

6. Licht, Sehen, Farbe

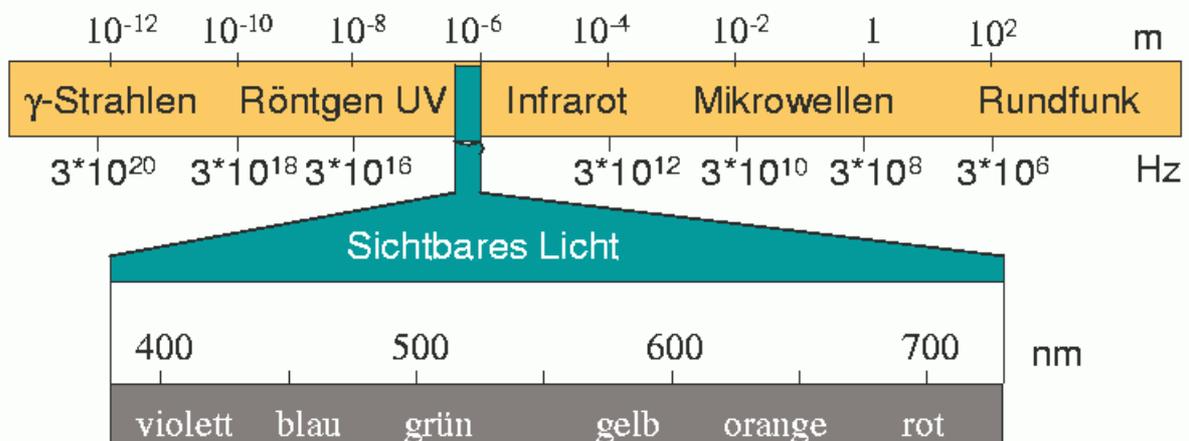
Menschliches visuelles System (Augen + Gehirn!) = entscheidendes Glied in der Kette der Bilderzeugung.
Merke: *Am Monitorausgang ist nicht das Ende des Informationsflusses.*

Licht

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

$\nu \cdot \lambda = c =$ 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

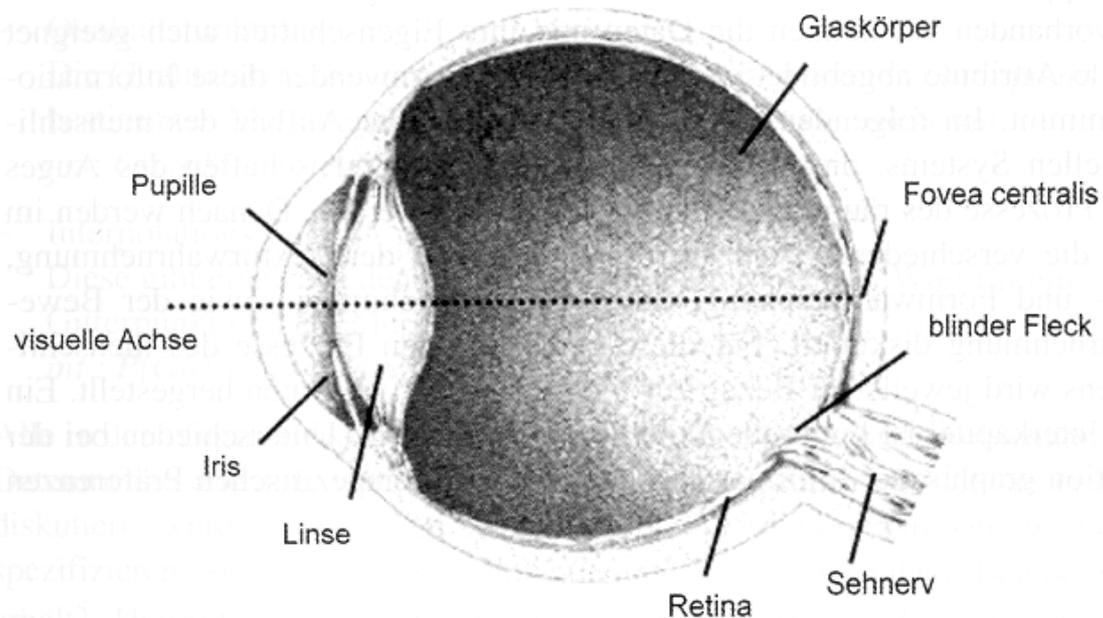
◆ Lichtstärke	luminous intensity	Candela [cd]
◆ Leuchtdichte	brightness	[cd/m ²]
auch	1 Stilb = 1 sb	= 1 cd/cm ²
	1 Apostilb = 1 asb	= 0,3183 cd/m ²
	1 Lambert = 1 L	= 10 ⁴ /π cd/m ²
	1 foot-Lambert = 1 fl	= 3,426 L
	auf der Netzhaut (Retina) oft in:	
	1 troland = 1 cd/cm ² bei 1 mm Pupillenöffnung	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

(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),

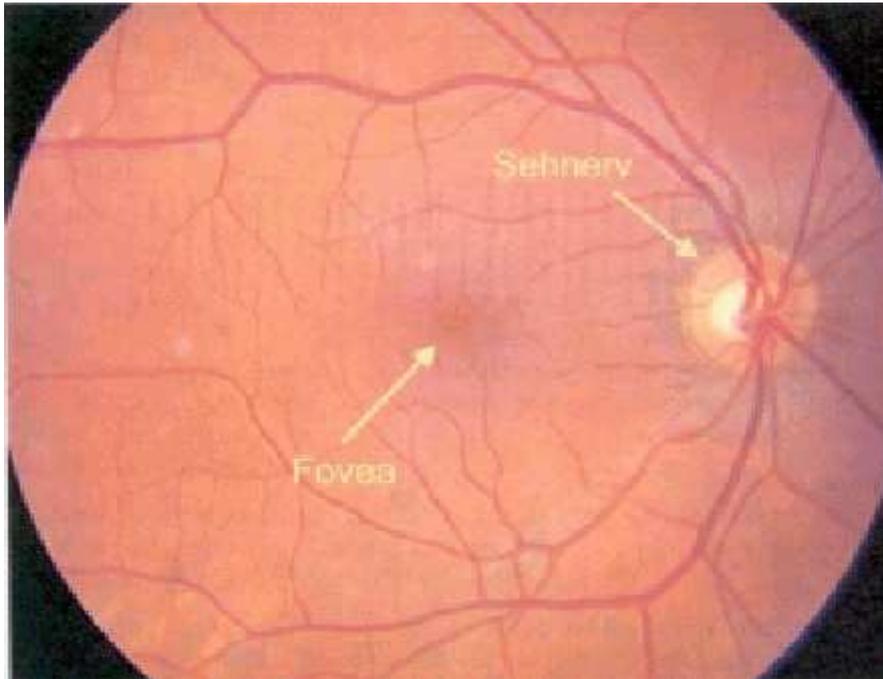
Brennweite: fern $f = 17$ mm, nah $f = 14$ mm.

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. $1,5^\circ$ 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

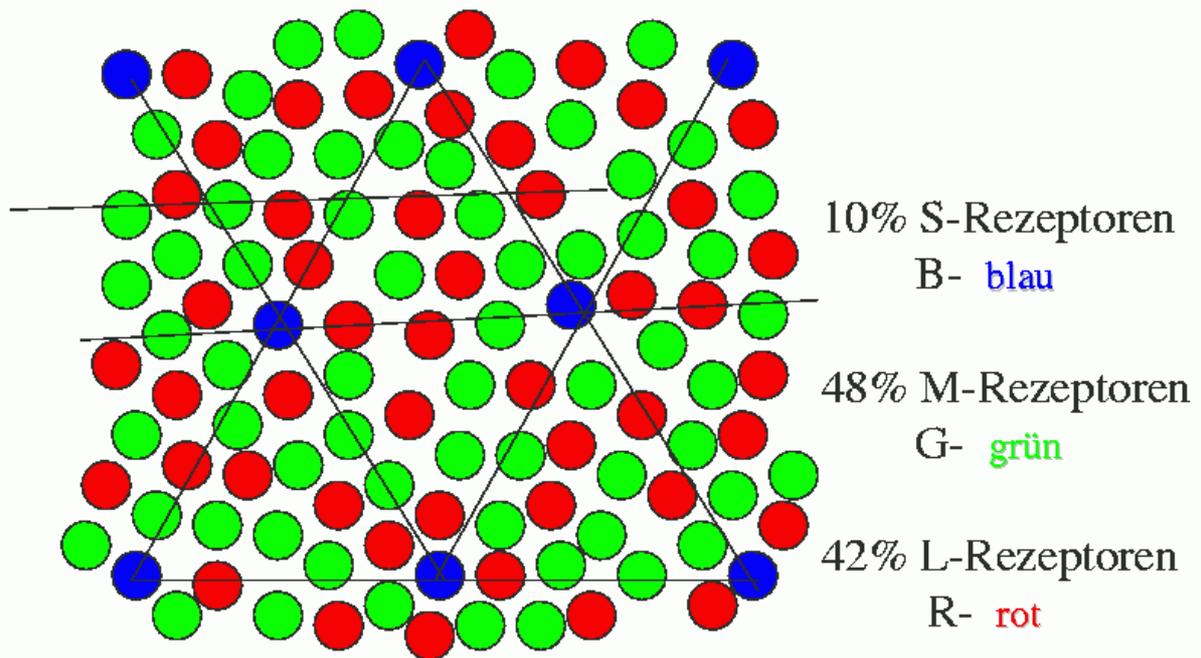
- Nachtsehen: Stäbchen (*rods*), nicht farbsehfähig, ca. 120 Millionen
- Tagsehen: Zäpfchen (*cones*), ca. 6 Millionen, hauptsächlich in der *fovea centralis*

(aus Schumann & Müller 2000)

3 Zapfen-Subtypen:

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

Zapfenmosaik in der Fovea Centralis



(aus Krömker 2001)

Farbe

- seit Jahrhunderten Thema von Physikern, Physiologen, Psychologen und Philosophen
- bis heute nicht vollständig verstanden und durchdrungen

DIN-Definition von "Farbe" (Standard 5033 von 1979):

"Farbe... ist ein durch das Auge vermittelter Sinnes-eindruck, also eine Gesichtsempfindung. Die Farbe ist diejenige Gesichtsempfindung eines dem Auge strukturlos erscheinenden Teiles des Gesichtsfeldes, durch die sich dieser Teil bei einäugiger Betrachtung mit unbewegtem Auge von einem gleichzeitig gesehenen, ebenfalls strukturlosen angrenzenden Bereich allein unterscheiden kann."

Beachte:

- Farbe ist das Ergebnis der Wahrnehmung elektromagnetischer Wellen durch Netzhaut und Gehirn.
- Lichtstrahlen besitzen keine Farbe, nur eine spektrale Leistungsverteilung (spectral power distribution, SPD), die angibt, welche Wellenlänge mit welchem Anteil vertreten ist.
- SPDs existieren in der physikalischen Welt, Farbe nur im Gehirn.

Objektive Farbmerkmale:

- *dominante Wellenlänge* – diejenige Wellenlänge aus dem Spektrum, bei der die höchste Leistung abgestrahlt wird.
- *Reinheit* – physikalisches Maß, das angibt, in welchem Verhältnis weißes Licht zu einem monochromatischen Licht zu mischen ist, um ein gegebenes Licht zu erzeugen.
- *Luminanz* – beschreibt die Strahlungsenergie (Intensität bez. auf den Flächeninhalt eines unendlich kleinen Flächenelements, das sich auf der Lichtquelle befindet).

Subjektive Farbmerkmale:

- *Helligkeit* – physiologisch-psychologisches Maß für die Stärke des durch einen Beobachter wahrgenommenen Gesamtenergieflusses. Man unterscheidet:
 - *Lightness*: Helligkeit eines reflektierenden Objektes,
 - *Brightness*: Helligkeit eines selbstleuchtenden Objektes (Lampe, Sonne, Bildschirm...).
- *Farbton (hue)* – physiologisch-psychologischer Begriff zur Unterscheidung verschiedener charakteristischer Spektralmuster; unterscheidet zwischen "reinen Farben" (rot, gelb, grün, blau usw.).
- *Sättigung (saturation)* – physiologisch-psychologisches Maß für den Grad, in dem für einen Beobachter der Farbton eines gegebenen Lichtes von dem Farbton eines weißen Lichtes gleicher Luminanz abweicht.

Farbspezifikation:

3 Fotorezeptor-Zelltypen \Rightarrow 3 Zahlenwerte ausreichend zur quantitativen Spezifikation von Farben.

Grassmannsche Gesetze (1853)

Erstes: Zwischen je vier Farben besteht immer eine eindeutige lineare Beziehung. Eine Farbe braucht zu ihrer Beschreibung drei voneinander unabhängige Bestimmungsstücke, d.h. die Farbe ist eine dreidimensionale Größe.

- Farben können als Vektoren eines dreidimensionalen Vektorraumes aufgefasst werden.
- Die Vektoren dieses Farbraums heißen **Farbvalenzen**.
- Die Länge eines Vektors ist ein Maß für die Leuchtdichte und heißt **Farbwert**, seine Richtung bestimmt die **Farbart**.

Folgerung:

- ◆ Wie in jedem dreidimensionalen Vektorraum benötigt man drei voneinander linear unabhängige Basisvektoren (**Primärvalenzen**), um den Raum aufzuspinnen.
- ◆ In diesem Fall bedeutet linear unabhängig, daß eine **Primärvalenz nicht durch Mischung** der beiden anderen Primärvalenzen darstellbar ist.

Folgerung: Farbmischung

- ◆ Mit drei Primärvalenzen R, G, B läßt sich also für jede Farbvalenz F eine Farbgleichung aufstellen:

$$F = r R + g G + b B$$

- ◆ Mit Farbvalenzen kann man also wie mit Vektoren rechnen, insbesondere ist die Umrechnung der Darstellung bezüglich verschiedener Primärvalenztripel (Basiswechsel) möglich

Grassmannsche Gesetze (Fortsetzung)

Zweites: *Gleich aussehende Farben ergeben mit einer dritten Farbe stets gleich aussehende Farbmischungen.*

Das heißt, dass es bei der Beurteilung von Gleichheit zweier Farben

- **nur** auf die Farbvalenz,
- **nicht** auf ihre spektrale Verteilung ankommt.

Die spektrale Verteilung und die Wahl der Primärvalenzen spielen keine Rolle.

Mischexperimente zeigen: Ganz unterschiedliche Spektralverteilungen können dieselben Farbreize erzeugen!
("Metamerie")

(z.T. aus Krömker 2001)

Farbmischung:
Additive Mischung

Addition von Licht: 2 oder mehr Farben werden dem Auge gleichzeitig angeboten

- ◆ “Echte” Überlagerung
- ◆ Sukzessiv (zeitliche Integration): Farbkreisel
- ◆ Simultan (örtliche Integration): Monitor

Grundfarben: **Rot** **Grün** **Blau**

Hintergrund: **Schwarz** unbunt

Summenfarbe: **Weiß**

Basis für die Farbdarstellung mit Kathodenstrahlröhren oder LCD-Displays.

◆ Subtraktive Mischung:

- Farbige Gläser (Filter)
- Druckpigmente

Grundfarben: **Cyan** **Magenta** **Gelb** CMY

Hintergrund: **Weiß** unbunt

Summenfarbe: **Schwarz**

Hilfsfarbe: **Schwarz** CMYK

(Krömker 2001)

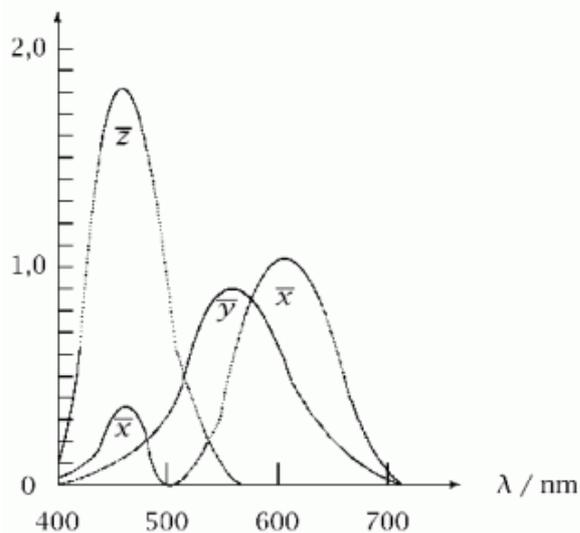
Basis für die Farbdarstellung im Druck.



Messen von Farben: Colorimetrie

- ◆ CIE: Commission International de l'Eclairage
Internationale Beleuchtungskommission
- ◆ Normalbeobachter für Farbmischversuche
- ◆ 2^o Sehfeld CIE 1931
(Ergänzung 10^o Sehfeld CIE 1964 → andere Ergebnisse)
- ◆ Hellempfindlichkeit Y
- ◆ 3 reale Lichtquellen ("monochromatisch")
 - 700 nm CIE Rot
 - 546,1 nm CIE Grün
 - 435,8 nm CIE Blau(Spektrallinien einer Quecksilberdampf Lampe)

CIE Farbdiagramm



- ausgehend von drei hypothetischen Standardprimärfarben X, Y, Z und drei Funktionen $x_\lambda, y_\lambda, z_\lambda$
- Funktionen geben an, in welchem Verhältnis X, Y, Z zu mischen sind, um Farben einer Wellenlänge λ zu erhalten

Folgende Bedingungen werden erfüllt:

- y_λ entspricht exakt der Helligkeitsreaktion des menschlichen Auges
- x_λ und z_λ so konstruiert daß zum Mischen aller existierenden Farben nur Farbadditionen notwendig sind
- Das Integral jeder Funktion über alle sichtbaren Wellenlängen ist jeweils 1

(Beschreibung hier nach Schlechtweg 2001.)

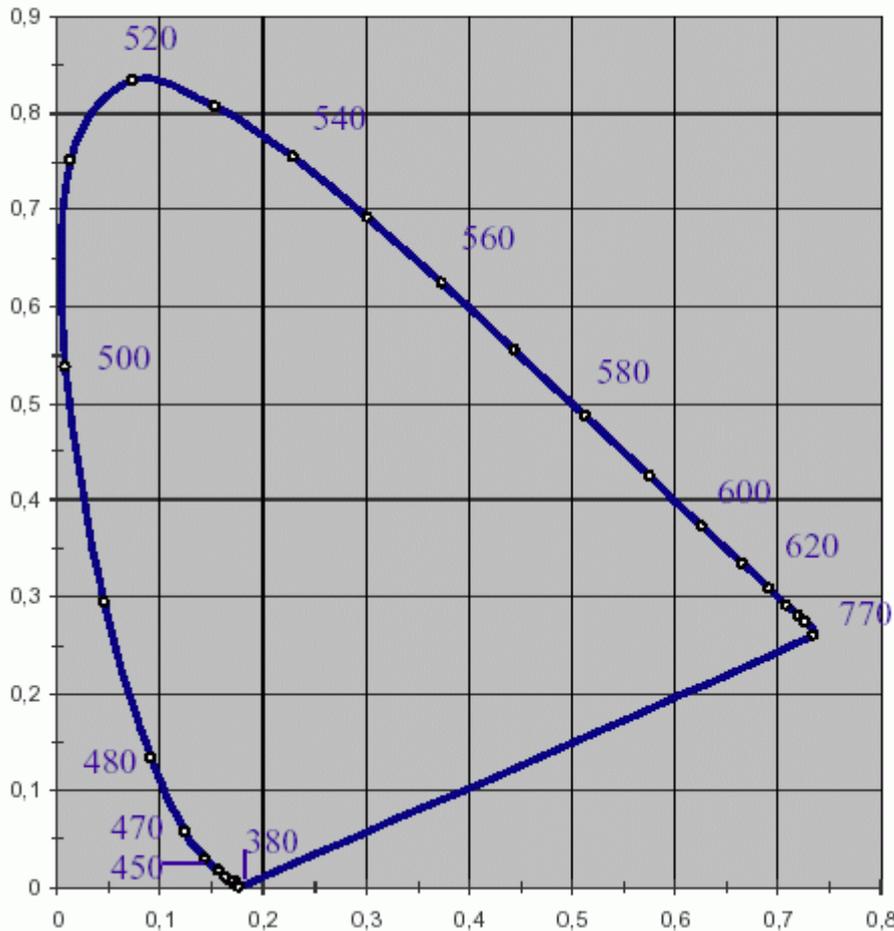
Im CIE-Farbdiagramm (Normfarbtafel, *chromaticity diagram*) wird der Helligkeitsanteil Y weggelassen.

Die physikalisch reinen Spektralfarben bilden eine geschwungene, etwa parabelförmige Kurve im x, y -Diagramm. Diese Kurve ist nicht geschlossen (rot \neq blauviolett!).

Auf der Verbindungslinie der Enden liegen *keine* reinen Spektralfarben, sondern Mischfarben aus Rot und Blauviolett ("Purpurgerade").

Alle wahrnehmbaren Farben liegen innerhalb des durch die reinen Spektralfarben und durch die Purpurgerade gegebenen geschlossenen Kurvenzugs.

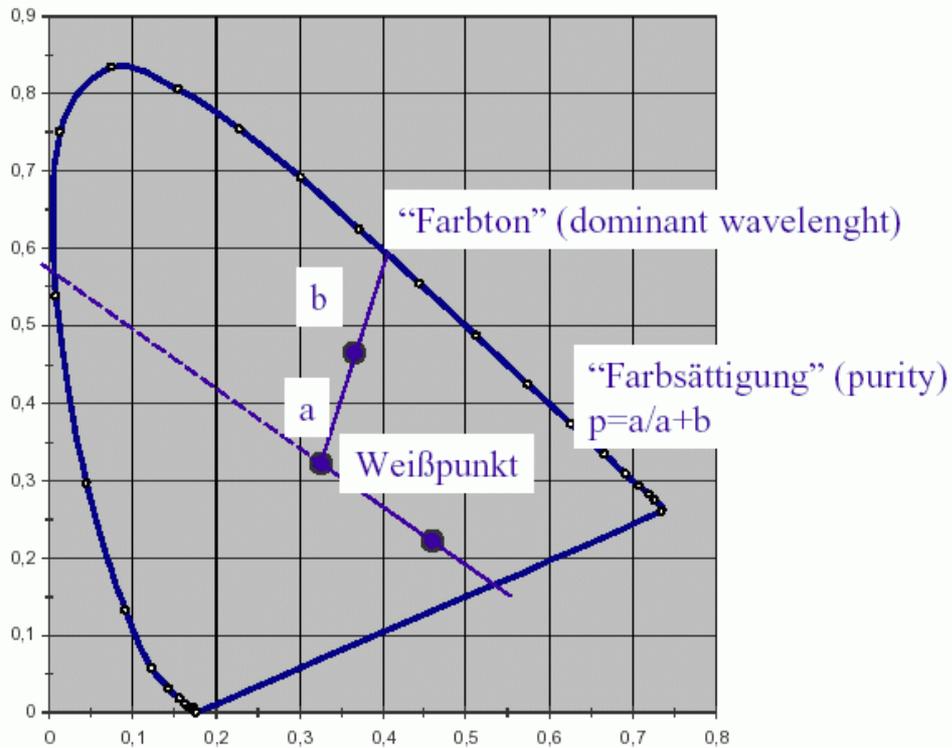
Normfarbtafel - Chromaticity Diagram



Zahlen auf der Kurve: Wellenlängen in nm. (aus Krömker 2001)

Das Innere der Normfarbtafel ergibt sich durch additive Farbmischung aus den Randfarben (ganz innen = weiß).

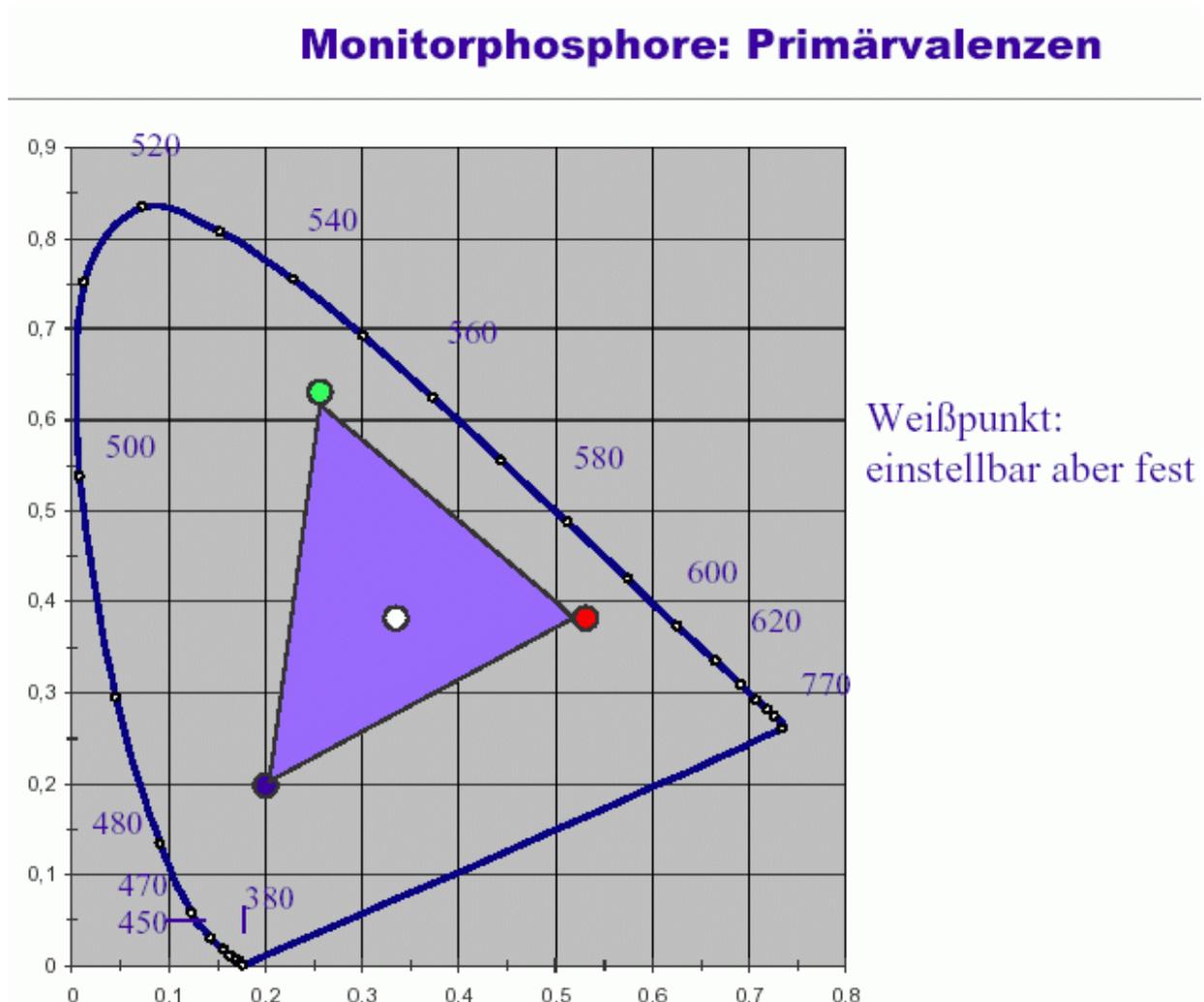
Zusammenhänge: Mischung



Die Grundfarben (R, G, B) der üblichen Monitore sind *keine* reinen Spektralfarben, d.h. sie liegen nicht auf der Außenlinie.

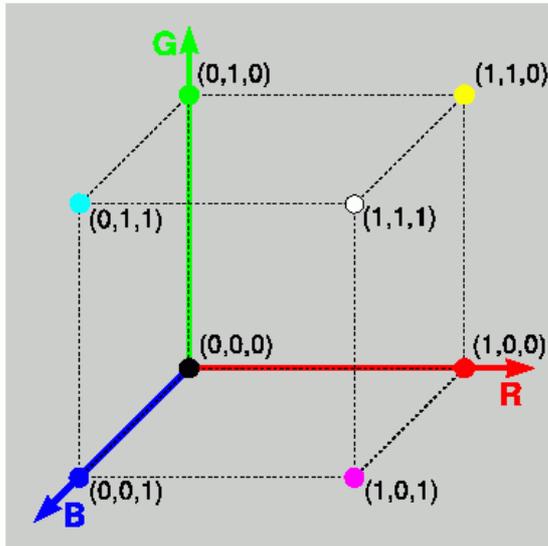
Folgerung: Es sind *nicht* alle Farben des Diagramms durch Mischung aus diesen Farben darstellbar, sondern nur diejenigen innerhalb des von den Grundfarben aufgespannten Dreiecks!

Inneres des Dreiecks = Gamut des Monitors.



(Krömker 2001)

Farbmodelle – RGB



- additives Farbmodell
- für Ausgabe auf Farbbildschirmen
- Grundfarben Rot, Grün, Blau
- RGB-Einheitswürfel

(Schlechtweg 2001)

Alle darstellbare Farben sind Punkte eines Einheitswürfels. Auf den positiven Halbachsen liegen die Primärfarben :

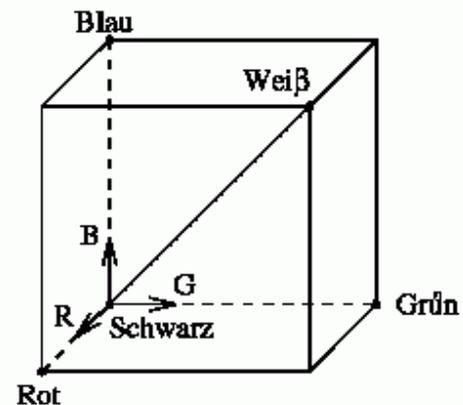
Rot, **Grün** und **Blau**.

Erste Eigenschaften:

Schwarz liegt im Ursprung $(0,0,0)$

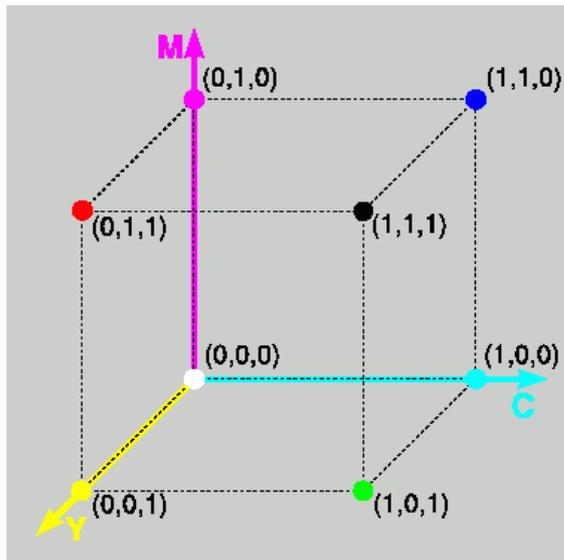
Weiss im Punkt $(1,1,1)$

Grauwerte darstellbar durch gleichgroße Anteile von R, G und B, liegen **auf der Hauptdiagonalen** des Einheitswürfels



(Krömker 2001)

Farbmodelle – CMY(K)



- subtraktives Farbmodell
- für Ausgabe auf Druckern
- Grundfarben Türkis (Cyan), Magenta, Gelb (Yellow)
- beim Druck Hinzunahme von reinem Schwarz (K) – Vierfarbdruck

Konvertierung RGB ↔ CMY

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} C \\ M \\ Y \end{pmatrix}$$

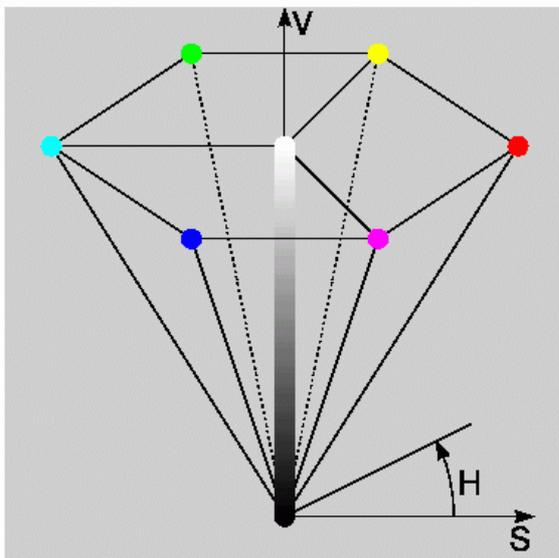
$$\begin{pmatrix} C \\ M \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

- gilt nur theoretisch
- kompliziertere Verfahren in der Druckindustrie

(Schlechtweg 2001)

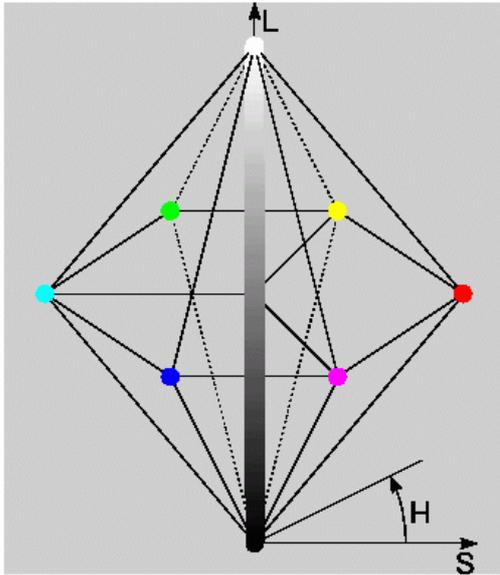
Die technisch-physikalischen Farbmodelle (RGB, CMY, YIQ...) entsprechen den technischen Gegebenheiten, sind aber zur direkten Farbdefinition durch den Benutzer wenig geeignet. Deshalb wurden Farbmodelle entwickelt, die näherungsweise (sehr grob) den Größen der menschlichen Farbwahrnehmung entsprechen, nämlich Helligkeit, Farbton und Farbsättigung.

Farbmodelle – HSV



- Hue / Saturation / Value
- Hue – Winkel um vertikale Achse, $0^\circ \equiv$ g rot
- Änderung der Sättigung: Änderung des Weißanteils
- Änderung der Helligkeit: Änderung des Schwarzanteils
- z. B. dunkelblau: $H = 240^\circ$, $S = 1$, $V = 0.3$

Farbmodelle – HLS



- Hue / Lightness / Saturation
- Strategie von Malern: nimm reines Pigment (H), Weiß dazu (S), Schwarz dazu (1-L)
- Komponenten nicht unabhängig voneinander
- Graustufen: $S = 0$
- vollgesättigte Farben:
 $L = 0.5, S = 1$

(Schlechtweg 2001)

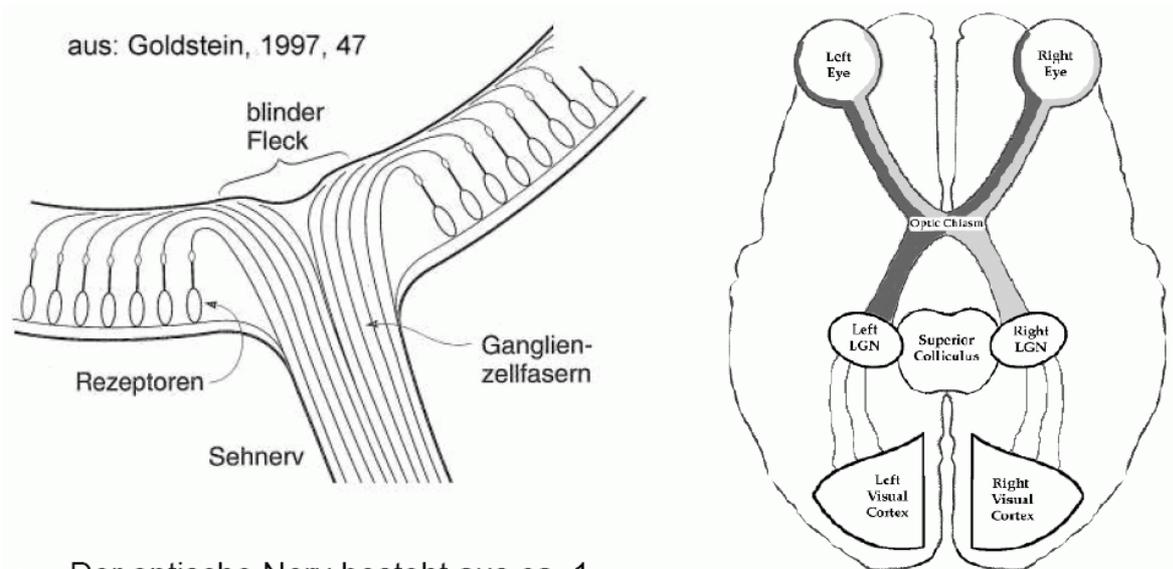
Achtung: Durch die unterschiedlichen Farbräume liefert die lineare Interpolation zwischen zwei identischen, aber in verschiedenen Farbräumen definierten Farben völlig unterschiedliche Ergebnisse.

Interaktive Farbselektion

- Auswahl aus einem Menü (Palette)
 - nur sinnvoll bei geringer Farbanzahl
 - Farben auf kleinen Flächen schwer zu erkennen
- namentliche Nennung („gelblich-grün“, „blaugrau“)
 - mehrdeutig und subjektiv
 - Abhilfe: Color Naming Scheme CNS
- Koordinatenangaben in einem Farbraum
 - textuell, Slider
- Interaktion mit graphischer Darstellung des Farbmodells

Weiterverarbeitung der elektrochemischen Reize aus den Sinneszellen der Netzhaut:

- 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.

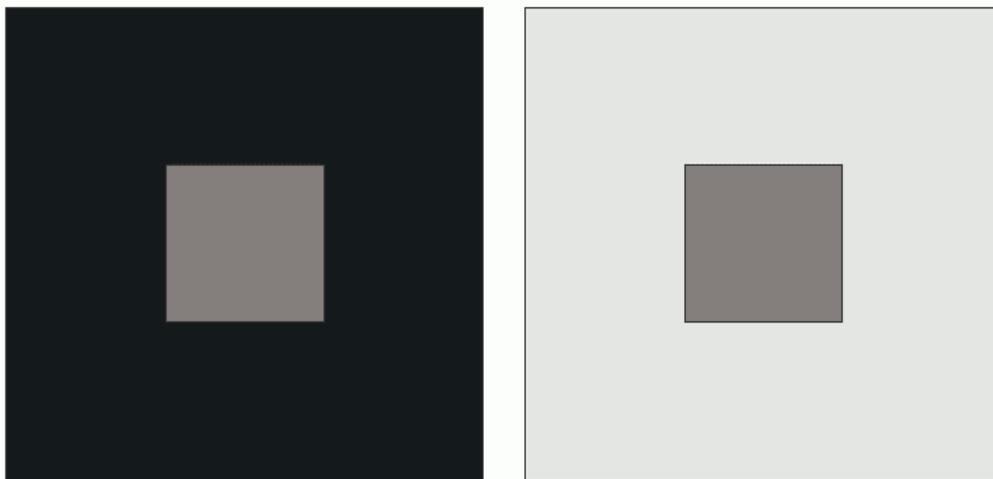
(Weimar 2005)

Resultierende Eigenheiten der visuellen Wahrnehmung

Helligkeit:

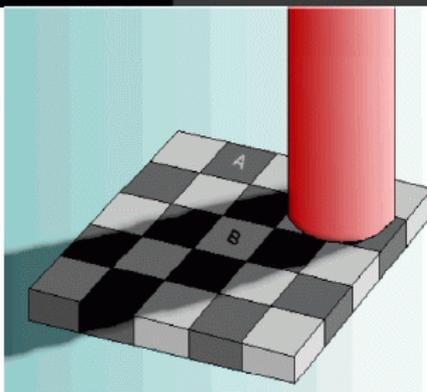
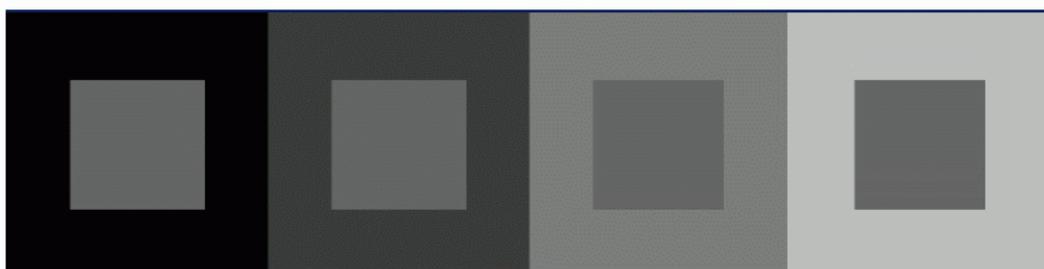
keine absolute Wahrnehmungsgröße
abhängig von:

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



die beiden mittleren Quadrate haben dieselbe Graustufe

(aus Krömker 2001)

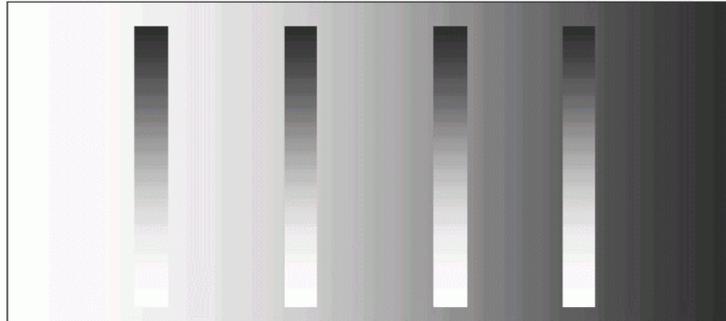


A und B haben dieselbe Farbe

(Woessner, o.J.)

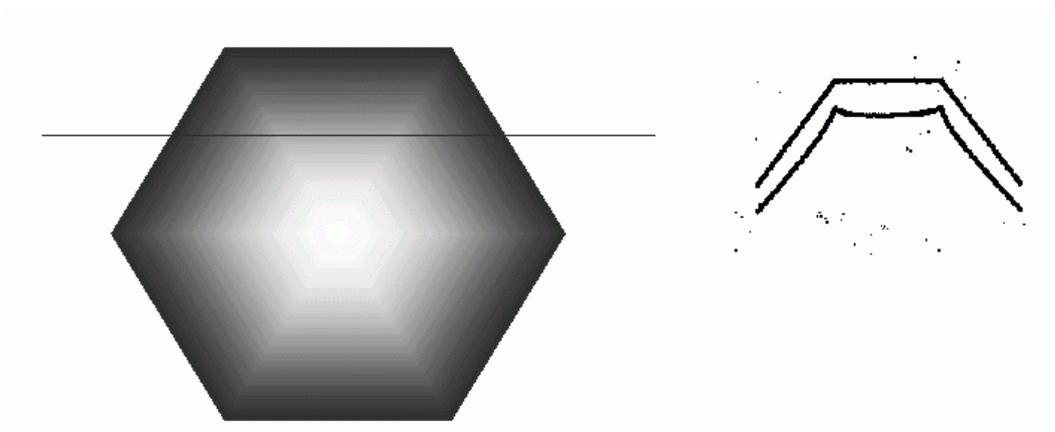
Kontrastverstärkung:

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



Unstetige Helligkeitsänderungen:

Mach-Bänder



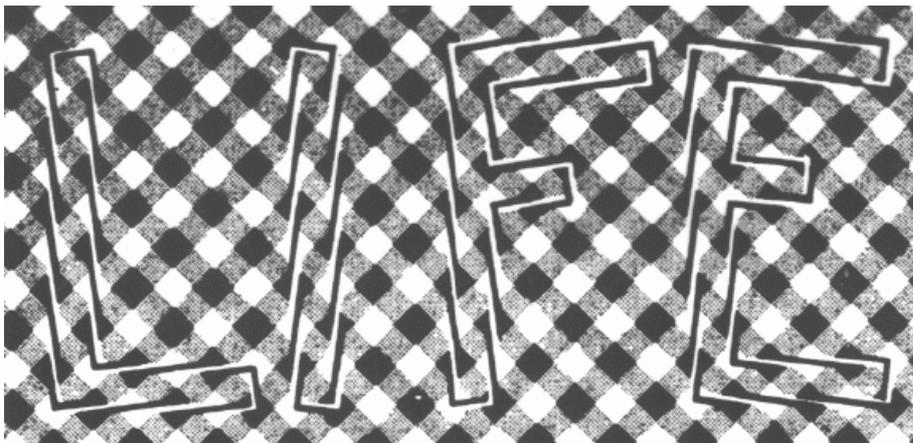
(Krömker 2001)

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

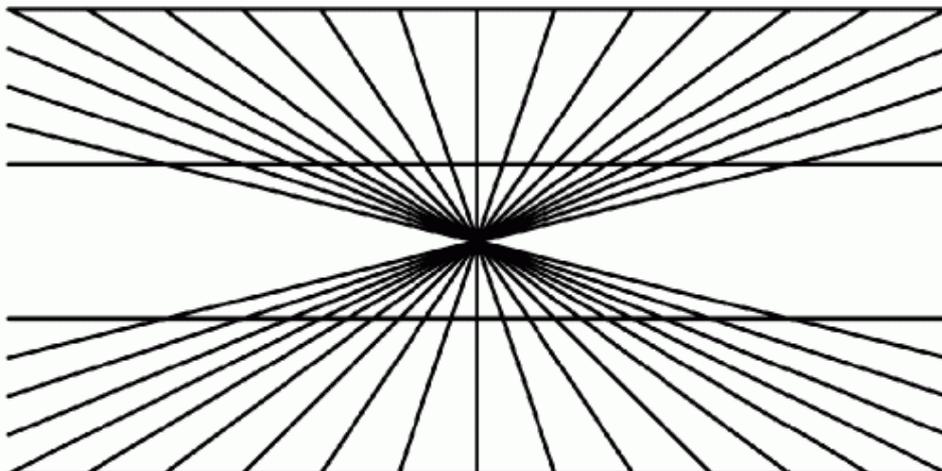
Effekt (in frühen Verarbeitungsschritten in der Netzhaut verursacht) ist Basis für Kanten- und Konturerkennung.

Richtung:

Geneigte Linien in der Umgebung erzeugen eine entgegengesetzte Neigung senkrechter Linien



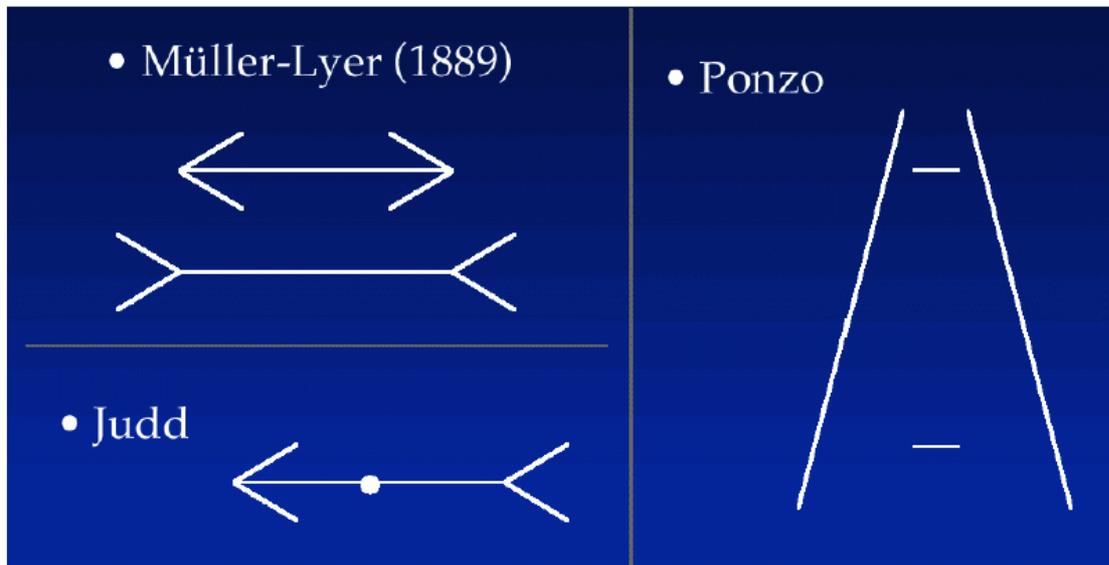
Parallelität:



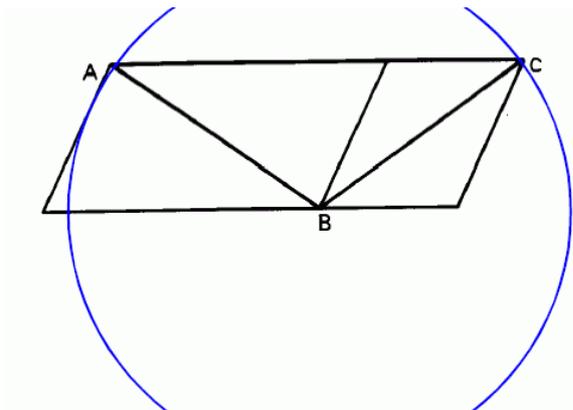
(Weimar 2005)

Länge:

- Eindruck von Strichlängen durch Umgebung verändert

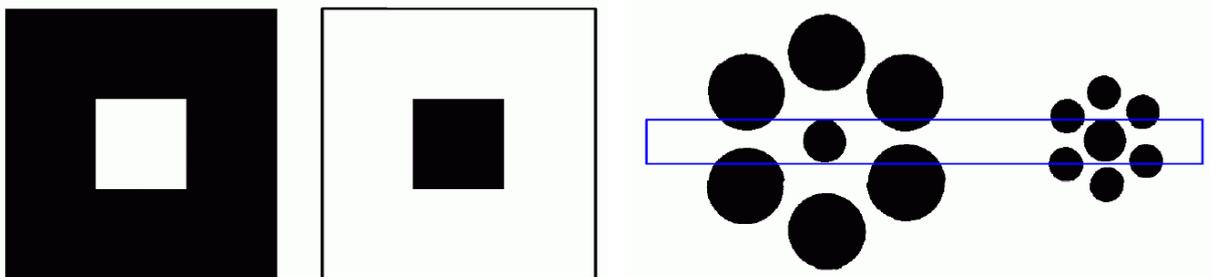


(Woessner, o.J.)



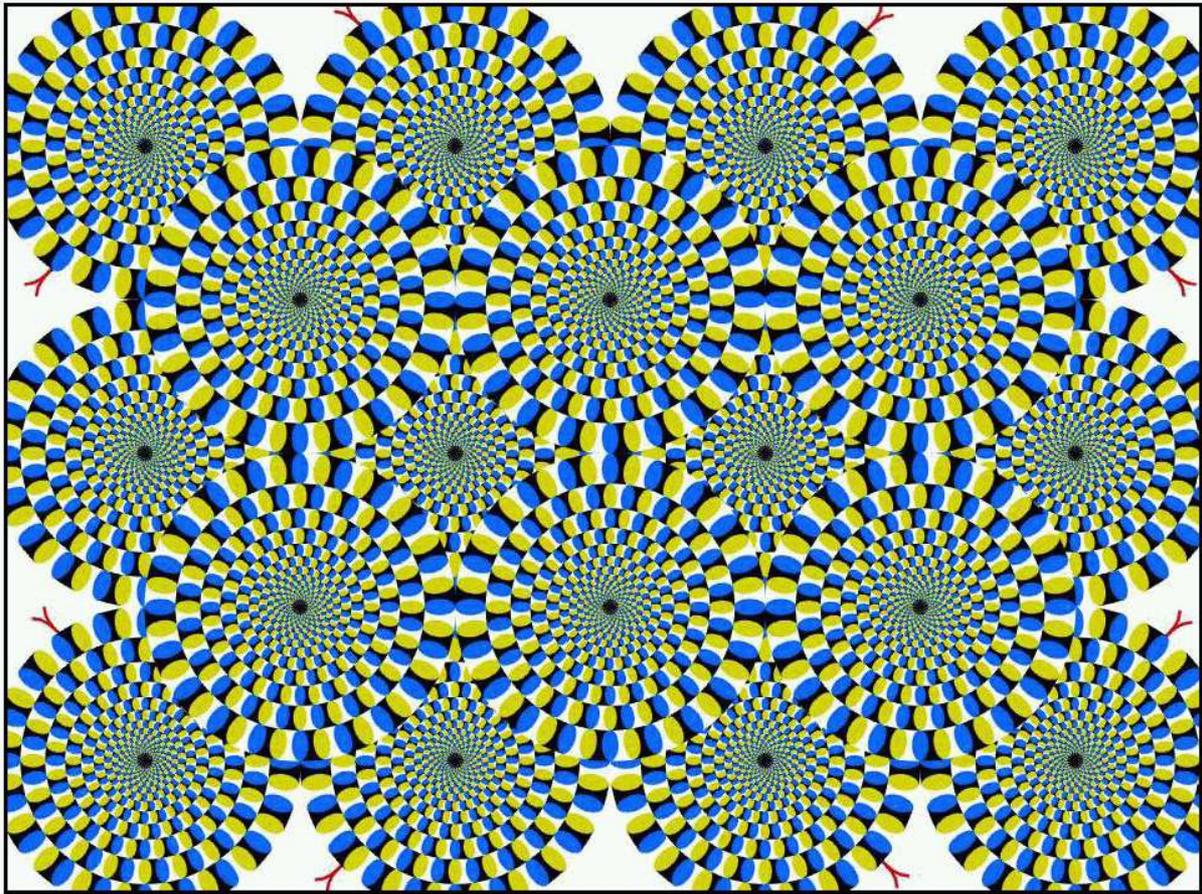
$$|AB| = |BC| \quad (\text{Weimar 2005})$$

Flächen:



(Weimar 2005)

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.

Beispiel:

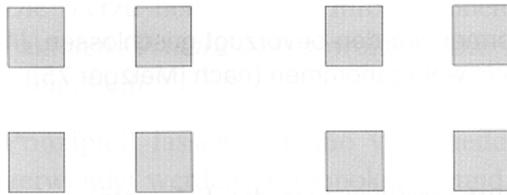
der Dalmatiner (aus Schumann & Müller 2000, nach Thurston 1986) – keine Konturlinie vorgegeben, diese konstruiert das visuelle System!



Gestaltprinzipien

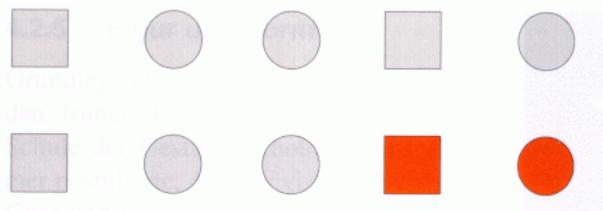
Gestaltprinzip der Nähe

Nahes wird als zusammengehörig empfunden:



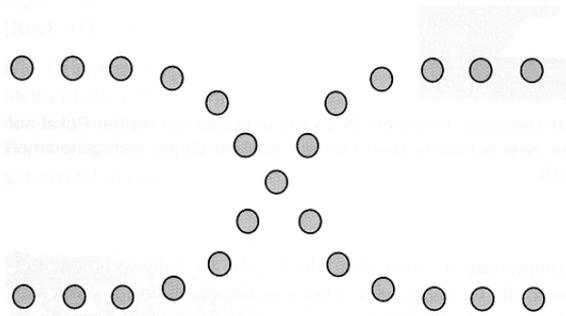
Gestaltprinzip der Ähnlichkeit

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



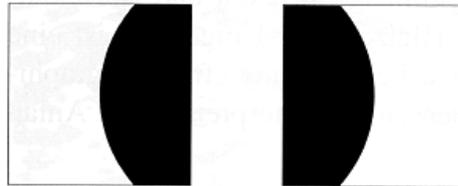
Gestaltprinzip der stetigen Fortsetzung

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:



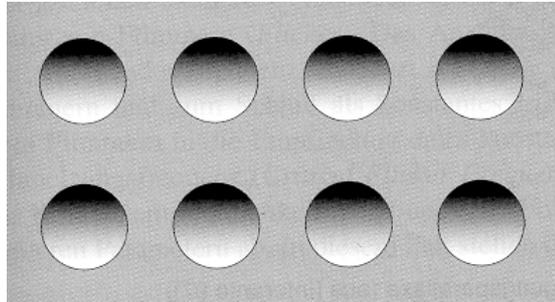
Kontextabhängigkeit der Formwahrnehmung

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

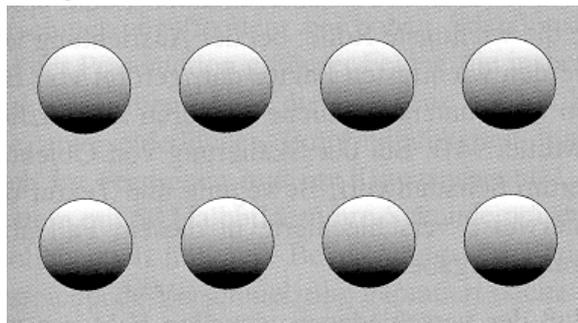
TAE CAT

3D-Formwahrnehmung (Tiefenwahrnehmung) aus Schattierung:

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



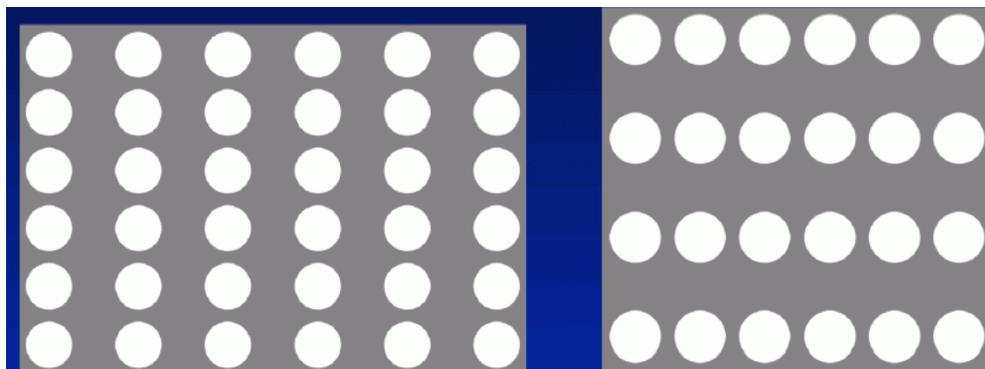
Die gleichen Kreise, gedreht, werden als kugelförmige Erhebungen wahrgenommen:



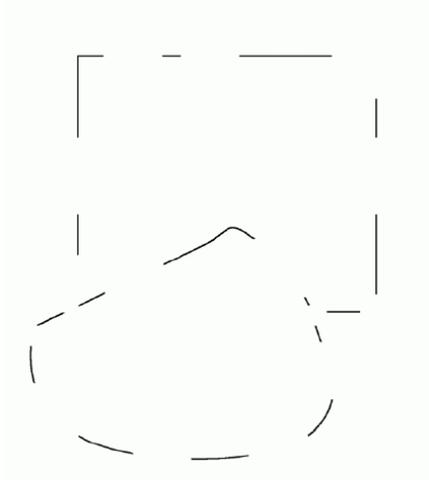
(Gestalt-Beispielbilder aus Schumann & Müller 2000)

Abstand zwischen Objekten:

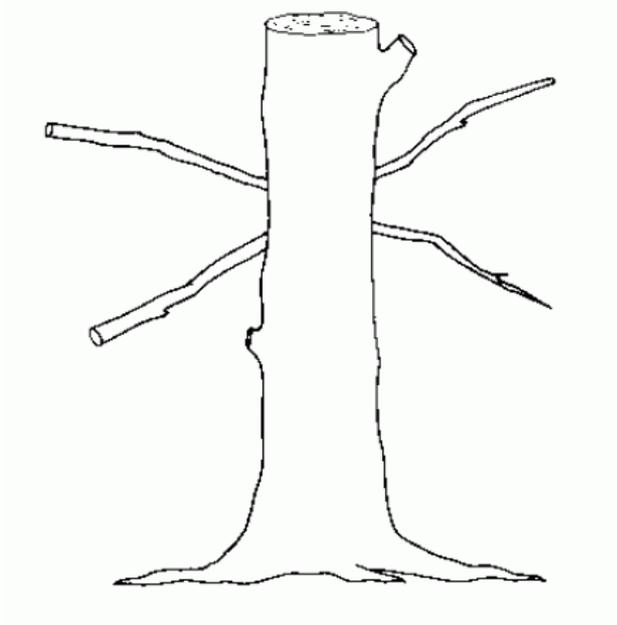
Gruppierung als Spalten oder Zeilen

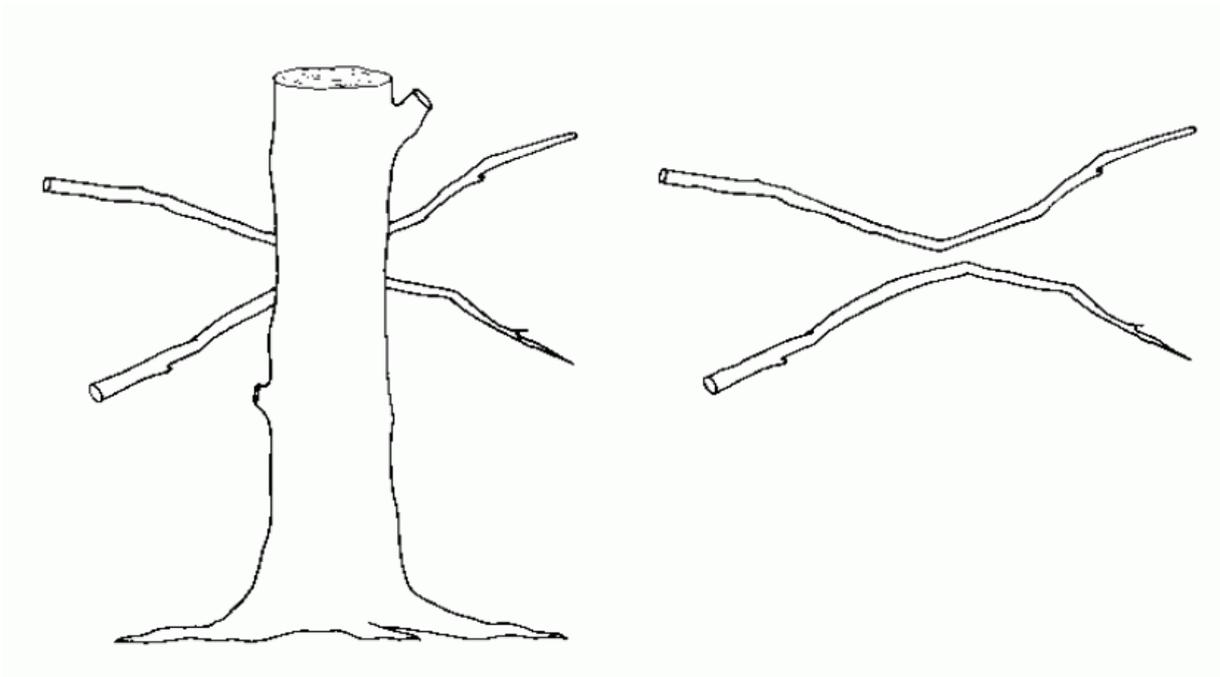


Linienfortsetzung



stetige Fortsetzung, "Prinzip der guten Gestalt"





Ausschnitte aus:
Krömker 2001, Schlechtweg 2001, Schumann & Müller 2000,
van Dam 2001; genaue Quellenangaben siehe
http://www.uni-forst.gwdg.de/~wkurth/cg08_lit.htm