

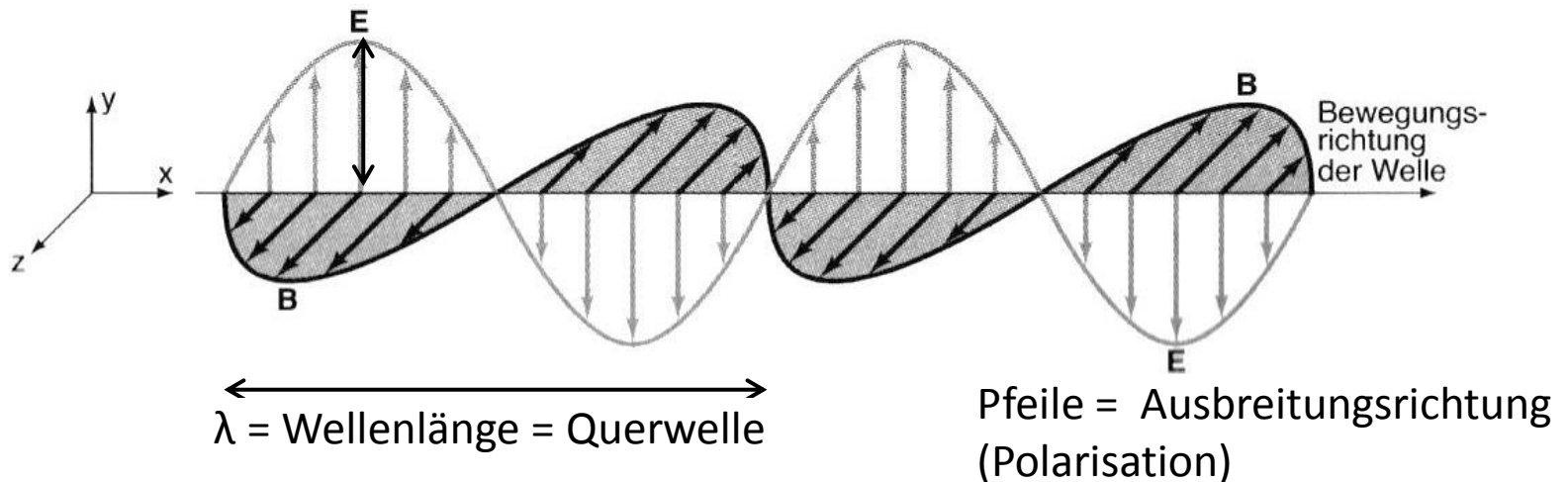
# Einführung ins Sehen

---

# Was ist Licht?

- Elektromagnetische Wellen, die von einer Lichtquelle (z.B. Glühbirne, Kerze) ausgestrahlt bzw. von einem Objekt reflektiert werden
- Photon: kleinstmögliche Einheit von Energie
- Geradlinie Ausbreitung durch den Raum (Ablenkung, Reflektion, Absorption möglich)
- Lichtgeschwindigkeit: Glas (190.000 km/s), Wasser (224.000 km/s), Luft (300.000 km/s)

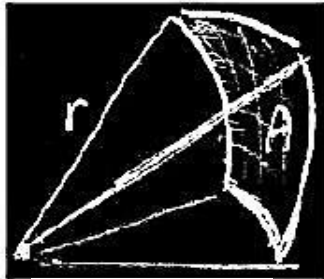
A = Amplitude = Intensität der Helligkeit



# Photometrische Kenngrößen

Raumwinkel

$\Omega$



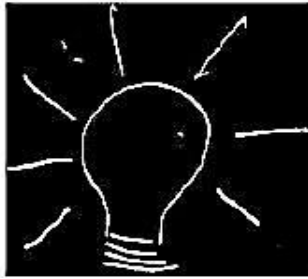
Sterad [sr]

3D Winkel einer Kugel,  $\Omega = A/r^2$  mit Flächeninhalt A und Radius r

Strahlung, die nach allen Seiten abgegeben wird (Gesamtstrahlung)  
 $\phi_v = L_v / t$  mit Leuchtdichte  $L_v$   
 Zeit in Stunden t

Lichtstrom

$\phi_v$

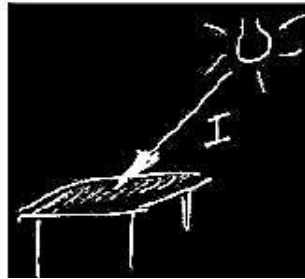


Lumen [lm]

In einer bestimmte Richtung abgestrahlter Lichtstrom, z.B. Kerze mit 1 cd  
 $I_v = \phi_v / \Omega$  mit Lichtstrom  $\phi_v$  und Raumwinkel  $\Omega$

Lichtstärke

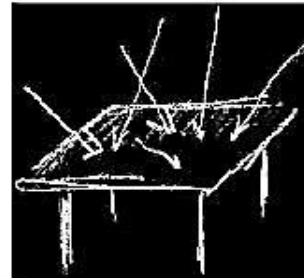
$I_v$



Candela [cd]

Beleuchtungsstärke

$E_v$

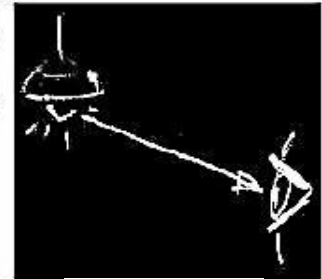


Lux [lx]

Maß für das auf eine Fläche auftreffende Licht. Abhängigkeit vom Abstand zur Lichtquelle  $E_v = I_v / r^2$  mit Lichtstärke  $I_v$  und Abstand r

Leuchtdichte

$L_v$

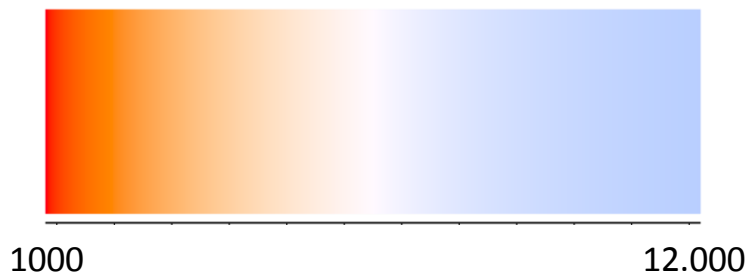


[cd/m²]

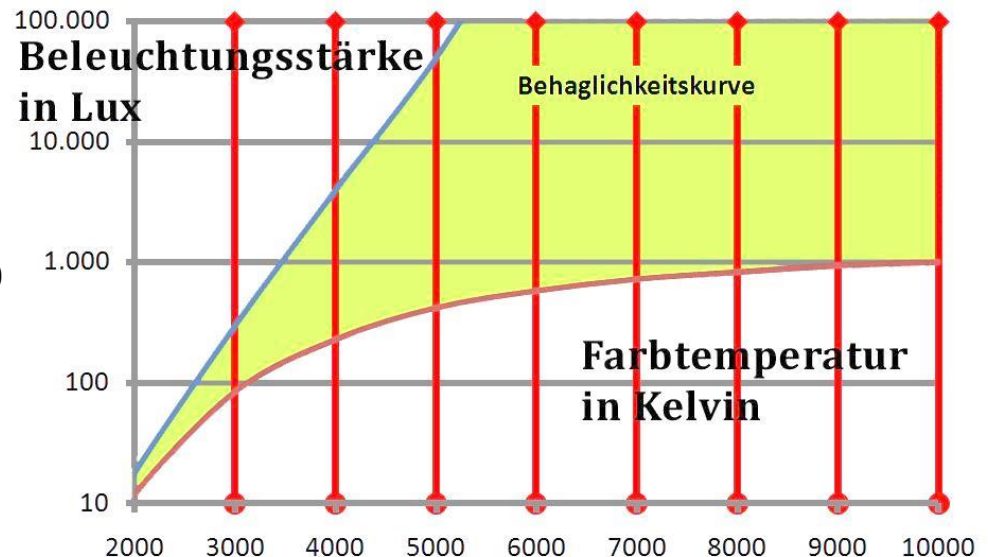
Energie (Helligkeitseindruck), die von einer Lichtquelle ausgestrahlt wird  
 $L_v = \phi_v / t$  mit Lichtstrom  $\phi_v$   
 Zeit in Stunden t

# Wirkung von Licht

Bezeichnung	Farbtemperatur [Kelvin]	Beschreibung	Wirkung auf den Menschen
warmweiß	unter 3300 K	gelbweiß	gemütlich und behaglich
neutralweiß	3300 bis 5300 K	weiß	sachliche Atmosphäre, Kunstlichtcharakter
tageslichtweiß	über 5300 K	Tageslicht-ähnliches	wirkt technisch, anregend, passt zu einfallendem Tageslicht

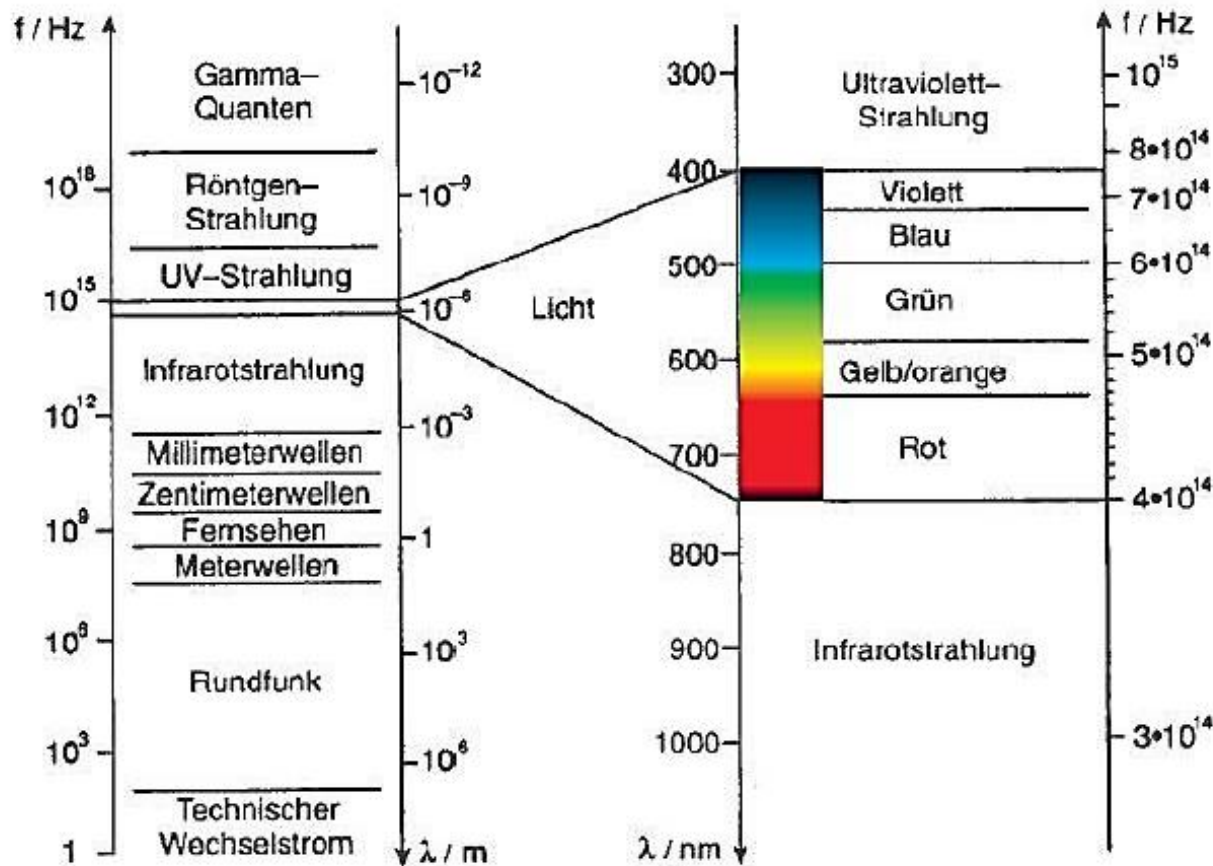


Beleuchtungsstärke  $E_v$  im Verhältnis zur Farbtemperatur K (Farbeindruck einer Lichtquelle)



# Sichtbares Licht

Der Mensch kann Licht mit einer Wellenlängen von ca. 400 - 770 Nanometer (1nm = 1 Milliardstel Meter) wahrnehmen

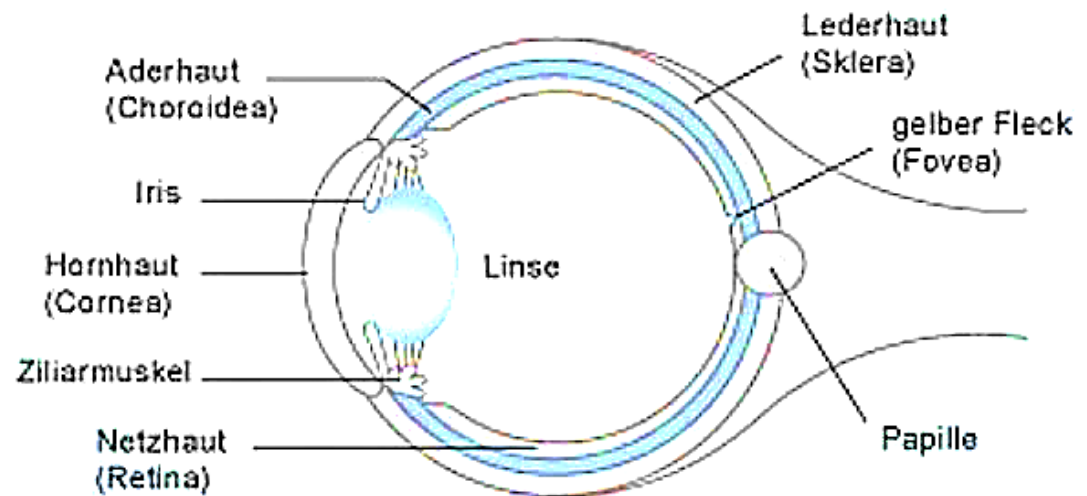


# Das Auge

---

- Das reflektierte Licht gelangt durch die Hornhaut, die Pupille, die Linse und den Glaskörper auf die Netzhaut
- Rezeptoren auf der Netzhaut wandeln elektromagnetische Strahlen (Licht) in elektrische Impulse (Transduktion) und der Sehnerv leitet diese an das Gehirn weiter
- Vereinfacht gesehen kann man eine Kamera mit dem menschliche Auge vergleichen

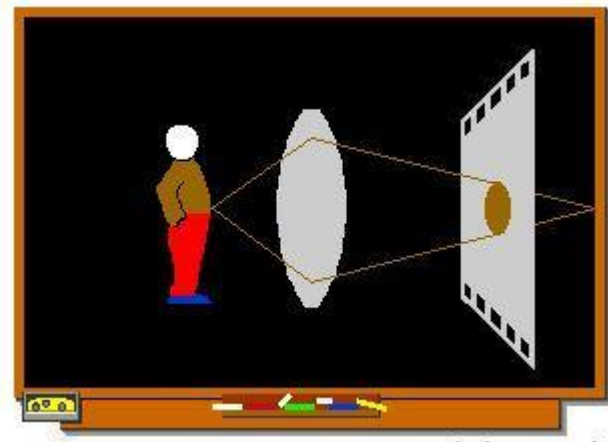
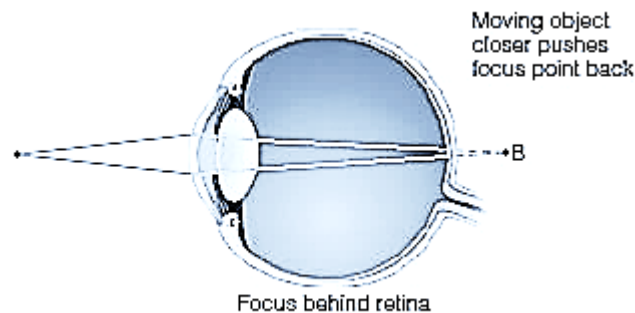
- Linse - Linsengruppen des Objektivs (z.B. Sammellinse)
- Iris - Blende des Objektivs
- Netzhaut - Kamerasensor



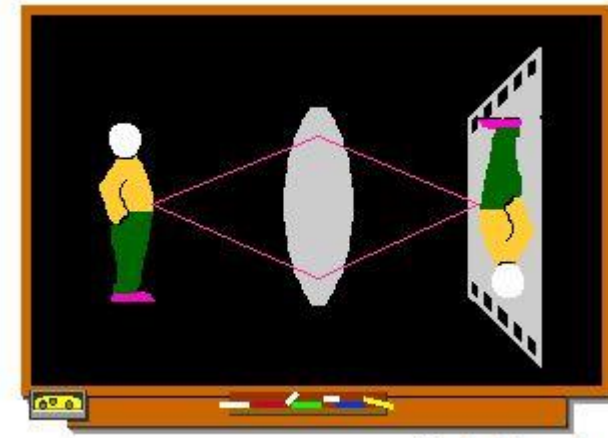
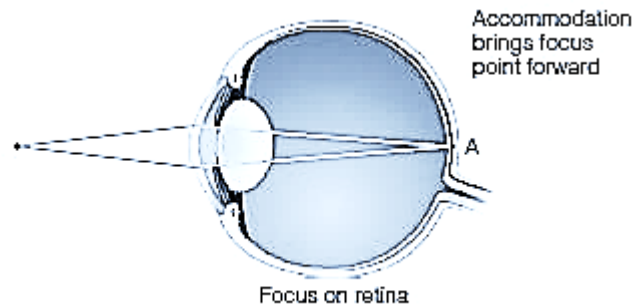
# Die Linse

- Krümmungsgrade ermöglichen scharfes Sehen im Nah- und Fernbereich (Fokussieren = Akkomodation)

Zu nah – Objekt unscharf – Kamera: konvergenter Lichteinfall nach dem Sensor



Fokussieren - Objekt scharf

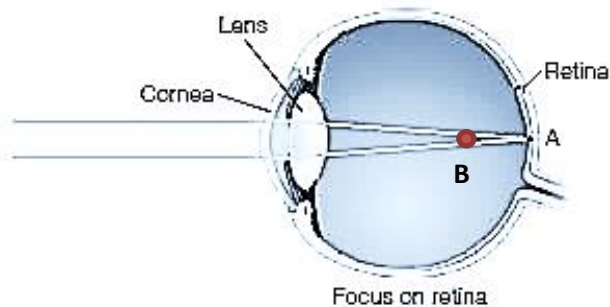


Auge – Nahsicht - erfordert Muskelaufwand

Kamera

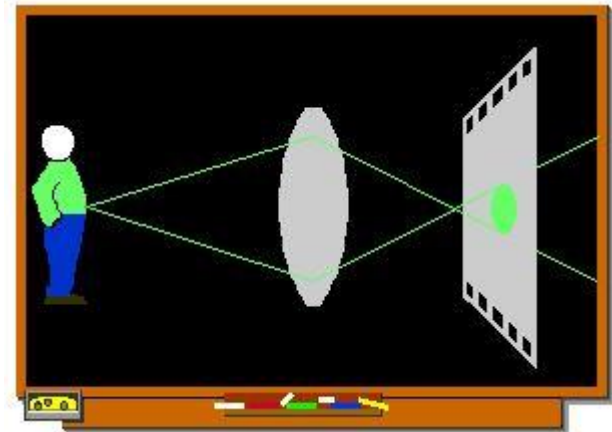
# Die Linse

Objekt weit entfernt - Bildpunkt liegt vor der Retina  
(Kurzichtigkeit (Punkt B)) bzw. vor dem Sensor der Kamera



Auge

Die Fernakkommodation beim Auge ist der entspannte Normalzustand



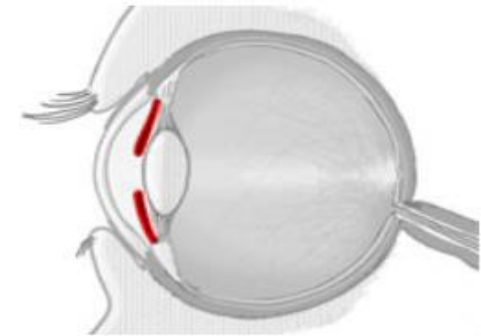
Kamera

Divergender Lichteinfall auf Sensor - unscharf



# Die Pupille

- Blendenmechanismus des Auges, der den Lichteinfall auf die Retina steuert (Pupillenreflex)
- Lichteinfall wird direkt durch beidseitige Kontraktion oder Dilatation der Irismuskulatur reguliert
- Je nach Lichteinfall variiert ihr Durchmesser zwischen 1,5 und 8-12 Millimeter



*Regenbogenhaut*

Blende und Belichtungszeit bestimmen  
Schärfentiefe und Helligkeit



Blendenwert hoch ->  
Blendenöffnung klein  
= wenig Lichteinfall

# Schärfentiefe

---

- Schärfentiefe wird von folgenden 3 Faktoren beeinflusst
  - Blendenwert /-öffnung
  - Entfernung zum Objekt
  - Brennweite (Abstand Linse - Sensor)



Niedriger Blendenwert  
Blendenöffnung groß



Mittlerer Blendenwert  
Blendenöffnung mittig

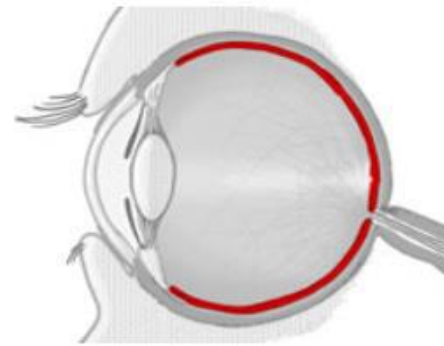


Hoher Blendenwert,  
Blendenöffnung klein

# Die Netzhaut

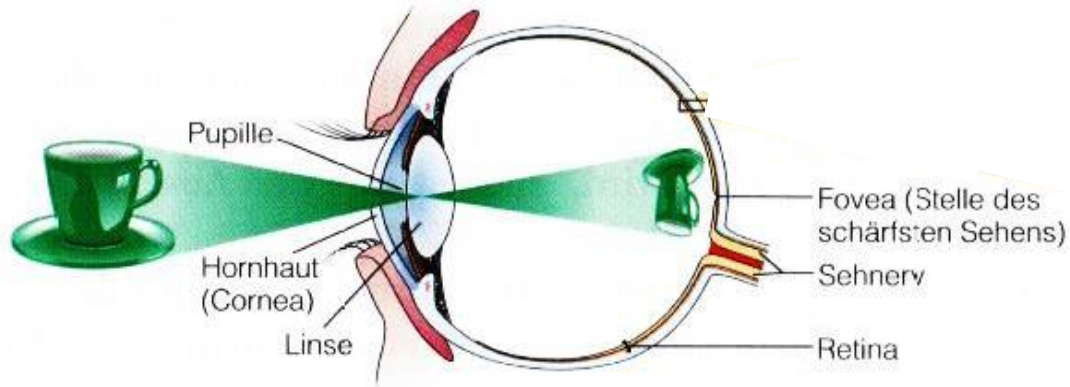
---

- Wenige Zehntelmillimeter dünne Retina (5 Arten von Neuronen)
- Rezeptoren wandeln Licht in bioelektrische Spannung (Transduktion) - Kamara CCD/CMOS Sensoren wandeln wandeln Licht (Photonen) in elektrische Signale (Elektronen) um
- Zapfen: Für das Farbsehen verantwortlich, Tagessehen (Unschärfe im Dunklen)
- Stäbchen nur Helligkeiten (Grauwerte), Nachtsehen

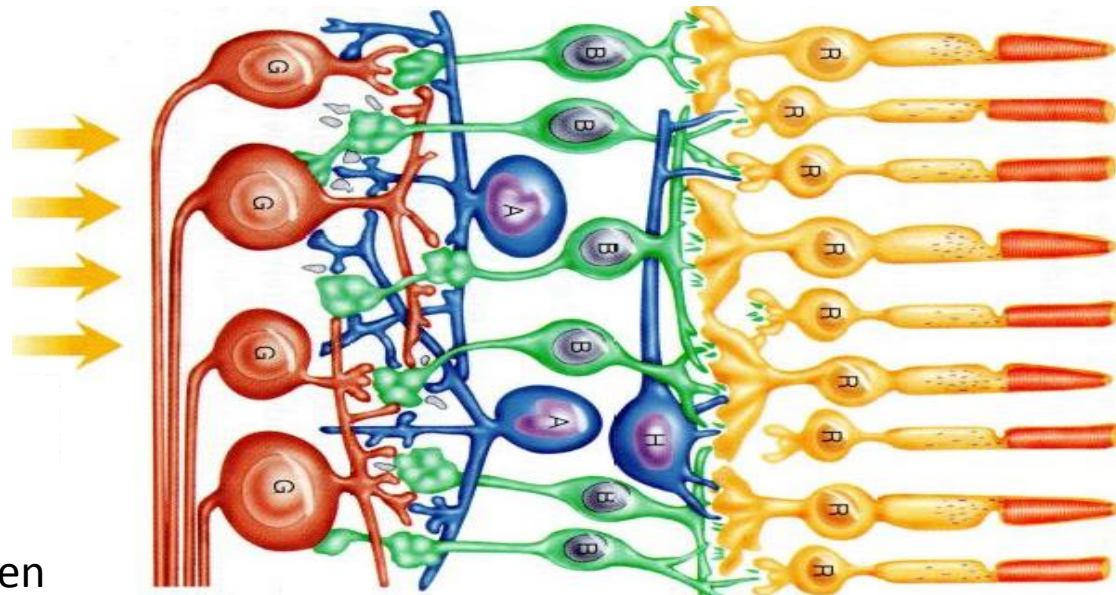


*Netzhaut (Retina)*

# Aufbau der Netzhaut



Außensegment  
Innensegment



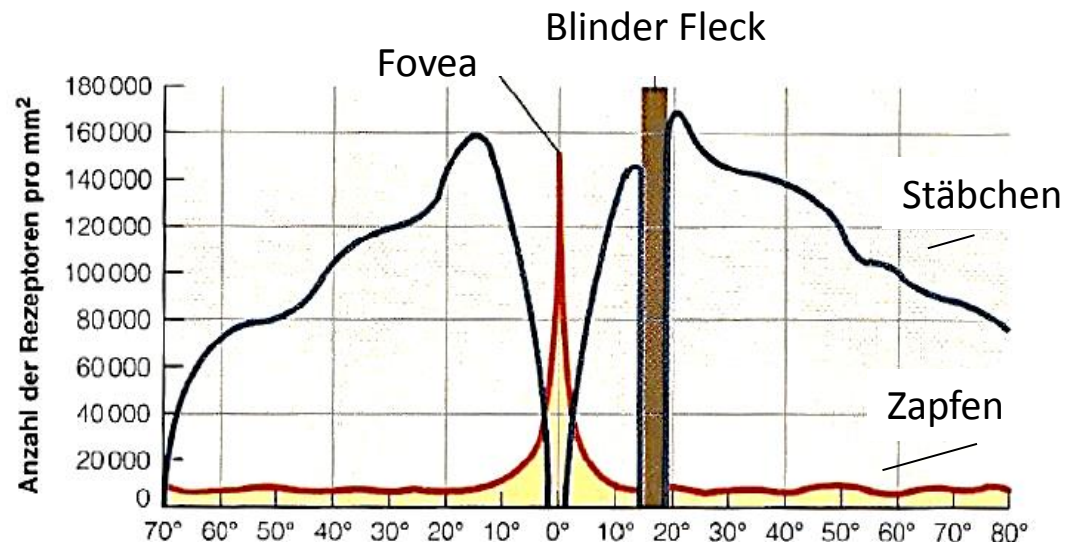
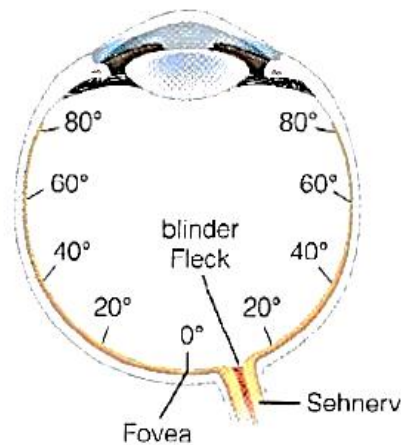
Rückseite des Auges

G = Ganglienzellen  
A = Amakrinzellen  
B = Bipolarzellen  
H = Horizontalzellen  
R = Stäbchen und Zapfen

Nervenfasern des Sehnervs

# Verteilung der Rezeptoren

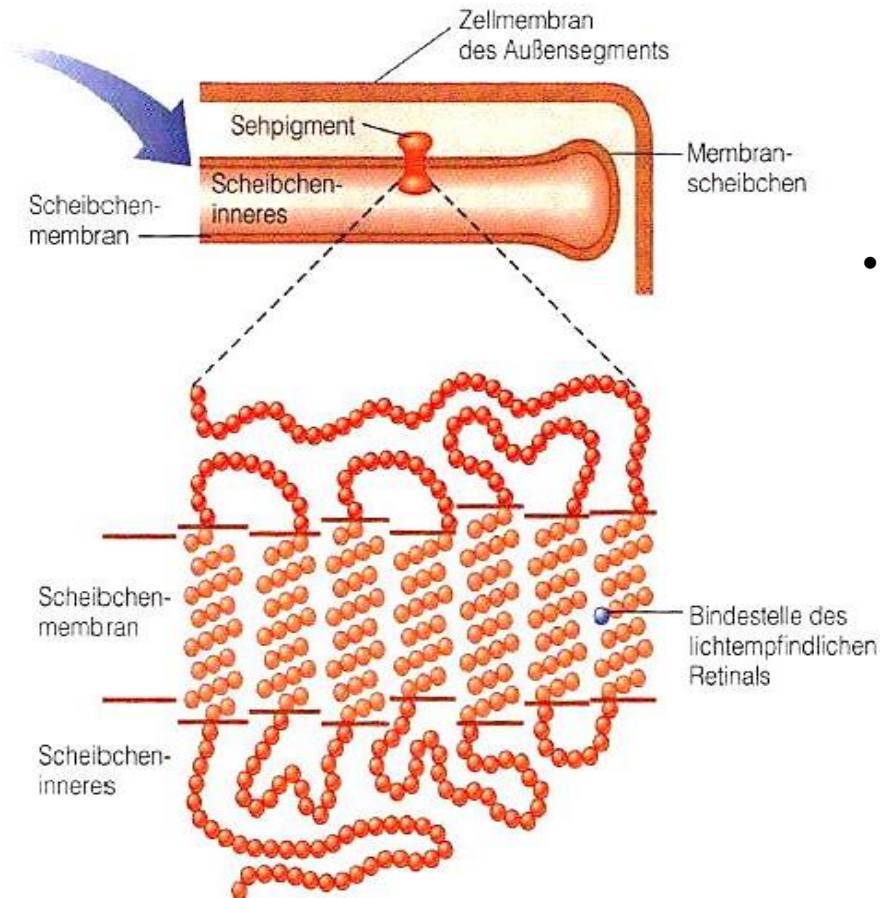
- Ausschließlich Zapfen in der Fovea (Sehgrube, Gelber Fleck), 1% = ca. 50.000
- Ca. 120 Mio. Stäbchen und ca. 5-6 Mio. Zapfen in der Peripherie
- Blinder Fleck - keine Rezeptoren



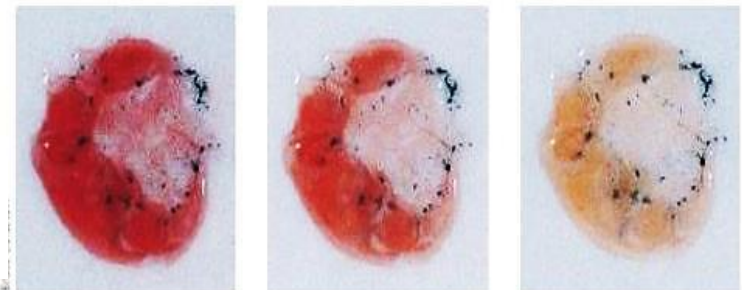
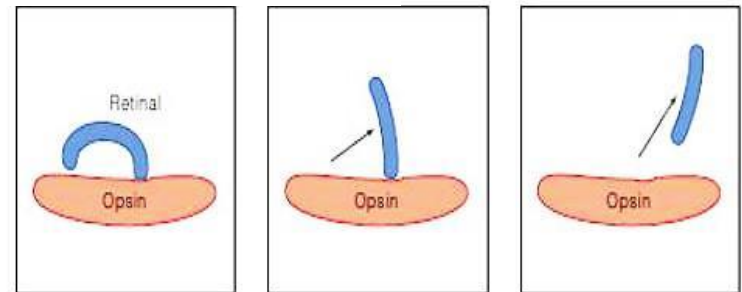


# Visuelle Transduktion

- Nach Aufnahme eines Lichtreizes (7 Photonen) löst sich das Retinal vom Opsin (Isomerisation) und die Transformation beginnt (Bleichung des Sehpigmentes)
- Aufnahme und Transformation neuer Lichtenergie nach erneutem verbinden der beiden Moleküle (Regeneration)



Sehpigmentmolekül

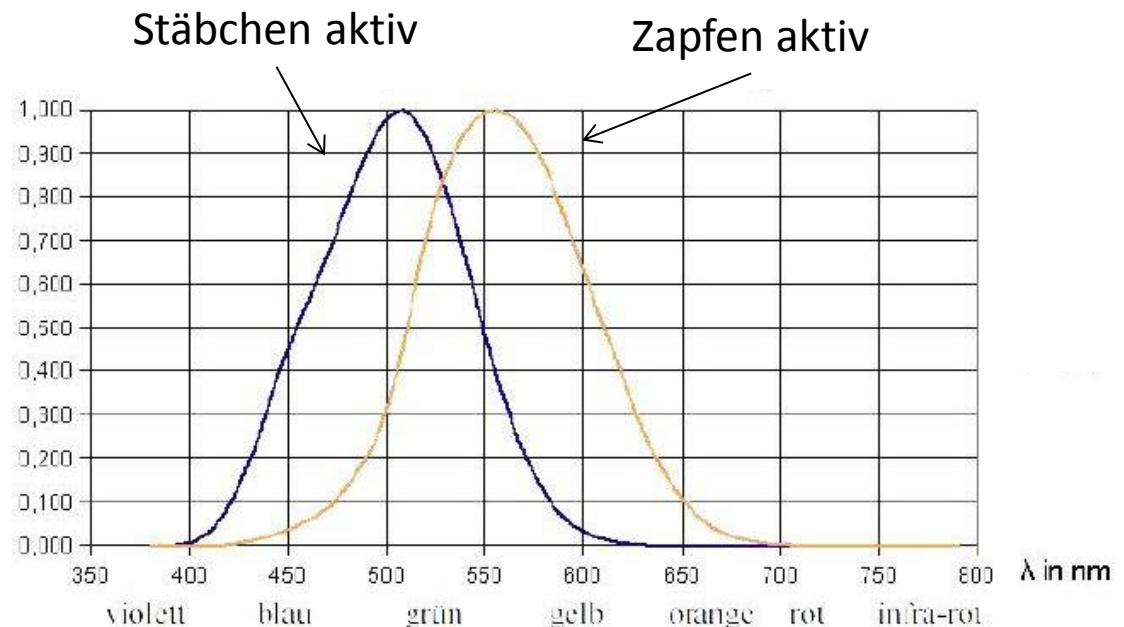


Sehpigmentmolekül  
beim Frosch

# Lichtempfindlichkeit beim Auge

- Ca. 200 Helligkeitsstufen unterscheidbar
- Höhere Empfindlichkeit der Stäbchen bei kurzwelligem Licht (500nm), Zapfen mittel- bis langwelliges Licht (560nm)
- Höchste Empfindlichkeit in grün-gelb Bereich
- Auge beim Tagessehen (rote Kurve) und bei Nacht (blaue Kurve)

Empirisch gemessenes  
Helligkeitsempfinden  
hell/dunkel



# Lichtempfindlichkeit beim Auge

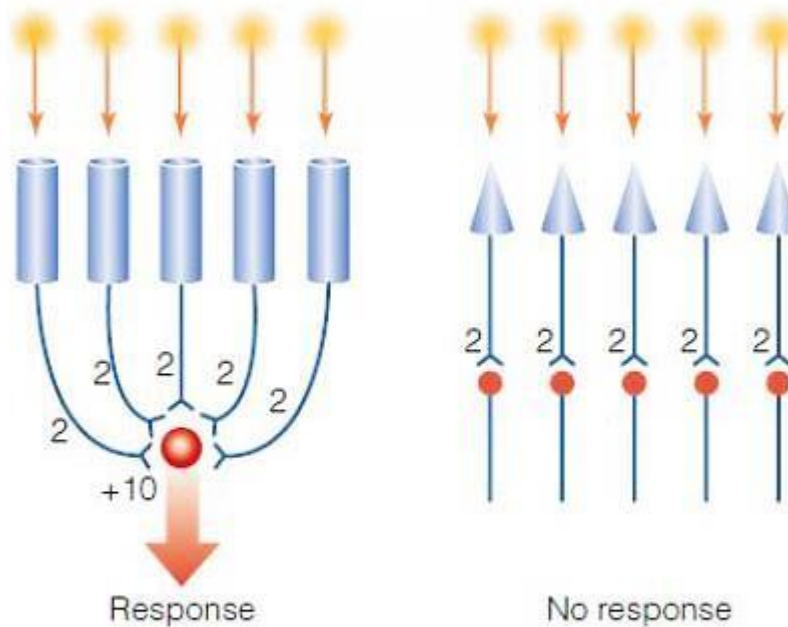
---

Leuchtdichte cd (Candela)/m <sup>2</sup>	
$10^{-6} = 0.000001$	Unterste Grenze zur Orientierung
unter $10^{-2} = 0.01$	Nur Dämmerungssehen, kein Farbsehen
$10^{-2} = 0.01$ bis $10^2 = 100$	Übergang vom Dämmerungs – zum Tagessehen, Farbsehen für den Bereich der Fovea
$10^2 = 100$ bis $10^5 = 100.000$	Tagessehen, helligkeitskonstantes Farbsehen
$10^5 = 100.000$	Beginnende Blendung des hell adaptierten Auges



# Neuronale Verschaltung (Lichtempfindlichkeit)

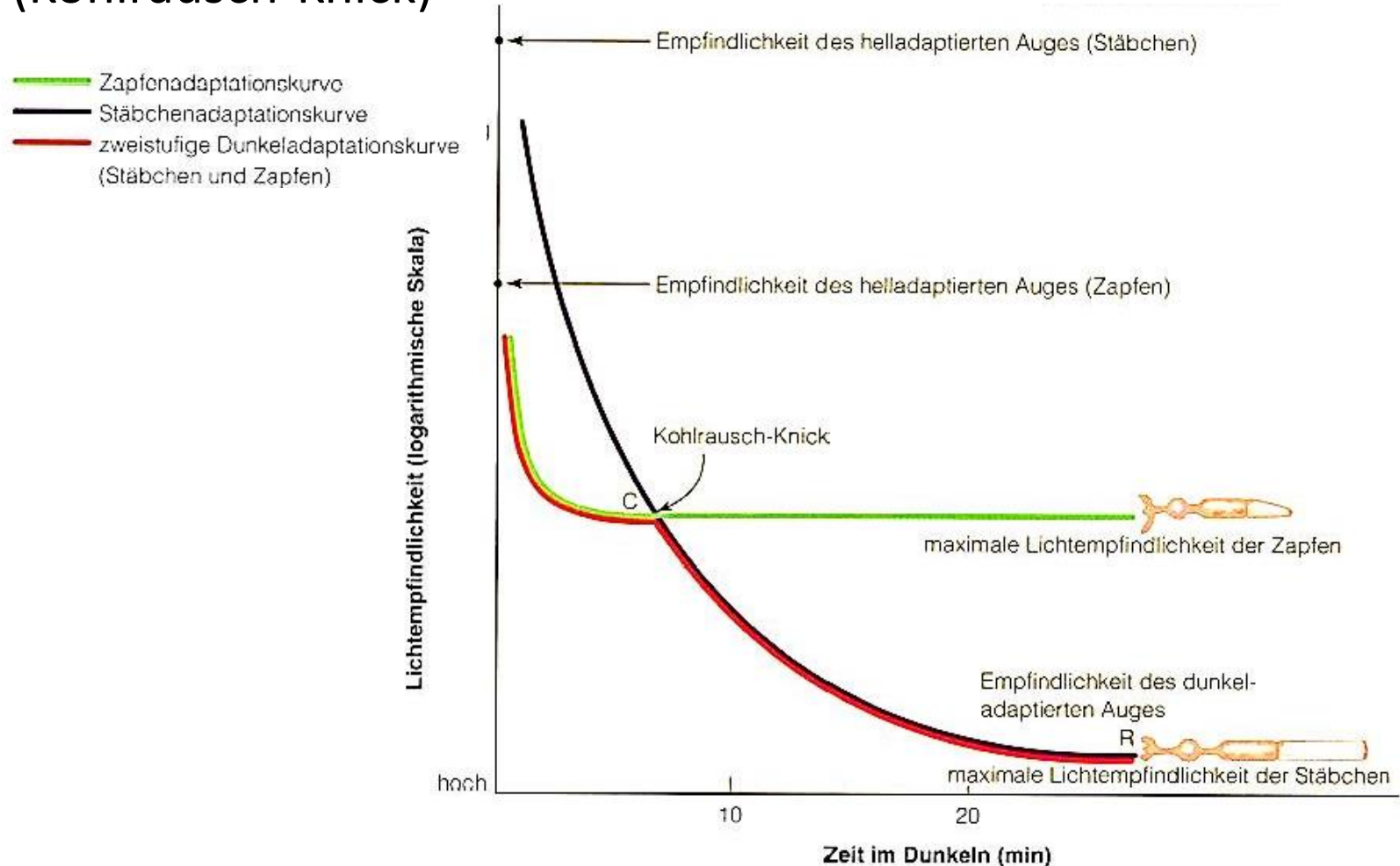
- Höhere Lichtempfindlichkeit bei Stäbchen durch Konvergenz = Verschaltung von Neuronen



Stäbchen links, Zapfen rechts

# Dunkeladaptation beim Auge

- Zapfen adaptieren in den ersten Minuten
- Stäbchen übernehmen die Sicht nach ca. 8-10min (Kohlrausch-Knick)



# Farbverarbeitung in der Fernsehtechnik

---

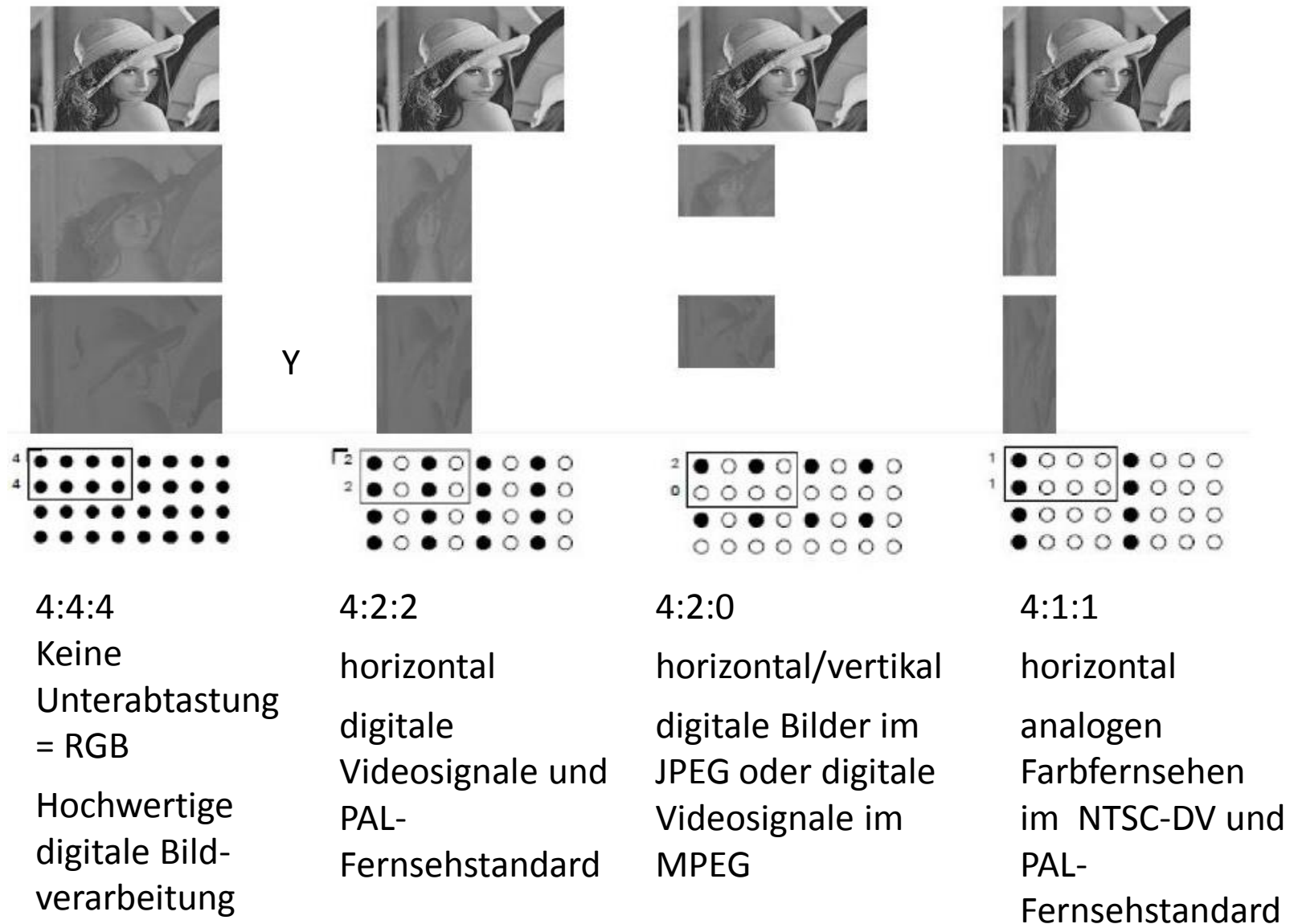
- In der Fernsehtechnik (PAL, NTSC - Farbübertragungsverfahren) wird Helligkeits- und Farbempfindung beim Menschen genutzt: Helligkeit (Luminanz) und Farben werden getrennt verarbeitet
- Analoges Fernsehen: YUV, Y für Luminanz und UV für die Chrominanz = Farbinformationen
- Digitalfernsehen:  $YC_bC_r$ , Y für Luminanz und  $C_bC_r$  für die Chrominanz
- Gewichtung der Farbkomponente, da Helligkeitsempfindung abhängig von Farbe (grün heller als rot, rot heller als blau)

Luminanz:  $Y = 0.3 * R + 0.59 * G + 0.11 * B$

Weiterer Ansatz der Luminanzbestimmung:

Mittelwert  $Y = (R + G + B) / 3$

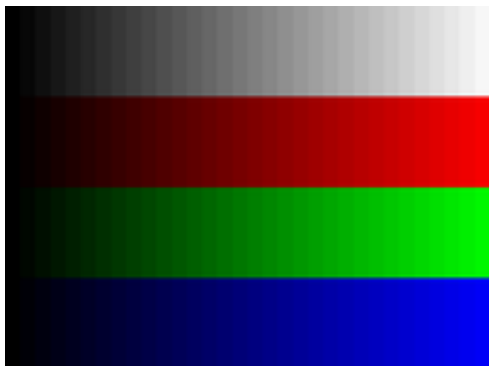
# YUV/YCbCr Codierung beim Video



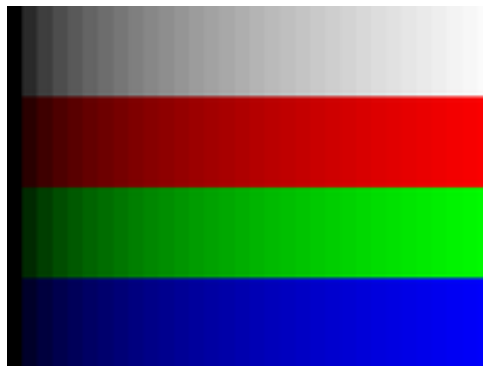
# Gamma- Korrektur

- Proportional (d. h. linear) wachsenden Größe in eine nicht linear wachsende Größe (Mensch) überführt – Helligkeitsempfinden steigt in dunklen Bereichen steiler und in hellen weniger steil an (Bild mittig  $\gamma = 0,5$ ) – Stevenssche Potenzfunktion (Gamma von ca. 0,3 bis 0,5)
- Helligkeitswahrnehmung unabhängig vom verwendeten Monitoren und Grafikkarten

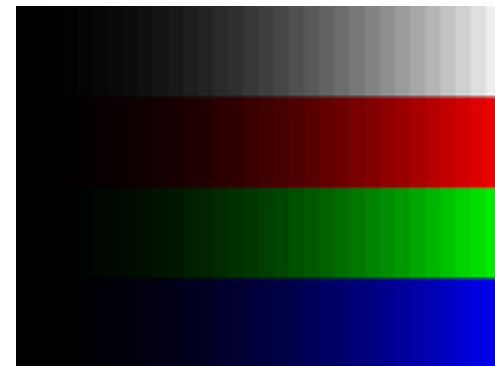
linear zunehmender  
Helligkeit  $\gamma = 1,0$   
(Mitte: 50% Helligkeit)



*Gammakorrektur*  
 $\gamma = 0,5$  (Mitte: 75%  
Helligkeit)



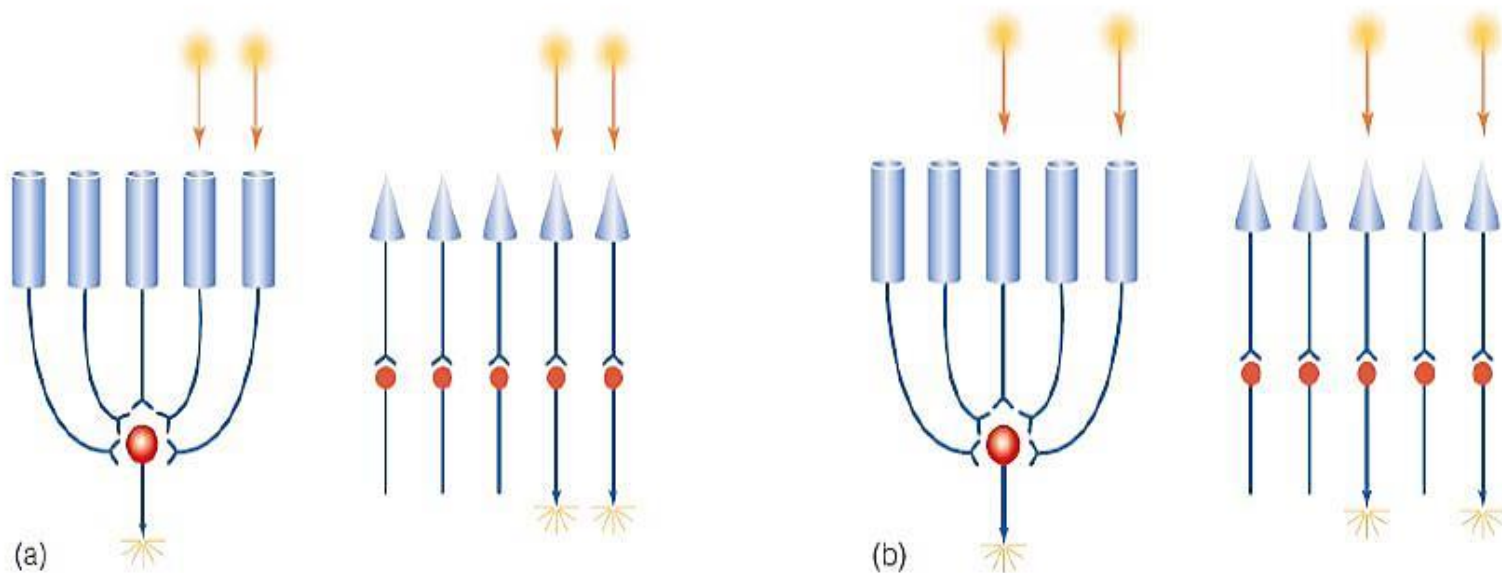
*Gammakorrektur*  
 $\gamma = 2,0$  (Mitte 25%  
Helligkeit)



Helligkeiten der dunkelsten (0) und hellsten Felder (255) bleiben erhalten

# Neuronale Verschaltung (Detailgenauigkeit)

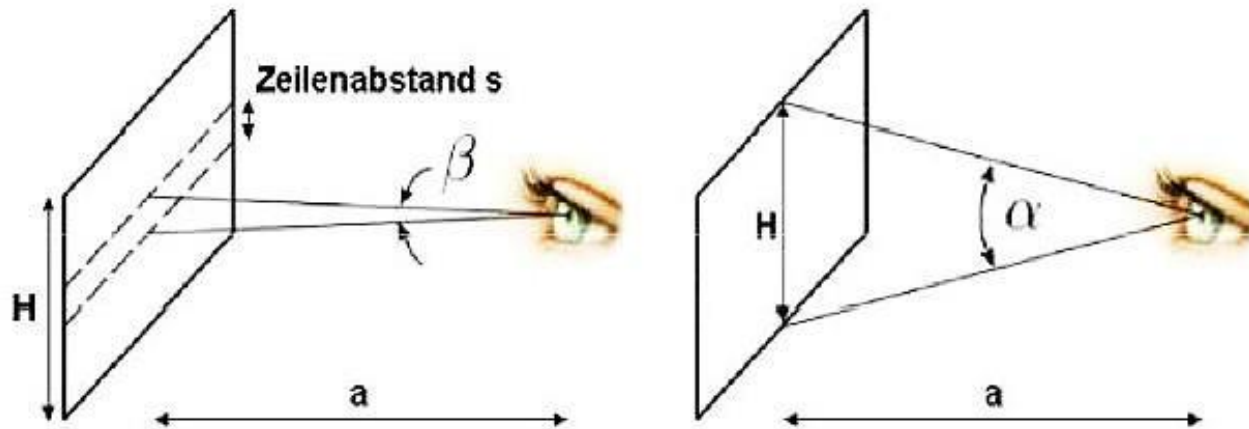
- Detailliertes Sehen (Scharfsehen) in der Fovea (Zapfen)
- Bei Stäbchen (links) kein Hinweis, ob ein, zwei oder mehr Lichtreize, da immer nur eine Antwort



Stäbchen jeweils links, Zapfen jeweils rechts

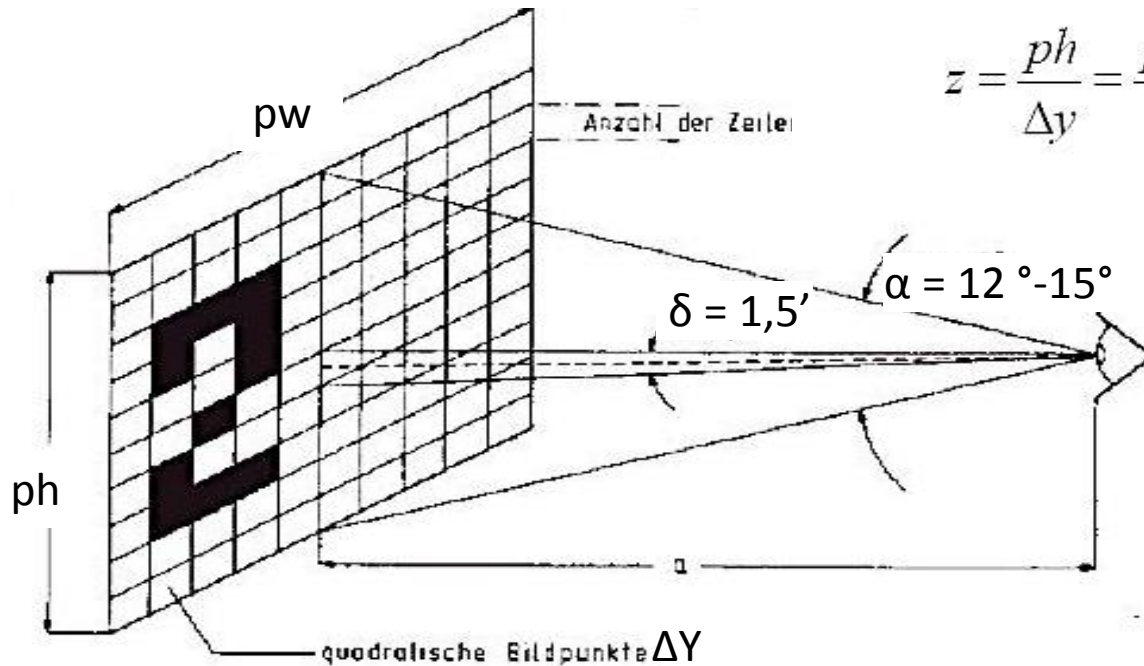
# Minimaler Zeilenabstand und -anzahl

- Erfassung „mit einem Blick“  $12^\circ$  -  $15^\circ$  (Betrachtungswinkel)
- Ab einem Raumwinkel von  $1,5'$  (Bogenminute =  $1^\circ/60$ ) werden zwei Lichtpunkte getrennt wahrgenommen
- Die Zeilenstruktur wird vom Auge gerade nicht mehr wahrgenommen (Grenzauflösung)



# Minimaler Zeilenabstand und -zahl

- Anforderung an die minimale Zeilenzahl eines Bildes (Fernsehen, Monitor), 480-600, z.B. im europäischen analogen PAL-Standard mit 625



$$z = \frac{ph}{\Delta y} = \frac{ph}{a} \cdot \frac{a}{\Delta y} = \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\delta)} \approx \frac{\alpha}{\delta}$$

pw - sichtbare Bildbreite  
 ph - sichtbare Bildhöhe  
 $\delta$  = Raumwinkel  
 $\alpha$  = Betrachtungswinkel  
 $\Delta Y$  = Zeilenabstand (Pixel)



# Flimmerwahrnehmung des Auges

---

- Begrenzte Reaktionsfähigkeit nach Anregung eines Rezeptors (Regeneration des Sehpigmentes)
- Zeitliche Auflösung des Sehsinns: 50ms Darbietung
- Scheinbewegung (Stroboskopische Bewegung)
- Bei der Filmaufzeichnung nutzt man die Trägheit des Auges
- Maximale Reaktionsgeschwindigkeit des Sehsinns liegt (je nach Helligkeit) zwischen 50 und 60 (Halb-) bilder pro Sekunde -> Illusion einer fließenden Bewegung



**Fragen!...**

---