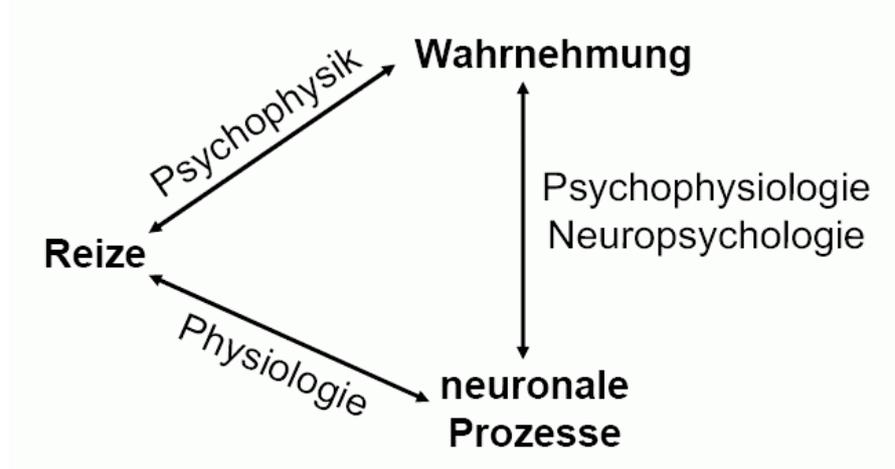


2. Grundlagen zur visuellen Wahrnehmung

2.1. Wahrnehmungsphysiologie und -psychologie allgemein



Wahrnehmung: Organisiert oft chaotische Sinneswahrnehmungen zu stabilen, geordneten Perzepten.

Perzept - das Wahrgenommene: das erfahrene (phänomenale) Ergebnis des gesamten Wahrnehmungsprozesses, der Vorgänge wie Zusammenfügen, Schätzen, Urteilen, Erinnern, Vergleichen und Assoziieren umfasst.

Psychophysik:

- dimensionale (Fechner, Stevens)
direkter Zusammenhang zwischen Reiz und Wahrnehmung

Ziel: Abbildungsfunktionen

- strukturelle (Gestaltpsychologie)
Wahrnehmung entsteht aus Reizstruktur

Ziel: Organisationsprinzipien

(Bartz 2005)

Zusammenhang zwischen (physikalischem) Reiz und Wahrnehmung:

Reizschwelle S_0 : kleinster wahrnehmbarer Reiz

- Bsp.: Helligkeit des dunkelsten noch erkennbarer Stern am Nachthimmel
- Reizschwelle ist ein quantitatives Maß

Unterscheidungsschwelle ΔS : kleinster Unterschied von einem Grundreiz

- Bsp.: Helligkeitsdifferenz für einen Punkt den man gerade noch vor einem grauen Hintergrund wahrnehmen kann
- Unterscheidungsschwelle ist ein qualitatives Maß und ist abhängig vom Grundreiz

Weber-Fechner'sches Gesetz(e):

Ψ ... Empfindungsstärke

S ... Intensität des Grundreiz

ΔS ... Unterscheidungsschwelle

k ... von Sinnesmodalität abhängige Konstante

$$\frac{\Delta S}{S + k} = const$$

Fechner'sches psychophysisches Gesetz:

$$\Psi(S) = k \cdot \log S$$

Gilt nur in mittleren Intensitätsbereichen.

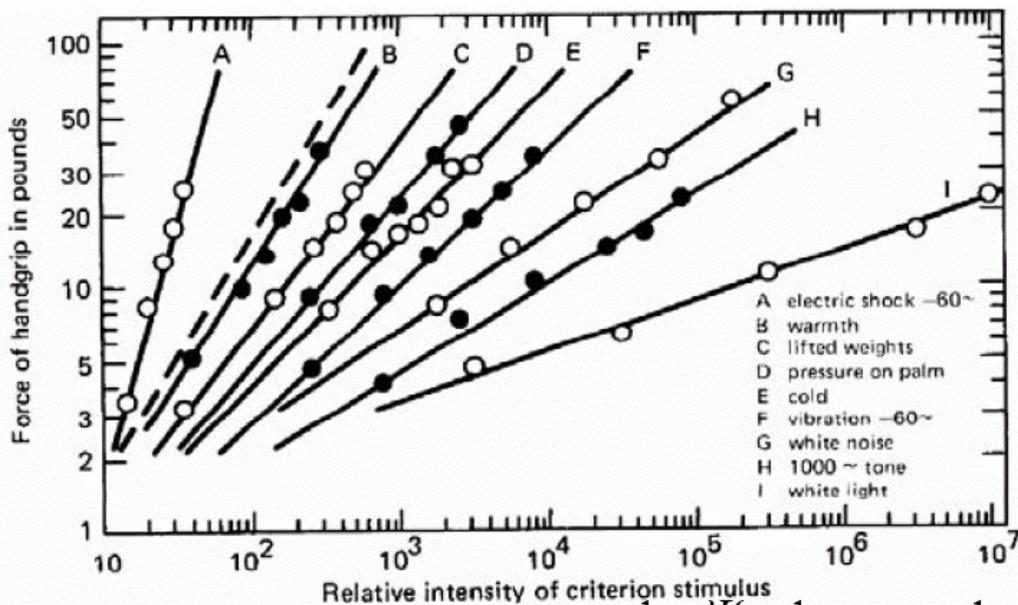
Steven'sches Potenzgesetz:

Einführung der Größenschätzung

$$\Psi(S) = c \cdot (S - S_0)^{n(k)}$$

$n(k)$ ist Dimensionsparameter (was wird gemessen?)

- Helligkeit: $n = 0.3$
- Schwere eines Gewichts: $n = 1.5$
- Elektrischer Schlag $n = 3.5$
- Länge einer Linie: $n = 1.0$



$$\log \Psi = \log c + n \cdot \log(S - S_0)$$

Steven'sches Gesetz: doppelt logarithmische Darstellung der Reizempfindlichkeit über Reizintensität für verschiedene Sinne

(Bartz 2005)

Charakterisierung menschlicher Wahrnehmungsfähigkeiten

- Bandbreite, d.h., aufnehmbare Datenmenge pro Zeiteinheit
- Öffnungswinkel für Signaleingänge
- Orientierungsfähigkeit bzgl. Signalquelle
- Genauigkeit der Lokalisierung einer Signalquelle
- Reichweite von Signalen
- Ausbreitungsgeschwindigkeit von Signalen

Wahrnehmungsfähigkeiten verschiedener Sinne

- Hören
 - Bandbreite: mittel
 - Öffnungswinkel: groß; Ausrichtung nicht notwendig
 - Richtungszuordnung: möglich
 - Genauigkeit: gering
 - Reichweite: mittel
 - Ausbreitungsgeschwindigkeit: mittel
- Riechen
 - Bandbreite: gering
 - Öffnungswinkel: abhängig von Ausbreitungsrichtung
 - Richtungszuordnung: schwierig
 - Genauigkeit: gering
 - Reichweite: mittel

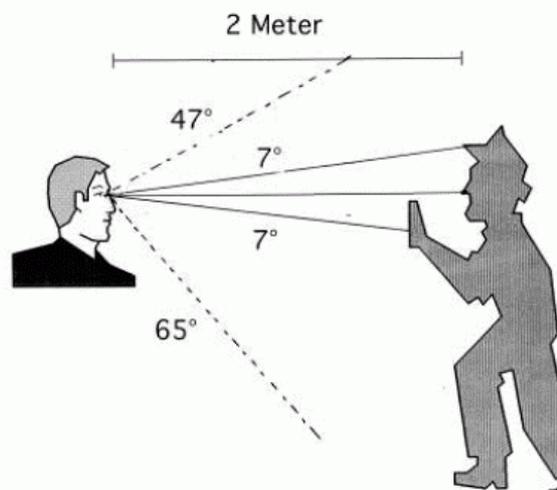
- Schmecken
 - Bandbreite: gering
 - Öffnungswinkel: lokaler Kontakt
 - Richtungszuordnung: Kontaktpunkt
 - Genauigkeit: gering
 - Reichweite: lokal
- Fühlen (Wärme)
 - Bandbreite: minimal
 - Öffnungswinkel: lokaler Kontakt
 - Richtungszuordnung: Kontaktpunkt
 - Genauigkeit: gering
 - Reichweite: lokal
- Sehen
 - Bandbreite: maximal
 - Öffnungswinkel: Gesichtsfeld
 - Richtungszuordnung: sehr gut
 - Genauigkeit: groß
 - Reichweite: sehr groß
 - Ausbreitungsgeschwindigkeit: sehr groß

Das Gesichtsfeld

- Gesichtsfeld (monoculare bzw. binoculare)

Bereich der mit einem bzw. zwei Augen **ohne** Bewegung der Augen erfaßt werden kann.

binocular: horizontal ca. 170° , vertikal ca. 110°



- Blickfeld (monoculare bzw. binoculare)

Bereich der mit einem bzw. zwei Augen **mit** Bewegung der Augen erfaßt werden kann.

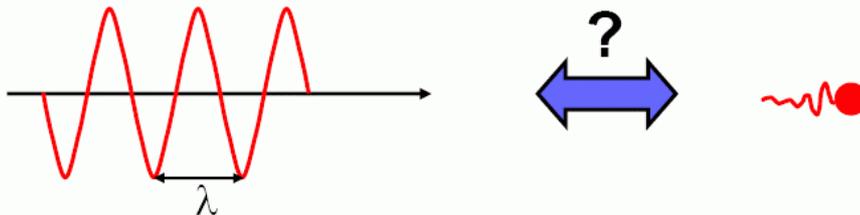
binocular: horizontal ca. 290° , vertikal ca. 190°

(Woessner, o.J.)

2.2. Licht

physikalisch: *elektromagnetische Strahlung*
 charakterisiert durch Frequenz f bzw. Wellenlänge λ .

Licht ist eine in Photonen gequantelte transversale elektromagnetische Welle



Lichtgeschwindigkeit = Wellenlänge * Frequenz

$$c = \lambda \cdot f$$

c ist nur vom Medium abhängig
 → Wellenlänge ist Maß für Energie:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

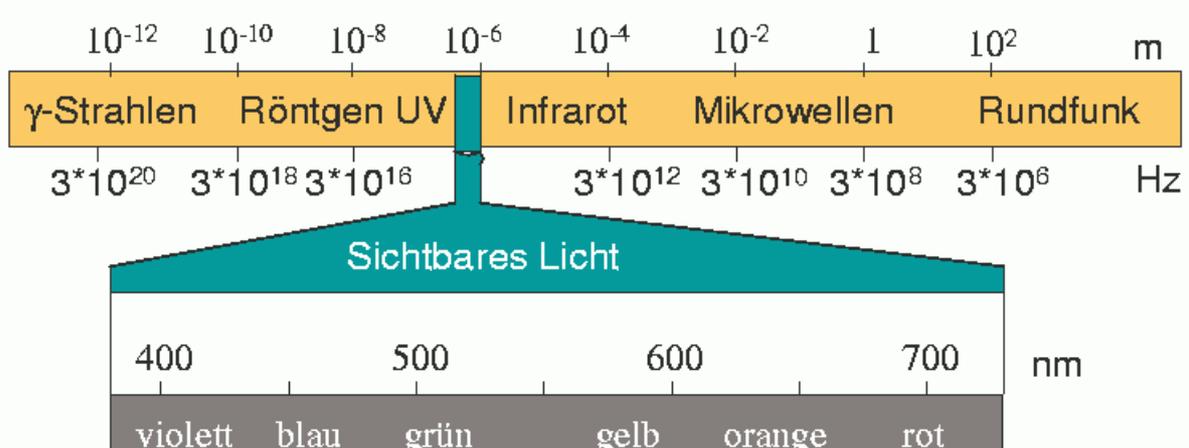
$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

(Bartz 2005)

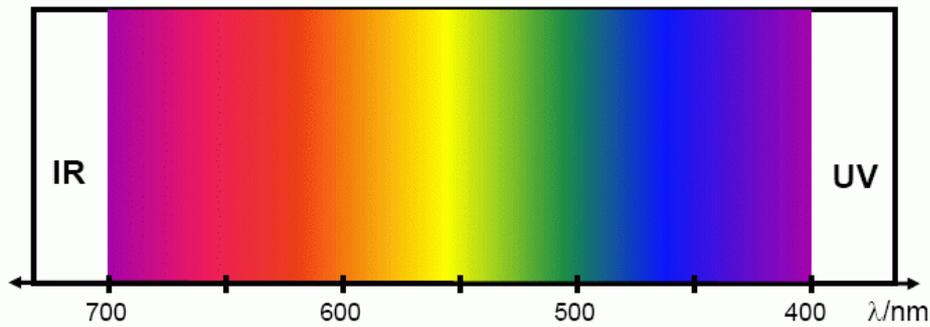
c = Lichtgeschwindigkeit, im Vakuum $\approx 2,9979 \cdot 10^8$ m/s.

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

"Elektromagnetisches Spektrum":



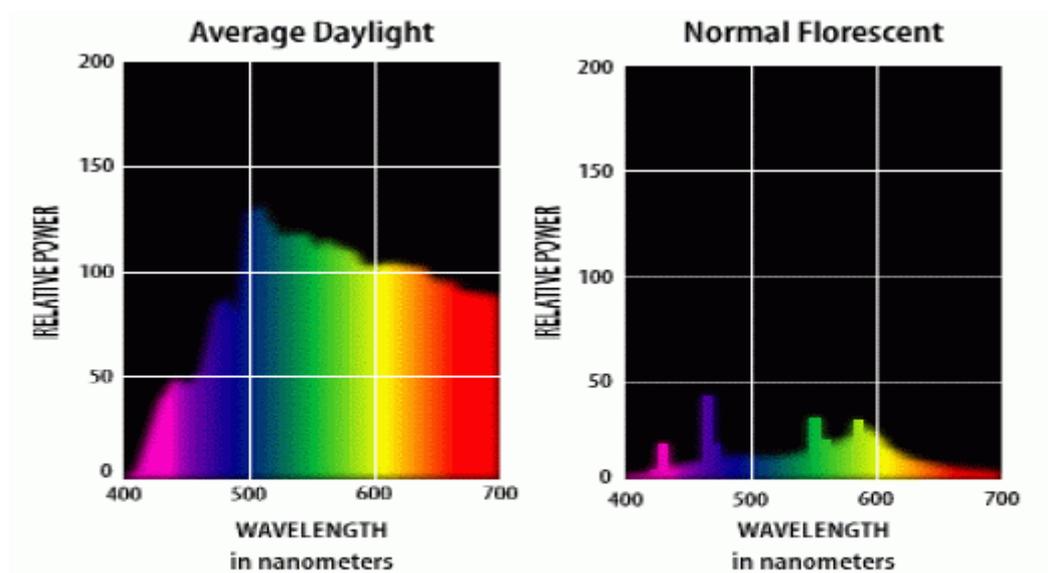
(aus Krömker 2001)



sichtbares Licht

physikalische Beschreibung von Licht:

spektrale Leistungsverteilung (spectral power distribution, SPD) – wieviel Licht der Wellenlänge λ ist in einem gegebenen Licht enthalten (aufgeschlüsselt für alle λ)?



relative spektrale Leistungsverteilung für Tageslicht und eine Leuchtstofflampe

(Bartz 2005)

weitere physikalische Eigenschaften von Licht:
Intensität, Phase, ggf. Schwingungsebene (Polarisation).

Entstehung von Licht:

Glühen: Flüssigkeiten oder Feststoffe emittieren bei Erhitzung über 1000K Licht

Theoretisches Model der Schwarzkörperstrahlung (Absorptionsmodell) beschreibt spektrale Leistungsverteilung:

Beispiele:

- Sonne bei ca. 6500K
- Wolfram-Glühbirne bei ca. 2854K

Gasentladung: Bei Stromdurchfluss leuchten Gase, meist geringer Dichte. Das Licht hängt vom Gas und der Dichte ab. (z.B. Natrium, Quecksilber, Xenon Lampen)

Photolumineszenz: Phosphors wandeln einfallendes Licht in ein für den Phosphor charakteristisches Licht um

Chemische Reaktionen: bei Verbrennung wird chemischer Energie in der Flamme in Licht umgewandelt

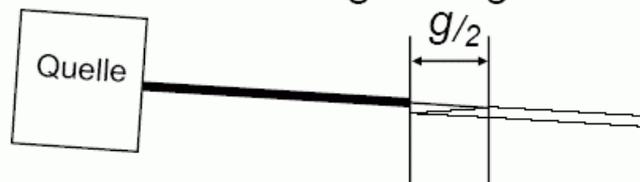
Phosphor: Strom und Elektronenbeschuss bringen Phosphors zum Leuchten (z.B. Monitor, Fernseher)

Eigenschaften von Licht:

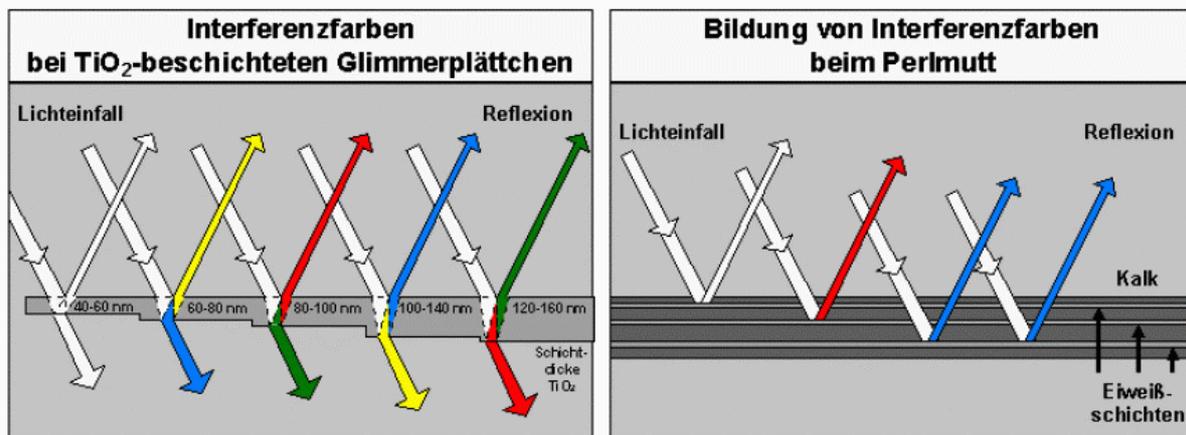
Interferenz: Überlagerung zweier Lichtstrahlen aus derselben Quelle mit einem Gangunterschied g

→ Anteile der Wellenlängen $\lambda=2g$ löschen sich aus

→ Anteile der Wellenlängen $\lambda=g$ verstärken sich



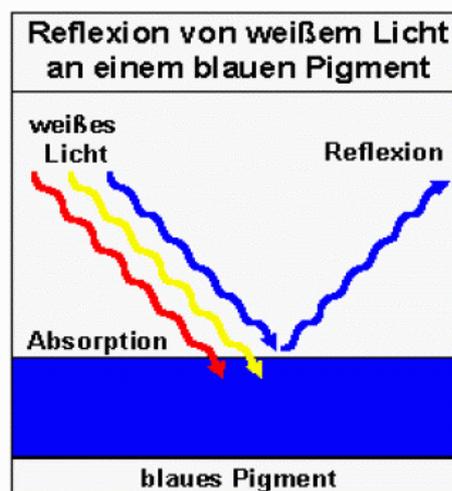
Beispiele, wo Interferenz sich sichtbar auswirkt:



(Bartz 2005)

Grundlegend für die visuelle Wahrnehmung von nicht-selbstleuchtenden Objekten:

Absorption und Reflexion: fällt Licht auf eine farbige Oberfläche werden charakteristische Wellenlängen absorbiert. Das restliche reflektierte Licht enthält die sichtbare Farbe



Standardisierung von Licht

Standardbeleuchtung: gedruckte Farben erscheinen je nach Beleuchtung unterschiedlich (z.B. erscheint gelb in magenta Beleuchtung rot).

Definiere Standardbeleuchtung:

- Illuminant A (2856K / Wolfram Glühwendel)
- Illuminant B (direktes Sonnenlicht)
- Illuminant C (mittleres Sonnenlicht)
- Illuminant D55 (5500 K / bewölktes Tageslicht)
- Illuminant D65 (6500 K / Tageslicht auf Nordhalbkugel)
- Illuminant TL84 (4000K / 3-Band-Fluoreszenzlampe)

Standardbeleuchtung:

Illuminant A

Illuminant B

Illuminant C

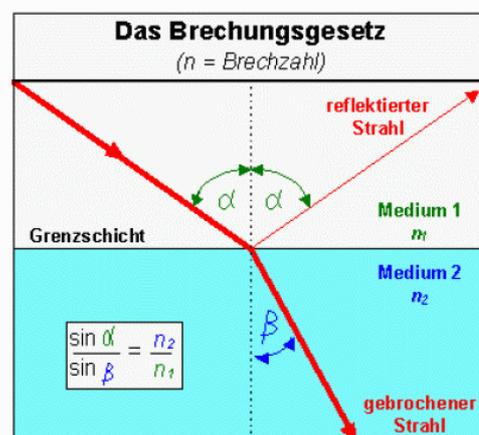
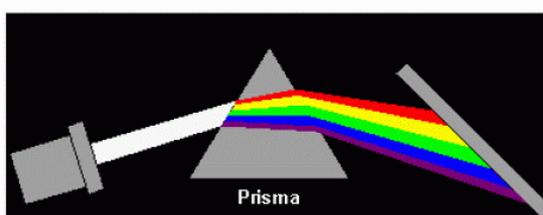


Gleiche Szene mit unterschiedlicher Beleuchtung

Brechung: beim Übergang von Licht zwischen zwei Medien unterschiedlicher Brechkraft n_j , wird der Lichtstrahl nach dem Brechungsgesetz abgelenkt.

Die Brechkraft $n(\lambda)$ eines Mediums ist abhängig von der Wellenlänge

$$n(\lambda) = \frac{\lambda_0}{\lambda}$$



(Bartz 2005)

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

(Krömker 2001)

Definition "Candela":

aktuelle Version:

1 Candela ist die Lichtstärke einer Lichtquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz 540×10^{12} Hz ausstrahlt und eine ausgestrahlte Energie von 1/683 W/sr hat.

(1 sr = 1 Steradian = Raumwinkel, der 1 m² Innenfläche auf einer Kugel mit 1 m Radius um die Lichtquelle entspricht.)

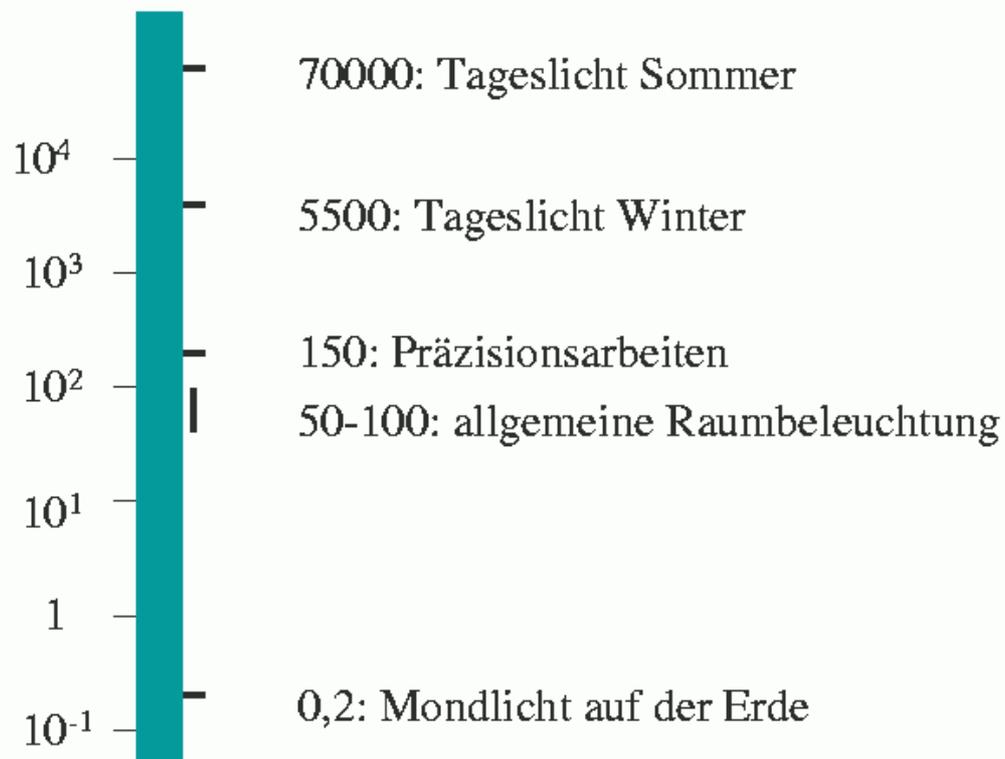
alte Version:

1 Candela ist die Lichtstärke von 1 cm² glühendem Platin am Schmelzpunkt.

1 Lumen = 1 cd * sr

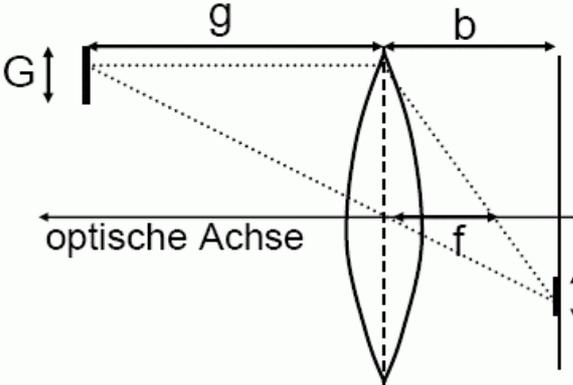
1 Lux = 1 Lumen/m²

Typische Beleuchtungsstärken [Lx]



(Krömker 2001)

Lintengesetze der Strahlenoptik

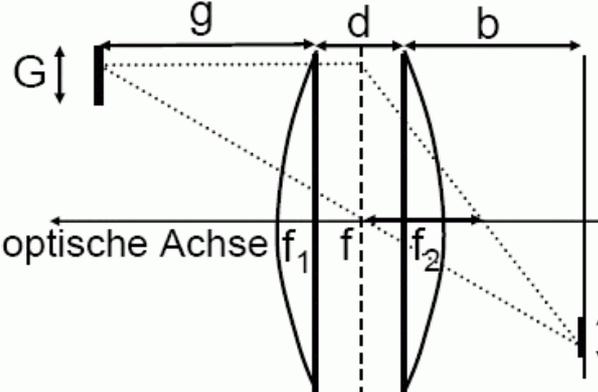


G ... Gegenstandsgröße
 B ... Bildgröße
 g ... Gegenstandsweite
 b ... Bildweite
 f ... Brennweite
 D ... Brechkraft
 Dioptrin (dpt) = $1/m$

Abbildungsgleichung:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{G} + \frac{1}{B} = \frac{1}{f} = D$$

dünne Linse:

$$D = (1-n) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$


Dicke Linse setzt sich aus zwei dünnen Linsen und einem d dicken Zwischenstück zusammen:

$$D = D_1 + D_2 - D_1 \cdot D_2 d$$

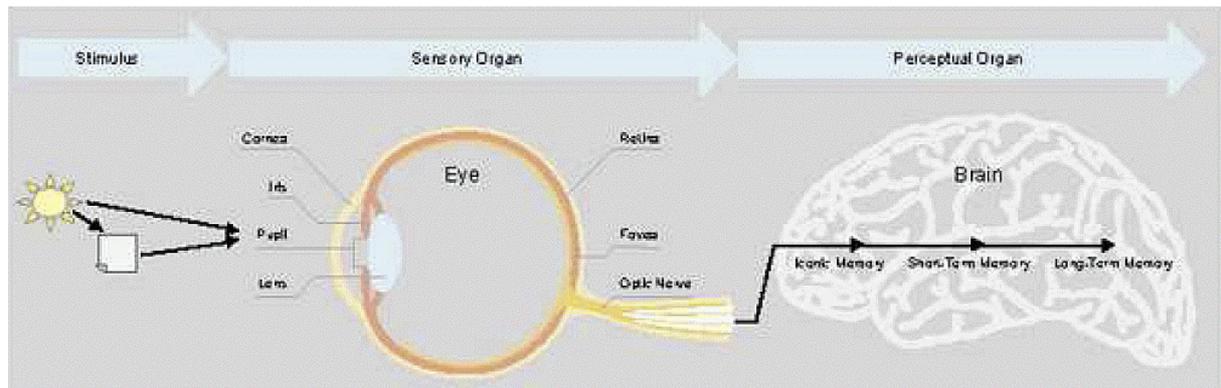
Das Auge ist eine dicke Linse mit

$b \cong 18\text{mm}$ $d \cong 7,5\text{mm}$ $n \cong 1,34$
 $D_1 \cong 43\text{dpt}$ $D_2 = 19\text{-}33\text{dpt}$

(Bartz 2005)

2.3. Das menschliche visuelle System

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



(Weimar 2005)

Das menschliche Auge

Hornhaut: durchsichtige Verlängerung der Lederhaut zum Schutz des Auges

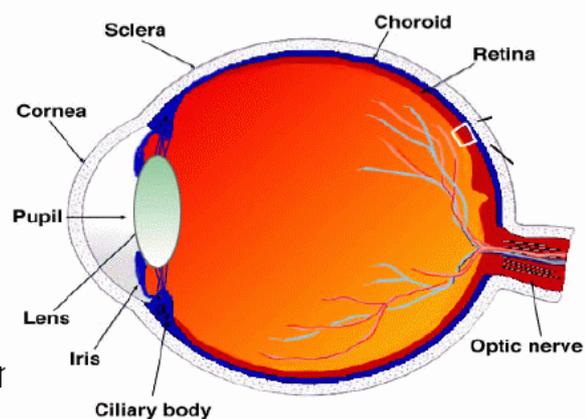
Vorderkammer: mit Wasser gefüllt

Iris: umschließt die Pupille, die als Blende dient - zur Steuerung der Lichtmenge

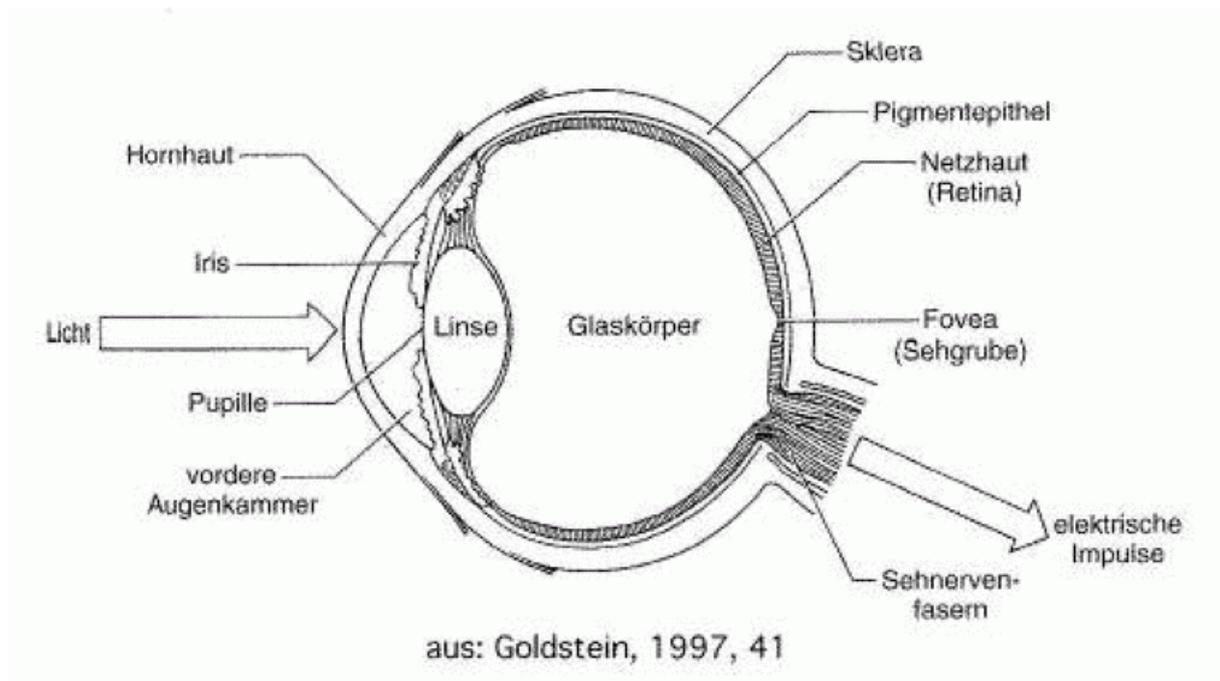
Linse: bildet das Bild auf die Retina ab

Retina: enthält die Lichtsensoren

blinder Fleck / Sehnerv: leitet die aufbereiteten Informationen weiter



(Bartz 2005)



Optische Eigenschaften:

Akkommodation: durch Kontraktion und Verdickung der Linse erhöht sich die Brechkraft.

- Fernakkommodation bei entspannter Linse
- Nahakkommodation bei kontrahierter Linse

Akkommodationsbandbreite $D = \frac{1}{f_{nah}} - \frac{1}{f_{fern}} \text{ [dpt]}$

Kurzsichtigkeit: Brechkraft der entspannten Linse zu groß

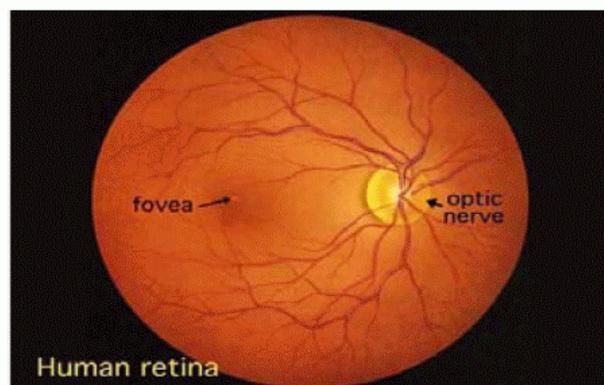
Fernsichtigkeit: Brechkraft der kontrahierten Linse zu klein

Die Netzhaut (Retina)

Retina: 0.4mm dick mit Photorezeptoren besetzt

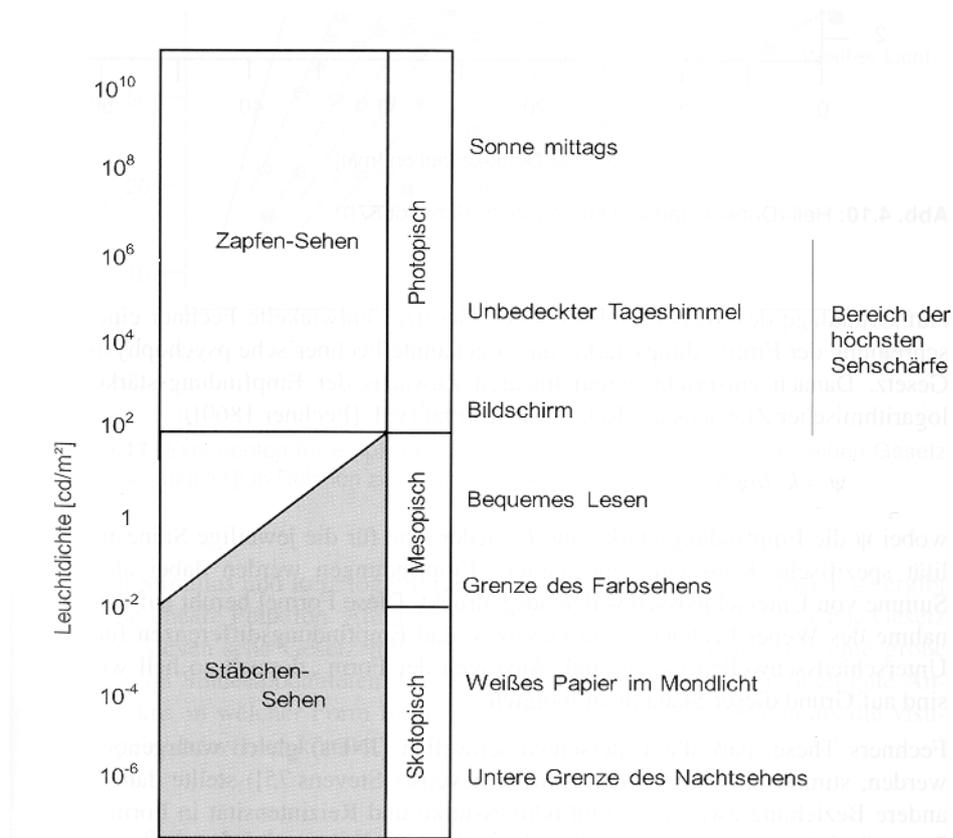
Fovea: Durchmesser ca. 1.5mm, zentral gelegene Region mit höchster Zapfchenkonzentration aber ohne Stäbchen

Blinder Fleck: misst ca. 1.75mm im Durchmesser

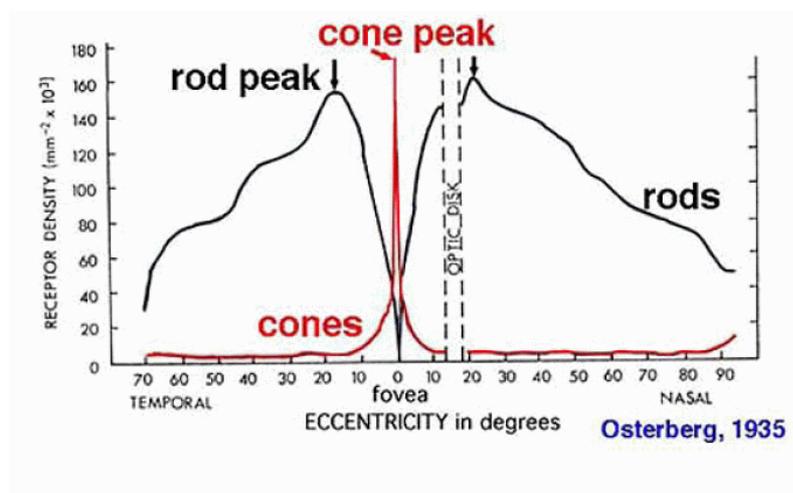


Photorezeptor-Zellen (Sinneszellen): 2 Grundtypen

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

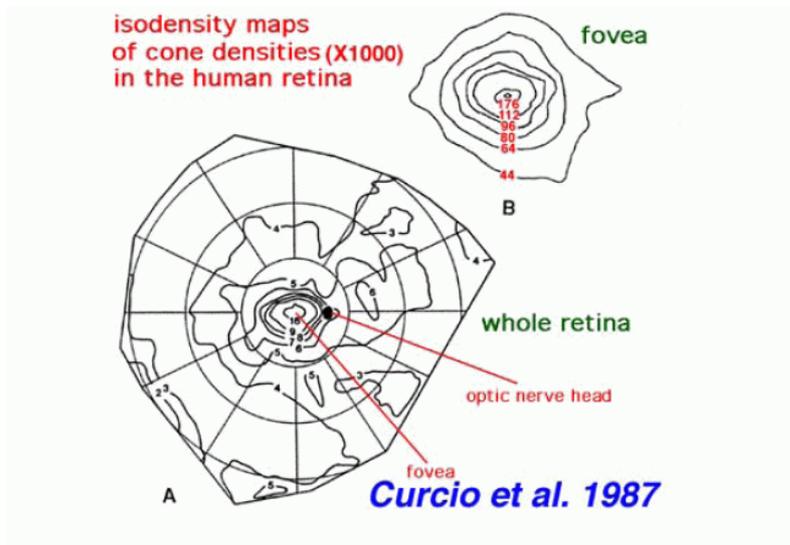


(aus Schumann & Müller 2000)



Dichteverteilung der Stäbchen und Zäpfchen um die Fovea

(Bartz 2005)



Dichteverteilung der Stäbchen und Zäpfchen um die Fovea

Aufbau der Netzhaut:

Zapfen: drei Arten mit unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit

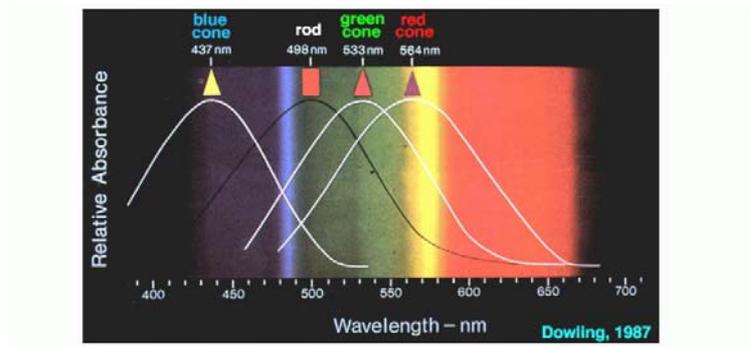
Stäbchen: sehr hohe Empfindlichkeit

Horizontalzellen: Zusammenführung von Rot-Grün, Blau-Gelb und Stäbchensignale in Kontrastsignale

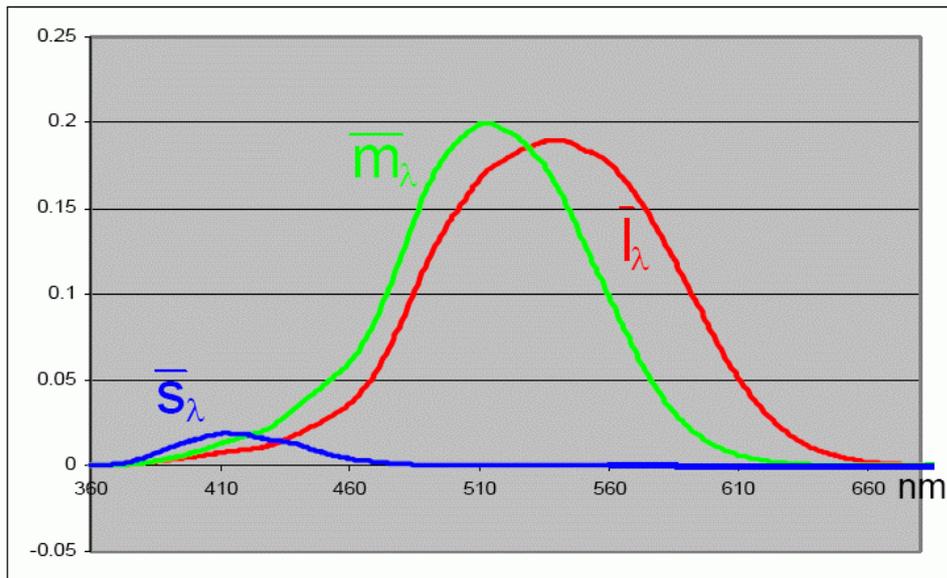
Bipolarzellen: On- und Off-Zellen die Kontraste verstärken

Amakrinzellen: zusätzlich Empfindlichkeit auf Reizänderung

Ganglienzellen: sehr komplex, reagieren auf Farbe, Größe, Richtung und Geschwindigkeit



relative spektrale Empfindlichkeit der Stäbchen und der drei verschiedenen Zäpfchenarten



Spektrale Empfindlichkeit der drei verschiedenen Zapfenarten nach CIE Standard, nicht normiert

(Bartz 2005)

Zapfen:

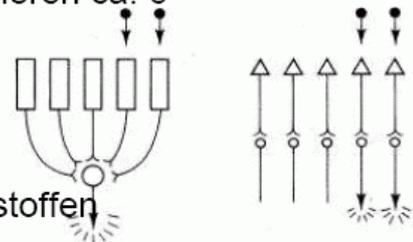
bessere räumliche Auflösung als bei Stäbchen aufgrund unterschiedlicher neuronaler Verschaltung

zuständig für das Farbsehen

1:1 Verschaltung in der fovea, sonst konvergieren ca. 6

Zapfen auf eine Ganglienzelle (6:1)

hohe Dichte in der fovea



drei Zapfentypen mit unterschiedlichen Farbstoffen

kurzwelliges Pigment (max. 419 nm)

mittelwelliges Pigment (max. 531 nm)

langwelliges Pigment (max. 558 nm)

⇒ erzeugen gemeinsam eine Empfindlichkeitskurve mit einem Maximum bei 560 nm

Pigmentregenerationszeiten ca. 6 Minuten

Stäbchen:

geringere räumliche Auflösung als bei Zapfen aufgrund unterschiedlicher neuronaler Verschaltung

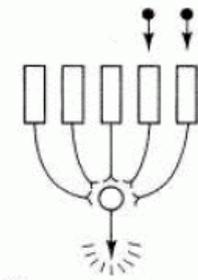
ca. 120 Stäbchen konvergieren zu auf eine Ganglienzelle

Stäbchen sind lichtempfindlicher als Zapfen

- aufgrund der räumlichen Summation
- ihrer größeren Absorption von Licht

Maximum im Wellenbereich 500-560 nm
kurzwelliges Licht am Ende des Blau-Spektrums

Pigmentregenerationszeiten ca. 30 Minuten



Signalverarbeitung:

Reaktion der Zapfen und Stäbchen auf Licht mit elektrischen Signalen

Licht wird von Sehfärbstoff absorbiert (Bleichung)

Stäbchen (Rhodopsin), Zapfen (drei Zapfentypen mit unterschiedlichen Farbstoffen => trichomatische Theorie des Farbsehens)

Wiederaufbau der Farbstoffe (Pigmentregeneration) unter Nutzung von Enzymen

Verarbeitung durch die neuronalen Strukturen

Weiterleitung über Sehnerv an den primären visuellen Cortex

(Woessner, o.J.)

Berechnung des Reizes aus der spektralen Leistungsverteilung P des Lichtes möglich:

Reiz am blauen Zapfen (short cone):

$$S = k_s \int P(\lambda) \cdot \bar{s}(\lambda) d\lambda$$

für grüne (mid cones) und rote Zapfen (long c.) analog.

Winkelauflösung des Auges:

Abstand	Fläche	Linie	Landolt Ring	Nonius
				
1'	1'	3''	20''	5''
Aus 50cm:	0.15mm	7µm	48µm	12µm

(aus Weimar 2005)

statische & dynamische Sehschärfe

- Messung z.B. durch Landolt-Ringe, durch Erkennen, auf welcher Seite sich die Öffnung befindet

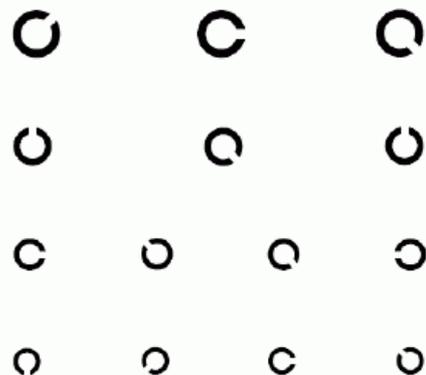
- Die statische Sehschärfe hat ca. nach 6 Monaten fast die Sehschärfe eines Erwachsene erreicht, endgültig nach 1,5 Jahren (Basis: neuronale Vernetzung, Entwicklung der Zapfen der fovea).

- Die dynamische Sehschärfe ist nach ca. 8-9 Jahren ausgebildet (Basis: Interaktion von Sakkaden und Augefolgebewegungen).

- Es lässt sich nicht aus der Ausprägung der statischen Sehschärfe auf die dynamische schließen.

10cm

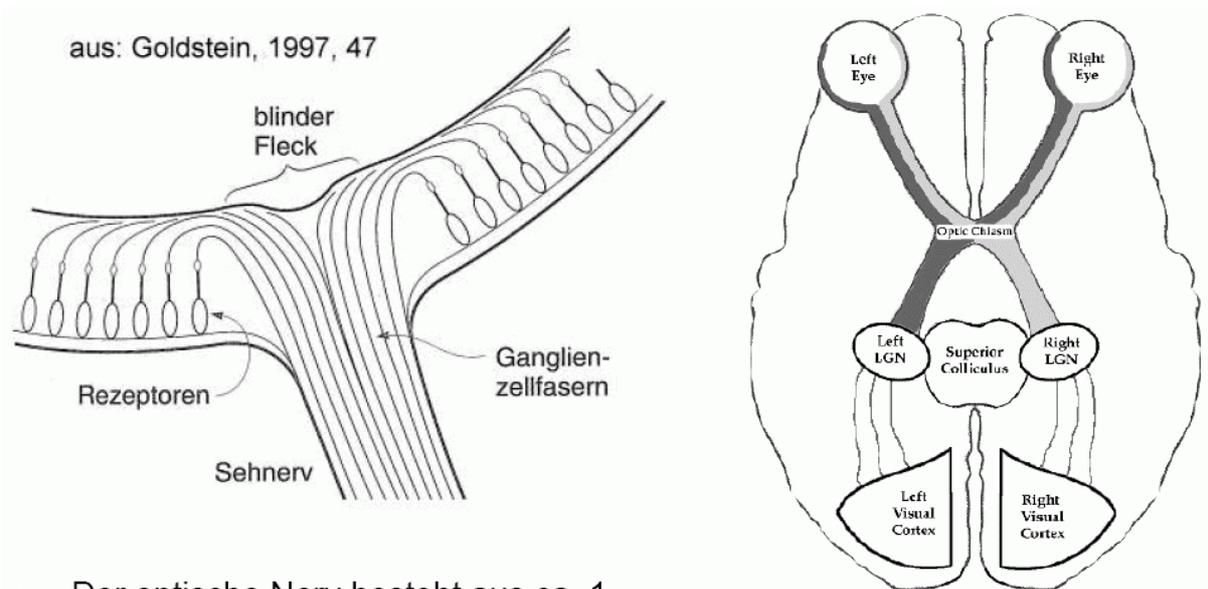
Testanleitung: Hängen Sie bitte dieses Blatt bei Tageslicht auf und betrachten Sie es aus ca. 4 Meter Entfernung nacheinander nur mit einem Auge (Das andere jeweils mit der Hand abdecken) und zum Schluss mit beiden Augen gleichzeitig. In welche Richtung gehen die Ringöffnungen?



(Woessner, o.J.)

Weiterverarbeitung der elektrochemischen Reize aus den Sinneszellen:

- Verschaltung in der Netzhaut selbst
- Weiterleitung im Sehnerv, dort weitere Verschaltungen
- Weiterverarbeitung in verschiedenen Zentren des Gehirns



- Der optische Nerv besteht aus ca. 1 M Fasern, 10% davon sind der Fovea zugeordnet
- Blinder Punkt ca. 17° zur Nasenseite von Fovea

(Woessner, o.J.)

Durch die Weiterverarbeitung kommt es zu spezifischen Wahrnehmungsleistungen, z.T. aber auch zu Täuschungen ("optische Täuschungen" = eigentlich Wahrnehmungstäuschungen)

- Was wir zu sehen glauben, ist nicht was wirklich **ist**.
- Unser Sehapparat aus Augen und Gehirn bestimmen mit.
- Schon die 3-D Präsentation auf 2-D Schirm/Papier ist eine Täuschung.

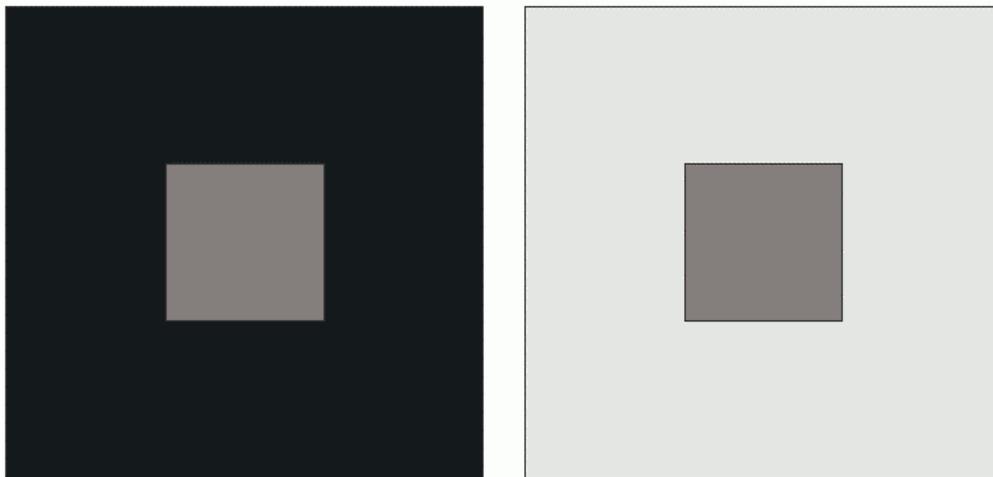
(Weimar 2005)

2.4. Eigenheiten der visuellen Wahrnehmung

Helligkeit:

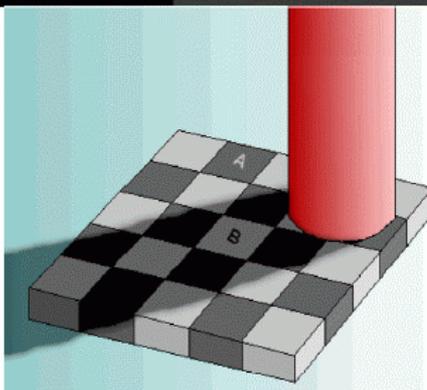
keine absolute Wahrnehmungsgröße
abhängig von:

- Reizstärke (Leuchtdichte)
- Reizstärke zuvor (Adaptation!)
- Leuchtdichte in der Umgebung



die beiden mittleren Quadrate haben dieselbe Graustufe

(aus Krömker 2001)

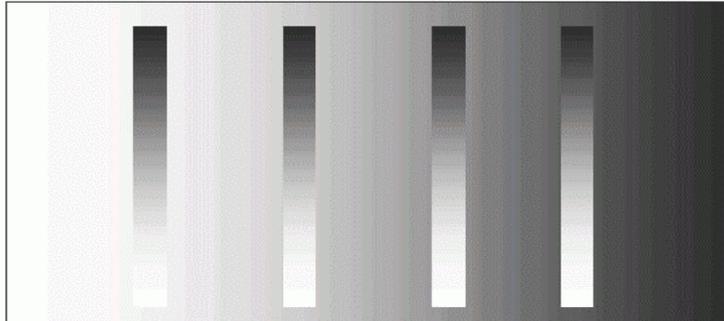


A und B haben dieselbe Farbe

(Woessner, o.J.)

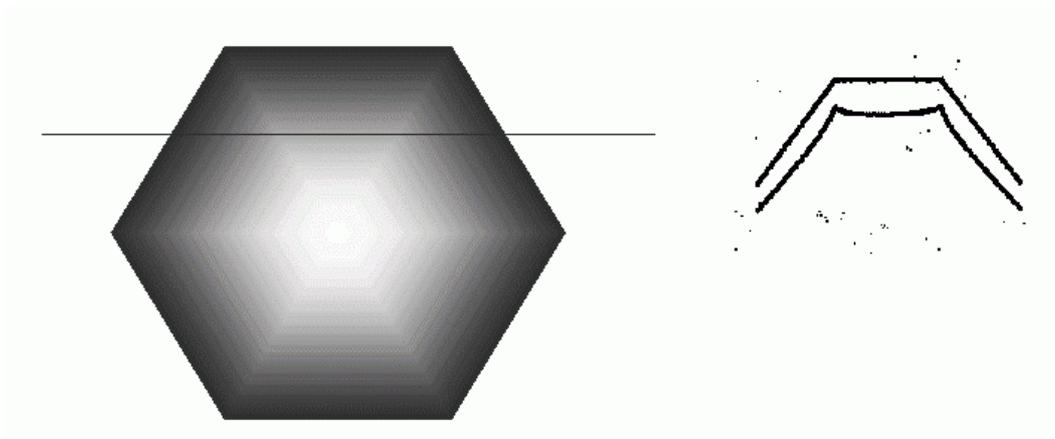
Kontrastverstärkung:

Differenzen werden umso stärker wahrgenommen, je näher sie an der Hintergrundhelligkeit liegen.



Unstetige Helligkeitsänderungen:

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.

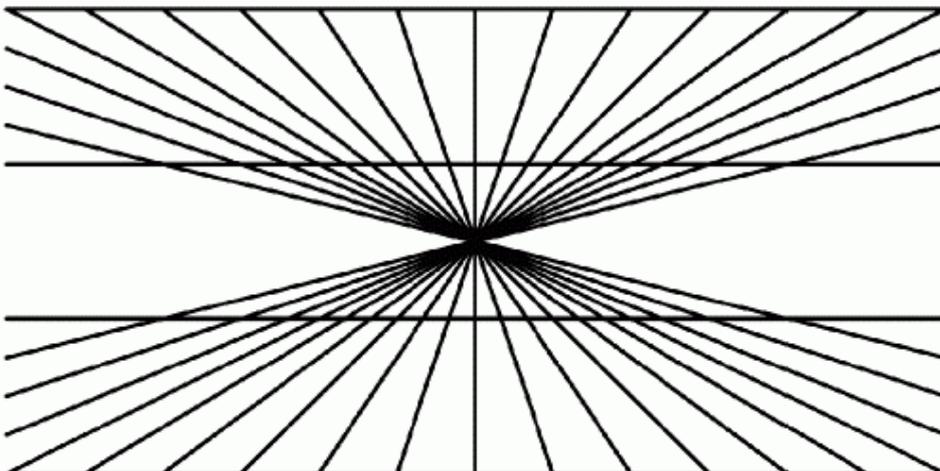
Effekt (in frühen Verarbeitungsschritten in der Netzhaut verursacht) ist Basis für Kanten- und Konturerkennung!

Richtung:

Geneigte Linien in der Umgebung erzeugen eine entgegengesetzte Neigung senkrechter Linien



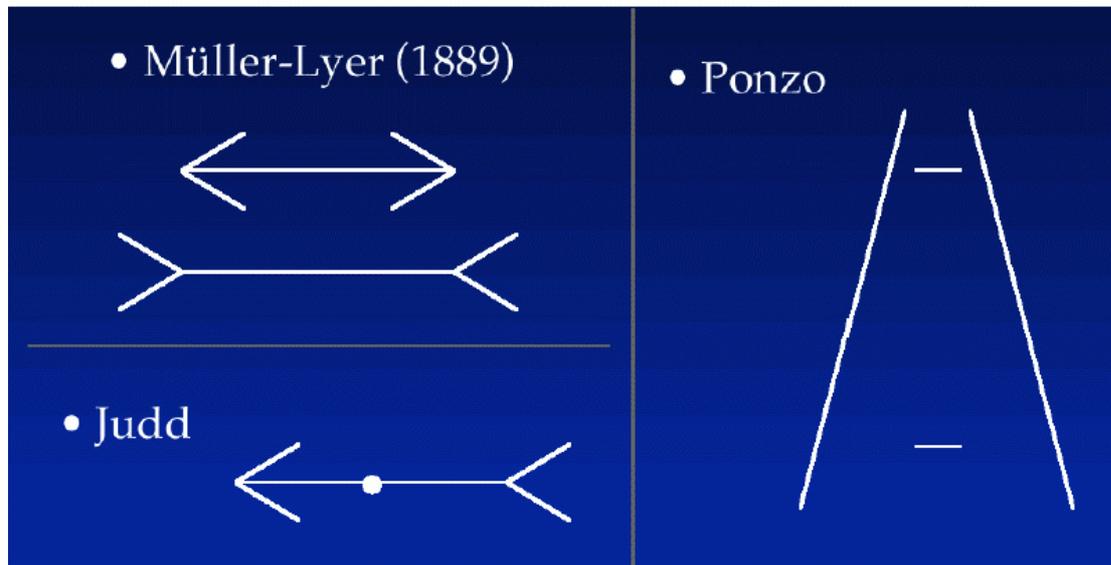
Parallelität:



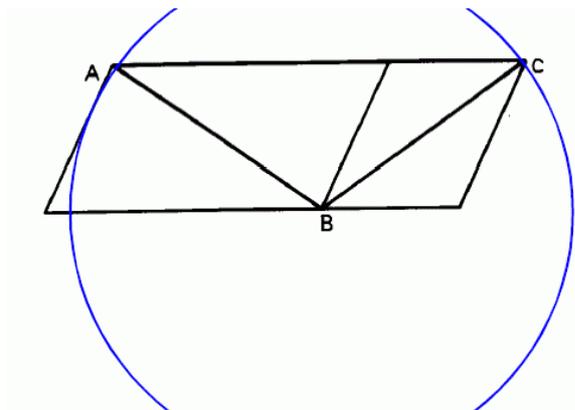
(Weimar 2005)

Länge:

- Eindruck von Strichlängen durch Umgebung verändert

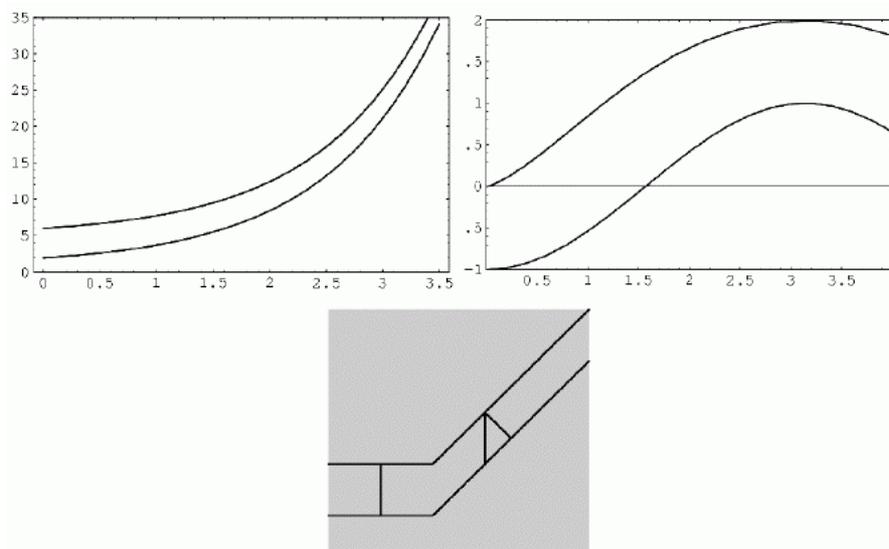


(Woessner, o.J.)

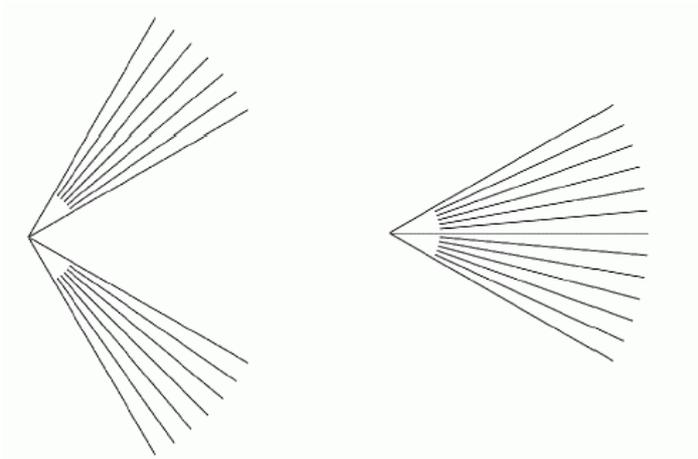


$$|AB| = |BC| \quad (\text{Weimar 2005})$$

Abstand:

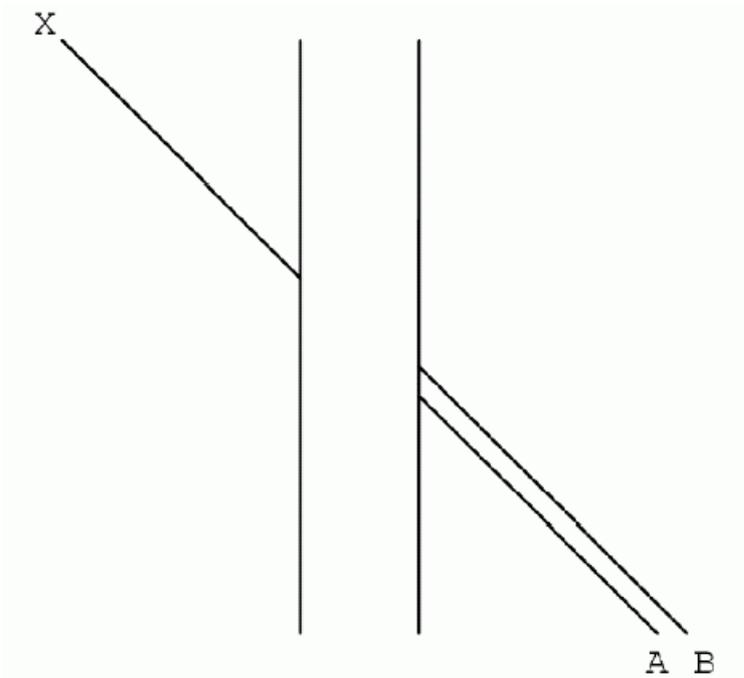


Winkel:

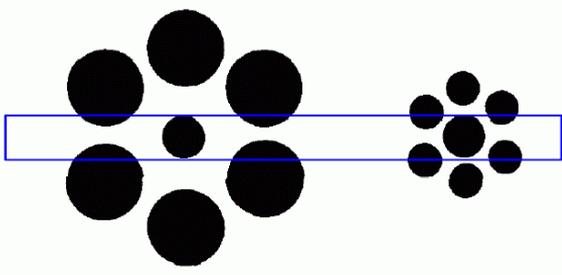
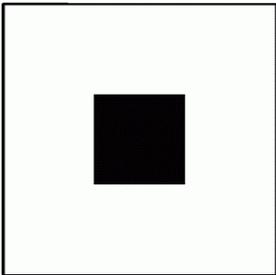
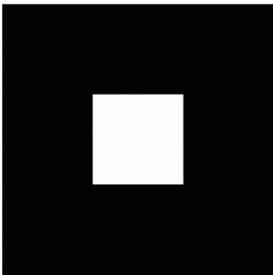
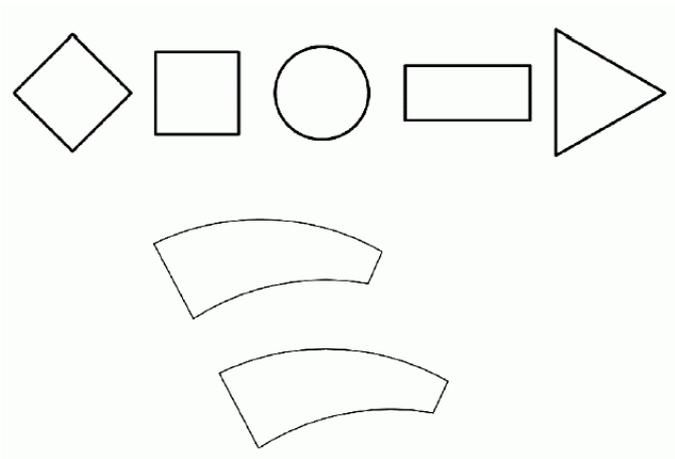


(Weimar 2005)

Linienverlauf:



Flächen:



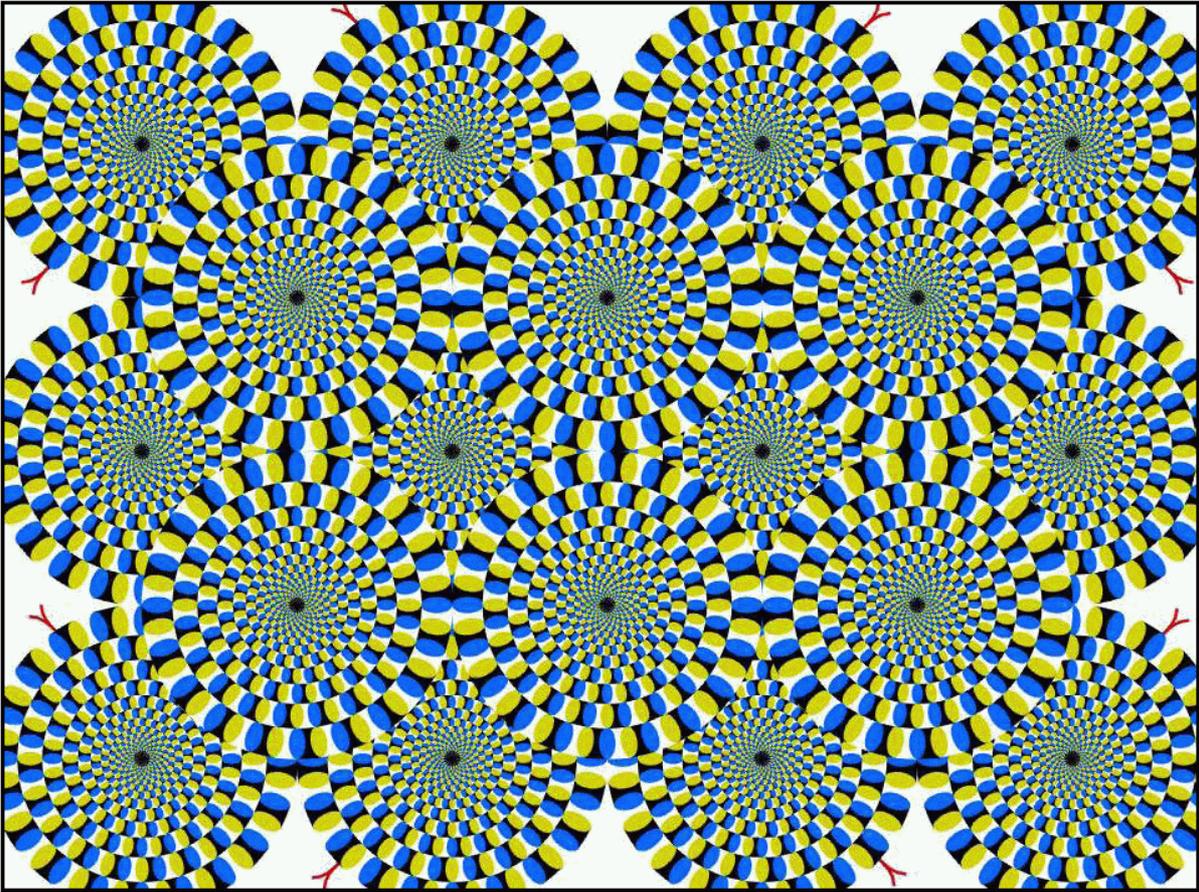
(Weimar 2005)

<p>• Zoellner</p>	<p>• Jastrow</p>
-------------------	------------------

<p>• Hering (1861)</p>	<p>• Titchener (1898)</p>
------------------------	---------------------------

(Woessner, o.J.)

Bewegungsillusion:



(Bartz 2005)

Formwahrnehmung

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

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

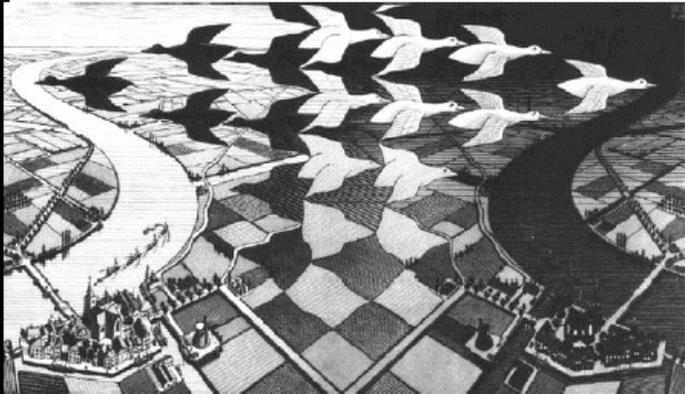
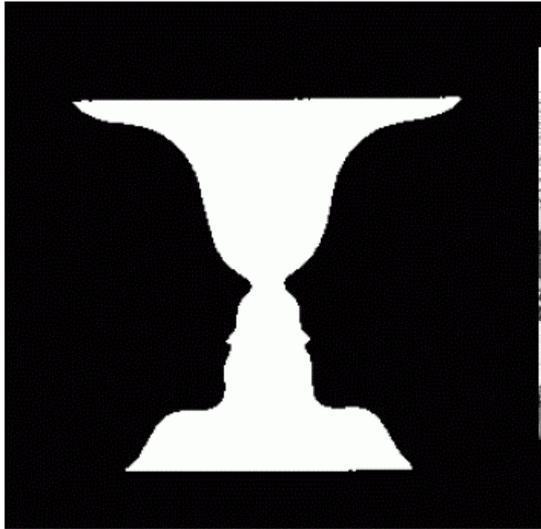
Beispiele:

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



Separation in Figur und Grund

- Ermittlung von Grenzlinien
- Bestimmen zusammenhängender Bereiche
- Unterscheidung Hintergrund/Vordergrund

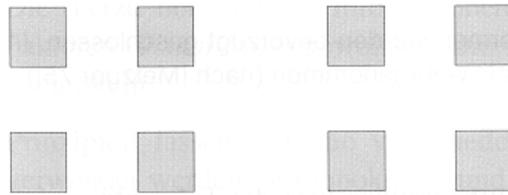


(Woessner, o.J.)

Gestaltprinzipien

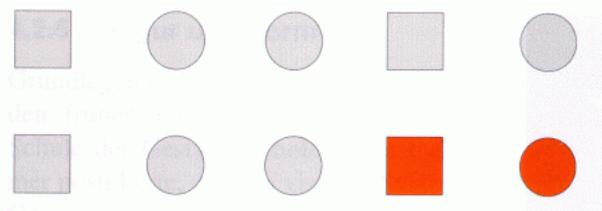
Gestaltprinzip der Nähe

Nahes wird als zusammengehörig empfunden:



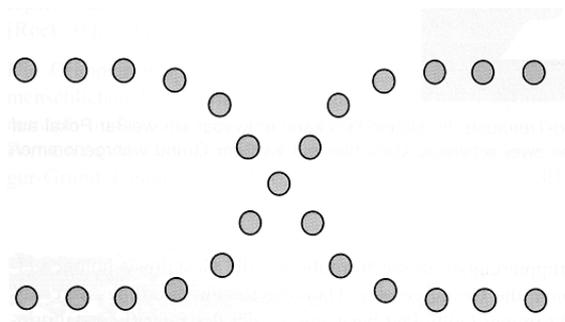
Gestaltprinzip der Ähnlichkeit

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



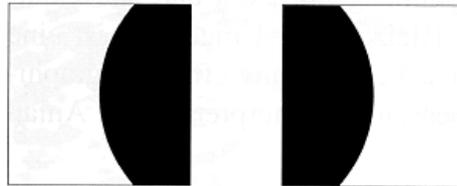
Gestaltprinzip der stetigen Fortsetzung

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:



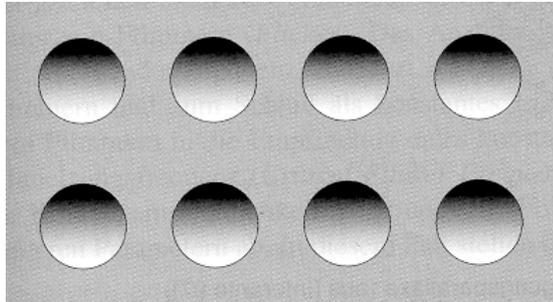
Kontextabhängigkeit der Formwahrnehmung

Der zweite Buchstabe wird im ersten Wort als "H", im zweiten als "A" erkannt, obwohl in beiden Fällen identische Stimuli vorliegen

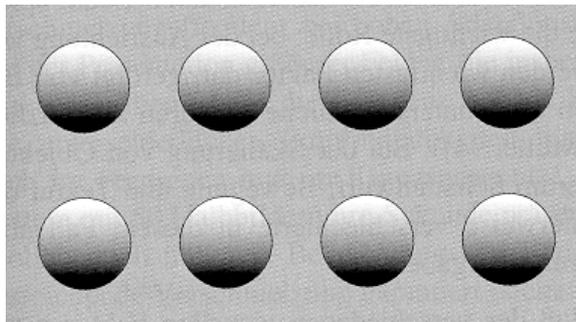
TAE CAT

3D-Formwahrnehmung (Tiefenwahrnehmung) aus Schattierung:

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



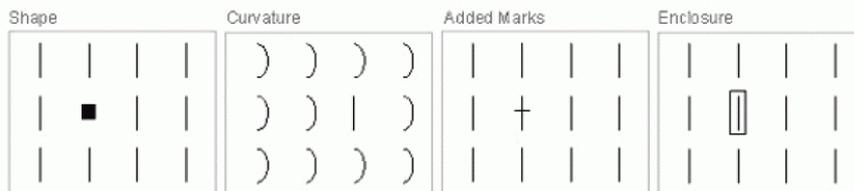
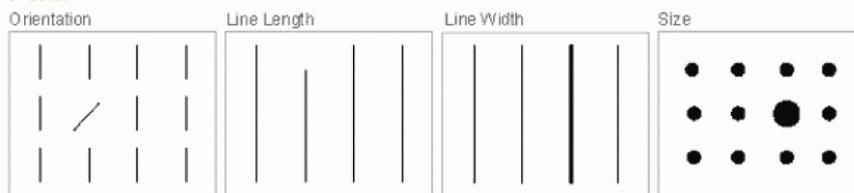
Die gleichen Kreise, gedreht, werden als kugelförmige Erhebungen wahrgenommen:



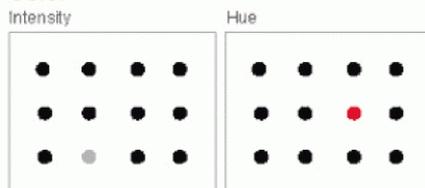
(Gestalt-Beispielbilder aus Schumann & Müller 2000)

weitere Beispiele zur Gestaltwahrnehmung:

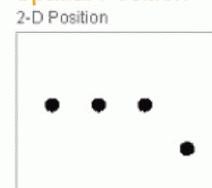
Form



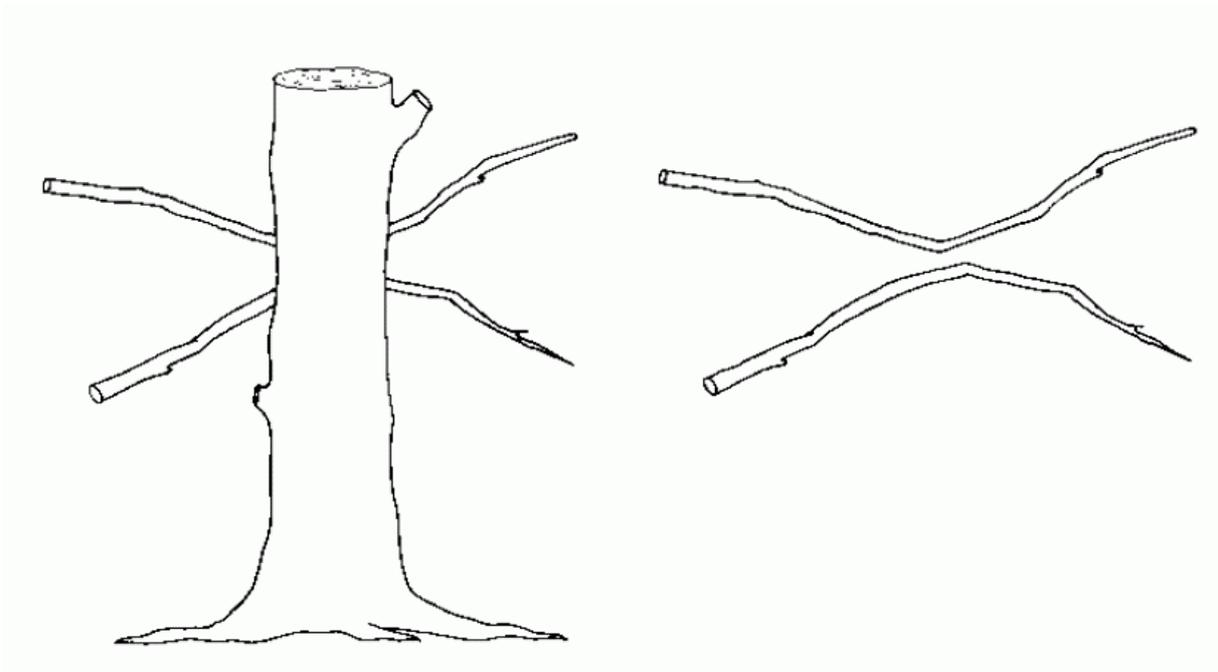
Color



Spatial Position

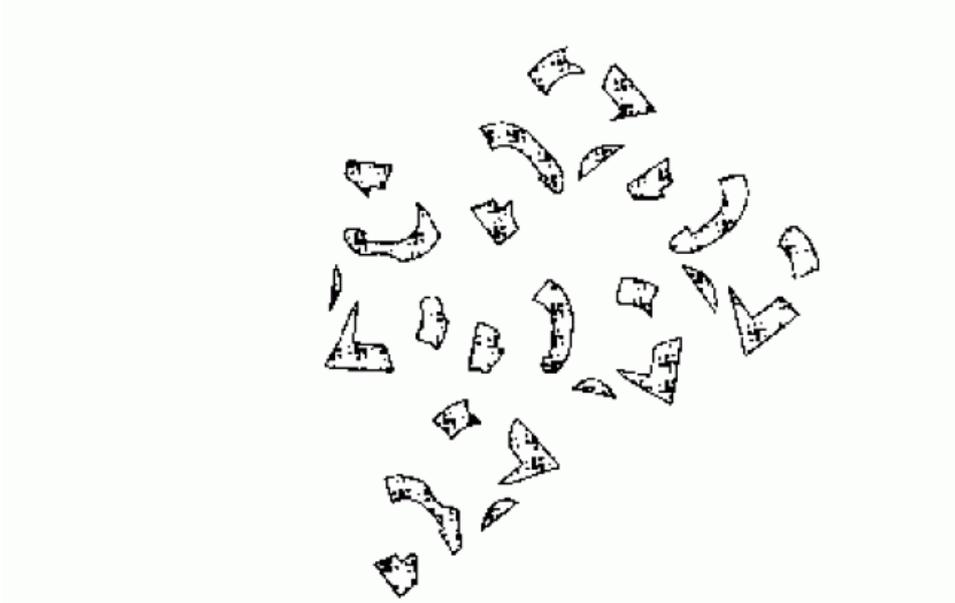


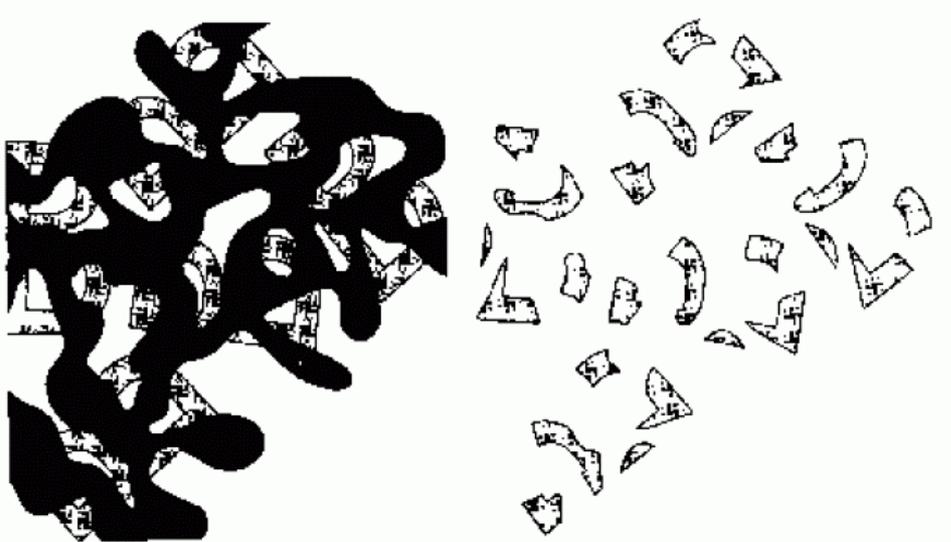
(Weimar 2005)



Prinzip der Geschlossenheit:
Zusammenfassung komplexer Strukturen zu Objekten.
Verdeckungen helfen dabei:

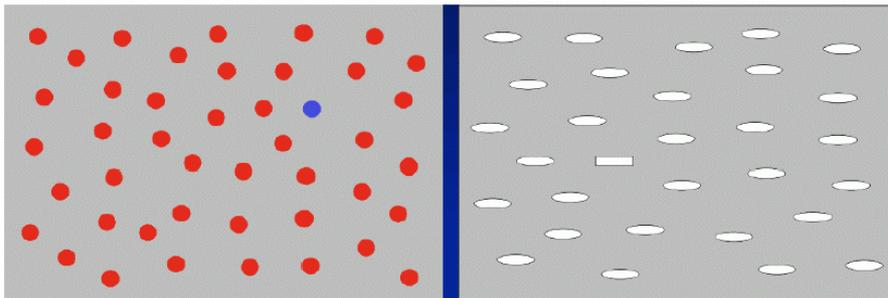
- Zusammenfassung komplexer Strukturen zu Objekten
- Verdeckungen helfen dabei





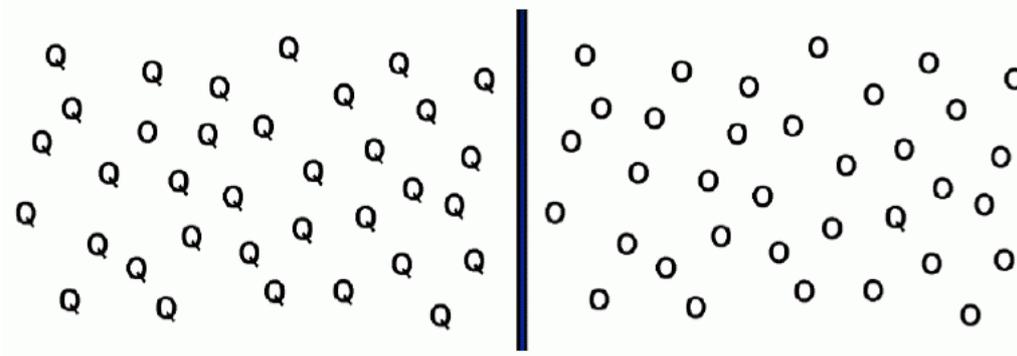
Hervortreten von Eigenschaften:

- Unterschiedliche Dauer zur Lokalisierung von Eigenschaften



je nach Eigenschaft (z.B. Farbe schneller als Form)

- Fehlen einer Eigenschaft führt zu sequenziellem Suchen
- Zusätzliche Eigenschaft wird schneller erfasst (siehe Strich in O)



(Woessner, o.J.)

Zeit-Effekte der Wahrnehmung

Im Magnozellulären System werden nur achromatische zeitveränderliche Informationen gesammelt.

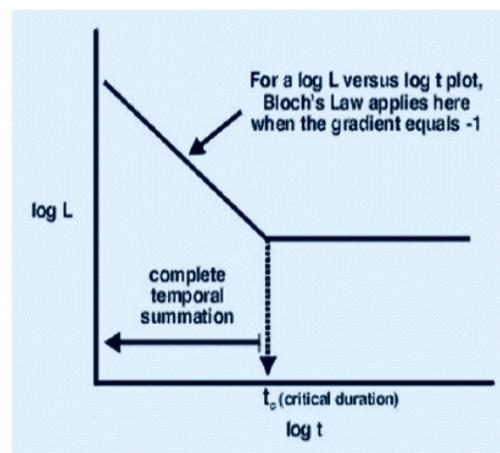
Zeitintegration: Integration der retinalen Leuchtdichte über kleine Zeitintervalle:

- Skotopisch (Nachtsehen): 100ms \rightarrow 10Hz
- Photopisch (Tagsehen): 10-15ms \rightarrow 70Hz
- \rightarrow Maximal wahrnehmbare Flimmerfrequenz 70Hz
- \rightarrow Maximal erkennbare Bewegungsfrequenz 35Hz

Blochs Gesetz:

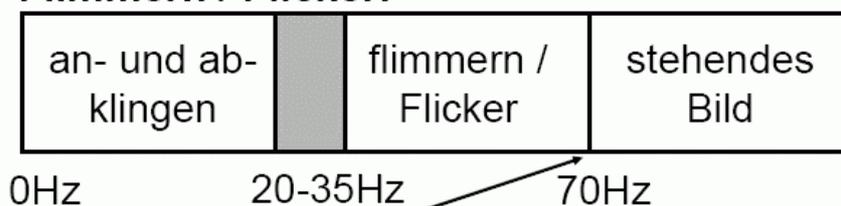
$$L \cdot t^n = k$$

- L ...retinale Luminanz
- t ...stimulierte Zeit
- n ... Vollständigkeit der Zeitintegration (0 ... keine Integration, 1 ... Vollständige Int.)
- k ...Konstante



$$\log L = \log k - n \cdot \log t$$

Flimmern / Flicker:

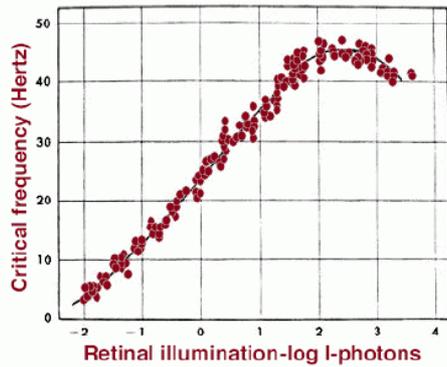


Critical Flicker Frequency CFF:

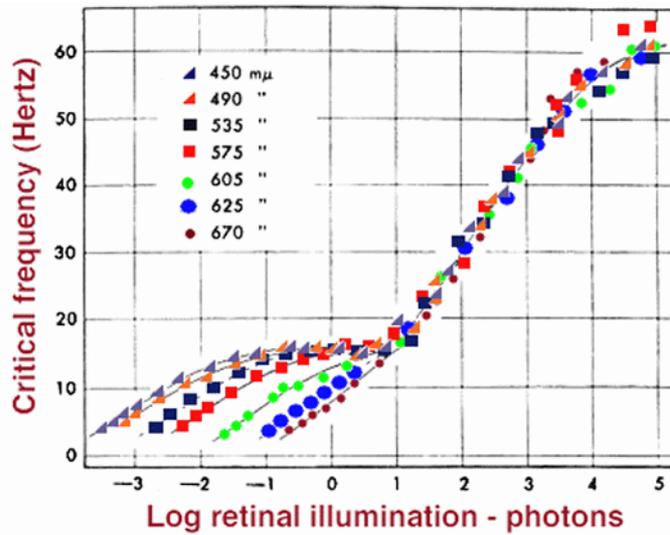
ist abhängig von:

- Leuchtdichte L des Hintergrundes
- Größe & Position des Testfeldes (a,b)

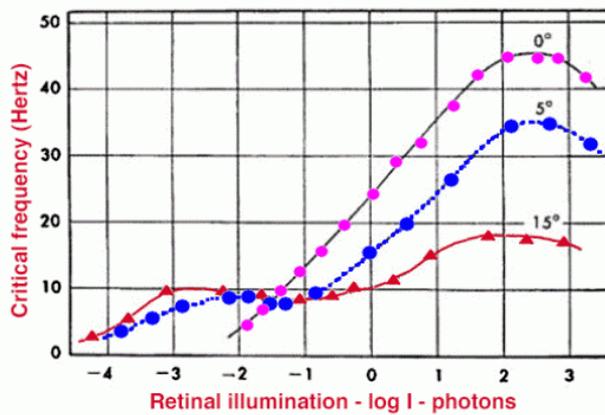
Ferry-Porter Gesetz: $CFF = a \cdot \log L + b$



Gültigkeitsbereich des Ferry-Porter Gesetz



Einfluss der Wellenlänge auf die kritische Flimmerfrequenz



Einfluss der retinalen Position auf die kritische Flimmerfrequenz

Fazit:

- Bildwiederholrate > 70 Hz
- Animation mit 45 Hz ausreichend
- VR schon ab 8 Bilder
- bei Film wird Umgebungshelligkeit gesenkt, damit 24 Bilder pro Sekunde ausreichen

Visualisierung:

- ➔ bewegte Objekte sollten sich in Helligkeit vom Untergrund deutlich unterscheiden
- ➔ Vorsicht Bewegung zieht Aufmerksamkeit auf sich