



LUDWIG-  
MAXIMILIANS-  
UNIVERSITÄT  
MÜNCHEN

LFE Medieninformatik • Prof. Dr. Ing. Axel Hoppe

# COMPUTERGRAFIK I

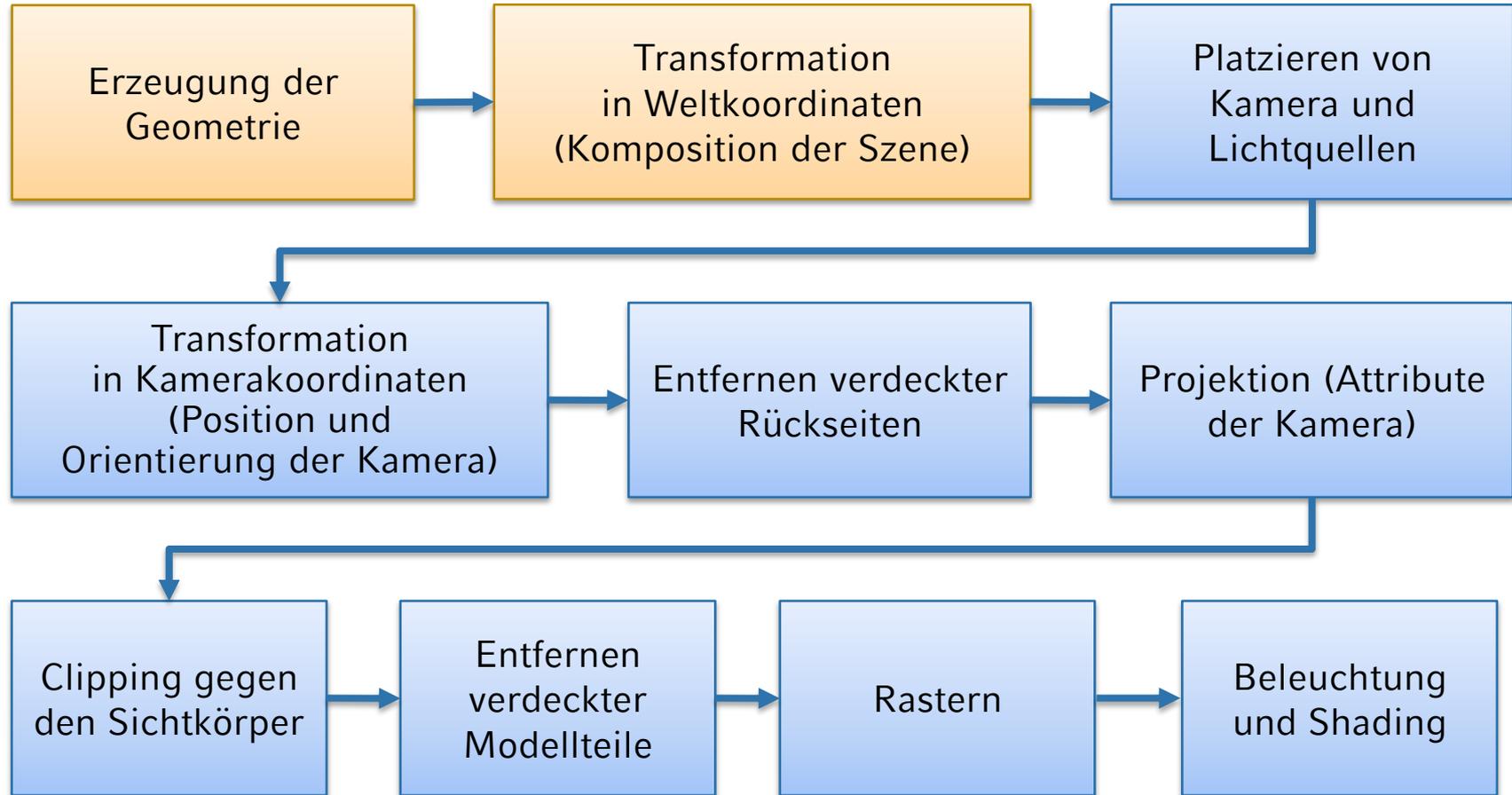
Farbe und Sichtbeschreibung

- Rendering-Pipeline
- Koordinatensysteme
- Transformationen

- Definition eines Polygons:
  1. Angabe der Koordinaten der Eckpunkte
    - ◆  $x$ -,  $y$ -,  $z$ -Koordinatentripel
    - ◆ Verbindung der Eckpunkte zu einem Polygon wird implizit hergestellt:
      - Verbinde den  $i$ -ten Punkt mit dem  $(i + 1)$ -ten
      - Verbinde den letzten mit dem ersten zum Schließen des Polygons

2. Auflistung aller Eckpunkte (vertices) in einer Liste
  - Verbindung wird angegeben durch eine Liste von Indizes (Kanten definiert als indizierte Eckpunktliste)
  - Vorteil: kompakte Speicherung (keine Redundanz), Projektion/Transformation des Modells: Iteration über alle Eckpunkte
3. Weitere komplexere Modellierungstechniken

# RENDERING-PIPELINE



# FAHRPLAN FÜR HEUTE

- Farbe
- Zusammenbau der Szene



LUDWIG-  
MAXIMILIANS-  
UNIVERSITÄT  
MÜNCHEN

LFE Medieninformatik • Prof. Dr. Ing. Axel Hoppe

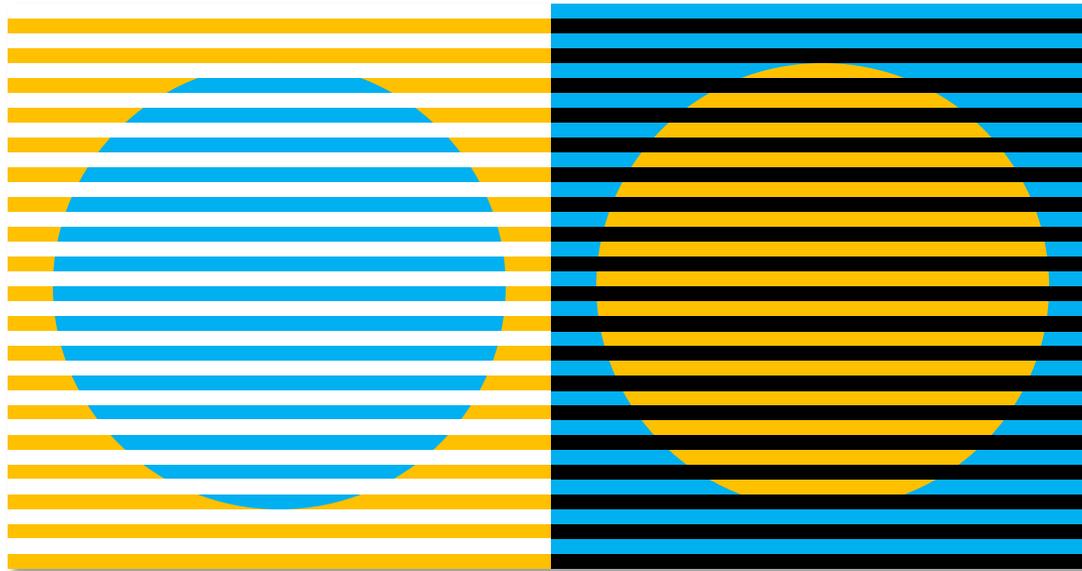
3D-Computergrafik und -animation

**FARBE**

## Motivation:

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

- 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 und
  - visueller Wahrnehmung (Unterschiedlich bei jungen und alten Menschen, Wahrnehmungsstörungen).



- Die blauen und orangen Farben sind in beiden Bildern exakt gleich

- Die Wahrnehmung von Farben wirkt auf zweierlei Art psychologisch:
  1. Hervorrufen von Assoziationen– also Vorstellungen, meistens Erinnerungen an Dinge wie
    - ◆ Feuer (Rot),
    - ◆ Gras (Grün),
    - ◆ Zitrone (Gelb), siehe die Tabelle oben.

2. Gefühle (Farbgefühl, Gefühlston, Anmutungsqualität, Gefühlscharakter) kann hervorgerufen werden bei Verwendung von Eigenschaften
  - ◆ gefährlich (Rot),
  - ◆ giftig (Grün),
  - ◆ frisch (Gelb).

- Assoziationen und Gefühle in Folge von Farbwahrnehmung gehen in die Schöpfungen der Kultur(en) ein.
- Nach der „Empiristischen Theorie der Gefühlswirkung von Farben“ werden die Farbgefühle individuell und implizit (unbewusst, nicht erinnerbar) gelernt: Gefühle, die der Mensch auf Grund seiner ererbten Triebstruktur und Daseinsthematik ursprünglich gegenüber bestimmten überall vorkommenden „Universalobjekten“ bzw. „Universalsituationen“ entwickelt

- Der blaue Himmel,
- das Wasser,
- die grüne Vegetation,
- das rote Feuer,
- Blut,
- die gelbe Sonne,
- der braune Erdboden,
- Fäkalien,
- der graue Felsen,
- die schwarzen Brandreste.

# FARBEN – WAHRNEHMUNG: UNIVERSITUATIONEN

- Situationen, in denen sich der Mensch täglich befindet,
- etwa die dunkle (schwarze) Nacht und
- der helle (weiße) Tag

## 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

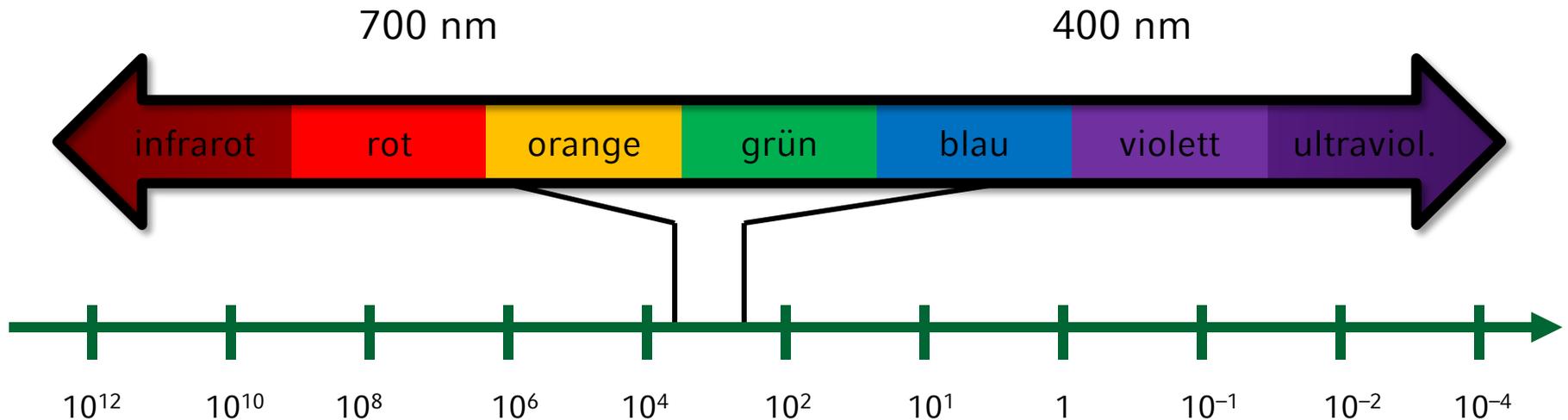
- Farbe ist die Wahrnehmung der spektralen Zusammensetzung des Lichtes (welcher Anteil des einfallenden Lichtes hat welche Wellenlänge)

## 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

- Drei 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

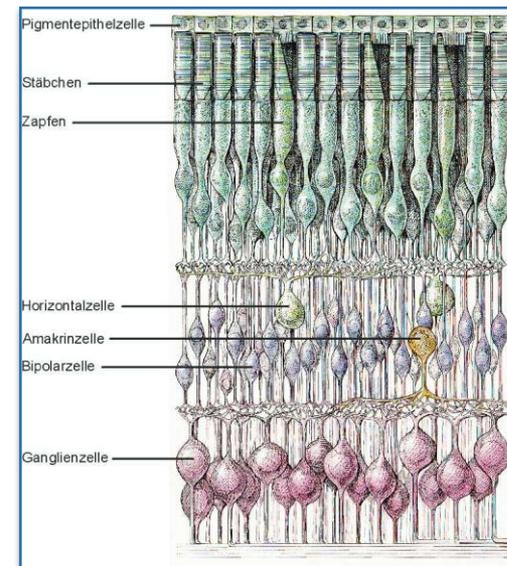


- Farben, die durch die Zerlegung weißen Lichts entstehen, werden als Spektralfarben bezeichnet.
- Spektrum enthält nur einen kleinen Teil der Farben – nämlich nur reine Farben, und von diesen nicht diejenigen auf der sogenannten „Purpurlinie“ zwischen Violett und Rot.
- Alle anderen, die durch Farbmischung entstehen, werden als „Mischfarben“ bezeichnet.
- Bestimmte Mischfarben können dem menschlichen Auge durch Metamerie als identisch mit bestimmten Spektralfarben erscheinen.

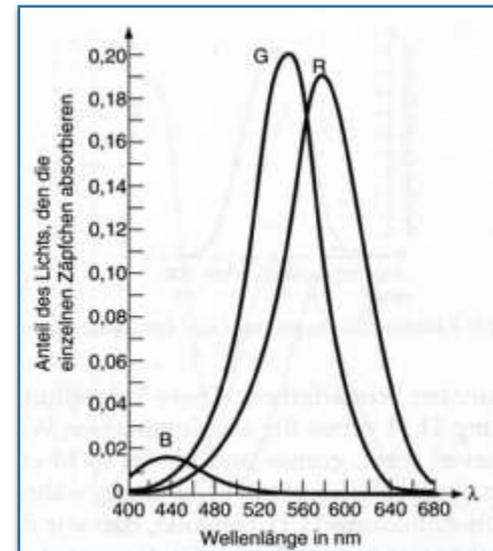
# FARBWAHRNEHMUNG

Farbe	Wellenlänge
Rot	≈ 625–740 nm
Orange	≈ 590–625 nm
Gelb	≈ 565–590 nm
Grün	≈ 520–565 nm
Cyan	≈ 500–520 nm
Blau	≈ 450–500 nm
Indigo	≈ 430–450 nm
Violett	≈ 380–430 nm
Magenta	Mischfarbe
Braun	Mischfarbe

- Bild wird auf Netzhaut „projiziert“
- Photorezeptorzellen wandeln Lichtimpulse in elektrische Impulse um
- Stäbchenzellen:
  - Hell-Dunkel
  - 498 nm
- Zapfenzellen
  - Farbe
  - 3 Empfindlichkeiten



- Experimente zum Farbempfinden
- Spektralreaktion
- Reaktion auf blaues Licht schwächer



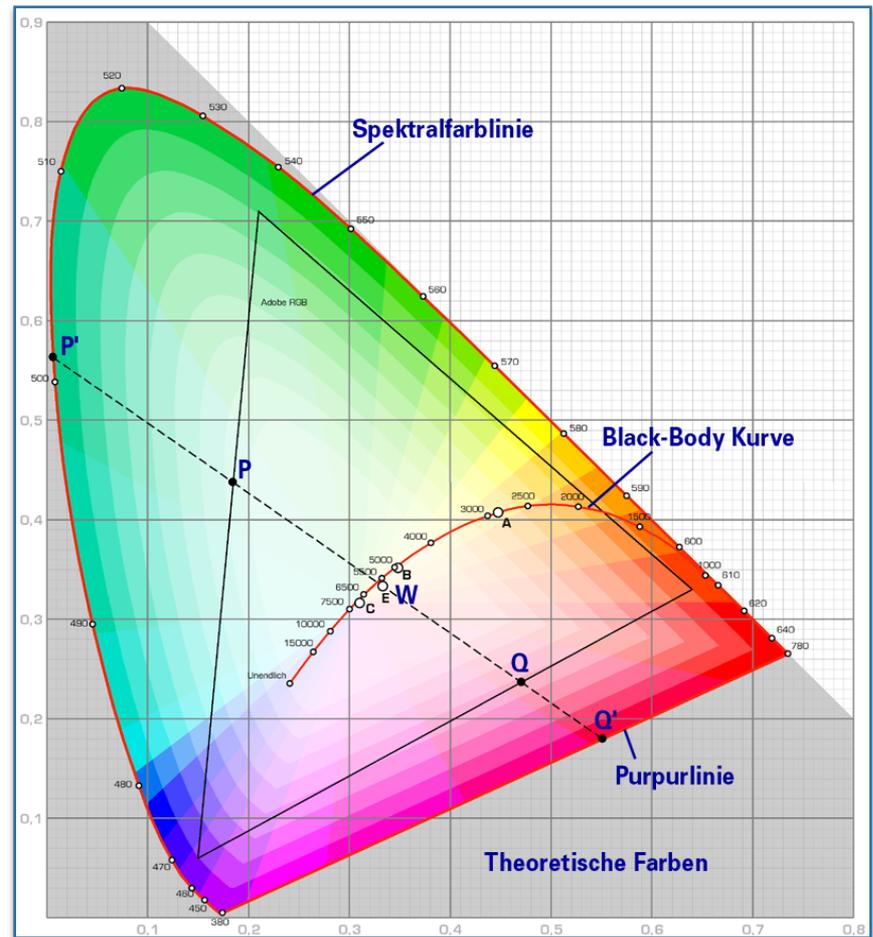
## Objektive Farbmerkmale

- **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.

- **Subjektive Farbmerkmale**
- Helligkeit: Physiologisch-psychologisches Maß für die Stärke des durch einen Beobachter wahrgenommenen Gesamtenergieflusses
  - Lightness: Helligkeit eines reflektierenden Objektes
  - Brightness: Helligkeit eines selbstleuchtenden Objekte (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.

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

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

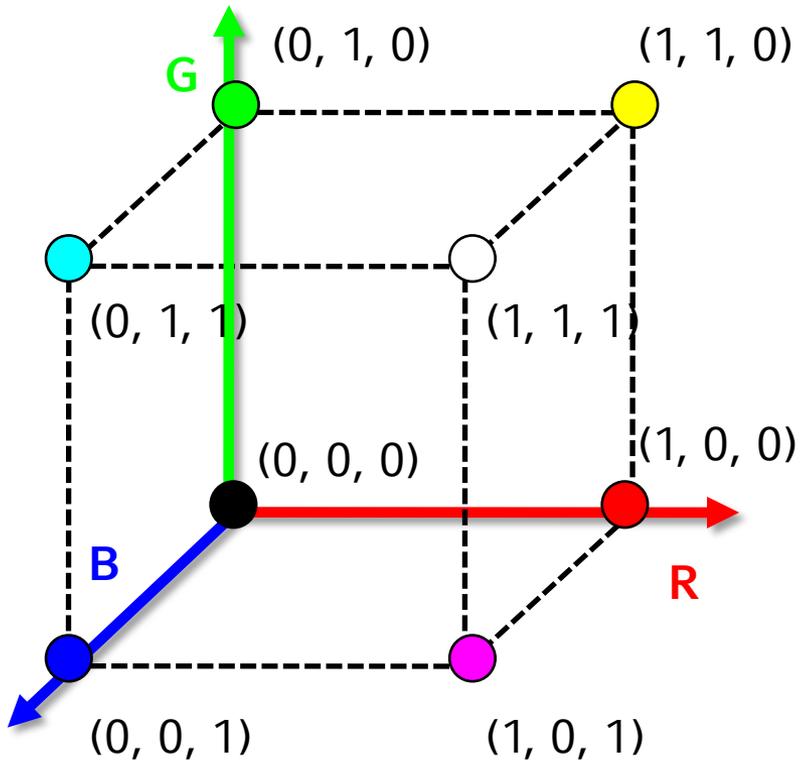


- Hardwareorientierte Farbmodelle:
  - Motiviert durch die Charakteristika von Ausgabegeräten.
  - Beispiele: RGB- und CMY-Modell
- Perzeptionsorientierte Farbmodelle:
  - Gleiche Abstände im Farbraum korrespondieren zu (etwa) gleichen Abständen in der Farbwahrnehmung.
  - Nutzung von physiologischen Größen: Farbton, -sättigung, -helligkeit
  - Beispiele: HLS- und HSV-Modell
- Hardwareorientierte Modelle sind unerlässlich; perzeptionsorientierte für die Farbeingabe wünschenswert. → Transformation notwendig.

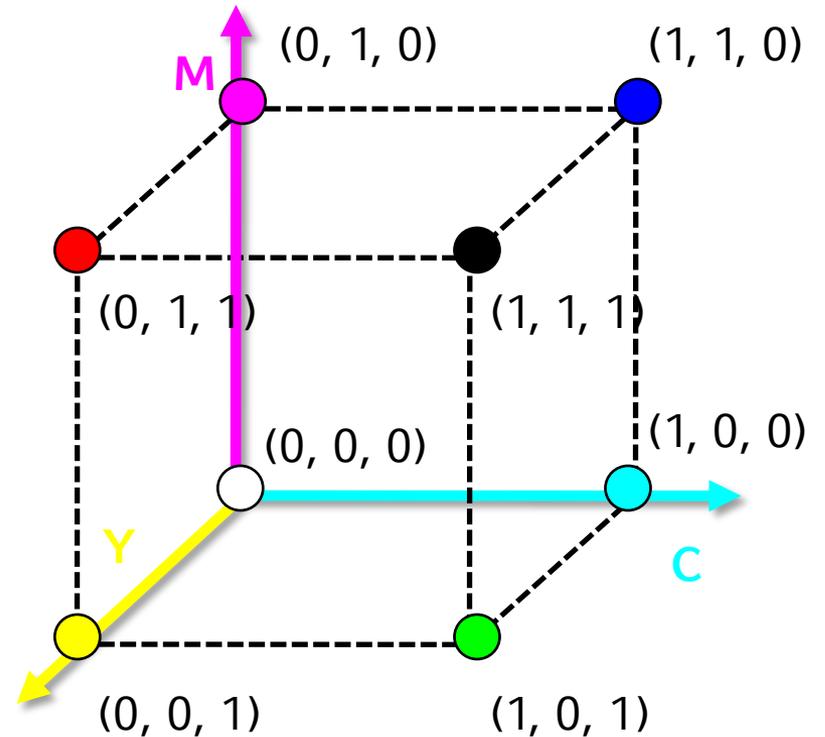
## Hardwareorientierte Farbmodelle:

- **RGB:** Additives Farbmodell, bei dem Farben als Linearkombination ihres Rot-, Grün-, Blau-Anteils beschrieben werden. Genutzt für Ansteuerung von Monitoren.
- **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.

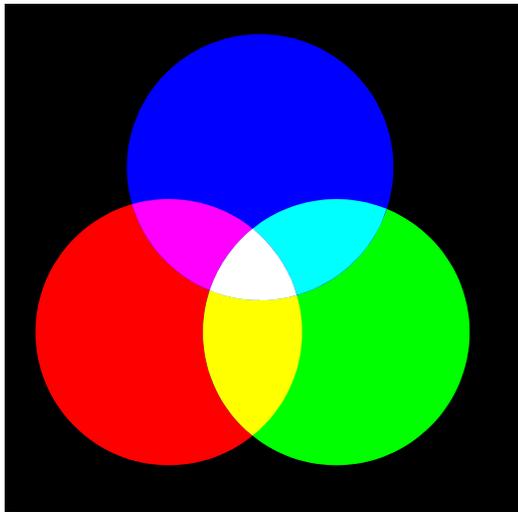
RGB-Farbmodell



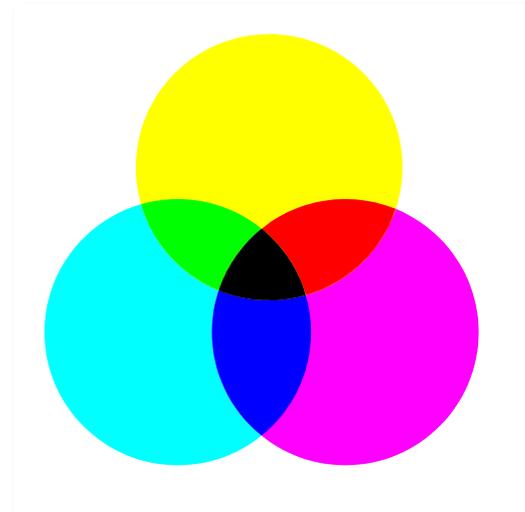
CMY-Farbmodell



additive Farbmischung



subtraktive Farbmischung

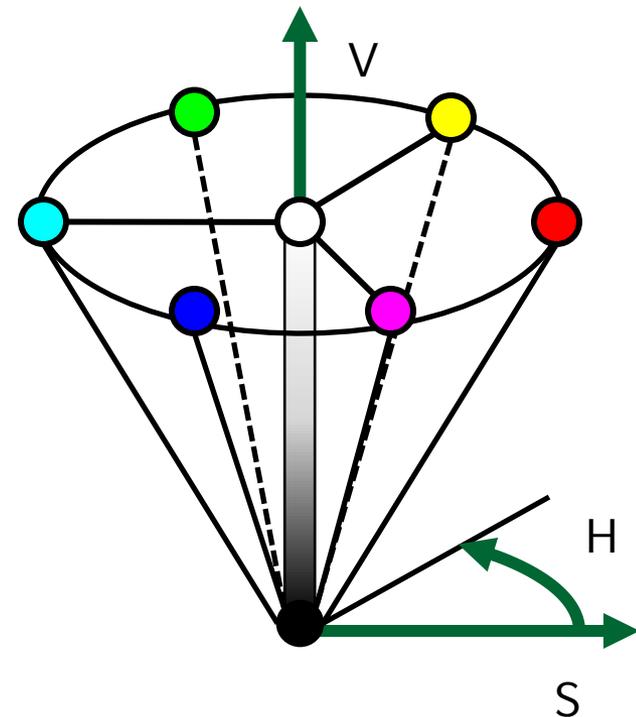


- Konvertierung: RGB  $\leftrightarrow$  CMY
- Einfaches, angenähertes Verfahren

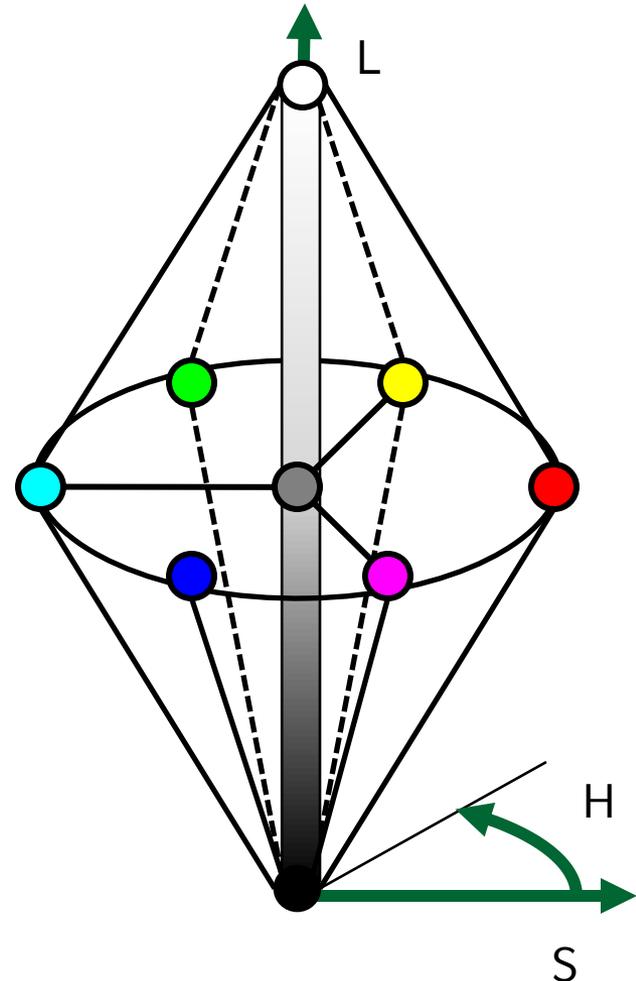
$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} C \\ M \\ Y \end{pmatrix}$$

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

- Hue, Saturation, Value
- Hue – Winkel um vertikale Achse,  $0^\circ$  entspricht rot
- Änderung der Sättigung
  - 0 ... 1
- Helligkeit entspricht dem Schwarzanteil
- Beispiel: gesättigtes dunkelblau:
  - $H = 225^\circ$ ,
  - $S = 100 \%$ ,
  - $V = 100 \%$ .



- 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:  
 $L = 0,5, S = 1$



# KONVERTIERUNG: HLS IN RGB

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

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

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

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

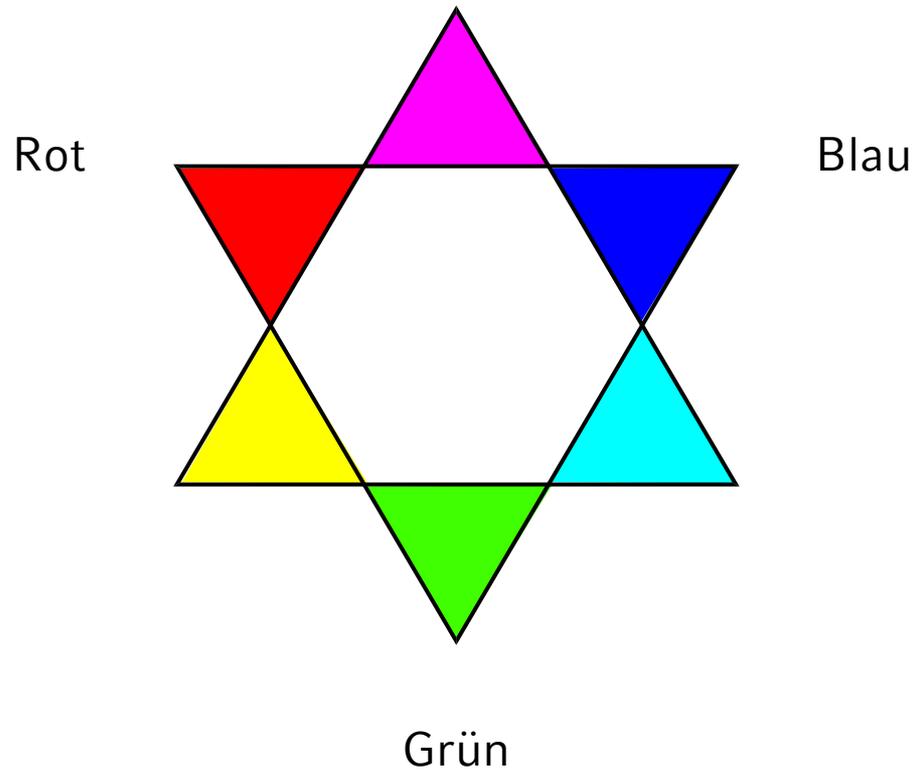
# KONVERTIERUNG: RGB IN HLS

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

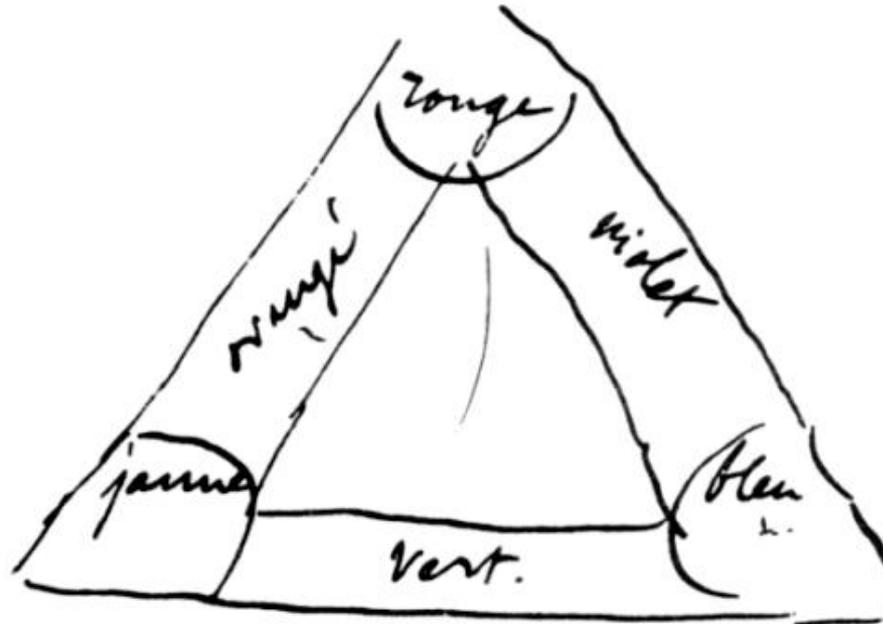
$$H = \arctan\left(\frac{M_1}{M_2}\right)$$

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

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



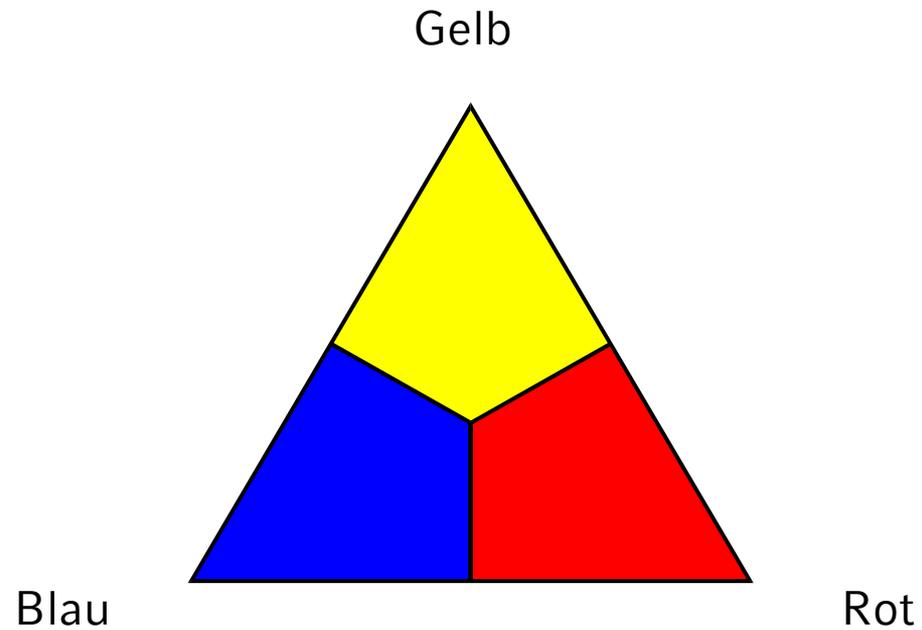
# FARBEN – EXKURS: DELACROIX



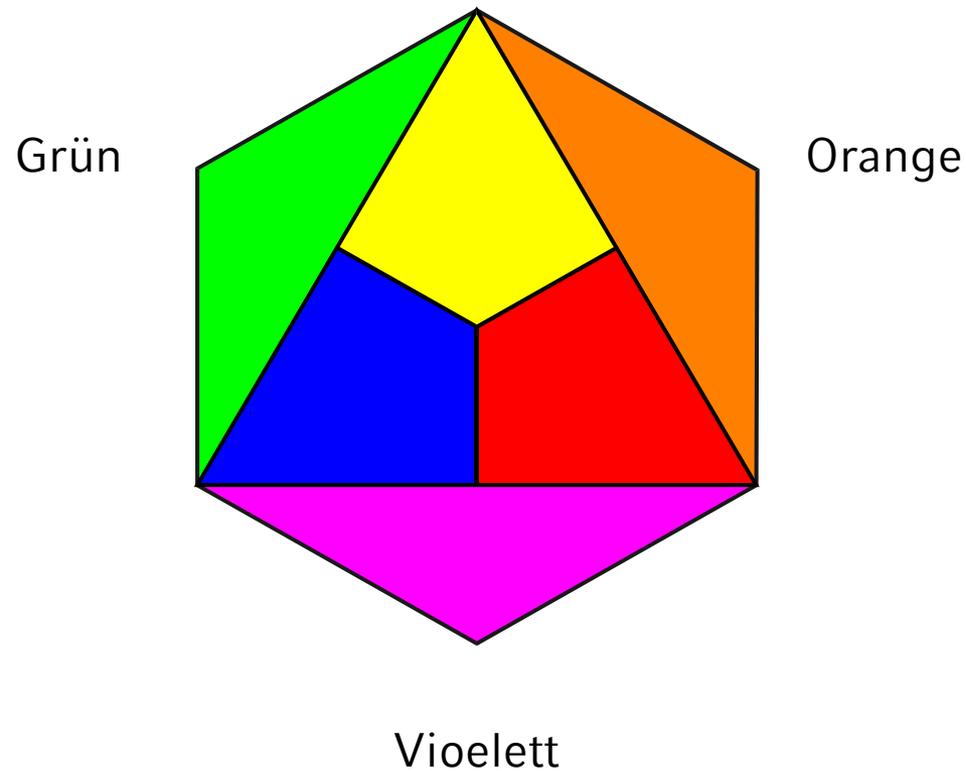
Des 3 couleurs primitives se forment les  
3 binaires. — si se au ton binaire vous

- Zahlreiche Persönlichkeiten beschäftigten sich mit Arbeiten zur Theorie der Farben:
- Leonardo da Vinci – „Ein Künstler, welcher ohne Theorie ans Werk geht, ist wie ein Steuermann, der sich ohne Steuerruder und Kompass aufs Meer wagt.“ aus: „Traktat von der Malerei“,
- Isaac Newton,
- Johann Wolfgang Goethe,
- Philip Otto Runge,
- Johannes Itten, „Kunst der Farbe“, 1962.

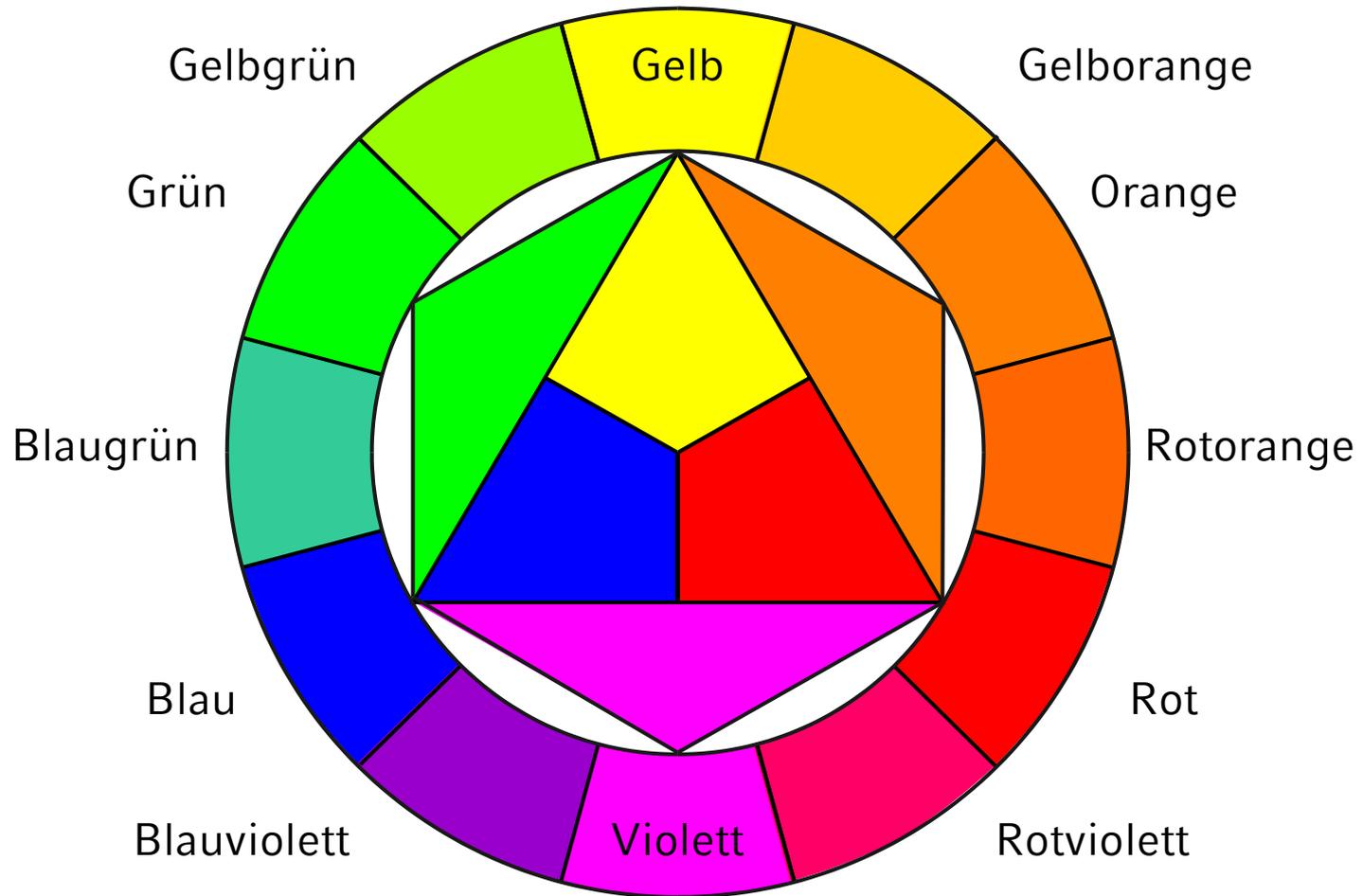
# FARBEN – EXKURS: FARBEN 1. ORDNUNG



# FARBEN – EXKURS: FARBEN 2. ORDNUNG



# FARBEN – EXKURS: FARBEN 3. ORDNUNG



- Von *Kontrast* spricht man, wenn zwischen zwei zu vergleichenden Farbwirkungen deutliche Unterschiede oder Intervalle festzustellen sind.
- Ist Unterschied maximal:
  - *polarer Kontrast*,
  - Farbwerte heißen dann *Pole* des Kontrastes

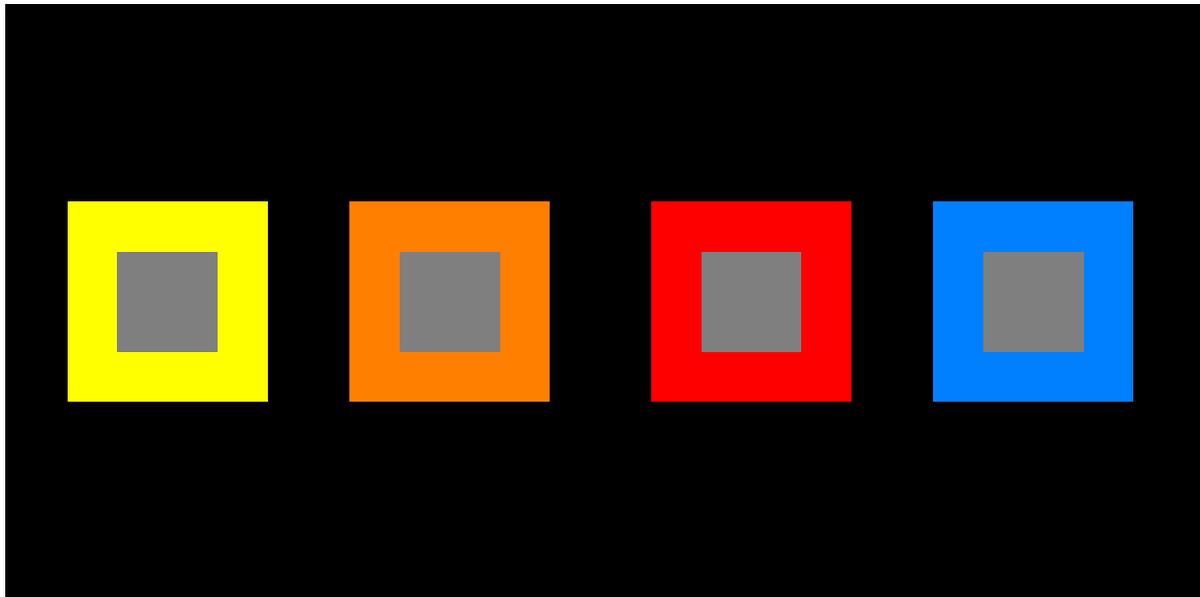
# FARBKONTRASTE: FARBE-AN-SICH- KONTRAST

- „Buntheit“ mehrerer Farben nebeneinander
- beschrieben durch mindestens drei Farben
- Maß ist Abstand der Farben untereinander auf dem Farbkreis
- Rot, Blau und Gelb ergeben maximalen Buntkontrast

- Tonwertkontrast
- Abstand der Farben auf der Tonwertskala
- Pole:
  - Schwarz und
  - Weiß



- basiert auf der Erscheinung, dass das menschliche Auge zu einer Farbe die Komplementärfarbe generiert
- Wirkung einer Farbe verändert sich durch umgebende Farbflächen
- Grau erscheint auf gelb hellviolett, auf orange bläulich usw.



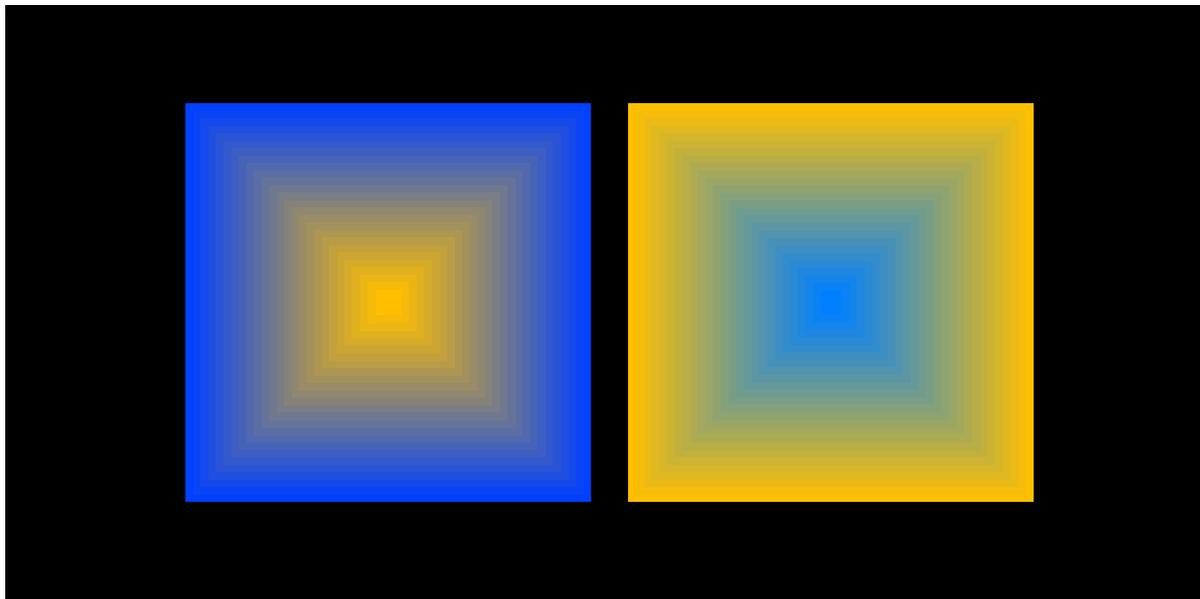
# FARBKONTRASTE: SIMULTAN-KONTRAST

- Streifen in der Mitte ist gleichmäßig gefüllt
- Kombination von Hell-Dunkel- und Simultankontrast

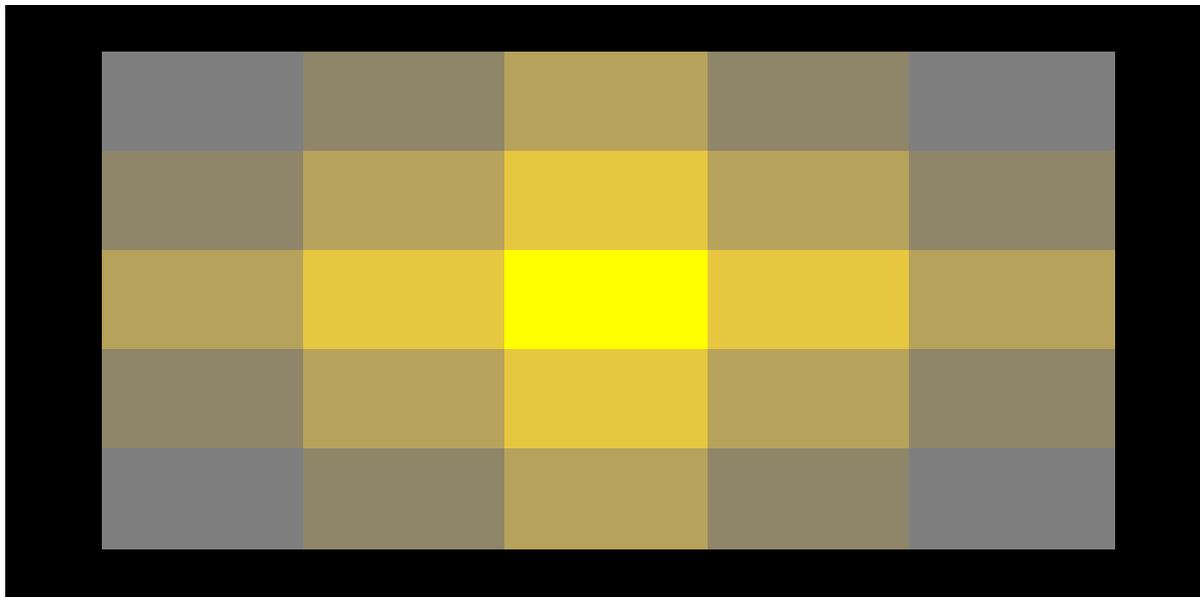


# FARBKONTRASTE: WARM-KALT-KONTRAST

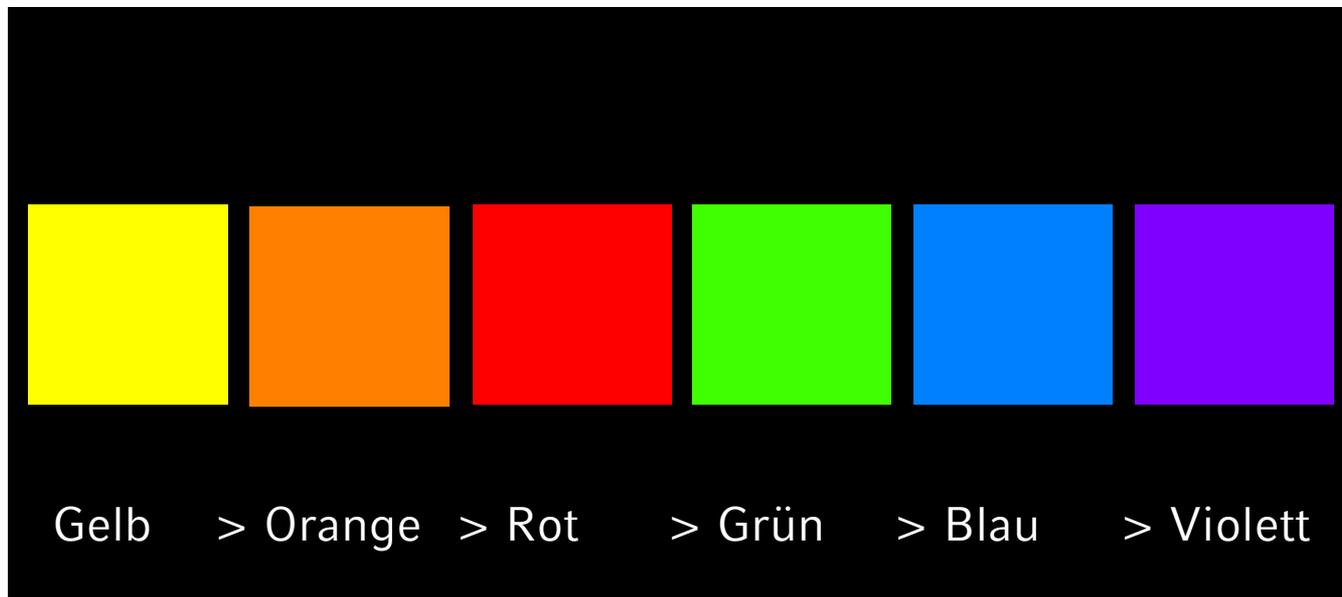
- maximaler Kontrast zwischen Blaugrün (kalt) und Rotorange (warm)
- Abstand zweier Farben auf dieser Skala ist Maß für den Kontrast
- Teil des Warm-Kalt-Kontrastes ist die Wirkung, dass warme Farben räumlich näher wirken als kalte; deshalb auch Perspektivkontrast genannt



- Unterschied zwischen Leucht- und Buntkraft von Farben
- beschrieben durch Relationen der Farben zueinander (Satt-Trübe, Leuchtend-Stumpf)
- Intensität einer Farbe kann gesteigert werden, indem sie in die Nähe einer Farbe mit schwächerem Tonwert gebracht wird

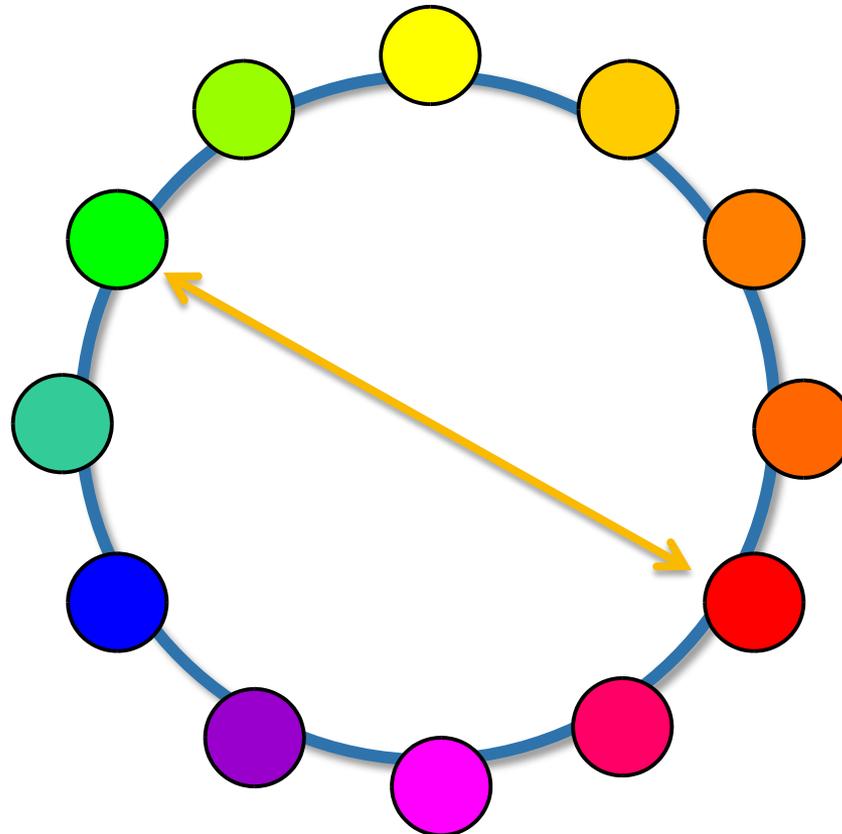


- „Kräfteverhältnis“ von Farben in ihrer Wirkung bezüglich ihrer Ausdehnung
- etwa so wirkt eine orange Fläche größer als eine gleichgroße blaue
- Goethe: Farben haben „Gewichte“

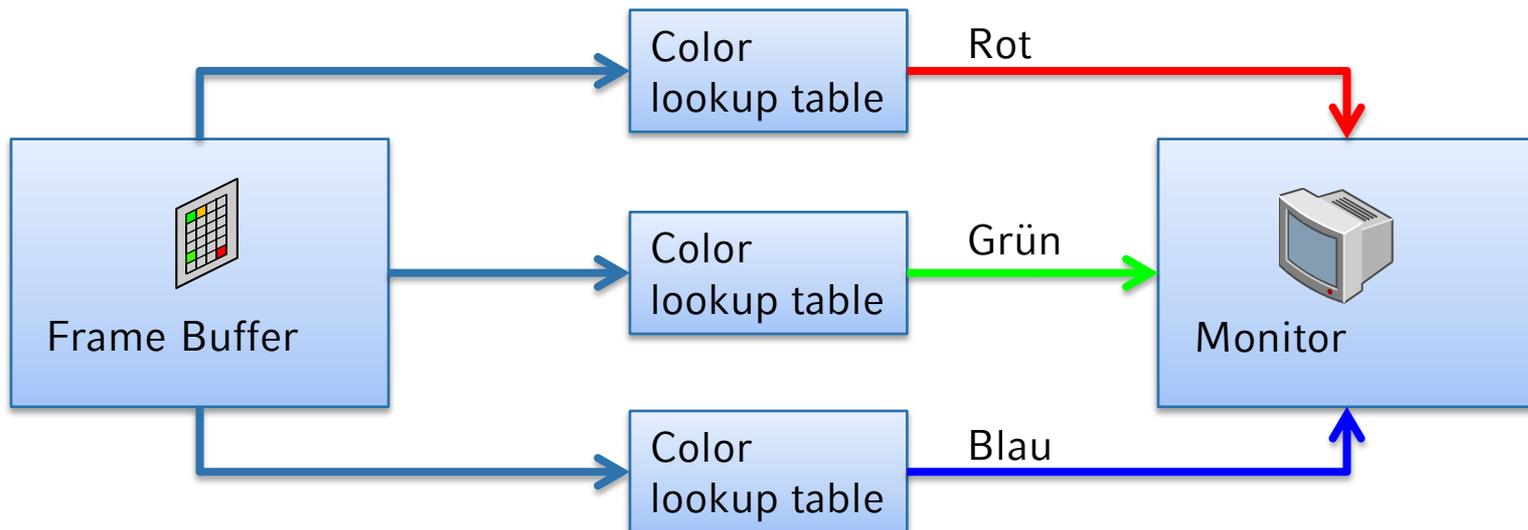


# FARBKONTRASTE: KOMPLEMENTÄR- KONTRAST

- Komplementärfarben liegen einander im Farbkreis gegenüber
- steigern sich gegenseitig zu höchster Leuchtkraft

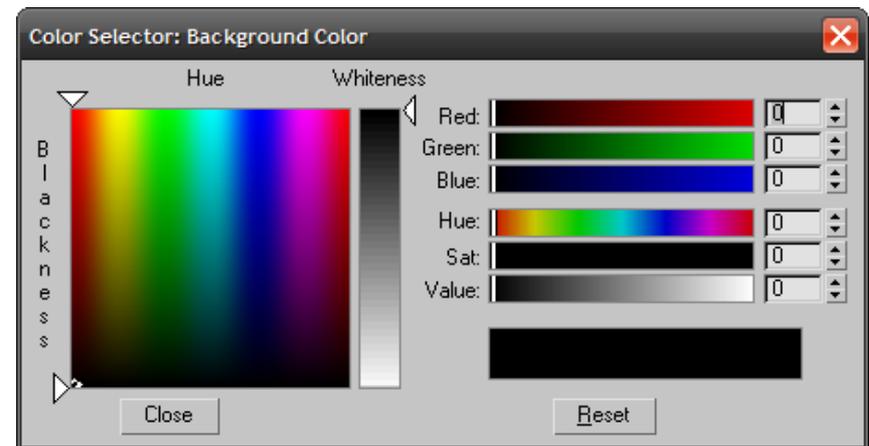


- Indizierte Farben/Paletten – Motivation:
  - Bei hoher räumlicher Auflösung stehen nur wenige Farben zur Verfügung (begrenzter Framebuffer)
  - Typisch: 8 Bit (256 Werte)
  - Werte werden als Indizes in eine Farbtabelle genutzt, die je 8 Bit R-, G-, B-Werte angeben.



- 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).

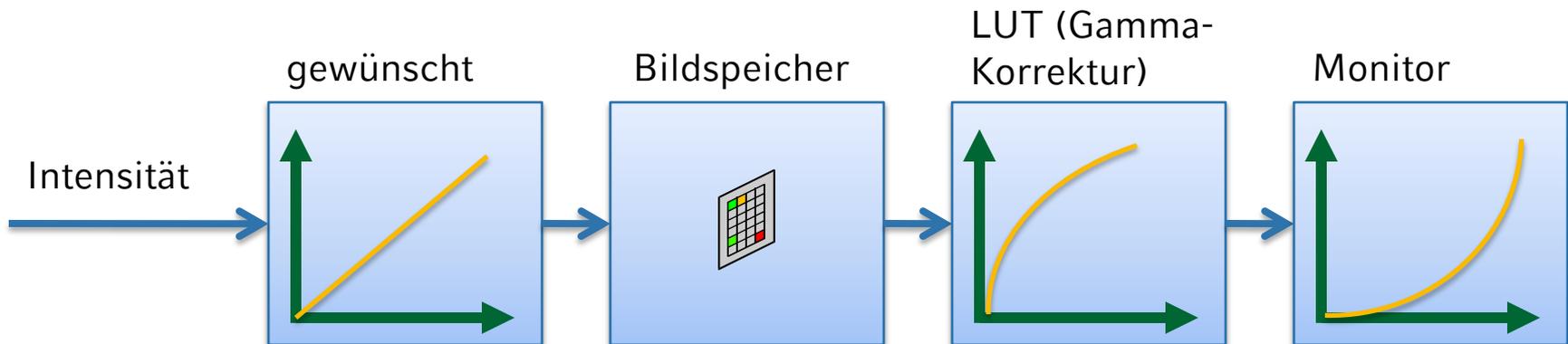
- Koordinatenangaben in einem Farbraum
  - textuell
  - Rollbalken
  - Interaktion mit graphischer Darstellung des Farbmodells



- 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 (für Farbmonitore typischerweise:  $2,3 \leq \gamma \leq 2,6$ ):

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

- 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.



# EIN KLEINER TEST ZUM ABSCHLUSS

**GELB BLAU ORANGE**  
**SCHWARZ ROT GRÜN**  
**VIOLETT GELB ROT**  
**ORANGE ROT GRÜN**  
**GELB SCHWARZ GRÜN**

- Aufgabe: Sagen Sie die Farbe, mit dem der Text gefüllt ist, so schnell vor wie möglich!
- Konflikt, linke Gehirnhälfte versucht, Farbe zu sagen und rechte Gehirnhälfte versucht, das Wort zu sagen

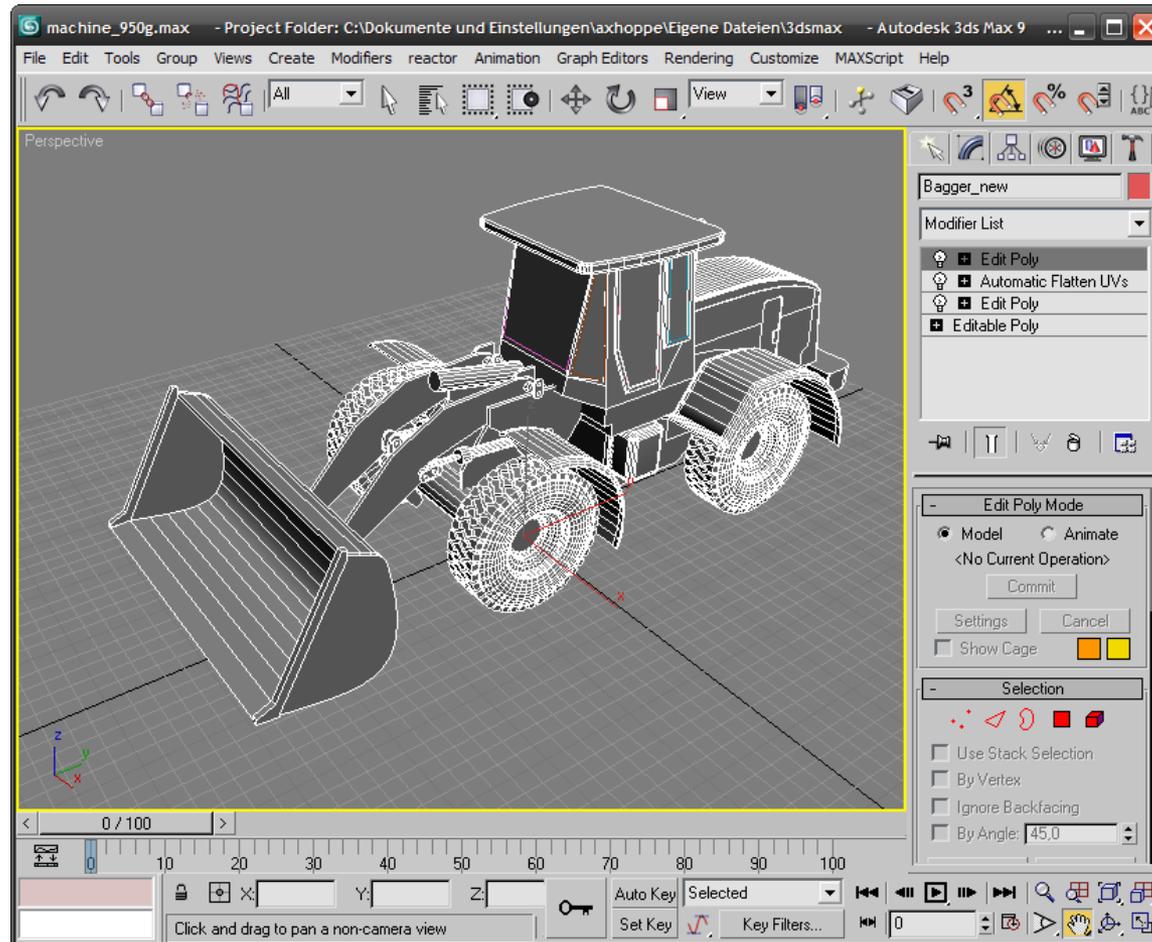
LFE Medieninformatik • Prof. Dr. Ing. Axel Hoppe

Vom Modell zum Bild

# DATENSTRUKTUREN FÜR DIE ERSTELLUNG VON SZENEN

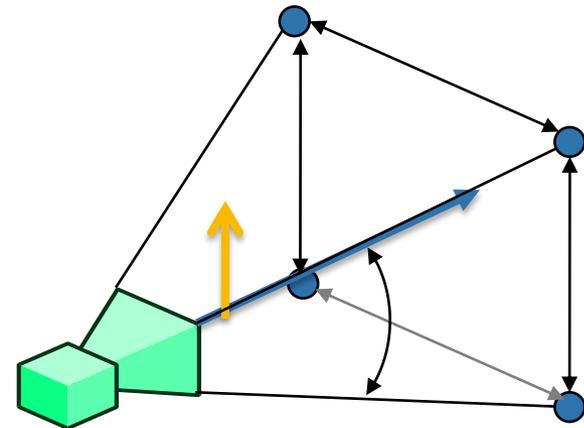
- Bisher sind Objekte in *lokalen* Koordinaten gegeben, d.h. jedes Objekt hat sein eigenes Koordinatensystem.
- Berechnungen, die mehrere Objekte einbeziehen, sind schwierig
- daher ist Transformation in ein gemeinsames Koordinatensystem notwendig
- *Weltkoordinaten:*
- Platzieren der Objekte in einem globalen Koordinatensystem, in dem auch Kameras und Lichter sowie Oberflächeneigenschaften der Objekte definiert werden

# ZUSAMMENBAU DER SZENE



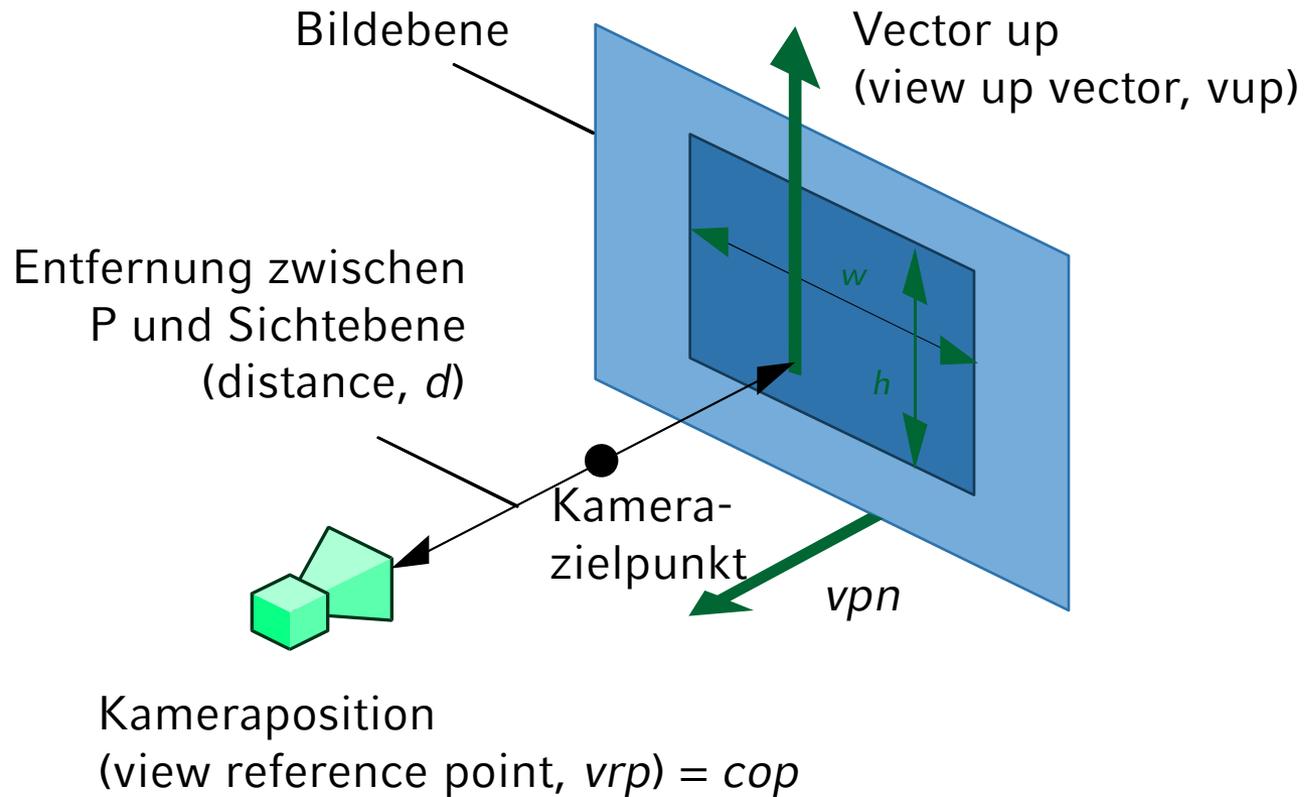
- Wie entsteht ein größeres geometrisches Modell?
- Durch explizite Modellierung verschiedener Teile (oft durch mehrere Personen parallel durchgeführt)
- Durch extensive Wiederverwendung von Teilen (auch aus anderen Modellen)
- Wiederverwendung durch Kopieren, Verschieben, Rotieren von Modellteilen (Beispiele: Räder und Türgriffe an Autos, Fenster, Türen an Gebäuden, etc.)
- Repräsentation großer Modelle:
  - Mehrfach verwendete Geometrie oft nur einmalig repräsentiert; zusammen mit mehreren Transformationen

- Kameramodell:
  - Position und Richtung
  - die Abbildung bestimmende Parameter



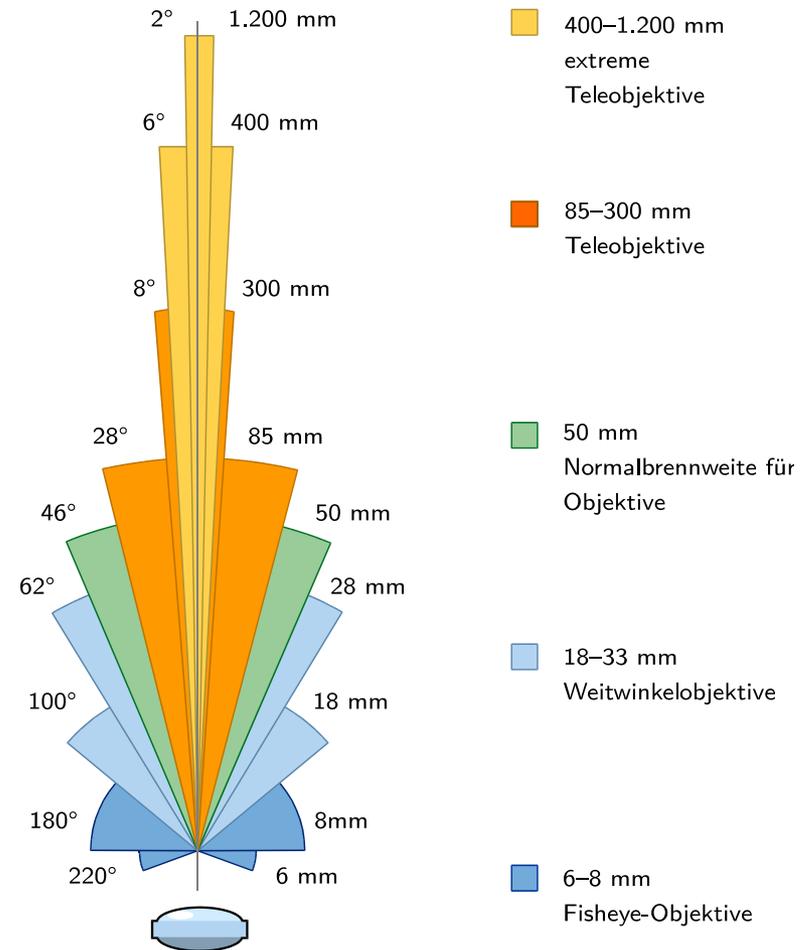
- Reale Kamera als Orientierung und Metapher für den Viewing-Prozess
- Parameter realer Kameras:
  - Position
  - Blickrichtung
  - Brennweite
  - Tiefenschärfe
  - Art des Objektivs (Weitwinkel, Tele) bestimmt den Öffnungswinkel → Projektionen sind teilweise nicht planar
- Parameter der entstehenden Bilder:
  - Größe (Breite, Höhe, bzw. Breite und Seitenverhältnis)
  - Typische Werte für Seitenverhältnis: 4:3 (Fernsehen), 16:9
  - Auflösung

# SYNTHETISCHE KAMERA



Öffnungswinkel	Brennweite
76,0°	24 mm
67,6°	28 mm
56,4°	35 mm
41,4°	50 mm
24,9°	85 mm
15,8°	135 mm
10,7°	200 mm

- Zusammenhang zwischen
  - Öffnungswinkel und
  - Brennweite



- In der Computergraphik wird ein vereinfachtes Kameramodell genutzt:
  - Position – Punkt (Koordinaten in 3D)
  - Blickrichtung – Vektor (Koordinaten in 3D)
- Bildspezifikation:
  - Größe des Viewports in der Sichtebene (Pixel)
- Zusätzlich:
  - Schnittebenen, die die dargestellte Szene auf solche Objekte begrenzen, die hinter einer ersten Ebene (*near*) und vor einer zweiten (*far*) liegen.
    - ◆ Spezifikation als Abstände von der Kamera in Blickrichtung.
    - ◆ Objekte, die eine Ebene schneiden, müssen geclippt werden.

- Koordinatensystem, bei dem die Kamera im Ursprung steht und entlang der (negativen) z-Achse ausgerichtet ist.
- Definition des Sichtkörpers
- Einige Operationen lassen sich hier sehr einfach ausführen, daher dieser „Zwischenschritt“
  - Optimierungen (Entfernen verdeckter Rückseiten)
  - Clipping gegen den Sichtkörper

- Abbildung von Weltkoordinaten (des Modells) in Kamerakoordinaten: Model-View-Matrix.
- Matrix in homogenen Koordinaten, wird mit Projektionsmatrix multipliziert.

# DEFINITION VON LICHTQUELLEN (LQ)

- Üblich: Punktlichtquellen (LQ ohne Ausdehnung, die in alle Richtungen gleichstark abstrahlen) – vereinfachtes Modell
  - Position
  - Farbe des ausgestrahlten Lichtes
  - Helligkeit
- Weitere Typen von Lichtquellen möglich:
  - Flächige LQ
  - Gerichtete LQ (parallele Strahlen in eine Richtung)
  - Spotlights (Gerichtete LQ mit Öffnungswinkel)

- Axel Hoppe. *Validierung und Nachbearbeitung von gerenderten Bildern*. Dissertation an der Otto-von Guericke-Universität Magdeburg, Shaker-Verlag, Aachen, 1999. ISBN 3-8265-4610-5
- Foley, van Dam, Feiner, Hughes. *Computer Graphics, Principles and Practice*. Zweite Auflage, Addison Wesley. ISBN 0-201-84840-6.
- Bernhard Preim. *Computergraphik 1*. Universität Magdeburg, Vorlesungsskript, Juli 2005.