


Farbräume

Industrielle Bildverarbeitung, Vorlesung No. 13¹

M. O. Franz

¹ falls nicht anders vermerkt, sind die Abbildungen entnommen aus Burger & Burge, 2005. 

Übersicht

- 1 Farbe
- 2 RGB- und HSV-Farbraum
- 3 Technische Farbräume
- 4 Kolorimetrische Farbräume

Übersicht

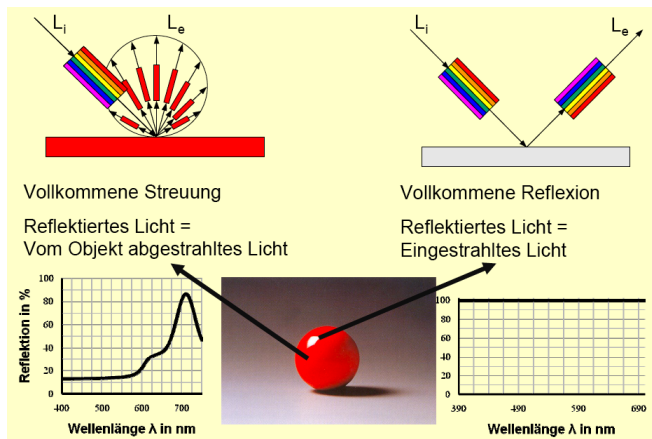
- 1 Farbe
- 2 RGB- und HSV-Farbraum
- 3 Technische Farbräume
- 4 Kolorimetrische Farbräume

Farbreiz und Farben

"Farben sind Taten des Lichts. Taten und Leiden!" (Goethe)

- Weißes Licht enthält Licht aller Wellenlängen zu ähnlichen Anteilen. Farbreize entstehen, wenn durch selektive Absorption signifikante Anteile eine Verminderung "erleiden".
- Farben entstehen in Auge und Gehirn als "Taten" der Farbreize. Newton: *"...die Lichtstrahlen selbst sind natürlich nicht farbig, vielmehr ist ihnen nur eine gewisse Kraft und Fähigkeit eigen, diese oder jene Farbempfindung hervorzurufen."* ⇒ Ohne Empfangsapparat keine Farbe.
- Farbe ist die Reaktion unseres Wahrnehmungsapparates auf Lichtwellen unterschiedlicher Wellenlänge. Farbe "existiert" nur subjektiv beim Sehenden. Ändert sich ein Glied in der Ursache-Wirkungs-Kette, ändert sich die Farbempfindung.

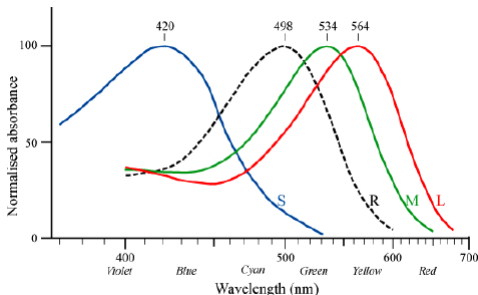
Ohne selektive Absorption keine Farbe



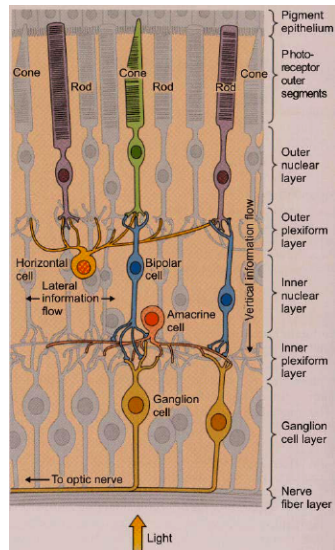
[Heintz & Beyerer]

Der Farbreiz wird durch die spektrale Zusammensetzung des von der Oberfläche reflektierten Lichtes bestimmt, in Abhängigkeit von der Beleuchtungsfarbe.

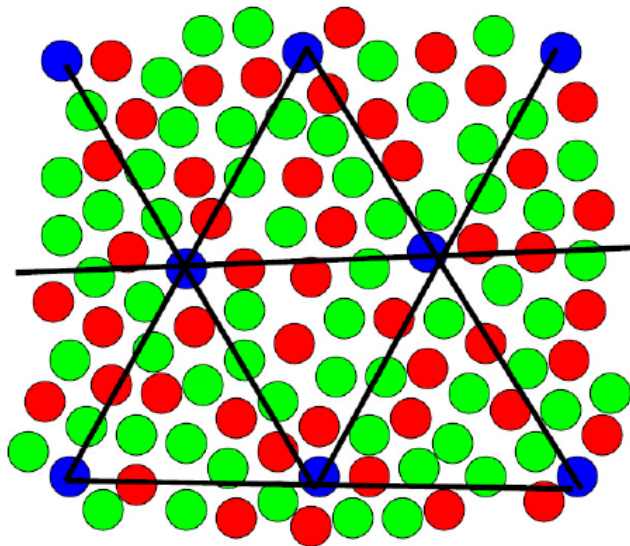
Menschliches Farbsehen



- Die menschliche Retina enthält 3 Typen farbsensitiver Zellen: L-, M- und S-Zapfen.
- Ein Lichtstimulus unter fixen Beleuchtungsbedingungen kann komplett in einem dreidimensionalen Raum spezifiziert werden.



Zapfenmosaik



Anteil der
Zapfentypen:

L: 42%

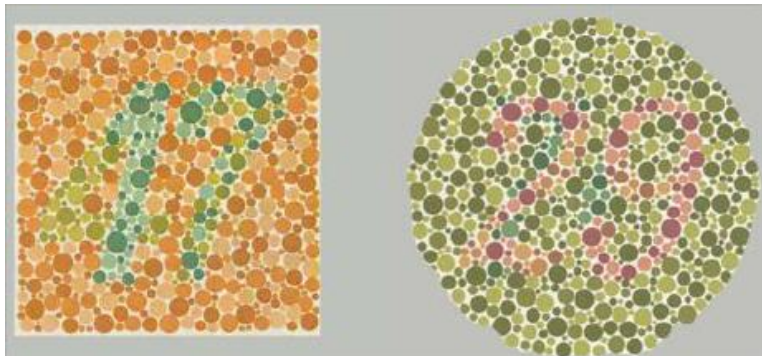
M: 48%

S: 10%

[Fraunhofer IGD]

Farbenfehlsichtigkeit

8% der Männer, 0.4% der Frauen.



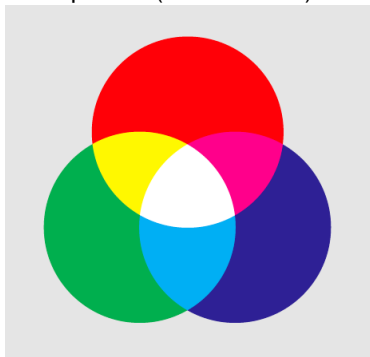
[Gall]

Bei der Rot-Grün-Sehschwäche fehlen entweder die L-Zapfen (Protanopie, Rotblindheit) oder die M-Zapfen (Deutanopie, Grünblindheit), bei der sehr seltenen Blau-Gelb-Sehschwäche (Tritanopie) die S-Zapfen.

Farbmischung

Da wir nicht für jede Wellenlänge eigene Rezeptoren haben, kann der einer bestimmten Wellenlänge entsprechende Farbeindruck auch durch Mischung geeigneter Grundfarben erzeugt werden.

Additiv: Überlagerung von Lichtquellen (z.B. Monitor)



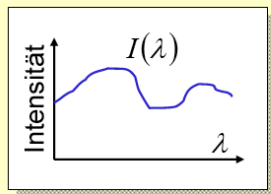
Subtraktiv: Absorption des reflektierten Lichtes (z.B. Druck)



Farbvalenz und Metamerie

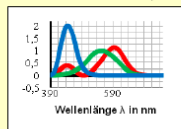
Physik

Farbreiz := Spektrum $I(\lambda)$



Dimension: ∞

Sehen



Physiologie

Sinneseindruck Farbe:
Farbvalenz

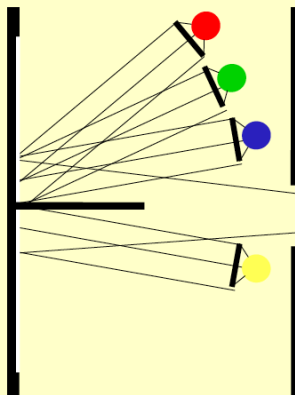
Farbvalenz: $\begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{pmatrix}$

Dimension: 3

[Heintz & Beyerer] Zwei unterschiedliche Farbreize mit gleicher Farbvalenz heißen **metamer**.

Jede Menge gleich aussehender Farbreize definiert eine **Farbvalenz**.

Psychophysische Vermessung von Farbvalenzen



Die Gewichtungsfaktoren für die 3 Primärvalenzen (= Koordinaten bzgl. dieser Basisvektoren) der zu messenden Lichtquelle heißen **Farbwerte**.



Test Lichtquelle:
monochromatische steuerbare Lichtquelle

Definition von 3 „**Primärvalenzen**“ durch die CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) 1931:
3 monochromatische Lichtquellen:

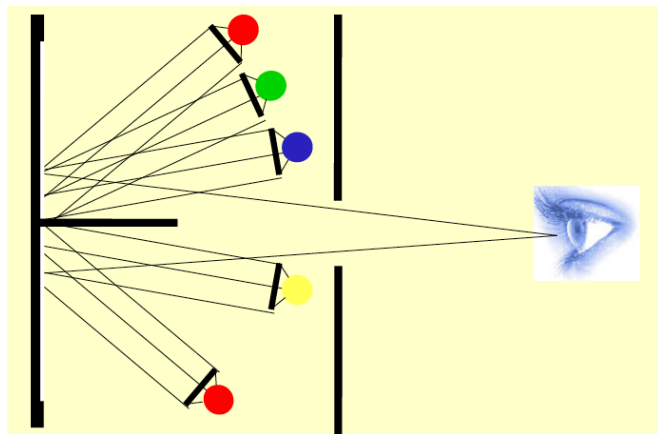
CIE Rot: 700,0 nm

CIE Grün: 546,1 nm

CIE Blau: 435,8 nm

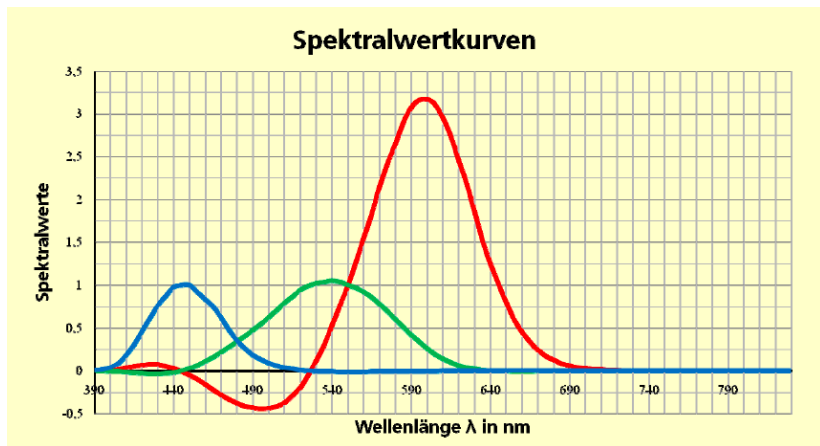
Funktioniert ab 530 nm, nicht für kleinere Wellenlängen! [Heintz & Beyerer]

Vermessung des kurzwelligen Bereiches



Durch Addition von CIE Rot bzw. Grün zur Testfarbe lassen sich auch die Farben des kurzwelligen Bereiches erzeugen \Rightarrow in der additiven Farbmischung ergeben sich dadurch negative Farbwerte!

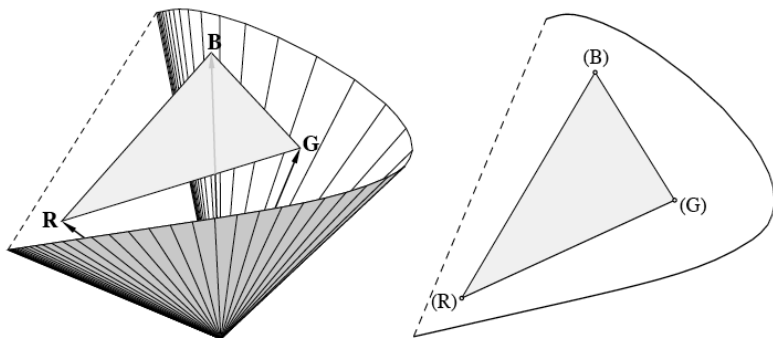
Spektralwertkurven



[Heintz & Beyerer]

Spektralwerte: Farbwerte der monochromatischen Spektralfarben für die 3 CIE-Primärvalenzen.

Farbwerte aller sichtbarer Farben



[Zawischa, www.itp.uni-hannover.de/zawischa/ITP/]

Durch additive Mischung (d.h. positive Koeffizienten) kann nur das Innere des aus den 3 Grundfarben gebildeten Dreiecks erzeugt werden. Die Menge der überhaupt wahrnehmbaren Farben wird durch den **Spektralfarbenzug** und die **Purpurlinie** begrenzt.

Wahrnehmung von Farben (Farberscheinung)

Absolute:

- brightness: apparent intensity
- colourfulness: intensity of hue

Colour appearance is 5-dimensional!

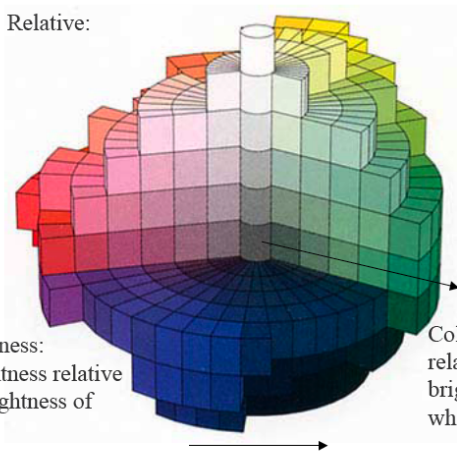
But: for our purpose, the three relative dimensions are enough.

Relative:

Lightness:
Brightness relative to brightness of white

Hue: colour tone

chroma:
Colourfulness relative to brightness of white

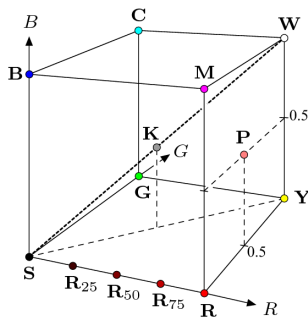


Übersicht

- 1 Farbe
- 2 RGB- und HSV-Farbraum**
- 3 Technische Farbräume
- 4 Kolorimetrische Farbräume

RGB-Farbraum

Das RGB-Farbsystem basiert auf der **additiven** Mischung der drei Primärfarben Rot, Grün und Blau, d.h. ausgehend von Schwarz wird farbiges Licht in den Primärfarben überlagert, was sowohl den **Farbton**, die **Intensität** und die **Sättigung** des Farbwertes bestimmt.

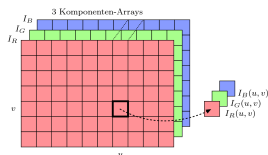


RGB-Werte

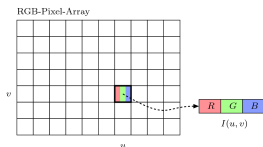
Pkt.	Farbe	R	G	B
S	Schwarz	0.00	0.00	0.00
R	Rot	1.00	0.00	0.00
Y	Gelb	1.00	1.00	0.00
G	Grün	0.00	1.00	0.00
C	Cyan	0.00	1.00	1.00
B	Blau	0.00	0.00	1.00
M	Magenta	1.00	0.00	1.00
W	Weiß	1.00	1.00	1.00
K	50% Grau	0.50	0.50	0.50
R ₇₅	75% Rot	0.75	0.00	0.00
R ₅₀	50% Rot	0.50	0.00	0.00
R ₂₅	25% Rot	0.25	0.00	0.00
P	Pink	1.00	0.50	0.50

Aufbau von Farbbildern

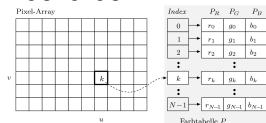
Komponenten-anordnung



Gepackte Anordnung



Indexbilder



- Bei gepackter Anordnung müssen die einzelnen Farbkanäle über spezielle Zugriffsfunktionen aus den Pixeln ausgelesen und beschrieben werden.
- Indexbilder erlauben nur eine beschränkte Anzahl von Farben. Die Pixel enthalten nur den Index k einer Farbtabelle oder Palette

$$P[k] = (P_R[k], P_G[k], P_B[k])$$

und erlauben so eine "flache" Bildrepräsentation.

- Interessantes Problem: Umwandlung eines Vollfarbenbildes in ein Indexbild (nächste Vorlesung).

Umwandlung in Grauwertbilder

Einfachster Ansatz: Durchschnittswert der drei Farbkomponenten

$$y = \frac{R + G + B}{3}$$

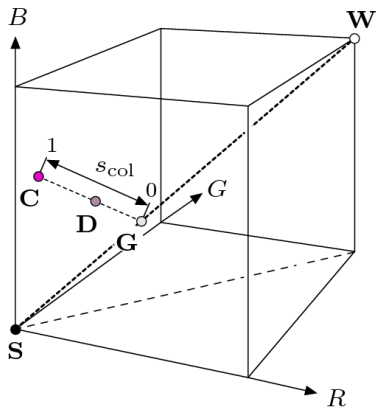
aber die wahrgenommene Helligkeit von Rot und Grün ist wesentlich höher als die von Blau \Rightarrow Gebiete mit hohem Rot- und Grünanteil werden zu dunkel, Gebiete mit hohem Blauanteil zu hell wiedergegeben.

Idealerweise müßte die relative Helligkeit Y_R, Y_G, Y_B jedes Farbkanals des Wiedergabegerätes mit einem Photometer vermessen werden (z.B. in TV- oder ITU-BT709- Norm). Die wahrgenommene Intensität (**Luminanz**) ergibt sich dann als

$$Y = R \cdot Y_R + G \cdot Y_G + B \cdot Y_B \quad \text{mit} \quad Y_R + Y_G + Y_B = 1$$

z.B. $Y_R = 0.299, Y_G = 0.587, Y_B = 0.114$ bei TV-Geräten. Diese Formel gilt aber nur näherungsweise, da die wahrgenommene Intensität in Wirklichkeit nichtlinear von den einzelnen Farbwerten abhängt.

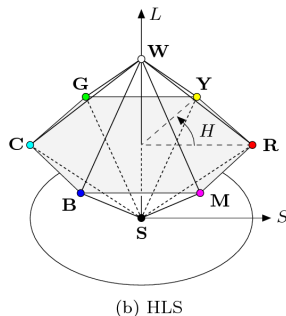
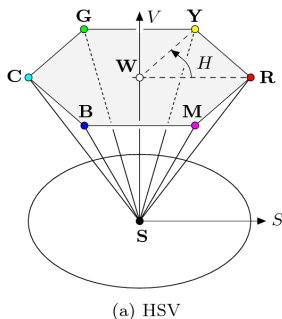
Desaturierung im RGB-Raum



$$\begin{pmatrix} R_D \\ G_D \\ B_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y \\ Y \\ Y \end{pmatrix} + s_{col} \cdot \begin{pmatrix} R - Y \\ G - Y \\ B - Y \end{pmatrix}$$

HSV- und HLS-Farbraum

Veränderungen an RGB-Werten ändern i.A. immer alle vom Menschen wahrgenommenen Farbattribute (Ton, Sättigung, Helligkeit) gleichzeitig. Daher sind für manche Anwendungen Farbräume vorteilhafter, die eine direkte Manipulation dieser Attribute erlauben.



HSV: Hue (Ton), Saturation (Sättigung), Value (Helligkeit), manchmal auch HSB oder HSI, HLS: Hue, Luminance, Saturation

Umrechnung RGB in HSV

RGB-Werte befinden sich im Intervall $[0, C_{\max}]$, C_{\min} sei das Minimum der drei Werte R,G,B, C_{high} das Maximum, der Wertebereich

$$\Delta C = C_{\text{high}} - C_{\min}, \text{ die relativen Farbkomponenten } R' = \frac{C_{\text{high}} - R}{\Delta C},$$

$$G' = \frac{C_{\text{high}} - G}{\Delta C}, B' = \frac{C_{\text{high}} - B}{\Delta C}$$

•

$$\text{Sättigung: } S = \begin{cases} \frac{\Delta C}{C_{\max}} & \text{für } C_{\max} > 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

•

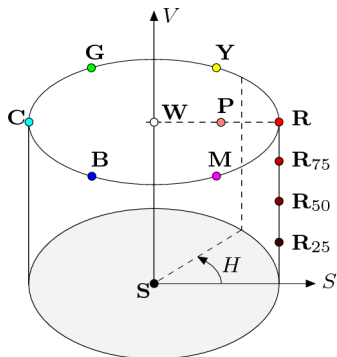
$$\text{Helligkeit (Value): } V = \frac{C_{\text{high}}}{C_{\max}}$$

•

$$\text{Farbton: } H' = \begin{cases} B' - G' & \text{wenn } R = C_{\text{high}} \\ B' - B' + 2 & \text{wenn } G = C_{\text{high}} \\ G' - R' + 4 & \text{wenn } B = C_{\text{high}} \end{cases}$$

$$\text{Normierung } H = \frac{1}{6}(H' + 6) \text{ für } H' < 0, \text{ sonst } H = \frac{1}{6}H'.$$

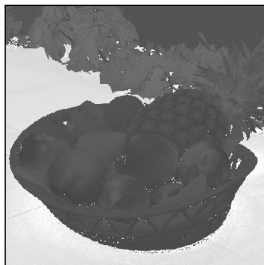
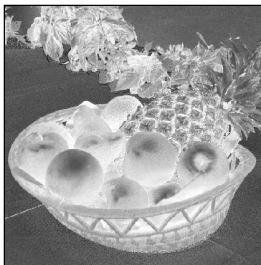
HSV-Farbraum



RGB-/HSV-Werte

Pkt.	Farbe	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>H</i>	<i>S</i>	<i>V</i>
S	Schwarz	0.00	0.00	0.00	—	0.00	0.00
R	Rot	1.00	0.00	0.00	0	1.00	1.00
Y	Gelb	1.00	1.00	0.00	1/6	1.00	1.00
G	Grün	0.00	1.00	0.00	2/6	1.00	1.00
C	Cyan	0.00	1.00	1.00	3/6	1.00	1.00
B	Blau	0.00	0.00	1.00	4/6	1.00	1.00
M	Magenta	1.00	0.00	1.00	5/6	1.00	1.00
W	Weiß	1.00	1.00	1.00	—	0.00	1.00
R₇₅	75% Rot	0.75	0.00	0.00	0	1.00	0.75
R₅₀	50% Rot	0.50	0.00	0.00	0	1.00	0.50
R₂₅	25% Rot	0.25	0.00	0.00	0	1.00	0.25
P	Pink	1.00	0.50	0.50	0	0.5	1.00

Beispiel: HSV-Darstellung

 h_{HSV}  s_{HSV}  v_{HSV}

Umrechnung HSV in RGB

Farbsektor: $H' = (6 \cdot H) \bmod 6$

Zwischenwerte ($v = V_{\text{HSV}}$):

$$\begin{aligned} c_1 &= \lfloor H' \rfloor & x &= (1 - S_{\text{HSV}}) \cdot v \\ c_2 &= H' - c_1 & y &= (1 - (S_{\text{HSV}} \cdot c_2)) \cdot V_{\text{HSV}} \\ & & z &= (1 - (S_{\text{HSV}} \cdot (1 - c_2))) \cdot V_{\text{HSV}} \end{aligned}$$

Normalisierte RGB-Werte in $[0, 1]$:

$$(R', G', B') \leftarrow \begin{cases} (v, z, x) & \text{wenn } c_1 = 0 \\ (y, v, x) & \text{wenn } c_1 = 1 \\ (x, v, z) & \text{wenn } c_1 = 2 \\ (x, y, v) & \text{wenn } c_1 = 3 \\ (z, x, v) & \text{wenn } c_1 = 4 \\ (v, x, y) & \text{wenn } c_1 = 5 \end{cases}$$

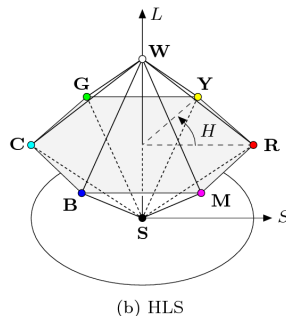
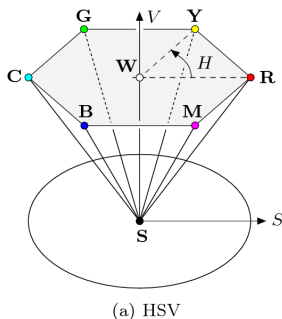
Danach Skalierung auf $[0, C_{\text{max}}]$.

Übersicht

- 1 Farbe
- 2 RGB- und HSV-Farbraum
- 3 Technische Farbräume**
- 4 Kolorimetrische Farbräume

HSV- und HLS-Farbraum

Veränderungen an RGB-Werten ändern i.A. immer alle vom Menschen wahrgenommenen Farbattribute (Ton, Sättigung, Helligkeit) gleichzeitig. Daher sind für manche Anwendungen Farbräume vorteilhafter, die eine direkte Manipulation dieser Attribute erlauben.



HSV: Hue (Ton), Saturation (Sättigung), Value (Helligkeit), manchmal auch HSB oder HSI, HLS: Hue, Luminance, Saturation

Umrechnung RGB in HLS

C_{\min} sei das Minimum der drei Werte R,G,B, C_{high} das Maximum, der Wertebereich $\Delta C = C_{\text{high}} - C_{\min}$

- Farbton: genau gleich wie bei HSV



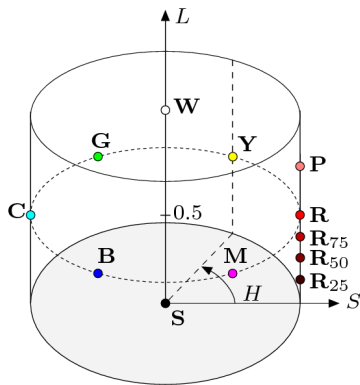
Luminanz:
$$L = \frac{C_{\text{high}} + C_{\min}}{2}$$



Sättigung:
$$S = \begin{cases} 0 & \text{für } L = 0 \\ \frac{1}{2} \frac{\Delta C}{L} & \text{für } 0 < L < \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \frac{\Delta C}{1-L} & \text{für } \frac{1}{2} < L < 1 \\ 0 & \text{für } L = 1 \end{cases}$$

Der Einheitswürfel im RGB-Raum wird wieder auf einen Zylinder mit Höhe und Radius 1 abgebildet, aber hier liegen alle Spektralfarben in der Ebene $L = \frac{1}{2}$ und der Weißpunkt außerhalb der Ebene bei $L = 1$.

HLS-Farbraum



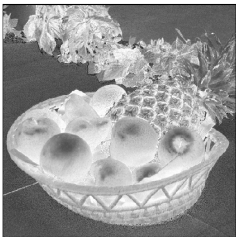
RGB-/HLS-Werte

Pkt.	Farbe	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>H</i>	<i>S</i>	<i>L</i>
S	Schwarz	0.00	0.00	0.00	—	0.00	0.00
R	Rot	1.00	0.00	0.00	0	1.00	0.50
Y	Gelb	1.00	1.00	0.00	1/6	1.00	0.50
G	Grün	0.00	1.00	0.00	2/6	1.00	0.50
C	Cyan	0.00	1.00	1.00	3/6	1.00	0.50
B	Blau	0.00	0.00	1.00	4/6	1.00	0.50
M	Magenta	1.00	0.00	1.00	5/6	1.00	0.50
W	Weiß	1.00	1.00	1.00	—	0.00	1.00
R₇₅	75% Rot	0.75	0.00	0.00	0	1.00	0.375
R₅₀	50% Rot	0.50	0.00	0.00	0	1.00	0.250
R₂₅	25% Rot	0.25	0.00	0.00	0	1.00	0.125
P	Pink	1.00	0.50	0.50	0/6	1.00	0.75

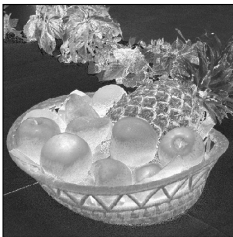
Für die Umrechnung HLS nach RGB s. Burger und Burge (2006), S.259.

Vergleich HSV- und HLS-Farbraum

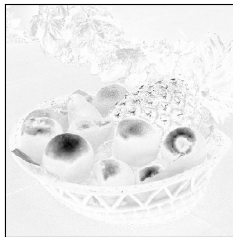
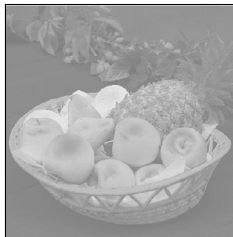
HSV

 S_{HSV}

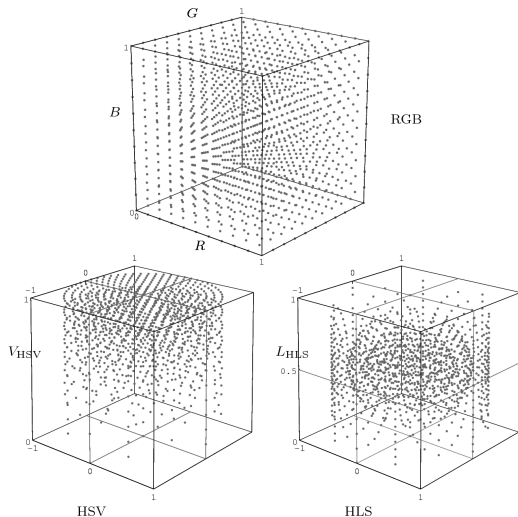
HLS

 S_{HLS}

Differenz

 $S_{HSV} - S_{HLS}$  V_{HSV}  L_{HLS}  $V_{HSV} - L_{HLS}$

Verteilung von Farbwerten im HSV- und HLS-Farbraum



- Es gilt allgemein $V_{\text{HSV}} > L_{\text{HLS}}$
- Sättigungswert ist bei HLS v.a. an hellen Stellen größer.
- In HSV bilden die maximal gesättigten Farben Kreise, Dichte nimmt nach oben hin zu.
- In HLS verteilen sich die Farben symmetrisch um die Mittelebene, gleichmäßigere Dichte

TV-Komponentenfarbräume: YUV und YC_bC_r

- YUV (PAL und NTSC) und YC_bC_r (JPEG, digitales TV) sind für die standardisierte Aufnahme, Speicherung, Übertragung und Wiedergabe im TV-Bereich in entsprechenden Normen definiert.
- RGB wird linear transformiert in eine Luminanzkomponente Y und zwei sog. Chromakomponenten, die Blau-Gelb- und Rot-Grün-Farbdifferenzen codieren (\Rightarrow Kompatibilität mit Schwarzweißgeräten)
- Chromakomponenten werden oft mit geringerer Auflösung codiert, da das menschliche Auge hier eine geringere räumliche Auflösung hat.
- Beispiel YUV (RGB sollte bereits gammakorrigiert sein):

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B$$

$$U = 0.492(B - Y)$$

$$V = 0.877(R - Y)$$

Vergleich YUV- und YC_bC_r -Farbraum

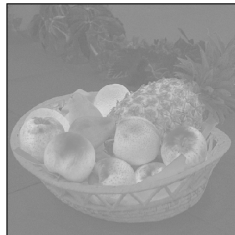
YUV



Y



U



V

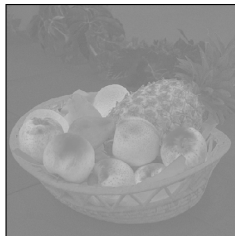
YC_bC_r



Y

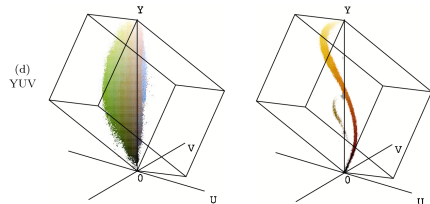
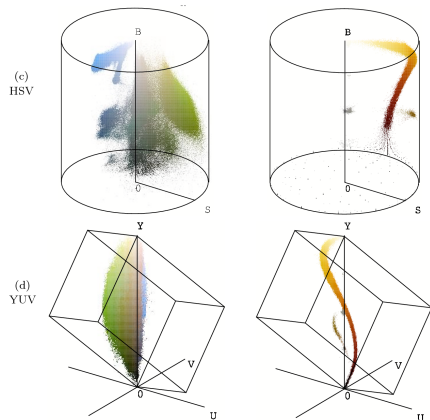
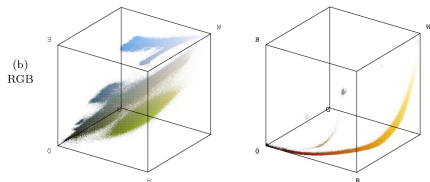
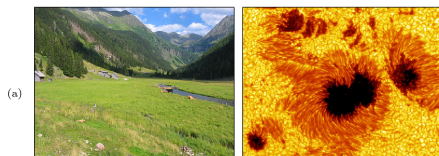


C_b



C_r

Farbverteilung in RGB, HSV und YUV



Übersicht

- 1 Farbe
- 2 RGB- und HSV-Farbraum
- 3 Technische Farbräume
- 4 Kolorimetrische Farbräume**

Kolorimetrische Farbräume

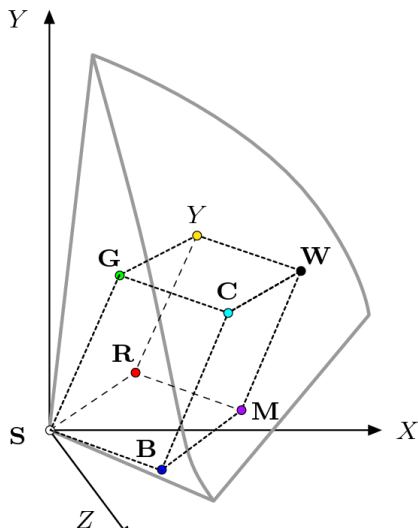
Die bisher besprochenen Farbräume sind im Normalfall geräteabhängig: sie beschreiben die relativen Ansteuerungsstärken der drei (oder vier bei Druckern) Farbkanäle des Geräts, die sich von Gerät zu Gerät unterscheiden. Damit sieht derselbe RGB-Wert auf jedem Gerät anders aus.

Mögliche Auswege:

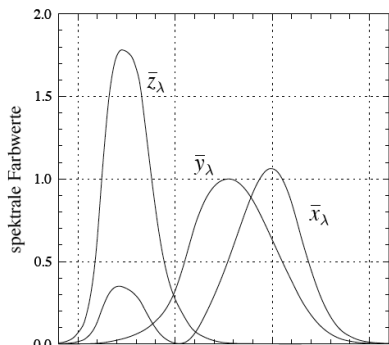
- **Standardisierung:** Farbkanäle des Ausgabegeräte müssen einem Normgerät entsprechen (z.B. sRGB, PAL, NTSC usw.).
- **Kalibrierung:** Vermessung der Emissionseigenschaften der Farbkanäle mit einem Spektro- oder Colorimeter. Aus diesen Daten kann eine Farbe von einem Gerät zu einem anderen umgerechnet werden.
- **Kolorimetrische Farbräume:** Geräteunabhängiger Farbraum, definiert auf drei Grundfarben und ihrer psychophysisch exakt vermessenen Beziehung zu den Spektralfarben.

Das Normvalenzsystem (CIE-Standard 1931)

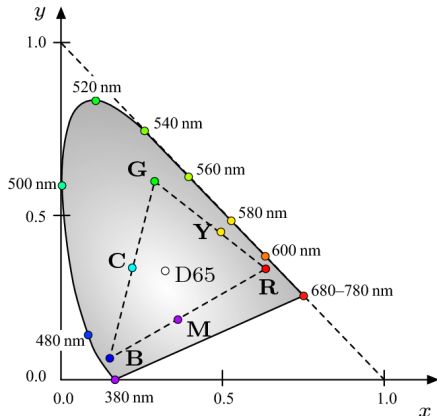
Farbmetrik (Kolorimetrie): Messung von Farben.



Lineare Transformation von RGB auf imaginäre 3 Primärfarben XYZ (Y: Luminanz, XZ Farbigkeit). Alle existierenden Farben haben nur positive Koeffizienten.



Kennzeichnung von Farben im CIE xy-Farbdiaagramm



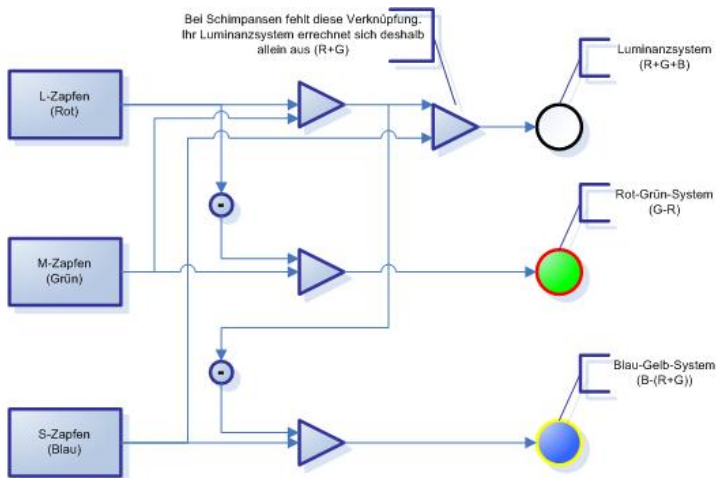
Alle Farbtöne gleicher Helligkeit entsprechen einer Ebene im XYZ-Raum, d.h. jeder Farbton kann in einem zweidimensionalen Diagramm dargestellt werden. Für die Ebene $Y = 1$ wird die Farbe normiert dargestellt:

$$x = \frac{X}{X + 1 + Z}$$

$$y = \frac{1}{X + 1 + Z}$$

Durch Angabe von XYZ oder Yxy wird eine Farbe eindeutig und geräteunabhängig gekennzeichnet.

Zapfenverschaltung in der Netzhaut



[Wikipedia]

Chromatische Adaption

- Die Festlegung der XYZ-Koordinaten fängt den menschlichen Farbeindruck nicht ein: 2 Farben mit exakt den gleichen Tristimuluswerten bei verschiedener Beleuchtung können völlig unterschiedlich wahrgenommen werden. Grund: **chromatische Adaption**
- Farbunterschiede in XYZ entsprechen nicht den wahrgenommenen Farbunterschiede.
- Jedes Stäbchen paßt sich individuell an die Beleuchtungsbedingungen an (v.a. an die Farbe der Beleuchtung)
- Die Signale aus den Stäbchen gehen durch eine adaptive, kompressive Nichtlinearität. Dann werden sie in einen achromatischen und in 2 Gegenfarbkanäle kombiniert.

CIE Lab - ein einfaches Farberscheinungsmodell

Merkmale:

- Modellierung der chromatischen Adaption (Normalisierung durch Referenzweiß)
- Nichtlinearität zur Anpassung an menschliche Wahrnehmung von Farbunterschieden
- Luminanz- und 2 Gegenfarbkanäle

$$\text{Nichtlinearität: } f(c) = \begin{cases} c^{\frac{1}{3}} & \text{für } c > 0.008856 \\ 7.787c + \frac{16}{116} & \text{für } c \leq 0.008856 \end{cases}$$

$$\text{Luminanz: } L = 116f\left(\frac{X}{X_{\text{ref}}}\right) - 16$$

$$\text{Rot-Grün-Gegenfarbkanal: } a = 500 \left(f\left(\frac{X}{X_{\text{ref}}}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_{\text{ref}}}\right) \right)$$

$$\text{Blau-Gelb-Gegenfarbkanal: } b = 200 \left(f\left(\frac{Y}{Y_{\text{ref}}}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_{\text{ref}}}\right) \right)$$