




Computer-Graphik I

Farben



G. Zachmann
 Clausthal University, Germany
zach@in.tu-clausthal.de




*Die Farbe ist ein Mittel, direkten Einfluss auf die Seele auszuüben.
 Die Farbe ist die Taste, das Auge ist der Hammer.
 Die Seele ist das Klavier mit vielen Saiten.
 Der Künstler ist die Hand, die durch diese oder jene Taste
 zweckmäßig die menschliche Seele in vibration bringt.*

Wassily Kandinsky (1866 – 1944)



G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 2

Disclaimer

- Farben sind eine Wissenschaft für sich:
 - Es gibt sehr viele Farbräume
 - Involviert Physik, Biologie / Physiologie, Wahrnehmungspsychologie
 - Oft nicht leicht zu erkennen, in welchem Gebiet man sich gerade bewegt
 - Sehr viele Begriffe
- Fredo Durant:

- *Color is both quite simple and quite complex*
 - *There are two options to teach color:*
 - *Pretend it all makes sense and it's all simple*
 - *Expose the complexity and arbitrary choices*
 - *Unfortunately, I have chosen the latter ...*
- Vereinfachung hier: keine lichttechn. / photometrischen Größen

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 3

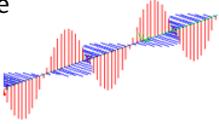
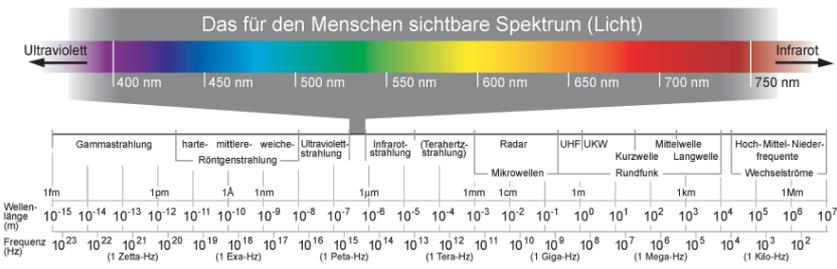
Literatur

- Foley / van Dam, Peter Shirley, Rogers (s. Homepage der VL)
- Gary W. Meyer: *Tutorial on color science*
(siehe Link auf der Homepage der Vorlesung)

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 4

Was ist Licht?

- **Licht** = elektromagnetische Strahlung / Energie im für den Menschen sichtbaren Spektralbereich: 380 – 780 nm

Das für den Menschen sichtbare Spektrum (Licht)

Ultraviolett | 400 nm | 450 nm | 500 nm | 550 nm | 600 nm | 650 nm | 700 nm | Infrarot

Wellenlänge (m): 10⁻¹⁵, 10⁻¹⁴, 10⁻¹³, 10⁻¹², 10⁻¹¹, 10⁻¹⁰, 10⁻⁹, 10⁻⁸, 10⁻⁷, 10⁻⁶, 10⁻⁵, 10⁻⁴, 10⁻³, 10⁻², 10⁻¹, 10⁰, 10¹, 10², 10³, 10⁴, 10⁵, 10⁶, 10⁷

Frequenz (Hz): 10²³, 10²², 10²¹, 10²⁰, 10¹⁹, 10¹⁸, 10¹⁷, 10¹⁶, 10¹⁵, 10¹⁴, 10¹³, 10¹², 10¹¹, 10¹⁰, 10⁹, 10⁸, 10⁷, 10⁶, 10⁵, 10⁴, 10³, 10²

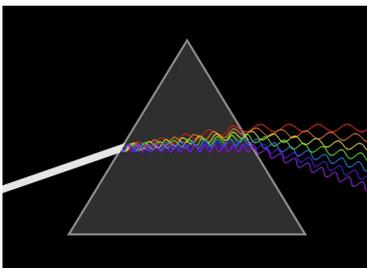
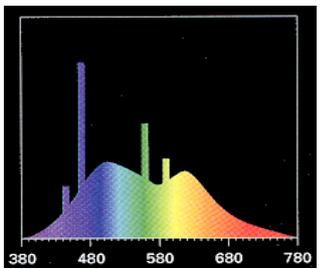
Gammastrahlung | harte- mittlere- weiche- Röntgenstrahlung | Ultraviolett- strahlung | Infrarot- strahlung (Terahertz- strahlung) | Radar | UHF/UKW | Kurzwelle | Mittelwelle | Langwelle | Hoch- Mittel- Nieder- frequente Wechselströme

1fm | 1pm | 1Å | 1nm | 1µm | 1mm | 1cm | 1m | 1km | 1Mm

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 5

Lichtquellen

- Licht entsteht durch Emission von elektromagnetischer Strahlung
 - Normalerweise durch hohe Temperatur, z.B.: Sonne, Kerze, schwarzer Strahler, ...
 - Ausnahmen: Fluoreszenz, Laser, ...
- Eine Lichtquelle hat (fast) immer ein komplettes Spektrum:

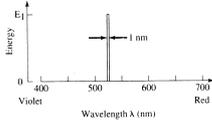
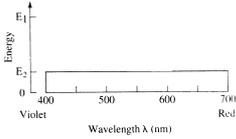



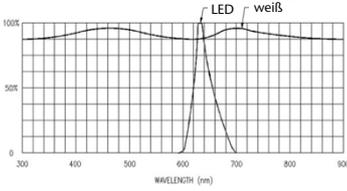
Leuchtstoffröhre

380 480 580 680 780

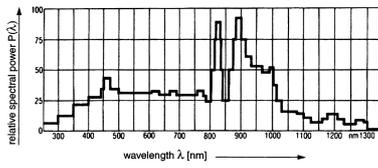
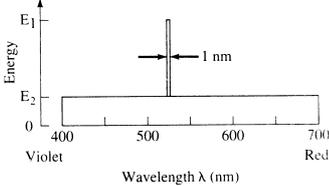
G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 6

Chromaticity ("Chromatizität")

- Monochromatisches Licht = genau 1 Wellenlänge (Laser)**

- Achromatisches Licht = alle Wellenlängen ungefähr gleich stark → weiß**




G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 7

- Chromatisches Licht: ganzes Spektrum, eine dominante Wellenlänge (farbiges Licht)**


- Wesentliche, beschreibende Charakteristika:**
 - Dominante Wellenlänge = "Farbe", *Hue*
 - Verhältnis E_1 / E_2 = Anteil des weißen Lichtes = Reinheit, *Sättigung, Saturation*
 - Fläche unter der Spektralkurve = Helligkeit = *Intensität, Brightness*

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 8

Das Licht auf dem Weg ... (das *Reflectance Spectrum*)

The diagram illustrates the process of color perception. A person is holding a red apple. Light from the sun (Illuminant D65) hits the apple. The apple's surface reflects light, which is captured by a camera. The resulting image is a red apple. The diagram includes three spectral graphs:

- Reflectance Spectrum:** A graph showing the reflectance of the apple's surface. The x-axis is wavelength (nm) from 500 to 700. The y-axis is reflectance. The curve is low until about 550 nm, then rises sharply to a plateau of 1.0 (100% reflectance) from 600 nm to 700 nm.
- Illuminant D65:** A graph showing the spectral power distribution of the sun. The x-axis is wavelength (nm) from 500 to 700. The y-axis is spectral power. The curve is broad and relatively flat, peaking around 550 nm.
- Spectral Power Distribution:** A graph showing the spectral power distribution of the light reflected from the apple. The x-axis is wavelength (nm) from 500 to 700. The y-axis is spectral power. The curve is low until about 550 nm, then rises sharply to a peak around 650 nm, matching the reflectance spectrum of the apple.

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 9

Neon Lamp

The diagram illustrates the process of color perception under a neon lamp. A person is holding a red apple. Light from a neon lamp (Illuminant F1) hits the apple. The apple's surface reflects light, which is captured by a camera. The resulting image is a red apple. The diagram includes four spectral graphs:

- Reflectance Spectrum:** A graph showing the reflectance of the apple's surface. The x-axis is wavelength (nm) from 500 to 700. The y-axis is reflectance. The curve is low until about 550 nm, then rises sharply to a plateau of 1.0 (100% reflectance) from 600 nm to 700 nm.
- Illuminant F1:** A graph showing the spectral power distribution of the neon lamp. The x-axis is wavelength (nm) from 500 to 700. The y-axis is spectral power. The curve shows several sharp peaks in the blue and green regions, with a broad peak in the red region.
- Spectral Power Distribution Under F1:** A graph showing the spectral power distribution of the light reflected from the apple under the neon lamp. The x-axis is wavelength (nm) from 500 to 700. The y-axis is spectral power. The curve shows several sharp peaks in the blue and green regions, with a broad peak in the red region, matching the reflectance spectrum of the apple.
- Spectral Power Distribution Under D65:** A graph showing the spectral power distribution of the light reflected from the apple under the sun. The x-axis is wavelength (nm) from 500 to 700. The y-axis is spectral power. The curve is low until about 550 nm, then rises sharply to a peak around 650 nm, matching the reflectance spectrum of the apple.

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 10

Warum ist der Wald grün?

- Weil der grüne Teil des Spektrums nicht absorbiert wird:
- Würden Pflanzen alle Wellenlängen gleich gut absorbieren, sähe das so aus:

A Absorption spectra of carotenoids, chlorophyll, and anthocyanin. The y-axis is 'Relative extinguishing molar coefficient' and the x-axis is 'Wavelength, nm'. Carotenoids (orange) peak at ~450 nm, Anthocyanin (magenta) at ~530 nm, and Chlorophyll (green) at ~660 nm.

B Average crown reflectance spectra. The y-axis is 'Relative reflectance' and the x-axis is 'Wavelength, nm'. Tropical trees (dark green) and Maples (light green) both show high reflectance in the 500-650 nm range, with a dip at ~660 nm.

C Human spectral sensitivity at bright light (Photopic sensitivity). The y-axis is 'Relative sensitivity' and the x-axis is 'Wavelength, nm'. The curve peaks at ~555 nm.

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 11

Woher kommen die Farben?

- Kennen Sie diese Szene?
 - "There is no spoon"

The Matrix

- Merke: **ES GIBT KEINE FARBEN!**
 - In der physikalischen Welt gibt es nur Spektren!
 - Farben entstehen erst im Auge bzw. im Kopf!

Observer
Stimulus
rot

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 12

Das Auge

The diagram illustrates the visual pathway. Light from the apple enters the eye through the cornea and lens, hitting the retina. The retina contains rods and cones, which connect to bipolar cells, which in turn connect to ganglion cells. The optic nerve carries the signals to the Lateral Geniculate Nucleus (LGN) in the brain, which then sends signals to the Visual Cortex. The brain scan shows the Right LGN and Left LGN, with the LGN defined as the Lateral Geniculate Nucleus. The Visual Cortex is also indicated. Below the brain scan, there are images of rods and cones, and a diagram showing the distribution of cones and rods in the retina.

Rods Cones Distribution of Cones and Rods

LGN = Lateral Geniculate Nucleus Visual Cortex

Right LGN Left LGN

Ganglion Horizontal Cells Bipolar Cells Rod Cone

Amacrine Cells Retina Optic Nerve

Light Light

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 13

Human Spectral Sensitivity

The graph shows the spectral sensitivity of the human eye. The x-axis represents Wavelength (nm) from 400 to 700. The y-axis represents Lumens per watt from 0 to 1500. Two curves are shown: a taller, narrower curve for scotopic vision (dark adapted) peaking at 507 nm with 1700 lumens per watt, and a shorter, wider curve for photopic vision (light adapted) peaking at 555 nm with 683 lumens per watt.

- Nachts: **scotopic** (Rods, Stäbchen)
- Tags: **photopic** (Cones, Zäpfchen)

507 nm 1700 lumens per watt

555 nm 683 lumens per watt

Scotopic vision (dark adapted)

Photopic vision (light adapted)

Lumens per watt

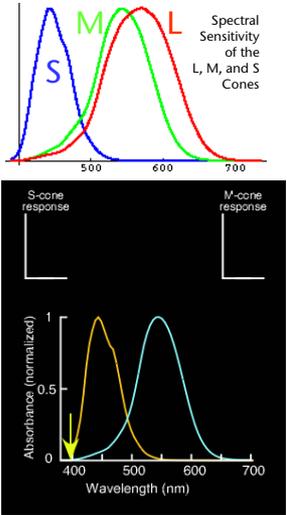
Wavelength (nm)

- Daher: "Nachts sind alle Katzen grau."

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 14

Cone spectral sensitivity

- 3 Arten von Cones: L-, M-, S-Cones; steht für "long", "medium", "short" wavelength
- Jede Cone-Art hat eine eigene Empfindlichkeitskurve; Maxima entsprechen **ungefähr** Gelb, Grün, Blau
- Erstaunlich:
 - Manche Tiere sehen UV- oder IR-Licht
 - Der Fangschreckenkrebs hat 8 verschiedene Cones im sichtbaren Bereich und 4 im UV!
 - Hund und Katze haben nur 2 Cone-Arten (blau & rot)
 - Es gibt vermutlich **Tetrachromaten!**
 - (Wenn, dann nur Frauen ...)



Spectral Sensitivity of the L, M, and S Cones

S-cone response

M-cone response

Absorbance (normalized)

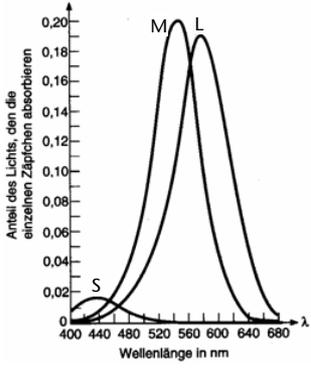
Wavelength (nm)

Animation

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 15

Der wahrgenommene Stimulus

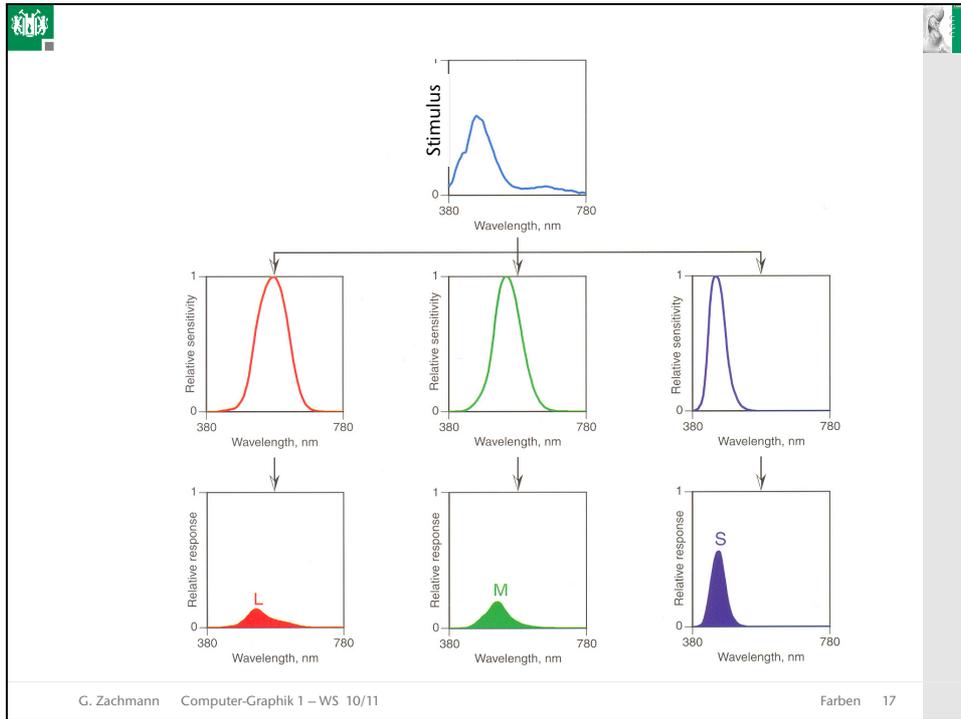
- Die "wahren" Empfindlichkeitskurven
- Der "Output" (*Response*) eines Cones:
 - Sei $P(\lambda)$ das Spektrum des einfallenden Lichtes
 - Sei $w(\lambda)$ die Empfindlichkeitskurve
 - Dann ist die Antwort des Cones:

$$\Phi = k \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} w(\lambda) \cdot P(\lambda)$$


Anteil des Lichts, den die einzelnen Zapfen absorbieren

Wellenlänge in nm

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 16

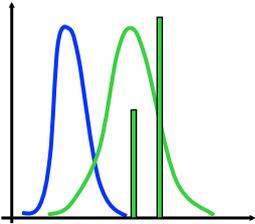


- Achtung: Cones können keine Farben "sehen"!
- Beispiel:
 - Verschiedene Wellenlänge, aber trotzdem gleiche Response
 - Wg. verschiedener Intensität
- Aber: mit mehr Cone-Arten kann man mehr Farben unterscheiden!
- Beispiel:
 - Stimulus wie oben
 - Verschiedene Cones haben verschiedene Response

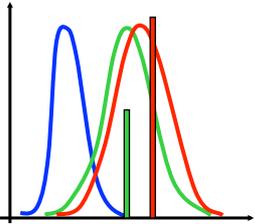
G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 18

Farbenblindheit

- Klassischer Fall: eine Cones-Art fehlt
- Z.B.: "rote" Cones fehlen



Gleiche Response



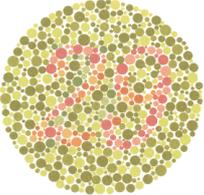
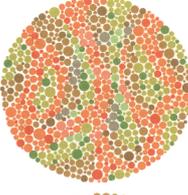
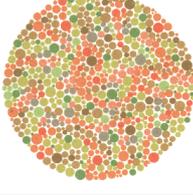
Wird differenziert

- Folge: Rot-Grün-Blindheit
- Häufigkeit:
 - 99% aller Farbsehschwächen, 10% aller Menschen sind rot-grün-blind
 - Davon 90% Männer, 10% Frauen

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 19

Test zur Farbenblindheit

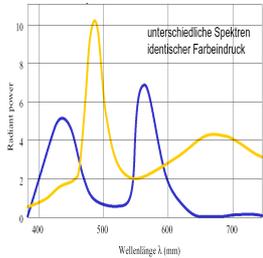
1. Beispiel:
 - Normalsichtige sehen hier "29"
 - Rot-grün-Blinde sehen hier "70"
2. Beispiel:
 - Normalsichtige sehen hier nichts
 - Rot-grün-Blinde sehen hier "5"
3. Beispiel:
 - Normalsichtige: nichts
 - Rot-grün-Blinde: eine Art Irrweg von links nach rechts

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 20

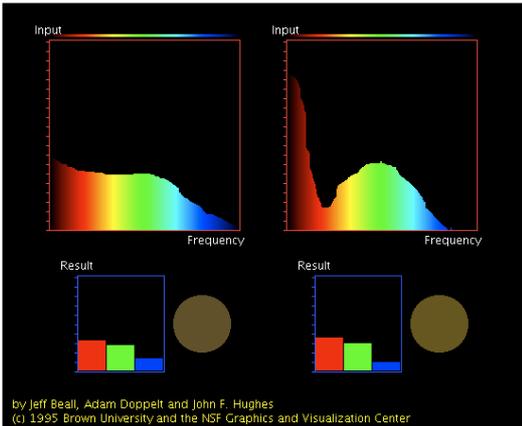
Metamere

- Merke: wir sind alle "farbenblind"!!
- Man kann unendlich viele Paare von Spektren konstruieren, so daß die selbe Response für alle 3 Cones entsteht
- Solch ein Paar von Spektren heißt **Metamer**
- Hintergrund:
 - Die Menge aller Spektren ist ein unendlich-dim. Raum
 - Die Wahrnehmung durch 3 Sensor-Arten (Cones) stellt eine Projektion auf einen 3-dim. Raum dar!
 - Folge: man verliert Information
- Das Gute daran: nur so ist es möglich, mit nur 3 Primärfarben im Monitor (fast) alle Farbeindrücke zu "erzeugen", die wir sehen können!



G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 21

Applet



by Jeff Beall, Adam Doppelt and John F. Hughes
(c) 1995 Brown University and the NSF Graphics and Visualization Center

http://www.cs.brown.edu/exploratories/freeSoftware/catalogs/color_theory.html

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 22