

# Praktikum Computergrafik

Winfried Kurth

Lehrstuhl für Computergrafik und ökologische Informatik

Abteilung Ökoinformatik, Biometrie und Waldwachstum,  
Büsgenweg 4 (Fakultät für Forstwissenschaften und Wald-  
ökologie); [wk@informatik.uni-goettingen.de](mailto:wk@informatik.uni-goettingen.de)

Wintersemester 2009/10

## **Zeitplan und Themenübersicht des theoretischen Teils**

(donnerstags, 16:15-18:00, MN09)

22. 10. 2009	Übersicht. Grundlagen zur visuellen Wahrnehmung und zur Farbe.
29. 10.	Visuelle Wahrnehmung (Fortsetzung); Grafische Hardware.
5. 11.	Affine Abbildungen, homogene Koordinaten, Objekttransformationen.
12. 11.	Techniken der 2D-Rastergrafik, Halbtontechniken, Antialiasing.
19. 11.	Modelle für Kurven (Splines, Bézier-Kurven).
26. 11.	Modelle für gekrümmte Flächen. Projektionsarten (1).
3. 12.	Projektionsarten (2) und Perspektive; Lichtquellen und Reflexion, lokale Beleuchtungsrechnung.
10. 12.	Gouraud- und Phong-Shading; Transparenz und Schatten. Sichtbarkeitstransformation, z-Buffer.
17. 12.	Visible Surface Determination. Texturierung (1).
7. 1. 2010	Texturierung (2). Darstellungsarten für 3D-Objekte und Szenen: Boundary representation.
14. 1.	Constructive solid geometry, Voxelmodelle. Grundzüge von VRML.
21. 1.	Raytracing.
28. 1.	Fraktale Modelle.
4. 2.	Animation.

Skript des Theorie-Teils:

[http://www.uni-forst.gwdg.de/~wkurth/cg09\\_skript.htm](http://www.uni-forst.gwdg.de/~wkurth/cg09_skript.htm)

Literaturhinweise:

[http://www.uni-forst.gwdg.de/~wkurth/cg08\\_lit.htm](http://www.uni-forst.gwdg.de/~wkurth/cg08_lit.htm)

## 1. Einleitung: Einige Begriffe

"Grafische Datenverarbeitung" als Oberbegriff.

ISO-Definition von 1982: "Methods and techniques for converting data to and from graphics displays via computer".

Untergliederung der grafischen DV nach Rosenfeld:

		<i>Ausgabe</i>	
		<i>Bild</i>	<i>Beschreibung</i>
<i>Eingabe</i>	<i>Bild</i>	Bildverarbeitung	Bildanalyse, Mustererkennung
	<i>Beschreibung</i>	generative Computergrafik	(andere DV- Disziplinen)

Hier: Schwerpunktthema "**generative Computergrafik**", kurz **CG**.

Beziehungen zwischen den 3 Teilgebieten:

Weitere Begriffe:

### *Visualisierung:*

Verwendung von computergestützten Techniken der grafischen Datenverarbeitung, um Daten besser verstehbar zu machen oder aus den Resultaten von Messungen, Simulationen oder Berechnungen Wissen zu extrahieren.

Verwendung von optischen *Wahrnehmungsprimitiven*, um Informationen abzubilden (Form, Farbe, Textur, Zeit).

**Rendering** (keine adäquate deutsche Übersetzung):

Bilderzeugung am Computer aus geometrischen Modellen.

Häufiges Ziel: fotorealistisches Rendering;

Super-Fotorealismus (!)

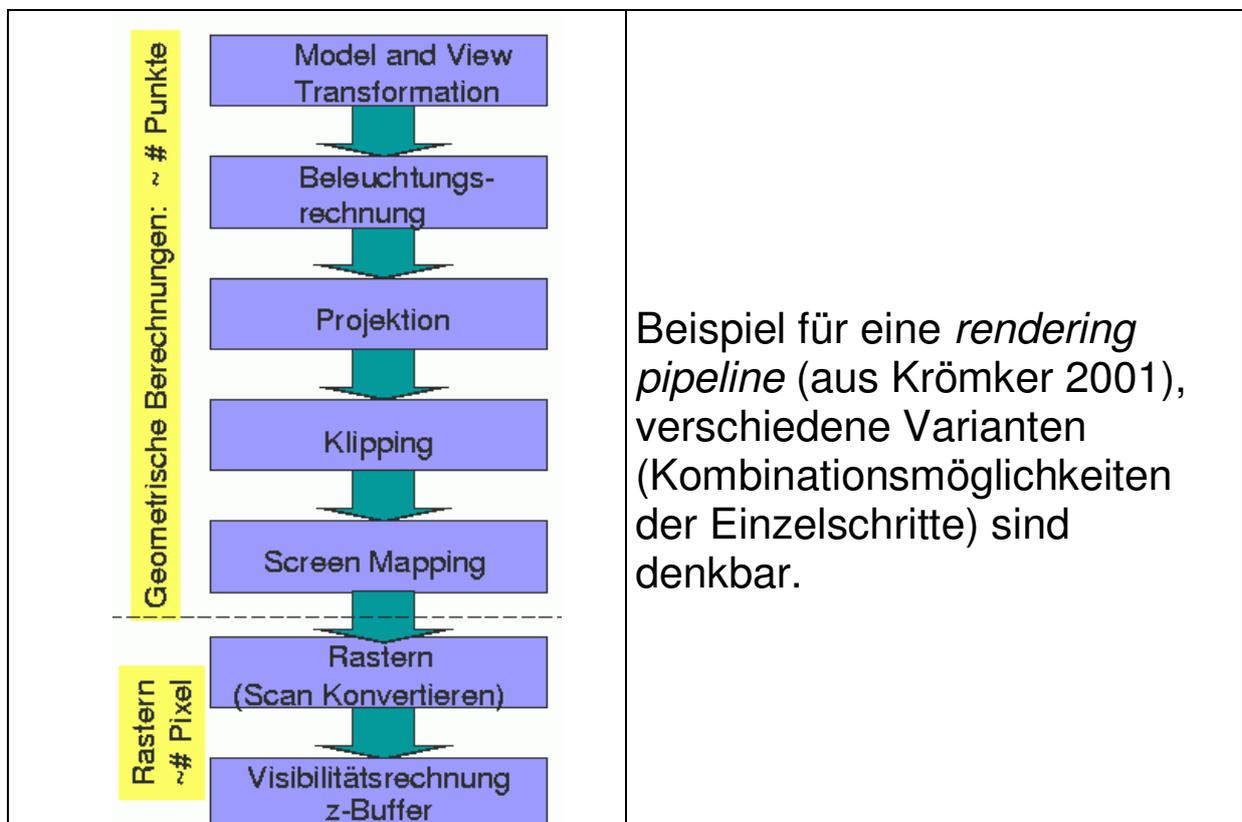
interessanter, jüngerer Zweig, bes. in der Computerkunst:

Nicht-fotorealistisches Rendering (NPR).

## "Rendering Pipeline"

- geometrische Transformationen (Rotation, Skalierung, Translation)
- Betrachtungstransformationen / Viewing: Projektion der 3D-Geometrie auf die 2D-Darstellungsfläche
- *visible surface determination / hidden surface removal*: Entfernen von Teilen des Modells, die zur Darstellung nichts beitragen oder von anderen Teilen verdeckt sind
- Beleuchtung und Schattierung  
Beschreibung von Licht und Farbe und der Interaktion des Lichtes mit den geometrischen Objekten; Verfahren zur Berechnung der Farbe der dargestellten Bildpunkte
- Texturen und Schatten  
realistischere Darstellung durch Simulation verschiedener Materialoberflächen und durch Schatten

(vgl. Schlechtweg 2001)



Alternatives Paradigma zur Geometrie-basierten Grafik:

*Sample-basierte Grafik.*

Kein geometrisches Modell als Zwischenschritt – direkte Verwendung "gesampelter" optischer Informationen (z.B. von Digitizern, digitalen Kameras).

Einsatz:

2D-Bildmanipulation

Beispiel:



Michele Turre: Die Künstlerin, ihre Tochter und ihre Mutter, alle im Alter von 3 Jahren (aus van Dam 2001).

Nachteil der sample-based graphics:

**WYSIAYG** (What You See Is All You Get): Keine Zusatzinformationen, insbes. keine Tiefeninformation, kein *Walkthrough* möglich.

In neuerer Zeit dennoch großes Interesse: Neue Bilder werden aus alten konstruiert durch Interpolation (*Morphing*), Komposition, Verzerrung usw.

## 2. Licht, Sehen, Farbe

Menschliches visuelles System (Augen + Gehirn!) = entscheidendes Glied in der Kette der Bilderzeugung.

Merke: *Am Monitorausgang ist nicht das Ende des Informationsflusses.*

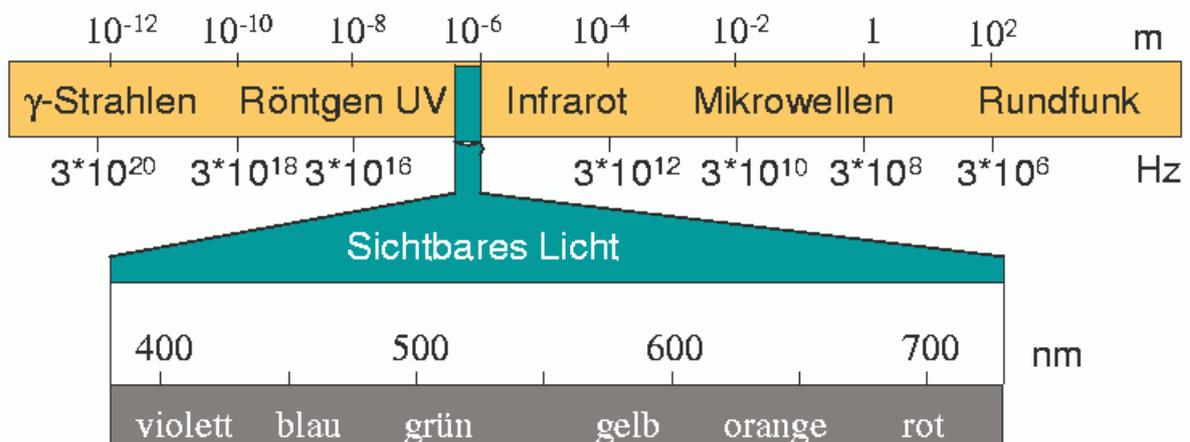
### Licht

physikalisch: *elektromagnetische Strahlung*

charakterisiert durch Frequenz  $\nu$  bzw. Wellenlänge  $\lambda$ .

$\nu \cdot \lambda = c =$  Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  $\approx 2,9979 \cdot 10^8$  m/s.

Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts: ca. 380–780 nm (Nanometer = milliardstel Meter),  
entspr. Frequenzbereich um  $10^{15}$  Hz (Hertz, Schwingungen pro Sekunde).



(aus Krömker 2001)

Weitere Eigenschaften: Lichtstärke, Phase, ggf. Schwingungsebene (Polarisation).

### 3 Teilgebiete der Optik:

- Strahlenoptik
- Wellenoptik
- Quantenoptik

In der CG genügt meistens die Strahlenoptik.

Ausnahmen: Arbeiten mit polarisiertem oder kohärentem Licht (Laser); Interferenzerscheinungen. Dort ist der Wellencharakter wesentlich.

Licht aufgebaut aus

- Wellen
  - Teilchen (Photonen = Lichtquanten),  $E = h \cdot \nu$ ,  $h = \text{const.}$
- Einheitliche Beschreibung (formal, unanschaulich) erst in der Quantentheorie möglich.

### Radiometrie und Photometrie

*Radiometrie:* Physikalische Beschreibung.

Elektromagnetische Energie, z.B. Betrag der Lichtenergie je Wellenlänge

*Photometrie:* psychophysikalische Messung der visuellen "Energie", die vom elektromagnetischen Reiz erzeugt wird.

#### Einheiten der Photometrie

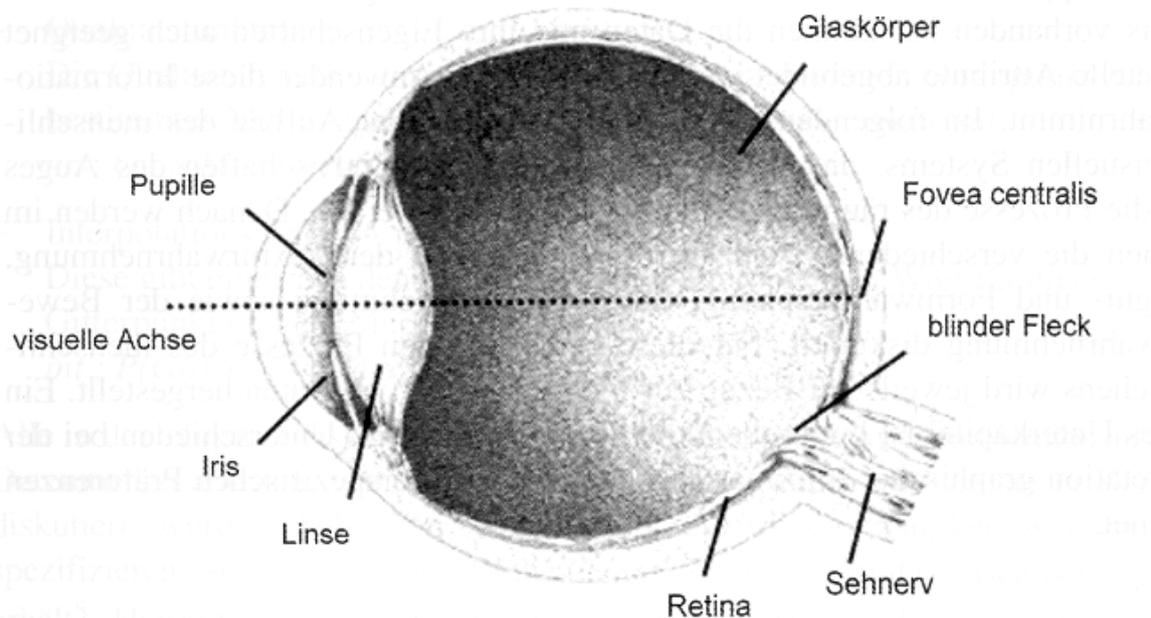
◆ Lichtstärke	luminous intensity	Candela [cd]
◆ Leuchtdichte	brightness	[cd/m <sup>2</sup> ]
auch	1 Stilb = 1 sb	= 1 cd/cm <sup>2</sup>
	1 Apostilb = 1 asb	= 0,3183 cd/m <sup>2</sup>
	1 Lambert = 1 L	= 10 <sup>4</sup> /π cd/m <sup>2</sup>
	1 foot-Lambert = 1 fl	= 3,426 L
	auf der Netzhaut (Retina) oft in:	
	1 troland = 1 cd/cm <sup>2</sup> bei 1 mm Pupillenöffnung	
◆ Beleuchtungsstärke	illuminance	Lux [lx]
◆ Lichtstrom	luminous flux	Lumen [lm]

(aus Krömker 2001)

## Das visuelle System

- Auge: optischer Weg + Netzhaut (Rezeptoren & frühe Verarbeitung)
- Sehnerven
- Sehrinde (visual cortex) im Gehirn

## Das menschliche Auge (Abb. aus Schumann & Müller 2000)



**Iris:** Blendenmechanismus

Teil des Adaptationsmechanismus, 2–8 mm Öffnung

optisch abbildende Elemente: Hornhaut, Kammerwasser, Linse, Glaskörper

**Linse:** Akkomodation (Scharfeinstellung),

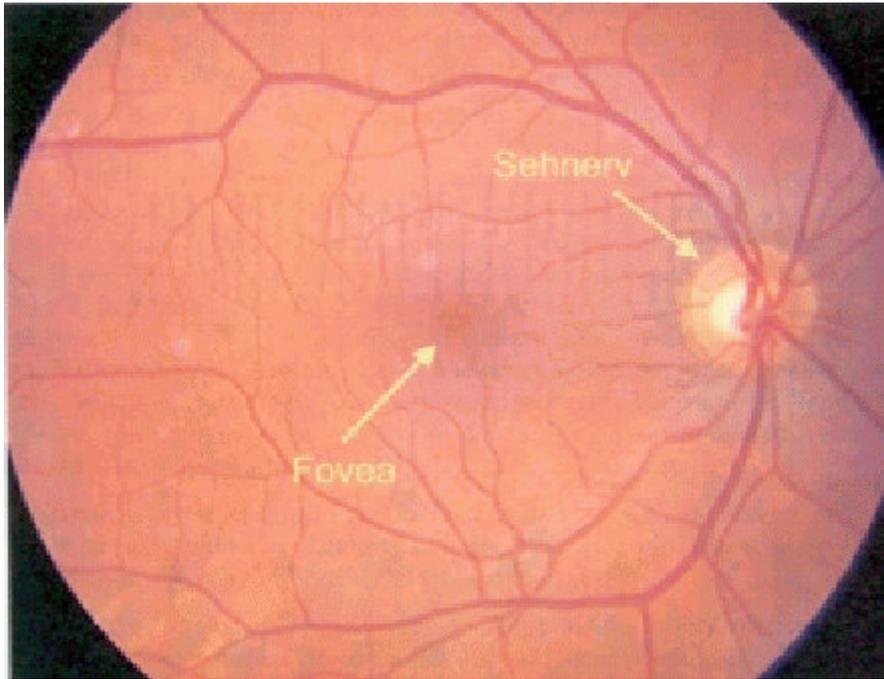
Brennweite: fern  $f = 17$  mm, nah  $f = 14$  mm.

**Netzhaut (Retina):** Rezeptoren (Wahrnehmungszellen), Nervengeflecht und Sehnerv.

Mittlerer Bereich der Netzhaut: "gelber Fleck" (*macula lutea*), ca. 1,5–2 mm Durchmesser,  $5^\circ$  Winkeldurchmesser.

Im Zentrum: Netzhautgrube, ca. 0,2 mm Durchmesser bzw.  $1,5^\circ$  Winkeldurchmesser = Bereich des schärfsten Sehens (dort 80 % der Sehschärfe).

**Blinder Fleck:** Austrittsort des Sehnervs.



(aus Schumann & Müller 2000, Krömker 2001).

### Nervenbahnen:

innerhalb der Netzhaut bereits erste Verschaltungen

Sehnerv: ca. 1 Million Ganglienzellen

Kreuzung der beiden Sehnerven (chiasma optica)

Weiterleitung über mehrere Zwischenstationen zum primären visuellen Cortex (im hinteren Teil des Großhirns, beidseitig)

### Aufbau der Netzhaut:

2 Grundtypen von Fotorezeptorzellen

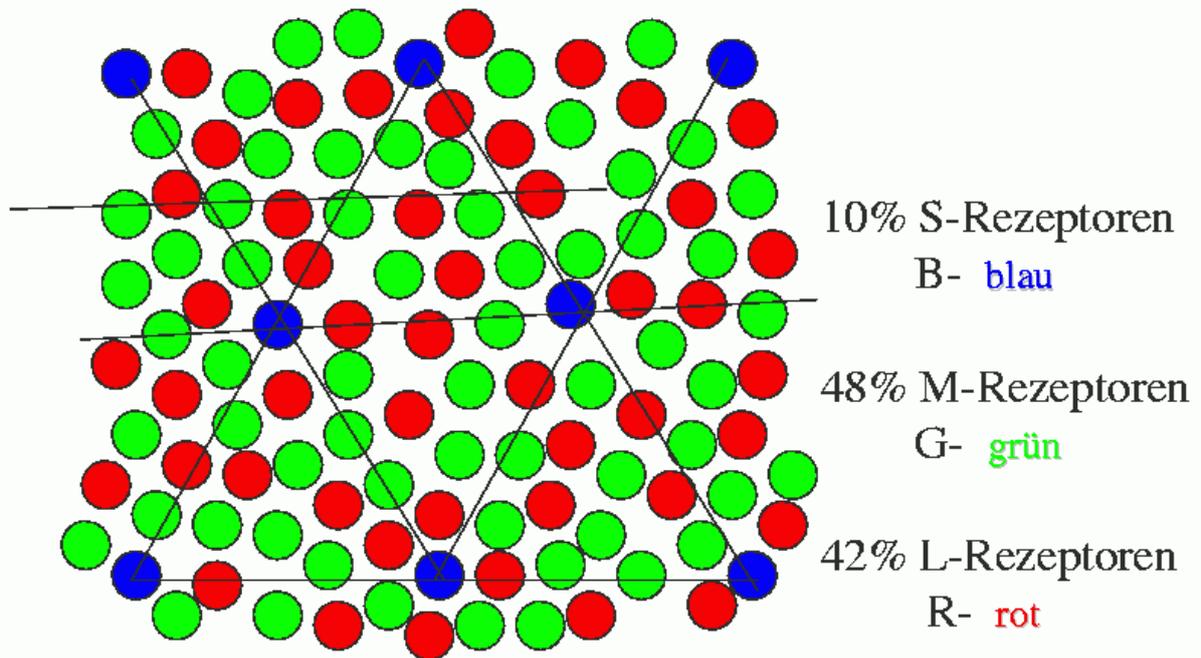
- Nachtsehen: Stäbchen (*rods*), nicht farbsehfähig, ca. 120 Millionen
- Tagsehen: Zäpfchen (*cones*), ca. 6 Millionen, hauptsächlich in der *fovea centralis*

(aus Schumann & Müller 2000)

### 3 Zapfen-Subtypen:

L für Rot-Sehen, M für Grün-Sehen, S für Blau-Sehen.

## Zapfenmosaik in der Fovea Centralis



(aus Krömker 2001)

## Farbe

- seit Jahrhunderten Thema von Physikern, Physiologen, Psychologen und Philosophen
- bis heute nicht vollständig verstanden und durchdrungen

DIN-Definition von "Farbe" (Standard 5033 von 1979):

*"Farbe... ist ein durch das Auge vermittelter Sinnes-  
eindruck, also eine Gesichtsempfindung. Die Farbe ist  
diejenige Gesichtsempfindung eines dem Auge struk-  
turlos erscheinenden Teiles des Gesichtsfeldes, durch  
die sich dieser Teil bei einäugiger Betrachtung mit un-  
bewegtem Auge von einem gleichzeitig gesehenen,  
ebenfalls strukturlosen angrenzenden Bereich allein  
unterscheiden kann."*

### Beachte:

- Farbe ist das Ergebnis der Wahrnehmung elektromagnetischer Wellen durch Netzhaut und Gehirn.
- Lichtstrahlen besitzen keine Farbe, nur eine spektrale Leistungsverteilung (spectral power distribution, SPD), die angibt, welche Wellenlänge mit welchem Anteil vertreten ist.
- SPDs existieren in der physikalischen Welt, Farbe nur im Gehirn.

### Objektive Farbmerkmale:

- *dominante Wellenlänge* – diejenige Wellenlänge aus dem Spektrum, bei der die höchste Leistung abgestrahlt wird.
- *Reinheit* – physikalisches Maß, das angibt, in welchem Verhältnis weißes Licht zu einem monochromatischen Licht zu mischen ist, um ein gegebenes Licht zu erzeugen.
- *Luminanz* – beschreibt die Strahlungsenergie (Intensität bez. auf den Flächeninhalt eines unendlich kleinen Flächenelements, das sich auf der Lichtquelle befindet).

## Subjektive Farbmerkmale:

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

## Farbspezifikation:

3 Fotorezeptor-Zelltypen  $\Rightarrow$  3 Zahlenwerte ausreichend zur quantitativen Spezifikation von Farben.

## Grassmannsche Gesetze (1853)

*Erstes: Zwischen je vier Farben besteht immer eine eindeutige lineare Beziehung. Eine Farbe braucht zu ihrer Beschreibung drei voneinander unabhängige Bestimmungsstücke, d.h. die Farbe ist eine dreidimensionale Größe.*

- Farben können als Vektoren eines dreidimensionalen Vektorraumes aufgefasst werden.
- Die Vektoren dieses Farbraums heißen **Farbvalenzen**.
- Die Länge eines Vektors ist ein Maß für die Leuchtdichte und heißt **Farbwert**, seine Richtung bestimmt die **Farbart**.

Folgerung:

- ◆ Wie in jedem dreidimensionalen Vektorraum benötigt man drei voneinander linear unabhängige Basisvektoren (**Primärvalenzen**), um den Raum aufzuspinnen.
- ◆ In diesem Fall bedeutet linear unabhängig, daß eine **Primärvalenz nicht durch Mischung** der beiden anderen Primärvalenzen darstellbar ist.

Folgerung: Farbmischung

- ◆ Mit drei Primärvalenzen R, G, B läßt sich also für jede Farbvalenz F eine Farbgleichung aufstellen:

$$F = r R + g G + b B$$

- ◆ Mit Farbvalenzen kann man also wie mit Vektoren rechnen, insbesondere ist die Umrechnung der Darstellung bezüglich verschiedener Primärvalenztripel (Basiswechsel) möglich

Grassmannsche Gesetze (Fortsetzung)

**Zweites:** *Gleich aussehende Farben ergeben mit einer dritten Farbe stets gleich aussehende Farbmischungen.*

Das heißt, dass es bei der Beurteilung von Gleichheit zweier Farben

- **nur** auf die Farbvalenz,
- **nicht** auf ihre spektrale Verteilung ankommt.

Die spektrale Verteilung und die Wahl der Primärvalenzen spielen keine Rolle.

Mischexperimente zeigen: Ganz unterschiedliche Spektralverteilungen können dieselben Farbreize erzeugen! ("Metamerie")

Farbmischung:  
*Additive Mischung*

Addition von Licht: 2 oder mehr Farben werden dem Auge gleichzeitig angeboten

- ◆ “Echte” Überlagerung
- ◆ Sukzessiv (zeitliche Integration): Farbkreisel
- ◆ Simultan (örtliche Integration): Monitor

Grundfarben: **Rot** **Grün** **Blau**

Hintergrund: **Schwarz** unbunt

Summenfarbe: **Weiß**

Basis für die Farbdarstellung mit Kathodenstrahlröhren oder LCD-Displays.

◆ Subtraktive Mischung:

- Farbige Gläser (Filter)
- Druckpigmente

Grundfarben: **Cyan** **Magenta** **Gelb** CMY

Hintergrund: **Weiß** unbunt

Summenfarbe: **Schwarz**

Hilfsfarbe: **Schwarz** CMYK

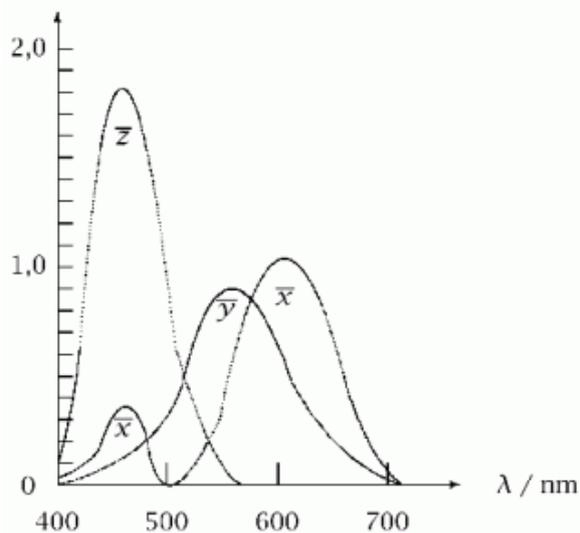
Basis für die Farbdarstellung im Druck.



## Messen von Farben: Colorimetrie

- ◆ CIE: Commission International de l'Eclairage  
Internationale Beleuchtungskommission
- ◆ Normalbeobachter für Farbmischversuche
- ◆ 2° Sehfeld CIE 1931  
(Ergänzung 10° Sehfeld CIE 1964 → andere Ergebnisse)
- ◆ Hellempfindlichkeit Y
- ◆ 3 reale Lichtquellen ("monochromatisch")
  - 700 nm CIE Rot
  - 546,1 nm CIE Grün
  - 435,8 nm CIE Blau(Spektrallinien einer Quecksilberdampf Lampe)

## CIE Farbdiagramm



- ausgehend von drei hypothetischen Standardprimärfarben  $X, Y, Z$  und drei Funktionen  $x_\lambda, y_\lambda, z_\lambda$
- Funktionen geben an, in welchem Verhältnis  $X, Y, Z$  zu mischen sind, um Farben einer Wellenlänge  $\lambda$  zu erhalten

Folgende Bedingungen werden erfüllt:

- $y_\lambda$  entspricht exakt der Helligkeitsreaktion des menschlichen Auges
- $x_\lambda$  und  $z_\lambda$  so konstruiert daß zum Mischen aller existierenden Farben nur Farbadditionen notwendig sind
- Das Integral jeder Funktion über alle sichtbaren Wellenlängen ist jeweils 1

(Beschreibung hier nach Schlechtweg 2001.)

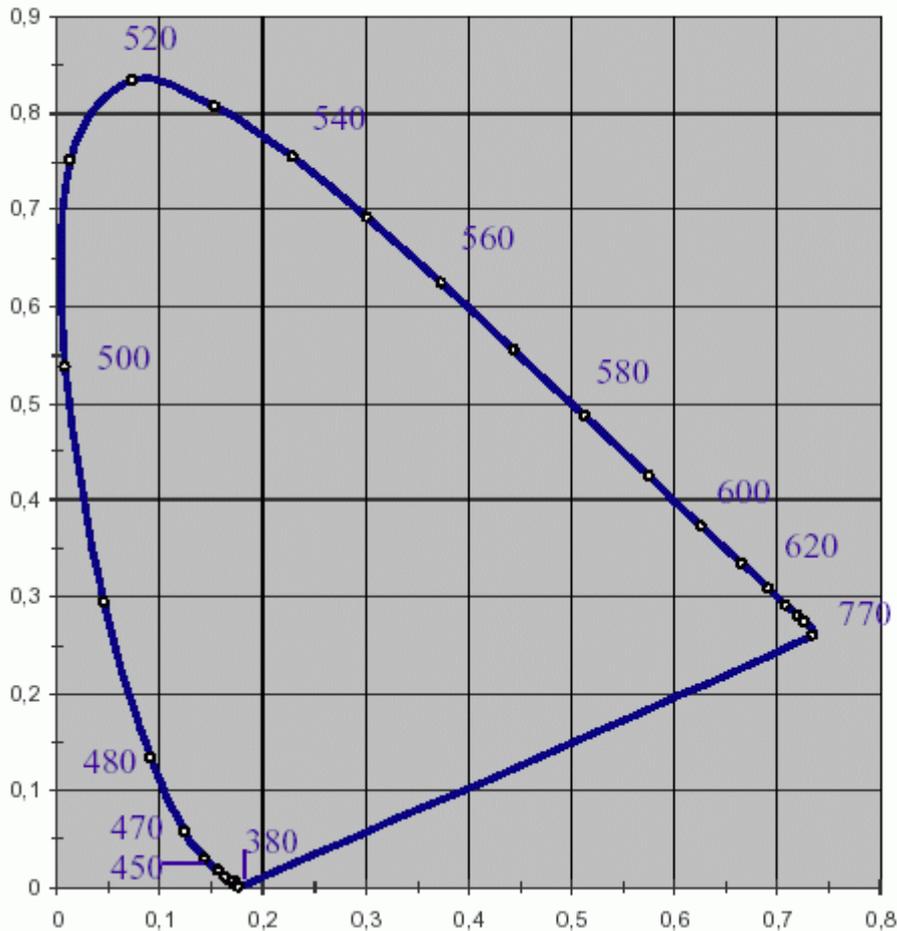
Im CIE-Farbdiagramm (Normfarbtafel, *chromaticity diagram*) wird der Helligkeitsanteil  $Y$  weggelassen.

Die physikalisch reinen Spektralfarben bilden eine geschwungene, etwa parabelförmige Kurve im  $x, y$ -Diagramm. Diese Kurve ist nicht geschlossen (rot  $\neq$  blauviolett!).

Auf der Verbindungslinie der Enden liegen *keine* reinen Spektralfarben, sondern Mischfarben aus Rot und Blauviolett ("Purpurgerade").

Alle wahrnehmbaren Farben liegen innerhalb des durch die reinen Spektralfarben und durch die Purpurgerade gegebenen geschlossenen Kurvenzugs.

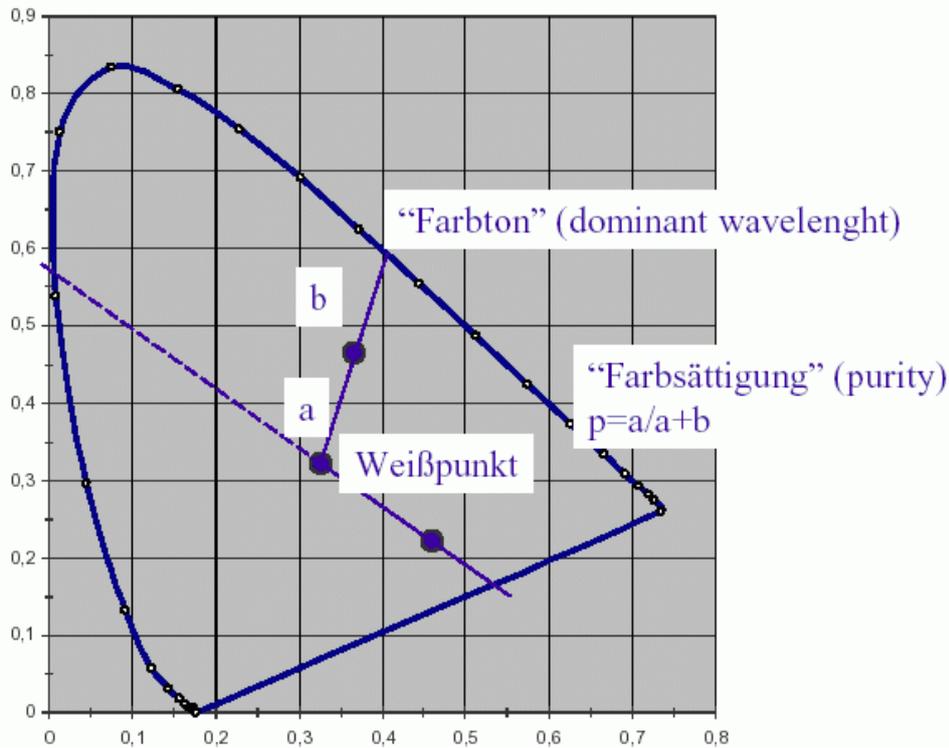
### **Normfarbtafel - Chromaticity Diagram**



Zahlen auf der Kurve: Wellenlängen in nm. (aus Krömker 2001)

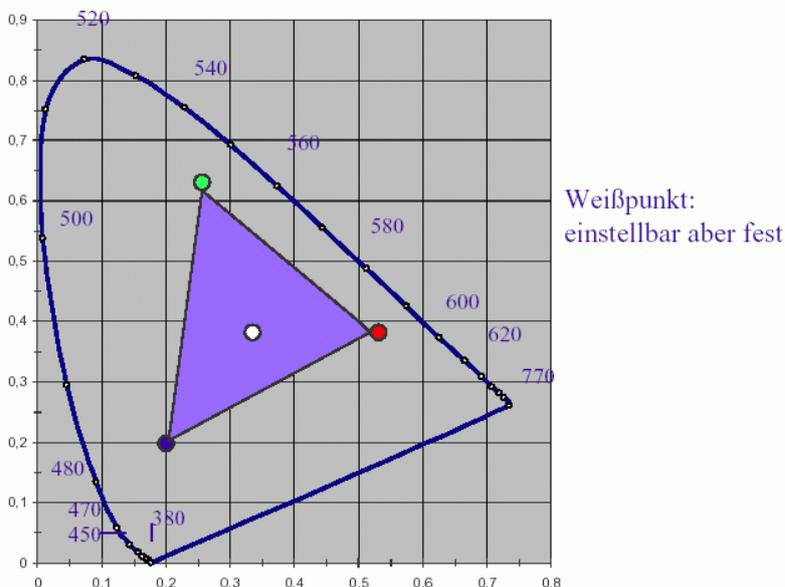
Das Innere der Normfarbtafel ergibt sich durch additive Farbmischung aus den Randfarben (ganz innen = weiß).

## Zusammenhänge: Mischung

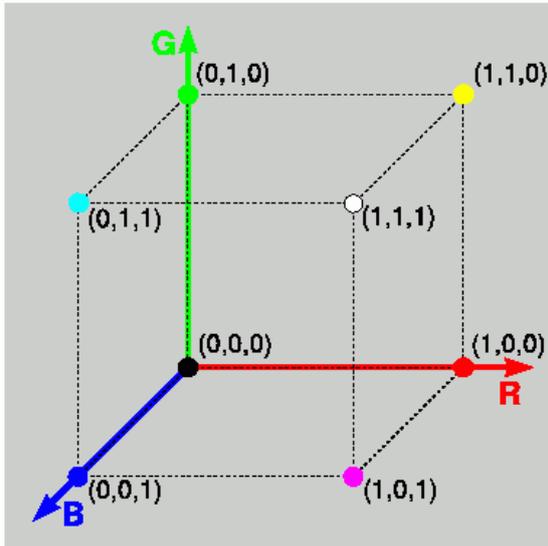


Die Grundfarben (R, G, B) der üblichen Monitore sind *keine* reinen Spektralfarben, d.h. sie liegen nicht auf der Außenlinie. *Folgerung:* Es sind *nicht* alle Farben des Diagramms durch Mischung aus diesen Farben darstellbar, sondern nur diejenigen innerhalb des von den Grundfarben aufgespannten Dreiecks! **Inneres des Dreiecks = Gamut des Monitors.**

## Monitorphosphore: Primärvalenzen



## Farbmodelle – RGB



- additives Farbmodell
- für Ausgabe auf Farbbildschirmen
- Grundfarben Rot, Grün, Blau
- RGB-Einheitswürfel

Alle darstellbare Farben sind Punkte eines Einheitswürfels. Auf den positiven Halbachsen liegen die Primärfarben :

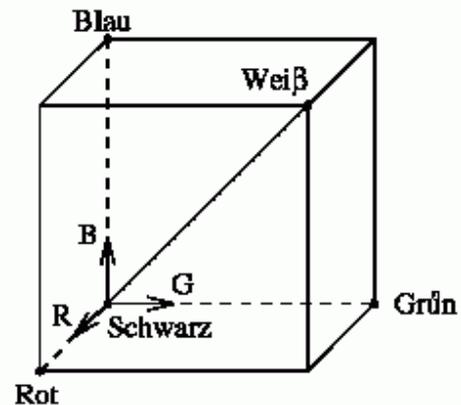
**Rot**, **Grün** und **Blau**.

Erste Eigenschaften:

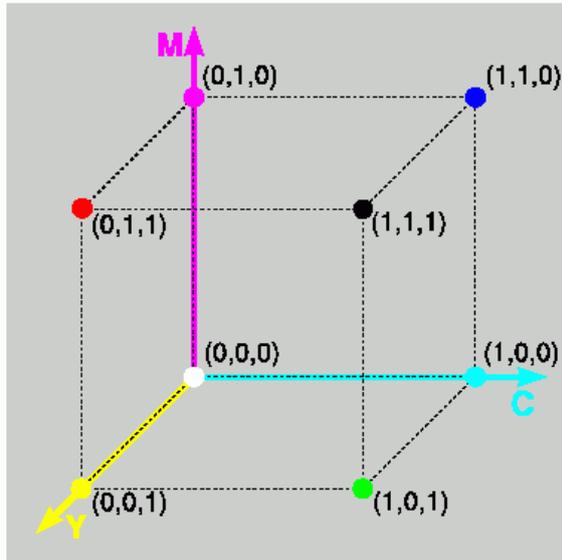
**Schwarz** liegt im Ursprung  $(0,0,0)$

**Weiss** im Punkt  $(1,1,1)$

**Grauwerte** darstellbar durch gleichgroße Anteile von R, G und B, liegen **auf der Hauptdiagonalen** des Einheitswürfels



## Farbmodelle – CMY(K)



- subtraktives Farbmodell
- für Ausgabe auf Druckern
- Grundfarben Türkis (Cyan), Magenta, Gelb (Yellow)
- beim Druck Hinzunahme von reinem Schwarz (K) – Vierfarbdruck

## Konvertierung RGB ↔ CMY

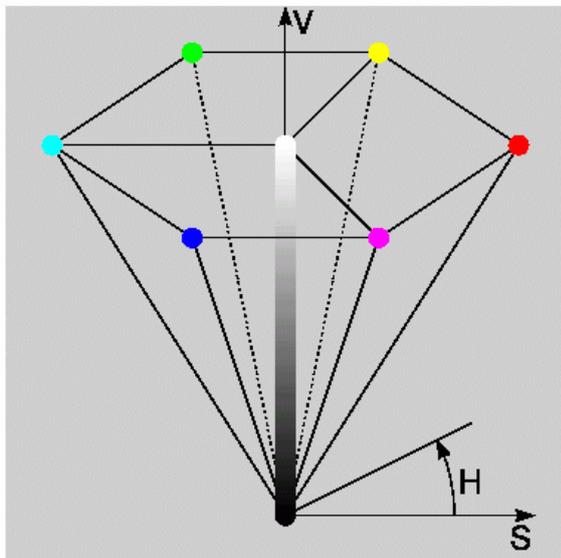
$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} C \\ M \\ Y \end{pmatrix}$$

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

- gilt nur theoretisch
- kompliziertere Verfahren in der Druckindustrie

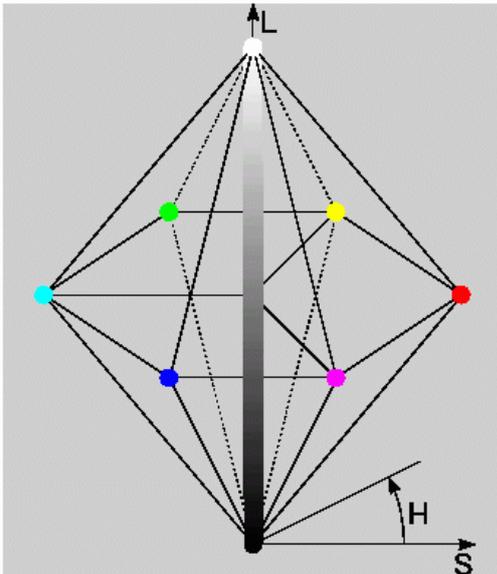
Die technisch-physikalischen Farbmodelle (RGB, CMY, YIQ...) entsprechen den technischen Gegebenheiten, sind aber zur direkten Farbdefinition durch den Benutzer wenig geeignet. Deshalb wurden Farbmodelle entwickelt, die näherungsweise (sehr grob) den Größen der menschlichen Farbwahrnehmung entsprechen, nämlich Helligkeit, Farbton und Farbsättigung.

## Farbmodelle – HSV



- Hue / Saturation / Value
- Hue – Winkel um vertikale Achse,  $0^\circ \equiv$  rot
- Änderung der Sättigung: Änderung des Weißanteils
- Änderung der Helligkeit: Änderung des Schwarzanteils
- z. B. dunkelblau:  $H = 240^\circ$ ,  $S = 1$ ,  $V = 0.3$

## Farbmodelle – HLS



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

Achtung: Durch die unterschiedlichen Farbräume liefert die lineare Interpolation zwischen zwei identischen, aber in verschiedenen Farbräumen definierten Farben völlig unterschiedliche Ergebnisse.

## Interaktive Farbselektion

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