


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

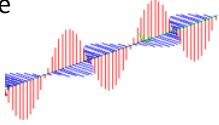
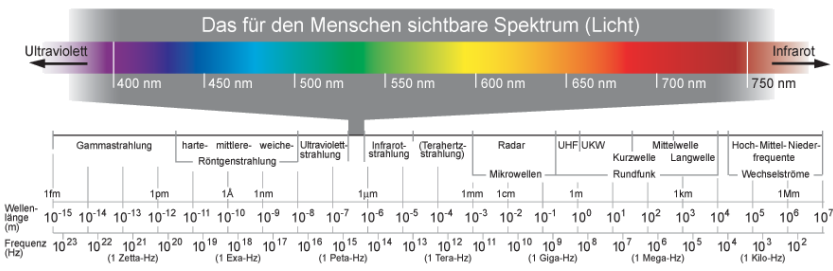
Literatur

- 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

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

Wellen- länge (m) | 1fm | 1pm | 1Å | 1nm | 1µm | 1mm | 1cm | 1m | 1km | 1Mm

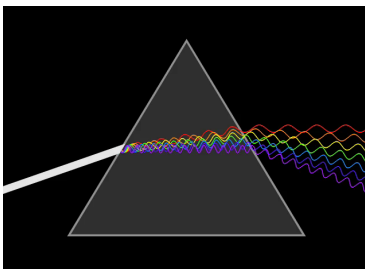
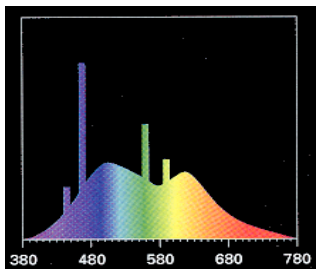
Frequenz (Hz) | 10^{23} | 10^{22} | 10^{21} | 10^{20} | 10^{19} | 10^{18} | 10^{17} | 10^{16} | 10^{15} | 10^{14} | 10^{13} | 10^{12} | 10^{11} | 10^{10} | 10^9 | 10^8 | 10^7 | 10^6 | 10^5 | 10^4 | 10^3 | 10^2

(1 Zetta-Hz) | (1 Exa-Hz) | (1 Peta-Hz) | (1 Tera-Hz) | (1 Giga-Hz) | (1 Mega-Hz) | (1 Kilo-Hz)

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

Lichtquellen

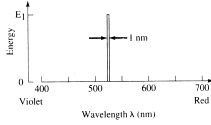
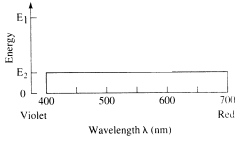
- Licht entsteht durch Emission von elektromagnetischer Strahlung
 - Normalerweise durch hohe Temperatur, z.B.: Sonne, Kerze, schwarzer Strahler, ...
 - Ausnahmen: Fluoreszenz, Laser, ...
- Eine Lichtquelle hat (fast) immer ein komplettes Spektrum:

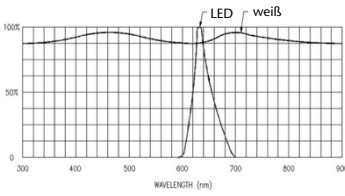



Leuchtstoffröhre

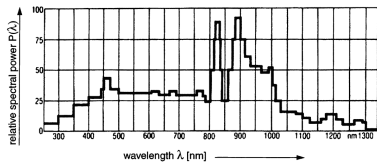
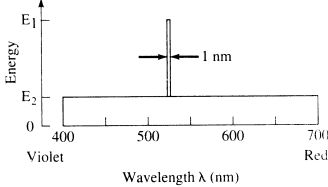
G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 6

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 interaction of light with a red apple. A sun icon at the top emits a yellow arrow representing light towards the apple. A person is shown holding the apple. Three spectral graphs are included:

- Reflectance Spectrum:** A red line graph showing the apple's reflectance across wavelengths from 500 to 700 nm. The curve is low in the blue and green regions and rises sharply in the red region, reaching a plateau around 650 nm.
- Illuminant D65:** A blue line graph showing the spectral power distribution of natural daylight. It has a broad, continuous spectrum with a peak around 550 nm. A color bar below the graph shows the visible spectrum from violet to red.
- Spectral Power Distribution:** A red line graph showing the light spectrum after reflection from the apple. It follows the shape of the apple's reflectance spectrum, with most power concentrated in the red region.

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

Neon Lamp


The diagram illustrates the interaction of light from a neon lamp with a red apple. A neon lamp icon at the top emits a blue arrow representing light towards the apple. A person is shown holding the apple. Four spectral graphs are included:

- Reflectance Spectrum:** A red line graph showing the apple's reflectance across wavelengths from 500 to 700 nm. The curve is low in the blue and green regions and rises sharply in the red region, reaching a plateau around 650 nm.
- Illuminant F1:** A blue line graph showing the spectral power distribution of a neon lamp. It consists of several sharp, discrete peaks at specific wavelengths, with the most prominent ones in the blue and green regions.
- Spectral Power Distribution Under F1:** A red line graph showing the light spectrum after reflection from the apple under the neon lamp. It shows the discrete peaks of the neon lamp filtered by the apple's reflectance curve, resulting in a spectrum with peaks primarily in the red region.
- Spectral Power Distribution Under D65:** A red line graph showing the light spectrum after reflection from the apple under natural daylight. It follows the shape of the apple's reflectance spectrum, with most power concentrated in the red region.

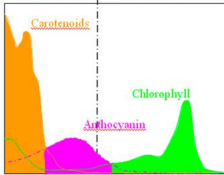
G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 10

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:

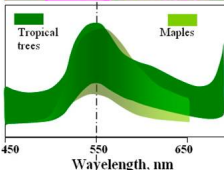


A Relative extinguishing molar coefficient



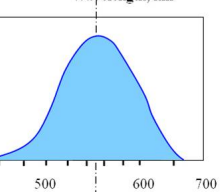
Absorption spectra of carotenoids, chlorophyll, anthocyanin

B Relative reflectance



Average crown reflectance spectra

C Relative sensitivity



Human spectral sensitivity at bright light (Photopic sensitivity)

Wavelength, nm

500 550 600 650 700

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!



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

Das Auge

Rods Cones Distribution of Cones and Rods

LGN = Lateral Geniculate Nucleus Visual Cortex

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

Human Spectral Sensitivity

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

507 nm 1700 lumens per watt

555 nm 683 lumens per watt

Scotopic vision (dark adapted)

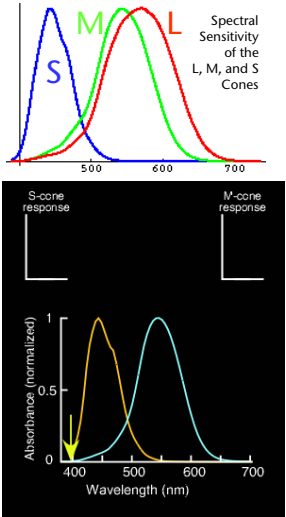
Photopic vision (light adapted)

- 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)

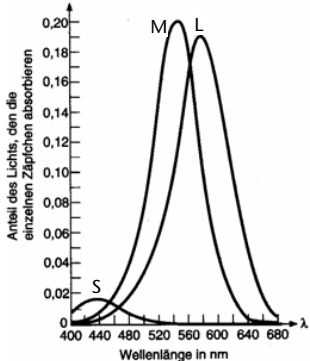
Wavelength (nm)

Animation

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

Der wahrgenommene Stimulus

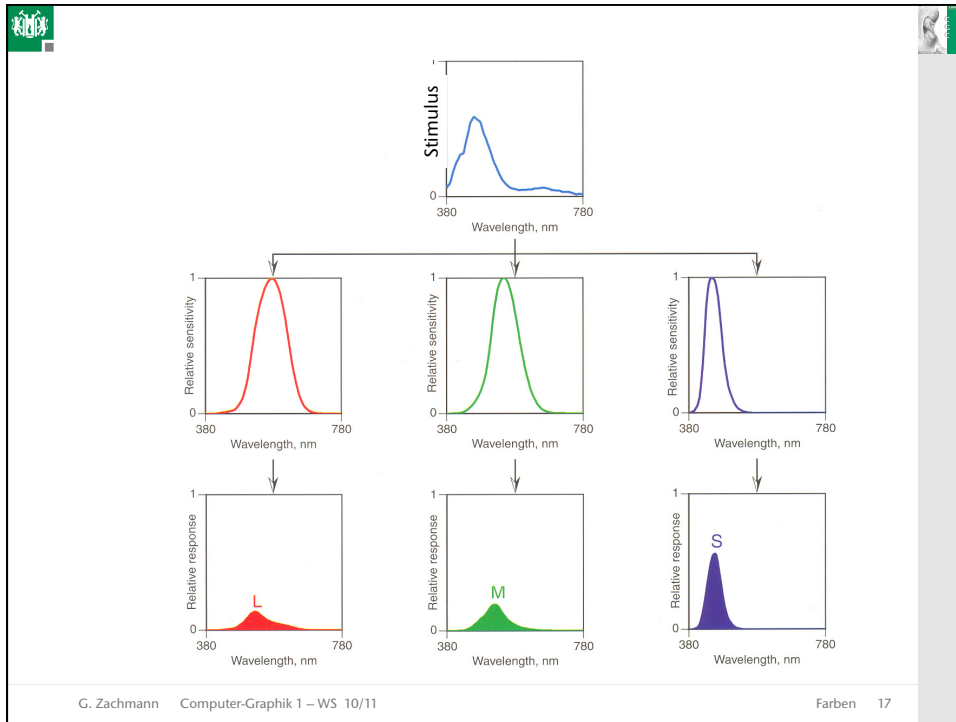
- Die "wahren" Empfindlichkeitskurven
- Der "Output" (*Response*) eines Cones:
 - Sei $P(\lambda)$ das Spektrum des einfallenden Lichtes
 - Sei $w(\lambda)$ die Empfindlichkeitskurve
 - Dann ist die Antwort des Cones:

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


Anteil des Lichts, den die einzelnen Zapfen absorbieren

Wellenlänge in nm

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

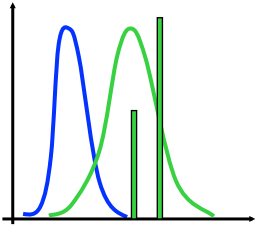


- Achtung: Cones können keine Farben "sehen"!
- Beispiel:
 - Verschiedene Wellenlänge, aber trotzdem gleiche Response
 - Wg. verschiedener Intensität
- Aber: mit mehr Cone-Arten kann man mehr Farben unterscheiden!
- Beispiel:
 - Stimulus wie oben
 - Verschiedene Cones haben verschiedene Response

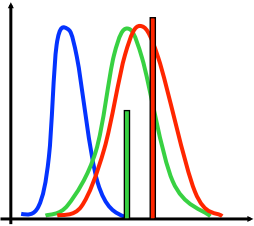
G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 18

Farbenblindheit

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



Gleiche Response



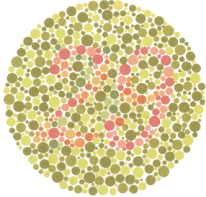
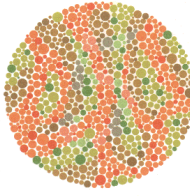
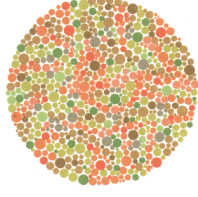
Wird differenziert

- 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

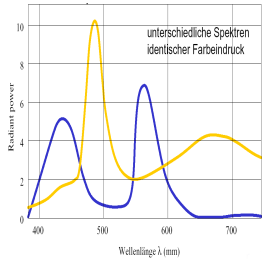
- Beispiel:
 - Normalsichtige sehen hier "29"
 - Rot-grün-Blinde sehen hier "70"
- Beispiel:
 - Normalsichtige sehen hier nichts
 - Rot-grün-Blinde sehen hier "5"
- Beispiel:
 - Normalsichtige: nichts
 - Rot-grün-Blinde: eine Art Irrweg von links nach rechts

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

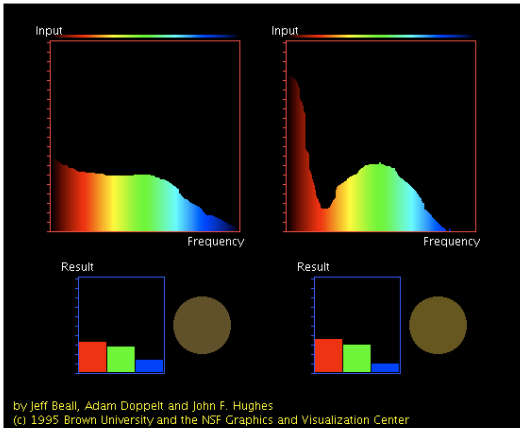
Metamere

- 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



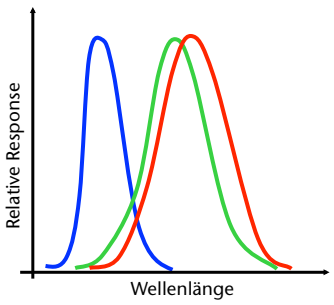
by Jeff Beall, Adam Doppelt and John F. Hughes
(c) 1995 Brown University and the NSF Graphics and Visualization Center

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

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

Das Fundamentalproblem der Farben

- Man könnte folgende Idee haben:
 - Wähle Phosphore im Monitor so, daß diese exakt dasselbe Spektrum abstrahlen wie die Empfindlichkeitskurven der menschlichen Cones
 - Verwende diese Spektren direkt zur Erzeugung verschiedener Farben
- Leider: **DAS KLAPPT NICHT**



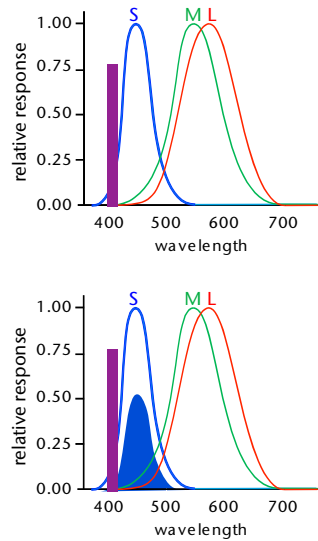
Relative Response

Wellenlänge

Farben 24

Gegenbeispiel

- Versuche folgenden Stimulus mit den 3 o.g. Spektren zu erzeugen:
 - Synthese: Integriere den geg. Stimulus mit den 3 Empfindlichkeitskurven
 - Ergibt hier: 0.5·S-Kurve
 - Monitor: "S"-Pixel mit halber Stärke anschalten
 - Analyse: im Auge werden die anderen beiden Cones **doch** erregt
 - Ergibt **andere** Farbe!
 - Grund: die Kurven überlappen sich, sind also **korreliert** (gekoppelt)!



relative response

wavelength

Farben 25

Entwicklung standardisierter Farbräume

- Quantitative und wiederholbare Bestimmung von Farben zwingend notwendig in vielen Industriezweigen:
 - Fernsehen, Druck, Farbenhersteller, Leuchtenhersteller, ...
- Wurde ca. 1920 begonnen von der CIE
 - = Commission Internationale de l'Eclairage
- Erster Standard-Farbraum 1931 von der CIE: CIEXYZ-Farbraum

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 26

Linearkombinationen und Gleichheit von Lichtquellen

- Seien

$$s(\lambda), m(\lambda), l(\lambda) : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$$
 die Response-Kurven der S-, M-, und L-Sensoren
- Annahme:
 - Wir leuchten mit 3 Primärlichtquellen R, G, B auf eine perfekt weiße, perfekt diffuse Fläche
 - Bei voller Leuchtstärke gelangen davon die Spektren

$$R(\lambda), G(\lambda), B(\lambda)$$
 ins Auge
 - Diese Spektren können "gedimmt" werden mit Skalaren

$$r, g, b \in [0, 1]$$
 (z.B. durch teilweise Abschattung)
- Welche Signalstärke kommt jeweils von den Sensoren ins Gehirn?

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 27

- Sei A das Misch-Spektrum von der weißen, diffusen Fläche:

$$A(\lambda) = r \cdot R(\lambda) + g \cdot G(\lambda) + b \cdot B(\lambda)$$

- Erinnerung: Sensoren liefern die "gewichtete Fläche"
- Sei S_A die Antwort des S-Sensors auf das Spektrum A :

$$\begin{aligned} S_A &= \int s(\lambda)A(\lambda)d\lambda \\ &= \int s(\lambda)(rR(\lambda) + gG(\lambda) + bB(\lambda))d\lambda \\ &= r \int s(\lambda)R(\lambda)d\lambda + g \int s(\lambda)G(\lambda)d\lambda + b \int s(\lambda)B(\lambda)d\lambda \\ &= rS_R + gS_G + bS_B \end{aligned}$$

- Analog für M_A und L_A

- Zusammen:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} S_A \\ M_A \\ L_A \end{pmatrix} &= \underbrace{\begin{pmatrix} S_R & S_G & S_B \\ M_R & M_G & M_B \\ L_R & L_G & L_B \end{pmatrix}}_M \cdot \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix} \\ &= M \cdot \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix} \end{aligned}$$

- Matrix M beschreibt also eine Art "Sensor-Abbildung", nämlich von den physikalischen Größen r, g, b (der "Skalierung" der Primärlichtquellen) auf die physiologischen Größen S_A, M_A, L_A (den Sensor-Outputs)

- Bemerkung: die Matrix

$$M = \begin{pmatrix} S_R & S_G & S_B \\ M_R & M_G & M_B \\ L_R & L_G & L_B \end{pmatrix}$$
 ist (für ein bestimmtes Auge) konstant!
- Bemerkung: für eine bestimmte Sensorantwort (S_C, M_C, L_C) ist die notwendige Skalierung r, g, b unserer (fest) gewählten Primärlichtquellen eindeutig bestimmt
 - Spektrum C und Spektrum $r \cdot R + g \cdot G + b \cdot B$ sind **Metamere!**
- Achtung: keine Garantie, daß diese $r, g, b \in [0, 1]$ wären!!

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 30

Definition des Begriffs "Farbe"

- Definition **Farbe**:
Sei C eine Lichtquelle mit irgendeinem Spektrum.
Mit der "**Farbe C**" meinen wir die Sensorantwort (S_C, M_C, L_C) ,
m.a.W., die **Farbe C** ist eigtl. nur eine **Kurzschreibweise** für den Vektor (S_C, M_C, L_C) !
- Mit dieser Kurzschreibweise kann man nun die vorige Formel

$$S_C = rS_R + gS_G + bS_B$$
 so schreiben:

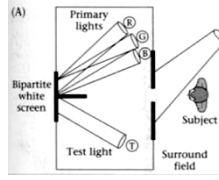
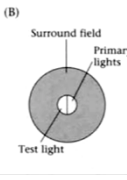
$$C = rR + gG + bB$$
- **Achtung**: C, R, G und B sind hier in Wahrheit Sensor-Output-Vektoren, und das "=" ist ein in Wahrheit ein "=" zwischen Vektoren!

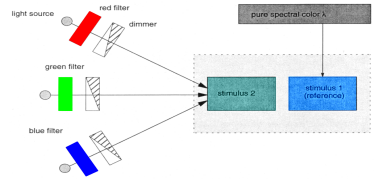
G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 31

Das Grassmann'sche Farbmischexperiment [1853]

- Gegeben:
 - Primärlichtquellen R, G, B
 - Monochromatische Testlichtquelle C_λ mit genau der Wellenlänge λ
 - User soll mit den Reglern r, g, b die Farbe C_λ matchen, d.h.

$$C_\lambda = r_\lambda R + g_\lambda G + b_\lambda B$$
- Definition: die Werte $r_\lambda, g_\lambda, b_\lambda$ nennt man **Tristimulus-Werte** (zu festgelegten R, G, B !)



G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11
Farben 33

- Beobachtung 1:
 - Das geht mit (fast) allen C_λ (und Helligkeiten von C_λ), vorausgesetzt:
 - R, G, B sind halbwegs weit über das Spektrum verteilt; und
 - keine der 3 Primärfarben läßt sich durch Kombination der anderen beiden erzeugen
- Problem: man kann so **nicht alle** Farben erzeugen!

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11
Farben 34

- Trick / Beobachtung: es klappt aber, wenn man zulässt, daß auch bei C_λ noch etwas von R, G, B beigemischt wird!
- M.a.W.:

$$C_\lambda = rR + gG + bB \quad \text{oder}$$

$$C_\lambda + rR = gG + bB \quad \text{oder}$$

$$C_\lambda + gG = rR + bB \quad \text{oder}$$

$$C_\lambda + bB = rR + gG$$
- Mathematische Schreibweise:

$$C_\lambda = -rR + gG + bB$$
- Achtung: solche negativen Koeffizienten haben keine physikalische Entsprechung! (man kann Licht nicht voneinander abziehen)

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 35

Beispiel

- Die CIE hat sehr viele Tests mit vielen Probanden (engl. *subjects*) gemacht
- Resultat bei monochromatischen Primärlichtquellen $R_{700}, G_{546}, B_{436}$ (700, 546, 436 nm):

- Beobachtung: egal, welche Primärlichtquellen man wählt, eine der Kurven r, g, b wird immer irgendwo negativ

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 36

- Beobachtung 2: verdoppelt man die Intensität der Testlichtquelle C_λ , dann muß man auch die Intensität der Primärlichtquellen verdoppeln (indem man die Tristimulus-Werte verdoppelt), d.h.

$$2C_\lambda = (2r)R + (2g)G + (2b)B$$
- Beobachtung 3: 2 Primärfarben alleine genügen nicht
- Beobachtung 4: ändert man stetig die Intensität einer der 3 Primärlichtquellen und hält die beiden anderen fest, so ändert sich die Mischfarbe stetig

▪ Bemerkung: o.g. Beobachtungen sind eigtl. klar nach unseren Betrachtungen zur Linearkombination von Lichtquellen / Farben

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 37

Die Grassmann'schen Gesetze

- Der (menschlich wahrnehmbare) Farbraum ist ein **stetiger, 3-dimensionaler Vektorraum** mit der Basis R, G, B , d.h.

$$\forall C : C = rR + gG + bB$$
- Die Gleichheits-Relation zwischen Farben ist **transitiv**, d.h.

$$C_1 = C_2 \wedge C_2 = C_3 \Rightarrow C_1 = C_3$$

und zwar völlig unabhängig von den Spektren der Lichtquellen, die die Stimulus-Vektoren C_1, C_2, C_3 hervorgerufen haben.

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 38

Exkurs: Prokudin-Gorskii

- Russischer Photograph um 1900
- Entwickelte Farb-Photoapparat und Farb-Projektor
 - 3 Einzelbilder rel. schnell hintereinander mit verschiedenen Farbfiltern

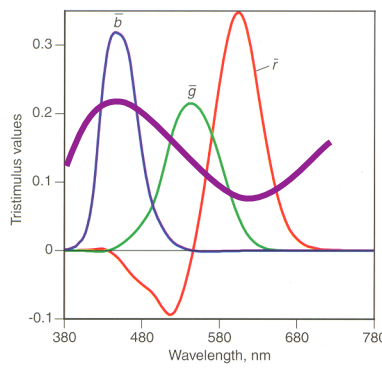


<http://www.loc.gov/exhibits/empire/>

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 39

Was macht man mit den CIE-Kurven?

- Sei Spektrum X gegeben
- Berechne die Tristimulus-Werte mittels der 3 Kurven (multiplizieren & integrieren)
- Skaliere mit diesen 3 Werten die 3 Primärlichtquellen (700, 546, 436 nm)
- Man erhält ein Metamer zu X (die gleiche Farbe)
- Achtung: eine der 3 Tristimulus-Werte könnte negativ sein



G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 40

Basiswechsel

- Folge der Grassmann'schen Gesetze:
 - Man kann (fast) jedes beliebige Tripel von Primärlichtquellen (= Basis) wählen
 - Hat man Farbe bzgl einer Basis gegeben, so kann man diese in jede andere Basis umrechnen (= Basistransformation)
- Beispiel:
 - Orig. Basis R, G, B , neue Basis U, V, W , wobei

$$U = u_1R + u_2G + u_3B, \quad V = \dots$$

m.a.W.

$$\begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \\ v_1 & v_2 & v_3 \\ w_1 & w_2 & w_3 \end{pmatrix}}_M \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 41

- Nun kann man die Farbe C vom RGB- in den UVW-Farbraum umrechnen:

$$C = uU + vV + wW = rR + gG + bB$$
- Also

$$C = (uvw) \begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix} = (uvw)M \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = (rgb) \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

$$(uvw) = (rgb)M^{-1}$$

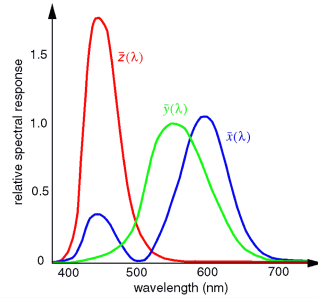
G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 42

Der CIEXYZ-Farbraum

- Negative Tristimulus-Werte sind lästig!
- Ziel: Farbraum XYZ, so daß Tristimulus-Werte überall positiv
- Lösung: wähle geeignete , überall positive "Beobachterfunktionen" (*matching curves*), und damit (gedachte, hypothetische!) Primärlichtquellen
- Diese **Standard-Beobachter-Funktionen** sind:

$$\bar{x}(\lambda) = +2.36r(\lambda) - 0.515g(\lambda) + 0.005b(\lambda)$$

$$\bar{y}(\lambda) = -0.89r(\lambda) + 1.426g(\lambda) + 0.014b(\lambda)$$

$$\bar{z}(\lambda) = -0.46r(\lambda) + 0.088g(\lambda) + 1.009b(\lambda)$$


G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 43

- Nachteil: die zu den Beobachterkurven gehörigen, gedachten Primärspektren sind nicht mehr physikalisch realisierbar!
- Die Standard-Beobachterfunktionen wurden von der CIE tabellarisch festgelegt
- Damit kann man die Tristimulus-Werte ausrechnen:



$$X = k \int \bar{x}(\lambda) \cdot P(\lambda)$$

$$Y = k \int \bar{y}(\lambda) \cdot P(\lambda)$$

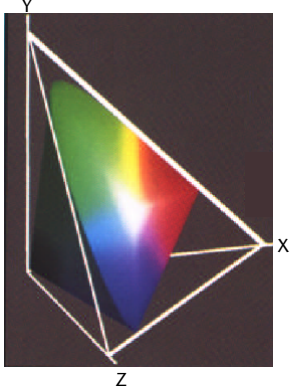
$$Z = k \int \bar{z}(\lambda) \cdot P(\lambda)$$

mit Normierungsfaktor k so, dass Weiß einen Y -Wert = 100 hat

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 44






- Der Farbraum:
 - Achsen X, Y, Z
 - Weiterer Nachteil: nicht alle (positiven) Punkte entsprechen tatsächlich Farben!
- In der Praxis
 - liegt die XYZ-Spektralwertkurve tabellarisch für Standardbeobachter vor
 - wird $P(\lambda)$ als Treppenfunktion aus Spektralbändern der Breite $\Delta\lambda = 5-10$ nm approximiert
- Erinnerung: XYZ sind für alle Wellenlängen positiv
 - (Weil Beobachterkurven [*matching curves*] überall positiv sind, und physikalisches Spektrum sowieso.)



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

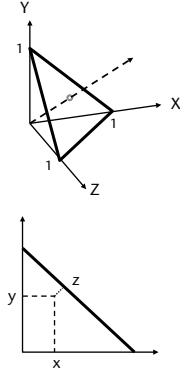
Farben 45

Das CIE-Chromatizitätsdiagramm

- Der XYZ-Raum ist unhandlich
- Beobachtung aus den Grassmann'schen Experimenten:
 - (X,Y,Z) und $(\alpha X, \alpha Y, \alpha Z)$, $\alpha > 0$, haben denselben Farbton (*hue*) und verschiedene Helligkeit (*luminance*)
- Oft interessiert nur der Farbton
- Lösung:
 1. Projektion auf Ebene $X+Y+Z=1$:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \frac{1}{X + Y + Z} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$
 2. Orthogonale Projektion auf XY-Ebene: da $x+y+z=1$, reicht die Angabe von (x,y)

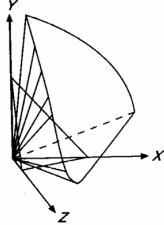
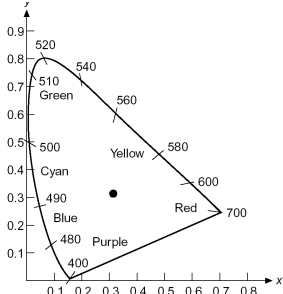
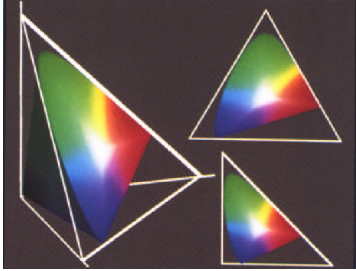


G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11

Farben 46

Eigenschaften

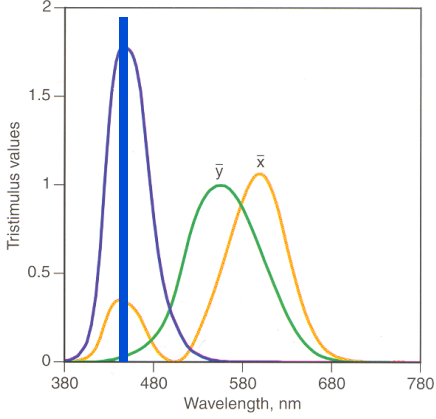
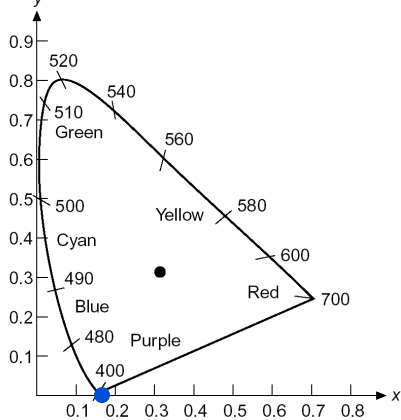
- (X,Y,Z) und $(\alpha X, \alpha Y, \alpha Z)$, $\alpha > 0$, haben dieselben Chromazitätskoordinaten (x,y)
- Geraden in XYZ bleiben Geraden in xy
- Die typ. "Hufeisenform" kommt von der Form der Beobachterkurven (*matching curves*)
- Reine Farben liegen auf dem Rand

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 48

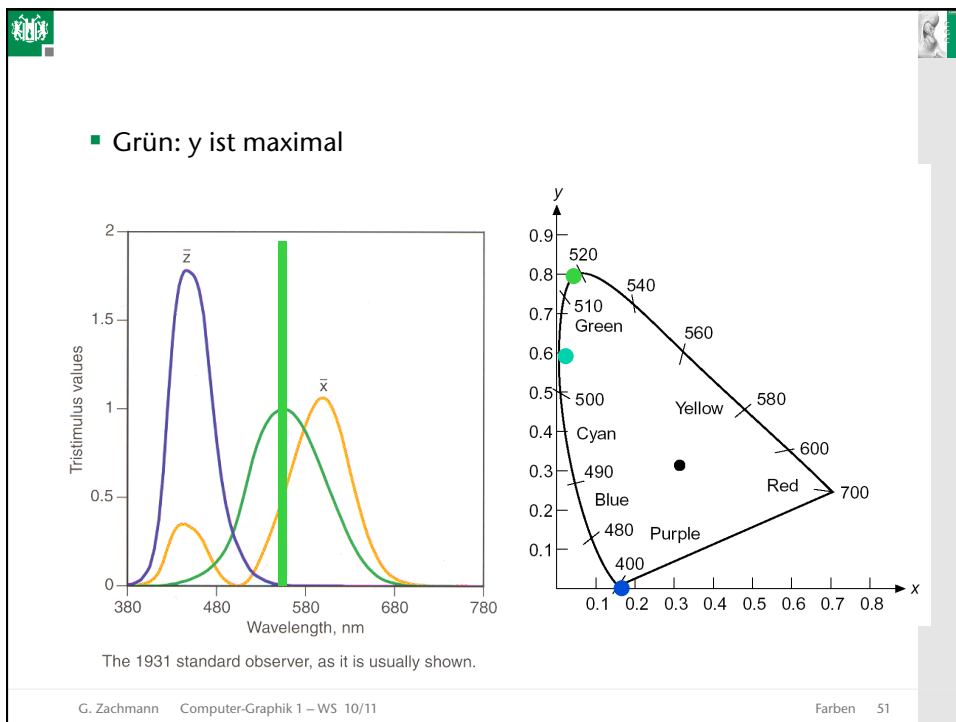
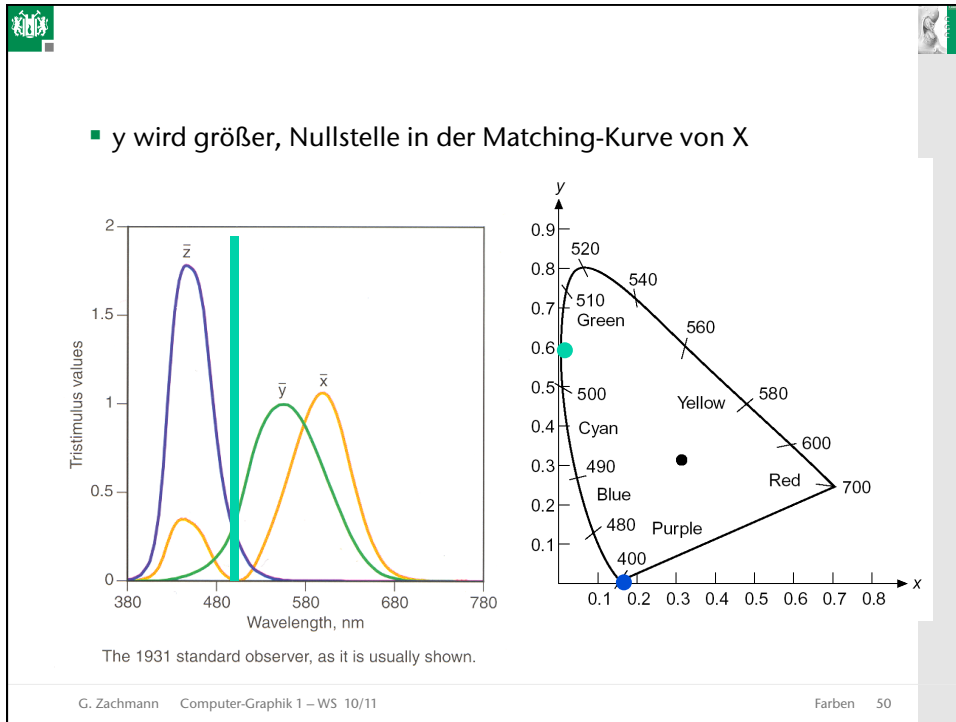
Plausibilitätsbetrachtung

- Blau: Z groß, X nicht 0 wegen "Höcker"

The 1931 standard observer, as it is usually shown.

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 49



http://www.pfk.ff.vu.lt/cie/1_CIE31_Chromaticity_Diagram.htm
<http://www.antigrain.com/doc/introduction/introduction.agdoc.html#toc0001>
<http://www.handprint.com/HP/WCL/color6.html>

- Gelb: x & y gleich groß, z=0, deswegen auf Gerade x+y=1

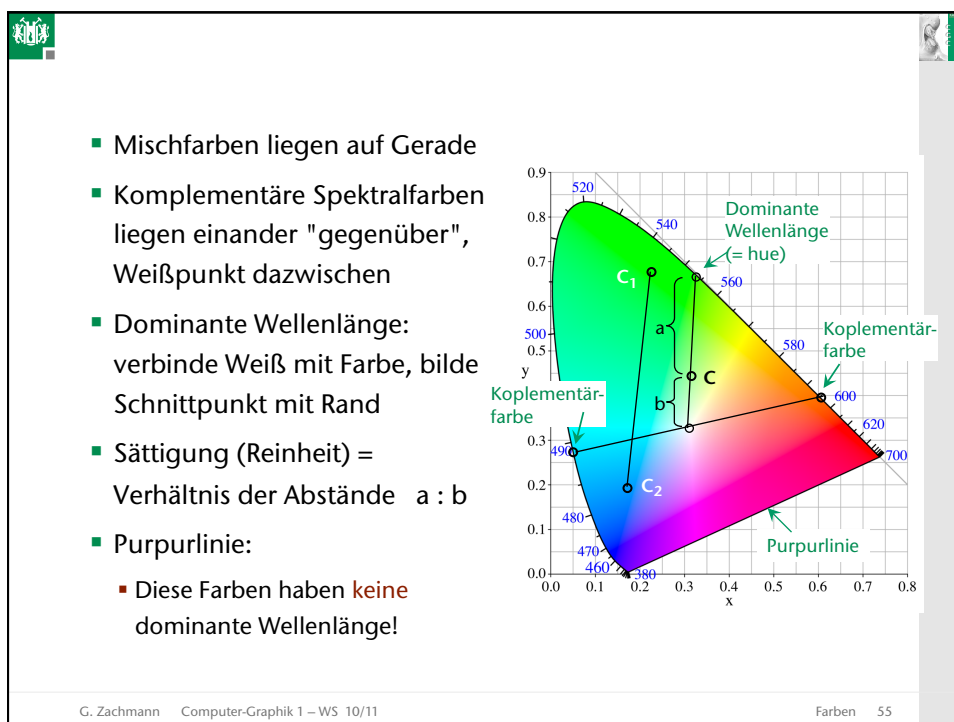
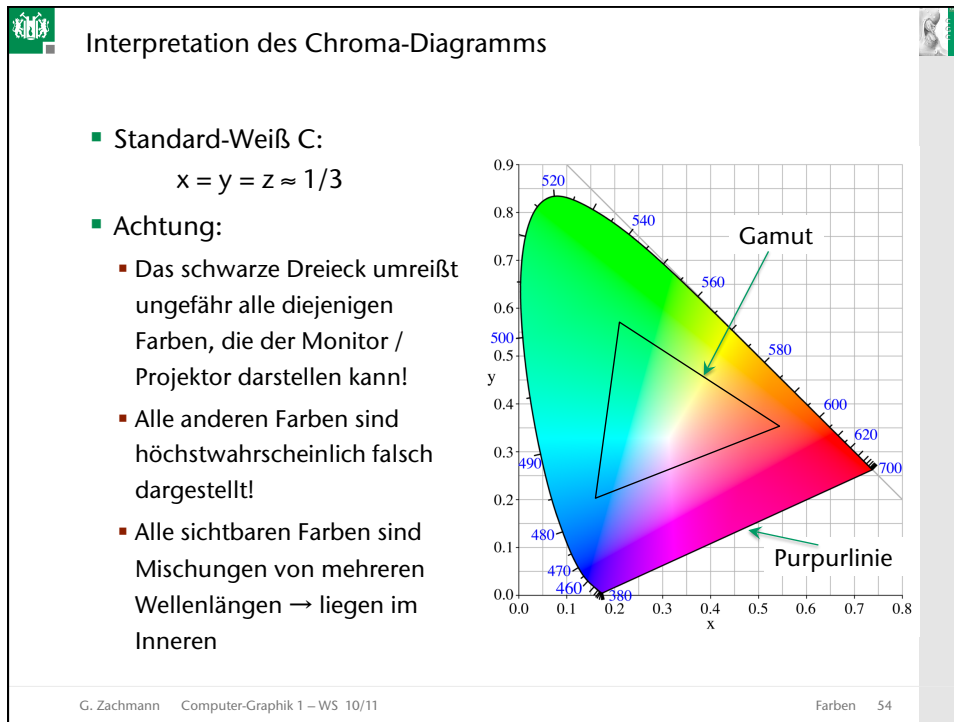
The 1931 standard observer, as it is usually shown.

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 52

- Rot: x relativ groß, y aber nicht 0



The 1931 standard observer, as it is usually shown.

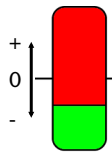
G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 53



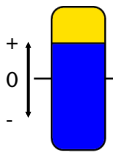
Das Gegenfarbenmodell

- Helmholtz (u.a.) postulierte die **Tristimulus-Theorie**, d.h., das LMS- (RGB-) Farbmodell
- Etliche Phänomene konnte man damit nicht erklären
- Hering (1874) postulierte das "**Gegenfarbenmodell**" (*Opponent Colors*)

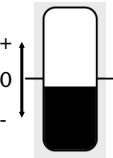





Rot/Grün-Rezeptor



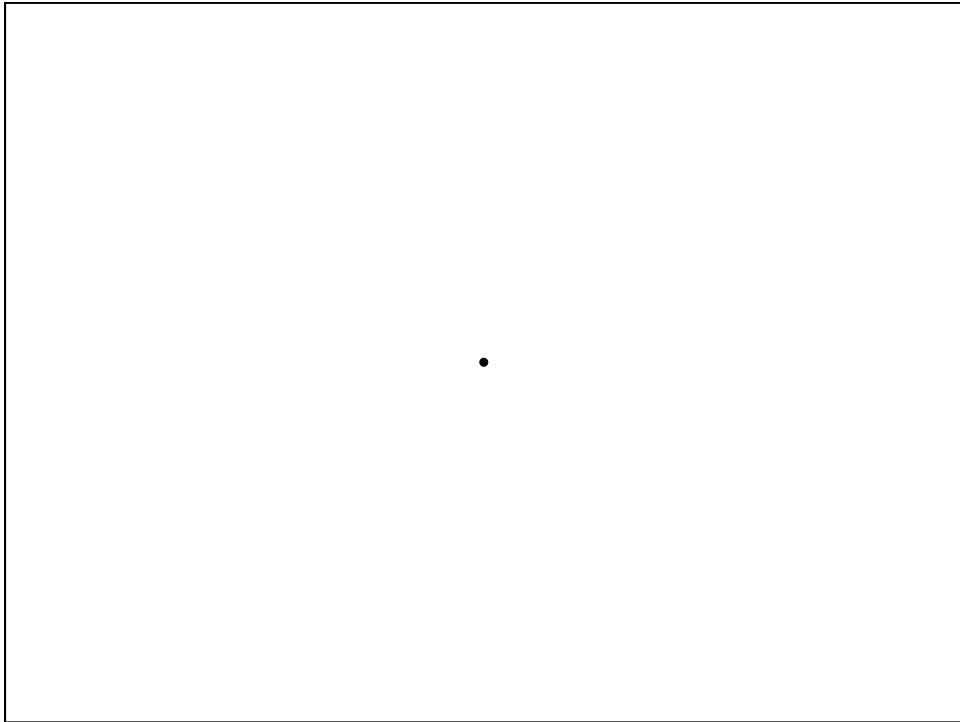
Blau/Gelb-Rezeptor



Schwarz/Weiß-Rezeptor

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 56





Bild

"Nachbild" (Afterimage)

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 59

The image shows two hexagons side-by-side, each composed of six triangles meeting at a central black dot. The left hexagon, labeled "Bild", has triangles in the following clockwise order from the top: yellow, red, pink, blue, green, and cyan. The right hexagon, labeled "'Nachbild' (Afterimage)", has triangles in the following clockwise order from the top: purple, cyan, green, yellow, red, and pink. The entire image is framed by a thin black border with small icons in the top corners and a footer at the bottom.

- Findet tatsächlich seine Entsprechung in einer "Verschaltung" direkt nach den Rezeptoren:
- Kann man auch einfach durch 3x3-Matrix abbilden (also ein Basiswechsel)

First zone (or stage): layer of retina with three independent types of cones

Second zone (or stage): signals from cones either excite or inhibit second layer of neurons, producing opponent signals

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 60

Historische Randnotiz

- Gegenfarben und Kontraste schon von Leonardo da Vinci (1500) beschrieben.
- Farbkreis mit Gegenfarben von Isaac Newton (1672),
- erweitert um subjektive/emotionale Wahrnehmung & Kontraste von Johann Wolfgang von Goethe (1810).

[Goethe, Farbenlehre, 1810]

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 61

CLICK

UH OH...

THE SKY IS A DEEP ORANGE! CALVIN'S SKIN IS A PALE GREEN! YELLOW FLOWERS ARE NOW BLUE!

EVERY COLOR IS THE OPPOSITE OF WHAT IT SHOULD BE!

CALVIN HAS BEEN TRANSFERRED TO A COLOR FILM NEGATIVE!

HIS ONLY HOPE IS TO BE PROCESSED BY A 1-HOUR PHOTO FINISHER. DEVELOPER! I NEED DEVELOPER!

DOGGONE IT, CALVIN! THAT'S *ANOTHER* PICTURE RUINED! CAN'T YOU LOOK PLEASANT FOR 1/500TH OF A SECOND?!

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 62

Ein kleines (kognitives) Experiment

- Lesen Sie folgende Farben (möglichst schnell) vor:
 - Introduction
 - Background
 - Theory
 - Lemma
 - Proof

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 63

■ Nun lesen Sie folgende Farben (möglichst schnell) vor:

Schwarz

Rot

Orange

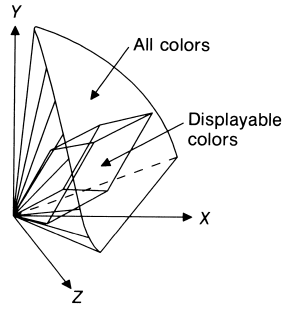
Gelb

Blau

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 64

Farbmodelle

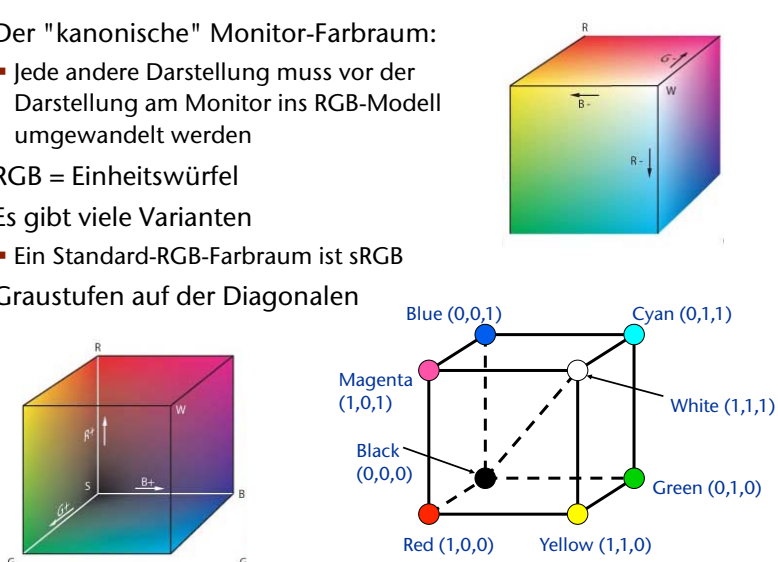
- XYZ ist zwar ein Standard, aber doch recht unpraktisch
- Je nach Aufgabe / Situation haben sich andere Farbmodelle bewährt
- **Hardwareorientiert:**
 - Geräte produzieren Farben durch Mischen von Grundfarben
 - RGB, YIQ, CMY
- **Wahrnehmungsorientiert:**
 - Wahrnehmungsempfinden des Menschen orientiert sich eher an den Parametern Farbton, Helligkeit und Sättigung
 - CIE Lab, HSV, HLS
- Teilmenge des CIEXYZ-Raums



G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 65

RGB

- Der "kanonische" Monitor-Farbraum:
 - Jede andere Darstellung muss vor der Darstellung am Monitor ins RGB-Modell umgewandelt werden
- RGB = Einheitswürfel
- Es gibt viele Varianten
 - Ein Standard-RGB-Farbraum ist sRGB
- Graustufen auf der Diagonalen



G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 66

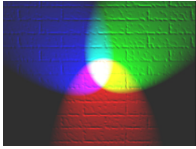

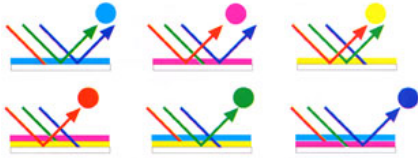
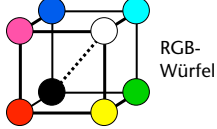
- Monitor-Hersteller geben i.a. Chromatizitäten der Phosphore und des "Weißpunktes" an: (x_r, y_r) , (x_g, y_g) , (x_b, y_b) , (x_w, y_w) .
- Daraus kann man die lineare Transformation berechnen
- Für sRGB:

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.241 & 1.537 & -0.497 \\ -0.969 & 1.876 & 0.042 \\ 0.056 & -0.204 & 1.057 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$
- Erinnerung: es können durchaus Werte außerhalb $[0,1]$ rauskommen!
 - Führt zum großen Problem des "Gamut-Mapping"

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 67

CMY / subtraktive Farbmischung


- Bislang immer **additive Farbmodelle** bzw. **additive Farbmischung**
 - "Addition" von "Farben" = Addition von Spektren
- Beobachtung: bei Überlagerung von Mal-Farben oder Farbfiltern passiert etwas anderes!
 - Warum sehen wir "Cyan", wenn wir die Malfarbe "Cyan" auf weißes Papier auftragen?

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 68

▪ Daraus ergibt sich folgende Tabelle:

Tinte	Absorbiert	Reflektiert	Erscheint
Cyan	Rot	Grün + Blau	Cyan
Magenta	Green	Rot + Blau	Magenta
Gelb	Blau	Rot + Grün	Gelb
Magenta + Gelb	Grün + Blau	Rot	Rot
Cyan + Gelb	Rot + Blau	Grün	Grün
Cyan + Magenta	Rot + Grün	Blau	Blau



▪ Folgerungen:

- Basis besteht aus Cyan, Magenta, Gelb → CMY
- "Addition" von Farben = Subtraktion von Spektren

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 69

▪ Umrechnung:

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

▪ "Null"-Punkt = (0,0,0) = Weiß

▪ (1,1,1) = Schwarz

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 70

Kleiner Exkurs: CMYK

▪ Erweiterung des CMY-Modells

▪ K = Schwarz

▪ Löst verschiedene Probleme:

- C + M + Y ergibt kein perfektes Schwarz (eher schmutziges Braun)
- Alle drei Farben übereinander drucken macht Papier sehr naß
- Text ist i.a. schwarz →
 - würde Farben verschwenden
 - exakte Überlagerung schwierig (man denke an die Serifen)

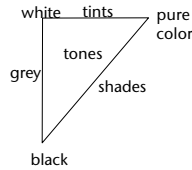
G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 71

YUV

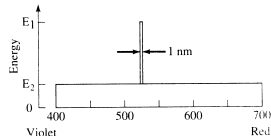
G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 72

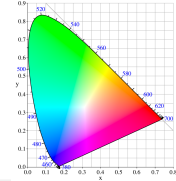
HSV [Alvy Ray Smith, 1978]

- Problem: RGB & CMY sind sehr unintuitiv
- Menschliche Farbspezifikation arbeitet eher mit
 - "Farbton" (rot, gelb, grün-blau, ...)
 - "Reinheit" ("satte Farbe", "pastell-...")
 - "Helligkeit" (dunkel)
- Entspricht auch eher den Parametern zur Beschreibung von chromatischem Licht
- ... und eher dem CIEXYZ-Farbraum



QuickTime
TIFF (uncompressed)
are needed to





G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 73

- Lösung: HSV-Farbmodell
 - $H = \text{Hue} = \text{Farbton in Grad} = \text{dominante Wellenlänge}$
 - $S = \text{Saturation} = \text{"Entfernung" von der (unbunten) Achse des Kegels} = \text{Verhältnis Energie von Weiß : Energie von dominanter Wellenlänge}$
 - $V = \text{Value} = \text{Höhe über dem "Boden"} = \text{Luminanz}$
- Anordnung der Farben:
 - Wie im Farbrad
 - Komplementärfarben gegenüber

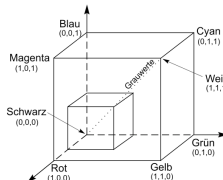
G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 74

- Geometrische "Interpretation" des HSV-Kegels:
 - Stelle RGB-Würfel auf die schwarze Spitze, so daß die Grau-Achse senkrecht steht
 - Projiziere die "obere Hülle" des Würfels auf die Ebene
- Jede horizontale Schnittfläche entspricht den 3 "oberen" Seiten eines Teilwürfels des RGB-Würfels

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 75

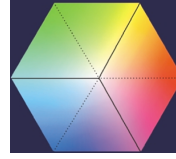
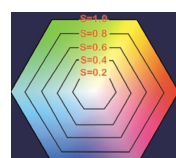
Umrechnung RGB → HSV

- Keine lineare Transformation mehr (logischerweise)
 - Die "oberen" 3 Seiten des Würfels sind definiert durch $\max(R,G,B) = 1$
 - Falls $\min(R,G,B) = 0 \rightarrow$ Farbe liegt auf einer der "unteren" Seiten des RGB-Würfels



Algo:

- $V = \max(R, G, B)$
- $S = \begin{cases} \frac{V - \min(R, G, B)}{V} & , V > 0 \\ 0 & , V = 0 \end{cases}$

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 76

- Falls $S > 0$:

$$H = \begin{cases} 0 + \frac{G-B}{\max - \min} & , R = \max(R, G, B) \\ 2 + \frac{B-R}{\max - \min} & , G = \max(R, G, B) \\ 4 + \frac{R-G}{\max - \min} & , B = \max(R, G, B) \end{cases}$$


(falls $S=0$ ist H =beliebig)
- $H = H \cdot 60^\circ$
- Falls $H < 0 \rightarrow H += 360$

- HSV → RGB: ähnlich


G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 77

Anwendungen

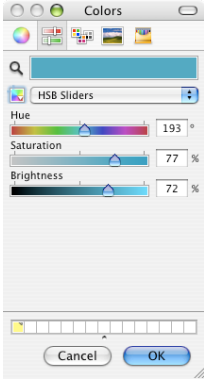
- Color Picker: heute Standard in jedem GUI zur Farbauswahl
- "Enhance colors" in Photo-Bearbeitungs-Software



vorher



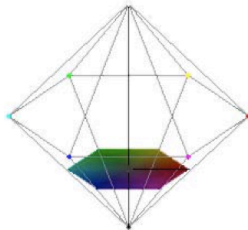
nachher



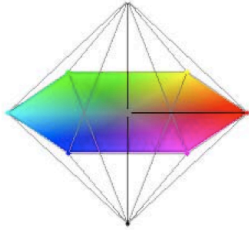
G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 78

HLS

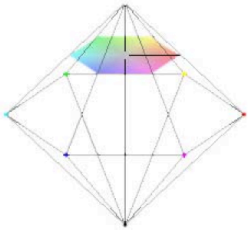
- HLS = *Hue, Lightness, Saturation*
- Manchmal auch HSL oder HIS
- Etwas "symmetrischer" aufgebaut:
 - Weiß als auch Schwarz bilden eine Spitze
 - Größte "Tiefe" bei 50% Grau



L= 0.25



L= 0.5



L= 0.75

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 79

Interpolation von Farben

- Häufiges Problem:
 - Farben C_1 und C_2 gegeben
 - Gesucht: alle Farben "dazwischen"
- Lineare Interpolation

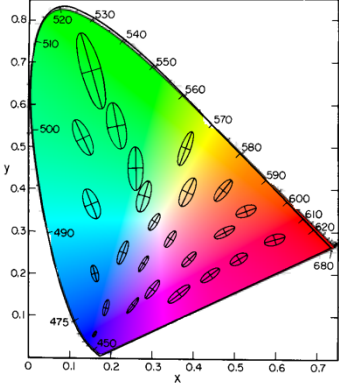
$$C(t) = t \cdot C_1 + (1-t) \cdot C_2$$

liefert "irgendwelche" Farben
(auf der Geraden zwischen C_1 und C_2)
- Je nach Anwendung:
 - Richtigen Farbraum wählen
 - Egal

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 80

Ähnlichkeit (Abstand) von Farben

- Häufiges Problem:
 - Maß für den "Abstand" zwischen zwei Farben benötigt
 - Bereich des Farbraums mit "äquidistanten" Farben sampeln
- Was ist der "Abstand"?
- MacAdams-Ellipsen:
 - zeigen die "just noticeable difference" im CIE xy-Diagramm
 - alle Farben auf dem Rand einer Ellipse haben den gleichen, gerade noch wahrnehmbaren Abstand vom Zentrum
- Hat man so ähnlich in jedem "linearen" Farbraum

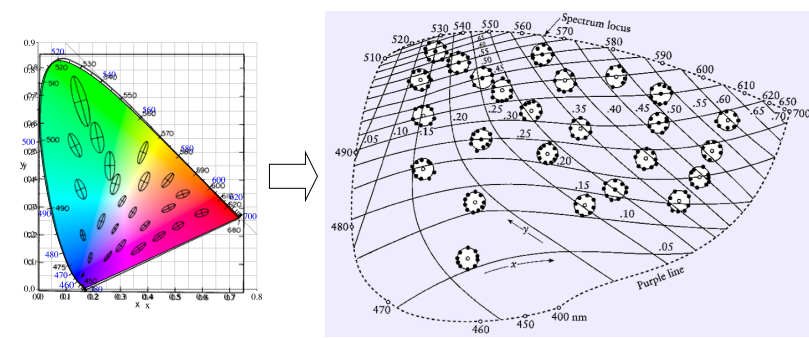


Das Diagramm zeigt ein CIE xy-Diagramm mit einer farbigen Hintergrundfläche, die den sichtbaren Farbraum darstellt. Über dem Diagramm sind verschiedene MacAdams-Ellipsen eingezeichnet, die den 'just noticeable difference' (JND) zwischen benachbarten Farben auf dem Rand der Ellipse darstellen. Die Ellipsen sind mit Werten wie 475, 490, 500, 510, 530, 540, 550, 560, 570, 580, 590, 600, 610, 620, 680 beschriftet, was den JND-Wert anzeigt. Die Achsen sind mit x und y beschriftet.

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 81

Uniforme Farbräume

- **Uniformer Farbraum** = Farbraum, in dem der Ort aller Farben mit gleicher wahrgenommener Distanz zu einer beliebigen gegebenen Farbe einen Kreis ergibt (d.h., die MacAdams-Ellipsen werden zu Kreisen)
- Läßt sich nur durch **nicht-lineare Transformation** erreichen



G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11
Farben 82

Beispiel: der CIE Lab (aka L*a*b*)

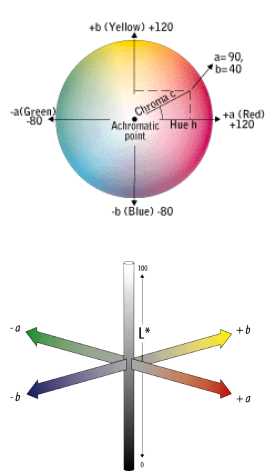
- **Verwendete Achsen:**
 - L = Luminanz
 - a,b = Gegenfarbenachsen
- **Transformation:**

$$L = 116 \left(\frac{Y}{Y_w} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$a = 500 \left[\left(\frac{X}{X_w} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_w} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$$

$$b = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_w} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_w} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$$

wobei (X_w, Y_w, Z_w) der Weißpunkt ist
- **Achtung:** a,b können negativ werden



G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11
Farben 83

Der Gamut

- Gamut** = Bereich all derjenigen Farben, der von einem Gerät (Monitor, Drucker, ...) dargestellt werden kann
- Lemma:**
 Jedes Gerät mit 3 Primärfarben kann nur Farben innerhalb des durch diese 3 Farben definierten Dreiecks produzieren!
- Corollar:**
 Kein Gerät mit 3 Primärfarben kann alle Farben produzieren!
- Achtung:** eigtl muß der Gamut 3-dimensional dargestellt werden!

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 84

Beispiele

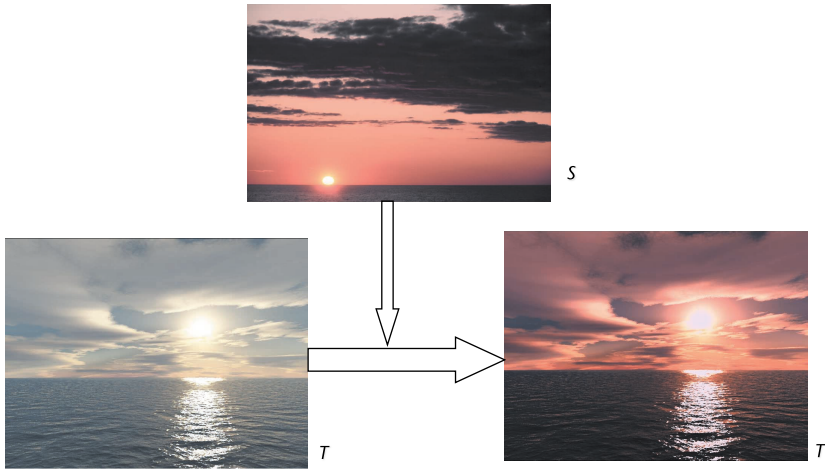
Monitor- vs. Drucker-Gamuts im Lab-Raum

Monitor- vs. Drucker-Gamuts im Yxy-Raum

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 85

Farbtransfer [Reinhard et. al., 2001]

- Aufgabe: Farben eines Quellbildes S (Source) auf ein Zielbild T (Target) übertragen


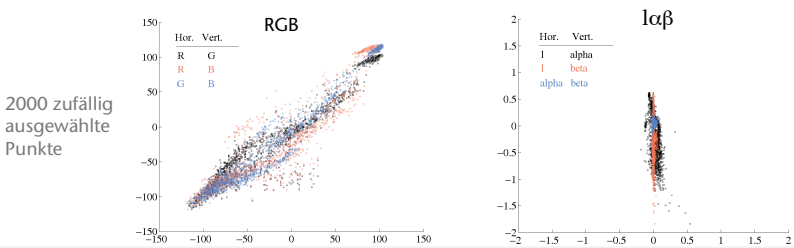


The diagram shows three images: a source image S (sunset over the ocean), a target image T (daytime ocean scene), and a color-transferred image T' . Arrows indicate the flow from S to T' and from T to T' .

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 87

Problem

- R-, G- und B-Werte sind normalerweise stark korreliert
 - Beispiel: Histogramm eines natürlichen Bildes im RGB-Raum
- Für Color-Transfer nötig: Farbraum mit minimaler Korrelation der Kanäle
- Ruderman et. al. stellten $\alpha\beta$ -Farbraum vor, welcher diese Eigenschaft erfüllt

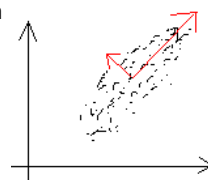
2000 zufällig ausgewählte Punkte

The figure contains two scatter plots. The left plot, labeled 'RGB', shows a strong positive correlation between the horizontal (R, G) and vertical (B) axes. The right plot, labeled ' $\alpha\beta$ ', shows the horizontal (alpha, beta) and vertical (alpha, beta) axes with minimal correlation, indicating a more uniform distribution of color components.

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 88

l $\alpha\beta$ - Farbraum [Ruderman et. al., 1998]

- Entstanden bei Untersuchung der menschlichen Farbwahrnehmung
- Konvertierung der RGB-Bilder in den LMS-Farbraum (Zapfen im menschl. Auge)
- Logarithmierung der Farbkanäle
 - Weber-Fechner Gesetz: Stärke von Sinneseindrücken verläuft logarithmisch zur Intensität des physikalischen Reizes
- Koordinatentransformation, so dass Korrelation minimal:
 - Nähere Histogramm der Bilder durch Ellipsoid an
 - Hauptachsentransformation




G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 89

- Konvertierung vom RGB- in den l $\alpha\beta$ -Raum:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5141 & 0.3239 & 0.1604 \\ 0.2651 & 0.6702 & 0.0641 \\ 0.0241 & 0.1228 & 0.8444 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3897 & 0.6890 & -0.0787 \\ -0.2298 & 1.1834 & 0.0464 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathcal{L} \\ \mathcal{M} \\ \mathcal{S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \log L - \langle \log L \rangle \\ \log M - \langle \log M \rangle \\ \log S - \langle \log S \rangle \end{bmatrix} \quad \langle x \rangle = \text{Mittelwert}$$

$$\begin{bmatrix} l \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{6}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{L} \\ \mathcal{M} \\ \mathcal{S} \end{bmatrix}$$


G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 90


Der Farbtransfer-Algorithmus

- Quellbild S und Zielbild T in den $\alpha\beta$ -Farbraum konvertieren
- Berechne Mittelwert $\langle(I^S, \alpha^S, \beta^S)\rangle, \langle(I^T, \alpha^T, \beta^T)\rangle$ und Standardabweichung $(\sigma_I^S, \sigma_\alpha^S, \sigma_\beta^S)$ ($\sigma_I^T, \sigma_\alpha^T, \sigma_\beta^T$) der Bilder
- Für alle Pixel des Zielbildes T :
 1. Mittelwert des Quellbildes subtrahieren


$$(I_i^1, \alpha_i^1, \beta_i^1) = (I_i^T, \alpha_i^T, \beta_i^T) - \langle(I^T, \alpha^T, \beta^T)\rangle$$
 2. Skalierung mit dem Quotienten der Standardabweichungen

$$(I_i^2, \alpha_i^2, \beta_i^2) = \left(\frac{\sigma_I^S}{\sigma_I^T} \cdot I_i^1, \frac{\sigma_\alpha^S}{\sigma_\alpha^T} \cdot \alpha_i^1, \frac{\sigma_\beta^S}{\sigma_\beta^T} \cdot \beta_i^1 \right)$$
 3. Erwartungswert des Zielbildes aufaddieren


$$(I_i^3, \alpha_i^3, \beta_i^3) = (I_i^2, \alpha_i^2, \beta_i^2) + \langle(I^S, \alpha^S, \beta^S)\rangle$$



T




S




T'

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 91


- Ergebnis: Zielbild T hat dieselben statistischen Momente wie das Source-Bild (aber natürlich andere konkrete Farbewerte in den Pixeln!)



T



S



T'

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 92

Beispiele

jetzt mit "dramatischem" Effekt


G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 93

Integration computer-generierter Bilder in natürliche Aufnahmen

unkorrigiert	korrigiert	unkorrigiert	korrigiert


G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 94

- Probleme bei stark unterschiedlichen Bildern (s.u.)
- Bilder in sinnvolle Bereiche aufteilen (Cluster hier: Himmel, Waende, Umgebung der Caffee-Tische/Personen)
- Color-Transfer gemäß den Statistiken der Cluster bestimmen
- Für jedes Pixel alle Transformationen durchführen und mit inversem Abstand der Pixel von Clusterzentren gewichten
- Was ist sinnvoller: Abstand im Bild oder im Farbraum?




G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11
Farben 95

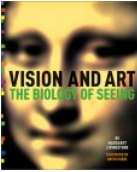
Selected Bibliography



Vision Science
by Stephen E. Palmer
MIT Press; ISBN: 0262161834
760 pages (May 7, 1999)





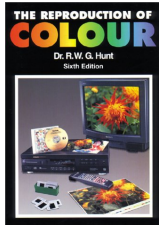
Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology, 3rd Edition
by Roy S. Berns, Fred W. Billmeyer, Max Saltzman
Wiley-Interscience; ISBN: 047119459X
304 pages 3 edition (March 31, 2000)



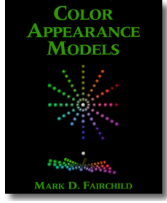
Vision and Art : The Biology of Seeing
by Margaret Livingstone, David H. Hubel
Harry N Abrams; ISBN: 0810904063
208 pages (May 2002)

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11
Farben 96





The Reproduction of Color
by R. W. G. Hunt
Fountain Press, 1995




Color Appearance Models
by Mark Fairchild
Addison Wesley, 1998


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

Farben 97

Phillip Otto Runge





[Ph. O. Runge, *Farbenkugel*, Hamburg 1810]

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

Farben 98

Calvin and Hobbes

CALVIN SUDDENLY REALIZES THE WORLD HAS NO HUE, VALUE, OR CHROMA!

HAVE THE PHOTORECEPTORS IN CALVIN'S EYES STOPPED WORKING PROPERLY, OR HAS THE FUNDAMENTAL NATURE OF LIGHT CHANGED?

PERHAPS SOME STRANGE NUCLEAR OR CHEMICAL REACTION ON THE SUN HAS CAUSED ELECTROMAGNETIC RADIATION TO DEFTY SEPARATION INTO A SPECTRUM.

MAYBE OBJECTS NO LONGER REFLECT CERTAIN WAVELENGTHS! WHATEVER THE CAUSE, IT'S CLEAR TO CALVIN THAT THERE'S NO POINT IN DISCUSSING THINGS WITH HIS DAD!

THE PROBLEM IS, YOU SEE EVERYTHING IN TERMS OF BLACK AND WHITE.

SOMETIMES THAT'S THE WAY THINGS ARE!

CALVIN AND HOBBS © 1991 Watterson. Reprinted with permission of UNIVERSAL PRESS SYNDICATE. All rights reserved.

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11
Farben 99

calvin and hobbes

WATTERSON

NOW, HONEY, YOU'RE MISSING A BEAUTIFUL SUNSET OUT HERE!

I'LL COUNT TO 10, AND THEN... **PON!**

DAD, HOW COME OLD PHOTOGRAPHS ARE ALWAYS BLACK AND WHITE? DIDN'T THEY HAVE COLOR FILM BACK THEN?

SURE THEY DID IN FACT, THOSE OLD PHOTOGRAPHS ARE IN COLOR. IT'S JUST THE **WORLD** WAS BLACK AND WHITE THEN.

REALLY? YEP, THE WORLD DIDN'T TURN COLOR UNTIL SOMETIME IN THE 1930s, AND IT WAS PRETTY GRAINY COLOR FOR A WHILE, TOO.

THAT'S REALLY WEIRD.

WELL, TRUTH IS STRANGER THAN FICTION.

BUT THEN WHY ARE OLD PAINTINGS IN COLOR?? IF THE WORLD WAS BLACK AND WHITE, WOULDN'T ARTISTS HAVE PAINTED IT THAT WAY?

NOT NECESSARILY. A LOT OF GREAT ARTISTS WERE INSANE.

BUT... BUT HOW COULD THEY HAVE PAINTED IN COLOR ANYWAY? WOULDN'T THEIR PAINTS HAVE BEEN SHADES OF GRAY BACK THEN?

OF COURSE, BUT THEY TURNED COLORS LIKE EVERYTHING ELSE DID IN THE '30s.

SO WHY DIDN'T OLD BLACK AND WHITE PHOTOS TURN COLOR TOO?

BECAUSE THEY WERE COLOR PICTURES OF BLACK AND WHITE, REMEMBER?

THE WORLD IS A COMPLICATED PLACE, HOBBS.

WHenever it seems that way, I take a nap in a tree and wait for dinner.

G. Zachmann Comput
Farben 100

 **Synaesthesia** 

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 10/11 Farben 101