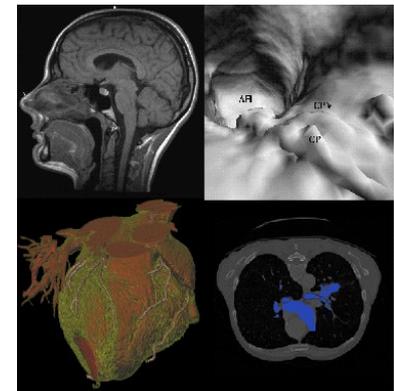
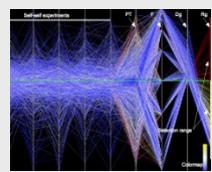


Informations- visualisierung

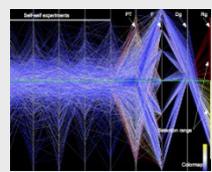
Thema:	2. Wahrnehmung von Graphik/1
Dozent:	Prof. Dr. Geric Scheuerman scheuermann@informatik.uni-leipzig.de
Sprechstunde:	nach Vereinbarung
Umfang:	2
Prüfungsfach:	Modul Fortgeschrittene Computergrafik Medizininformatik Angewandte Informatik





Übersicht

1. Einführung
2. Wahrnehmung von Graphik
 - 2.1 Semiotik
 - 2.2 Optische Wahrnehmung
 - 2.3 Helligkeit, Kontrast, Farbe
 - 2.4 Visuelle Aufmerksamkeit
 - 2.5 Muster und Bewegung
3. Statistische Grundlagen
4. Darstellung von Tabellen
5. Darstellung von Graphen
6. Darstellung von Metadaten und Prozessen
7. Interaktion
8. Spezifische Verfahren
9. Visual Analytics
10. Beispielanwendungen

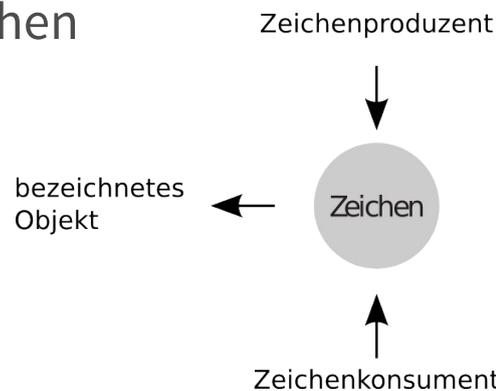


2.1 Semiotik

Ziel von Informationsvisualisierung:
Kommunikation von Inhalten

- mediale Kommunikation findet über **komplexe Zeichensysteme** statt
- Visualisierungen müssen den Voraussetzungen unser **mentalen Modells** entsprechen

[Ware, 2004]

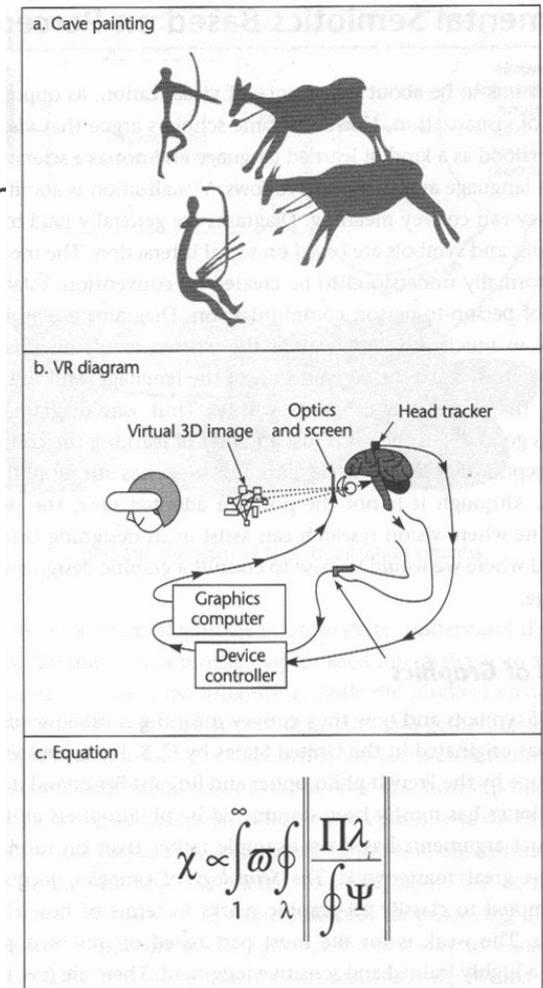


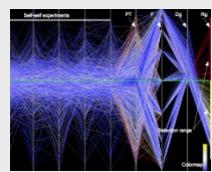
[Bürigel, 2001]

Semiotik befasst sich mit der Untersuchung von Zeichen und wie diese Informationen vermitteln

Klassisches Buch

- J. Bertin, 1983, The Semiology of Graphics



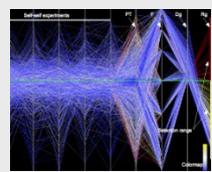


2.1 Semiotik

Gibsons Affordance Theorie

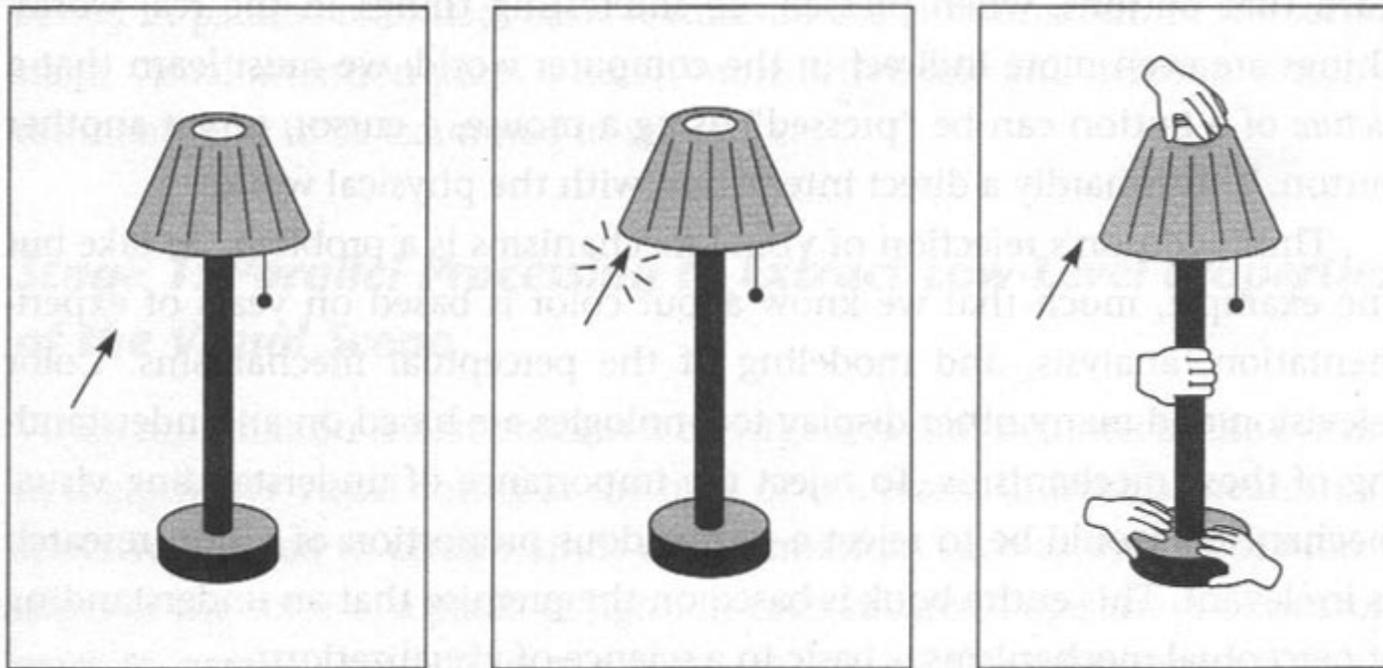
[J. J. Gibson, The Ecological Approach to Visual Perception, 1979]

- **Möglichkeiten für Handlungen** sind Motivation der Wahrnehmung (Affordances).
- **Hauptziel** einer Visualisierung ist die resultierende Entscheidungsfindung
- Handlungsmöglichkeiten werden **direkt** wahrgenommen
- **Frage:** Welche Möglichkeiten werden wahrgenommen, um ein Handeln auszuführen?
- **Herausforderung:** gute Visualisierung bedarf adäquater Affordance trotz **indirekter** Kommunikation über Computerdisplays

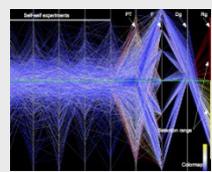


2.1 Semiotik

Gibsons Affordance Theorie



[Ware, 2004]



2.1 Semiotik

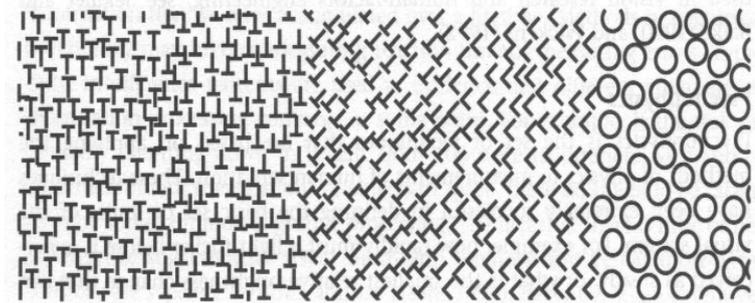
Visualisierung als Sprache

Kommunikation von Inhalten über komplexe Zeichensysteme

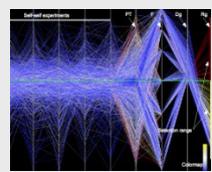
Zwei Arten graphischer Symbole, die unterschiedlich zu betrachten sind

Sensorische Symbole

Abstrakte Symbole



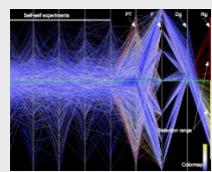
$$\chi \propto \int_1^{\infty} \omega \phi \left\| \frac{\Pi \lambda}{\phi \Psi} \right\|$$



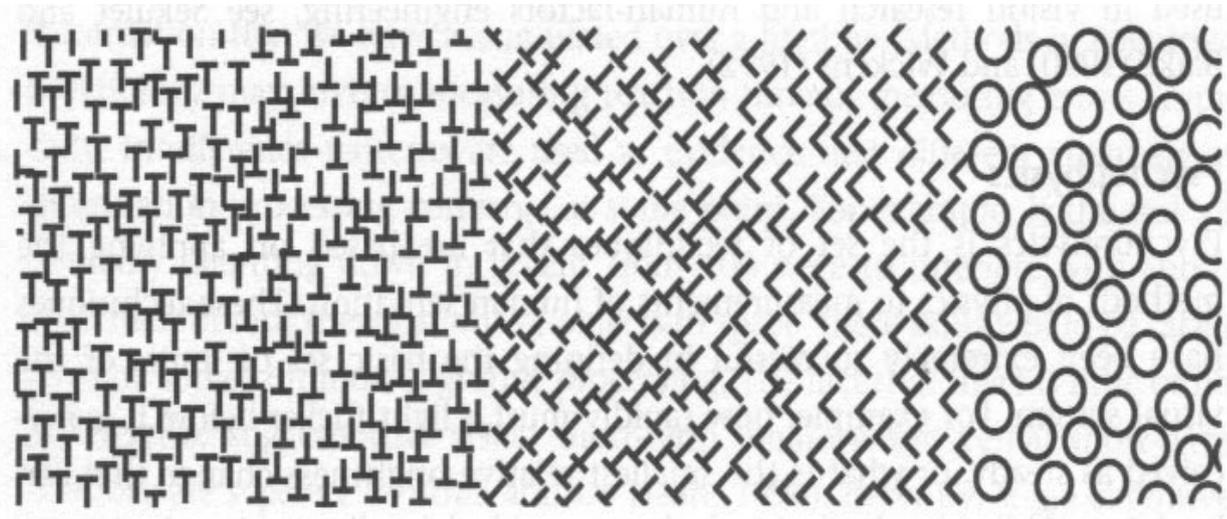
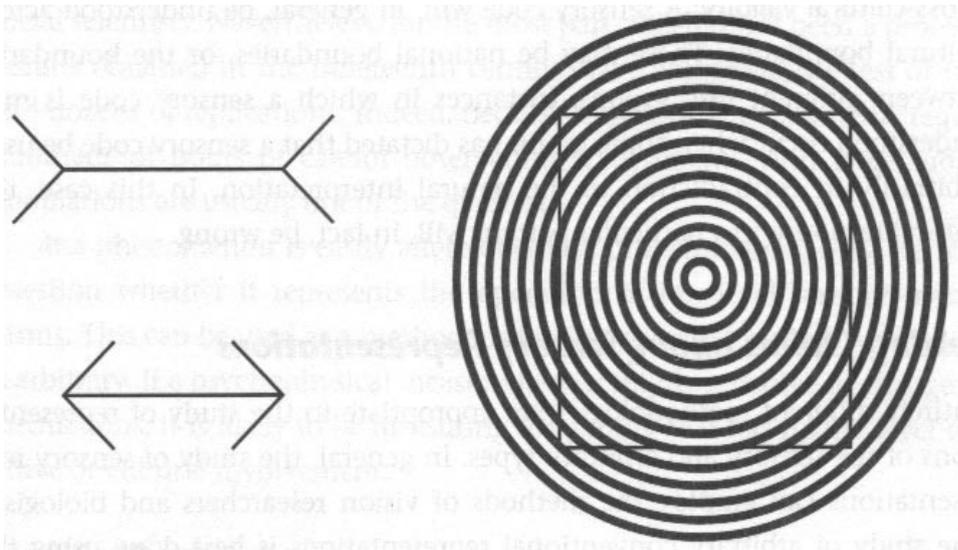
2.1 Semiotik

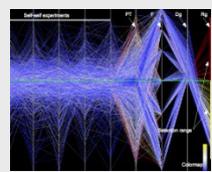
Sensorische Symbole

- basieren auf **biologisch vorgegebenen** Wahrnehmungsprozessen
- sind ohne Übung zu verstehen **leisten** selbst **dem eigenen Verstand** Widerstand
- sind unmittelbar erkennbar
- haben in allen Kulturen Gültigkeit



2.1 Semiotik



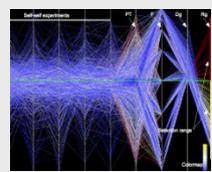


2.1 Semiotik

Abstrakte Symbole

- sind **schwer zu erlernen**
- **einfach zu vergessen** (Sofern sie nicht hinreichend tief gelernt sind, wie etwa Zahlen)
- **kulturabhängig** (Grün steht in China für Tod. Bei abstrakten Symbolen sind Standards sehr wichtig.)
- mächtige, flexible Werkzeuge (z. B. Mathematik)
- schnell entwickelbar (Neue Symbole können sich in wenigen Jahrzehnten weltweit durchsetzen)

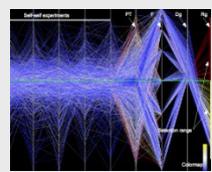
$$\chi \propto \int_1^{\infty} \omega \oint_{\lambda} \left\| \frac{\Pi \lambda}{\oint \Psi} \right\|$$



2.1 Semiotik

Zentrale Frage: Verwendet Visualisierung beliebige **abstrakte Symbole**?

- **Wenn ja**, dann sind letztlich alle Visualisierungen gleichwertig, sofern die benutzten Bilder/Symbole hinreichend gut gelernt sind
- **Wenn nein**, so bleibt Frage nach einem Maß für die Ähnlichkeit von Symbol und Objekt



2.1 Semiotik

Annahme in der Visualisierung (implizit oder explizit):

Wahl der Symbole nicht beliebig

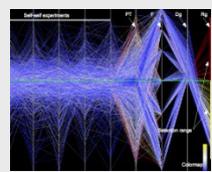
Vermutete Gründe

- Gesellschaftliche Konventionen
- Biologisch vorgegebene Wahrnehmungsstrukturen im Gehirn

Beispiel:

- Vermutung: Bei Kantenextraktion bei einem Bild und bei einem Objekt in der realen Umgebung werden gleiche Mechanismen im Gehirn aktiviert.
- Aber: Bei abstrakten Bildern und Diagrammen große Unterschiede zwischen Bild und Objekt (gerade in Visualisierung wichtig)

Bemerkung: Häufig werden abstrakte und sensorische Symbole gleichzeitig verwendet.



2.1 Semiotik

Verwandte Disziplinen insbesondere zur Untersuchung sensorischer Symbole

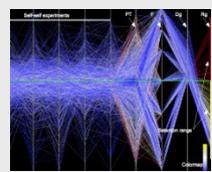
Psychophysik: Übertragung physikalischer Messprinzipien auf menschliche Wahrnehmung, z.B. zum Festlegen kleinster wahrnehmbarer Helligkeitsunterschiede

Kognitive Psychologie: Betrachtung des Gehirns als Verband von Zentren mit festen Aufgaben; Häufig wird mit Messungen auf Basis der Magnetresonanztomographie (MRT) gearbeitet

Strukturelle Analyse: Einfache Handlung von Versuchspersonen zusammen mit Interviews zu Wahrnehmung und Verständnis sollen schnell Hypothesen zu Vorgängen im Gehirn liefern. Leider ergeben sich mehr Beschreibungen als Erklärungen.

Interkulturelle Studien: Ein offensichtlicher Ansatz, den die modernen, globalen Medien zunehmend unmöglich machen.

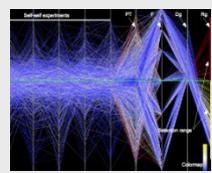
Studien an Kleinkindern



2.1 Semiotik

Verwandte Disziplinen insbesondere zur für das Studium
abstrakter Symbole

Methoden der Anthropologie

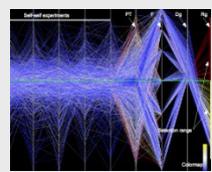


2.2 Optische Wahrnehmung

Unser Ziel: Wahrnehmung und visuelle Informationsverarbeitung besser zu verstehen

Mehrere Theorien und Modelle existieren und umfassen

- Physiologie
- Kognitive Psychologie

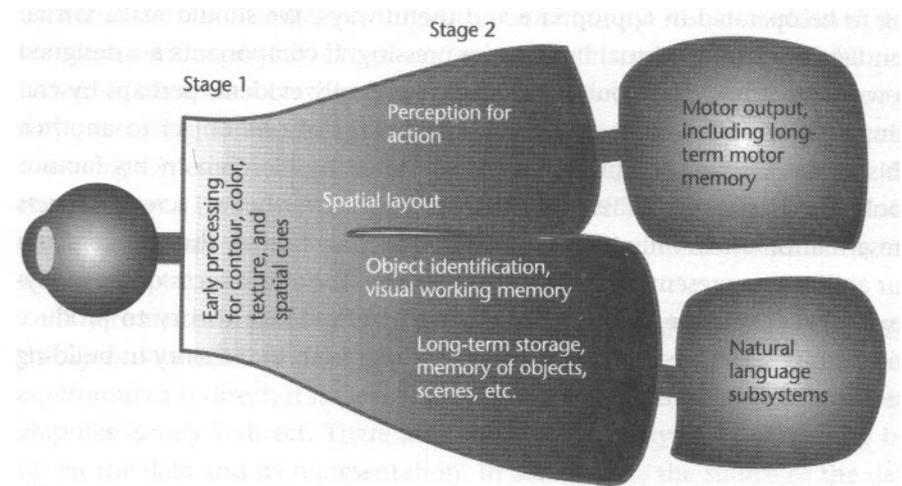


2.2 Optische Wahrnehmung

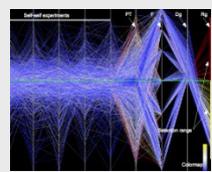
2.2.1 Ein (einfaches) Modell für Wahrnehmungsprozesse

Zweistufiger Wahrnehmungsprozess [Ware, 2004]

- parallelen Prozess, der uns erlaubt, elementare Eigenschaften der Szene zu extrahieren (z. B. Farbe, Form, Texture, räumliche Attribute)
- Sequentiell zielgerichtete Objektidentifikation welche visuelle Aufmerksamkeit und eine aktive Rolle erfordert



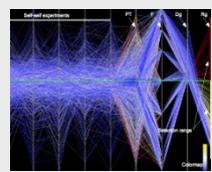
[Ware, 2004]



2.2 Optische Wahrnehmung

Stufe 1 - Low Level:

- schnelle parallele, fokusunabhängige Suche nach elementaren Merkmalen (Kanten, Orientierungen, einheitliche Farbe, Textur, Bewegungsmuster)
- Felder von Neuronen arbeiten parallel
- schnell ablaufenden, unbewussten Vorgang
- Informationen werden transitorisch, vorübergehend im “ikonischen Speicher” gehalten
- Bottom-up Ansatz, daten-gesteuerte Modell der Verarbeitung
- Oft “pre-attentive” Verarbeitung genannt

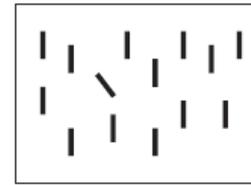


Präattentive Wahrnehmung

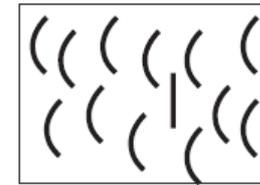
Einige präattentive Reize sind

- Form: Orientierung, Länge und Breite von Linien, Größe, Krümmung
- Farbe: Farbton, Intensität
- Bewegung: Flackern, Bewegungsrichtung
- Räumliche Position

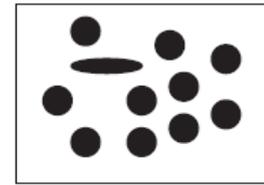
Orientation



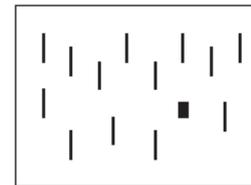
Curved/straight



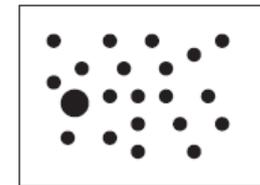
Shape



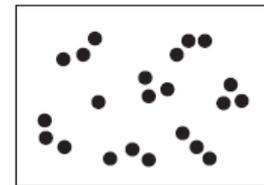
Shape



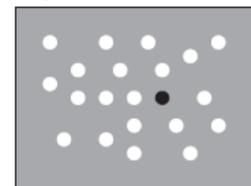
Size



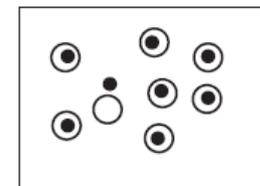
Number



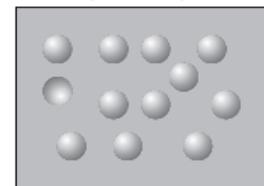
Gray/value



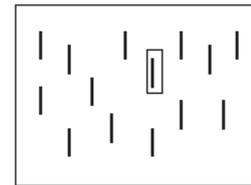
Enclosure



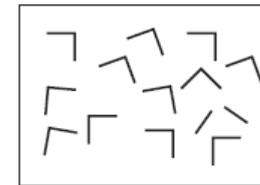
Convexity/concavity



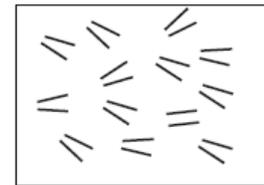
Addition

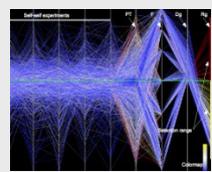


Juncture



Parallelism



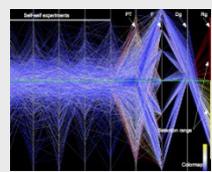


2.2 Optische Wahrnehmung

Beispiele pre-attentiver Verarbeitung

Wieviele 3er Ziffern sind vorhanden?

1281768756138976546984506985604982826762
9809858458224509856458945098450980943585
9091030209905959595772564675050678904567
8845789809821677654876364908560912949686

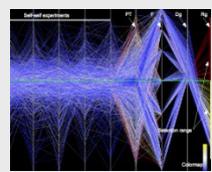


2.2 Optische Wahrnehmung

Beispiele pre-attentiver Verarbeitung

Wieviele 3er Ziffern sind vorhanden?

12817687561**3**8976546984506985604982826762
980985845822450985645894509845098094**3**585
90910**3**0209905959595772564675050678904567
8845789809821677654876**3**64908560912949686

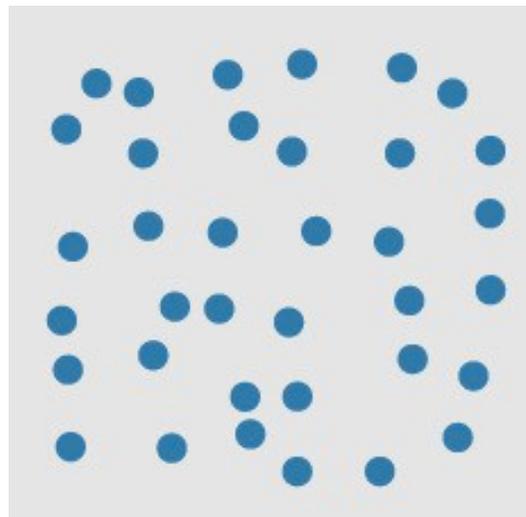
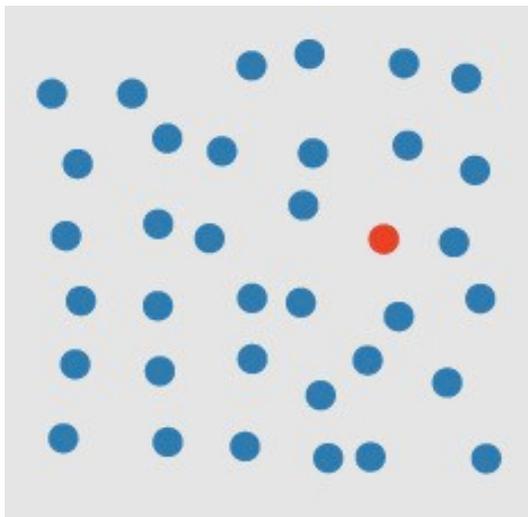


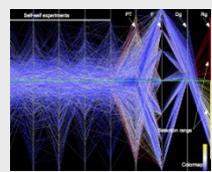
2.2 Optische Wahrnehmung

Beispiele pre-attentiver Verarbeitung

Farbe

Ist ein roter Kreis im Bild vorhanden?



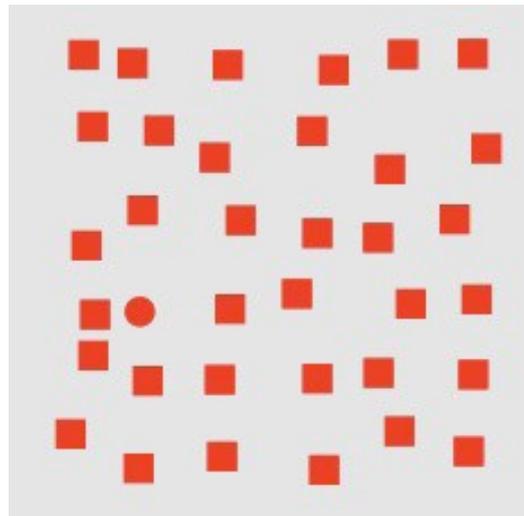
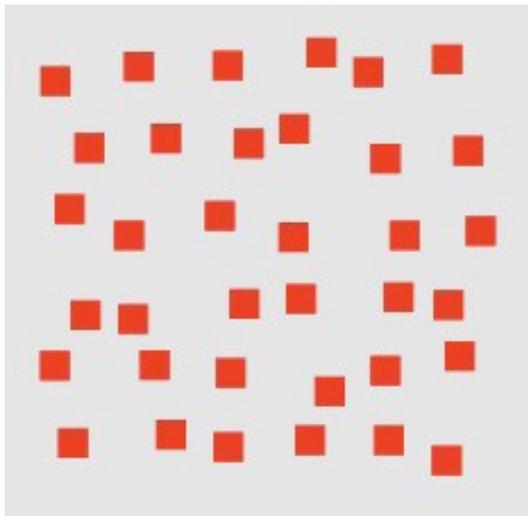


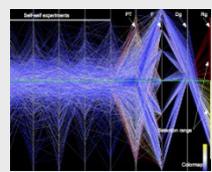
2.2 Optische Wahrnehmung

Beispiele pre-attentiver Verarbeitung

Form

Ist ein roter Kreis im Bild vorhanden?

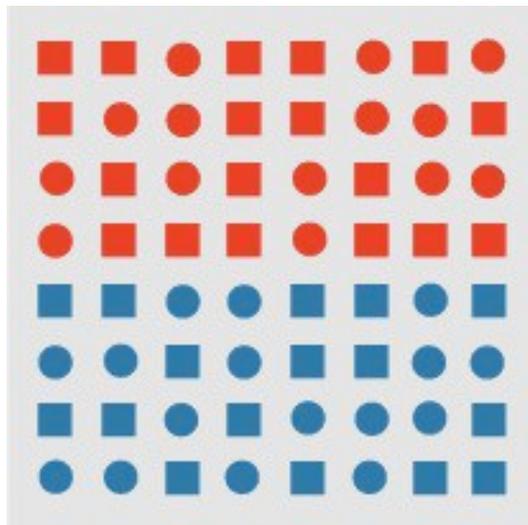


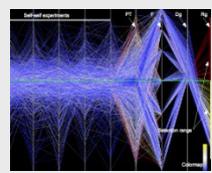


2.2 Optische Wahrnehmung

Beispiele pre-attentiver Verarbeitung

Segmentierung



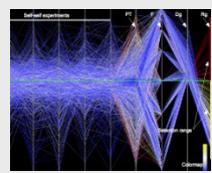


2.2 Optische Wahrnehmung

Beispiele pre-attentiver Verarbeitung

Diese und weitere Beispiele sowie Selbsttest unter:

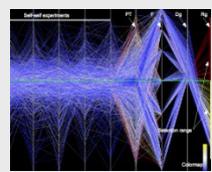
- <http://www.csc.ncsu.edu/faculty/healey/PP/index.html>



2.2 Optische Wahrnehmung

Stufe 2 - High Level:

- Teilung in Objekterkennung (Kooperation mit Sprachzentrum) und handlungsorientierte Wahrnehmung (Verbindung zum motorischen Zentrum)
- langsame, serielle Bearbeitung
- Nutzung von Kurzzeit- und Langzeitgedächtnis
- Stärkere Betonung abstrakter Symbole
- Top-Down Ansatz

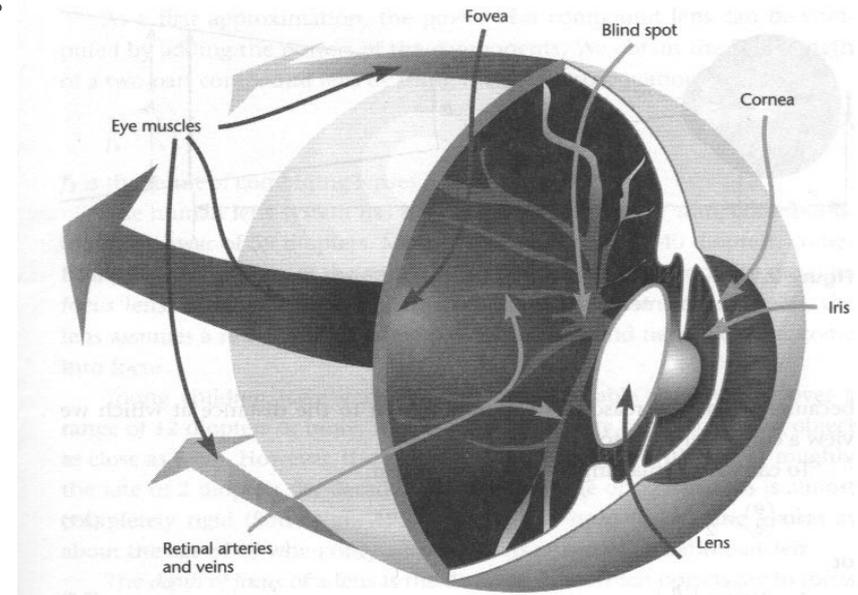


2.2 Optische Wahrnehmung

2.2.3 Auge

Aufbau des Auges spielt große Rolle.

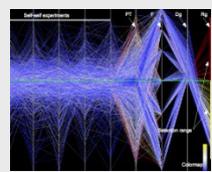
Hier: Funktion und Grenzen



Retina-Input wird nicht bewusst wahrgenommen!

- z. B. realistische Portraits schwierig

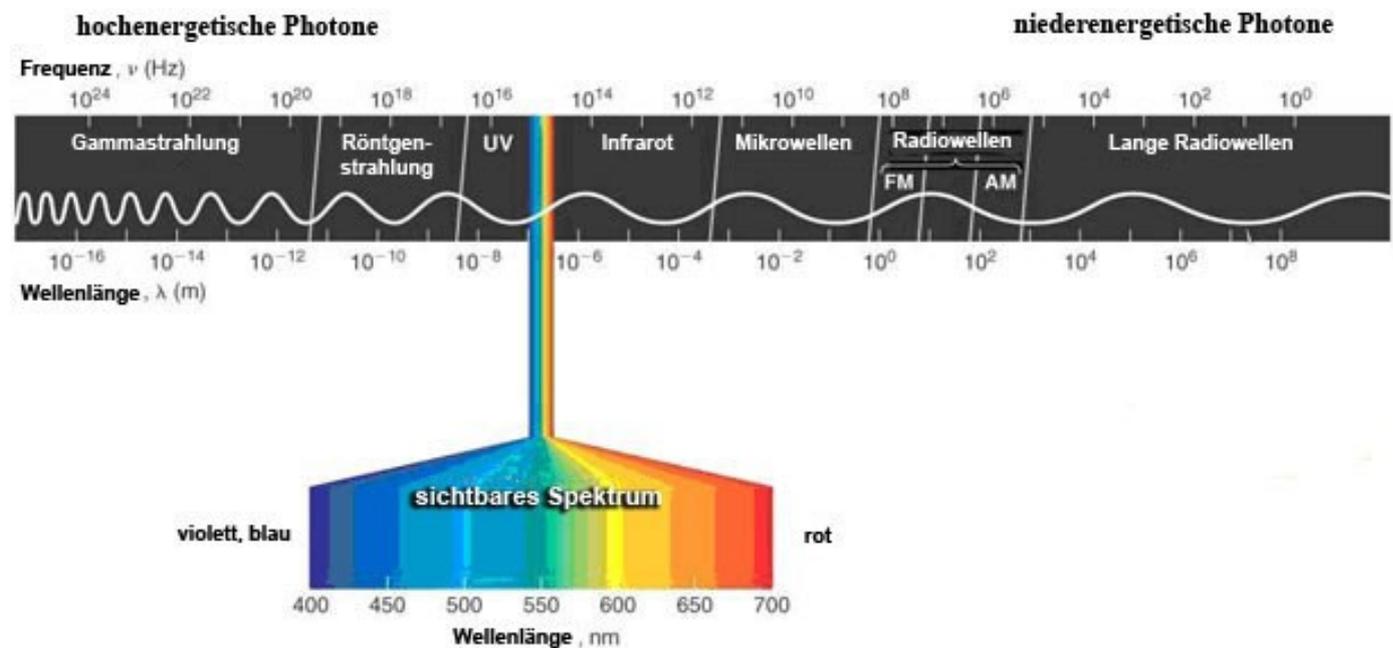
[Ware, 2004]

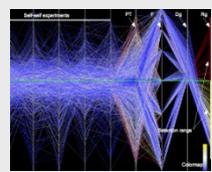


2.2 Optische Wahrnehmung

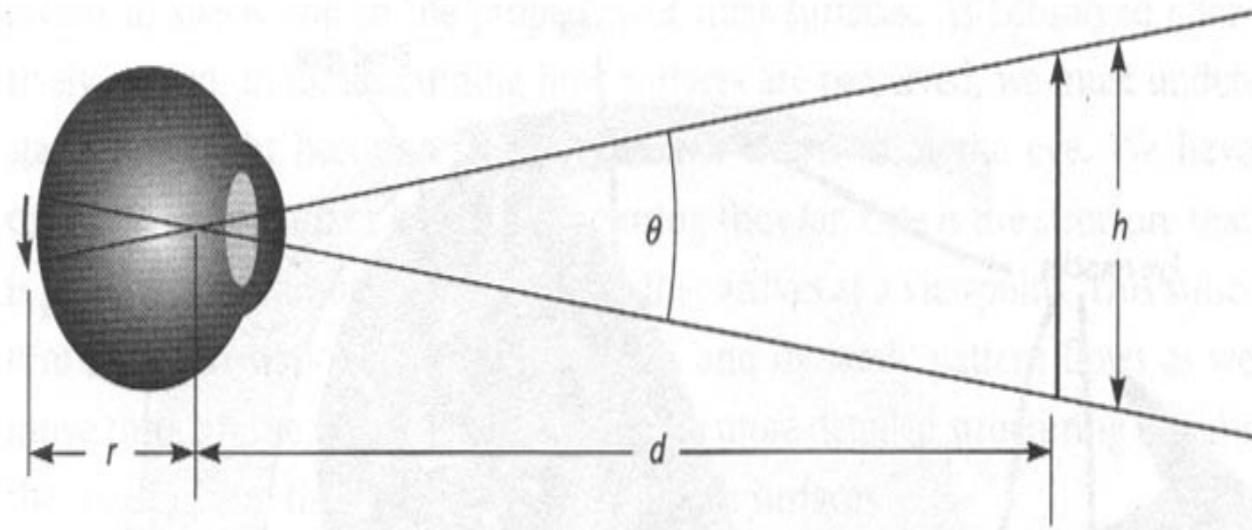
Licht und das sichtbare Spektrum

- Das **sichtbare Lichtspektrum** (400 – 700 nm) ist ein kleiner Teil des elektromagnetischen Spektrums.
- Manche Tiere können zusätzlich noch im Infrarotbereich sehen (Schlangen) oder ultraviolettes Licht wahrnehmen (Insekten).





2.2 Optische Wahrnehmung



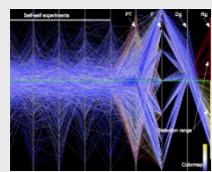
[Ware, 2004]

Sichtwinkel

Winkel, den Objekt im Auge des Betrachters einnimmt
Wichtig bei Beurteilung der Grenzen der Leistungen des Auges.

Es gilt

$$Q = 2 \arctan \left(\frac{h}{2d} \right)$$



2.2 Optische Wahrnehmung

Linse

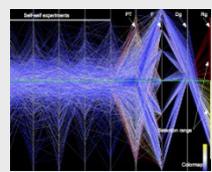
Für die **Linse** gilt $\frac{1}{f} = \frac{1}{d} + \frac{1}{r}$ mit der **Brennweite f**.

Stärke einer Linse $\frac{1}{f}$ wird in Dioptrie angegeben.

Komposition von Linsen $\frac{1}{f_3} = \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_1}$

Menschliche Auge hat Brennweite von, $\frac{1}{f_3} = \frac{1}{0.017}$ von dem

- $\frac{1}{f_1} = 40$ durch die Hornhaut erzeugt werden
- Rest $\frac{1}{f_2} = 19$ durch variable Fokuslinse



2.2 Optische Wahrnehmung

Schärfentiefebereich

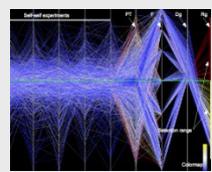
Wesentlicher fokussierter Bereich

Bei einer 3 mm Pupille:

Für Fokus bei **d** gilt dann $\left[\frac{3d}{d+3}, \frac{-3d}{d-3} \right] (d \leq 3\text{m})$ als fokussiert.

Viewing Distance	Near	Far
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	Infinity

- VR-Systemen können **fokussierte Objekte scharf** und andere unscharf darstellen.
- **Erhöht Konzentration** auf bestimmte Objekte, stellt Tiefe realistischer dar.
- **Erfordert Messung** des Fokuspunktes der Augen!



2.2 Optische W

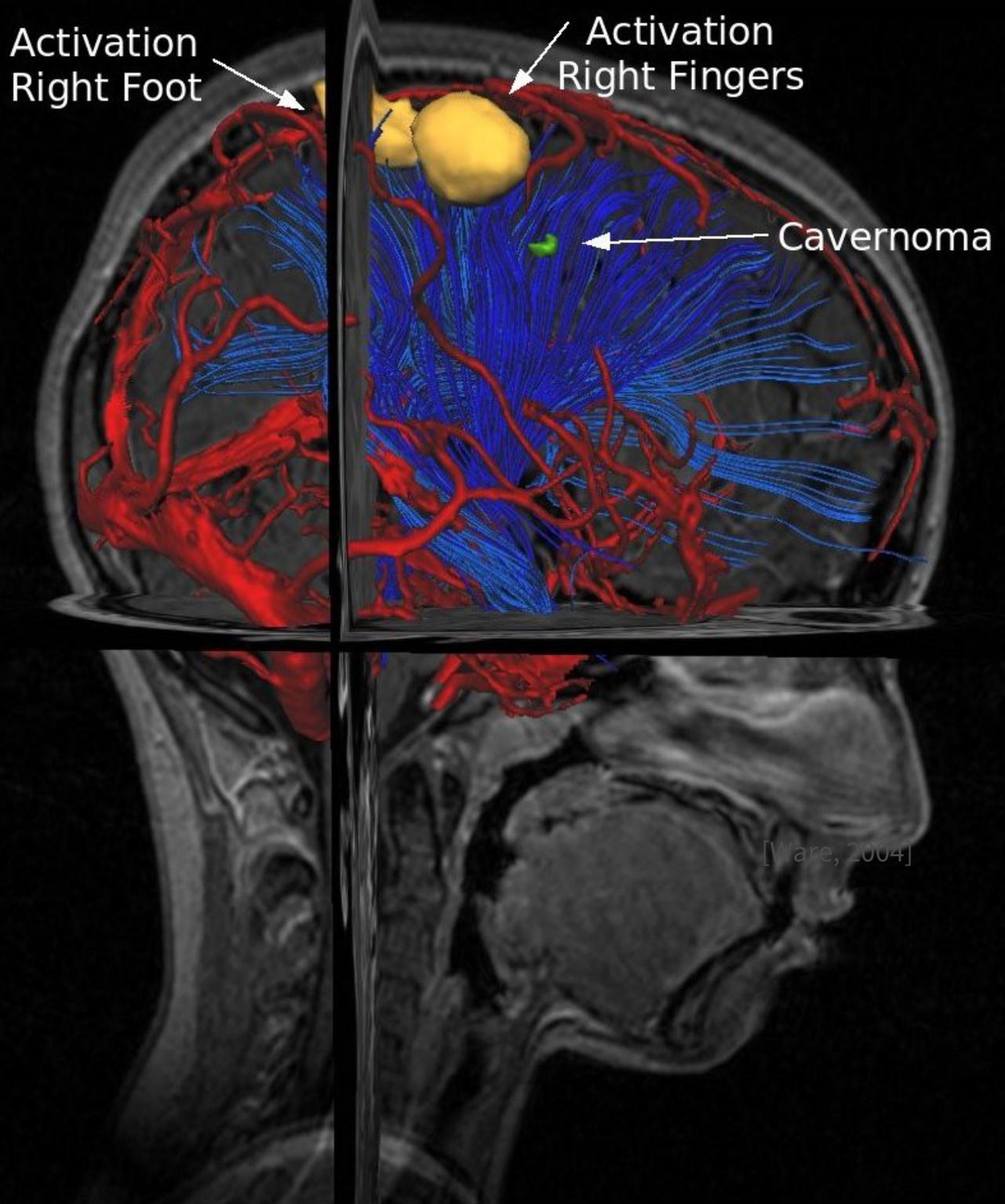
Farbabweichung (Ab

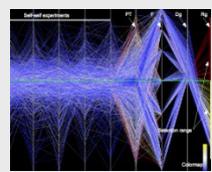
Farben werden im Auge
Um Rot (~480 nm) und
zu brechen, wird **Korrektur**
benötigt.

Daher erscheint **blauer**
Grund neben weißem o
unscharf

60% der Menschen ersch
keinen Unterschied.

- Tipp: Blauer Hirn
Vordergrund rü





2.2 Optische Wahrnehmung

Farbabweichung (Aberration/Dispersion)

Farben werden im Auge unterschiedlich gebrochen.

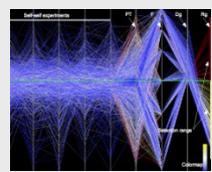
Um Rot (~480 nm) und Blau (~640 nm) gleich zu brechen, wird **Korrektur von 1,5 Dioptrien** benötigt.

Daher erscheint **blauer Text auf schwarzem**

Grund neben weißem oder rotem Text unscharf

Verwende deshalb nie rote Schrift auf blauem Hintergrund

oder blaue Schrift auf rotem Hintergrund!



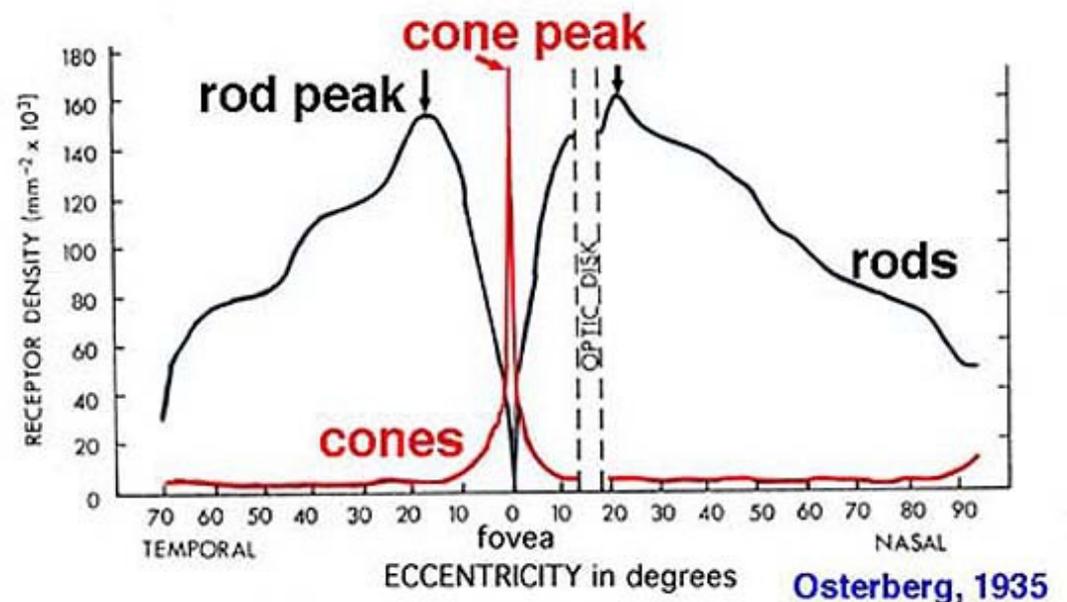
2.2 Optische Wahrnehmung

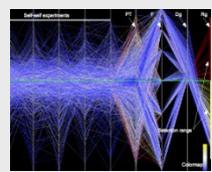
Rezeptoren

100 Millionen Stäbchen und 6 Millionen Zapfen

Zapfen tragen primär am Tag zur Wahrnehmung bei Fovea:

- 100 000 Zapfen konzentrieren sich nahe dem Zentrum der Retina
- 2 Grad Feld mit etwa 20 Bogensekunden Abstand





2.2 Optische Wahrnehmung

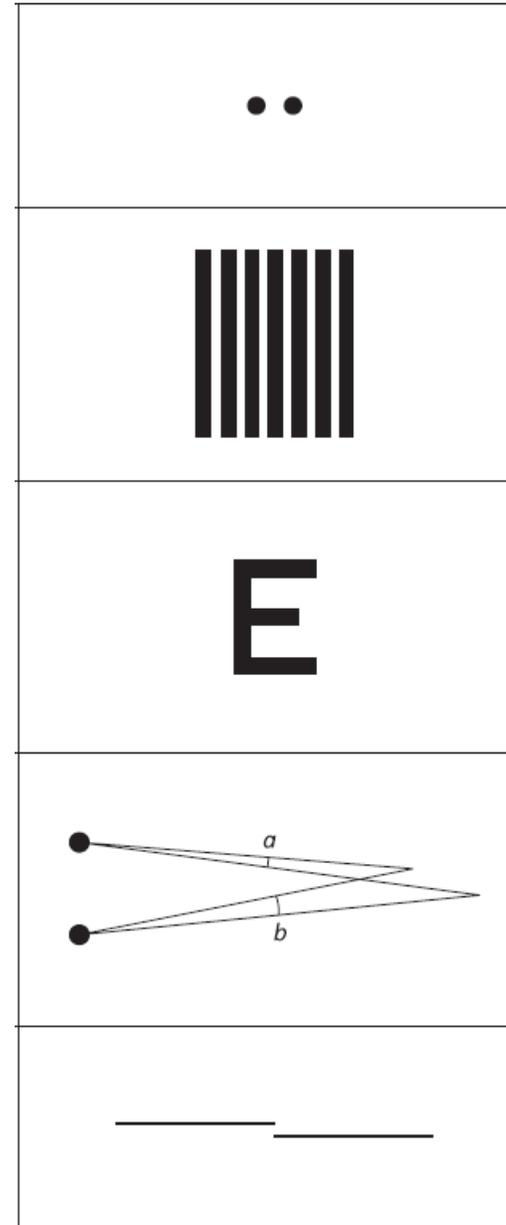
[Ware, 2004]

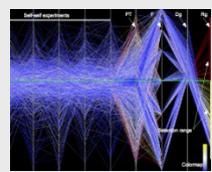
Sehschärfe

Genauigkeit des menschlichen Sehens in zahlreichen **psychophysikalischen Tests** untersucht.

Wichtige Grenzen sind::

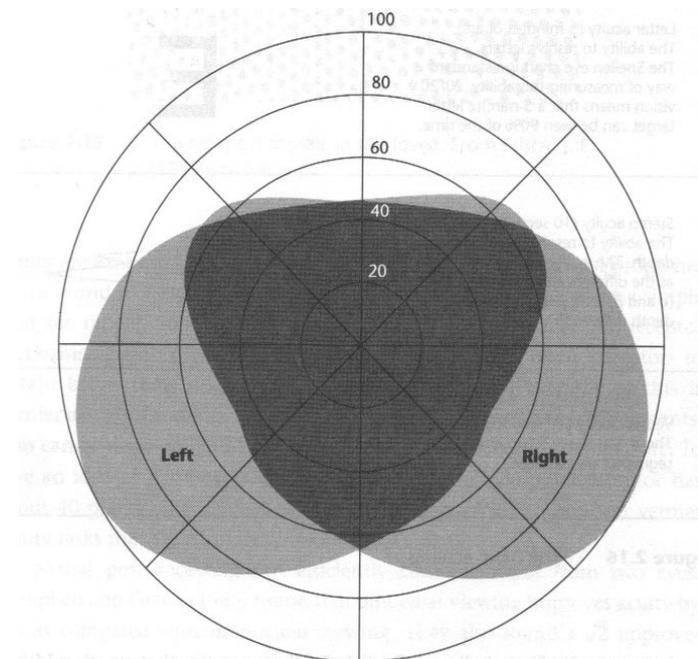
- Punktschärfe: Zwei benachbarte Punkte werden separat wahrgenommen (1 Bogenminute = $1/60^\circ$).
- Gitterschärfe: Ein Balkenmuster wird als solches wahrgenommen und nicht als graue Fläche (1-2 Bogenminuten).
- Buchstabenschärfe: Ein Buchstabe ist erkennbar (5 Bogenminuten).
- Stereoschärfe: Wahrnehmung von Objekten in räumlicher Tiefe (10 Bogensekunden).
- Vernierschärfe: Fähigkeit zu Bestimmen, ob zwei Liniensegmente kollidieren (10 Bogensekunden entspr. 1/10 Pixel).





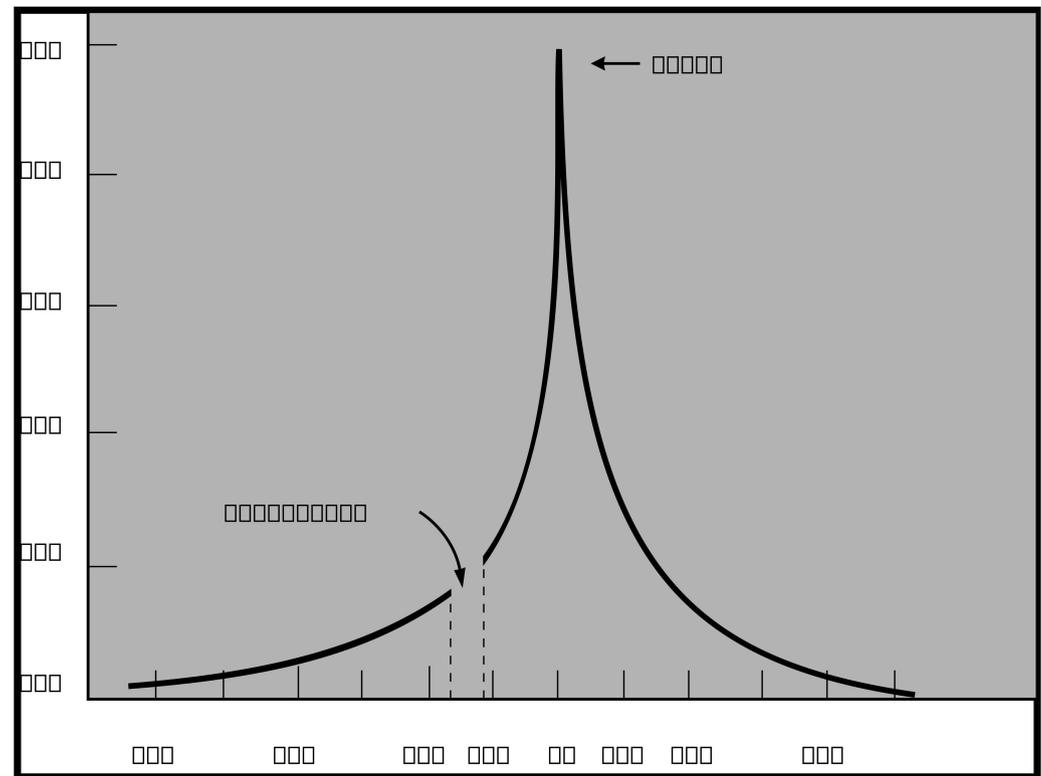
2.2 Optische Wahrnehmung

Sehschärfe ist aufgrund der Verteilung der Zapfen sehr unregelmäßig

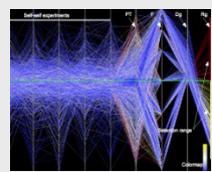


Blickfeld der beiden Augen

[Ware, 2004]



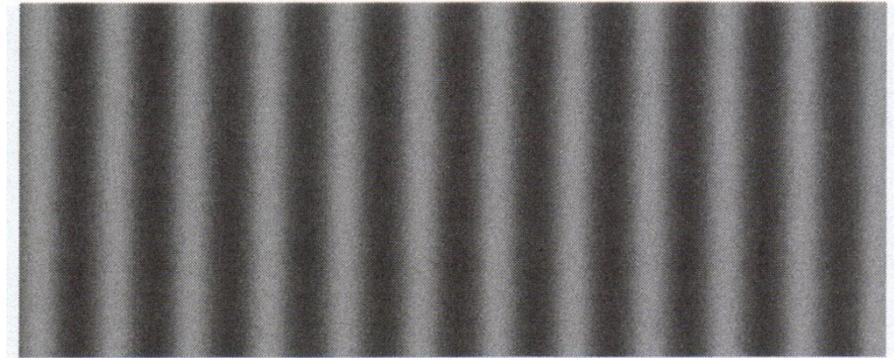
Sehschärfe



2.2 Optische Wahrnehmung

Räumlicher Kontrast

Kontrastwahrnehmung wird mit Hilfe eines Sinusmusters untersucht.



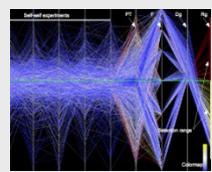
Es wird mittels $L = 0.5 + \frac{a}{2} \sin\left(\frac{2\pi x}{\omega} + \frac{\phi}{\omega}\right)$

[Ware, 2004]

bestimmt, wobei a die Amplitude, ϕ die Phasenverschiebung, ω die Wellenlänge, L die Helligkeit und x die Position bezeichnen.

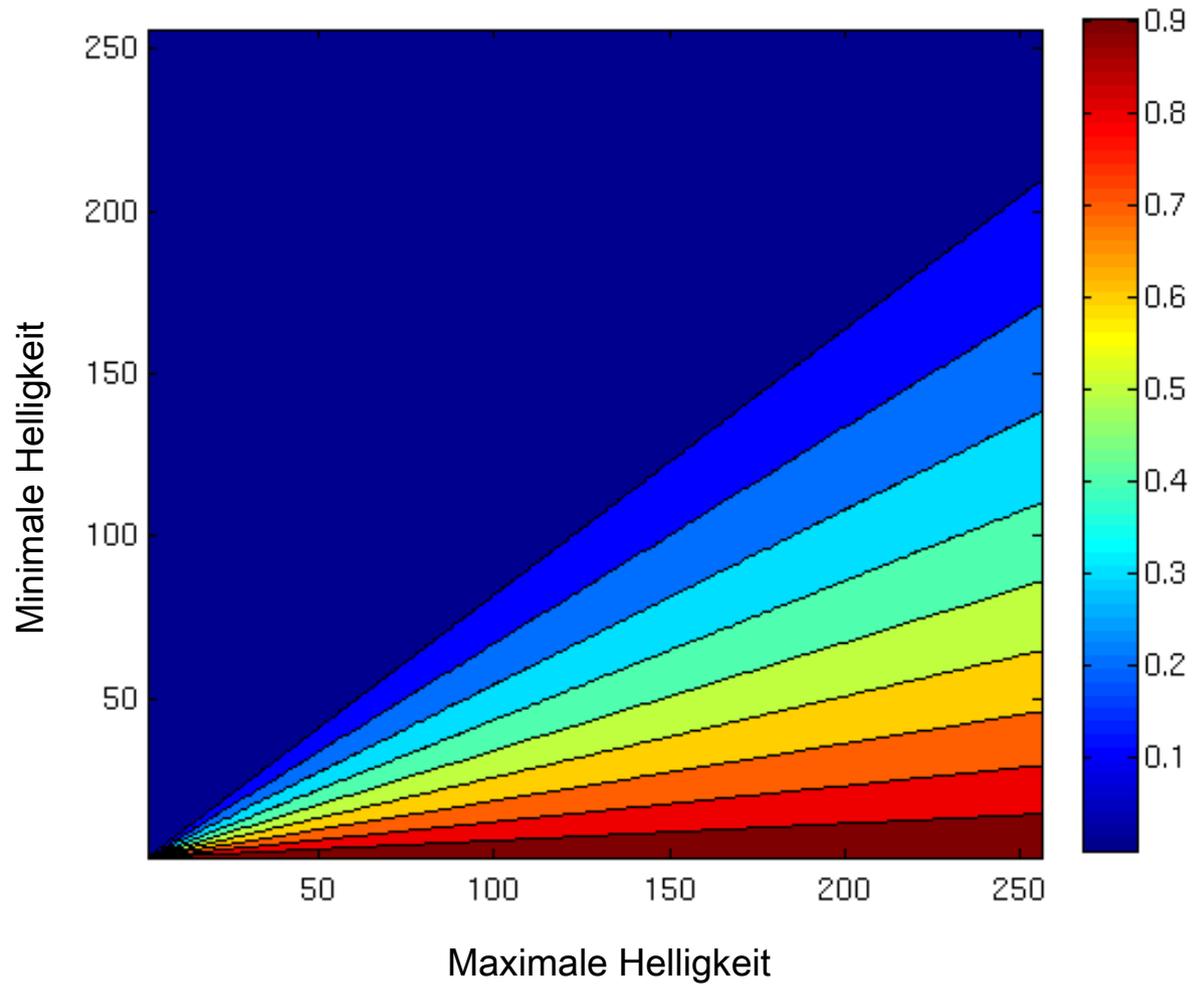
Als Kenngröße benötigt man den Kontrast

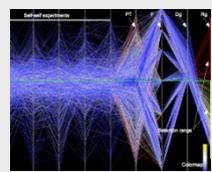
$$C := \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}}$$



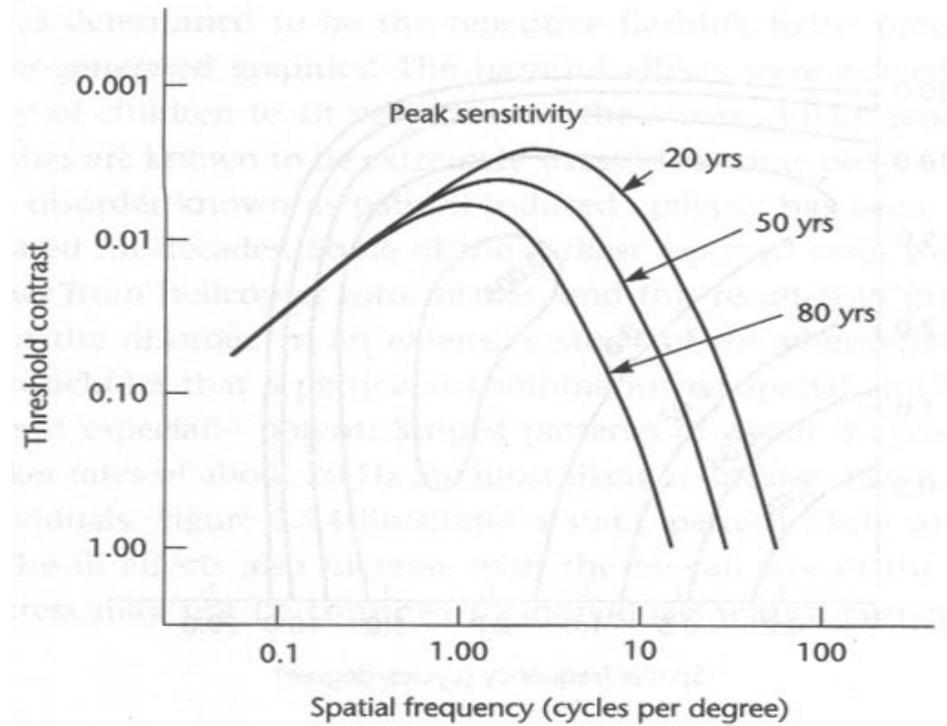
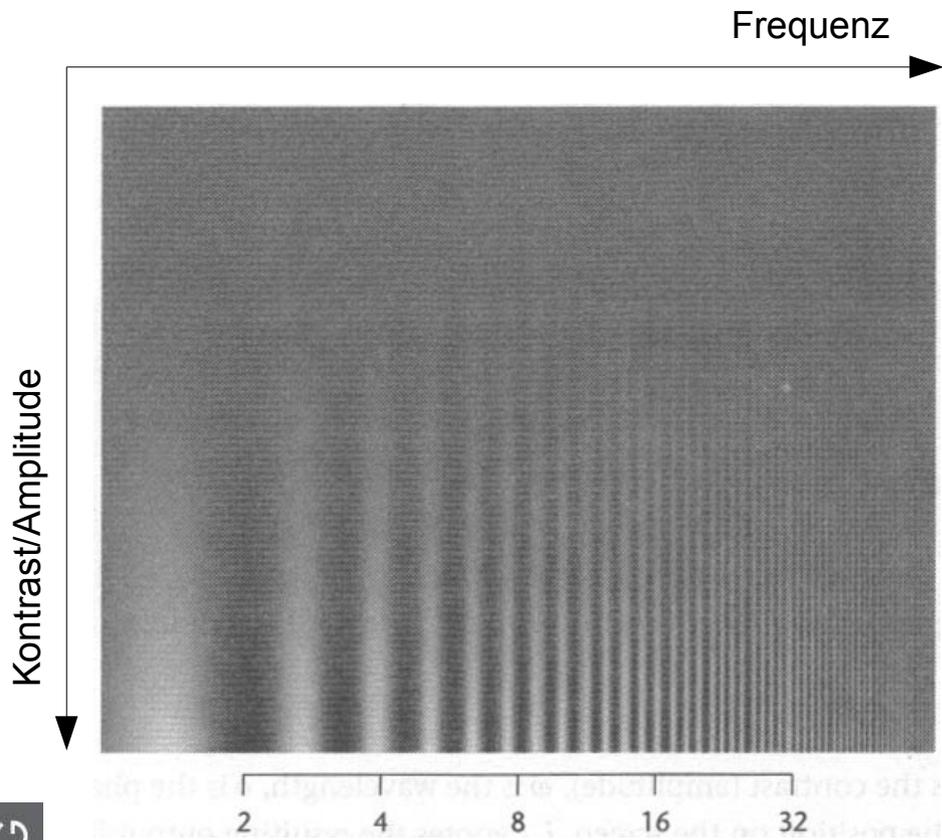
2.2 Optische Wahrnehmung

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

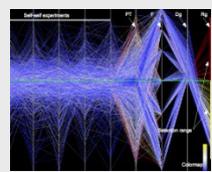




2.2 Optische Wahrnehmung



[Ware, 2004]



2.2 Optische Wahrnehmung

Optimales Display

Aktuelle Monitore (~1000 X 1000) haben etwa 35 Pixel/cm.

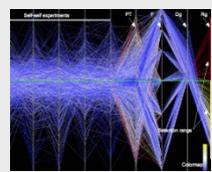
- also max. 40 Zyklen/Grad in üblicher Entfernung vom Monitor.

In der Fovea besitzt der Mensch etwa 180 Rezeptoren/Grad

- (Durch Kombination der Information mehrere Sinneszellen können Menschen teilweise sogar noch feinere Details wahrnehmen)
- Optimal sollten ca. **4000 X 4000 Pixel** (= 16 Mio Pixel) sein.

Antialiasing kann helfen Probleme einer (zu) niedrigen Auflösung zu überwinden.

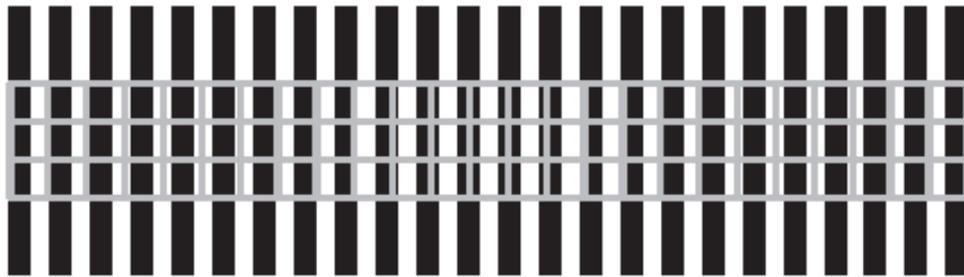
Drucker nutzen zwar 1200 dpi (460 Punkte/cm), dies dient jedoch vor allem der Vermeidung von Aliasing-Effekten und der korrekten Darstellung von Graustufen (Reduktion der Auflösung um mindestens Faktor 10).



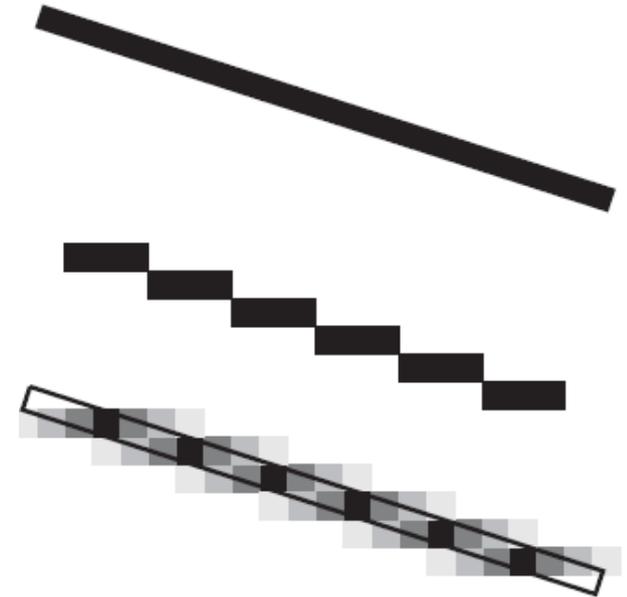
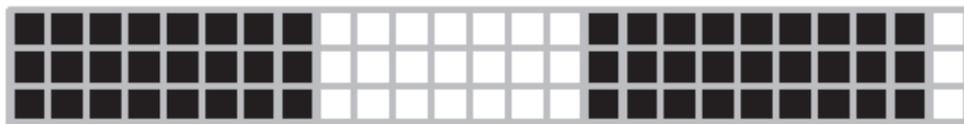
2.2 Optische Wahrnehmung

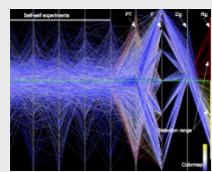
Antialiasing

Input pattern



Output pattern





2.2 Optische Wahrnehmung

Visueller Stress

- kann durch verschiedene visuelle Stimuli ausgelöst werden, die in Raum oder Zeit Muster bilden

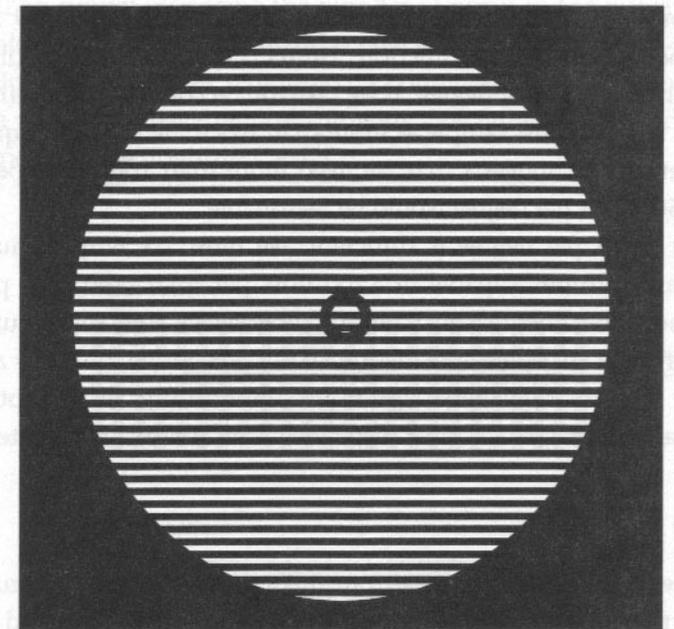
Beispiele

- Streifenmuster
- Schnelles wiederholtes Aufleuchten von grellen Lichtern
- Gleichmäßig bewegte Muster

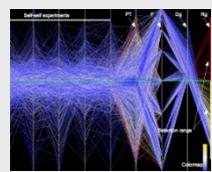
Symptome

- Übelkeit
- Probleme beim Lesen von Text (ähnliches Muster)
- epileptischen Anfälle

Warning! This pattern can cause seizures in some individuals.
If it causes you to feel ill effects, avoid looking at it.



[Ware, 2004]



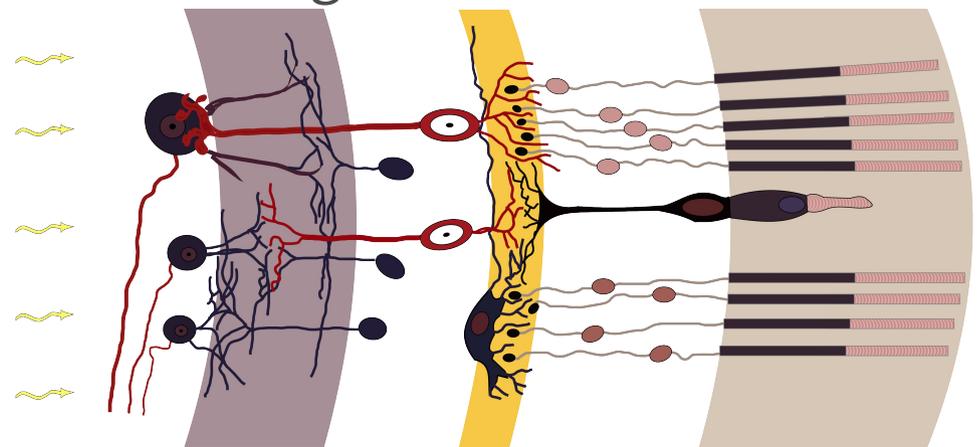
2.2 Optische Wahrnehmung

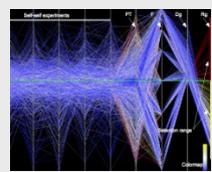
Wahrnehmung von Helligkeit

Die **Retina** besteht aus Photorezeptoren und mehreren Neuronenschichten. Jedes Neuron ist mit mehreren Komponenten der darunterliegenden Schicht verbunden, so dass jede Ganglionzelle permanent die gebündelte Information aus vielen Photorezeptoren in Form von Impulsen an das Gehirn weiterleitet (126 Mio. Rezeptoren, 1 Mio. Ganglienzellen)

Das **rezeptive Feld** einer Zelle ist der Bereich der Photorezeptoren, die Informationen an diese Zelle sendet. Bei Ganglionzellen ist das rezeptive Feld **rund**.

[wikipedia]



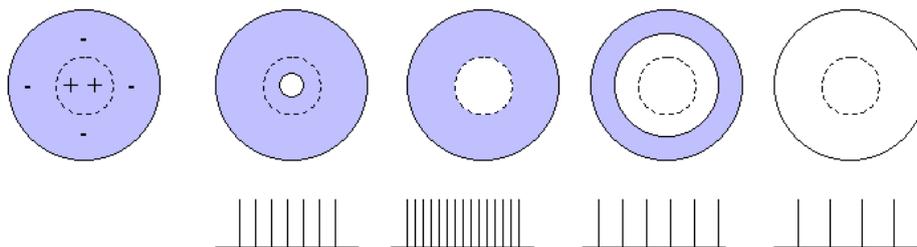


2.2 Optische Wahrnehmung

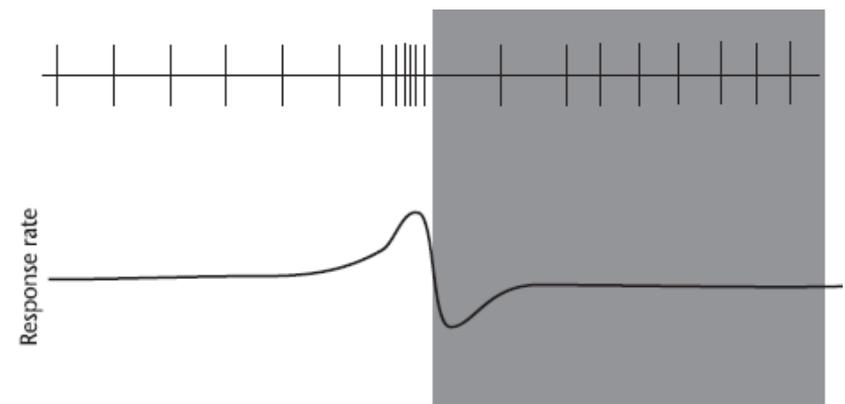
Wahrnehmung von Helligkeit

- Das **rezeptive Feld** wird in ein **Zentrum** und ein **Umfeld** unterteilt und man unterscheidet **On-Zentrum-Neurone** und **Off-Zentrum-Neurone**.

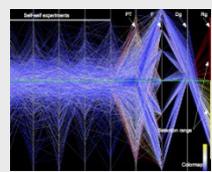
On-Zentrum-Neurone haben ein erregendes Zentrum und ein hemmendes Umfeld, bei Off-Zentrum Neuronen verhält es sich umgekehrt. Durch Erregung und Hemmung wird die Feuerrate des Neurons manipuliert.



Beleuchtung (weiß) und Feuerrate eines On-Zentrum-Neurons



Feuerrate beim Betrachten einer Kante



2.2 Optische Wahrnehmung

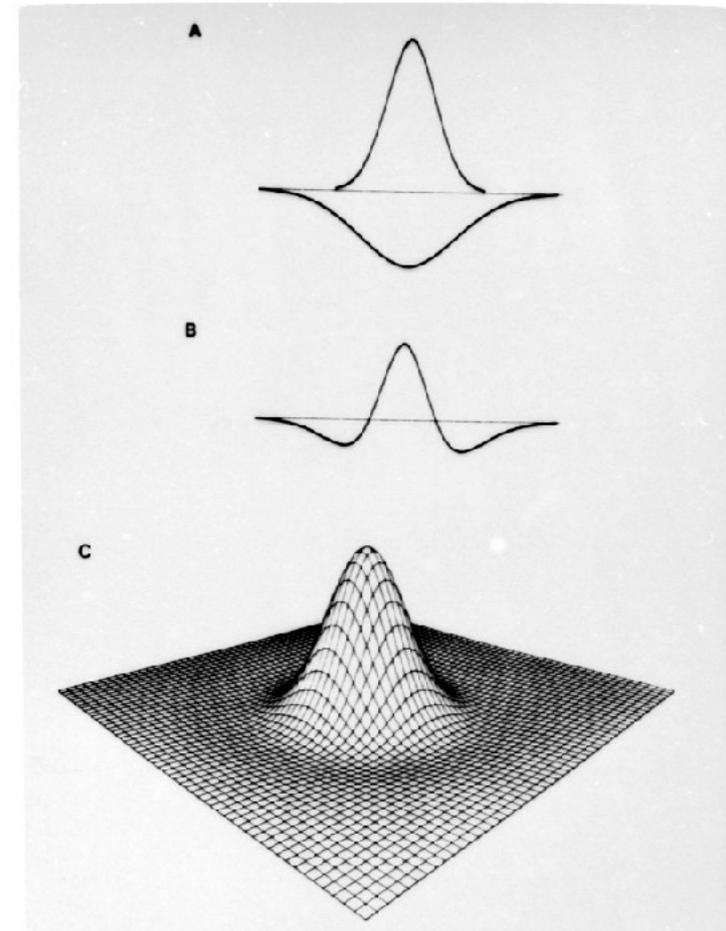
Wahrnehmung von Helligkeit

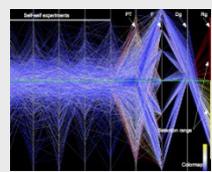
- Als **Modell für das konzentrische rezeptive Feld** dient in der Signalverarbeitung eine Differenz von Gaußverteilungen (DOG)

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

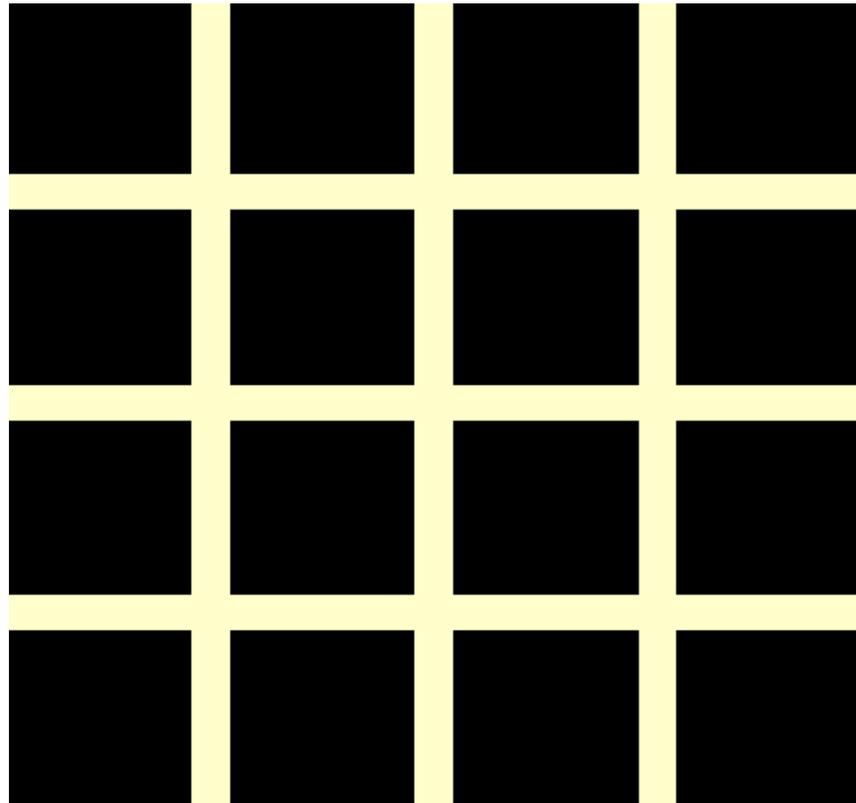
wobei α_1 die Verstärkung, α_2 die Abschwächung, w_1 die Breite des Zentrums, w_2 die Breite der Umgebung und x der radiale Abstand zum Mittelpunkt ist.

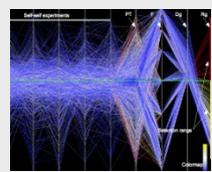
- Die Rezeptoren im Auge reagieren also auf **Differenzen** und messen **nicht exakte numerische Helligkeitswerte**.



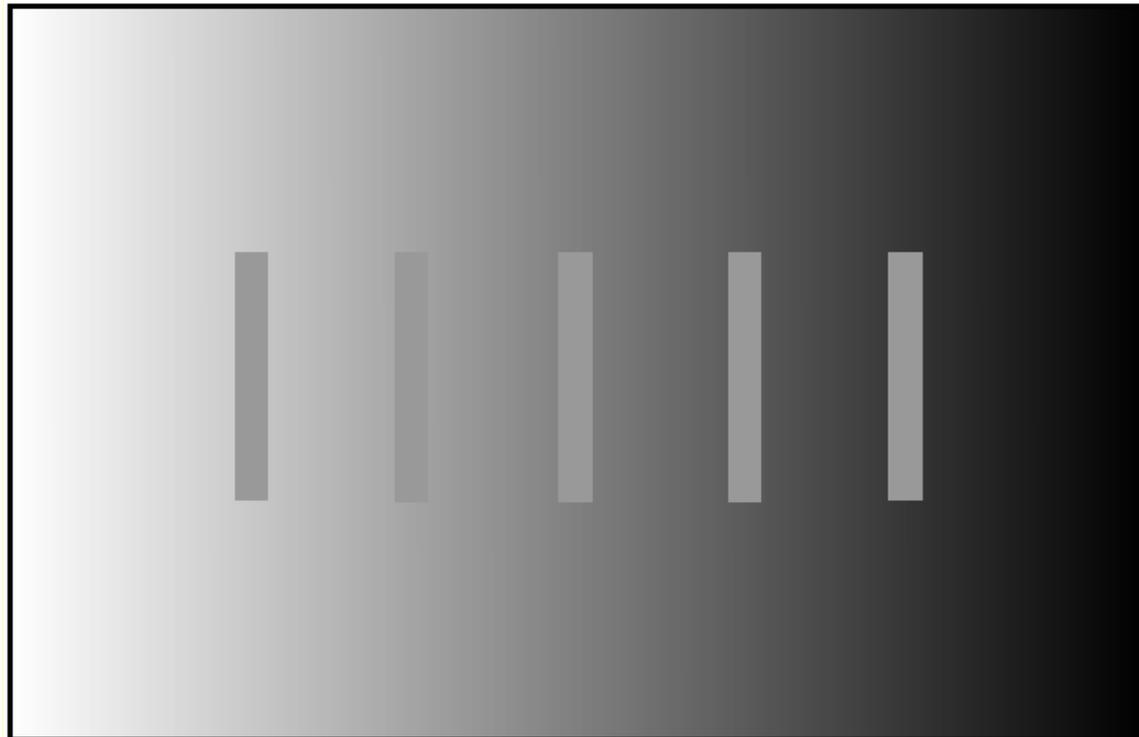


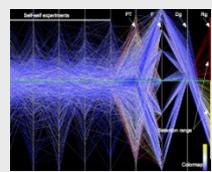
2.2 Optische Wahrnehmung





2.2 Optische Wahrnehmung





2.2 Optische Wahrnehmung

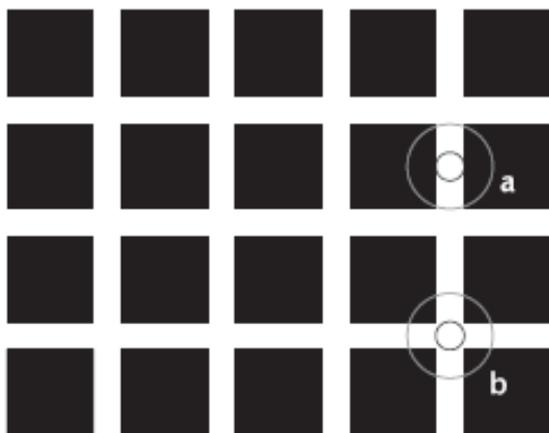
Mit diesem Modell lassen sich einige **optische Täuschungen** und **Effekte** erklären

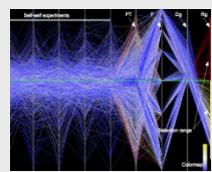
Hermann Gitter (links)

- Schwarze Punkte erscheinen an den Schnitten weißer Geraden.

Kontrast Illusion (rechts)

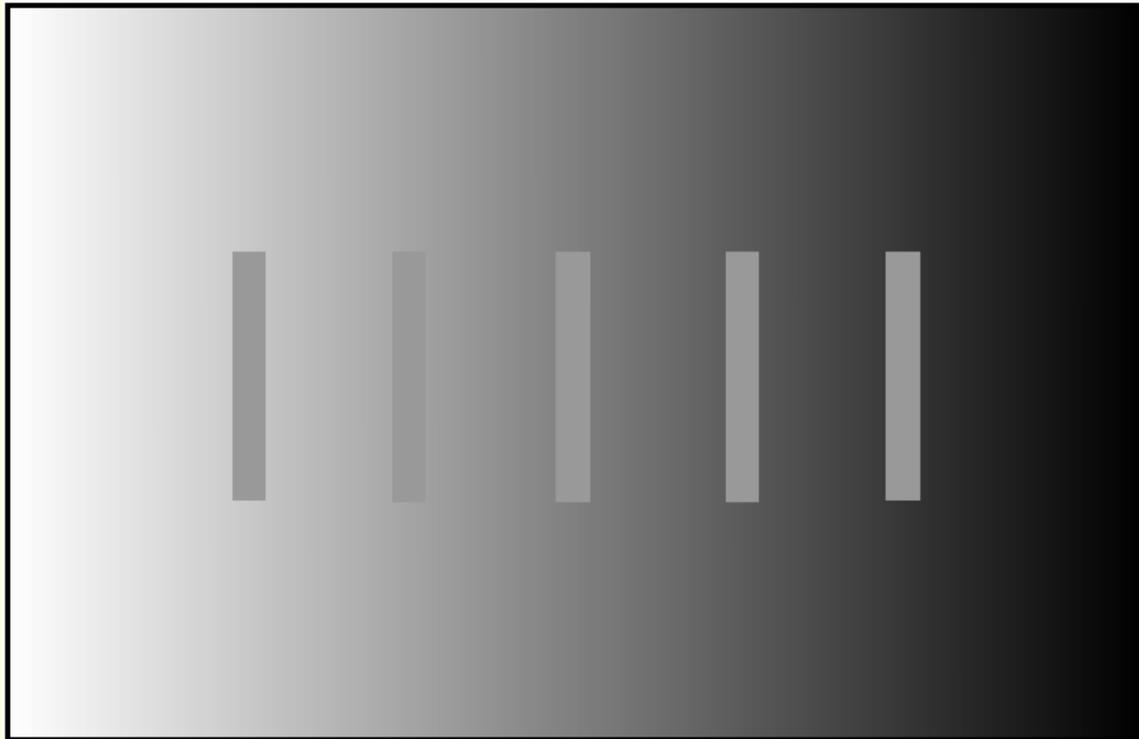
- Abhängig von der Hintergrundfarbe wird ein und derselbe Grauton unterschiedlich wahrgenommen.

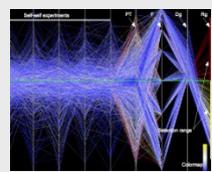




2.2 Optische Wahrnehmung

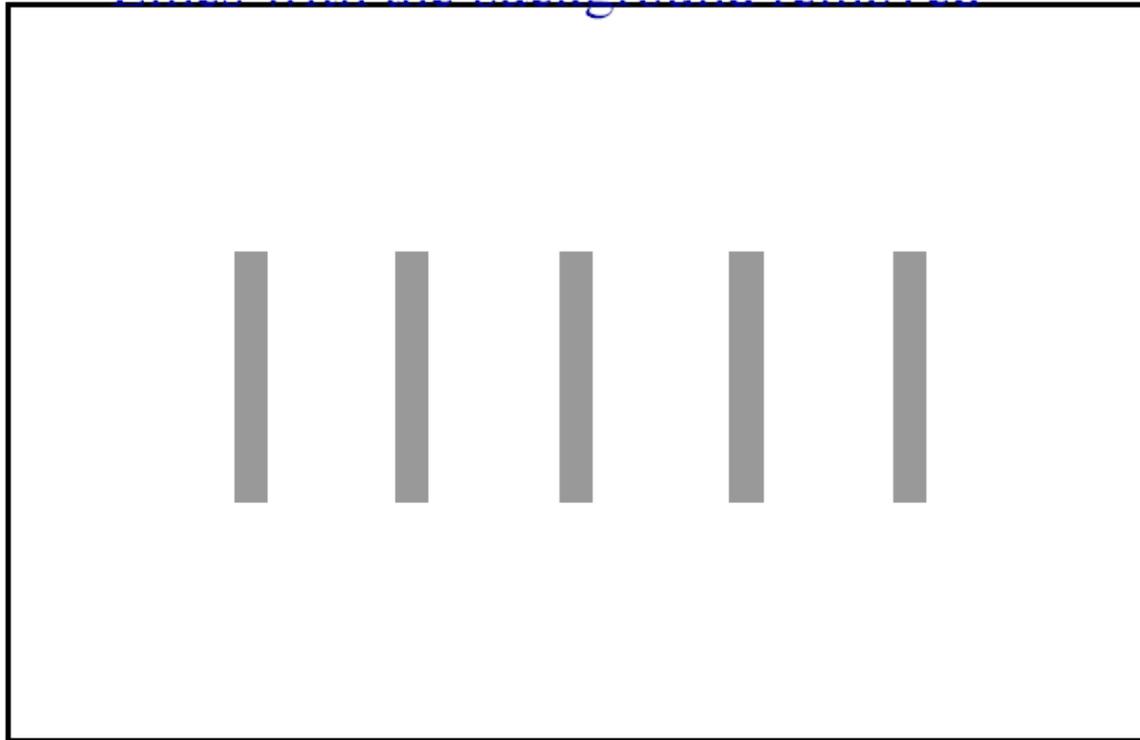
Optische Täuschung

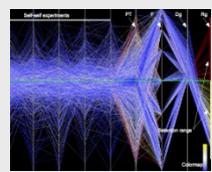




2.2 Optische Wahrnehmung

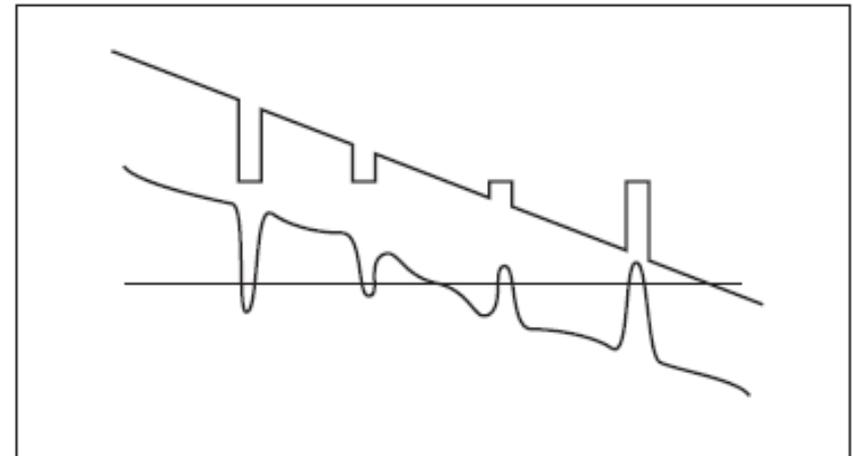
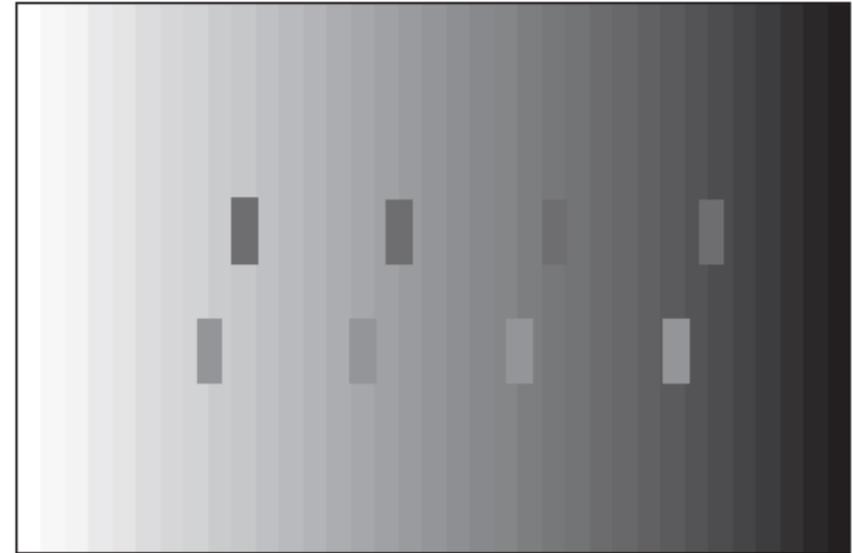
Optische Täuschung

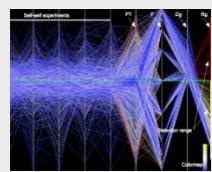




2.2 Optische Wahrnehmung

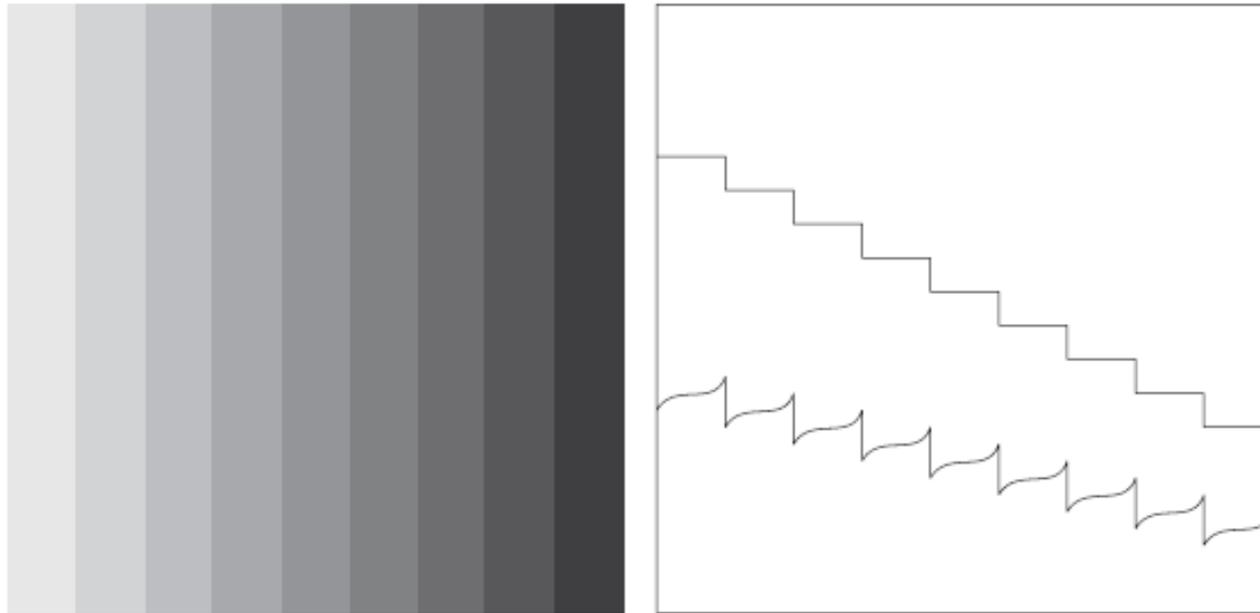
Optische Täuschung

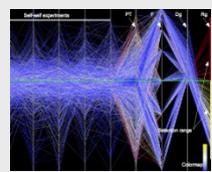




2.2 Optische Wahrnehmung

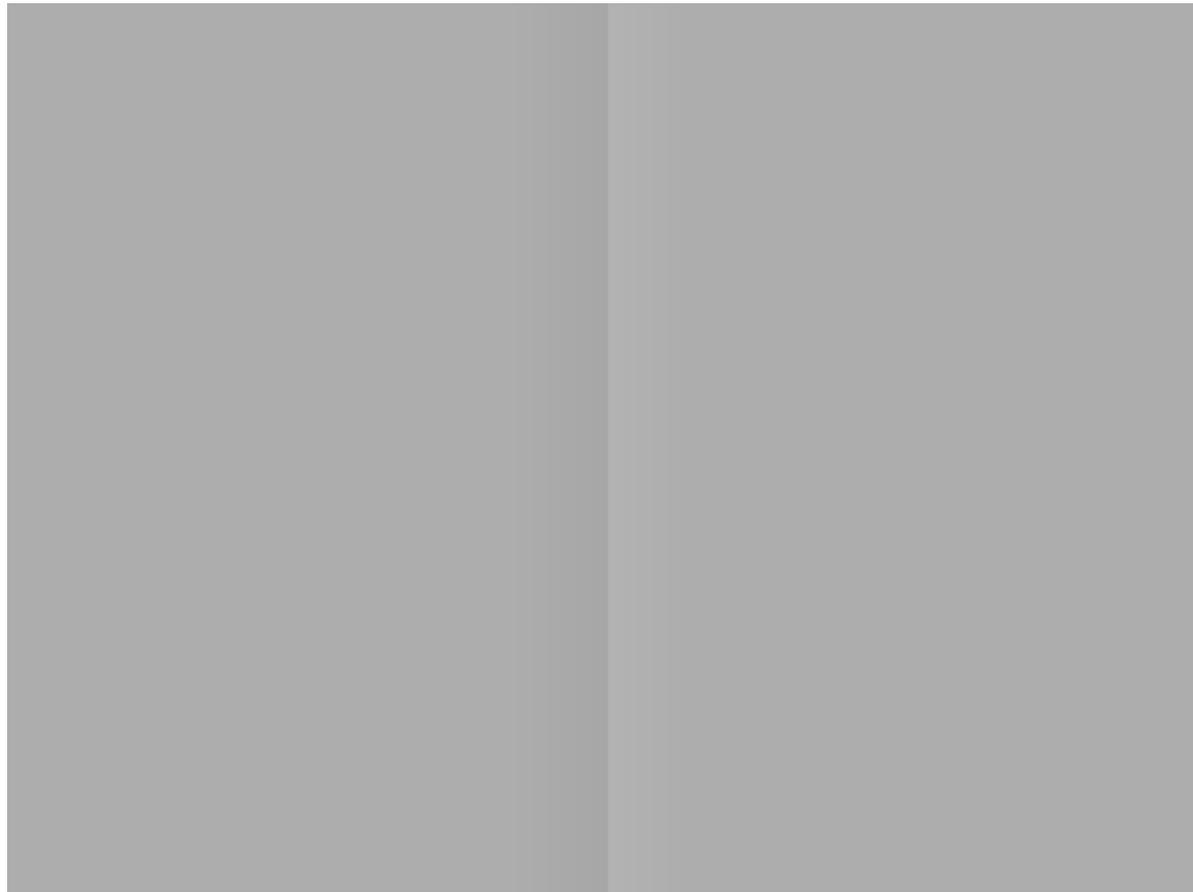
Weitere Effekte

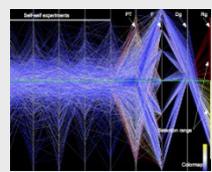




2.2 Optische Wahrnehmung

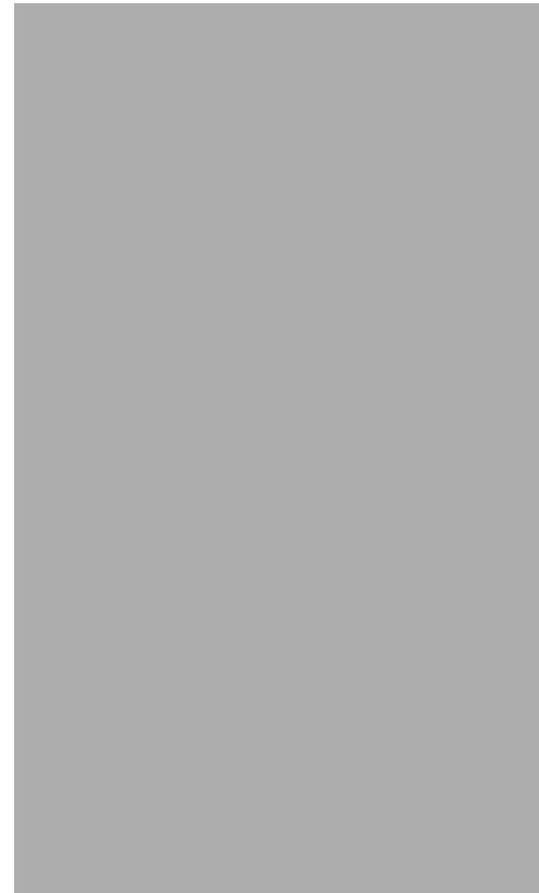
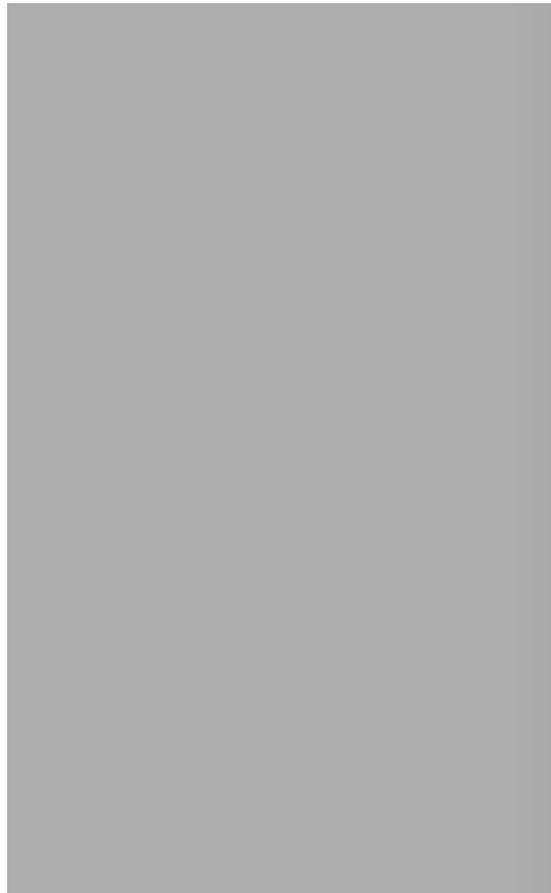
Weitere Effekte

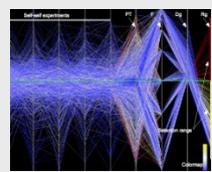




2.2 Optische Wahrnehmung

Weitere Effekte





2.2 Optische Wahrnehmung

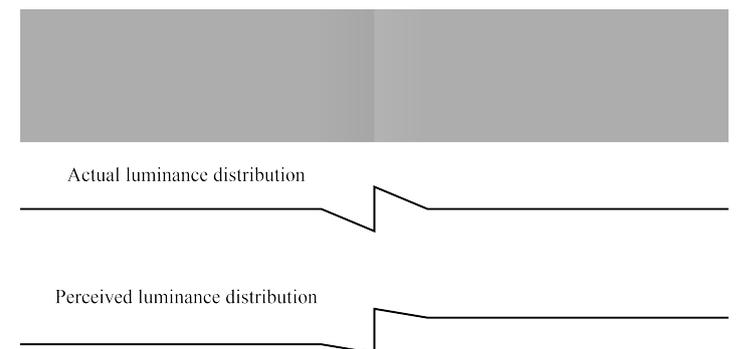
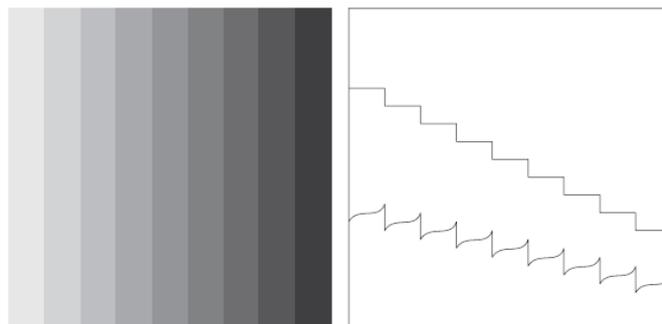
Weitere Effekte

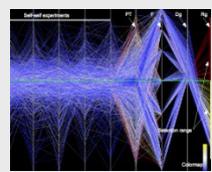
Machsche Streifen (links)

- Werden Flächen unterschiedlicher Graufärbung (ohne Gradient) nebeneinander abgebildet, sieht man an den Übergängen Machsche Streifen, d.h. der Kontrast an den Grenzen wird verstärkt.

Cornsweet Illusion (rechts)

- Auf einer einfarbigen Fläche wird eine Kante eingezeichnet die auf der einen Seite dunkel und auf der anderen hell ausläuft. Dadurch erscheinen die beiden Flächenstücke in unterschiedlichen Grautönen.

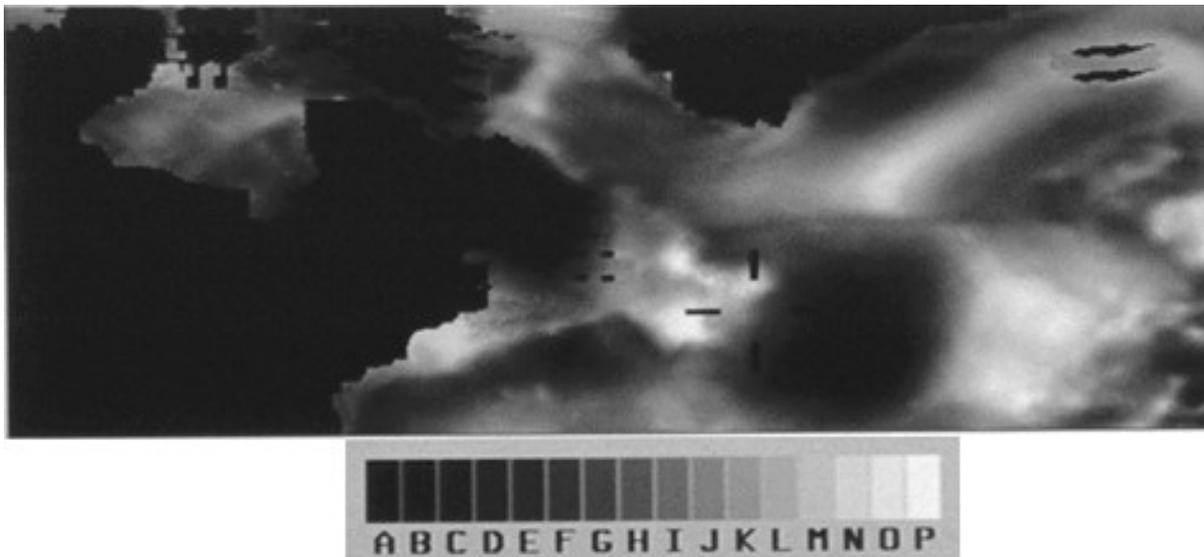


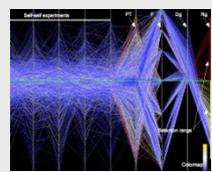


2.2 Optische Wahrnehmung

Diese optischen Täuschungen und Effekte können **starken Einfluß auf die Güte von Visualisierungen** haben, z.B. wenn Werte in einer Karte in Grautönen kodiert sind.

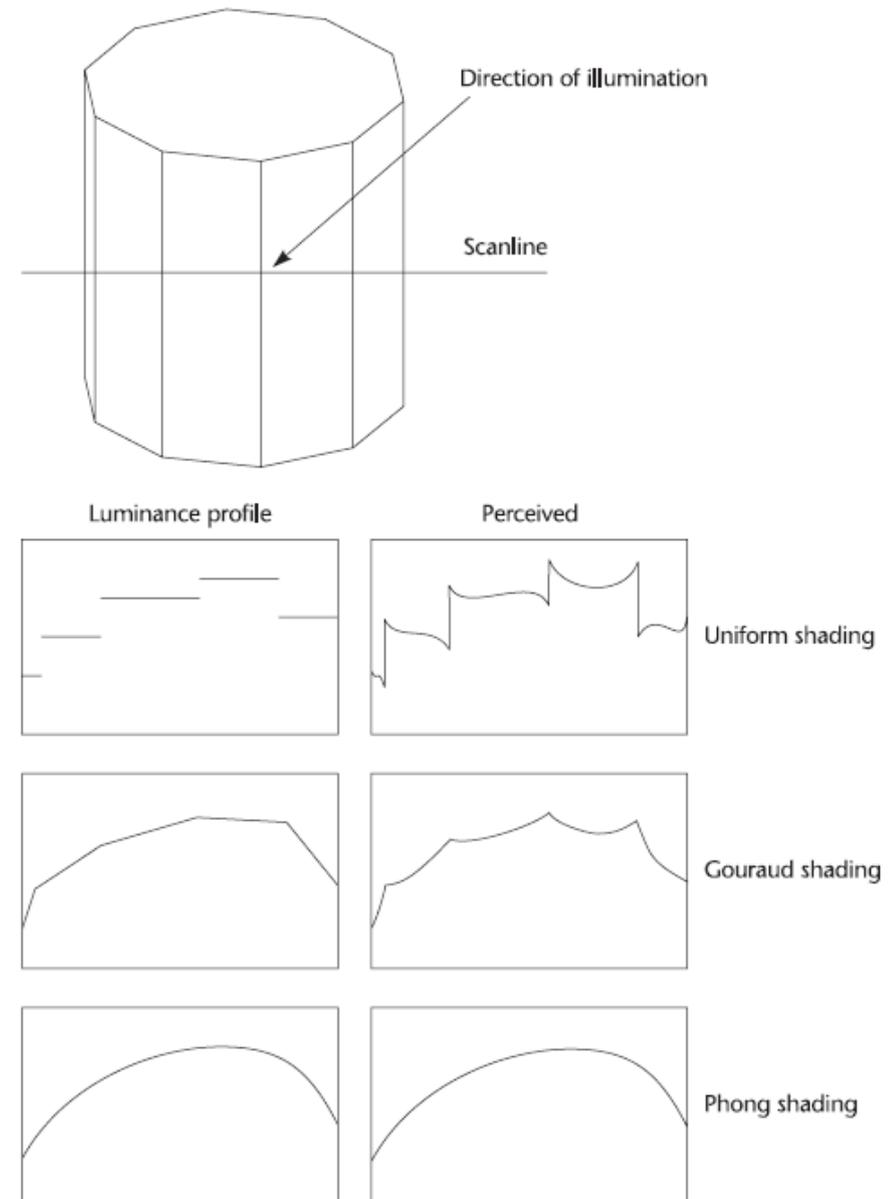
Hier treten **Ablesefehler von bis zu 20%** auf

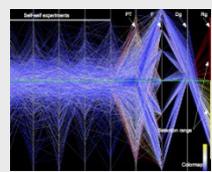




2.2 Optische Wahrnehmung

Artefakte treten auch bei der Betrachtung von 3D Objekten auf, wenn vereinfachte Schattierungstechniken (Flächenbasierte Schattierung, Gouraud-Schattierung) verwendet werden.





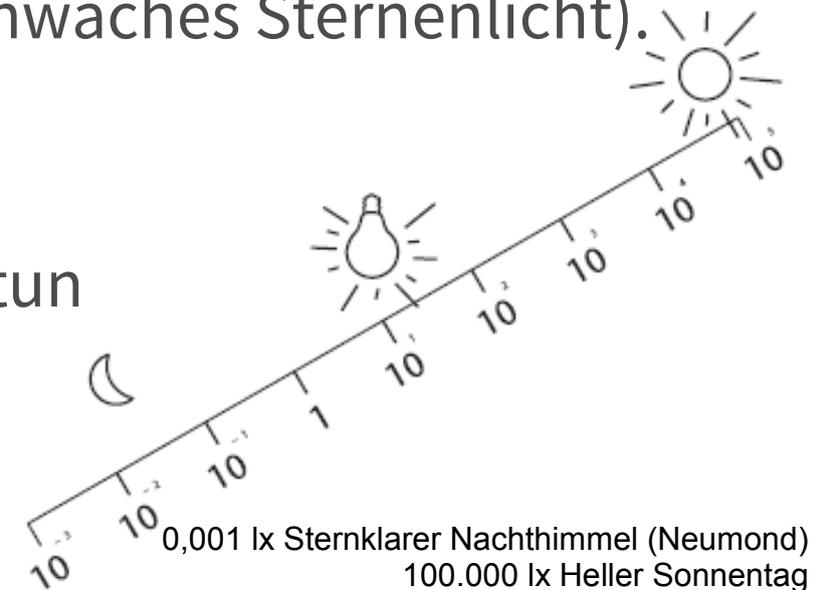
2.2 Optische Wahrnehmung

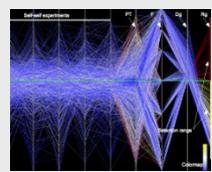
Subjektive Wahrnehmung der Leuchtintensität

Die **Wahrnehmung von Licht** in Form von **Differenzen** ist wichtig für die Anpassung an **unterschiedlichste Beleuchtungssituationen**.

Die physikalische Intensität des Lichtes in unserer Umgebung ist sehr variabel (helles Sonnenlicht bis schwaches Sternenlicht).

Wahrgenommene Intensität hat wenig mit **physikalischen Intensität** zu tun





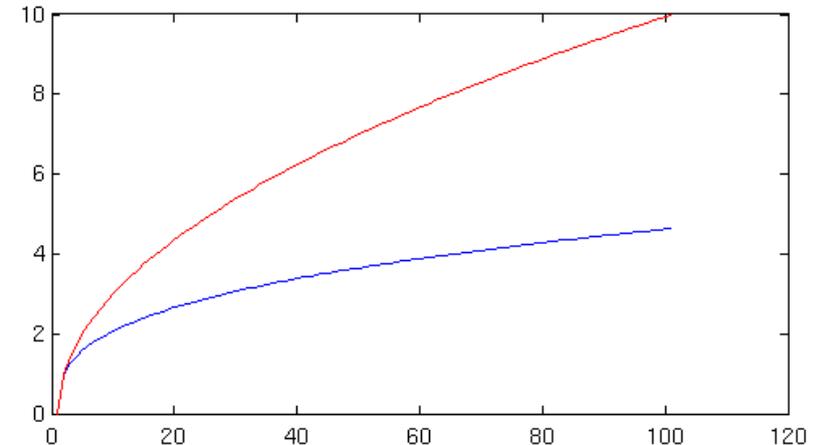
2.2 Optische Wahrnehmung

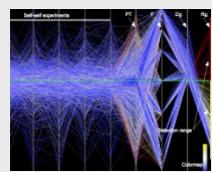
Subjektive Wahrnehmung der Leuchtintensität

- Den Zusammenhang zwischen physikalischer Intensität I und wahrgenommener Intensität S kann man für Licht in abgedunkelten Räumen gut durch Stevensche Gesetz beschreiben

$$S = a \cdot I^n$$

- Der Wert n hängt von der Größe des betrachteten Lichtfeldes ab. Bei runden Flächen der Größe 5° des Sichtfeldes ist $n = 0.333$, bei Lichtpunkten $n = 0.5$. Die Normierungskonstante a wird auf 1 gesetzt.
- Wahrgenommene Intensität bei steigender physikalischer Intensität für flächige Lichtquellen ($n=0.333$, blau) und Punktlichter ($n=0.5$, rot).

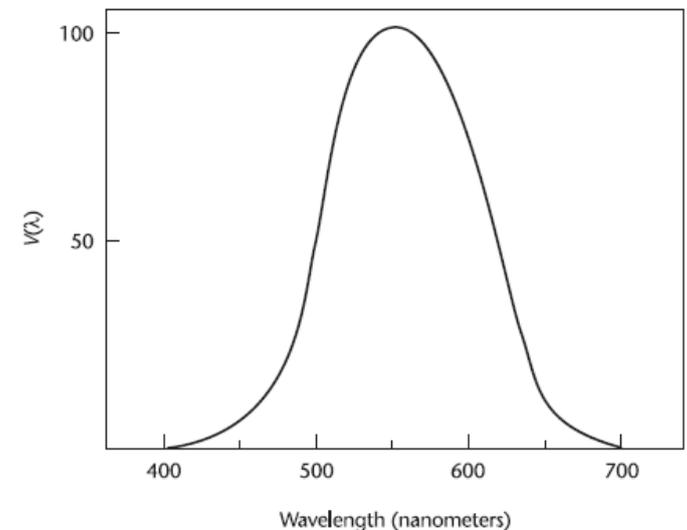


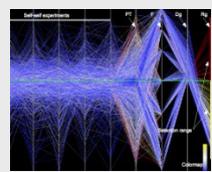


2.2 Optische Wahrnehmung

Anpassung an verschiedene Lichtverhältnisse

- Eine weitere Anpassung an die alltäglichen Lichtverhältnisse auf der Erde ist die **unterschiedliche Sensitivität für verschiedene Wellenlängen/Farben**.
- Die Wahrnehmung von Helligkeit durch das menschliche Auge hängt stark von der Wellenlänge des Lichts ab. Die spektrale Sensitivität $V(\lambda)$ für unterschiedliche Wellenlängen λ ist in einem Standard der Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) festgehalten.

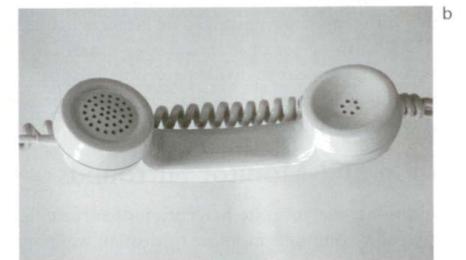
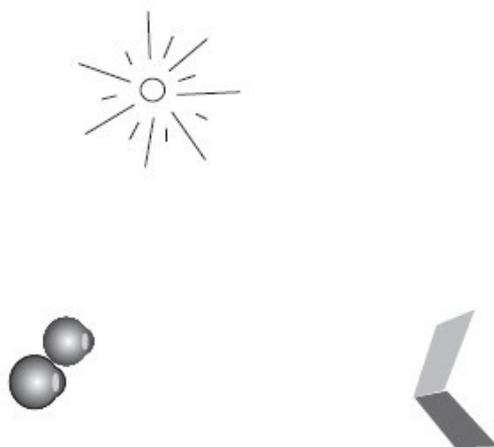




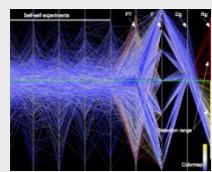
2.2 Optische Wahrnehmung

Anpassung an verschiedene Lichtverhältnisse

- Weitere Anpassung an die **korrekte Wahrnehmung von beleuchteten Oberflächen** sind nötig, damit diese richtig interpretiert werden können
 - Bei der Einschätzung der Beleuchtungssituation wird die **Position der Lichtquelle(n)** und die **Orientierung der Objekte** berücksichtigt
 - Das **Verhältnis zwischen spiegelndem und nichtspiegelndem Licht** dient der Bestimmung von Grauwerten (schwarze Szene → große Differenz, weiße Szene → kleine Differenz)



These two photographs show scenes in which (a) everything is black and (b) everything is white.



2.2 Optische Wahrnehmung

Unterscheidung von Grautönen

Ein weiterer wichtiger Aspekt der visuellen Wahrnehmung ist die **wahrgenommene Distanz** zwischen in der Szene enthaltenen **Grautönen** und ihre Unterscheidbarkeit

- Bei der subjektiven Wahrnehmung von Grautönen gilt für die **kleinste wahrnehmbare Intensitätsdifferenz** nach dem Weberschen Gesetz,

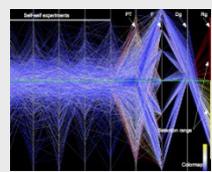
d.h. eine Veränderung von $\frac{\Delta I}{I} = 0.005$ kann wahrgenommen werden

- Für **größere Differenzen** gilt nach CIE

$$L' = 116 \left(\frac{I}{I_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16, \frac{I}{I_n} \geq 0.01$$

wobei I_n die physikalische Intensität des Objekts ist, das das meiste Licht zum Auge sendet, I die Lichtstärke eines beliebigen wahrgenommenen Objekts und L' die wahrgenommene Intensität dieses Objekts ist

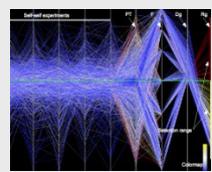
- **Untersuchung mit Sinusmustern** wie bereits beschrieben



2.2 Optische Wahrnehmung

Farbe

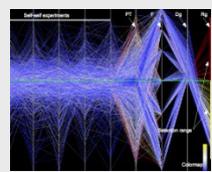




2.2 Optische Wahrnehmung

Farbe

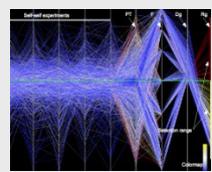




2.2 Optische Wahrnehmung

Farbe

- Farbwahrnehmung im täglichen Leben nur **eingeschränkt relevant** im täglichen Leben
 - Farbenblinde bemerken z. B. das Defizit oft jahrelang selbst nicht
 - Charakteristika von Objekten wie die **Form**, die **Lage im Raum** oder dessen **Bewegungsrichtung** sind wesentlich wichtiger und können ohne Farbe wahrgenommen werden
 -
- Farbsicht erleichtert einige Aufgaben jedoch immens
 - Sie hilft **Tarnungen** zu durchschauen
 - Sie hilft Objekte in einer charakteristischen Farbe schnell zu identifizieren (**Klassifizierung**)
 - Sie hilft **Objekteigenschaften zu bestimmen**, wie zum Beispiel ob ein Apfel reif oder Fleisch frisch ist.
- Daher sollte Farbe eher als **Attribut eines Objekts** betrachtet werden, anstatt als seine charakteristische Eigenschaft



2.2 Optische Wahrnehmung

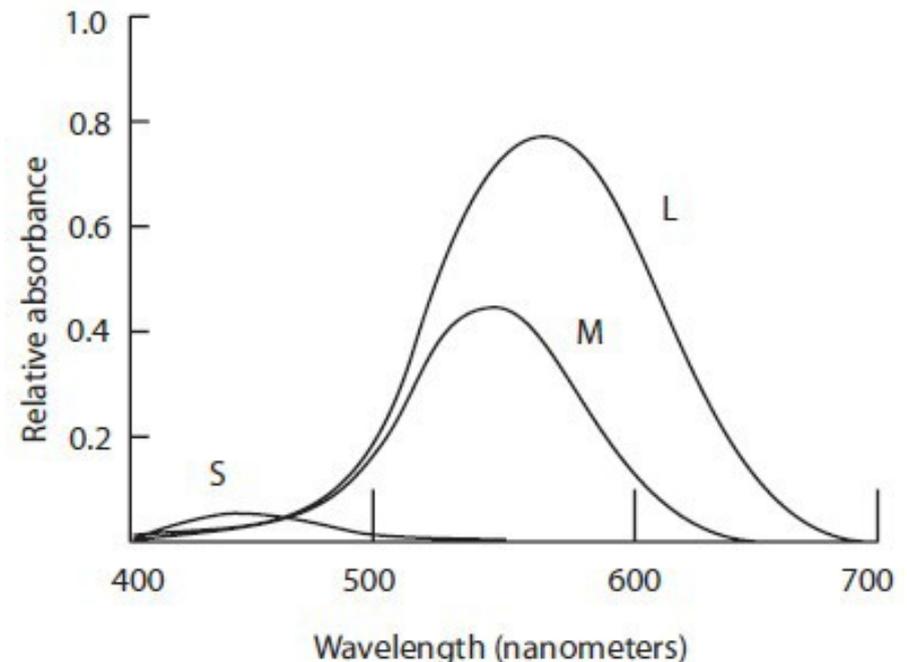
Dreifarbenlehre

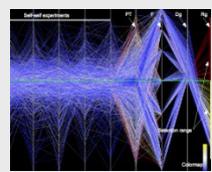
Der Mensch besitzt **drei Typen von Zapfen**, wobei jeder seine maximale Sensitivität bei einer anderen Wellenlänge hat (S = blau, M = grün und L= rot).

Bemerkung: Hühner haben 12 Typen.

Die Sensitivität der Zapfen ist sehr unterschiedlich.

- Da es nur drei verschiedene Zapfen gibt, die durch unterschiedlich starke Stimulation alle Farben wahrnehmen können, reicht **ein Farbsystem bestehend aus drei Grundtönen** um alle vom Menschen wahrnehmbaren Farben darzustellen (→ Dreifarbenlehre).
- **Farbblindheit**
10% der Männer und 1% der Frauen weisen eine Farbschwäche auf. Dabei handelt es sich häufig (99%) um das Fehlen der Zapfen für die Wahrnehmung von grün oder rot.





2.2 Optische Wahrnehmung

Farbblindheit

normalsichtig



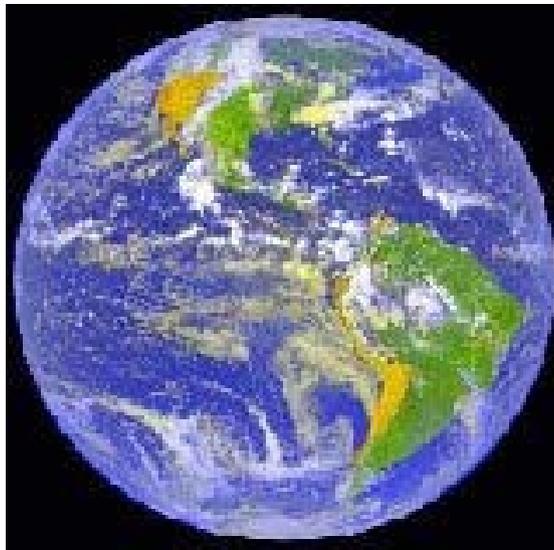
grün

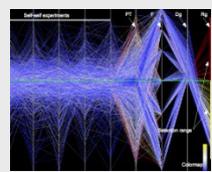


rot



blau/gelb





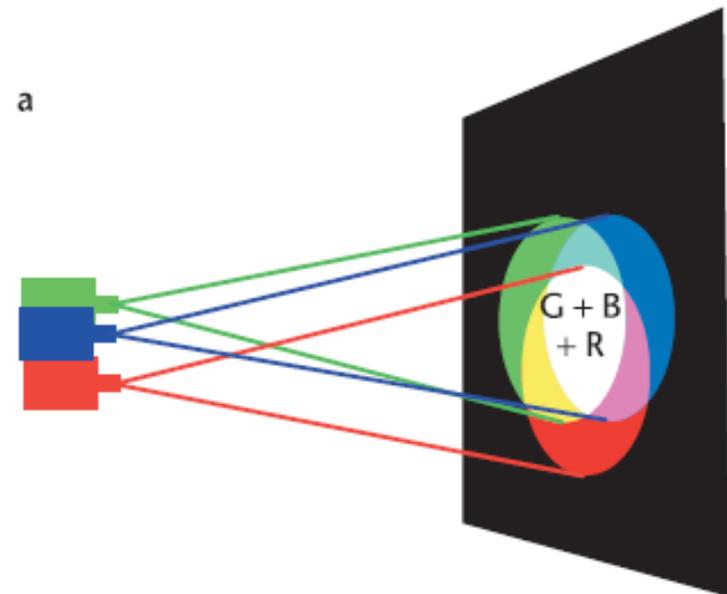
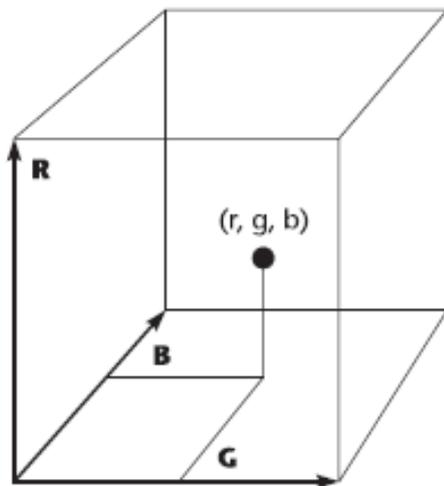
2.2 Optische Wahrnehmung

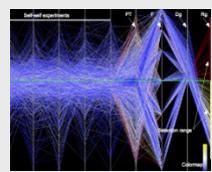
Farbmessung

- Man kann eine beliebige (Licht-)Farbe C mittels der Grundfarben Rot (R), Grün (G) und Blau (B) als

$$C = rR + gG + bB$$

ausdrücken.





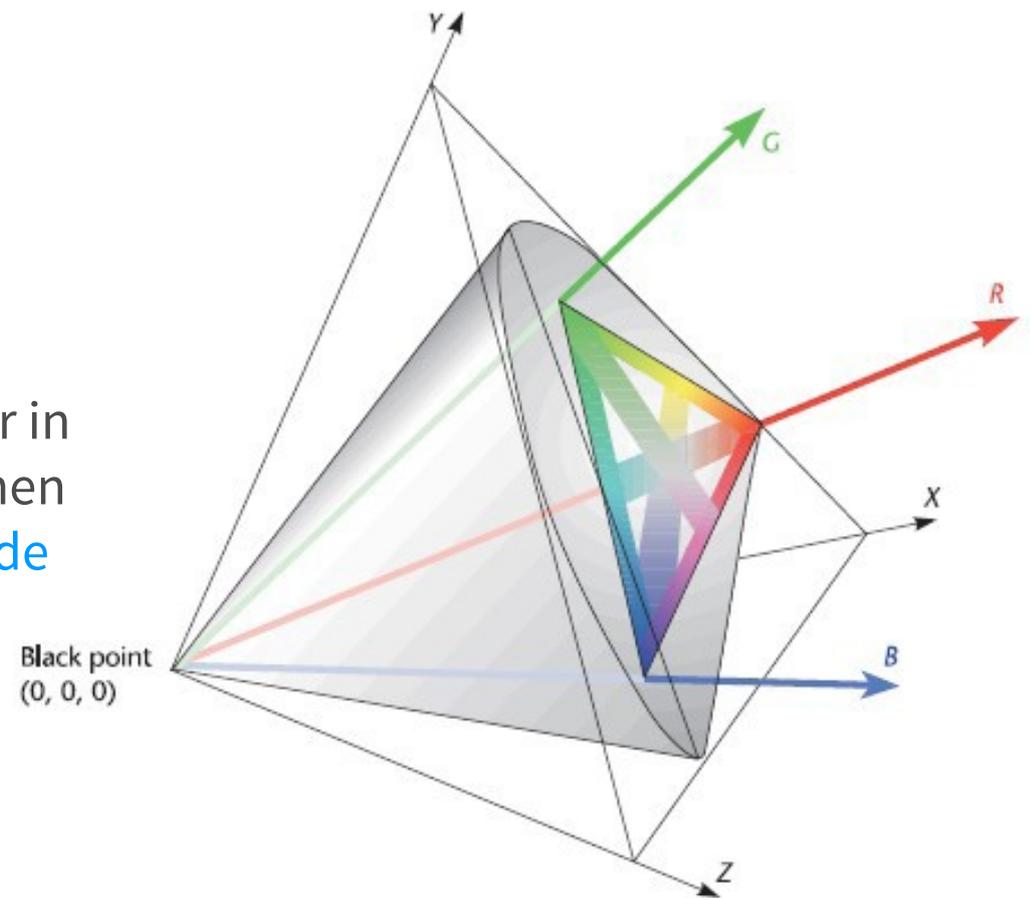
2.2 Optische Wahrnehmung

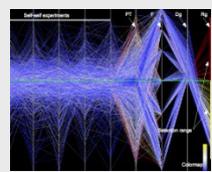
CIE Standard für Farben

Das Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) System verwendet drei abstrakte Primärfarben X, Y, Z.

Wahrnehmbare Farben sind als graues Volumen dargestellt. Die Messungen stammen von vor 1931.

Die Farben die durch drei farbige Lichter in rot, grün und blau erzeugt werden können sind durch die **einbeschriebene Pyramide** gekennzeichnet.





2.2 Optische Wahrnehmung

CIE Standard für Farben

Farben in XYZ Koordinaten sind **nur schwer zu verstehen**. Leichter verständlich ist die Repräsentation in **Farbwertanteilen** (chromaticity coordinates)

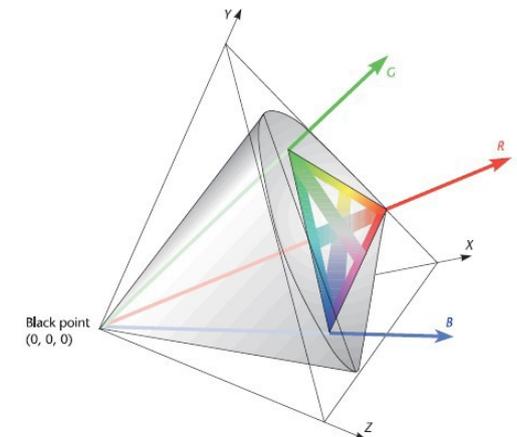
$$\begin{aligned}x &= X / (X + Y + Z) \\y &= Y / (X + Y + Z) \\z &= Z / (X + Y + Z)\end{aligned}$$

Wegen $x + y + z = 1$, reicht es die x und y Werte anzugeben.

- Üblicherweise werden Farben in Form von (x, y, Y) spezifiziert, wobei Y die Helligkeit angibt.

Die **inverse Transformation** ist gegeben durch

$$\begin{aligned}X &= Y x / y \\Y &= Y \\Z &= (1 - x - y) Y / y\end{aligned}$$

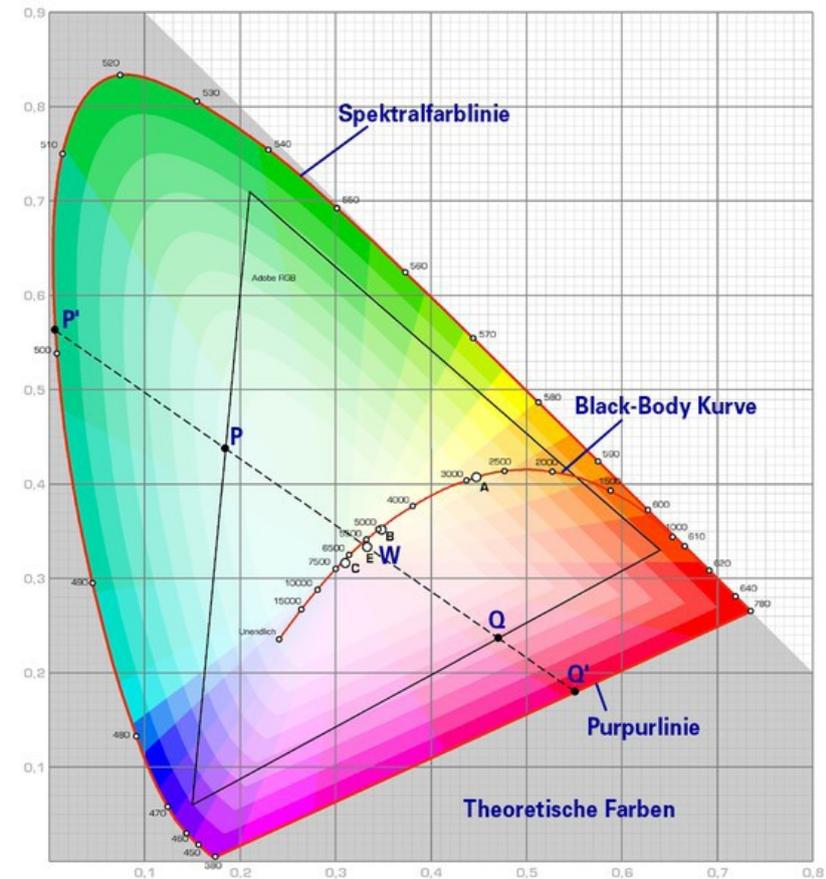


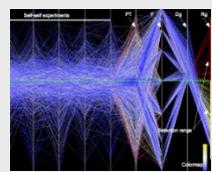
2.2 Optische Wahrnehmung

CIE Normfarbtafel

hat einige interessante Eigenschaften:

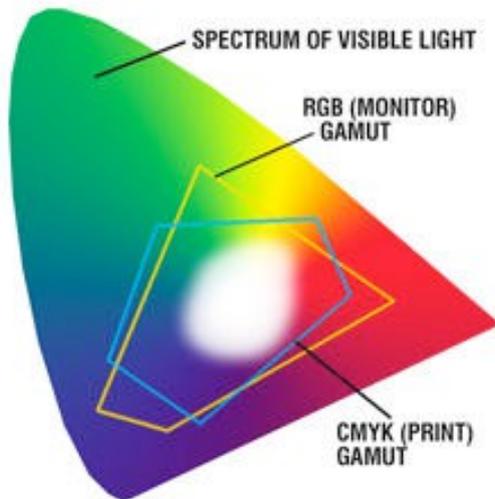
- Wenn zwei farbige Lichtquellen als Punkte im Diagramm dargestellt werden, liegen die Farben die als Mischung dieser beiden Lichtquellen erzeugt werden können auf einer Linie
- Alle **Farben innerhalb eines Dreiecks**, dessen Eckpunkte drei farbige Lichtquellen repräsentiert, können mit Hilfe dieser Lichtquellen erzeugt werden
- Die hufeisenförmige **Spektralfarblinie** enthält alle Farben mit den höchsten Sättigungsgraden in den einzelnen Farbtönen. Man sieht sie wenn man Licht betrachtet, dass nur aus einer Wellenlänge besteht.
- Die **Purpurlinie** verbindet die beiden Enden der Spektralfarblinie.
- Der **Weißpunkt** hat die Koordinaten $x = 0.333$ und $y = 0.333$. Auf der Verbindungslinie zwischen Weißpunkt und Spektralfarbe ändert sich der Farbton nicht.
- **Komplementärfarben** findet man entlang der Verbindungslinie durch den Weißpunkt.

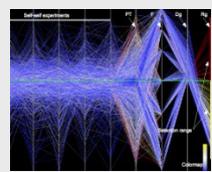




2.2 Optische Wahrnehmung

CIE Normfarbtafel





2.2 Optische Wahrnehmung

Der CIEluv Farbraum

In einigen Anwendungen ist es von Vorteil einen Farbraum zu haben bei dem der **räumlichen Abstand** zwischen zwei Farben dem **wahrgenommenen Abstand** entspricht.

Mögliche Anwendungen:

- Spezifikation von Farbtoleranzen
- Farbkodierung
- Pseudofarben in Karten

Der CIEluv-Raum ist ein solcher Farbraum und gegeben durch

Mit

$$u' = \frac{4X}{X+15Y+3Z} \quad u'_w = \frac{4X_w}{X_w+15Y_w+3Z_w}$$

$$v' = \frac{9Y}{X+15Y+3Z} \quad v'_w = \frac{9Y_w}{X_w+15Y_w+3Z_w}$$

$$L^* = 116 \cdot \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - 16$$

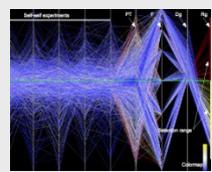
$$u^* = 13 L^* \cdot (u' - u'_n)$$

$$v^* = 13 L^* \cdot (v' - v'_n)$$

u', v' beschreiben eine **perspektivische Transformation** des x,y -Raumes.

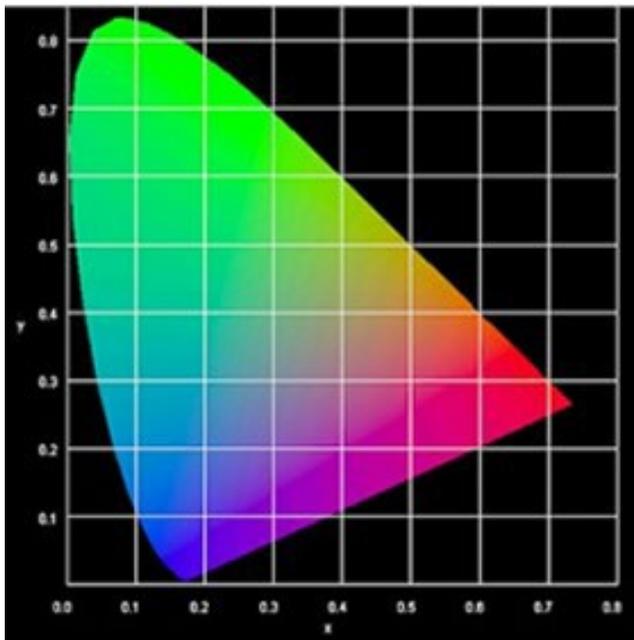
Die (wahrgenommene) Distanz zweier Farben ist $\Delta E_{u,v}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2}$

die Distanz $\Delta E_{u,v}^* = 1$ entspricht der gerade wahrnehmbaren Differenz.

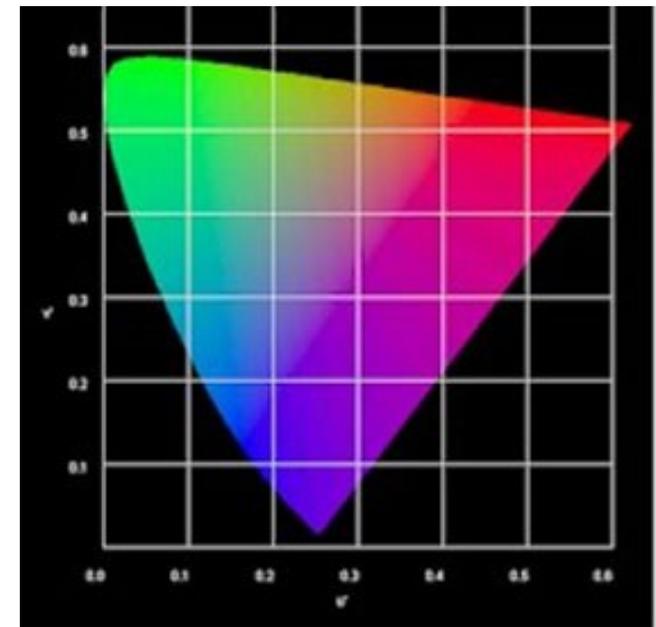


2.2 Optische Wahrnehmung

Der CIEluv Farbraum

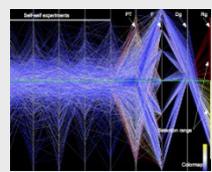


XYZ Farbraum



luv oder UCS Farbraum

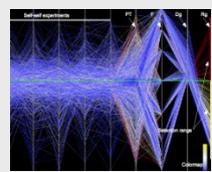
- Gleichmäßige Farbräume geben nur eine ungefähre Schätzung der tatsächlich wahrgenommenen Differenzen wieder, da die Wahrnehmung durch viele Außenfaktoren beeinflusst wird:
 - Kontrasteffekte (Hintergrundfarbe vs. Objektfarbe)
 - Größe der Farbflächen



2.2 Optische Wahrnehmung

Gegenfarbentheorie/Komplementärfarben

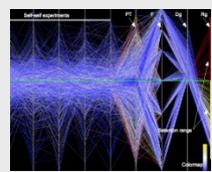
- Die Gegenfarbentheorie (~1874) ist eine **Gegentheorie zur Dreifarbentheorie (Farbwahrnehmung über unterschiedliche Stimulation der drei Zapfentypen)**.
- Einige Phänomene können mit der Dreifarbentheorie nicht erklärt werden:
 - Warum gibt es keine Farben die „gelbliches Blau“ oder „rötliches Grün“ heißen?
 - Warum sieht man, wenn man lange eine farbige Fläche betrachtet und anschließend auf eine weiße blickt dort die Komplementärfarbe?
- In der Gegenfarbentheorie wird die **Farbwahrnehmung mittels drei Gegenfarbpaaren** erklärt. Diese sind Blau-Gelb, Rot-Grün und Schwarz-Weiß. Farben werden dann als Kombination dieser drei Empfindungsdimensionen definiert.



2.2 Optische Wahrnehmung

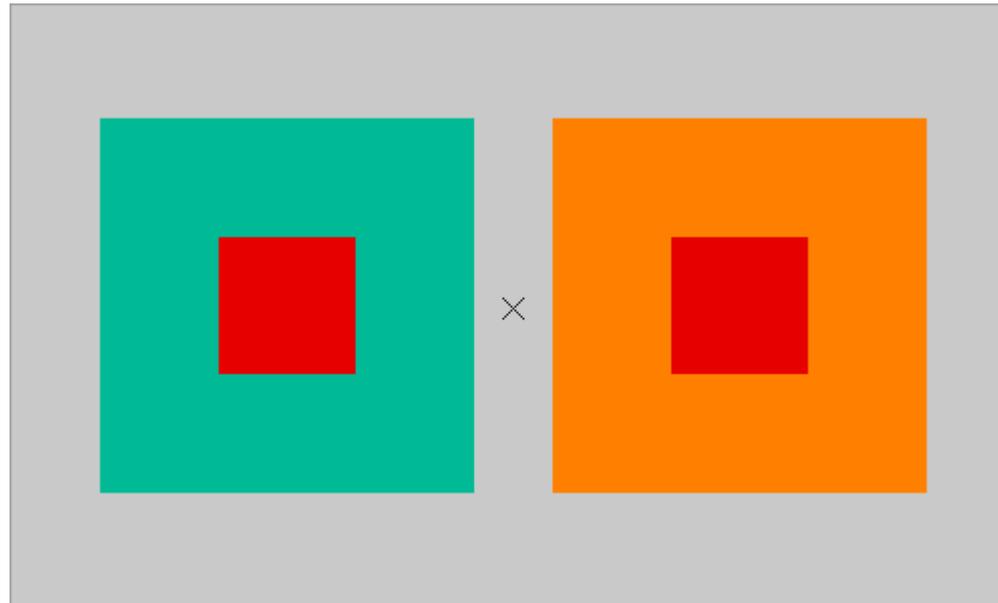
Gegenfarbentheorie/Komplementärfarben

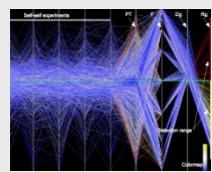
- Die Gegenfarbentheorie (~1874) ist eine **Gegentheorie zur Dreifarbentheorie (Farbwahrnehmung über unterschiedliche Stimulation der drei Zapfentypen)**.
- Einige Phänomene können mit der Dreifarbentheorie nicht erklärt werden:
 - Warum gibt es keine Farben die „gelbliches Blau“ oder „rötliches Grün“ heißen?
 - Nachbilder - Warum sieht man, wenn man lange eine farbige Fläche betrachtet und anschließend auf eine weiße blickt dort die Komplementärfarbe?
 - Komplämentärkontrast (siehe nächste Folie)
- In der Gegenfarbentheorie wird die **Farbwahrnehmung mittels drei Gegenfarbpaaren** erklärt. Diese sind Blau-Gelb, Rot-Grün und Schwarz-Weiß. Farben werden dann als Kombination dieser drei Empfindungsdimensionen definiert.



2.2 Optische Wahrnehmung

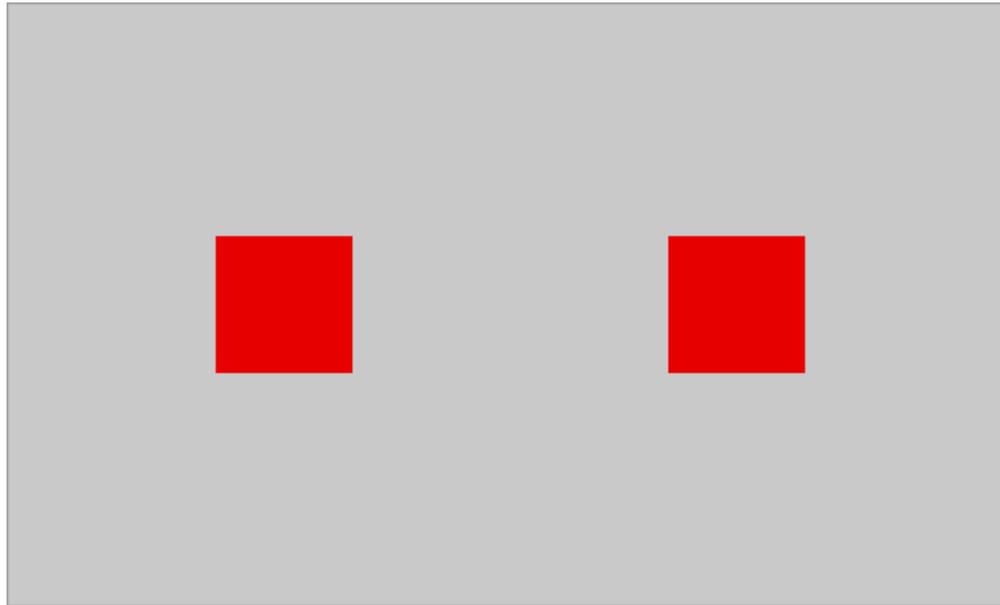
Komplementärkontrast/Simultankontrast

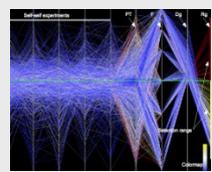




2.2 Optische Wahrnehmung

Komplementärkontrast/Simultankontrast



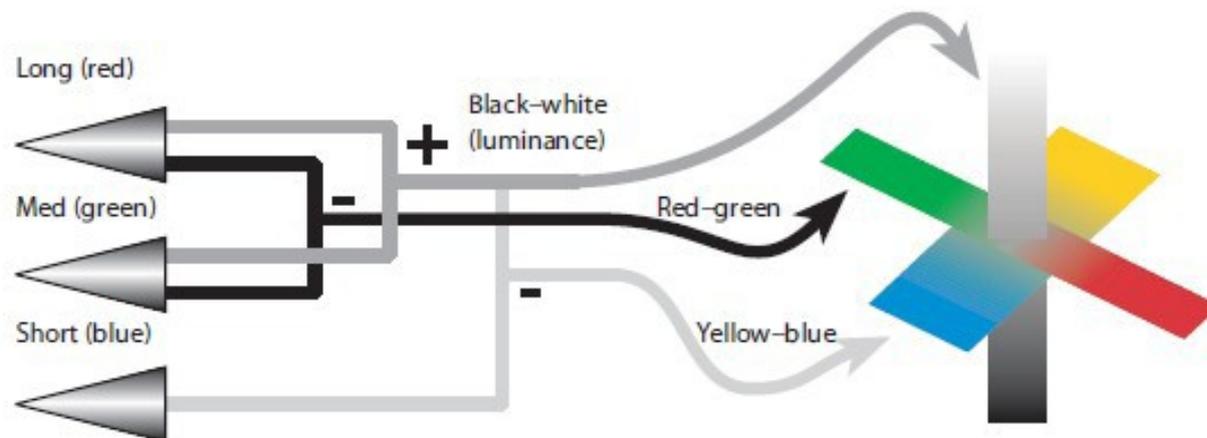


2.2 Optische Wahrnehmung

Gegenfarbentheorie

Sensorische Verarbeitung von Farbe im Gegenfarbenmodell

- Helligkeitskanal: Verarbeitung aller drei Farben
- Rot-Grün-Kanal: Differenz zwischen Rot und Grün
- Blau-Gelb-Kanal: Blau – (Rot + Grün)



2.2 Optische Wahrnehmung

Reihenfolge von Farbwörter

- Studie an 100 Sprachen [Berlin, Kay, 1969]: Farbwörter stets in Reihenfolge schwarz-weiß, rot-gelb/grün, blau, braun, rosa/violett/orange/ grau

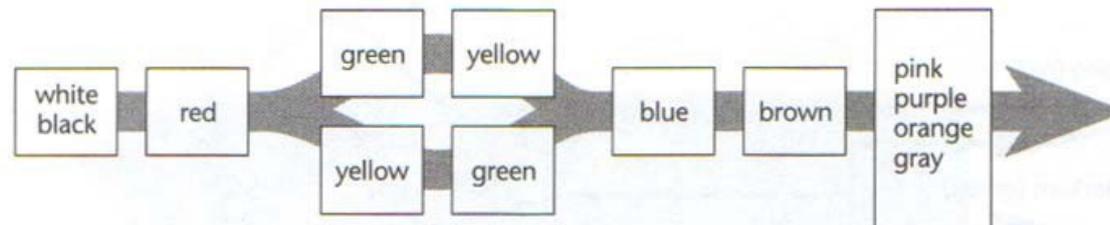


Figure 4.11 This is the order of appearance of color names in languages around the world, according to the research of Berlin and Kay (1969). The order is fixed, with the exception that sometimes yellow is present before green and sometimes the reverse is the case.

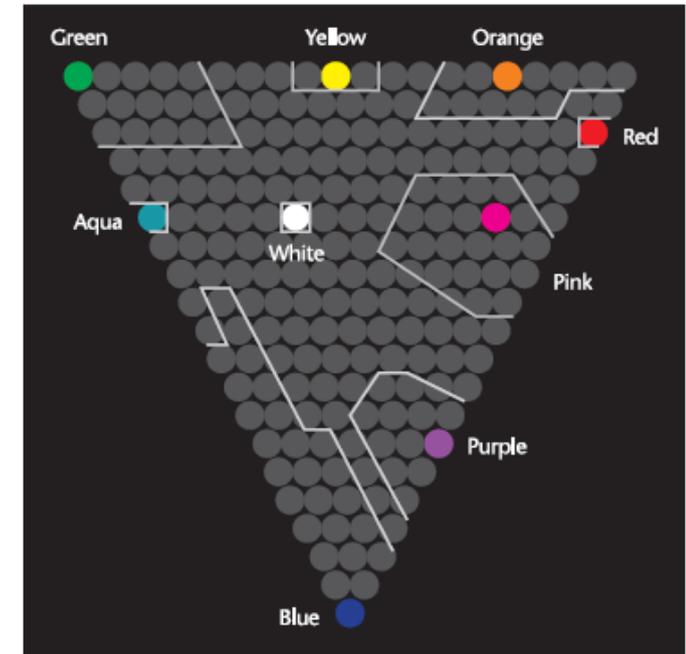
- Zusammen mit anatomischen/psychophysikalischen Untersuchungen:
 - Grundfarben** (Weiß, Schwarz, Rot, Grün, Blau, Gelb) biologisch bedingt eignen sich am besten zur **Farbkodierung**

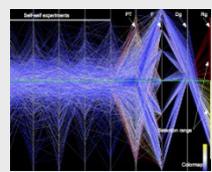
2.2 Optische Wahrnehmung

Farbnamen

Untersuchungen über die Benennung von Farben haben folgende Ergebnisse gebracht (z.B. Post und Green (1986))

- Nur **acht Farben** und weiß wurden von mind. 75% der Teilnehmer **gleich benannt**. Diese werden leicht erinnert.
(Wichtig wenn Farben als Kategorien verwendet werden sollen.)
- Das Rot am Monitor wird oft als Orange wahrgenommen (wahres Rot hat einen kleinen Blauanteil).
- Reines Gelb kann sehr exakt bestimmt werden (± 2 nm).
- Bei Grün gibt es zwei Modelwerte (2/3 für 514 nm, 1/3 bei 525 nm – eher türkis)
- Die Größe der Regionen mit gleichem Farbnamen hat wenig Aussagekraft, da dies stark vom Hintergrund abhängt.
- Dunkles Gelb wird als Braun wahrgenommen.

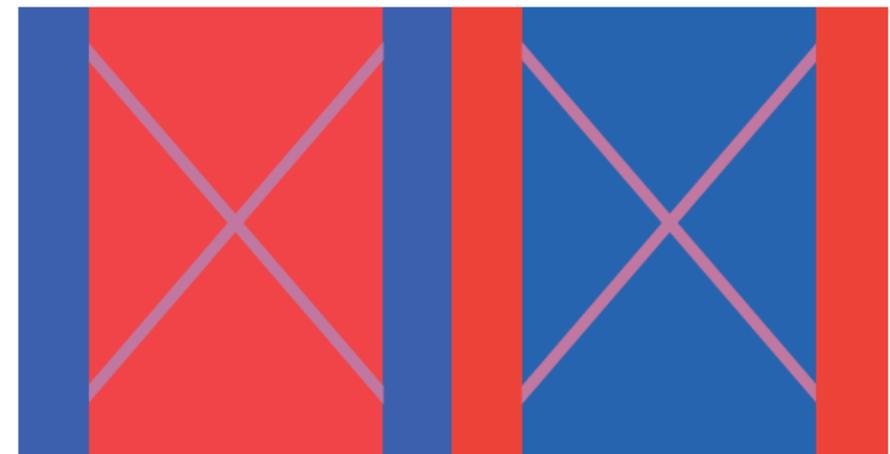


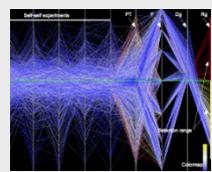


2.2 Optische Wahrnehmung

Farbwahrnehmung

- Abhängig von vielen äußeren Faktoren können Farben sehr unterschiedlich erscheinen.
- Wenn sicher gestellt werden soll, dass eine Farbe in einem bestimmten Ton wahrgenommen wird, müssen diese äußeren Faktoren eingerechnet werden. Entweder man passt also die äußeren Faktoren einem Standard an oder die Farbe den äußeren Faktoren.
- Ähnlich der Anpassung an verschiedene Helligkeiten, kann sich das Auge auch an verschiedene Beleuchtungsfarben anpassen. Wird ein Raum z.B. mit blauem Licht beleuchtet passen sich die Photorezeptoren an und reagieren weniger sensitiv auf blaues Licht, so dass Farben konstant wahrgenommen werden können. Ähnliche Effekte kann man beim Tragen von farbigen Sonnenbrillen beobachten.
- Ähnlich der Kontrastillusion für Graustufen haben auch Farben Wechselwirkungen, und je nach Hintergrund können sie verschieden wahrgenommen werden.
- Farben werden häufig mit zusätzlichen Adjektiven wie intensiv, leuchtend, fahl oder matt beschrieben. Diese Eigenschaften spiegeln sich in der Sättigung des Farbtons wieder.

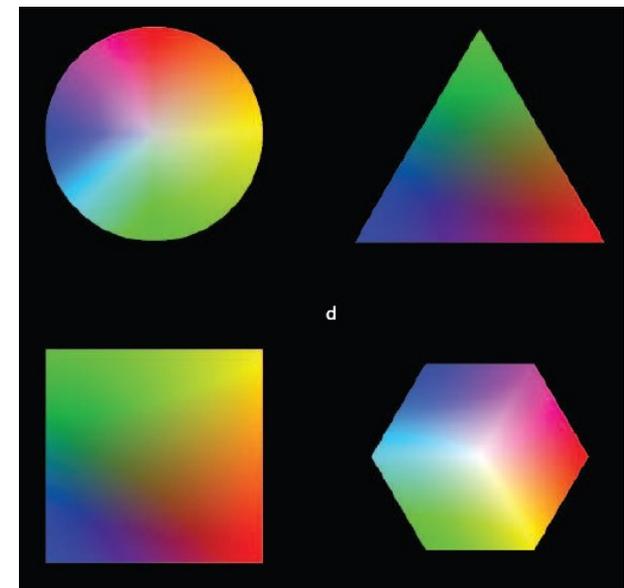


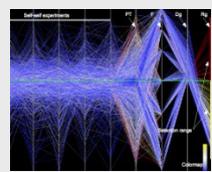


2.2 Optische Wahrnehmung

Farbwahldialoge

- In vielen Anwendungen muss der Benutzer die Möglichkeit haben selber Farben zu spezifizieren. Dies kann mittels Farbnamen, Farbpaletten oder eines Kontrollmenüs zur Eingabe eines Punktes in 3D geschehen.
- Die meiste Freiheit bieten Kontrollmenüs. Da die Spezifikation einer Farbe mittels RGB Werten für die meisten Menschen eher schwierig ist, werden häufig Menüs verwendet die die Kontrollparameter in Farbton (hue), Sättigung (saturation) und Hellwert (value) aufteilen (HSV Modell).
- Keines der Modelle ist perfekt und eine optimale Darstellung bisher noch nicht gefunden



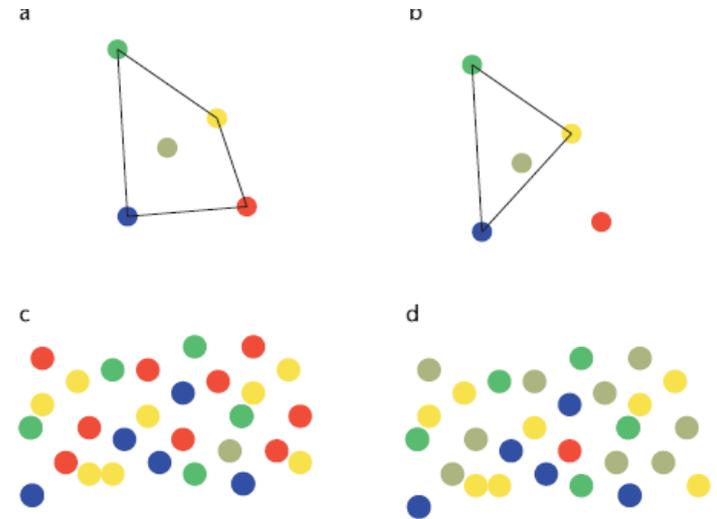
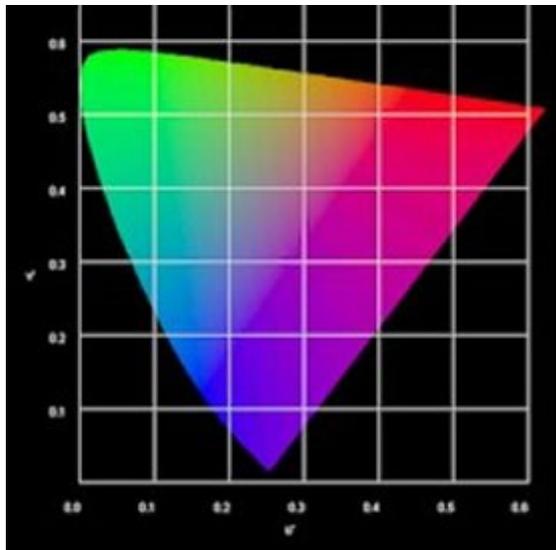


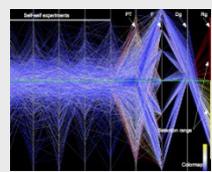
2.2 Optische Wahrnehmung

Farbkodierung von Objekten

Bei der Verwendung von Farbe zur Unterscheidung von Merkmalen müssen einige Punkte beachtet werden:

- **Unterscheidbarkeit:** Die Farben sollen leicht voneinander zu unterscheiden sein. (→ CIE Luv Raum). Wenn es darum geht ein Objekt einer bestimmten Farbe schnell zu finden, sollte diese außerhalb der konvexen Hülle der anderen Farben liegen.



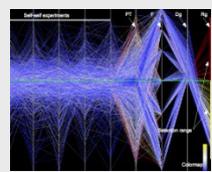


2.2 Optische Wahrnehmung

Farbkodierung von Objekten

Bei der Verwendung von Farbe zur Unterscheidung von Merkmalen müssen einige Punkte beachtet werden:

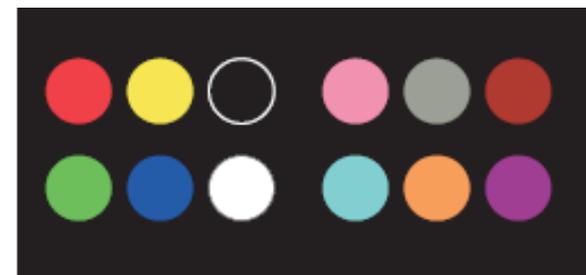
- **Unterscheidbarkeit:** Die Farben soll leicht voneinander zu unterscheiden sein. (→CIEluv Raum). Wenn es darum geht ein Objekt einer bestimmten Farbe schnell zu finden, sollte diese außerhalb der konvexen Hülle der anderen Farben liegen.
- **Eindeutige Farbtöne:** Die Gegenfarben haben in den meisten Kulturen und Sprachen einen eigenen spezifischen Namen und werden leicht erkannt. Sie sind zu bevorzugen, wenn nur wenige Farben benötigt werden. Auch sollte wenn möglich nicht mehrere Farben aus der gleichen Farbfamilie zur Kodierung verwendet werden.
- **Kontrast zum Hintergrund:** Es muss beachtet werden, dass Farben auf unterschiedlichem Hintergrund unterschiedlich wirken können. Wechselwirkungen können durch eine einheitliche Kontur (z.B. schwarz oder weiß) verkleinert werden.
- **Farbschwäche:** Da es relativ viele Menschen mit Farbschwäche gibt sollten Farbkodierung basierend auf rot-grün Kontrasten vermieden werden.

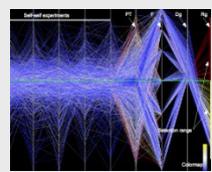


2.2 Optische Wahrnehmung

Farbkodierung von Objekten

- **Anzahl:** Nur 5 bis 10 Farben können schnell unterschieden werden.
- **Größe der Farbfläche:** Die Größe der farblich kodierten Objekte sollte nicht zu klein sein, da sie sonst nicht unterschieden werden können. Allgemein gilt: Für kleine Farbflächen sollten stark gesättigte und stark unterschiedliche Farben verwendet werden, für große Flächen eher Farben mit niedrigerer Sättigung und geringerem Abstand. Bei farbig hinterlegtem Text sollte eine helle Farbe gewählt werden.
- **Konventionen:** Einige Farben haben bestimmte Bedeutungen
 - Rot = heiß oder Gefahr
 - Blau = kalt
 - Grün = Leben
- **Man beachte:** Andere Länder, andere Sitten! (z.B. in China gilt rot = Leben oder Glück und grün = Tod)
- Folgende Farben werden für die Kodierung empfohlen: Rot, Grün, Gelb, Blau, Schwarz, Weiß, Pink, Cyan, Grau, Orange, Braun, Lila





2.2 Optische Wahrnehmung

Farbskalen zur Wertekodierung

- Zur farbigen Darstellung von kontinuierlichen Werten werden häufig Farbreihen (**color maps**) verwendet, die jedem Wert eineindeutig eine Farbe zuordnen.
- In der **Falschfarbendarstellung** werden gezielt Farben verwendet, die nicht dem natürlichen Farbeindruck entsprechen, z.B. blaues Pferd. Anstatt der Grauwertdarstellung von Skalarwerten können Falschfarben eingesetzt werden, die den einzelnen Grauwerten unterschiedliche Farben zuordnen. Dadurch fällt es leichter Muster zu erkennen und Werte exakt abzulesen.
- In den Naturwissenschaften wird häufig die Regenbogenfarbskala verwendet. Problem hierbei: Es gibt keine natürliche Ordnung für die enthaltenen Farben.
- Ein weiteres Beispiel ist die Schwarzkörperstrahlung, die gewöhnlich bei Wärmebildaufnahmen verwendet wird.
- Auch bei Farbskalen sollten Reihen vermieden werden, die ungünstig für Menschen mit Farbschwäche sind.

