

## 2. Physikalisch-biologisch-psychologische Grundlagen: Licht, Sehen, Farbe

Bilder dienen auch in der Computergrafik der Kommunikation von und zum Menschen  $\Rightarrow$  wir sollten das menschliche visuelle System kennen, um den Informationstransfer optimal zu gestalten.

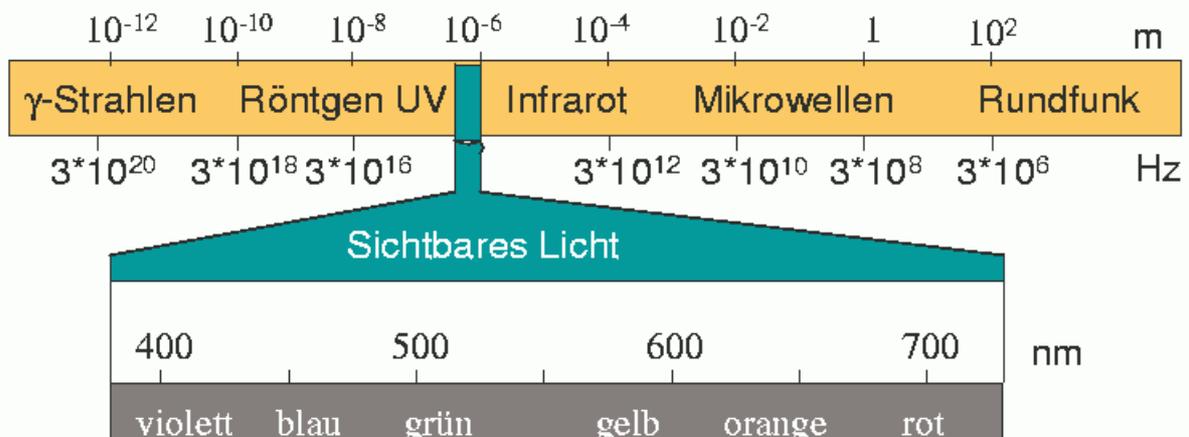
Menschliches visuelles System (Augen + Gehirn!) = entscheidendes Glied in der Kette der Bilderzeugung.  
Merke: *Am Monitorausgang ist nicht das Ende des Informationsflusses.*

### Licht

physikalisch: *elektromagnetische Strahlung*  
charakterisiert durch Frequenz  $\nu$  bzw. Wellenlänge  $\lambda$ .

$\nu \cdot \lambda = c =$  Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  $\approx 2,9979 \cdot 10^8$  m/s.

Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts: ca. 380–780 nm (Nanometer = milliardstel Meter),  
entspr. Frequenzbereich um  $10^{15}$  Hz (Hertz, Schwingungen pro Sekunde).



(aus Krömker 2001)

Weitere Eigenschaften: Lichtstärke, Phase, ggf. Schwingungsebene (Polarisation).

### 3 Teilgebiete der Optik:

- Strahlenoptik
- Wellenoptik
- Quantenoptik

In der CG genügt meistens die Strahlenoptik.

Ausnahmen: Arbeiten mit polarisiertem oder kohärentem Licht (Laser); Interferenzerscheinungen. Dort ist der Wellencharakter wesentlich.

Licht aufgebaut aus

- Wellen
  - Teilchen (Photonen = Lichtquanten),  $E = h \cdot \nu$ ,  $h = \text{const.}$
- Einheitliche Beschreibung (formal, unanschaulich) erst in der Quantentheorie möglich.

### Radiometrie und Photometrie

*Radiometrie:* Physikalische Beschreibung.

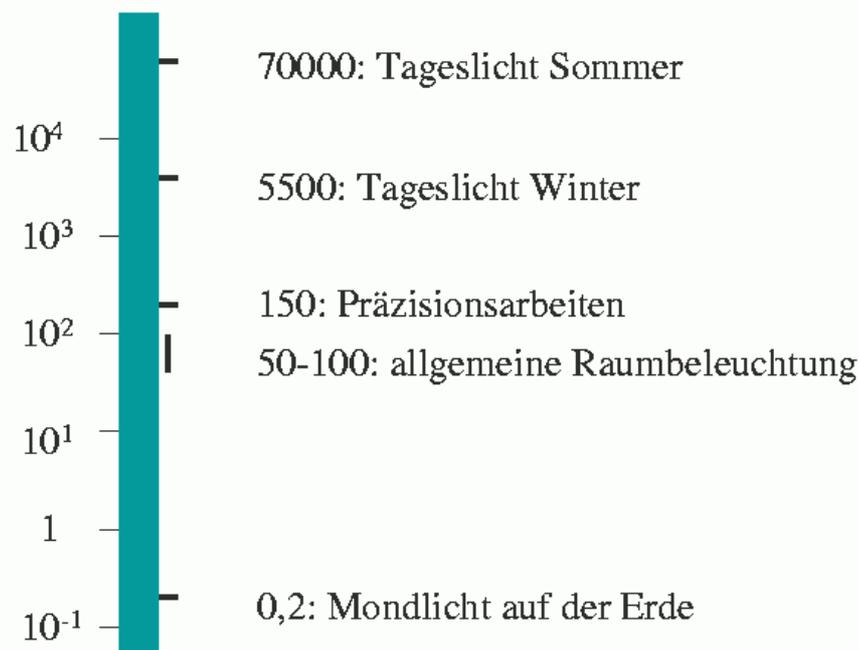
Elektromagnetische Energie, z.B. Betrag der Lichtenergie je Wellenlänge

*Photometrie:* psychophysikalische Messung der visuellen "Energie", die vom elektromagnetischen Reiz erzeugt wird.

### Einheiten der Photometrie

◆ Lichtstärke	luminous intensity	Candela [cd]
◆ Leuchtdichte	brightness	[cd/m <sup>2</sup> ]
auch	1 Stilb = 1 sb	= 1 cd/cm <sup>2</sup>
	1 Apostilb = 1 asb	= 0,3183 cd/m <sup>2</sup>
	1 Lambert = 1 L	= 10 <sup>4</sup> /π cd/m <sup>2</sup>
	1 foot-Lambert = 1 fl	= 3,426 L
	auf der Netzhaut (Retina) oft in:	
	1 troland = 1 cd/cm <sup>2</sup> bei 1 mm Pupillenöffnung	
◆ Beleuchtungsstärke	illuminance	Lux [lx]
◆ Lichtstrom	luminous flux	Lumen [lm]

## Typische Beleuchtungsstärken [Lx]

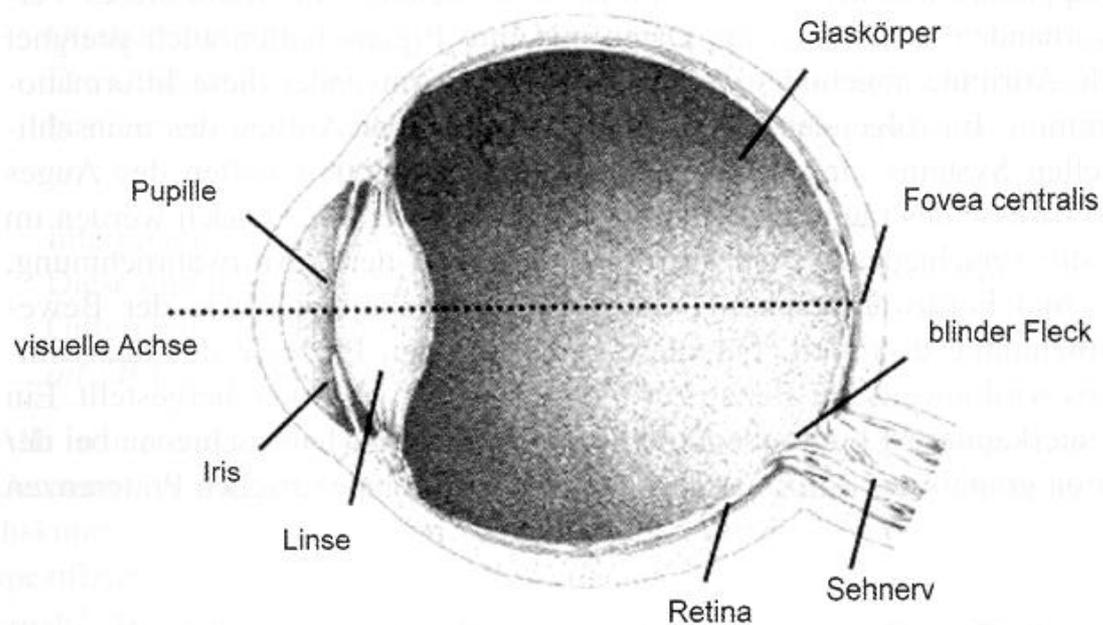


(aus Krömker 2001)

### Das visuelle System

- Auge: optischer Weg + Netzhaut (Rezeptoren & frühe Verarbeitung)
- Sehnerven
- Sehrinde (visual cortex) im Gehirn

### Das menschliche Auge (Abb. aus Schumann & Müller 2000)



*Iris*: Blendenmechanismus

Teil des Adaptationsmechanismus, 2–8 mm Öffnung  
optisch abbildende Elemente: Hornhaut, Kammerwasser, Linse, Glaskörper

*Linse*: Akkomodation (Scharfeinstellung),

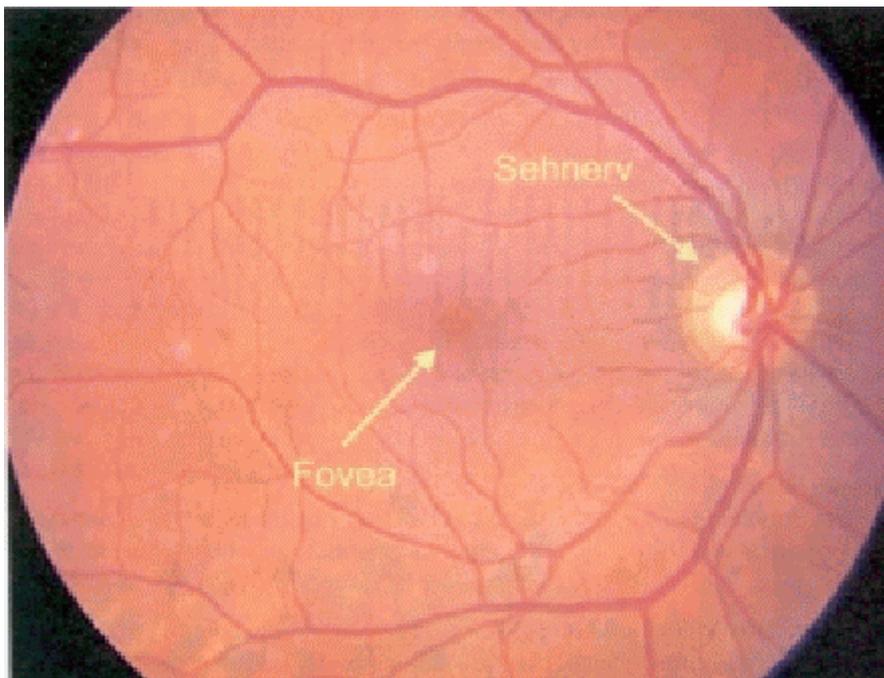
Brennweite: fern  $f = 17$  mm, nah  $f = 14$  mm.

*Netzhaut (Retina)*: Rezeptoren (Wahrnehmungszellen),  
Nervengeflecht und Sehnerv.

Mittlerer Bereich der Netzhaut: "gelber Fleck" (*macula lutea*),  
ca. 1,5–2 mm Durchmesser, 5° Winkeldurchmesser.

Im Zentrum: Netzhautgrube, ca. 0,2 mm Durchmesser bzw.  
1,5° Winkeldurchmesser = Bereich des schärfsten Sehens (dort  
80 % der Sehschärfe).

*Blinder Fleck*: Austrittsort des Sehnervs.



(aus Schumann & Müller 2000, Krömker 2001).

Nervenbahnen:

innerhalb der Netzhaut bereits erste Verschaltungen

Sehnerv: ca. 1 Million Ganglienzellen

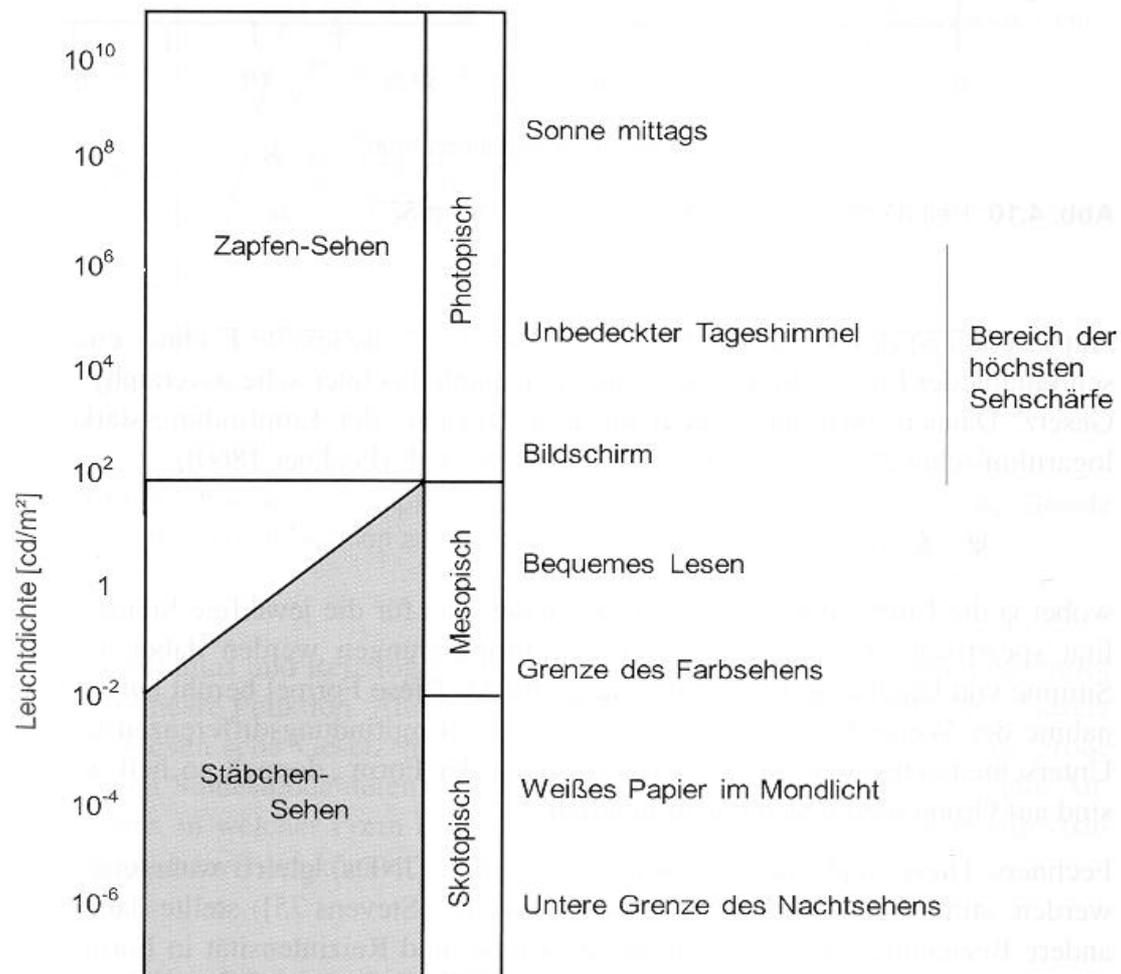
Kreuzung der beiden Sehnerven (*chiasma optica*)

Weiterleitung über mehrere Zwischenstationen zum primären  
visuellen Cortex (im hinteren Teil des Großhirns, beidseitig)

## Aufbau der Netzhaut:

### 2 Grundtypen von Fotorezeptorzellen

- Nachtsehen: Stäbchen (*rods*), nicht farbsehfähig, ca. 120 Millionen
- Tagsehen: Zäpfchen (*cones*), ca. 6 Millionen, hauptsächlich in der *fovea centralis*



(aus Schumann & Müller 2000)

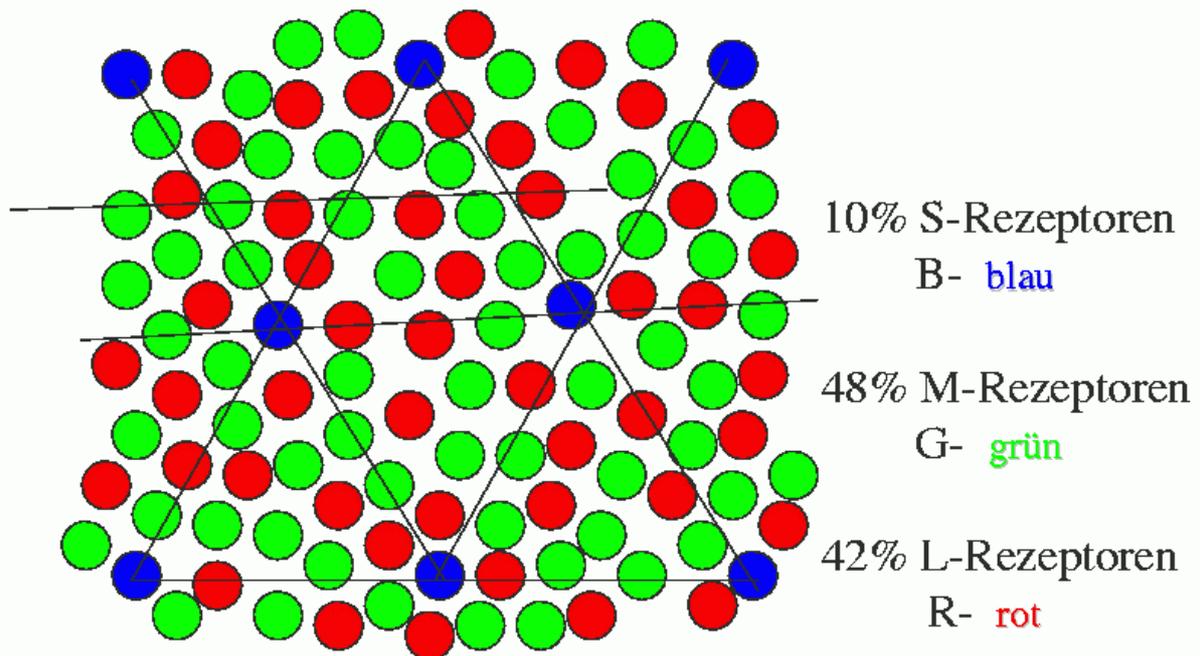
### Duplizitätstheorie des Sehens: 2 komplementäre Sehsysteme.

- *Skotoptisches System*: Stäbchen, Dämmerungssehen, geringes Auflösungsvermögen, kein Farbempfinden, aber extrem hohe Sensitivität.
- *Photoptisches System*: hohes räumliches und zeitl. Auflösungsvermögen, Farbsehen, aber geringe Sensitivität.

### 3 Zapfen-Subtypen:

L für Rot-Sehen, M für Grün-Sehen, S für Blau-Sehen.

## Zapfenmosaik in der Fovea Centralis



(aus Krömker 2001)

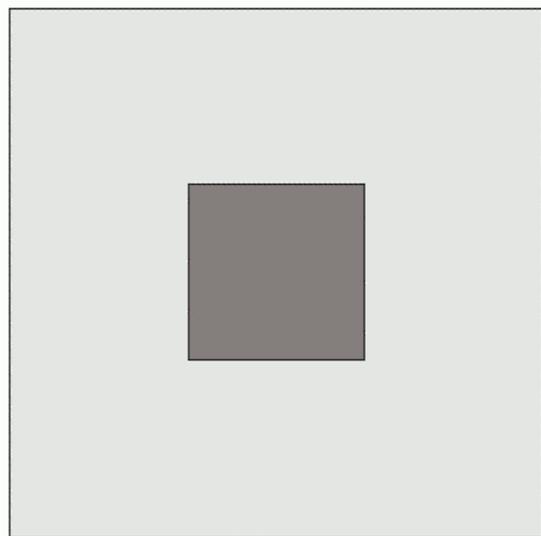
### Helligkeit:

keine absolute Wahrnehmungsgröße  
abhängig von:

Reizstärke (Leuchtdichte)

Reizstärke zuvor (Adaptation!)

Leuchtdichte in der Umgebung



die beiden mittleren Quadrate haben dieselbe Graustufe  
(aus Krömker 2001)

### Hell-Dunkel-Unterschied:

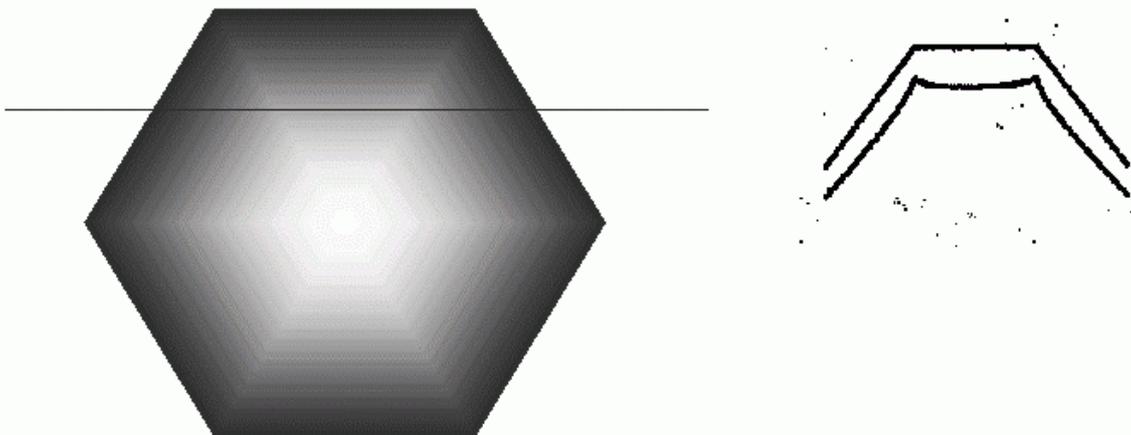
sehr wichtige Empfindungsgröße fürs Formensehen, Objekt-sehen...

Unterschied sollte groß genug sein, für kleine Details mindestens 3:1 (besser 10:1), vgl. ISO 9241, part 3, fürs Lesen von Text.

Kontrast: verschiedene Definitionen üblich. Starke individuelle Unterschiede bei Helligkeits-Unterschiedsschwelle (Schwellenkontrast).

Effekte der Signalverarbeitung im Nervensystem beim Sehen von Helligkeitsunterschieden:

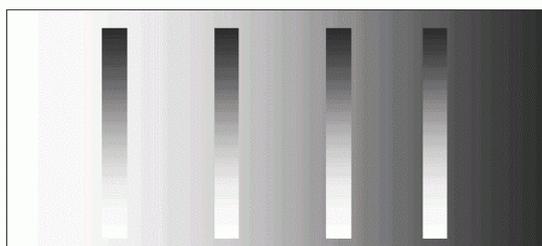
z.B. *Mach-Bänder*



(Krömker 2001)

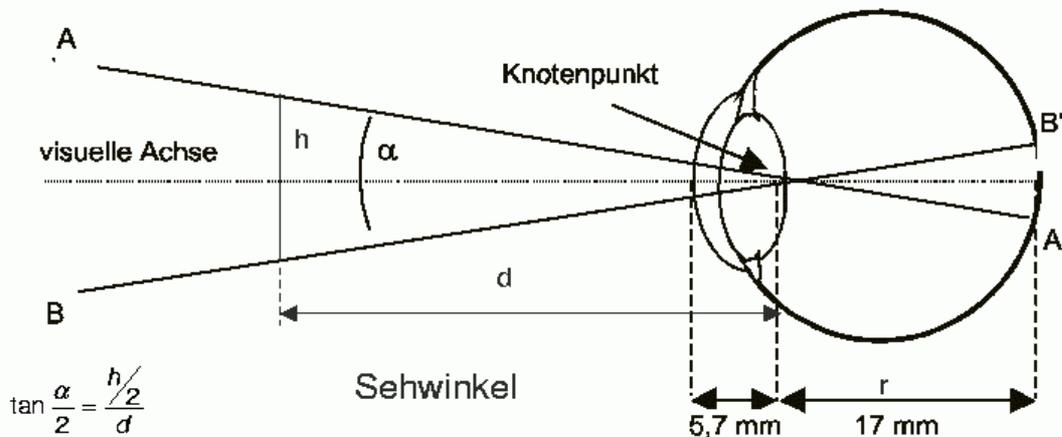
Im Bild ist die (physikalische) Helligkeit linear interpoliert, keine "Strahlen" vorhanden! Die "Strahlen" erscheinen dort, wo die 1. Ableitung eine un stetige Änderung aufweist.

Effekt (in frühen Verarbeitungsschritten in der Netzhaut verursacht) ist Basis für Kanten- und Konturerkennung!



weiterer Effekt: Kontrastverstärkung. Differenzen werden umso stärker wahrgenommen, je näher sie an der Hintergrundhelligkeit liegen.

## Sehwinkel (*Visual Angle*)



(aus Krömker 2001)

Wenn  $d$  und  $r$  in Metern angegeben werden, dann wird der Kehrwert der Brennweite,  $1/f$ , in Dioptrien (dpt) gemessen.

$$1/f = 1/d + 1/r$$

### Tiefenschärfe:

Abstand	Nah	Fern
50 cm	43 cm	60 cm
1 m	75 cm	1,5 m
2 m	1,2 m	6,0 m
3 m	1,5 m	unendlich

Bei 3 mm Pupillenöffnung und  $1/3$  dpt Tiefenschärfewert gilt folgendes Intervall  $\left[ \frac{3d}{d+3}, \frac{-3d}{d-3} \right]$

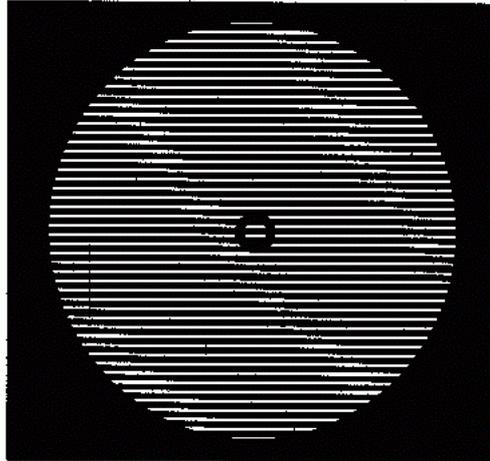
(Krömker 2001).

### Erkennung kleiner Details:

Begrenzt durch

- optische Eigenschaften des Auges, insbes. Lichtbeugung;
- Abtastung durch die Rezeptoren (insbes. Zapfengröße);
- Verarbeitung im Nervensystem.

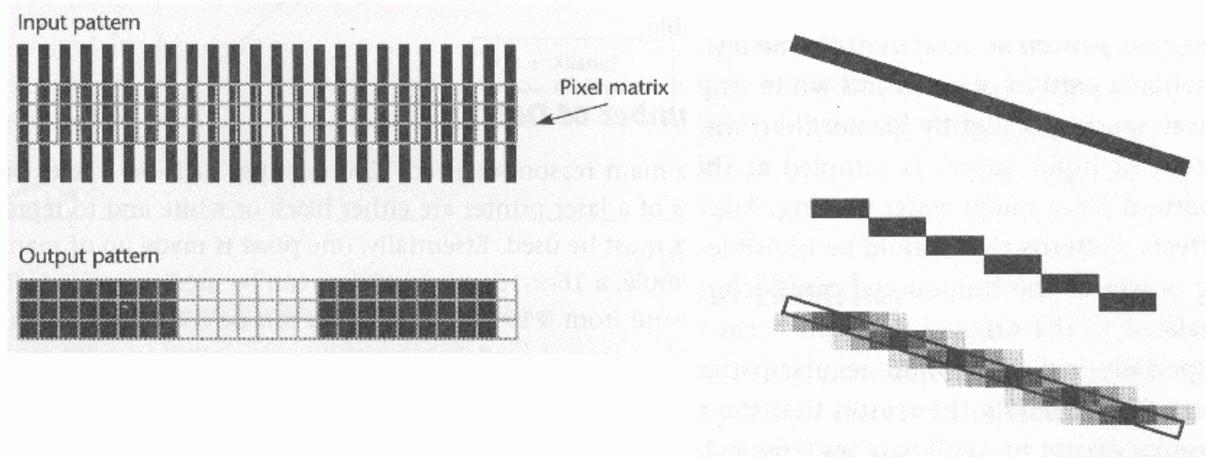
## Visueller Stress:



Großflächige sich wiederholende Blitze oder Streifenmuster und Flickerraten von 20 Hz lösen bei fast allen Betrachtern **visuellen Stress** aus, bis hin zu krampfartigen Anfällen (nach Krömker 2001)  
⇒ bei Multimedia-Anwendungen zu vermeiden

## Aliasing:

Streifenmuster und Treppenstufen durch Rasterung, wirken sehr störend (visuelles System reagiert hier empfindlich)  
⇒ Abhilfe: bei Streifen Anpassung der Streifenabstände an Pixelgröße; bei Linien Ausgleich durch Graustufen (*Anti-Aliasing*) (wir kommen darauf zurück)



(aus Krömker 2001)

Ein typisches CRT- oder auch LCD-Display hat nur ca. 72 dpi (*dots per inch*, typographische Auflösungs-Maßeinheit):  
⇒ Probleme mit feinen Strukturen, die Struktur der Pixel kann zusätzliche Probleme erzeugen.

## Formwahrnehmung

Grundlegende Arbeiten zur Organisation der menschlichen Wahrnehmung: *Gestaltpsychologie* (frühes 20. Jh., bes. Wertheimer)

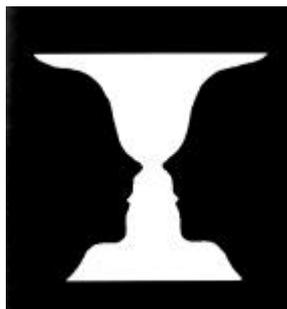
- das Ganze ist verschieden von der Summe seiner Teile;
- das visuelle System des Menschen fasst Elemente nach Gruppierungsregeln zusammen.

*Beispiele:*

der Dalmatiner (aus Schumann & Müller 2000, nach Thurston 1986) – keine Konturlinie vorgegeben, diese konstruiert das visuelle System!



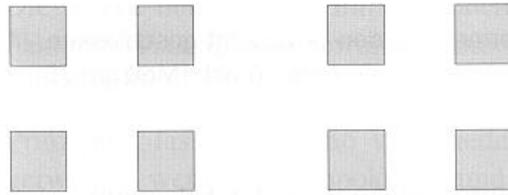
Figur-Grund-Trennung:



Gestaltprinzipien (Einsatz bei Visualisierungsaufgaben sinnvoll):

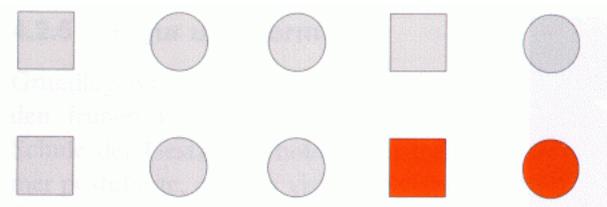
*Gestaltprinzip der Nähe*

Nahes wird als zusammengehörig empfunden:



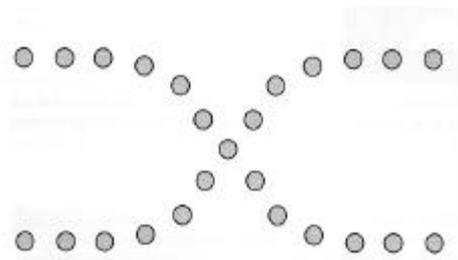
*Gestaltprinzip der Ähnlichkeit*

Gleiches oder fast gleiches wird als zusammengehörig empfunden. Farbe gruppiert dabei stärker als Form:



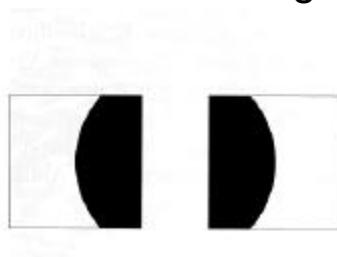
*Gestaltprinzip der stetigen Fortsetzung*

Unter mehreren Möglichkeiten, Musterelemente in eine Gestalt einzuordnen, wird die einfachere und regelmäßigere bevorzugt. In diesem Fall werden zwei sich kreuzende Kurven wahrgenommen, nicht zwei sich berührende Halbkreise:



*Gestaltprinzip der Konvexität*

Konvexe Formen werden bevorzugt geschlossen. Hier wird automatisch ein schwarzer Kreis wahrgenommen:

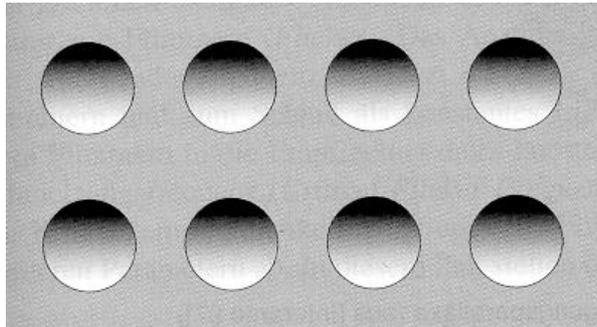


*Kontextabhängigkeit der Formwahrnehmung:*  
der zweite Buchstabe wird im ersten Wort als "H", im zweiten  
als "A" erkannt, obwohl in beiden Fällen identische Stimuli  
vorliegen

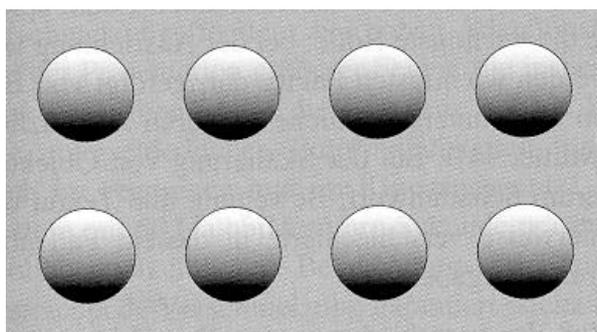
TAE CAT

*3D-Formwahrnehmung (Tiefenwahrnehmung) aus  
Schattierung:*

Kreise werden als kugelförmige Vertiefungen wahrgenommen  
(Schattierung entspricht hier den üblichen Verhältnissen bei  
einer Beleuchtung von oben):



Die gleichen Kreise, gedreht, werden als kugelförmige  
Erhebungen wahrgenommen:



Tiefenwahrnehmung: komplexe Informationsverarbeitung im  
visuellen System, wo u.a. eine Rolle spielen:  
binokulare Disparität, Bewegungsfaktoren, lineare Perspektive,  
Farbe, atmosphärische Perspektive, Texturgradienten,  
Elevation, Orientierung, Schattierung, Schattenwurf,  
Verdeckung, relative Größe ⇒ siehe *Stereoskopie*