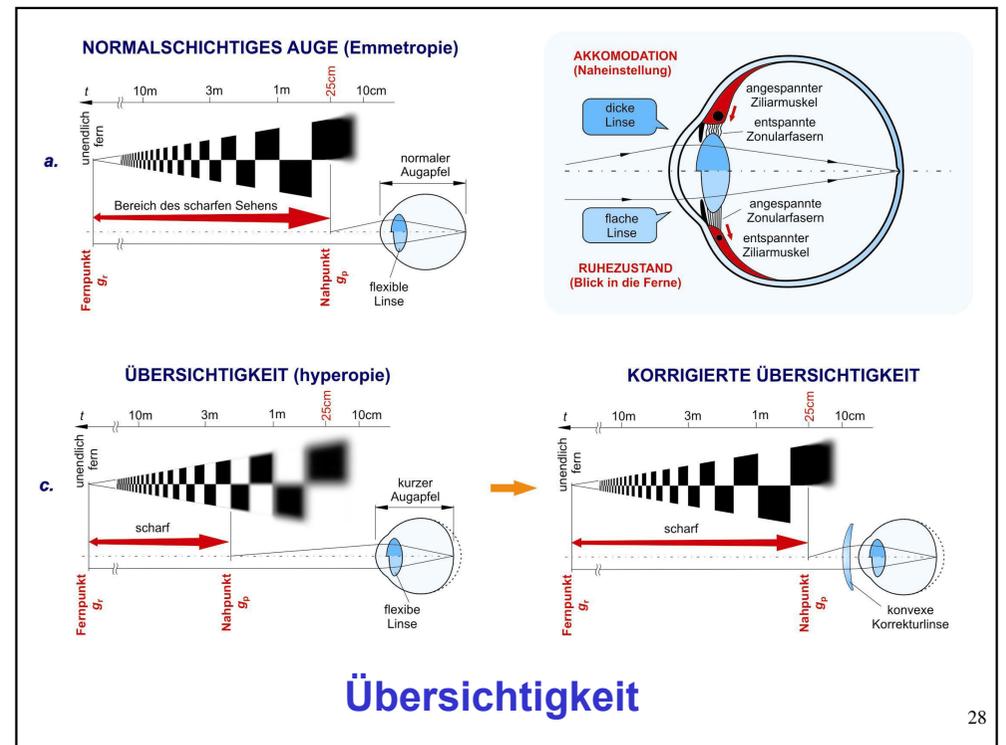
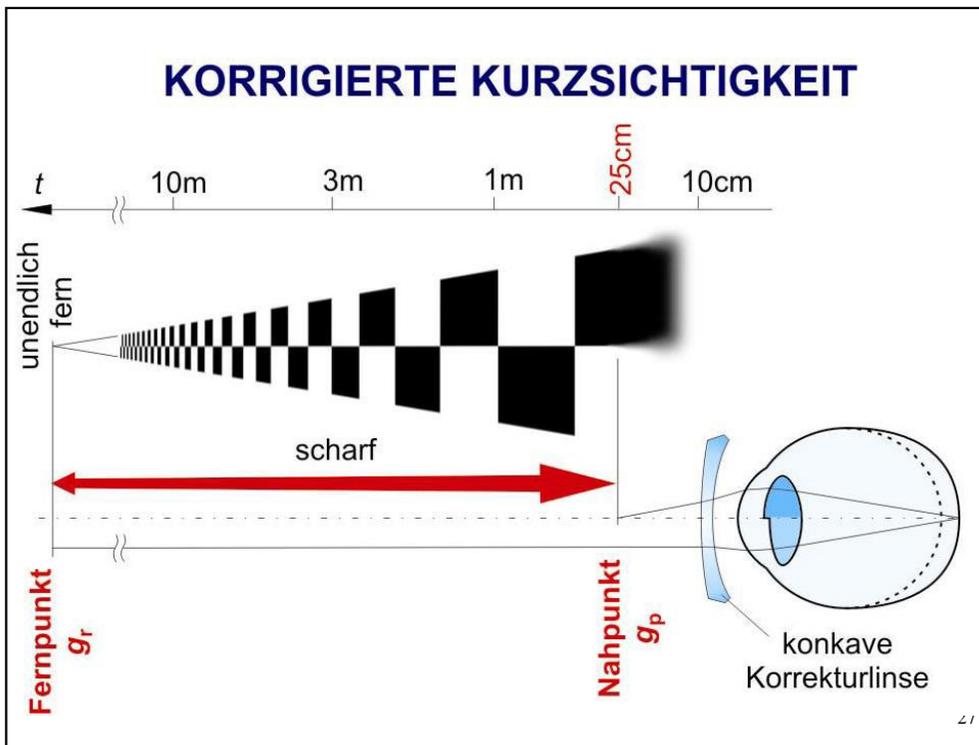
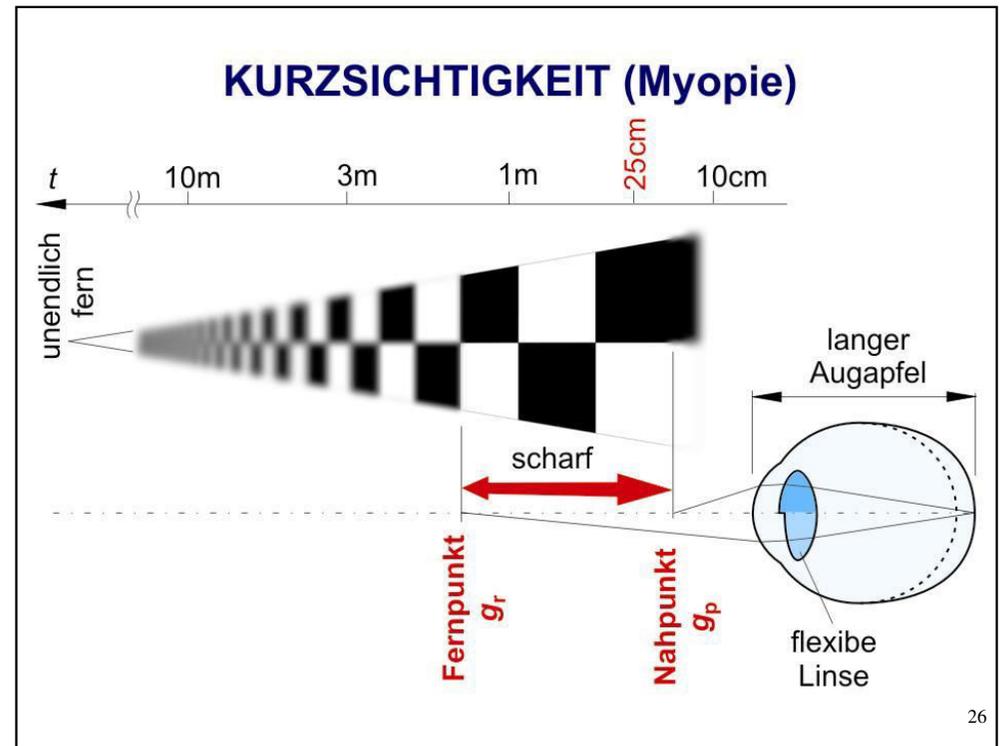
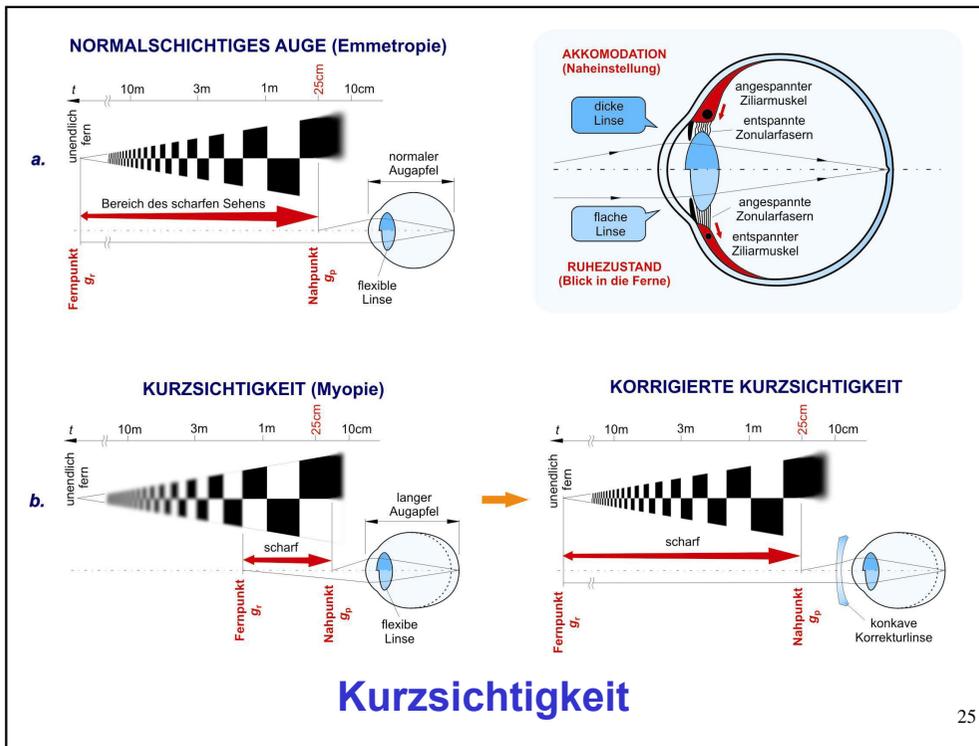


unter Wasser

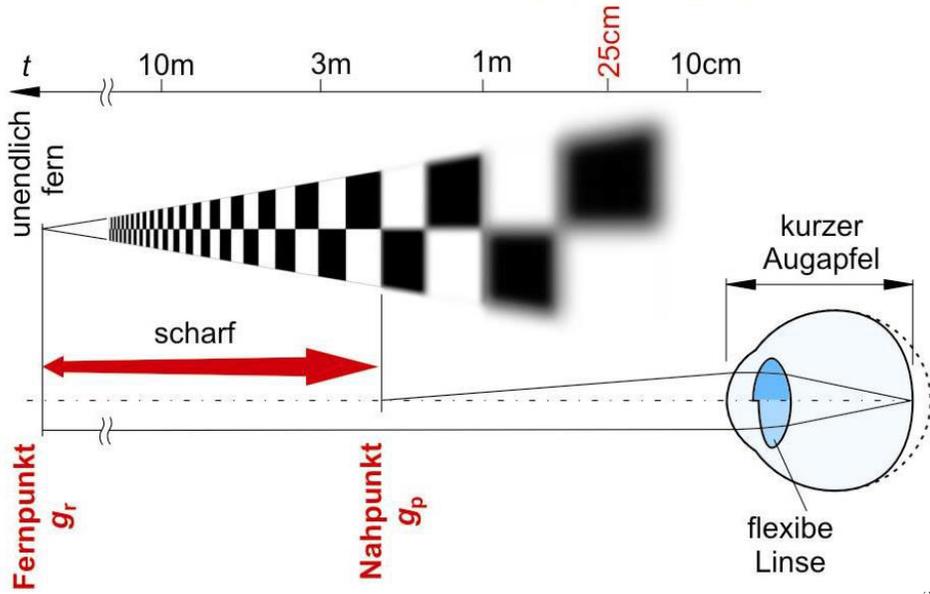
extrem gekrümmte Linsenoberflaeche

## Das Auge als optisches Instrument

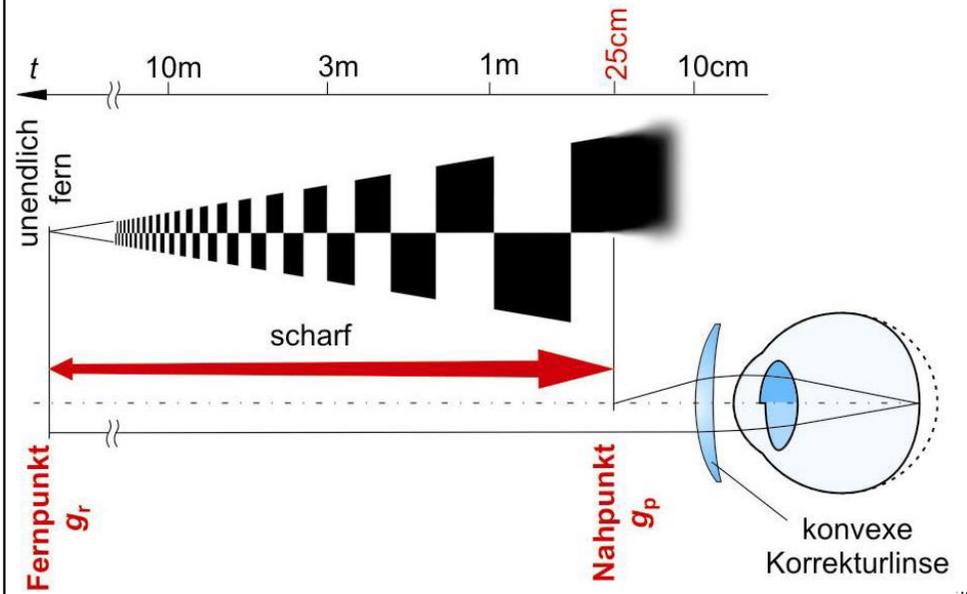




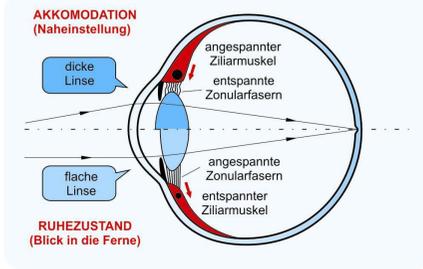
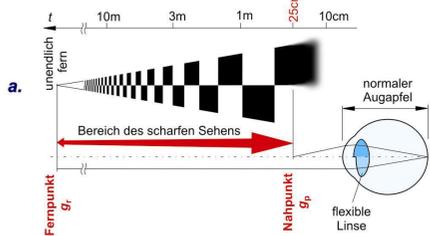
# ÜBERSICHTIGKEIT (hyperopie)



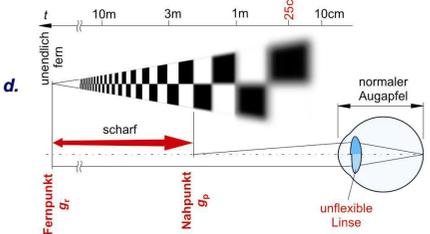
# KORRIGIERTE ÜBERSICHTIGKEIT



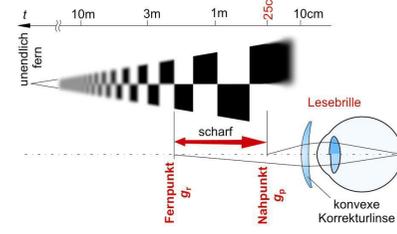
# NORMALSICHTIGES AUGE (Emmetropie)



# ALTERSSICHTIGKEIT (presbyopie)

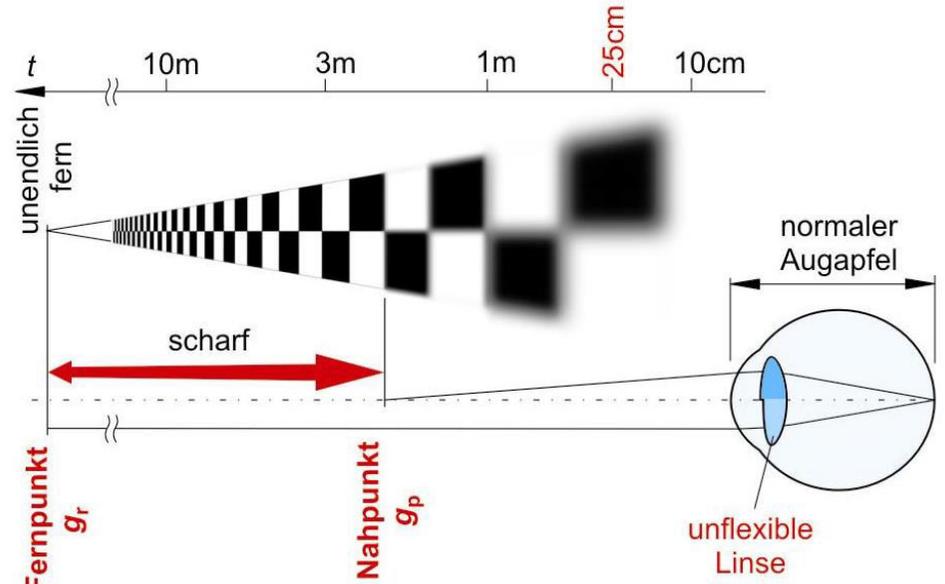


# KORRIGIERTE ALTERSSICHTIGKEIT

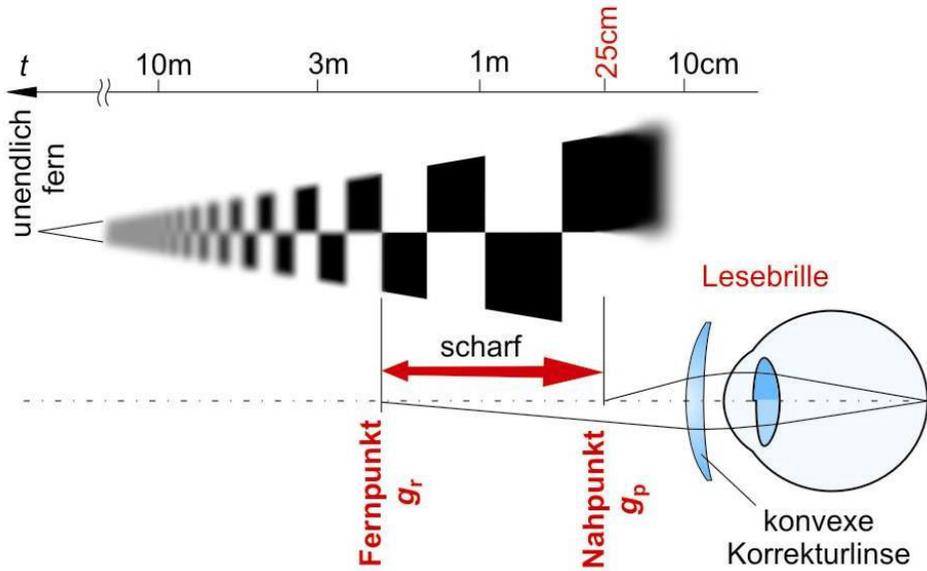


# Alterssichtigkeit

# ALTERSSICHTIGKEIT (presbyopie)



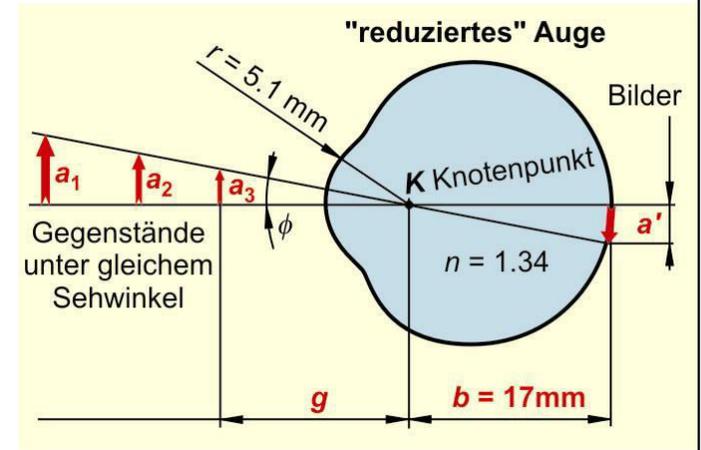
# KORRIGIERTE ALTERSSICHTIGKEIT



# Bildentstehung

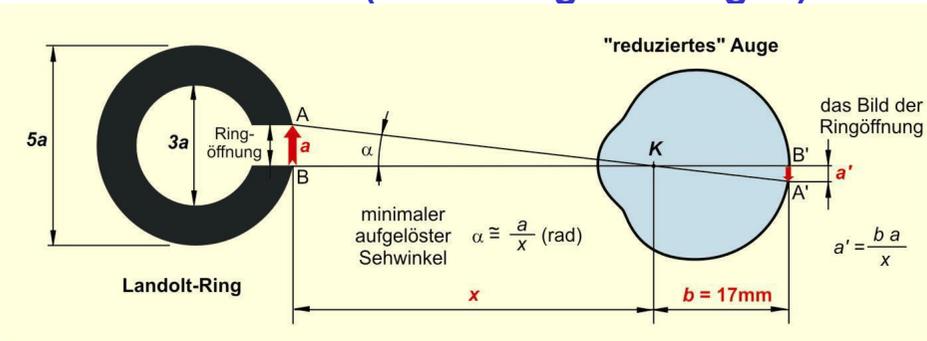
Modell:  
**reduziertes Auge**  
 = homogenes Objekt  
 mit Oberflaeche

Das Bild ist:  
 • reell,  
 • verkleinert,  
 • und umgekehrt.



$D = 67 \text{ dpt}$

# Sehschärfe (Auflösungsvermögen)



Minimaler aufgelöster Sehwinkel ( $\alpha$ ):

Sehschärfe lat. (Visus):

$$\alpha \cong \frac{a}{x} \text{ (rad)}$$

$$\alpha (^{\circ}) = \frac{a}{x} \text{ (rad)} \cdot \frac{360(^{\circ})}{2\pi \text{ (rad)}} \cdot 60 \left(\frac{'}{^{\circ}}\right)$$

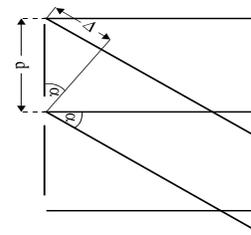
$$\text{Visus} = \frac{1 (^{\circ})}{\alpha (^{\circ})} (\cdot 100 \%)$$

Beim normalen Sehen beträgt  $\alpha$  im Durchschnitt  $1'$ , die Sehschärfe 100 %.

vg. Visus	{	Pferd	60 %
		Hund	40 %
		Katze	20 %

# Lichtbeugung (Wiederholung Vorlesung Wellenoptik Folien 14-16)

- **DEF:** Das Bild eines Lichtpunkts, das von einer kreisförmigen Linse oder Öffnung (Lochkamera) endlicher Größe abgebildet wird, ist nicht etwa wieder ein Lichtpunkt, sondern ein Beugungsscheibchen, umgeben von konzentrischen Beugungsringen. Nach dem englischen Astronomen George Biddell Airy wird der zentrale Beugungsfleck auch Airy-Scheibchen genannt.

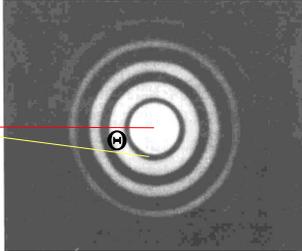
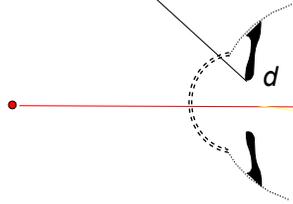


$$\Delta = d \cdot \sin \alpha_k = k \cdot \lambda$$

# Faktoren der Sehschärfe – Lichtbeugung

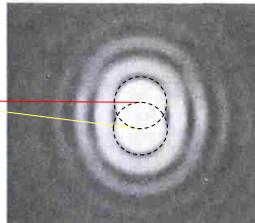
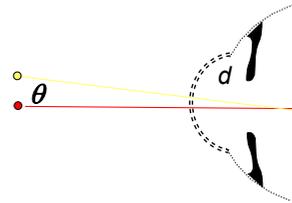
Wellenoptischer Faktor:  
Lichtbeugung an der Pupille

Bild eines Gegenstandspunktes auf der Retina (stark vergrößert!)



„Airy Scheibe“

Richtung des ersten Minimums:  $\sin \theta = 1,22 \frac{\lambda}{d} \approx \theta$



Zwei Gegenstandspunkte sind aufzulösen, wenn die zwei Airy-Scheiben im Vergleich zueinander mindestens so stark verschoben sind, damit das Hauptmaximum der einen Scheibe und das erste Minimum der anderen Scheibe zusammenfallen. In diesem Fall der Sehwinkel der zwei Gegenstandspunkte:

$$\theta = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

Es ist eine willkürliche Definition

z.B.  $\lambda = 0,55 \mu\text{m},$   
 $d = 3,5 \text{ mm} = 3500 \mu\text{m}$  }  $\Rightarrow \theta \approx 0,7'$

Seien A und B weit voneinander, sind die Airy-Scheiben A' und B' voneinander getrennt

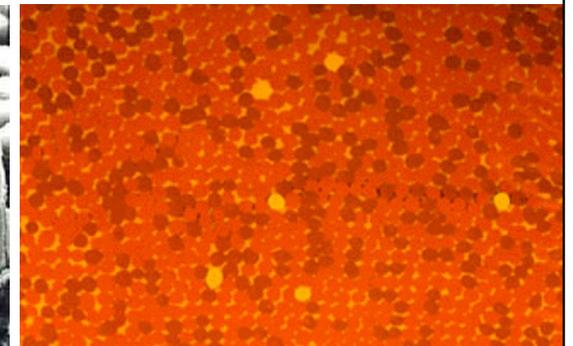
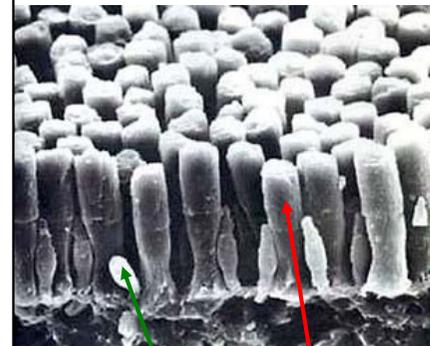
Seien A und B im kritischen Abstand voneinander, überlappen die Airy-Scheiben einander, aber sie sind zu unterscheiden.  
 $\delta$  minimale aufgelöste Entfernung,  
 $\theta$  minimaler aufgelöster Sehwinkel infolge Lichtbeugung

Sei der Abstand zwischen A und B kleiner als  $\delta$ , bilden zwei Airy-scheiben eine Bildscheibe.  
Das Bild von zwei Gegenstandspunkten ist nicht aufzulösen.

38

# Faktoren der Sehschärfe – Rezeptordichte

Diskretes Rezeptorenfeld, Rezeptordichte:



Zapfen und Stäbchen (auf der Peripherie der Retina)

Zapfen (in Fovea centralis)  
Photo von Elektronmikroskop

blau-grün-rot-Zapfen

ABER Stäbchen "sind farbenblind"

## Unterschiedliche Stäbchen Dichte



200.000 Stäbchen / mm<sup>2</sup>



1.000.000 Stäbchen / mm<sup>2</sup>

Mensch und Uhu (Bubo Bubo)

sie sehen im dunkeln besser

41

## Die Nachtsicht

Nachtsicht des Mannes



die Nachtsicht der Eule



42

## die Vision der Schlange

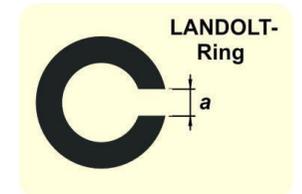


sieht Infrarotstrahlen mit  $\Delta T = 10 \text{ mK}$  Temperaturauflösung

43

## Messung der Sehschärfe

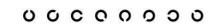
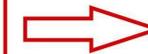
Praktikum!



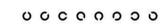
$a = 0,5 \text{ mm}$



$a = 0,4 \text{ mm}$



$a = 0,3 \text{ mm}$

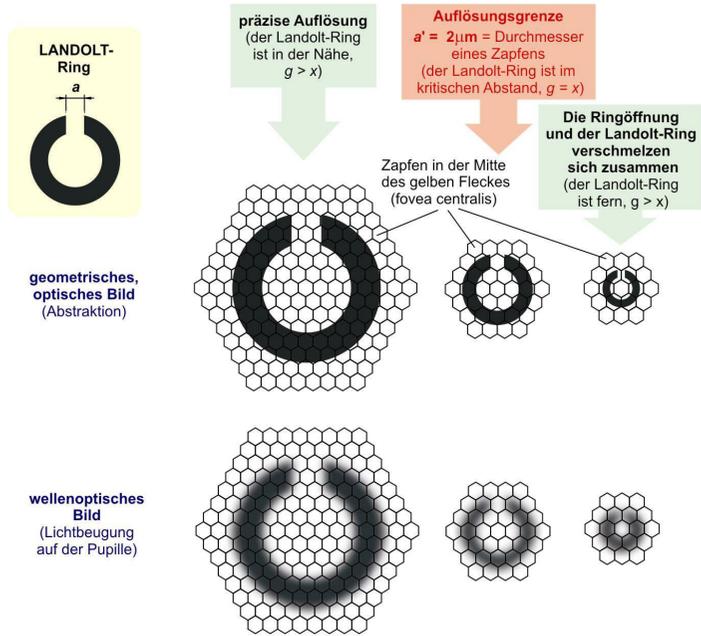


$a = 0,2 \text{ mm}$

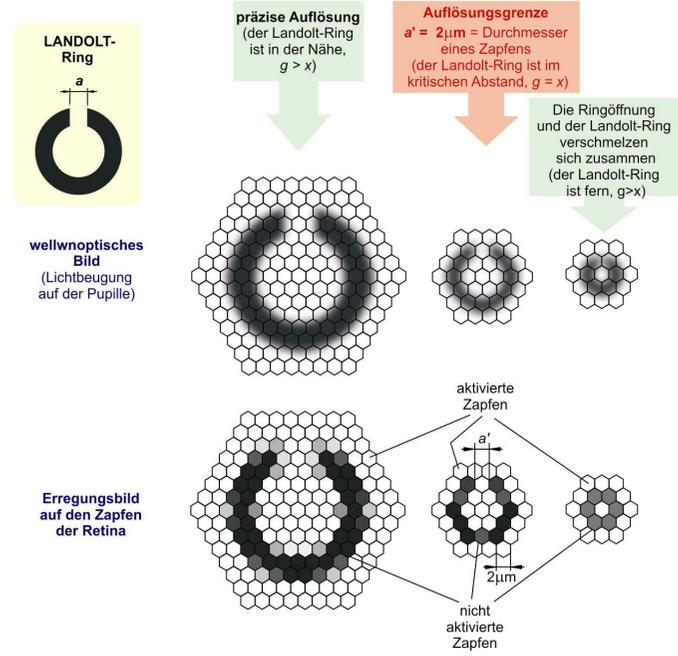


44

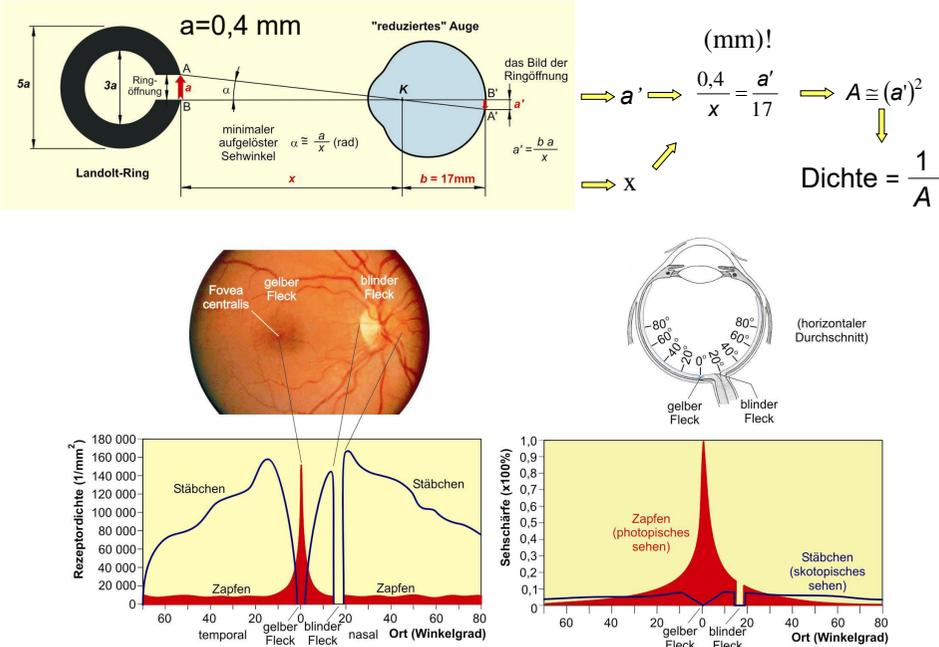
# Das Bild von Landolt-Ring in dem gelben Fleck 1.



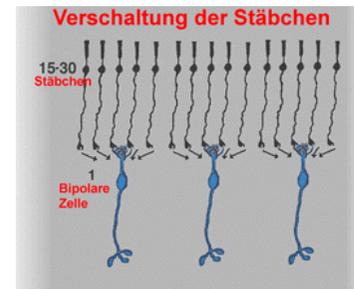
# Das Bild von Landolt-Ring in dem gelben Fleck 2.



# Dichte und Verteilung der Rezeptoren

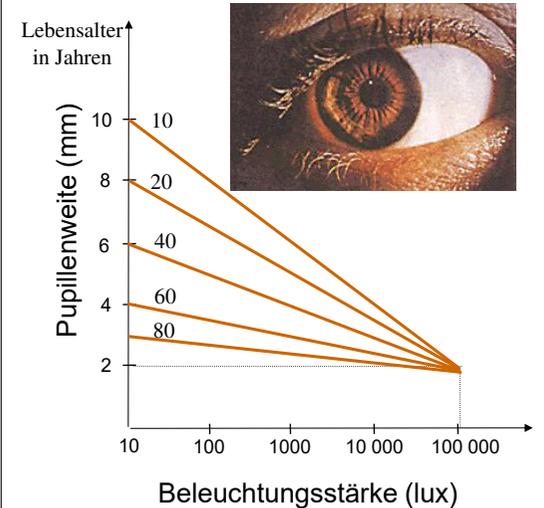


# Informationsreduktion, Konvergenz:

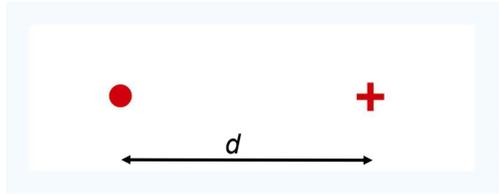


An der Peripherie am

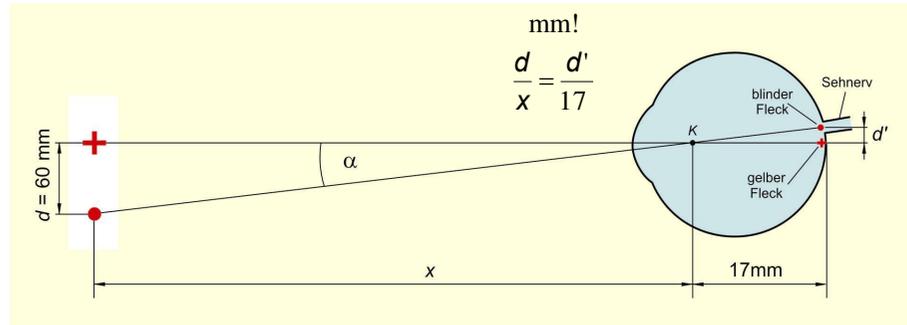
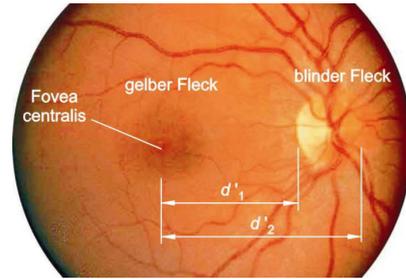
# Adaptation



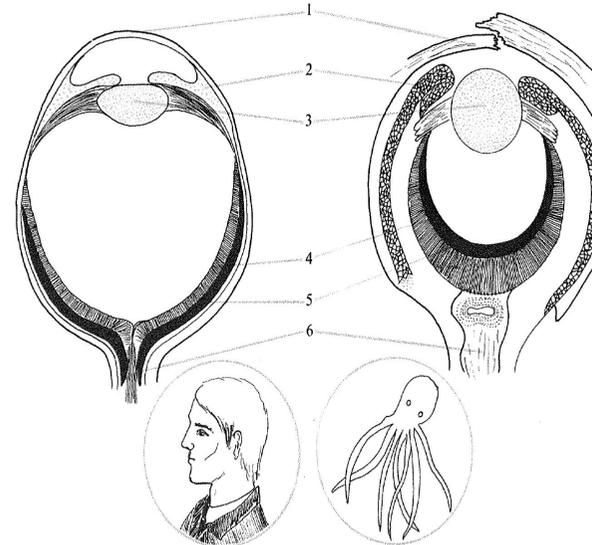
# Blinder Fleck



$d = 60 \text{ mm}$  (in der ausgedruckten Abbildung)

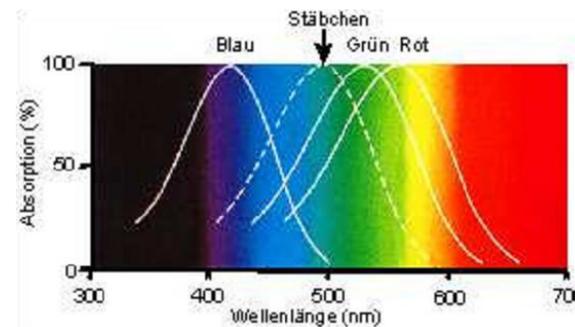
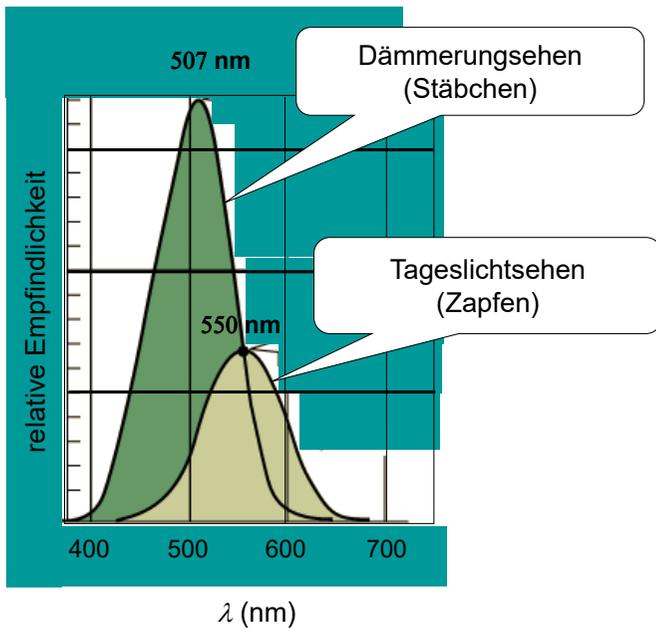


# Ein Oktopus hat kein blinder Fleck

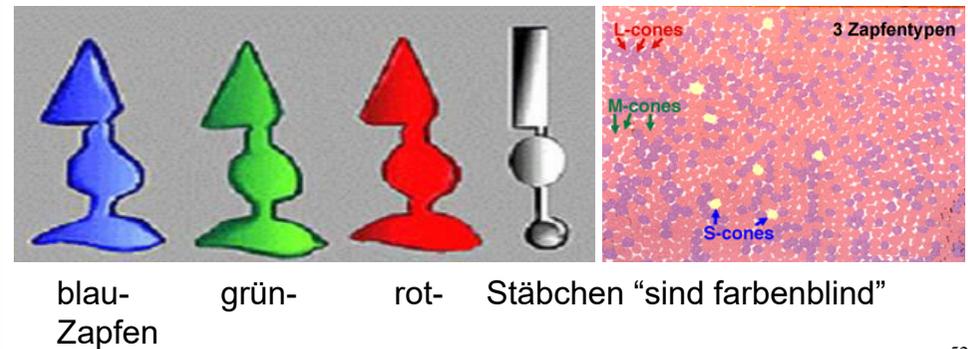


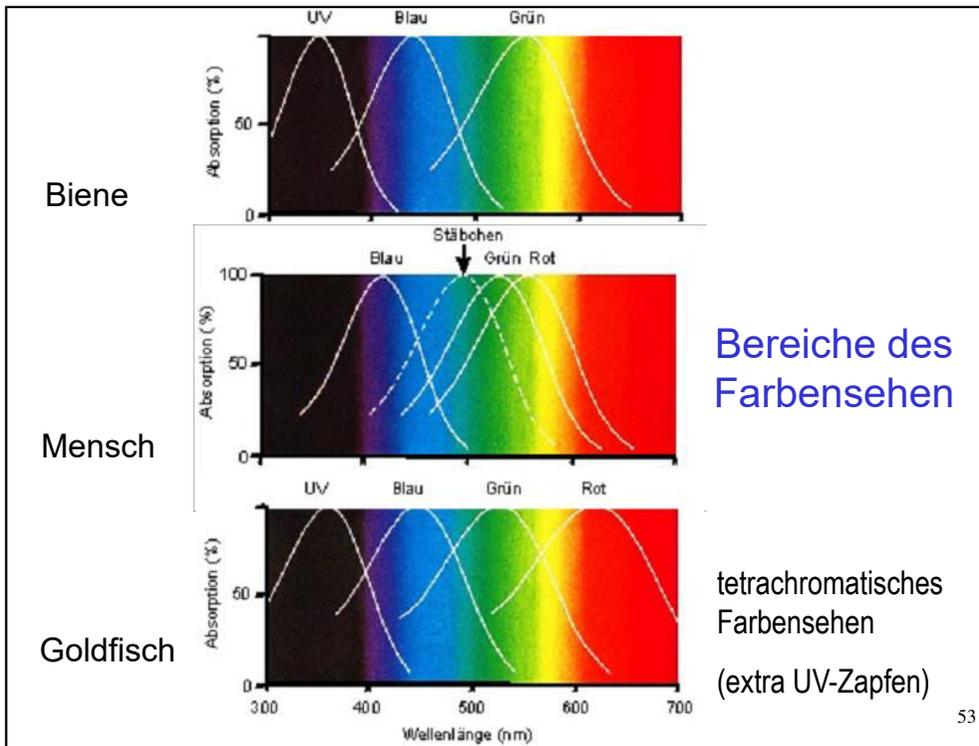
- 1 Hornhaut
- 2 Iris
- 3 Linse
- 4 Retina
- 5 Aderhaut
- 6 Sehnerv

# Empfindlichkeitskurve



# Farbsehen





### Etwas extra...

*Fangschreckenkrebs (Odontodactylus scyllarus)* hat 16 Photorezeptoren davon **12 Zapfen** sonst sieht noch das linearpolarisiertes und zirkularpolarisiertes Licht auch...

*Homo sapiens*

*Neogonodactylus oestedii*

<https://de.wikipedia.org/wiki/Fangschreckenkrebs>

### Die Augen von Raubvögeln

horizontaler Schnitt von Turmfalke Augen

Turmfalke (*Falco tinnunculus*)

1,2 doppelter gelber Fleck, fovea, haben nur Zapfen in Augen,

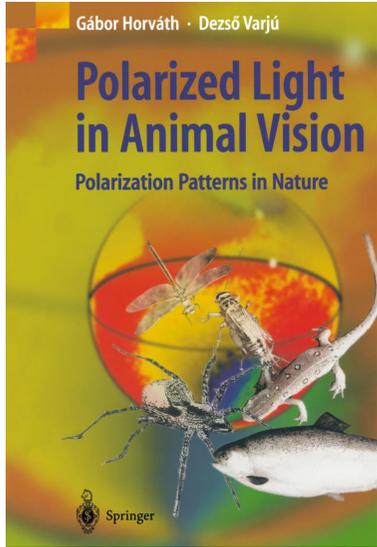
sehen drei Sachen gleichzeitig scharf

Ein Hünchen oder Truthahn kann es aber nicht

### Die Augen von Tauben

vertikaler Schnitt von Taube oder Euler Auge  
„Kamm-aenliches Organ“  
filtert das starke Licht (die Sonne) von oben

# Wie wird polarisiertes Licht gesehen?



Interessantes neues Thema

Dr. habil. GÁBOR HORVÁTH  
 Department of Biological Physics  
 Eötvös University  
 Pázmány sétány 1  
 H-1117 Budapest  
 Hungary

Prof. Dr. DEZSŐ VARJÚ  
 Lehrstuhl Kognitive Neurowissenschaften  
 Universität Tübingen  
 Auf der Morgenstelle 28  
 72076 Tübingen  
 Germany

Springer 2004

# Tiere die polarisiertes Licht sehen können



Fangschreckenkrebse (Stomatopoda)



Gemeine Rückenschwimmer  
 (*Notonecta glauca*)



Das **Große Mausohr** oder auch nur **Mausohr** (*Myotis myotis*) ist eine Fledermaus-Art



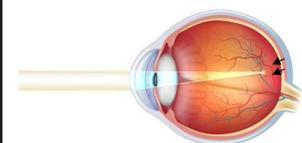
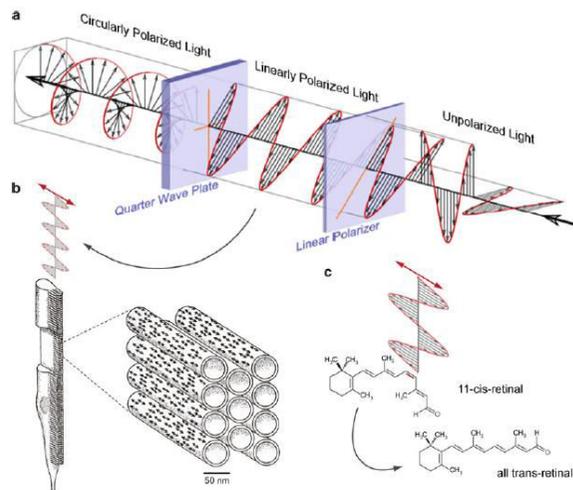
*Cataglyphis*, auf deutsch manchmal als Wüstenameisen bezeichnet

# Wie wird polarisiertes Licht gesehen?

## Polarization Vision

Stanley Heinze\*  
 Department of Biology, Lund University, Lund, Sweden

Encyclopedia of Computational Neuroscience  
 DOI 10.1007/978-1-4614-7320-6\_334-5  
 © Springer Science+Business Media New York 2014

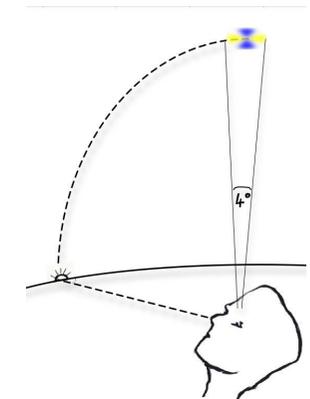
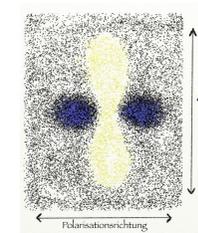


Photopigments are embedded in the microvilli membranes (enlargement) and preferentially absorb incoming light oscillating in one particular plane (indicated by *double arrows*) (Modified from Wehner 1976).

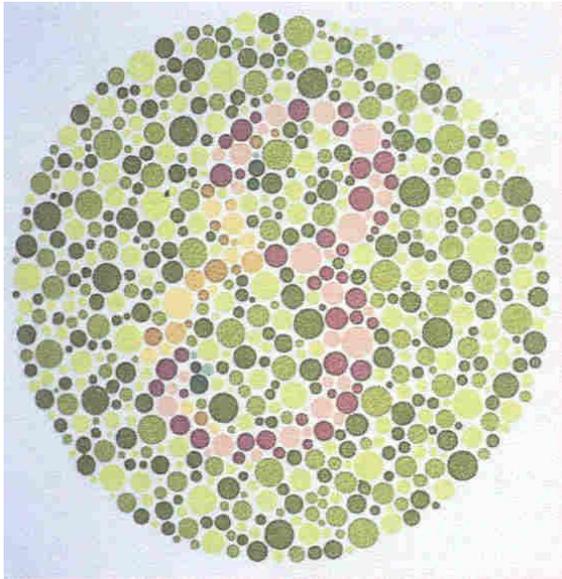
Wehner R (1976) Polarized-light navigation by insects. *Sci Am* 235:106–115

# Menschen können polarisiertes Licht auch wahrnehmen...

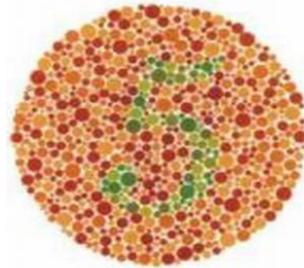
Das **Haidinger-Büschel** ist ein entoptisches Phänomen, das heißt, es entsteht erst im Auge des Beobachters und kann deshalb auch nicht fotografiert werden



# Farbenblindheit



Welche Zahl können Sie entdecken?



# Welche farben sehen hunde?

Keine triviale Frage...

*Visual Neuroscience* (1989), 3, 119-125. Printed in the USA.  
Copyright © 1989 Cambridge University Press 0953-5238/89 \$5.00 + .00

Color vision in the dog

JAY NEITZ, TIMOTHY GEIST, AND GERALD H. JACOBS  
Department of Psychology, University of California, Santa Barbara  
(RECEIVED February 28, 1989; ACCEPTED April 19, 1989)

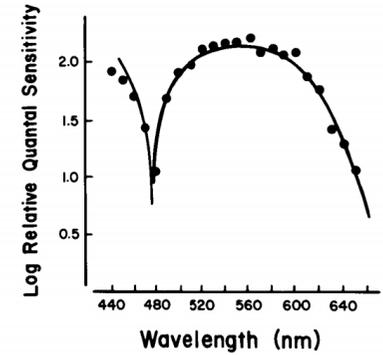
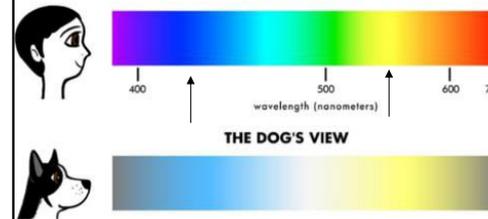


Fig. 4. Increment-threshold spectral sensitivity function for the dog. The data points are average sensitivity values for three subjects. The line drawn through the data points represents the best-fitting subtractive combination of the two presumed photopigments of the dog, i.e. those having  $\lambda_{max}$  values of 429 nm and 555 nm. This best fit combines these two pigments in the proportions of 55% (429 nm) and 45% (555 nm).

DOI: [10.1017/S0952523800004430](https://doi.org/10.1017/S0952523800004430)

dann sci-hub...

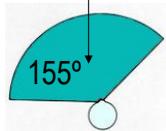
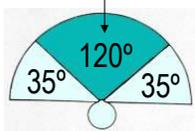
sehen praktisch nur 2 farben

# Plastisches Sehen

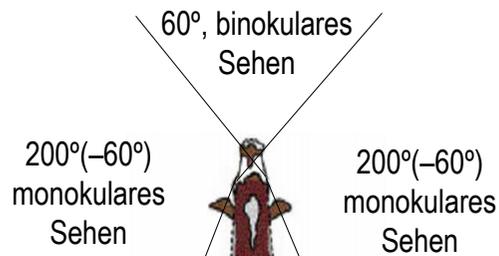
Gesichtsfeld des Menschen

Sehen mit beiden Auge

Sehen mit linkem Auge



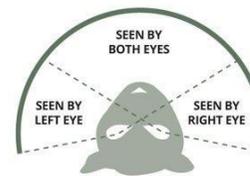
Gesichtsfeld von Rind



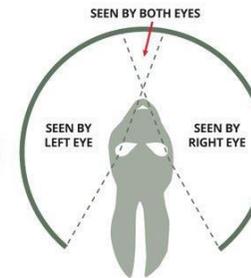
	Blickfeld	plastisches Sehen
Mensch	190°	120°
Hund/Katze	250°	85°
Pferd	350°	65°

# Augenposition

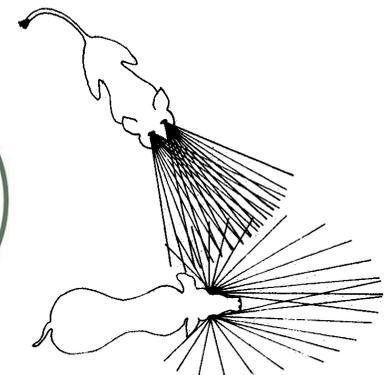
Raubtier  
Predator



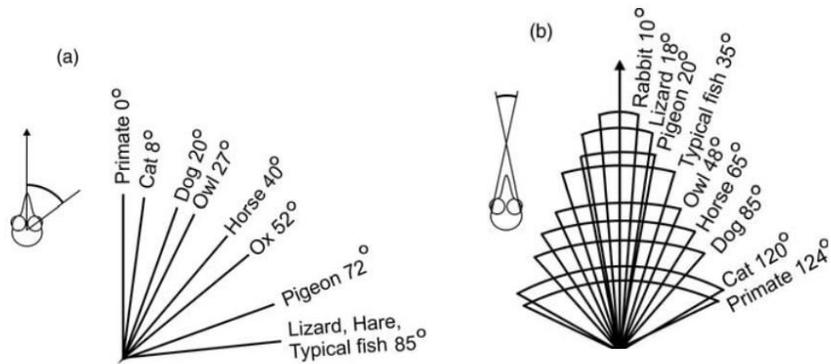
Pflanzenfresser  
Prey



Raubtiere sehen die Schärfentiefe besser

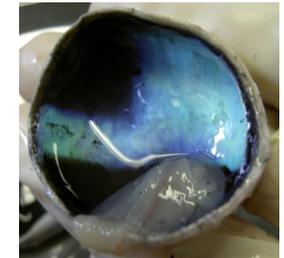
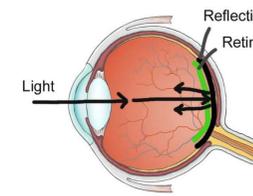


## Augenrichtung und binokulares Sehen



## Tapetum lucidum

- Nachttiere wie Katzen, Eulen und Rehe, aber auch Schafe realisieren durch eine retroreflektierende Schicht (meist grün oder blau) hinter der Netzhaut einen Zugewinn an Empfindlichkeit, was ihnen als Nachttiere (Räuber wie Beute) zu Gute kommt. **Tapetum lucidum**.



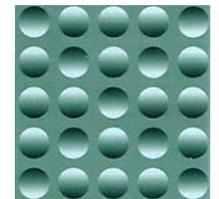
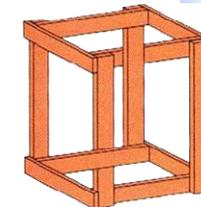
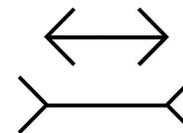
Kalbsauge mit herabhängender Retina<sup>66</sup>

## Facettenaugen

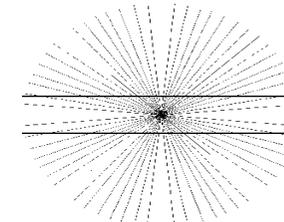
- zeitliche Auflösung bei Facettenaugen deutlich höher sein als bei Linsenaugen. Sie liegt etwa bei fliegenden Insekten bei **250 Bildern pro Sekunde**, des menschlichen Auges mit **60 Hz bis 65 Hz** entspricht.
- schlechte Auflösung aber alles scheint 5mal langsamer zu sein



## Optische Täuschungen

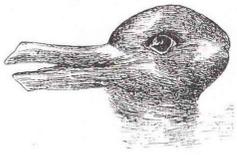


WHAT'S ON A MAN'S MIND

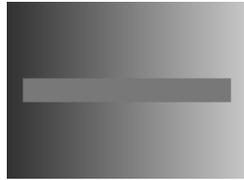


Es ist keine Physik mehr, sondern physiologie Wechselwirkung zwischen Nerven und Gehirn

## Optische Täuschungen



Ente - Hase



Grauskale



Schwarz- Weiss Foto mit Farbfilter



Vase - Gesicht



Es ist keine Physik mehr, sondern physiologie Wechselwirkung zwischen Nerven und Gehirn

69

## Optische Täuschungen



Sinnestäuschungen - Welt der Wunder

Von Weit eine nackte Frau plus ein Mann

<https://www.youtube.com/watch?v=TgnfZksUpYQ>



vor der Nähe Delfinen ©

70

## Zusammenfassung

*Sehen und Optik des Auges war heute*

*Nützliche youtube videos:*

Wie ist das menschliche Auge aufgebaut?

<https://www.youtube.com/watch?v=eaW3QrdoZ0w>

Das Auge Teil 1 (46 minuten lang)

<https://www.youtube.com/watch?v=h9DvHqb8J7A>

Das Auge Teil 2 (40 minuten lang)

[https://www.youtube.com/watch?v=4k\\_pxC8PmM](https://www.youtube.com/watch?v=4k_pxC8PmM)

Superaugen, wunder der Natur

<https://www.youtube.com/watch?v=eDLXj-YhaLM>

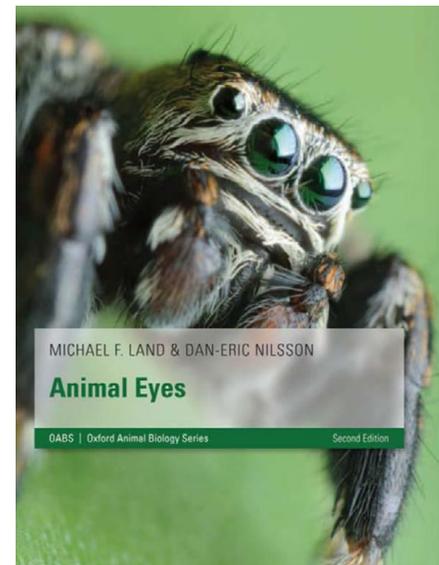
<https://en.wikipedia.org/wiki/Electroreception>

<http://www.scholarpedia.org/article/Electrolocation>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Tapetum\\_lucidum](https://en.wikipedia.org/wiki/Tapetum_lucidum)

*Fragen, Bemerkungen, Kommentare?...*<sup>71</sup>

## Literatur



Author(s): Michael F. Land, Dan-Eric Nilsson

Publisher: Oxford University Press, Year: 2012

ISBN: 9780191625367

291 Seiten

*Vielen Dank für ihre*



*Aufmerksamkeit!*

*Fragen, Bemerkungen, Kommentare?*