

Computergrafik

Prof. Dr.-Ing. Kerstin Müller



Grundbegriffe

Computergrafik, Graphische Datenverarbeitung (computer graphics)

Grobe Einordnung:

- Synthese von Bildern mit Hilfe des Rechners
- Erzeugung eines Bildes (einer Bitmap) aus einer (geometrischen) Beschreibung einer Szene
- Bei zeitabhängigen Szenenbeschreibungen: Animation
- Ausgabemedien:
Bildschirm, Drucker, Plotter, Fräser, Projektor(en),...

Die Disziplin **Computergrafik** beschäftigt sich u. a. mit:

- Repräsentation (Datenstrukturen!) und Verarbeitung (Algorithmen!) geometrischer, dreidimensionaler Objekte im Rechner
- Berechnung von Bilddarstellungen aufgrund solcher Datenstrukturen (bis hin zu foto-realistischen Bildern), das sog. „Rendering“
- Grafik-Hardware
- Grafik-Software
- grafisch-interaktiven Systeme



Jim Blinn, *SIGGRAPH98 Keynote Address*,
Computer Graphics 33(1), pp. 43-47

- „Modeling is figuring out the shape of it.“
- „Rendering is how to make a picture of it.“
- „Animation is figuring out how it moves with time.“

Grafik-Pipeline / *rendering pipeline*

- Den Prozess der Bildsynthese, also die Abbildung eines Modells eines Objektes bzw. einer Szene auf ein Bild auf dem Bildschirm, nennt man „**Rendering**“.
- Eine konkrete Implementierung dieses Prozesses in Soft- und/oder Hardware beschreibt man als „**Rendering-Pipeline**“.
- Die einzelnen Stufen der Pipeline setzen Basis-Algorithmen der Computergrafik um. Sie können jeweils in Software und/oder Hardware implementiert sein.
- Der Aufbau von Grafik-Pipelines kann sich je nach Art und Umsetzung des Renderings stark unterscheiden.

Begriffe

Punktgröße (dot size)

Durchmesser eines einzelnen Punktes
auf dem Ausgabemedium

Einheit: [mm], [inch]

Adressierbarkeit

Anzahl individuell erzeugbarer Punkte pro
Längeneinheit, Beispiel: 1280 Pixel / 20"

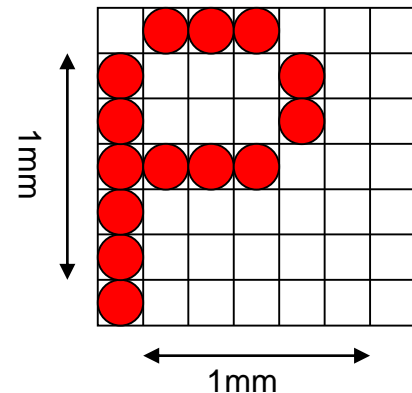
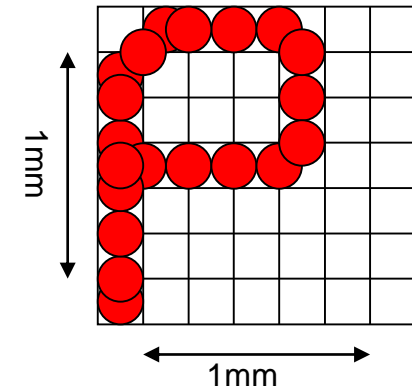
Punktabstand

1/Adressierbarkeit

Auflösung (resolution)

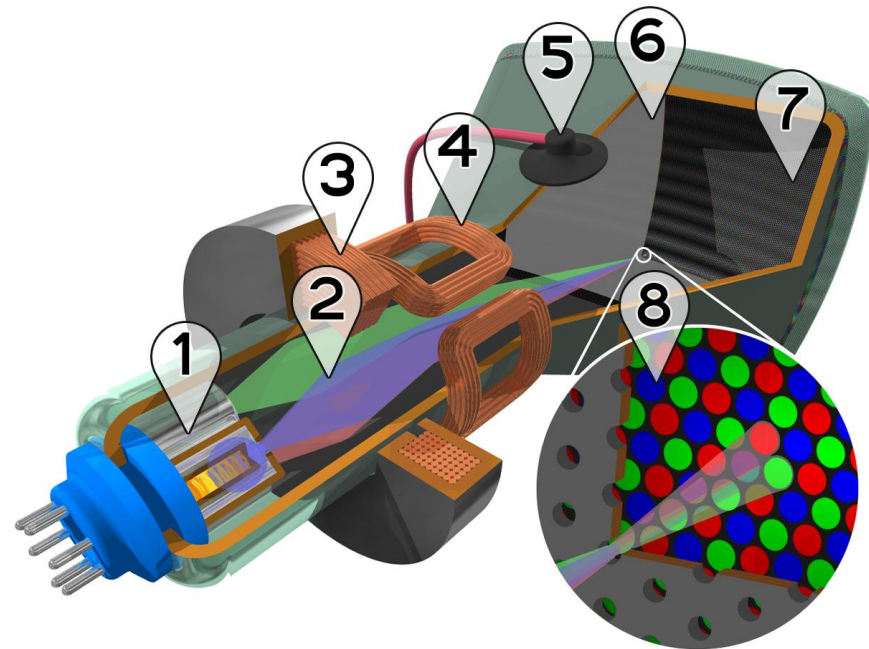
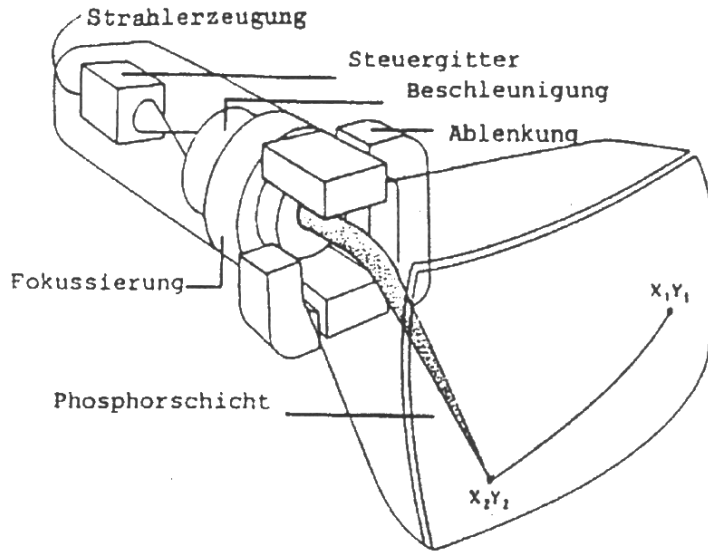
Anzahl unterscheidbarer Punkte oder
Linien pro Längeneinheit

Einheit: [L/mm], [dpi] = [dots / inch]



Adressierbarkeit:
maximal zur Verfügung stehende
Auflösung des Monitors

Röhrenbildschirm / CRT mit Rasterdisplay, ein- und mehrfarbig

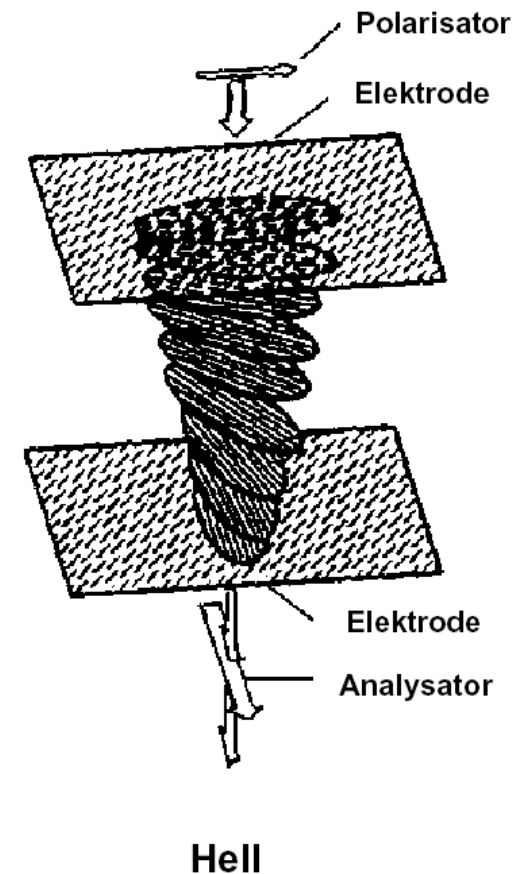


Aufbau einer Lochmasken-Bildröhre: 1 Glühkathoden,
2 Elektronenstrahlen, 3 Bündelungsspulen (nicht mehr gebräuchlich),
4 Ablenkspulen, 5 Anodenanschluss, 6 Lochmaske,
7 Fluoreszenzschicht mit roten, grünen und blauen Subpixeln,
8 Nahansicht der Fluoreszenzschicht
Quelle: Wikipedia

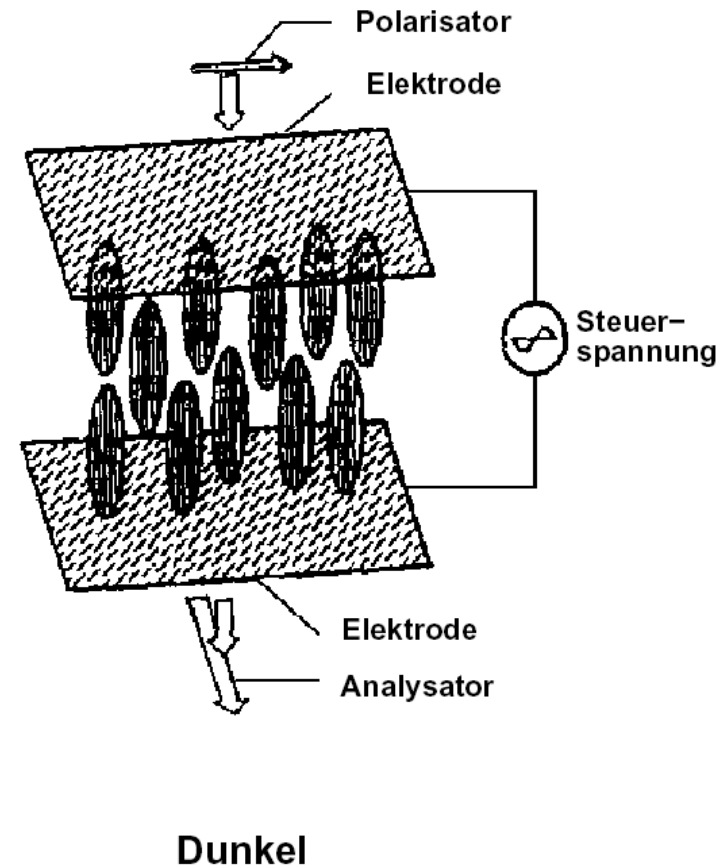
Flüssigkristallbildschirm / LCD (liquid crystal display)

- Zwei Glasplatten im Abstand weniger μm schließen Flüssigkristall ein
- Über zwei transparente Elektroden an beiden Glasplatten kann ein elektrisches Feld im Flüssigkristall erzeugt werden
- Einrahmung der Anordnung durch zwei um 90° gedrehte Polarisationsfilter
- Bildschirm wird durch künstliches Licht von hinten beleuchtet; dieses wird durch hinteren Polarisationsfilter polarisiert

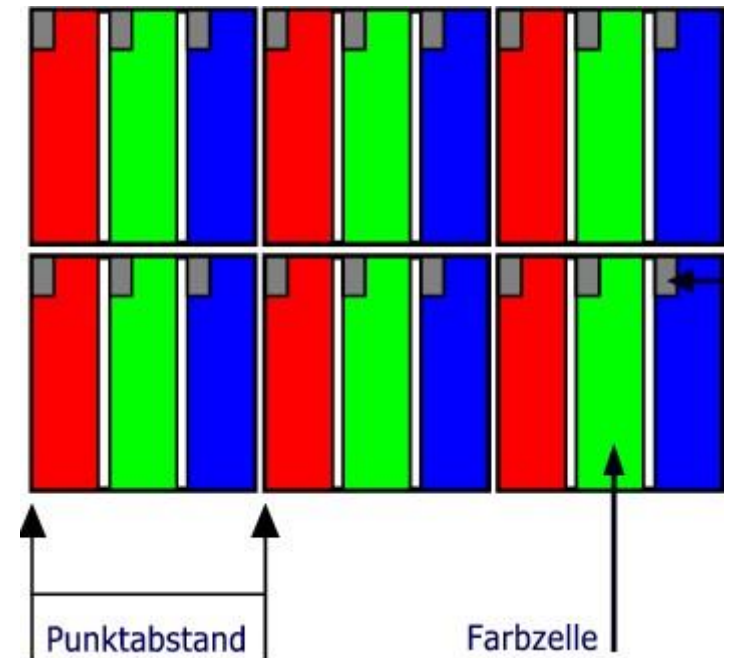
- Die organischen Moleküle im Flüssigkristall drehen die Polarisationsrichtung um 90° , falls kein elektrisches Feld anliegt
- Das polarisierte Licht passiert den zweiten Filter ungehindert, helles Pixel



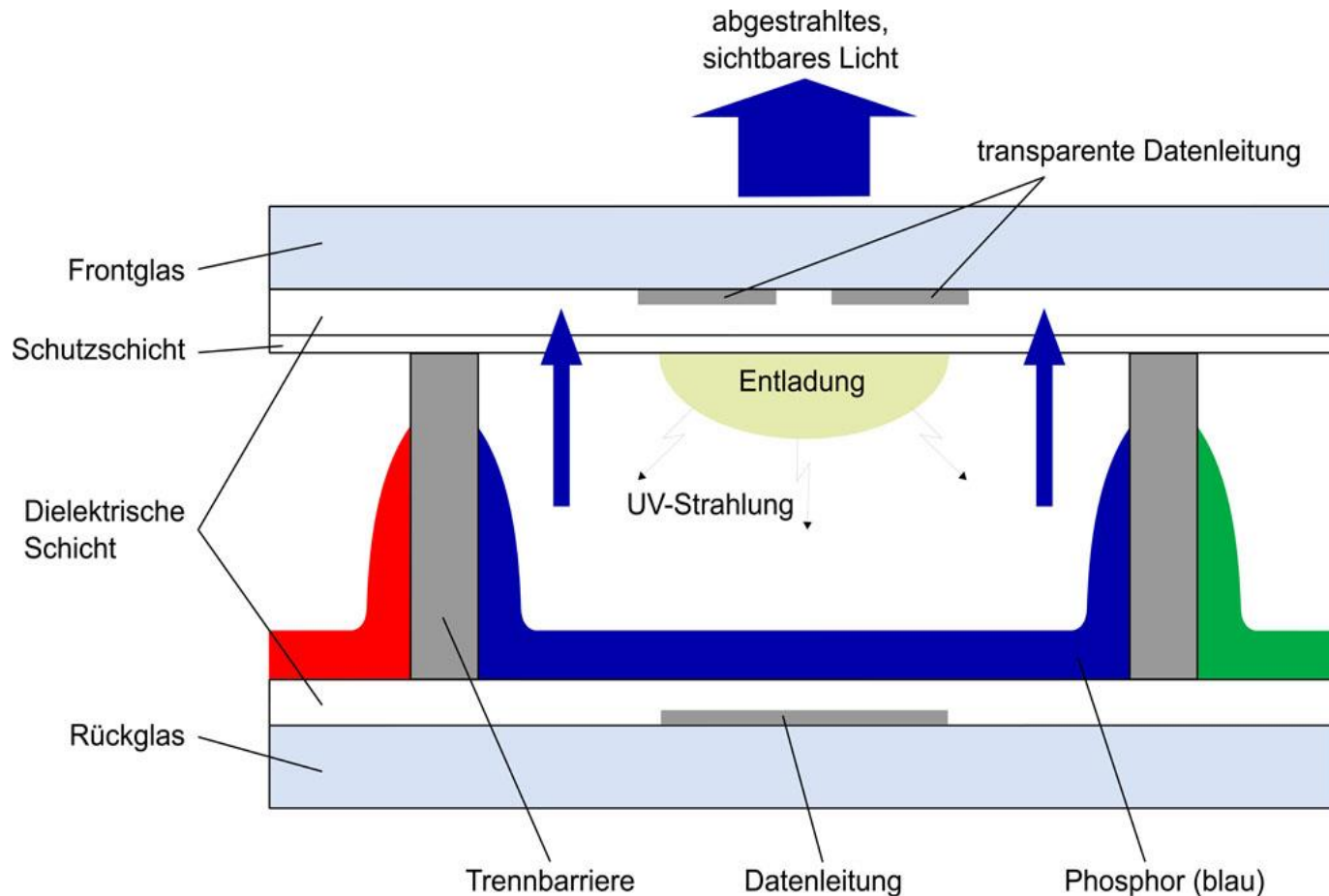
- Bei maximalem elektrischen Feld wird die Polarisationsrichtung nicht gedreht
- Das polarisierte Licht passiert den zweiten Filter nicht, dunkles Pixel
- Durch Kontrolle der Feldstärke kann die Helligkeit eingestellt werden.



- Für Farbdarstellungen werden drei Flüssigkristallzellen zu einem RGB-Farbtripel zusammengefasst
- Die drei Elementarfarben werden über Farbfilter über den Zellen erzeugt
- Die Zellen werden matrixartig angeordnet



Plasma Display Panel (PDP)



OLED: lichtemittierende Dioden (LED) aus Kunststoffen

Vorteil: Hoher Kontrast, da keine Hintergrundbeleuchtung

- OLEDs emittieren farbiges Licht („selbstleuchtend“), dagegen wirken LCDs nur als farbige Filter
- Sehr dünn, Reaktionszeit um ein Vielfaches schneller als bei LCD (> Faktor 1.000)

Nachteile:

- Niedrige Lebensdauer (blau als begrenzender Faktor)
- Korrosionsanfälligkeit



Bild oben: oled-info.com
Bild links: hiperdef.com

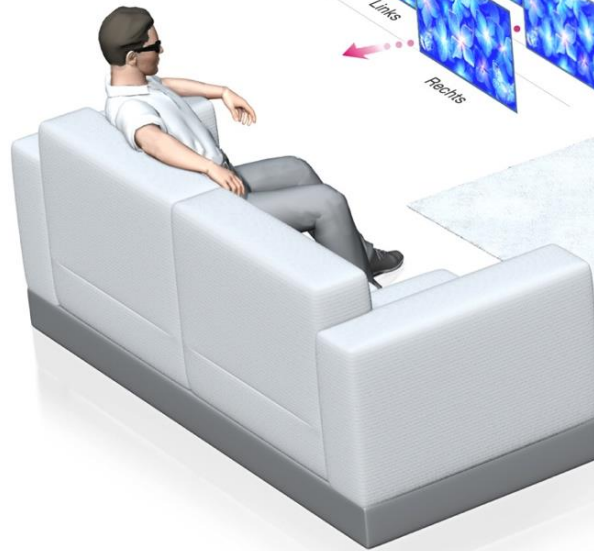
Anwendung vor allem in kleinen Bildschirmen (v.a. Smartphones, Tablets, ...)

Shutter-Brille



3D BRILLE

Die Active Shutter Brille sorgt durch schnelles Öffnen und Schließen der Gläser dafür, dass jedes Auge das jeweils richtige Bild sieht – und so der 3D Effekt entsteht.



3D TV

Der 3D Chipsatz des Fernsehers ermöglicht die Wiedergabe von 3D Inhalten in HD-Qualität. Selbst 2D Inhalte können in Echtzeit in 3D umgewandelt werden.

3D BLU-RAY HEIMKINO ODER 3D BLU-RAY PLAYER

3D Blu-ray Zuspieler sind die optimale Ergänzung zum 3D TV: Damit können 3D Filme in Full HD Auflösung (1920 x 1080 Pixel) wiedergegeben werden.

Quelle: Samsung

Polarisationsbrille

- Polarisierte Bilder für das linke bzw. rechte Auge

Virtual Retinal System

- Bild wird direkt auf die Retina projiziert (zeilenweise)
- Bild ungefähr eine Armlänge entfernt
- Durchsichtmodus: regelbare Helligkeit

Head Mounted Display

- Zwei kleine LCD bieten beiden Augen die Ansicht einer 3D Szene aus leicht unterschiedlichen Perspektiven an



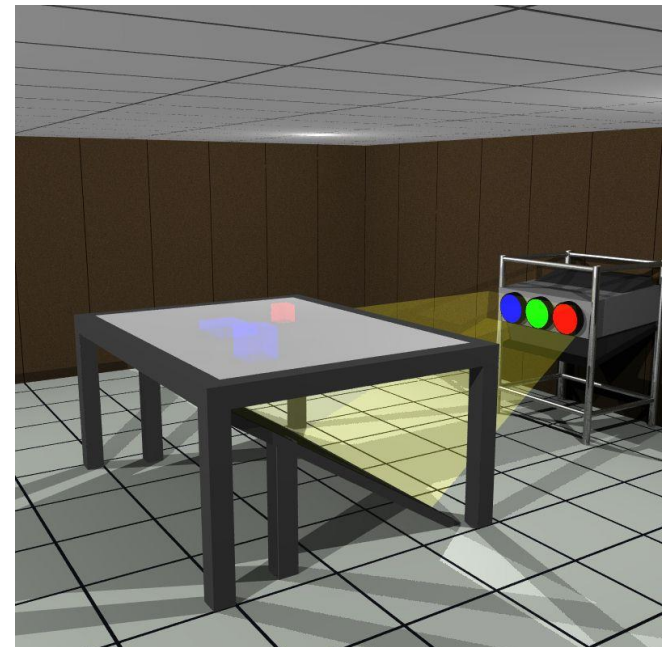
HMDs (z.B. Oculus Rift, HTC Vive)

- Preisgünstig
- Weites Spektrum an Bewegungen möglich
- Virtuelle, zwei-händige Interaktionen möglich
- Immersiv, aber unhandlich
- U.U. Übelkeit durch ungenaues oder langsames Tracking
- Ein-Benutzer-System



Responsive Workbench

- Verwendung der Tisch-Metapher
- Neigbare Projektionsfläche
- Rückprojektion
- 3D durch Shutter-Brille



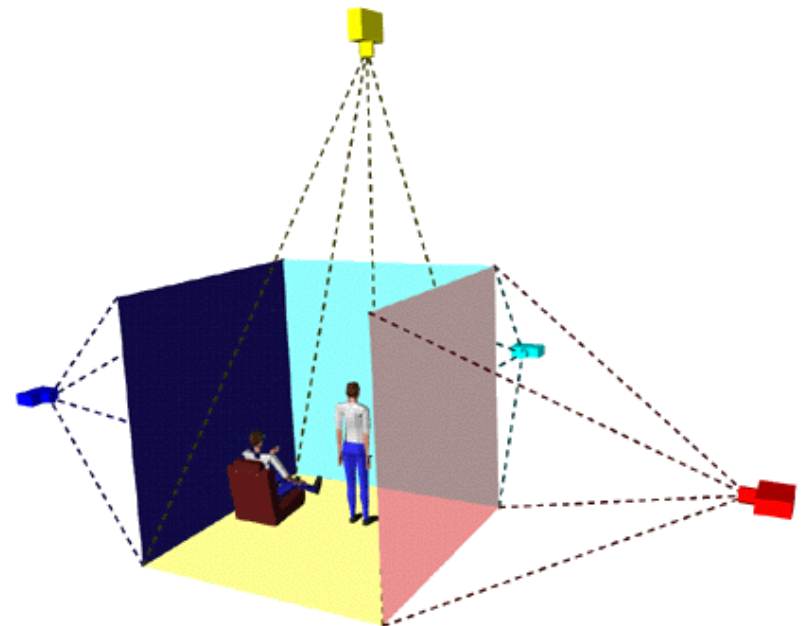
Powerwall

- Große Projektionsfläche
- Stereoskopische Ausgabe
- 3D durch Polarisations- oder Shutter-Brille
- 3D-Interaktion (eine Person)
- Benutzer kann sich innerhalb des Aktionsraums frei bewegen



CAVE

- Cave Automatic Virtual Environment
- Immersion über an Wände, Decke und Boden projizierte Stereobilder
- 3D durch Shutter-Brille
- Tracking
- 3D-Surround-Sound



Autostereoskopische Bildschirme

- Image Splitter
 - herkömmliches LCD mit abwechselnd einer Pixelspalte für das linke und rechte Auge
 - Streifenmaske blockiert jeweils den Blick auf die jeweils andere Spalte
 - Funktioniert nur bei einem Betrachter und bestimmter Kopfposition

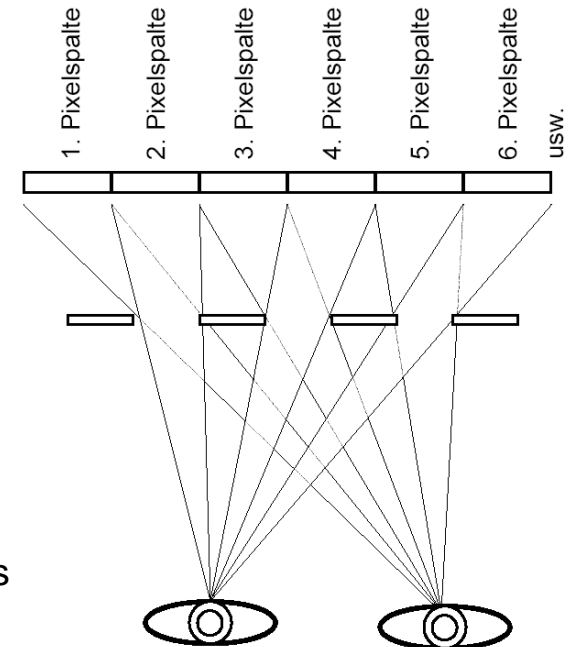


Abb.: Funktionsprinzip eines Image Splitters

Quelle: Uni Karlsruhe

Autoskopische Bildschirme

- Lentikularsystem
 - halbzylindrische Linsen vor Mattscheibe lenken Bilder in rechtes und linkes Auge
 - fester Betrachtungsabstand

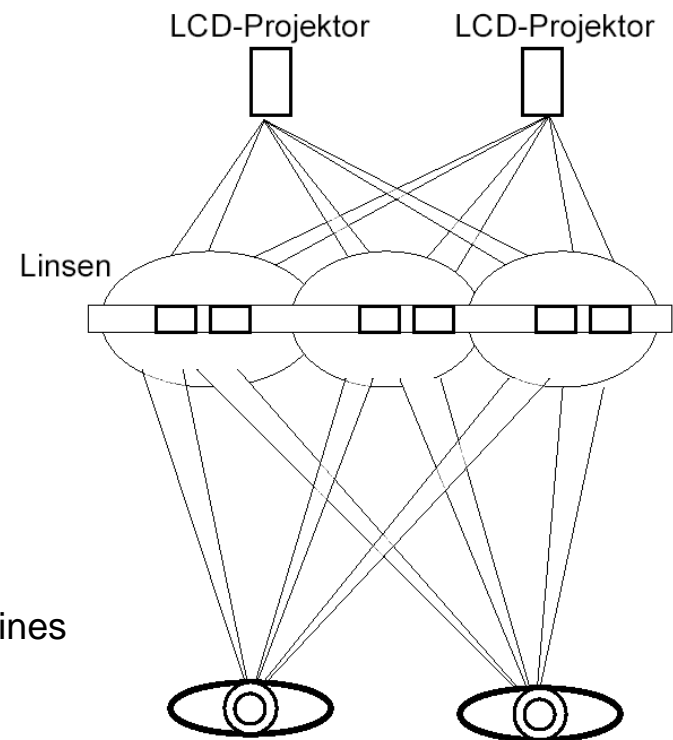


Abb.: Funktionsprinzip eines
Lentikularsystems

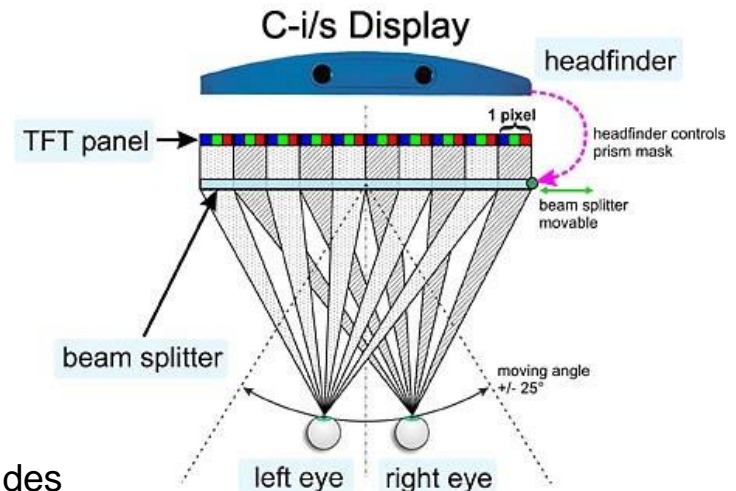
Quelle: Uni Karlsruhe

Autoskopische Bildschirme

- Prismensystem
 - Herkömmliches TFT-Display mit vorgeschaltetem Prismensystem
 - Bereich, in dem 3D-Effekt gesehen wird ("Sweetspot") ist normalerweise klein
 - Tracking-Funktion: Prismen werden je nach Position des Betrachters verschoben



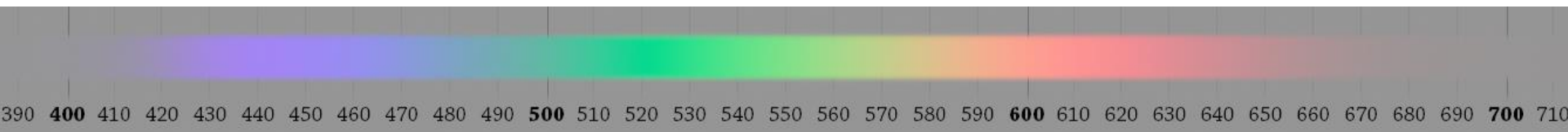
Abb.: Funktionsprinzip des Prismensystems



Quelle: SeeReal

Ein wesentlicher Teil der Computergrafik untersucht, wie sich das Aussehen eines Objektes z.B. in der Farbe eines Pixels niederschlägt.

Aber was genau ist „**Farbe**“?



Licht im Wellenlängenbereich von ca. 400–700nm erzeugt im Auge den Eindruck von Farbe.

Dabei überlagern sich die Eindrücke verschiedener Wellenlängen, z.B. zu weißem Licht, dass aus allen Wellenlängen zugleich besteht (Superpositionsprinzip).

Human eye:

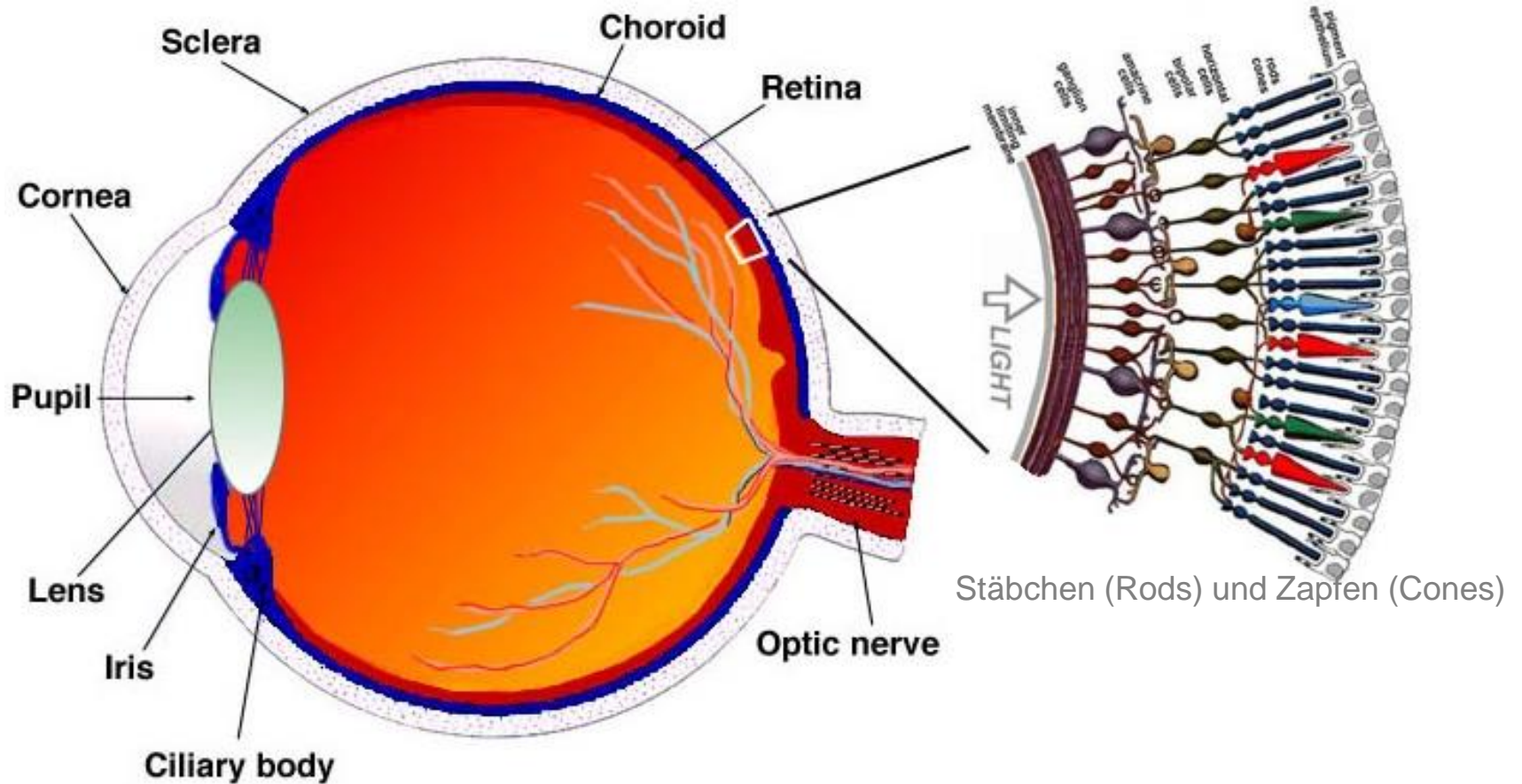


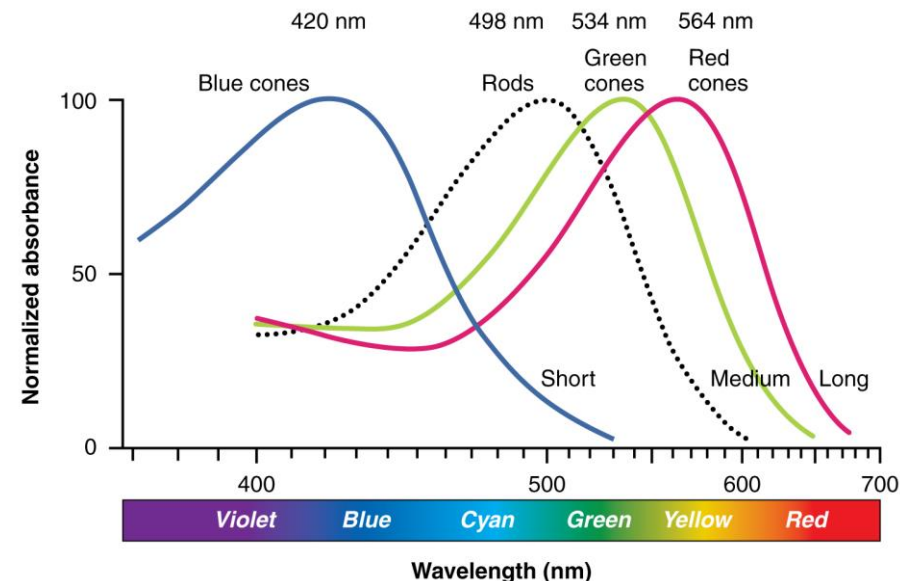
Figure by courtesy of <http://webvision.med.utah.edu/sretina.html>

Das menschliche Auge enthält zwei Typen von Lichtrezeptoren, die auf bestimmte Wellenlängenbereiche reagieren und dem Gehirn den Eindruck von Farbe vermitteln:

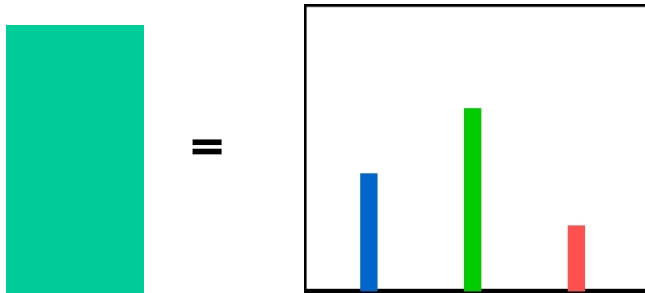
- Stäbchen melden Helligkeit
- Zapfen melden (ungefähr) rotes, grünes, und blaues Licht.

Fällt kein Licht ins Auge, so sieht man schwarz.

Dies kann man nutzen, um einen Großteil der sichtbaren Farben durch passende Mischung von rotem, grünem, und blauem Licht zu vermitteln.



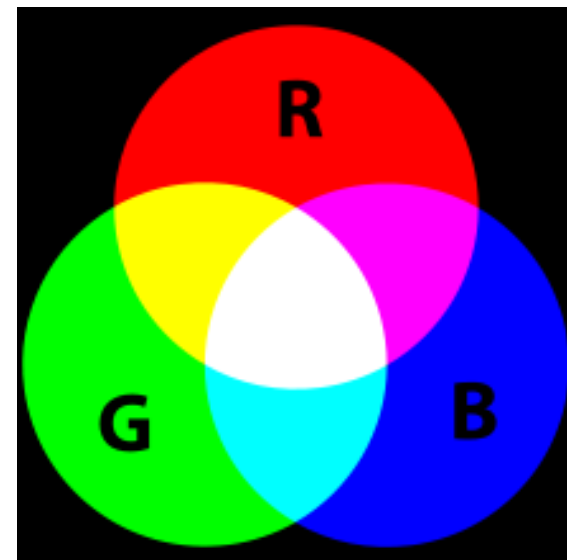
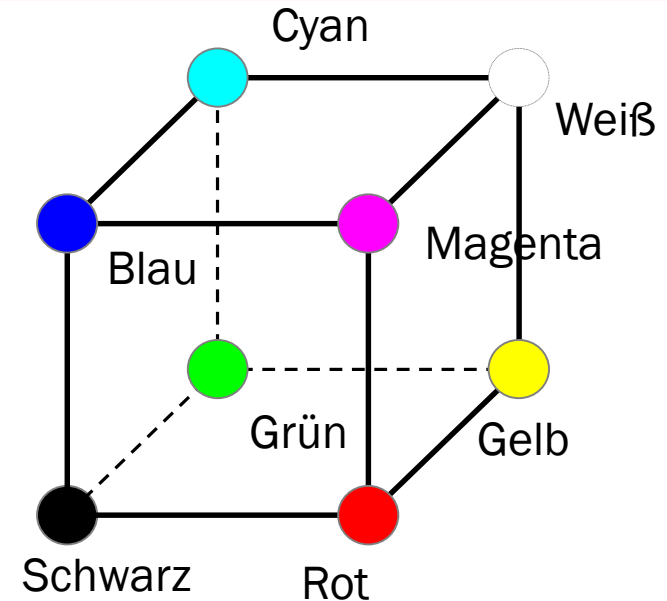
Zapfen melden Gehirn (ungefähr)
Anteil rotes, grünes, und blaues Licht



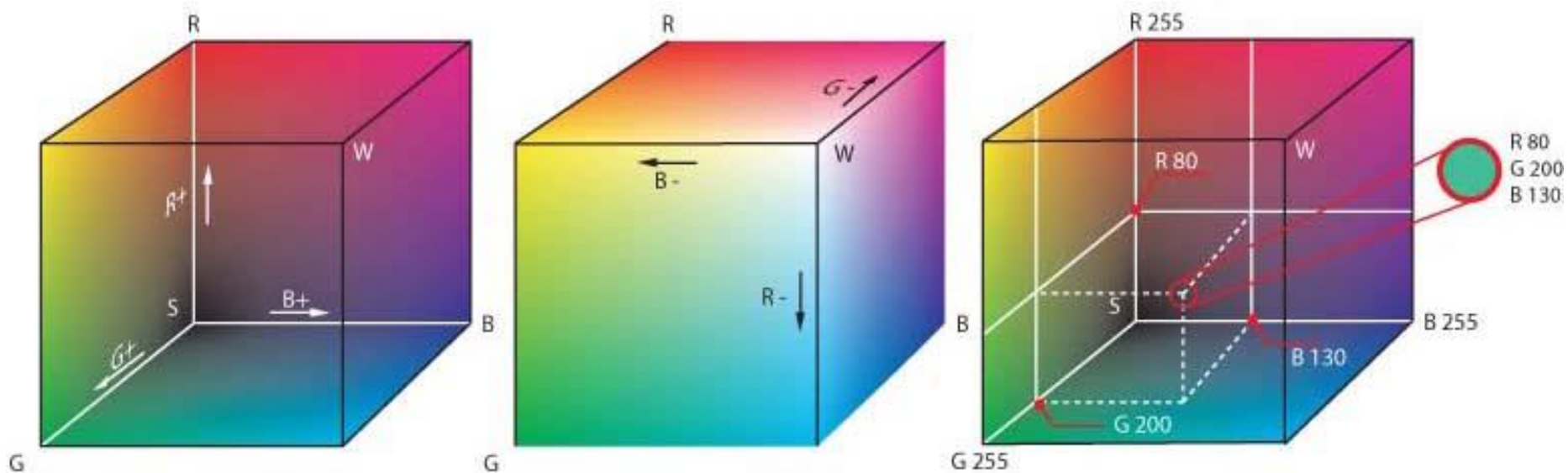
Fundamentales Prinzip (Superposition der primären Komponenten)
zur Farbwiedergabe, z.B. bei Displays, Drucker.

Das **RGB-Modell** ist additiv:
Schwarz + [R,G,B]

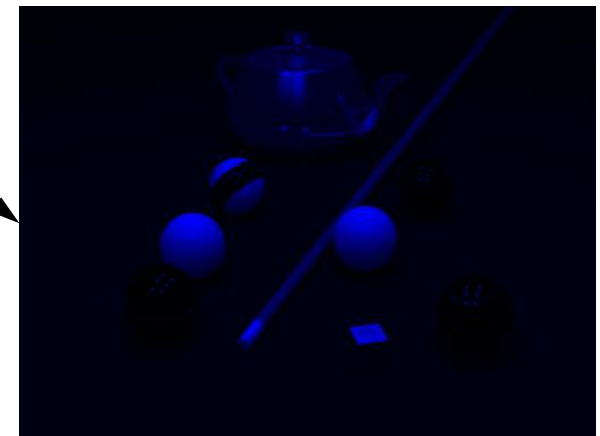
- Superpositionsprinzip
- Für R, G, B je ein relativer Anteil zwischen 0 und 1
- Interpretation als Einheitswürfel bzw. Farbwürfel
- in Farb-Displays
 - meist 8 Bit pro R, G, B
 - d.h. insgesamt $2^{24} = 16.7\text{M}$ Farben (*true color*)



RGB-Farbwürfel



Zerlegung eines Bildes in RGB-Komponenten



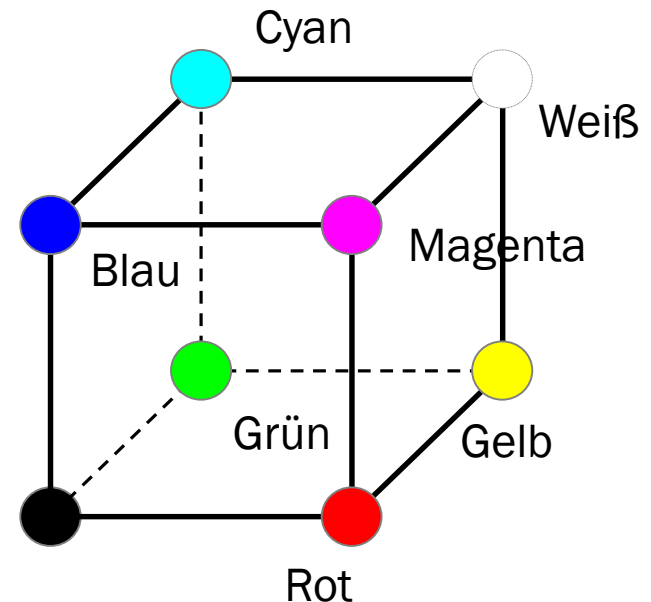
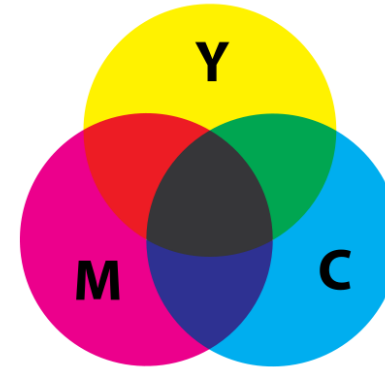
Tinte auf Papier vermittelt Farbeindruck durch Absorption bestimmter Wellenlängen.

Komplementärfarben zu RGB

- cyan (C), magenta (M), gelb (Y)
- Licht, additives Modell:
Farben überlagern sich zu weiss
- Tinte, subtraktives Modell:
überlagern sich zu schwarz

Subtraktives Farbmodell für Drucker

- da sich Schwarz nicht gut mischen lässt, wird eine zusätzliche Komponente K genutzt.



Das CMY-Modell wurde
im Buchdruck schon
früh genutzt.

In modernen Druckern kommen
oft Varianten des CMYK-Modells
zum Einsatz, die bessere Misch-
farben herstellen können.

- CcMmYyK
- Zusätzliche hellere Töne,
insgesamt sechs Tinten

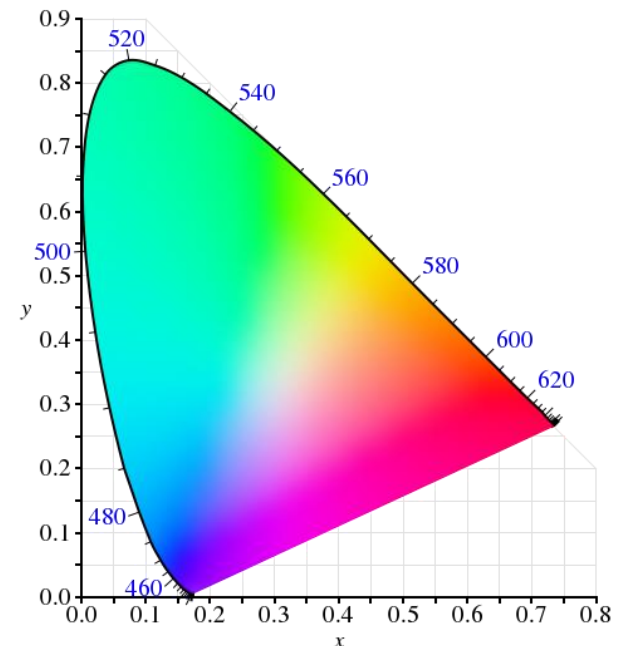


Nicht alle für das menschliche Auge sichtbaren Farben lassen sich mit RGB und CMYK darstellen.

Ein **Farbraum** (*color space*) ist eine spezifische Organisation von Farben, die analoge oder digitale Reproduktion näherungsweise ermöglicht. Dies ermöglicht eine genaue Spezifikation von Farben, bzw. eine Umrechnung zwischen Farbräumen (z.B. Display → Drucker)

Die Menge der wahrnehmbaren Farben kann näherungsweise im **Chromazitätsdiagramm** dargestellt werden

Verschiedene Farbräume repräsentieren Untermengen aller wahrnehmbaren Farben.

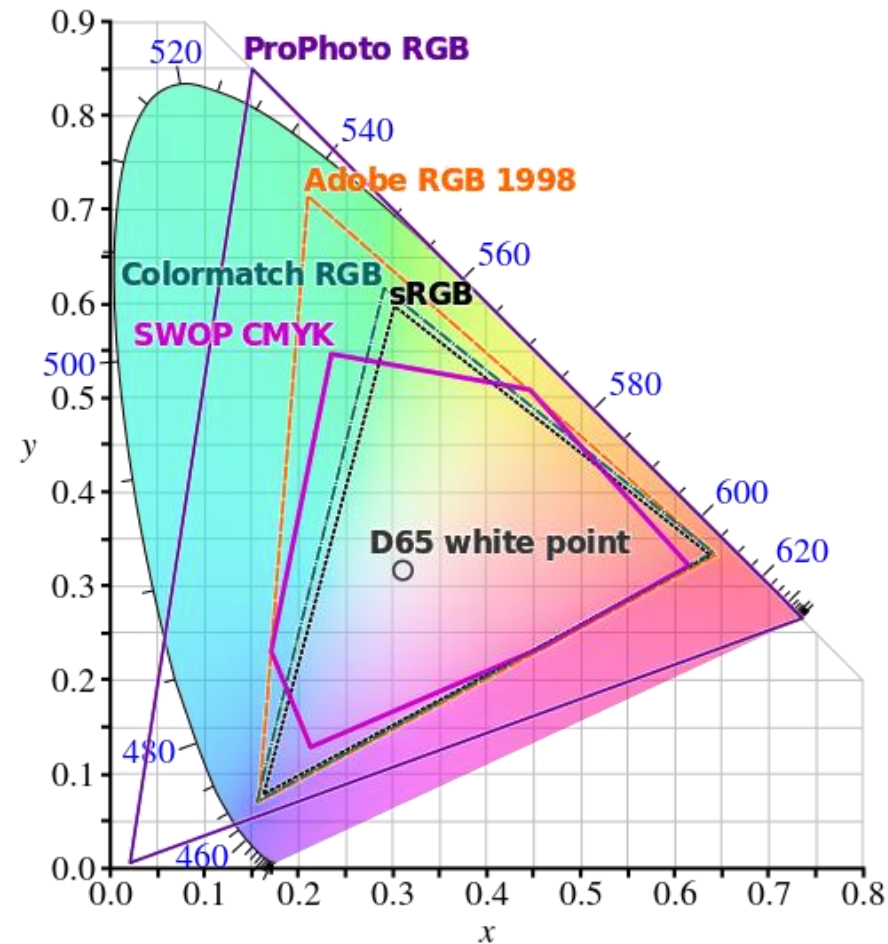


Der Gamut der RGB- und CMYK-Farbräume deckt bei weitem nicht das Chromatizitätsdiagramm ab.

Tatsächlich gibt es mehrere Spezifikationen, die zwar auf dem gleichen Prinzip basieren, aber unterschiedliche Mengen abbilden.

Häufig anzutreffen: **Adobe sRGB**

- guter Kompromiss für viele Anwendungen



Das RGB-Modell ist bezüglich der Farbwahrnehmung *nicht linear*.

- Selbst in *true color* existieren im Farbwürfel Regionen, in denen benachbarte Punkte für das Auge denselben Farbeindruck hervorrufen.
- In anderen Regionen hingegen sind die Farben benachbarter Punkte für das Auge sehr wohl voneinander unterscheidbar.

Für Menschen ist es oft schwierig, zu einer gewünschten Farbe (z. B. Kastanienbraun) ein (R, G, B)-Tripel zu ermitteln.

- Ebenfalls schwierig ist es beispielsweise, eine Farbe ein wenig abzuschwächen (erfordert ungleiche Änderungen von R, G und B).

Das HSV-Farbmodell trägt diesen Umständen Rechnung.

Unterstützung einer intuitiven Farbauswahl
(wahrnehmungsorientiertes Farbmodell)

- Der Farbkörper im 3D-Farbraum ist eine Pyramide mit sechseckiger Grundfläche
- Nutzung von „Zylinderkoordinaten“

Hue / Farbe („Farbfamilie“)

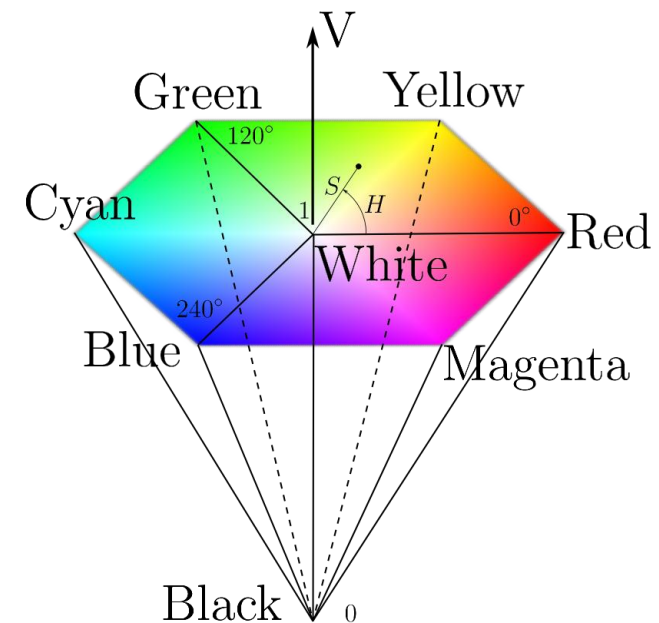
„Farbwinkel“ in Grad: $0^\circ \leq H < 360^\circ$

Saturation / Sättigung

$0 \leq S \leq 1$; Verkleinerung addiert Weiß

Value / Helligkeit

$0 \leq V \leq 1$; Verkleinerung addiert Schwarz



Zusammenhang zwischen HSV- und RGB-Modell

- Die Grundfläche der HSV-Pyramide entsteht aus dem RGB-Würfel durch Projektion entlang der Raumdiagonale von Weiß nach Schwarz auf eine dazu senkrecht stehende Ebene.
- Es ergeben sich folgende korrespondierende Punkte:

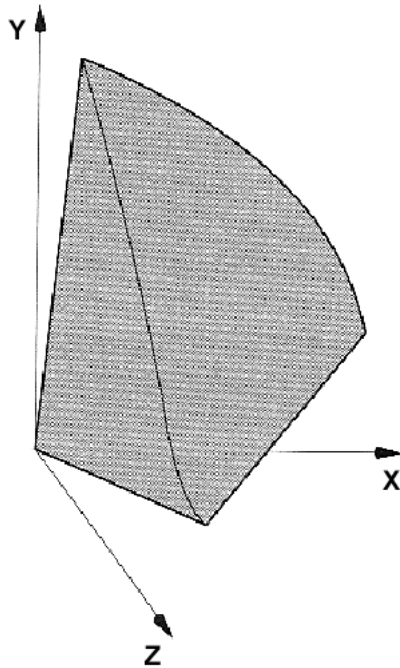
RGB	Farbe	HSV
(1, 0, 0)	Rot	(0, 1, 1)
(1, 1, 0)	Gelb	(60, 1, 1)
(0, 1, 0)	Grün	(120, 1, 1)
(0, 1, 1)	Cyan	(180, 1, 1)
(0, 0, 1)	Blau	(240, 1, 1)
(1, 0, 1)	Magenta	(300, 1, 1)

- Im HSV-Modell besitzen Komplementär-farben eine Winkeldifferenz von 180° im H-Wert

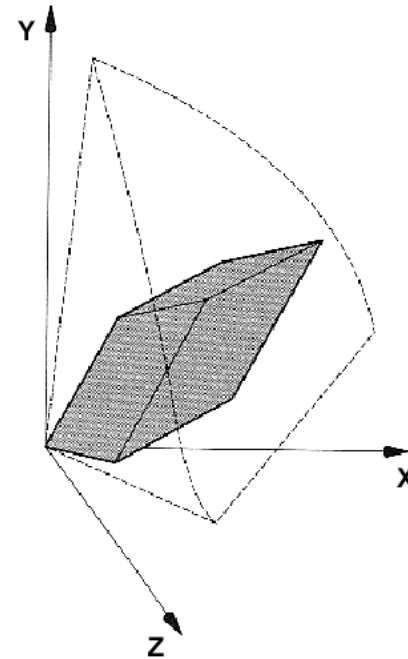
CIE-Farbraum

- Internationaler, geräteunabhängiger Standard zur Farbspezifikation, geeignet zur Beschreibung **aller** vom Menschen wahrnehmbaren Farben (der RGB-Farbkörper ist hierfür nicht geeignet!)
- Universeller Farbraum
- Verwendet die **künstlichen Grundfarben X, Y und Z** zur additiven Farbmischung (CIE XYZ-Farbraum)
 - Begründung: Keine Auswahl dreier Grundfarben aus dem sichtbaren Farbbereich kann durch additive Mischung mit nicht negativen Gewichten alle wahrnehmbaren Farben abdecken. Die Mischung schon zweier Grundfarben ergibt immer eine weniger gesättigte Farbe
- Repräsentation einer Farbe **C** durch
$$\mathbf{C} = X \mathbf{X} + Y \mathbf{Y} + Z \mathbf{Z}$$

CIE-Farbraum



CIE XYZ Farbkörper: enthält
alle wahrnehmbaren Farben



Von einem Monitor
darstellbare Farben

CIE-Farbraum (cont.)

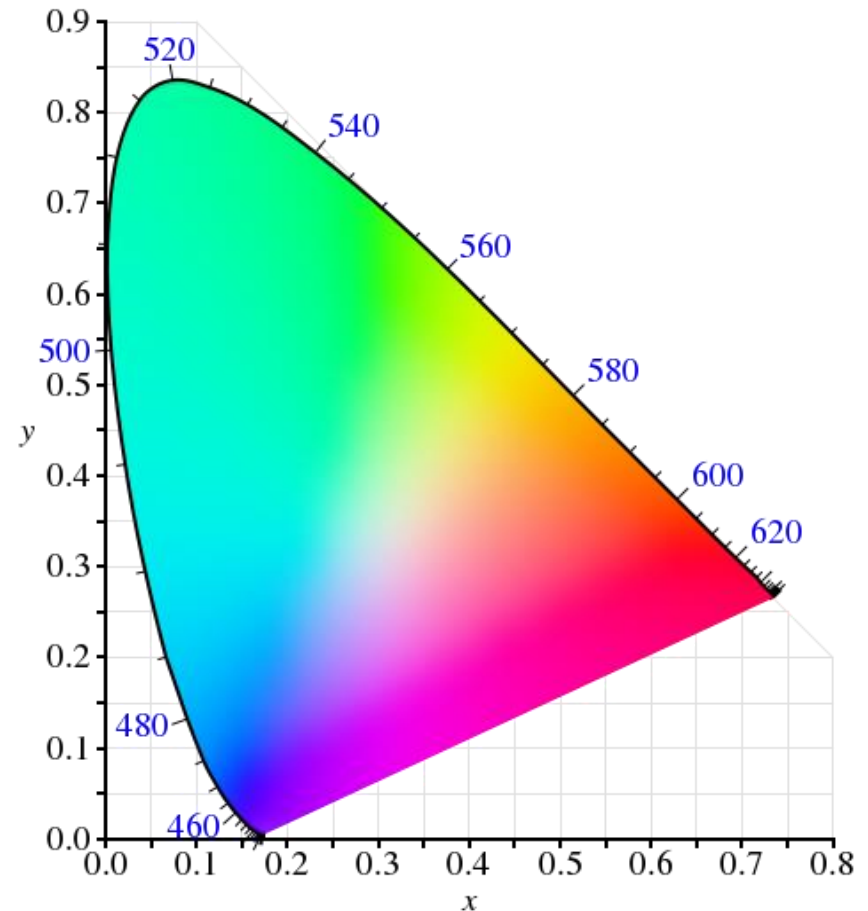
- Eine alternative Spezifikation des CIE XYZ-Farbtripels (X, Y, Z) ergibt sich durch eine Abbildung $(X, Y, Z) \rightarrow (x, y, Y)$ mit

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad \text{und} \quad (x, y, Y) \text{ (CIE } xyY\text{-Farbraum)}$$
$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

- Wertet man die Gleichungen für alle Farben des XYZ-Farbkörpers aus und trägt man die Ergebnisse in einem (x, y) -Diagramm ein, so erhält man das hufeisenförmige CIE-Diagramm der Chromatizität.

- Das (x, y)-Diagramm ist die Projektion der Ebene $X+Y+Z = 1$ in die xy -Ebene.

Es ergeben sich alle sichtbaren Farben, dabei wird der Luminanz-Anteil ignoriert.
- Auf dem äußeren Rand der Hufeisenform liegen die reinen Spektralfarben von Blau (400nm) bis Rot (700nm).
- Auf der Geraden zwischen Blau und Rot befinden sich die Lila- und Magenta-Farben.



Im YUV-System wird eine Farbe durch Helligkeit (*brightness*, Y) und zwei Farbausprägungen (*chrominance*, UV) spezifiziert.

Dadurch wird Helligkeitsinformation von der Farbinformation getrennt.



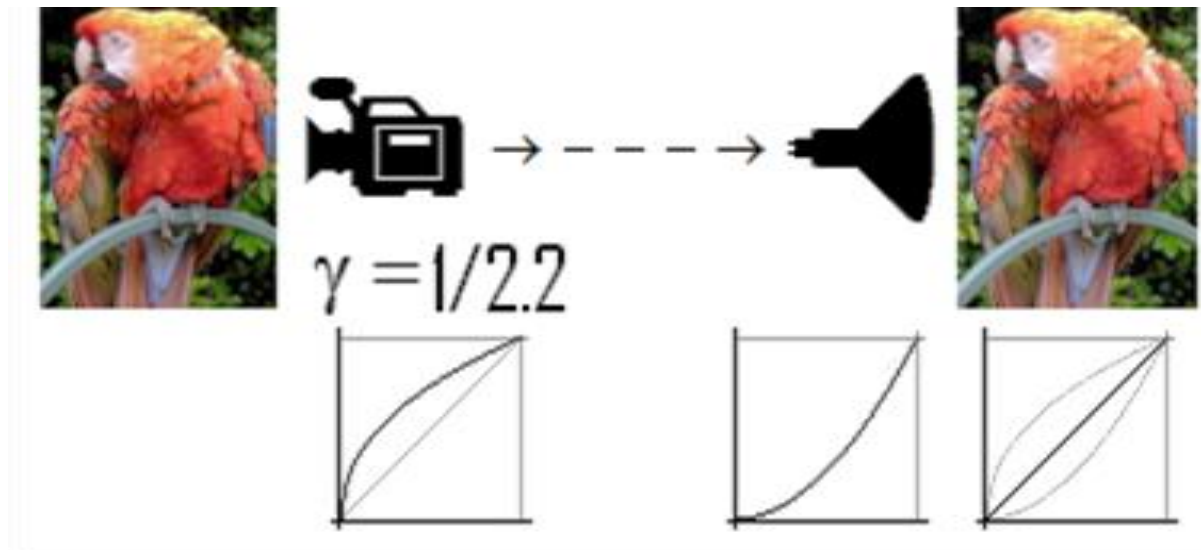
Das Auge ist hinsichtlich Farbe wesentlich weniger sensitiv als in Bezug auf Helligkeit. Deswegen kann Chrominanz aggressiver komprimiert werden. Auf diesem Prinzip bauen die JPEG-, MPEG- und viele andere Bildkompressionsverfahren auf.

Links: volle Auflösung von YUV, rechts: Y in voller Auflösung, UV in Viertelauflösung.



In der Frühzeit der Fernsehübertragung erwarteten Zuschauer, dass sie eine Szene zu Hause in derselben Farbqualität sehen wie in Realität auch.

Um dies zu verwirklichen, wird in der Fernsehkamera bereits eine Präkompensation vorgenommen, die die Nichtlinearität der Farbwiedergabe einer üblichen Fernsehöhre korrigiert.



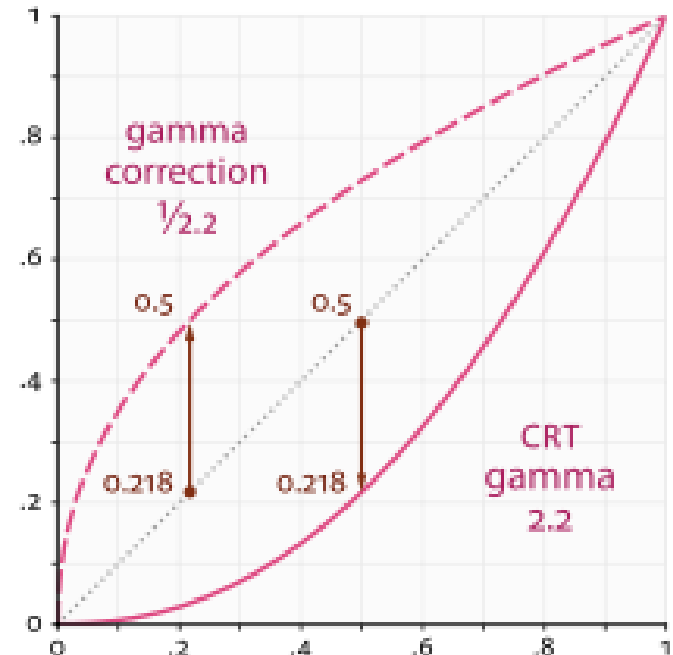
Bei der Darstellung von Szenen in der Computergrafik übernimmt ein Renderer die Rolle der Kamera, besitzt aber generell eine lineare Intensitätscharakteristik.

Da jedoch ein Monitor eine ähnliche Nichtlinearität bei der Farbwiedergabe aufweist wie ein Fernsehgerät, muss dem Renderingprozess eine geeignete Korrektur nachgeschaltet werden.

Diese **Gamma-Korrektur** ist von der Form

$$L^* = L^{(1/\gamma)}$$

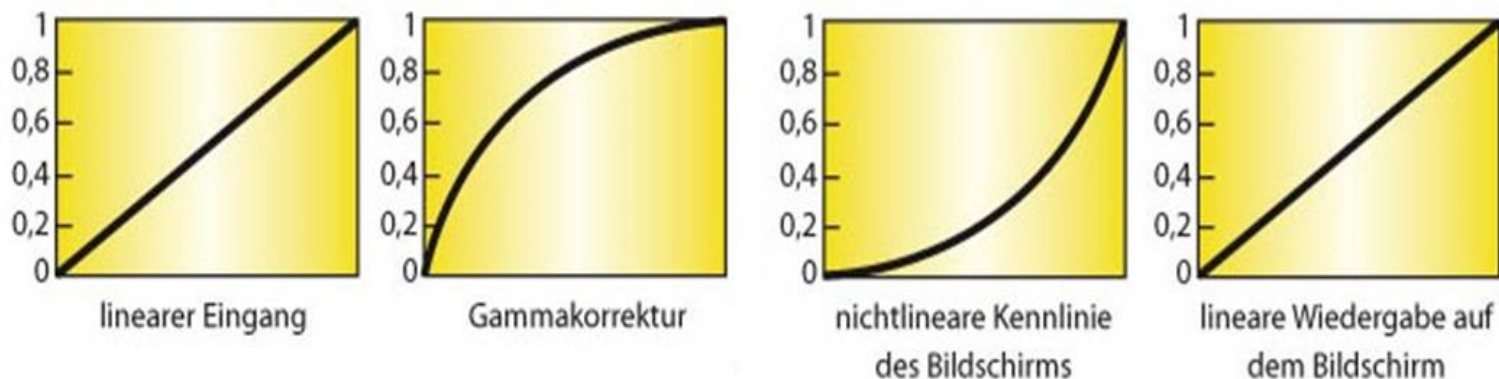
wobei γ typischerweise die Werte 1.8 oder 2.2 annimmt.



Aufgrund der Nichtlinearität des Monitors mischen sich z.B. Schwarz und Weiss nicht zu 50% Grau.

Dies muss berücksichtigt werden, wenn mit Farbwerten gerechnet wird, z. B. Mittelwert, Linearkombination, etc.

In moderner Grafikhardware wird die Gammakorrektur durch eine 8-bit-Tabelle für jeden der true color R,G,B-Kanäle separat durchgeführt.



Bildquelle: <http://www.elektroniknet.de>