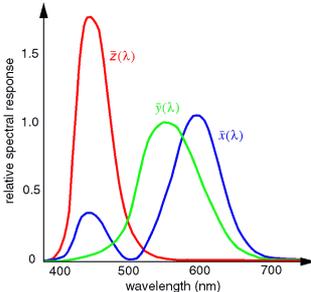


## Der CIEXYZ-Farbraum

- 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 09/10 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:

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

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

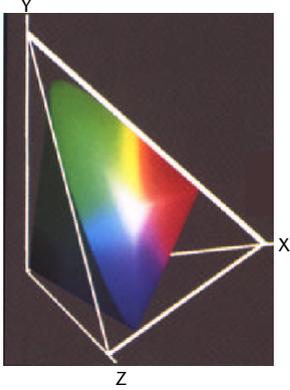
$$Z = k \int \bar{z}(\lambda) \cdot P(\lambda)$$

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

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 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.)



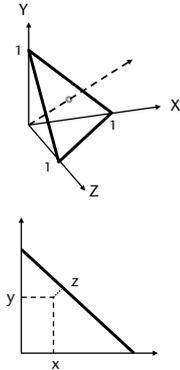
G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10

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  $(x, y)$

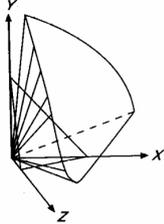
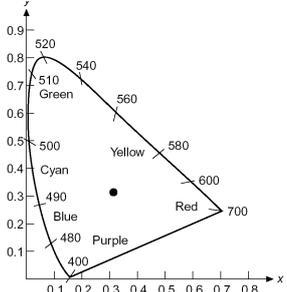
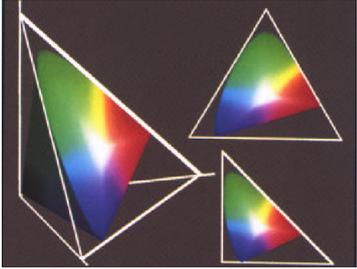


G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10

Farben 46

### Eigenschaften

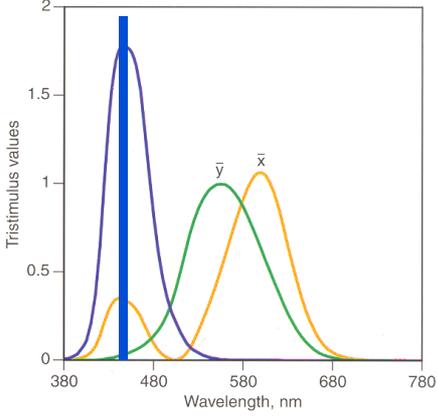
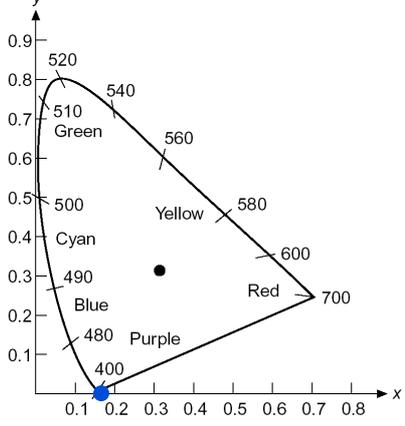
- $(X,Y,Z)$  und  $(\alpha X, \alpha Y, \alpha Z)$ ,  $\alpha > 0$ , haben dieselben Chromazitätskoordinaten  $(x,y)$
- Geraden in XYZ bleiben Geraden in  $xy$
- Die typ. "Hufeisenform" kommt von der Form der Beobachterkurven (*matching curves*)
- Reine Farben liegen auf dem Rand

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 48

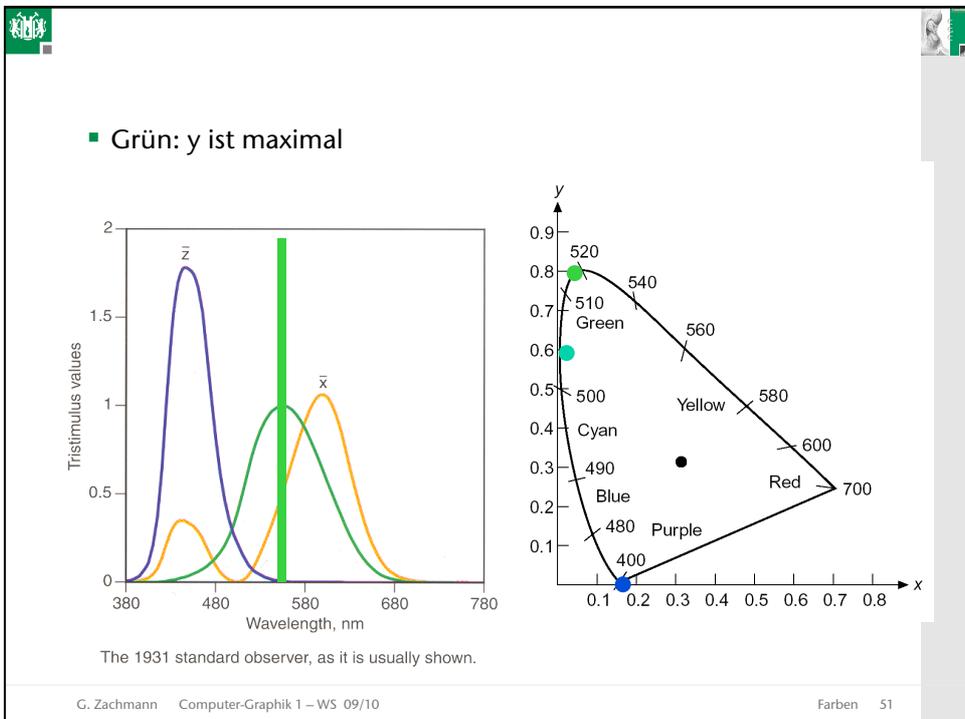
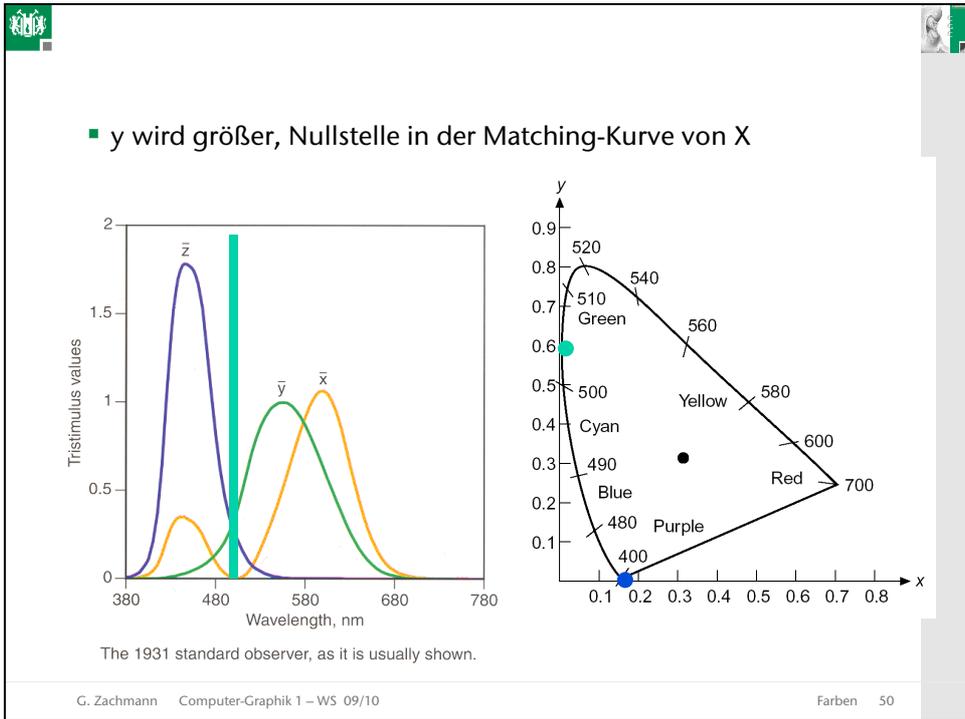
### Plausibilitätsbetrachtung

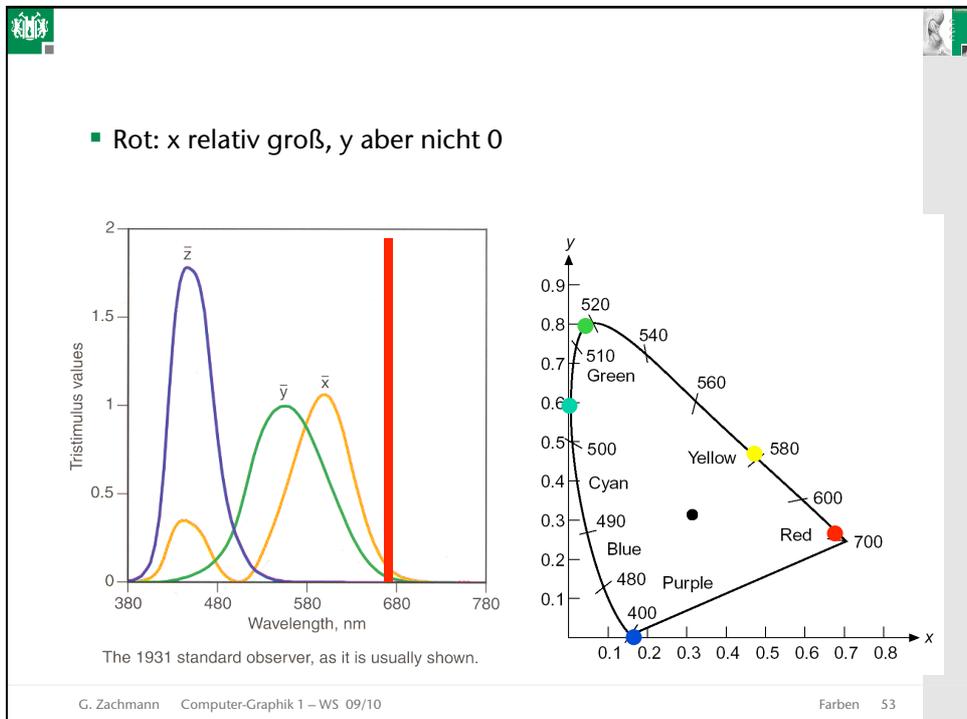
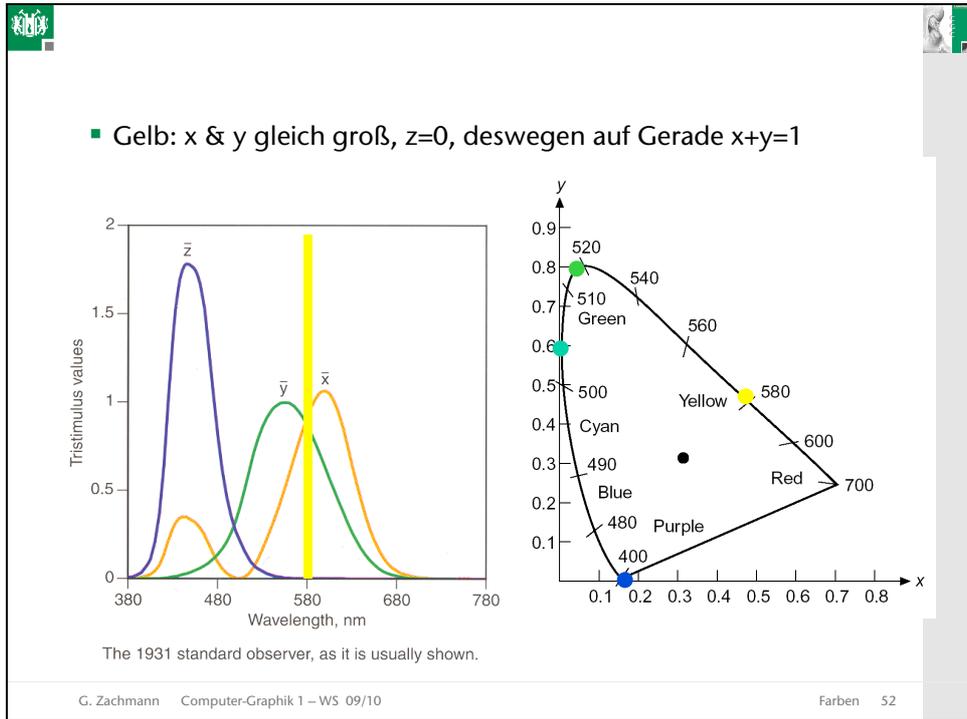
- Blau: Z groß, X nicht 0 wegen "Höcker"

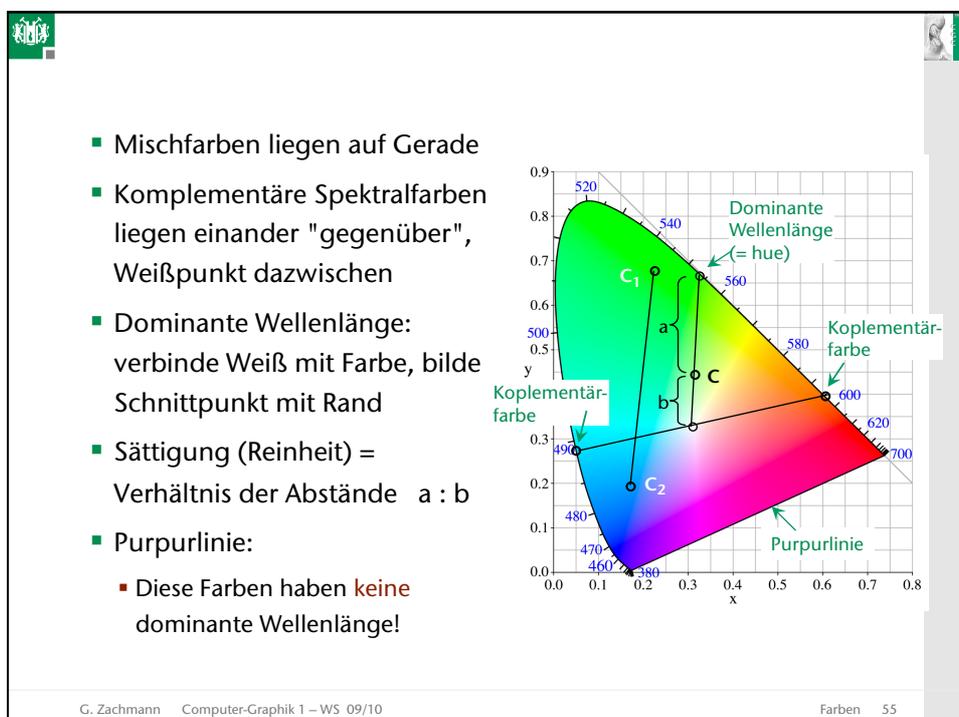
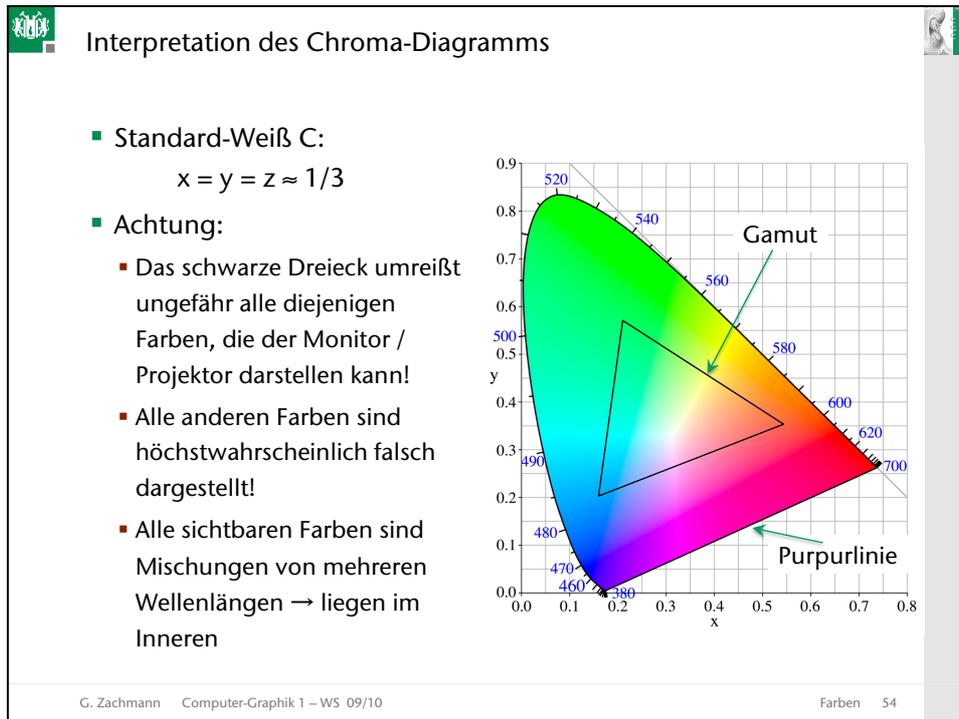



The 1931 standard observer, as it is usually shown.

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 49

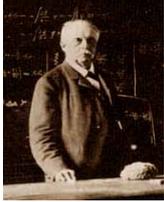
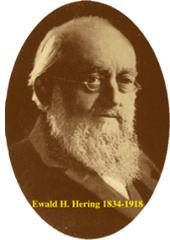


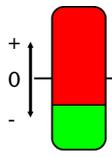




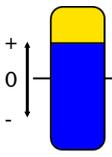
## Das Gegenfarbenmodell

- 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*)

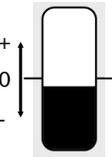





Rot/Grün-Rezeptor



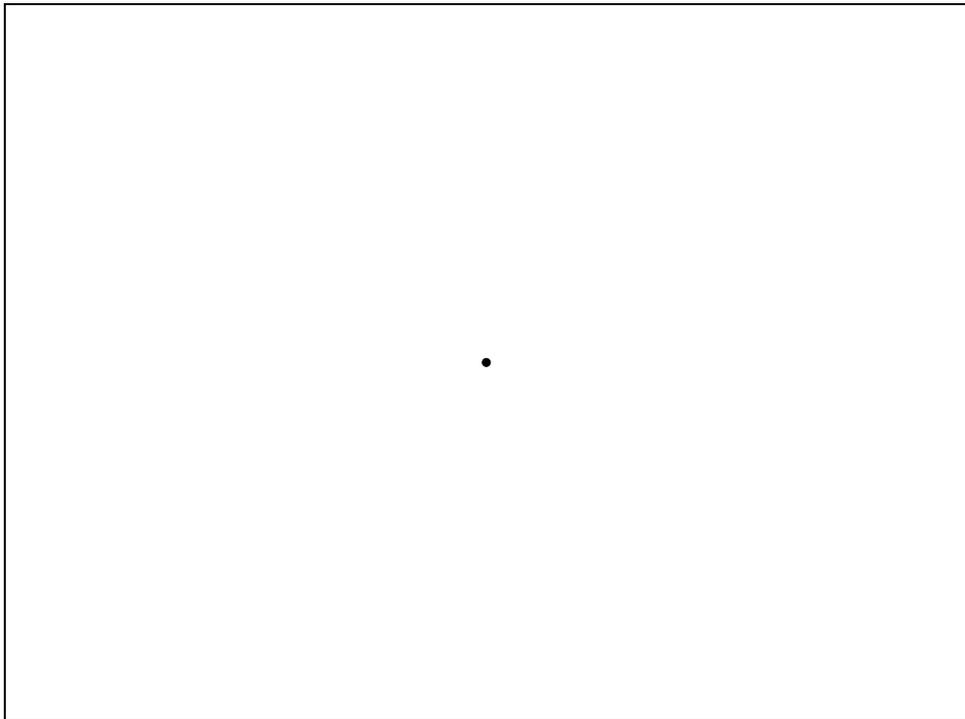
Blau/Gelb-Rezeptor



Schwarz/Weiß-Rezeptor

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 56





Bild

"Nachbild" (*Afterimage*)

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 59

The image shows two hexagonal color patterns. The left pattern, labeled "Bild", consists of six triangles meeting at a central black dot, with colors: top-left (green), top (yellow), top-right (red), bottom-right (magenta), bottom (dark blue), and bottom-left (cyan). The right pattern, labeled "Nachbild" (Afterimage), is a color inversion of the first, with colors: top-left (magenta), top (dark blue), top-right (cyan), bottom-right (green), bottom (yellow), and bottom-left (red). The slide footer contains the text "G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 59".

- 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 09/10 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 09/10 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 09/10 Farben 62

## Ein kleines (kognitives) Experiment

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

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 63

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

Schwarz

Rot

Orange

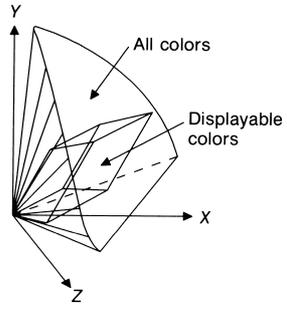
Gelb

Blau

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 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

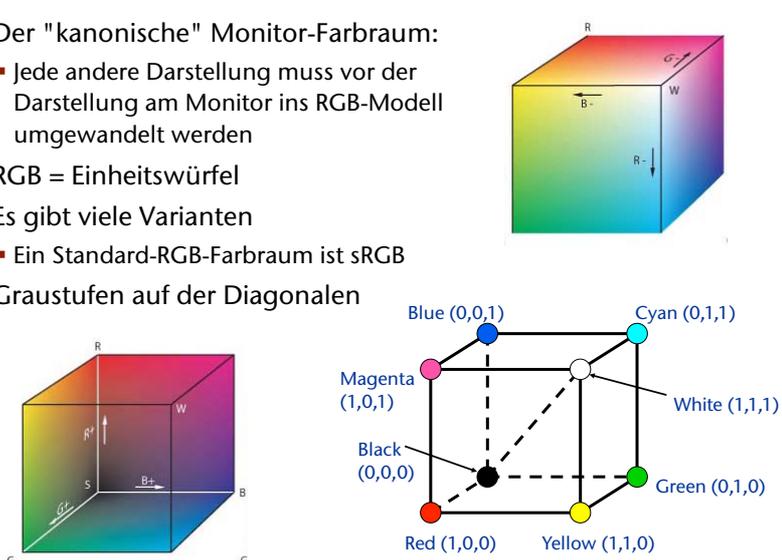


Das Diagramm zeigt ein dreidimensionales Koordinatensystem mit den Achsen X, Y und Z. Eine Kugel, beschriftet mit 'All colors', repräsentiert den gesamten Farbraum. Ein kleinerer, durchgezogener Bereich innerhalb der Kugel ist als 'Displayable colors' beschriftet und stellt die Teilmenge dar, die auf einem Display dargestellt werden kann. Gestrichelte Linien zeigen die Projektion der 'Displayable colors' auf die X-Y-Ebene.

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 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



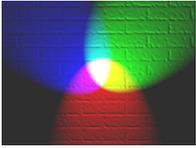
G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 66

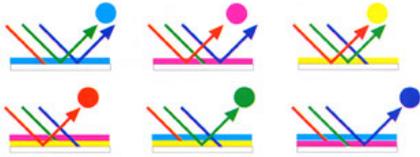
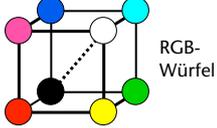
- Monitor-Hersteller geben i.a. Chromatizitäten der Phosphore und des "Weißpunktes" an:  $(x_r, y_r)$ ,  $(x_g, y_g)$ ,  $(x_b, y_b)$ ,  $(x_w, y_w)$ .
- Daraus kann man die lineare Transformation berechnen
- Für sRGB:
 
$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.241 & 1.537 & -0.497 \\ -0.969 & 1.876 & 0.042 \\ 0.056 & -0.204 & 1.057 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$
- Erinnerung: es können durchaus Werte außerhalb  $[0,1]$  rauskommen!
  - Führt zum großen Problem des "Gamut-Mapping"

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 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 Farbfiltren passiert etwas anderes!
  - Warum sehen wir "Cyan", wenn wir die Malfarbe "Cyan" auf weißes Papier auftragen?

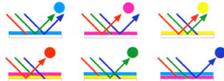


G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 68

▪ 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 09/10 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 09/10 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)

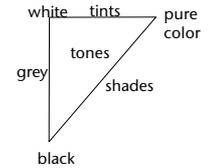
G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 71

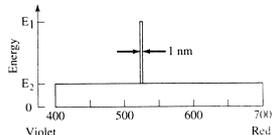
## YUV

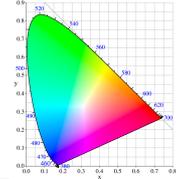
G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 72

## 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

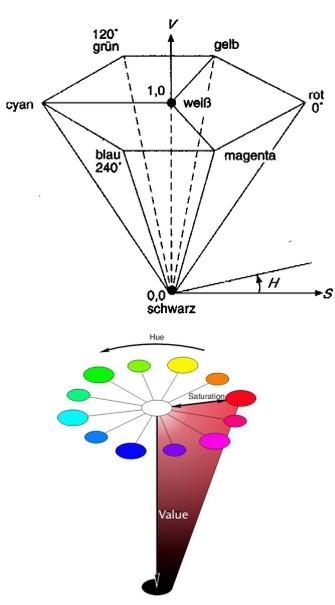






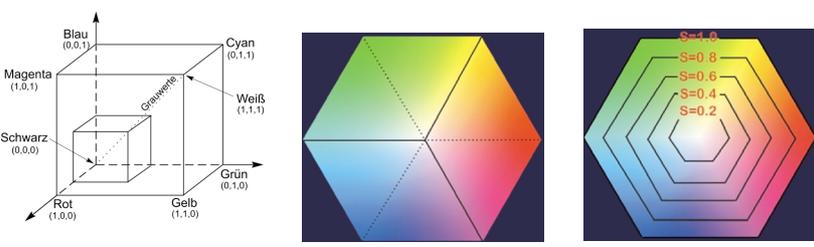
G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 73

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



G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 74

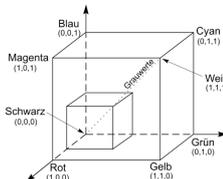
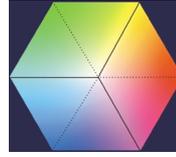
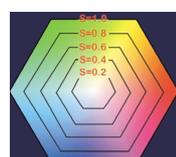
- Geometrische "Interpretation" des HSV-Kegels:
  - Stelle RGB-Würfel auf die schwarze Spitze, so daß die Grau-Achse senkrecht steht
  - Projiziere die "obere Hülle" des Würfels auf die Ebene
- Jede horizontale Schnittfläche entspricht den 3 "oberen" Seiten eines Teilwürfels des RGB-Würfels



G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 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 09/10 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 09/10 Farben 77

## Anwendungen

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



vorher



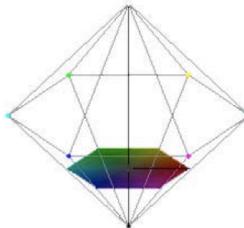
nachher



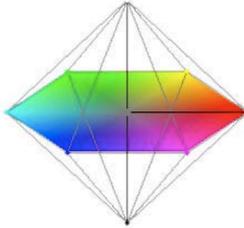
G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 78

## HLS

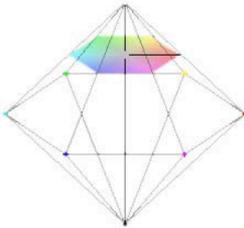
- HLS = *Hue, Lightness, Saturation*
- Manchmal auch HSL oder HIS
- Etwas "symmetrischer" aufgebaut:
  - Weiß als auch Schwarz bilden eine Spitze
  - Größte "Tiefe" bei 50% Grau



L= 0.25



L= 0.5



L= 0.75

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 79

## Interpolation von Farben

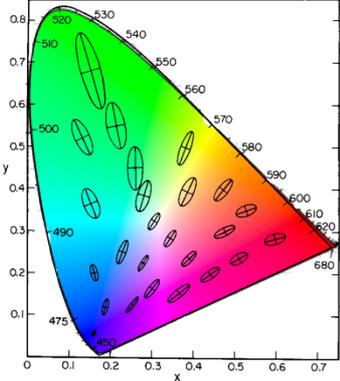
- Häufiges Problem:
  - Farben  $C_1$  und  $C_2$  gegeben
  - Gesucht: alle Farben "dazwischen"
- Lineare Interpolation
 
$$C(t) = t \cdot C_1 + (1-t) \cdot C_2$$

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 09/10 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

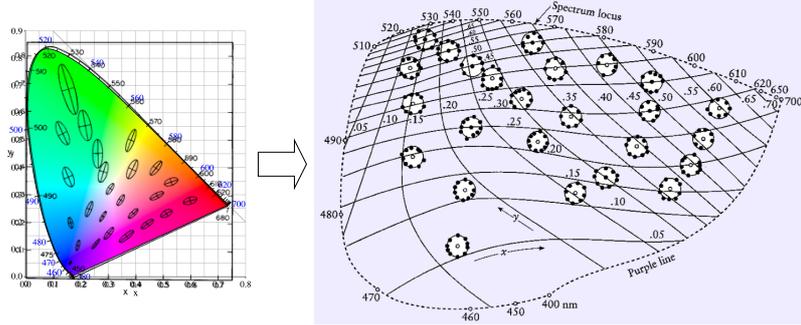


Das Diagramm zeigt ein CIE xy-Diagramm mit einer farbigen Fläche, die den sichtbaren Farbraum darstellt. Die Fläche ist in verschiedene Farben unterteilt, die von links oben (blau) über grün, gelb, orange bis hin zu rot rechts unten verlaufen. Über der Fläche sind mehrere Ellipsen gezeichnet, die als MacAdams-Ellipsen bezeichnet werden. Jede Ellipse ist mit einem Wert beschriftet, der den 'just noticeable difference' (JND) darstellt. Die Werte reichen von 475 bis 680. Die Ellipsen sind so angeordnet, dass sie den Farbraum in konstanten Abständen abdecken. Die Achsen sind mit x und y beschriftet, wobei x von 0 bis 0,7 und y von 0 bis 0,8 reicht.

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 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 09/10
Farben 82

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

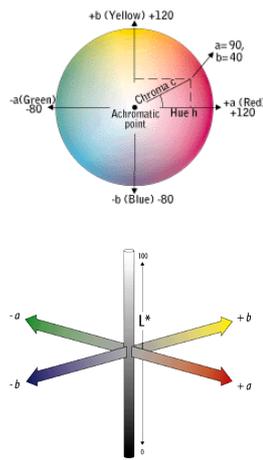
- **Verwendete Achsen:**
  - L = Luminanz
  - a,b = Gegenfarbenachsen
- **Transformation:**

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

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

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

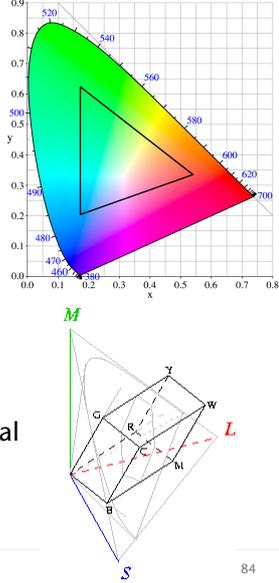
wobei  $(X_w, Y_w, Z_w)$  der Weißpunkt ist
- **Achtung:** a,b können negativ werden



G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10
Farben 83

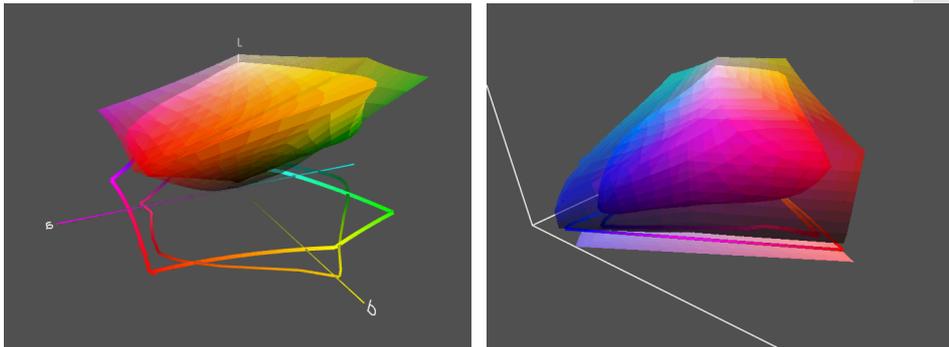
## Der Gamut

- 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 09/10 84

## Beispiele



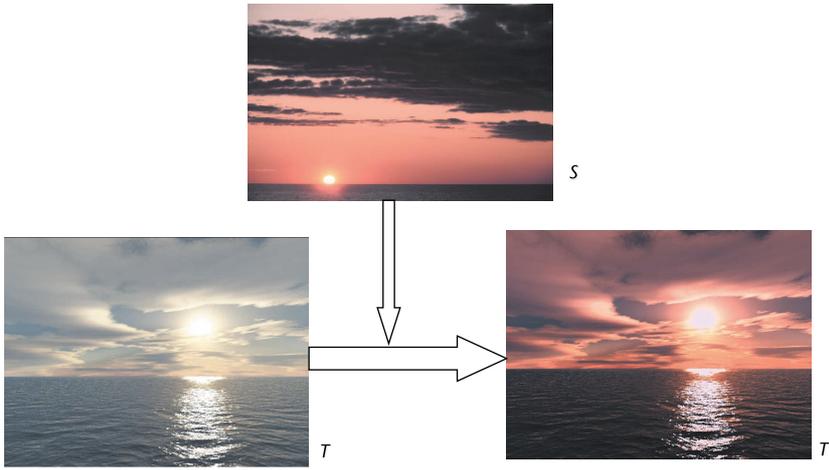
Monitor- vs. Drucker-Gamuts im Lab-Raum

Monitor- vs. Drucker-Gamuts im Yxy-Raum

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 85

## Farbtransfer [Reinhard et. al., 2001]

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

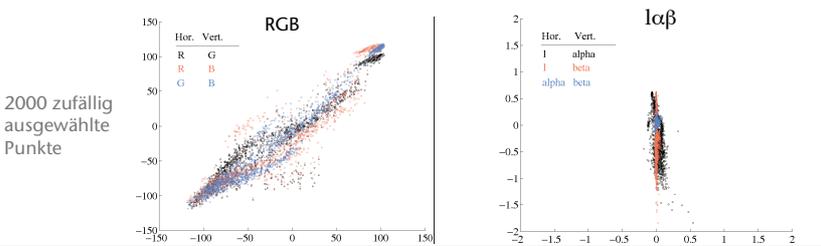


The diagram shows three images: a source image  $S$  (sunset over the ocean), a target image  $T$  (daytime ocean scene), and a color-transferred image  $T'$ . Arrows indicate the flow from  $S$  to  $T'$  and from  $T$  to  $T'$ .

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 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

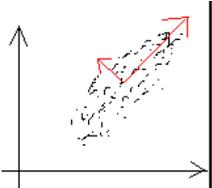
2000 zufällig ausgewählte Punkte

The figure contains two scatter plots. The left plot, labeled 'RGB', shows a strong positive correlation between the red, green, and blue channels. The right plot, labeled ' $\alpha\beta$ ', shows that the alpha and beta channels are nearly uncorrelated, with points clustered around the origin.

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 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 09/10 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 09/10 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 09/10 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 09/10 Farben 92

## Beispiele

jetzt mit "dramatischem" Effekt

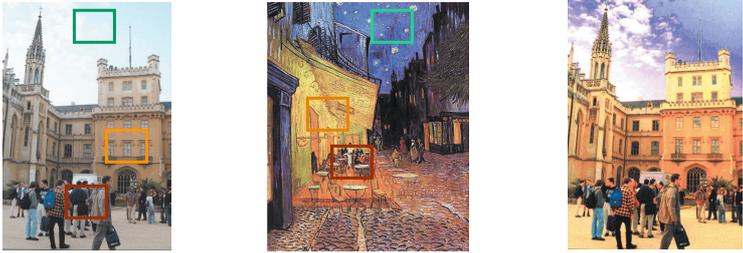
G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 93

## Integration computer-generierter Bilder in natürliche Aufnahmen

unkorrigiert	korrigiert	unkorrigiert	korrigiert

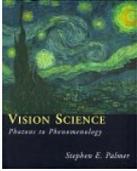
G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 94

- 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 09/10
Farben 95

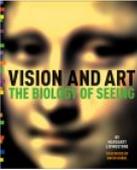
## Selected Bibliography



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



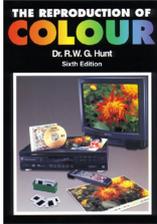
**Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology, 3rd Edition**  
by Roy S. Berns, Fred W. Billmeyer, Max Saltzman  
Wiley-Interscience; ISBN: 047119459X  
304 pages 3 edition (March 31, 2000)



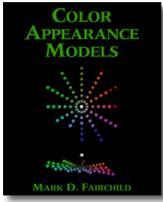
**Vision and Art : The Biology of Seeing**  
by Margaret Livingstone, David H. Hubel  
Harry N Abrams; ISBN: 0810904063  
208 pages (May 2002)

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10
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 09/10

Farben 97



## Phillip Otto Runge









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

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10

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 09/10Farben 99

## calvin and hobbes

WATTERSON

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

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

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 ComputFarben 100

The image shows a presentation slide with a white background and a thin black border. In the top-left corner, there is a small green square icon with a white symbol, followed by the title "Synaesthesie" in a black sans-serif font. In the top-right corner, there is a small, partially visible image of a person's face. At the bottom of the slide, there is a light gray horizontal bar containing the text "G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10" on the left and "Farben 101" on the right.