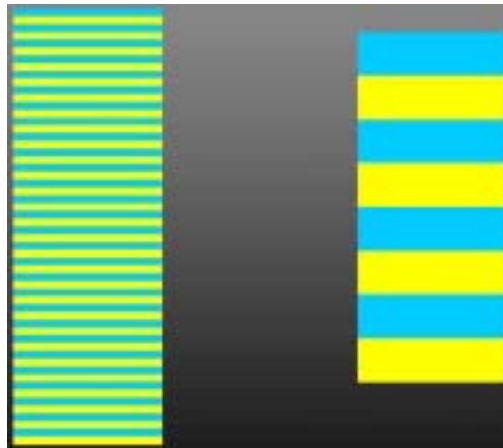
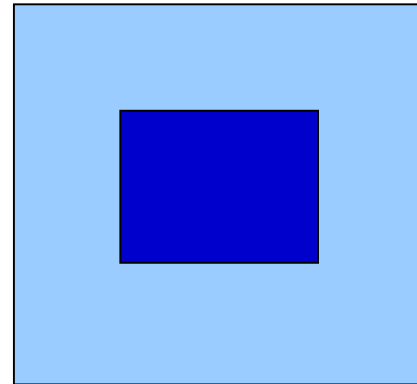
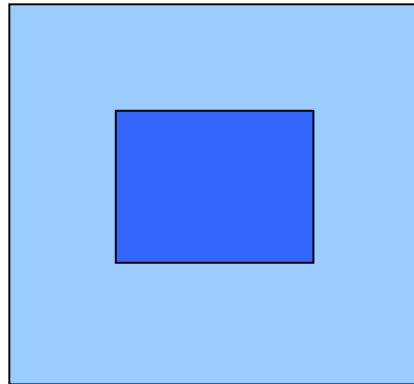
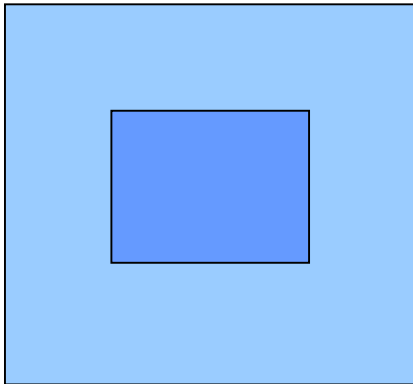


Farbe in der Computergraphik



Farbe in der Computergraphik

Gliederung:

- Licht und Farbe
- Farbspezifikation
- Farbmodelle
- Gamma und Gammakorrektur

Farbe in der Computergraphik

Motivation:

- Realistische Farbdarstellungen (Nachbildung der Lichtausbreitung)
- Farbmodelle zur intuitiven Spezifikation
- Farbmodelle zur Konvertierung von Farben zwischen unterschiedlichen Medien

Farbe in der Computergraphik

- Grundlagen: Physik (Optik, Lichtausbreitung), Physiologie und Psychologie
- Visuelle Wahrnehmung von Farben und Farbunterschieden: verschiedene Theorien
- Wahrgenommene Farbe eines Objektes ist abhängig von:
 - Lichteinfall,
 - Reflexions- und Transmissionseigenschaften
 - Farbe umgebender Objekte,
 - Visueller Wahrnehmung (Unterschiedlich bei jungen und alten Menschen, Wahrnehmungsstörungen)

Farbe in der Computergraphik

Was ist Licht?

- Sichtbarer Teil des elektromagnetischen Spektrums
- Wellenlängenbereich von 380 bis 780 nm (bei Tieren unterschiedlich)
- Frequenz des sichtbaren Lichtes entsprechend: $\sim 10^{15}$ Hz
- Charakterisiert durch (physikalische Größe) Licht-intensität und die (wahrgenommene Größe) Helligkeit.
- Licht breitet sich sehr schnell in alle Richtungen aus. Es wird an Oberflächen reflektiert und teilweise gebrochen bzw. von strahlenden Oberflächen emittiert.

Zusammenhang: Farbe und Licht

Farbe ist die Wahrnehmung der spektralen Zusammensetzung des Lichtes (welcher Anteil des einfallenden Lichtes hat welche Wellenlänge)

Farbwahrnehmung

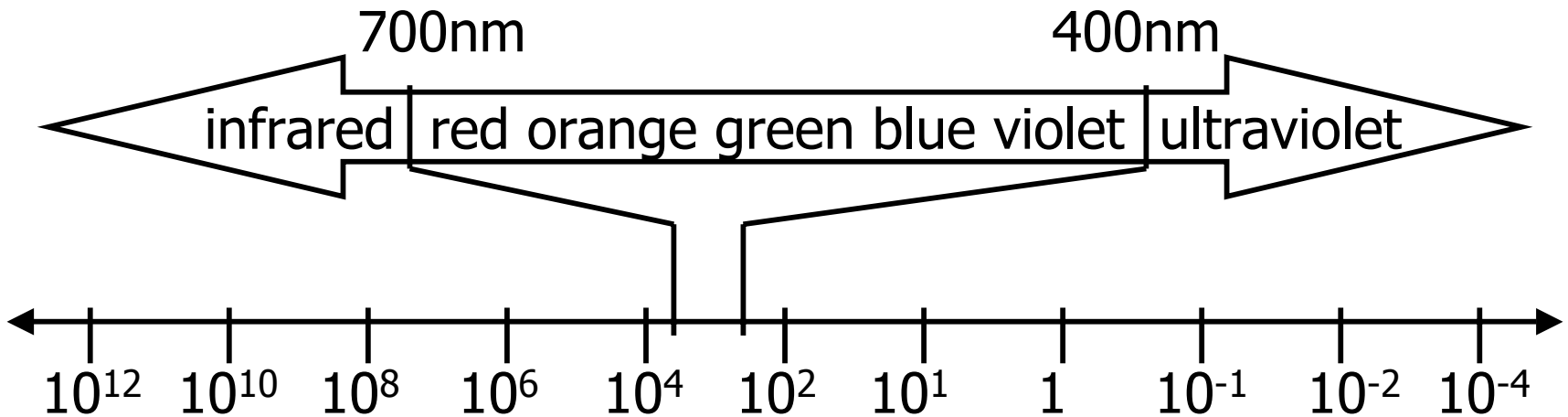
Ausgangspunkt:

- Wellentheorie des Lichtes → Farbwahrnehmung elektromagnetischer Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 380 und 780 nm.
- Lichtwahrnehmung in zwei Schritten:
 - 1. Reizaufnahme durch Rezeptoren auf der Retina
 - Stäbchen: für Schwarz-Weiß-Sehen auch bei geringer Intensität (\approx 120 Millionen)
 - Zapfen: für Farbwahrnehmung (\approx 6,5 Millionen)
 - 2. Verarbeitung der Reize in mehreren Stufen (Kontrastverstärkung am Ausgang der Retina, Interpretation im visuellen Kortex des Gehirns)

Farbwahrnehmung

Zapfen für das Farbsehen

- 3 Arten mit unterschiedlicher Wellenlänge (Rot, Grün, Blau im Verhältnis 10:10:1) -> Wichtig für Gestaltung von Farbskalen!
- Breite der Zapfen etwa $3 \mu\text{m}$ \Rightarrow Ortsauflösung 50 Bogensekunden



Farbwahrnehmung

Objektive Farbmerkmale

- **Dominante Wellenlänge:** die Wellenlänge aus dem Spektrum, bei der die höchste Leistung abgestrahlt wird
- **Reinheit:** physikalisches Maß, das für ein gegebenes Licht angibt, in welchem Verhältnis weißes Licht zu einem monochromatischen Licht zu mischen ist, um das gegebene Licht zu erzeugen.
- **Luminanz:** beschreibt die Strahlungsenergie; gibt Intensität bezogen auf den Flächeninhalt eines unendlich kleinen Flächenelementes an, das sich auf der Lichtquelle befindet

Farbwahrnehmung

Subjektive Farbmerkmale

- Helligkeit: physiologisch-psychologisches Maß für die Stärke des durch einen Beobachter wahrgenommenen Gesamtenergieflusses
 - Lightness: Helligkeit eines reflektierenden Objektes
 - Brightness: Helligkeit eines selbstleuchtenden Objektes (Lampe, Sonne, Bildschirm)
- Farbton (Hue): physiologischer Begriff zur Unterscheidung verschiedener Spektralmuster; unterscheidet zwischen reinen Farben (rot, gelb, grün, blau, usw.)
- Sättigung (Saturation): physiologisches Maß für den Grad, in dem der wahrgenommene Farbton eines Lichtes von dem Farbton eines weißen Lichtes gleicher Luminanz abweicht.

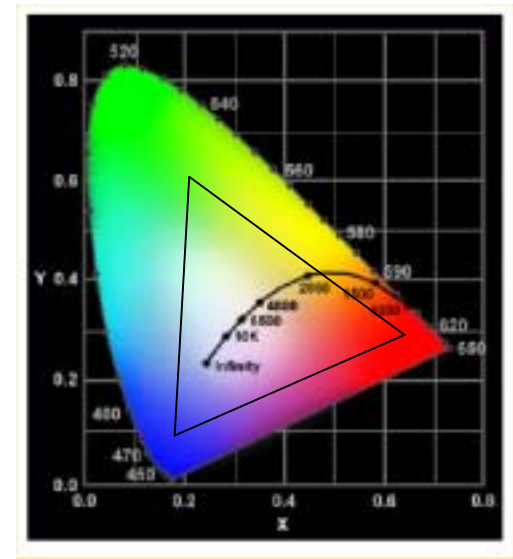
Farbspezifikation und Farbräume

- 3 Arten von Photorezeptoren → Abbildung jeder Farbe ist durch Mischung aus 3 Primärfarben (mit bestimmten Gewichten möglich)
- CIE = Commission Internationale de l'Éclairage
- Abbildung einer spektralen Leistungsverteilung auf 3D-Koordinaten in einem Farbraum
- CIE-Diagramm zur Farbstandardisierung (1931)

Farbspezifikation und Farbräume

- Farbmodell: Spezifikation eines 3D-Koordinatensystems und einer Untermenge davon, in der alle sichtbaren Farben eines bestimmten Farbbereiches (Gammut) liegen.

- CIE-Diagramm und Bildschirmgammut



Farbspezifikation und Farbräume

Hardwareorientierte Farbmodelle:

Motiviert durch die Charakteristika von Ausgabegeräten.

Beispiele: RGB- und CMY-Modell

Perzeptionsorientierte Farbmodelle:

Gleiche Abstände im Farbraum korrespondieren zu (etwa) gleichen Abständen in der Farbwahrnehmung.

Nutzung von physiologischen Größen: Farbton, -sättigung, -helligkeit

Beispiele: HLS- und HSV-Modell

Hardwareorientierte Modelle sind unerlässlich; perzeptionsorientierte für die Farbeingabe wünschenswert. → Transformation notwendig.

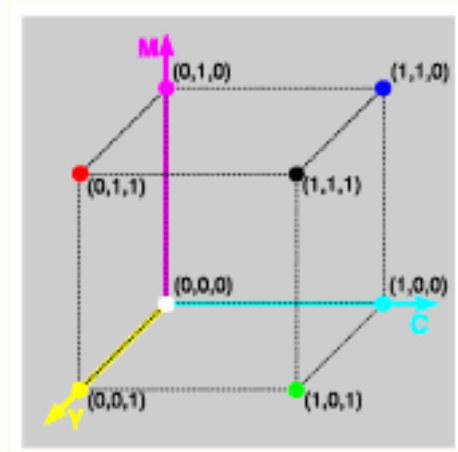
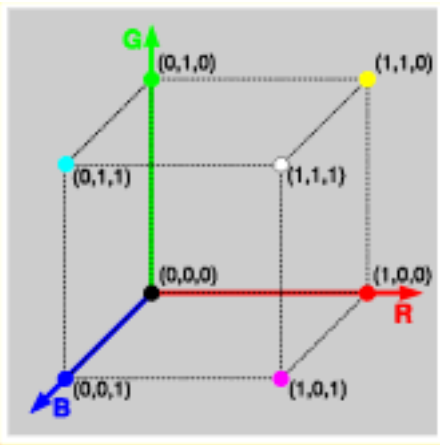
Farbspezifikation und Farbräume

Hardwareorientierte Farbmodelle:

- RGB: Additives Farbmodell, bei dem Farben als Linearkombination ihres Rot, Grün, Blau-Anteils beschrieben werden. Genutzt für Ansteuerung von Monitoren.
- OpenGL-Programmierung nutzt dieses Modell. Spezifikation als Vektor: `GLfloat (1.0, 0.0, 0.0)`
- CMY: Subtraktives Farbmodell, bei dem Farben als Linearkombination ihres Cyan, Magenta, Yellow-Anteils beschrieben werden. Genutzt für Ansteuerung von Druckern.
- Beim Druck: Hinzunahme von reinem Schwarz.

Farbspezifikation und Farbräume

Hardwareorientierte Farbmodelle:



RGB und CMY



Prinzip der additiven und subtraktiven Farbmischung

Farbspezifikation und Farbräume

- Konvertierung: RGB \blacklozenge CMY

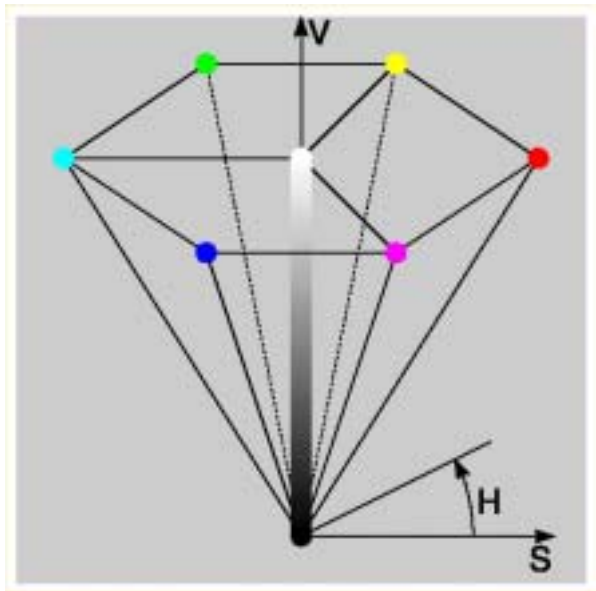
$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} C \\ M \\ Y \end{pmatrix}$$
$$\begin{pmatrix} C \\ M \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

- Einfaches, angenähertes Verfahren

Farbspezifikation und Farbräume

Perzeptionsorientierte Farbmodelle

HSV-Modell:

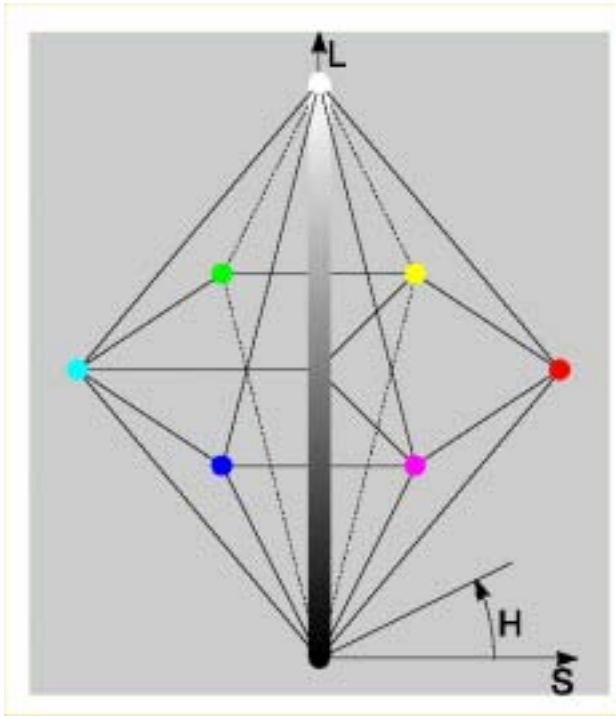


- Hue / Saturation / Value
- Hue – Winkel um vertikale Achse, 0 entspricht grün
- Änderung der Sättigung: Änderung des Weißanteils
- Helligkeit entspricht dem Schwarzanteil
- Bsp: gesättigtes dunkelblau: $H = 240, S = 1, V = 0$.

Farbspezifikation und Farbräume

Perzeptionsorientierte Farbmodelle

HLS-Modell:



- Hue/ Lightness /Saturation
- Strategie von Malern: nimm
- reines Pigment (H), Weiß dazu (S), Schwarz dazu (1-L)
- Komponenten nicht unabhängig voneinander
- Graustufen: $S = 0$
- Voll gesättigte Farben:
- $L = 0.5, S = 1$

Farbspezifikation und Farbräume

Konvertierung: HLS in RGB

$$M_1 = S \sin(H)$$

$$M_2 = S \cos(H)$$

$$I = \frac{L}{\sqrt{3}}$$

$$(R, G, B) = (M_1, M_2, I) \cdot \begin{pmatrix} \frac{2}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{pmatrix}$$

Farbspezifikation und Farbräume

Konvertierung: RGB in HLS

$$(M_1, M_2, I_1) = (R, G, B) \cdot \begin{pmatrix} \frac{2}{\sqrt{6}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ -\frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \end{pmatrix}$$

$$H = \arctan\left(\frac{M_1}{M_2}\right)$$

$$S = \sqrt{M_1^2 + M_2^2}$$

$$L = I_1\sqrt{3}$$

Farbspezifikation

Indizierte Farben/ Paletten:

Motivation:

Bei hoher räumlicher Auflösung stehen nur wenige Farben zur Verfügung

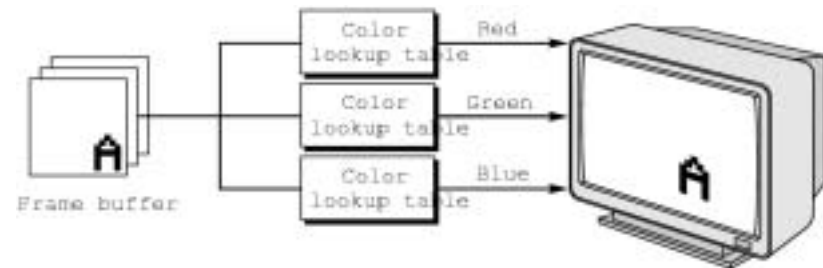
(begrenzter Framebuffer)

Typisch: 8 Bit (256 Werte)

Werte werden als Indizes in eine Farbtabelle genutzt, die je 8 Bit R-, G-, B-Werte angeben.

Input	Red	Green	Blue
0	0	0	0
1	$2^m - 1$	0	0
⋮	0	$2^m - 1$	0
⋮	⋮	⋮	⋮
$2^k - 1$	⋮	⋮	⋮

m bits m bits m bits



Farbspezifikation durch den Benutzer

Auswahl aus einem Menü (Palette)

- nur sinnvoll bei geringer Farbanzahl
- Farben auf kleinen Flächen schwer zu erkennen

Namentliche Nennung ("gelblich-grün", "blaugrau")

- mehrdeutig und subjektiv
- Abhilfe: Color Naming Scheme (CNS, international standardisiert).

Koordinatenangaben in einem Farbraum

- textuell, Slider
- Interaktion mit graphischer Darstellung des Farbmodells

Gamma und Gammakorrektur

Gamma

- visuelles System reagiert nicht-linear auf Intensitätsänderungen
- Nichtlineare Reaktion des Elektronenstrahls im Monitor auf Spannungsänderungen
- Intensität des "Lichts" am Monitor ist abhängig von der Eingangsspannung des Elektronenstrahls: $I = \text{constant}(V)^\gamma$
- Eingangsspannung für eine gewünschte Intensität:

$$V = \left(\frac{I}{\text{constant}} \right)^{\frac{1}{\gamma}}$$

- Für Farbmonitore typischerweise: $2.3 \leq \gamma \leq 2.6$

Gamma und Gammakorrektur

- Kompensation für die Nicht-Linearität des Elektronenstrahls
- Reaktion des visuellen Systems und Reaktion des Elektronenstrahls sind nahezu invers zueinander.
- Gammakorrektur kalibriert nur die Intensität der Anzeige, nicht die Farben.

