

Aspekte menschlicher Wahrnehmung

Dipl.-Math. Bastian Rieck

Computer graphics and Visualization (CoVis)

Licht & das menschliche Auge

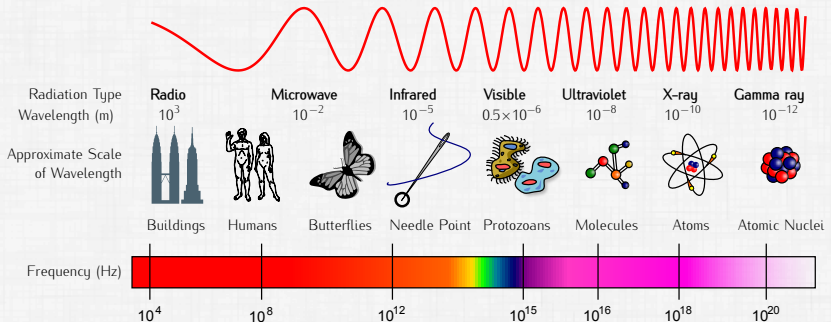
Helligkeit und Kontrast
Optische Täuschungen
Intensitätswahrnehmung

Farbe

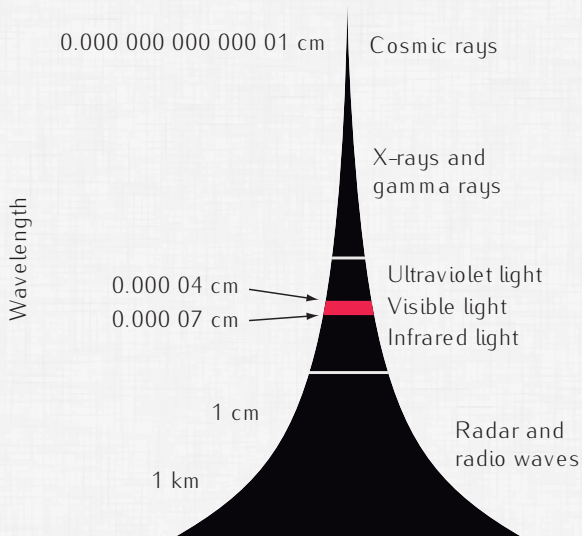
Visuelle Aufmerksamkeit & Praxistipps

Licht

- Wahrnehmung ist die Fähigkeit, *Muster* im sichtbaren Spektrum zu erkennen und zu verstehen
- Das sichtbare Spektrum umfasst eine Wellenlänge von ca. 380nm–780nm
- Manche Tiere können einen größeren Teil des elektromagnetischen Spektrums wahrnehmen, z.B. Schlangen (Infrarot) oder Insekten (ultraviolett)

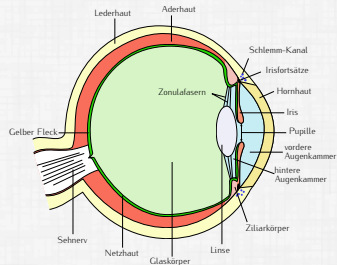


Sichtbares Spektrum des Lichts



Aufbau des menschlichen Auges

- Linse** Bündelt ein kleines *umgedrehtes* Bild der Realität auf die Netzhaut
- Iris** Reguliert die Menge des einfallenden Lichts
- Netzhaut** Enthält Photorezeptoren (lichtempfindliche Sinneszellen), die optische Reize wahrnehmen (Stäbchen: Für geringe Beleuchtung; Zapfen: Für normale Beleuchtung & Farbwahrnehmung)
- Blinder Fleck** Keine Photorezeptoren, weil Sehnerv das Auge verlässt
- Gelber Fleck** Größte Dichte von Photorezeptoren; nur hier scharfe Wahrnehmung möglich

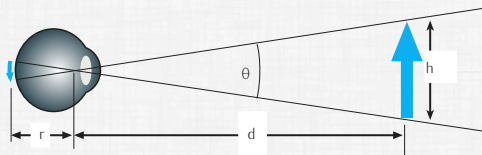


Sehwinkel

Definition (Sehwinkel)

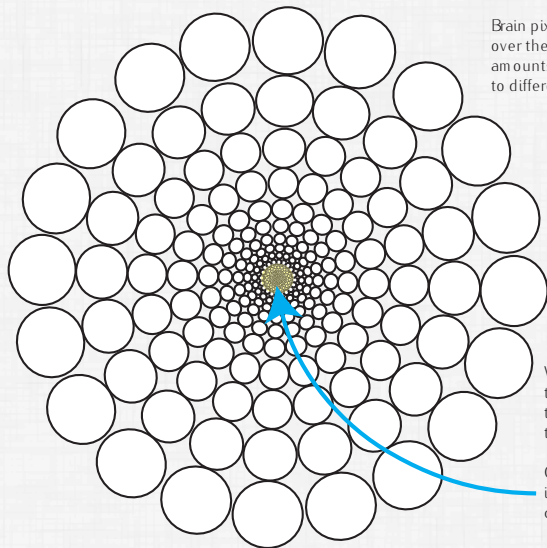
Der *Sehwinkel* (auch *scheinbare Größe*) ist der Winkel, unter dem ein Objekt wahrgenommen wird.

- Der Daumennagel auf Armlänge entspricht 1°
- Die *fovea centralis* nimmt nur ca. 2° wahr
- Formel: $\theta = 2 \arctan \left(\frac{h}{2d} \right)$



The visual angle of an object is measured from the optical center of the eye.

Auflösung



Brain pixels vary enormously in size over the visual field. This reflects differing amounts of neural processing power devoted to different regions of visual space.

At the edge of the visual field we can only barely see something the size of a fist at arm's length.

We can resolve about 100 points on the head of a pin held at arm's length in the very center of the visual field called the fovea.

Over half of our visual processing power is concentrated in a slightly larger area called the parafovea.

Sehschärfe

“Brain pixels”

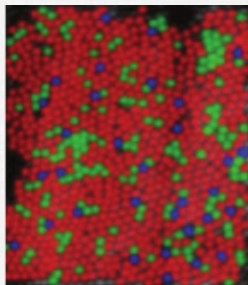
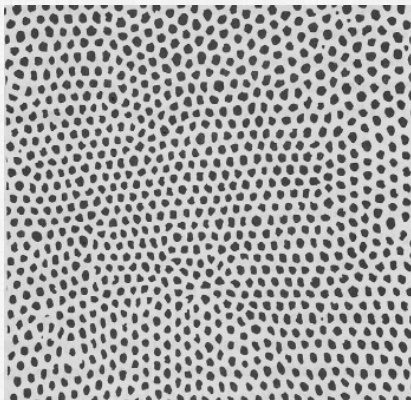


Abbildung: Photorezeptoren auf der Netzhaut

Sehschärfe

Unterschiedlich gute "Auflösungen"



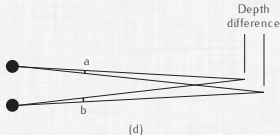
(a)



(b)



(c)



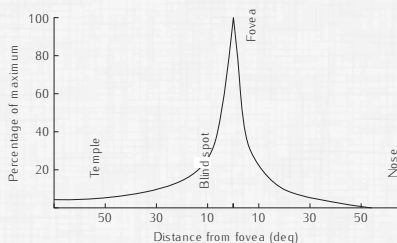
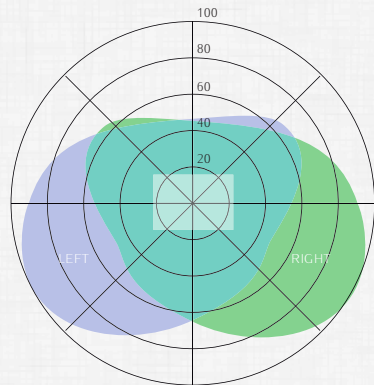
(d)



(e)

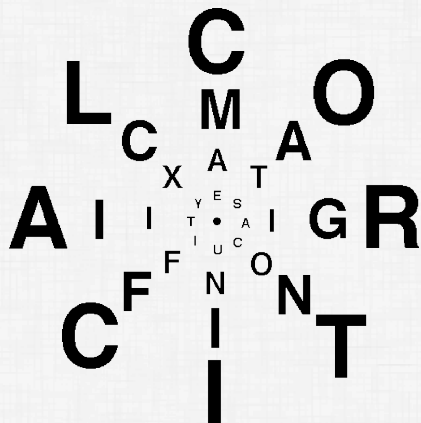
The basic acuities. (a) Point acuity (1 minute of arc): The ability to resolve two distinct point targets. (b) Grating acuity (1 to 2 minutes of arc): The ability to distinguish a pattern of bright and dark bars from a uniform gray patch. (c) Letter acuity (5 minutes of arc): The ability to resolve letters. The Snellen eye chart is a standard way of measuring this ability. 20/20 vision means that a 5-minute letter can be seen 90% of the time. (d) Stereo acuity (10 seconds of arc): The ability to resolve depth. The acuity is measured as the difference between two angles (a and b). (e) Vernier acuity (10 seconds of arc): The ability to see if two line segments are collinear.

Verteilung der Sehschärfe im Sichtfeld



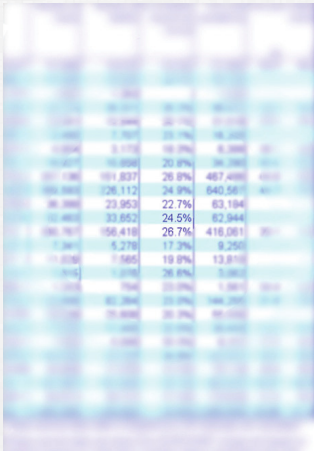
- Mitte des Sichtfeldes: 100 Punkte auf Stecknadel
- Rand des Sichtfeldes: Faustgroße Objekte

Buchstabentafel von Anstis

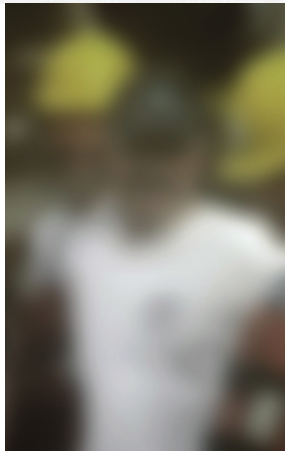


Sehschärfe

Auflösung im Sichtfeld



We only process details in the center of the visual field. We pick up information by directing our foveae using rapid eye movements.



At the edge of the visual field, we can barely see that someone is standing next to us.

Licht & das menschliche Auge

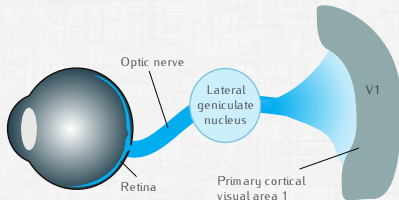
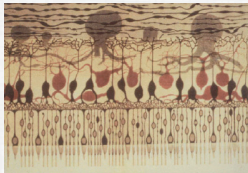
Helligkeit und Kontrast
Optische Täuschungen
Intensitätswahrnehmung

Farbe

Visuelle Aufmerksamkeit & Praxistipps

Helligkeitswahrnehmung

- Die Netzhaut enthält Photorezeptoren und mehrere Schichten von Neuronen
- Jedes Neuron kommuniziert über elektrische Impulse mit benachbarten Neuronen
- Die Rate, in der Impulse übertragen werden, kann variieren, je nachdem, ob ein Neuron *gehemmt* oder *erregt* wird
- Die Schichten von Neuronen münden in *retinalen Ganglienzellen*, die Informationen über den LGN zum Sehnerv übertragen



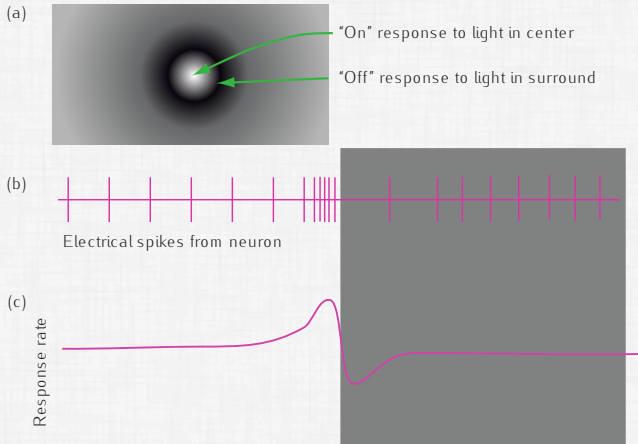
Signals from the retina are transmitted along the optic nerve to the lateral geniculate nucleus. From there, they are distributed to a number of areas, but mostly to visual area 1 of the cortex, located at the back of the head.

Rezeptives Feld

- Das *rezeptive Feld* einer Zelle ist der Bereich, in dem die Zelle auf Licht reagiert
- Jedes Lichtmuster verändert die Art und Weise, mit der das Neuron reagiert
- Retinale Ganglienzellen haben ein kreisförmiges rezeptives Feld
- Die Zellen können entweder Off-Zentrum oder On-Zentrum sein, je nachdem, ob ihr Zentrum *erregend* oder *hemmend* wirkt

Beispiel

"On-Zentrum"-Zelle



- (a) The receptive field structure of an on-center simple lateral geniculate cell. (b) As the cell passes over from a light region to a dark region, the rate of neural firing increases just to the bright side of the edge and decreases on the dark side. (c) A smoothed plot of the cell activity level.

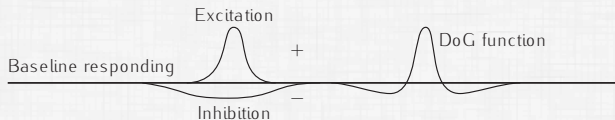
Modell

- “Difference of Gaussians”, d.h.

$$f(x) = \alpha_1 \exp\left(-\left(\frac{x}{w_1}\right)^2\right) - \alpha_2 \exp\left(-\left(\frac{x}{w_2}\right)^2\right),$$

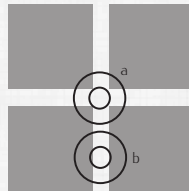
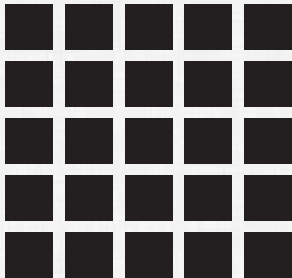
wobei x die Distanz zum Zentrum des Feldes beschreibt, w_1 die Breite des Zentrums und w_2 die Breite der Umgebung

- Die Stärke der Anregung wird über α_1 und α_2 modelliert
- Das Auge reagiert also auf *Differenzen* und misst keine exakten Helligkeitswerte!



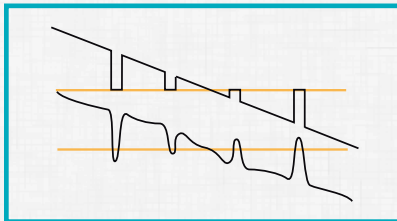
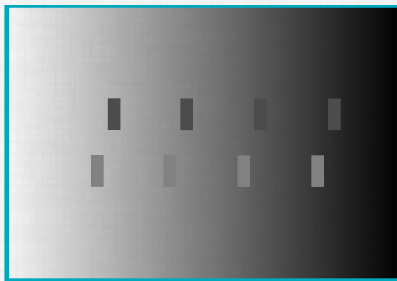
Difference of Gaussians (DoG) model of a receptive field.

Hermann-Gitter

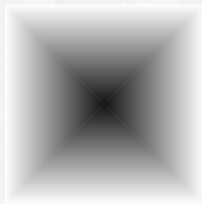


Simultaner Helligkeitskontrast

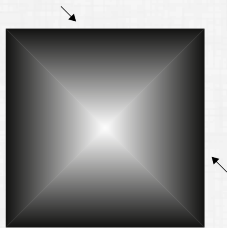
Ein graues Rechteck auf einem dunklen Hintergrund sieht heller aus als dasselbe graue Rechteck auf einem hellen Hintergrund.



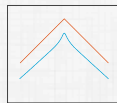
Machsche Streifen



(a)

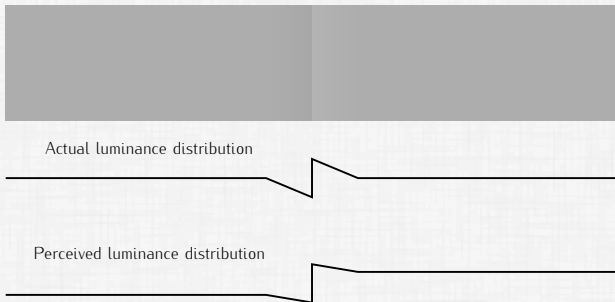


(b)

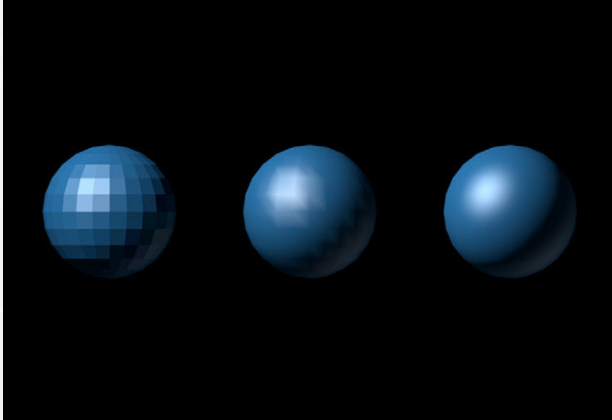


(c)

Cornsweet Illusion



Optische Artefakte beim *Shading*



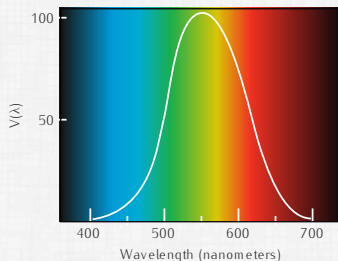
Definitionen

- Leuchtdichte** Beschreibt die *gemessene* Menge an Licht einer Lichtquelle (engl. *luminance*)
- Helligkeit** Beschreibt die *wahrgenommene* Menge an Licht einer Lichtquelle (engl. *brightness*)
- Lightness** Beschreibt die *wahrgenommene* Reflexion einer Oberfläche

Wahrgenommene Leuchtdichte

$$L = \int_{400}^{700} V_{\lambda} E_{\lambda} \delta_{\lambda}$$

Dabei ist E_{λ} eine Verteilungsfunktion für das Licht und V_{λ} die CIE-Schätzung der *spektralen Empfindlichkeit*. Einheit: cd/m^2



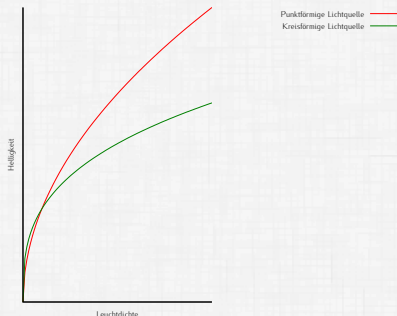
The CIE $V(\lambda)$ function representing the relative sensitivity of the human eye to light of different wavelengths.

Wahrgenommene Helligkeit

Extrem vereinfacht & idealisiert

$$\text{Brightness} = \text{Luminance}^n$$

Dabei hängt der Exponent n von der Größe der Lichtquelle ab. Praktische Werte sind $n \approx 0.33$ für kreisförmige Lichtquellen unter einem Sehwinkel von 5° und $n \approx 0.5$ für punktförmige Lichtquellen.



Empfindlichkeit bei der Kontrastwahrnehmung

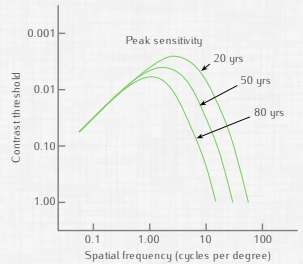
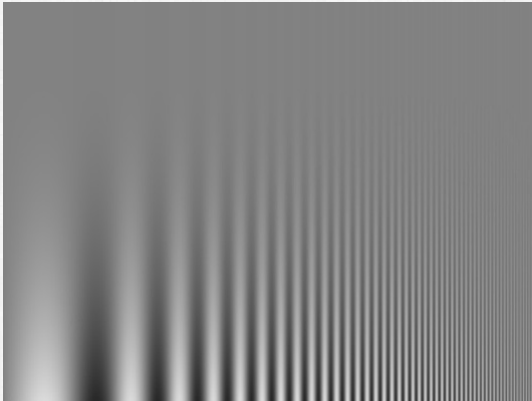
Der Kontrast C beschreibt Unterschiede der Leuchtdichte L :

$$C = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}$$

Die Wahrnehmung kann durch ein Sinusmuster untersucht werden. Dabei können verschiedene Parameter variiert werden:

- Räumliche Frequenz
(Anzahl der Streifen)
- Orientierung
- Kontrast (d.h. die Amplitude)
- Phase (d.h. die seitliche Verschiebung)
- Größe des überdeckten Sichtfeldes



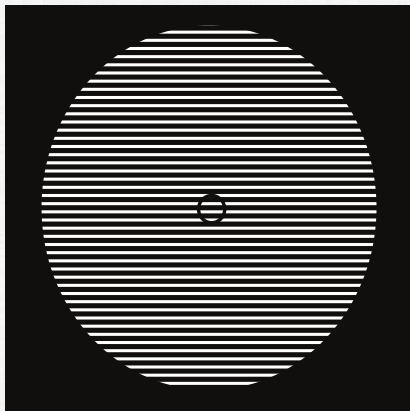


Visueller Stress



Visueller Stress

- Auslösung durch unterschiedliche visuelle Stimuli
- Meist *Kombination* von räumlichen und zeitlichen Mustern
- Wilkins (1995): Streifenmuster im Abstand von ca. $3/^\circ$ und Flackern mit ca. 20kHz



Unterscheidbarkeit von Grautönen

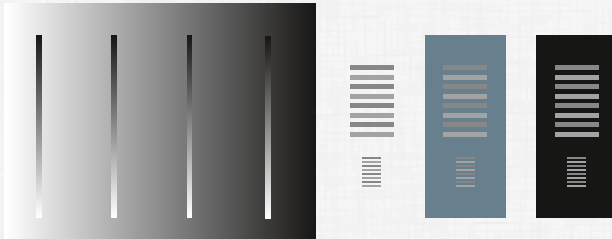
- Für eine Grauwertdarstellung ist es wichtig, den *wahrgenommenen* Unterschied zwischen Grautönen zu verstehen
- Ideal: Gleiche Unterschiede in den Daten führen zu gleichen wahrgenommenen Unterschieden in den Grautönen
- Das *Webersche Gesetz* besagt:

$$\frac{\delta L}{L} = \text{const.}$$

Die Grauwertdifferenz, die uns einen Unterschied sehen lässt, ist also *unabhängig* von der Gesamtleuchtdichte! Typischerweise kann eine Veränderung von $\delta \approx 0.005$, d.h. eine Veränderung von 0.5% noch wahrgenommen werden.

Contrast crispening

Grauwerte werden als unterschiedlicher wahrgenommen, wenn sie dem Grauwert des Hintergrundes gleichen. Die meisten Grauwertskalen beziehen diesen Effekt *nicht* mit ein!



Licht & das menschliche Auge

Helligkeit und Kontrast
Optische Täuschungen
Intensitätswahrnehmung

Farbe

Visuelle Aufmerksamkeit & Praxistipps

Warum Farbwahrnehmung?

Zunächst:

- Eingeschränkte Relevanz im täglichen Leben
- Farbenblinde bemerken ihr Defizit in der Farbwahrnehmung oft selbst erst sehr spät
- Räumliche Anordnung von Objekten, ihre Form oder ihre Bewegungsrichtung können auch *ohne* Farbe wahrgenommen werden

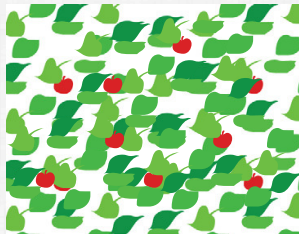
Aber:

- Farbwahrnehmung hilft, Tarnungen zu durchschauen
- Farbwahrnehmung hilft, Objekte anhand ihre charakteristischen Farbe *schnell* zu identifizieren
- Farbwahrnehmung hilft, Eigenschaften eines Objektes zu bestimmen (Ist diese Frucht noch reif? Ist das Fleisch noch frisch?)

Warum Farbwahrnehmung?

Daher:

- Farbe ist ein *Attribut* eines Objektes, nicht ein primäres Merkmal
- Gut geeignet, um zu markieren & kategorisieren...
- ...aber schlecht geeignet, um Form, Details, oder Raum darzustellen

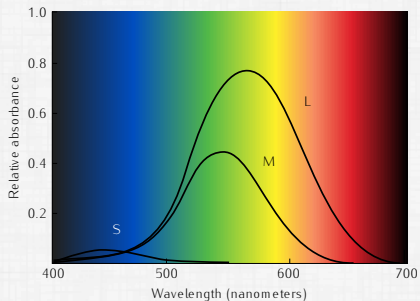


Definitionen zur Farbwahrnehmung

- Menschen sind *Trichromaten*; sie haben drei verschiedene Arten von Zapfen als Farbrezeptoren auf der Netzhaut
- Mit *Farbraum* (engl. *colour space*) ist eine Anordnung von Farben in einem dreidimensionalen Unterraum von \mathbb{R}^3 gemeint
- Drei Dimensionen reichen aus, denn wir haben nur drei Arten von Zapfen
- Da nur drei Arten von Rezeptoren an der Farbwahrnehmung beteiligt sind, ist es möglich, *jede* Farbe durch Mischen von drei farbigen Lichtern zu erzeugen

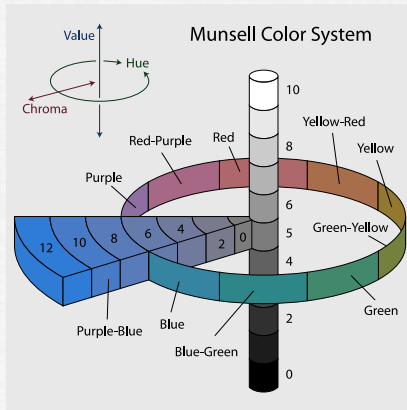
Warum Farbräume? Leichtere Erkennung von *ähnlich* wahrgenommenen Farben.

Empfindlichkeit der Farbwahrnehmung



Der S-Rezeptor, der auf kurze Wellenlängen reagiert, ist nicht besonders sensibel im Vergleich zu den anderen Rezeptoren. Dies ist u.a. der Grund, warum blauer Text auf z.B. schwarzem Hintergrund sehr schwer zu erkennen ist.

Das Munsell-Farbsystem



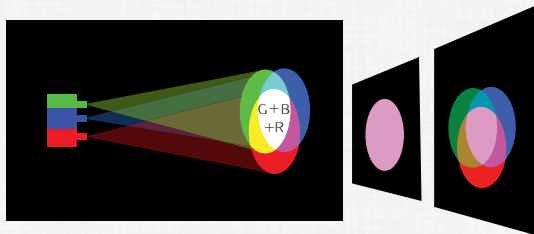
Basiert auf psychologischen Aspekten: Helligkeit (*value*), Farbwert/-ton (*hue*) und Chromatizität/Sättigung (*chroma*). Der Unterschied zwischen benachbarten Farben ist ungefähr gleich. Komplementärfarben liegen einander gegenüber. Die Mischung ergibt neutrales Grau mit der selben Helligkeit.

Farbmessung

Jede Farbe kann durch *additives Mischen* der Grundfarben (die als Licht oder physische Farbe vorliegen) erzeugt werden:

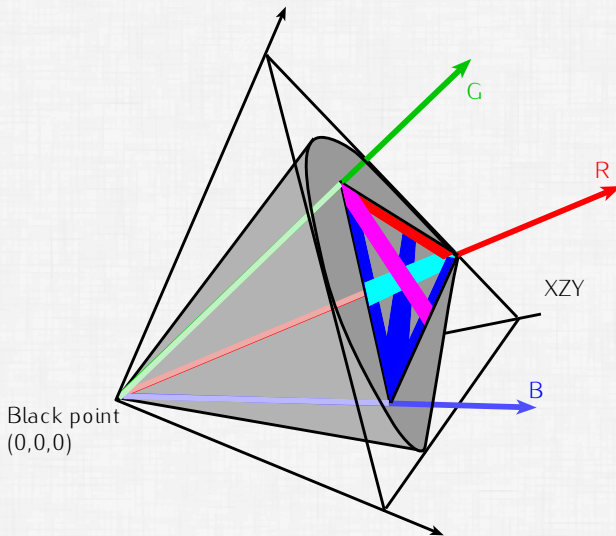
$$C \equiv rR + gG + bB$$

Dabei bezeichnen R , G , B die jeweiligen Lichtquellen und r , g , b jeweils die Menge an Licht.



Das CIE-System

- Commission Internationale de l'Éclairage
- Farbmessung durch "standardisierte Beobachter" ("typische" menschliche Wahrnehmung)
- Basiert auf der *Tristimulustheorie* (Mit X , Y , Z bezeichnet)
- Y entspricht der *Leuchtdichte*
- Auswahl nach *mathematischen* Kriterien, nicht nach *physischen* Lichtern



Die *wahrnehmbaren Farben* sind im grauen Volumen enthalten. Das pyramidale Volumen gibt den *Gamut* (Farbpalette) eines typischen Monitors an.

Koordinatentransformation

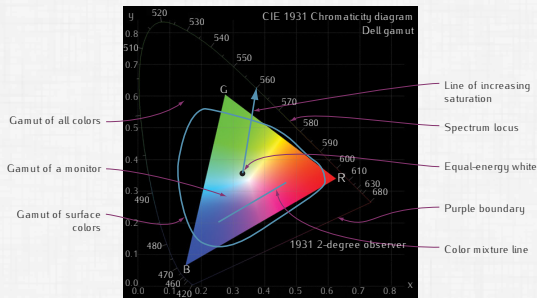
- Farben in Tristimuluskoordinaten sind sehr abstrakt
- Daher üblicherweise Konvertierung in *Chromatizitätswerte* (Farbsättigung)

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$
$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$
$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

Da $x + y + z = 1$, genügt es, die x - und y -Koordinaten anzugeben. Die führt dann zur CIE-Normfarbtafel (auch CIE-Chromatizitätsdiagramm).

Eigenschaften der CIE-Normfarbtafel

- Wenn zwei farbige Lichtquellen im Diagramm als Punkte dargestellt werden, dann liegen alle *Mischungen* der Farben auf der Linie zwischen den beiden Punkten.
- Je drei farbige Lichter legen ein Dreieck im Diagramm fest. Alle Farben, die *innerhalb* dieses Dreiecks liegen, können durch die Lichtquellen erzeugt werden.
- Die Spektralfarblinie enthält alle Farben mit den höchsten Sättigungsgraden, d.h. Farben, deren Licht nur aus einer einzigen Wellenlänge besteht.
- Die Purpurlinie verbindet die beiden Enden der Spektralfarblinie.
- Der Weißpunkt hat die Koordinaten $x = 0.333$, $y = 0.333$. Auf der Verbindungslinie von diesem Punkt zu einer beliebigen Farbe ändert sich der empfundene Farbton nicht.
- Komplementärfarben findet man durch Verlängerung der Strecke zum Weißpunkt.



“Gute” Farbräume

- Farbräume, in denen der räumliche Abstand zweier Farben dem wahrgenommenen Abstand entspricht, sind sehr nützlich. Beispiel: *Pseudofarben* für die Darstellung von Karten, Modellen, etc.
- **Wichtig:** Der CIE XYZ-Raum erfüllt dieses Kriterium nicht!
- Aber: *CIElab* und *CIEluv*
- Umrechnung aus CIE XYZ-Raum einfach möglich
- Euklidische Distanz zwischen zwei Farbvektoren entspricht gerade der wahrnehmbaren Differenz
- Anwendung: Einfaches *Clustering* auf Farbbildern möglich

Isoluminanz

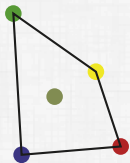
It is very difficult to read text that is isoluminant with its background color. If clear text material is to be presented it is essential that there be substantial luminance contrast with the background. Color contrast is not enough. This particular example is especially difficult because the chromatic difference is in the yellow blue direction. The only exception to the requirement for luminance contrast is when the purpose is artistic effect and not clarity



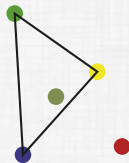
Isoluminanz meint, dass sich zwei Farben nur in ihren Farbtönen, nicht aber in ihre Helligkeit unterscheiden. Dies erschwert die Detailwahrnehmung enorm. Mit Grauwerten können Informationen tatsächlich besser transportiert werden.

Anwendung: Farben für Objekte wählen

(a)



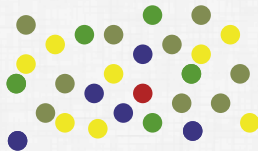
(b)



(c)



(d)



Um *Unterscheidbarkeit* zu gewährleisten, sollte die Farbe eines Objektes, das von anderen Objekten unterschieden werden soll, *außerhalb* der konvexen Hülle der anderen Farben liegen.

Anwendung: Farben für Objekte wählen

Was ist zu beachten?

- Unterscheidbarkeit** Die Farben sollten voneinander zu unterscheiden sein (siehe vorherige Folie)
- Eindeutige Farbtöne** Die Gegenfarben (blau & gelb, rot & grün, schwarz & weiß) werden in den meisten Kulturkreisen gut erkannt
- Kontrast zum Hintergrund** Farben können je nach Hintergrund unterschiedlich wirken. Isoluminanz ist zu vermeiden.
- Farbschwäche** Farbkodierung basierend auf rot-grün-Kontrasten sollte vermieden werden
 - Anzahl** Nur ca. 5 bis 10 Farben können *schnell* unterschieden werden
- Größe der Farbfläche** Die Größe der farbigen Objekte sollte nicht zu klein sein (allgemein: je kleiner, desto stärker gesättigte und unterschiedliche Farben)

Licht & das menschliche Auge

Helligkeit und Kontrast
Optische Täuschungen
Intensitätswahrnehmung

Farbe

Visuelle Aufmerksamkeit & Praxistipps

Wie oft kommt die Zahl 3 vor?

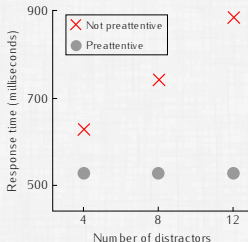
45929078059772098775972655665110049836645
27107462144654207079014738109743897010971
43907097349266847858715819048630901889074
25747072354745666142018774072849875310665

Wie oft kommt die Zahl 3 vor?

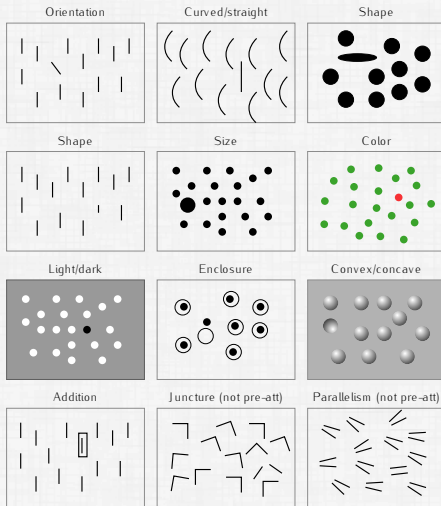
45929078059772098775972655665110049836645
27107462144654207079014738109743897010971
43907097349266847858715819048630901889074
25747072354745666142018774072849875310665

Präattentive Wahrnehmung

- Bestimmte visuelle Informationen “springen sofort ins Auge”
- Wir können sie erfassen, bevor wir unsere *Aufmerksamkeit* darauf richten
- Diese Art der Wahrnehmung wird daher *präattentiv* genannt
- Es ist experimentell möglich, zu bestimmen, ob eine Information präattentiv ist. Dazu wird überprüft, ob eine Versuchsperson ein Zielobjekt aus einer Menge an Ablenkungen (Distraktoren) herausfinden kann.
- Ist die Zeit, die dafür benötigt wird, *unabhängig* von der Anzahl der Ablenkungen, so ist die Information präattentiv.



Beispiele



Die Stärke dieser Reize ist unterschiedlich. Am stärksten sind Farbe, Orientierung, Größe, Kontrast.

Regeln

- Bei zu vielen unterschiedlichen präattentiven Reizen stechen einzelne Reize nicht mehr hervor.
- Die Kombination mehrerer Reize ist im Allgemeinen *nicht* präattentiv.



position
hue (color)

fully separable

2 groups each



size
hue (color)

some
interference

difficult to
discriminate
small items

(2 groups each)



size: width
size: height

some/significant
interference

integral
percept:
area
(planar size)

3 groups



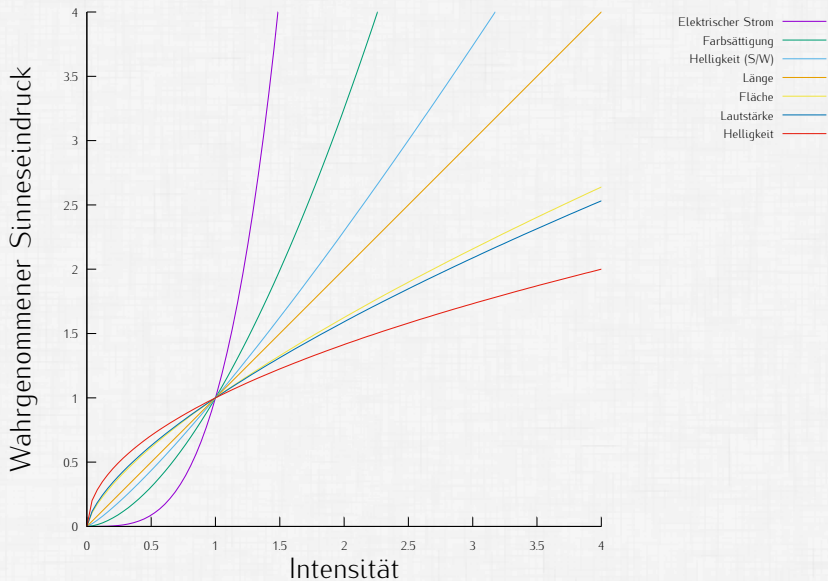
red
green

major
interference

integral
percept:
color/hue

4 groups

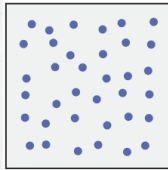
Die Stevenssche Potenzfunktion



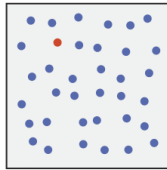
Exponenten: 3.5, 1.7, 1.2, 1.0, 0.7, 0.67, 0.5

Beispiel

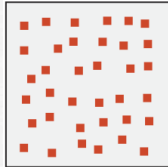
Geringere Suchgeschwindigkeit bei Kombinationen



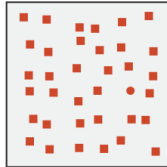
(a)



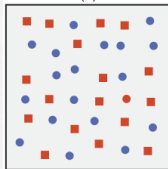
(b)



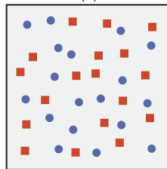
(c)



(d)

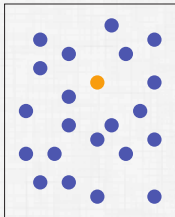


(e)

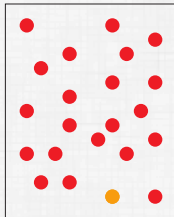


(f)

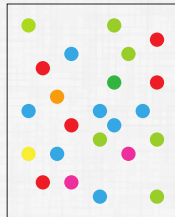
Unterschiedliche Suchgeschwindigkeiten



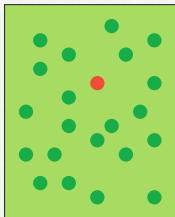
● The larger the chromatic difference between the target symbol and the other symbols, the easier the search.



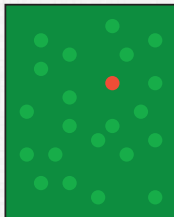
● When there is only a small color difference from non-target symbols, the search is difficult.



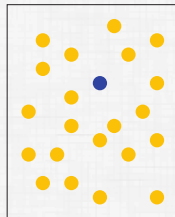
● When there are many non-target symbol colors, the search is the most difficult.



● If non-target symbols are similar to the background, they are easy to exclude from the visual search.



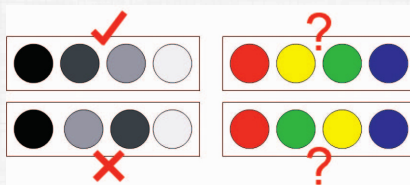
● A luminance difference plus a chromatic difference from other symbols and the background leads to the easiest search.



● A dark target on a light background with light non-target symbols can be as effective as the reverse.

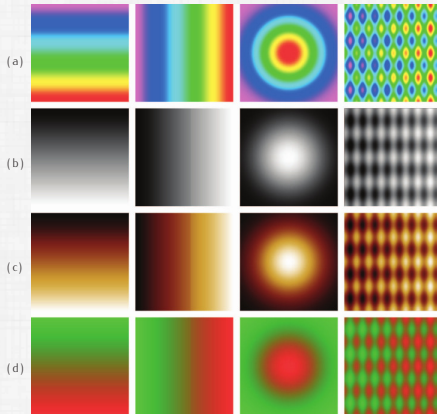
Farbskalenwahl

- Menschen können Farben gut nach ihrer *Leuchtdichte* sortieren...
- ...aber nicht sehr gut nach ihrem *Farbton*



Daher ist die oft benutzte Regenbogenfarbskala (*rainbow colour map*) komplett ungeeignet!

Vergleich einiger Farbskalen



Four data sets visualized with (a) rainbow, (b) gray-scale, (c) black-body radiation, and (d) isoluminant green-red color maps. Apparent sharp gradients in the data in (a) are revealed as rainbow color map artifacts, not data features, by comparing this row with the same data viewed using the other color maps. Conversely, the sharp gradient found at the center of the second data set (see the second column) shown in the gray-scale and black-body radiation (and to a lesser extent, the isoluminant green-red) images is not found in the corresponding image with the rainbow color map.

Wo finde ich gute Farbskalen?

The screenshot displays the ColorBrewer 2.0 web application interface. At the top right, the logo reads "COLORBREWER 2.0" with the tagline "color advice for cartography". The main interface is divided into several control panels on the left and a large map area on the right.

Number of data classes: 7

Nature of your data: sequential (selected), diverging, qualitative

Pick a color scheme: A grid of various color schemes is shown, with the "7-class PRGn" scheme selected.

Only show: colorblind safe, print friendly, photocopy safe

Context: roads, cities, borders (checked)

Background: solid color (selected), terrain

Color Legend (7-class PRGn):

- #762a83
- #af8dc3
- #e7d4e8
- #f7f7f7
- #d9f0d3
- #7bf77b
- #1b7837

The map shows a geographical area of Germany, with each administrative district colored according to the selected 7-class PRGn sequential color scheme. The colors range from dark purple in the west to dark green in the south.

Literatur

- [BI07] David Borland and Russell M. Taylor II, *Rainbow color map (still) considered harmful*, IEEE Computer Graphics and Applications **27** (2007), no. 2, 14–17.
- [War08] Colin Ware, *Visual thinking for design*, Morgan Kaufmann, 2008.
- [War12] ———, *Information visualization: Perception for design*, 3rd ed., Morgan Kaufmann, 2012.