

Computergrafik 2: Licht & Farbe

Prof. Dr. Michael Rohs, Dipl.-Inform. Sven Kratz

michael.rohs@ifi.lmu.de

MHCI Lab, LMU München

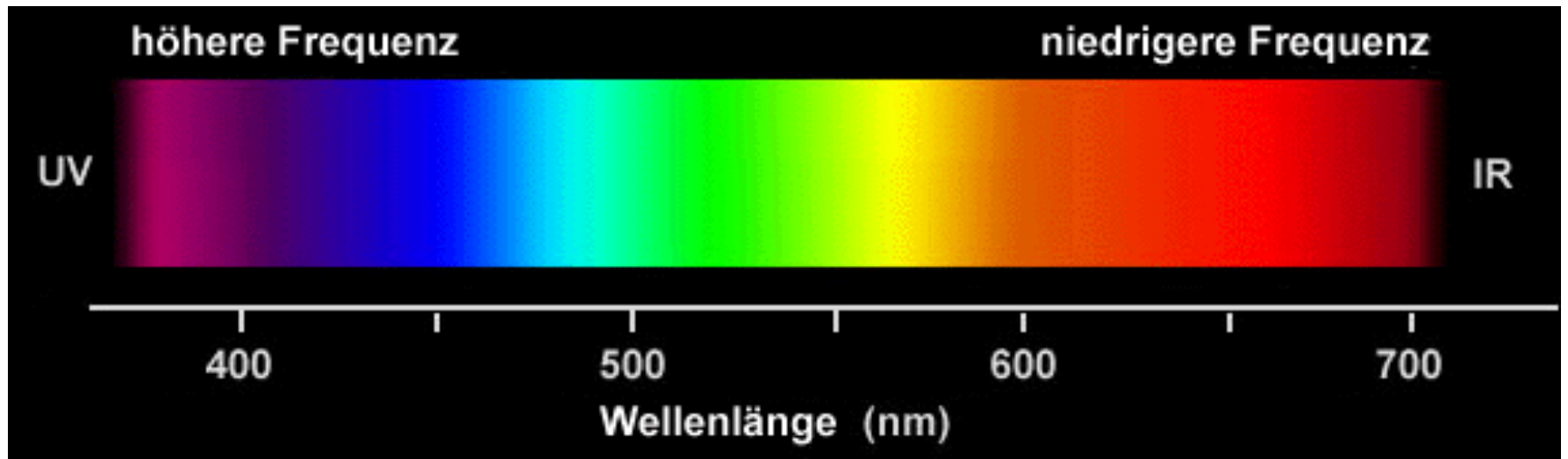
Folien teilweise von Andreas Butz, sowie von Klaus D. Tönnies
(Grundlagen der Bildverarbeitung. Pearson Studium, 2005)

Themen heute

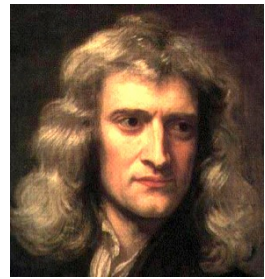
- Licht & Farbe
- Farbräume und Konvertierungen
- Ausgabe von Bildern
 - RGB Monitor / Projektor
 - Drucker, Film und Fotopapier
- Aufnahme von Bildern
 - Digitalkameras
 - Scanner
- Farbmanagement
 - Gammakurven
 - CIE Farbmanagement

Was ist Licht?

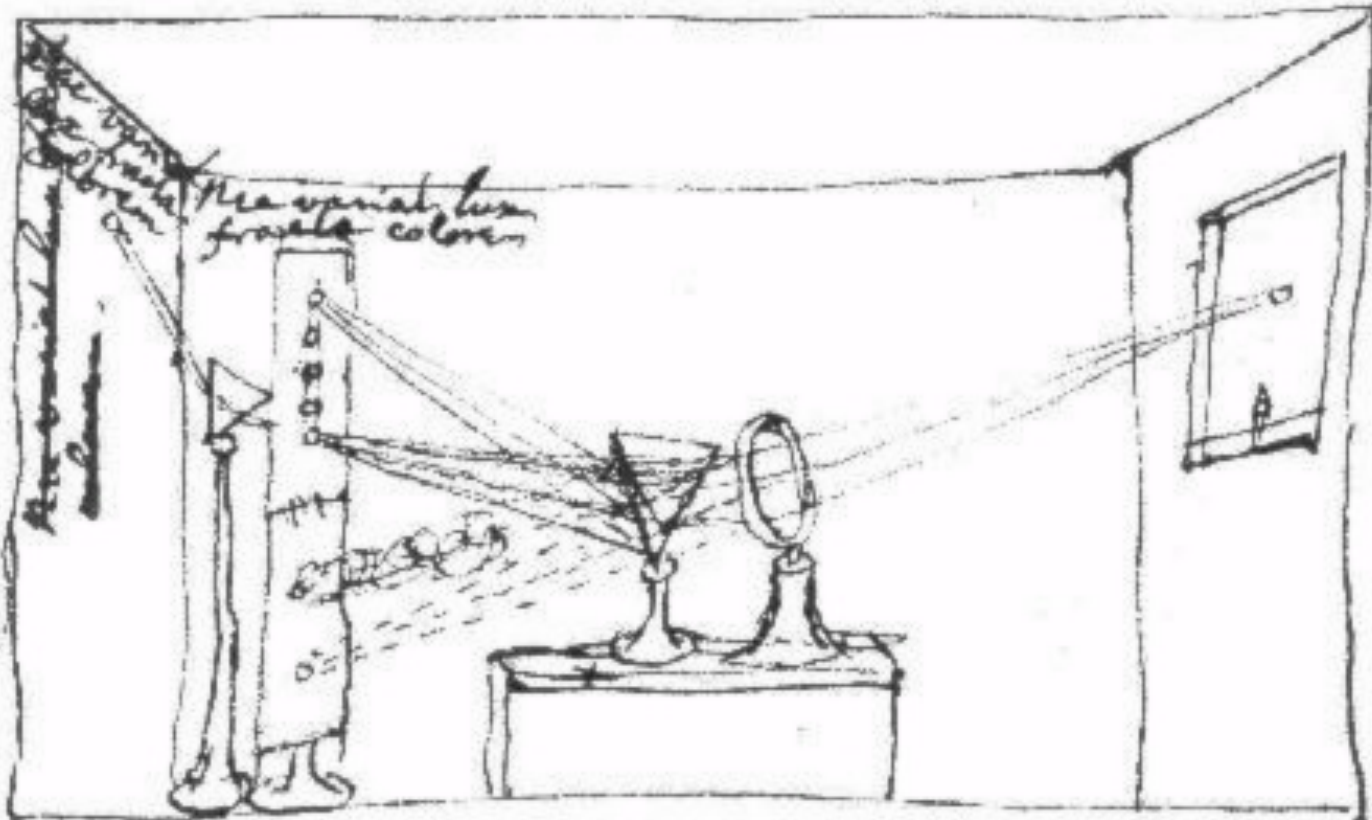
- Licht kann als elektromagnetische Welle beschrieben werden (oder als Teilchen)
- Sichtbarer Bereich zwischen 350 nm und 750 nm
- Zerlegung des Farbspektrums durch ein Prisma



Isaac Newton's Prism Experiments



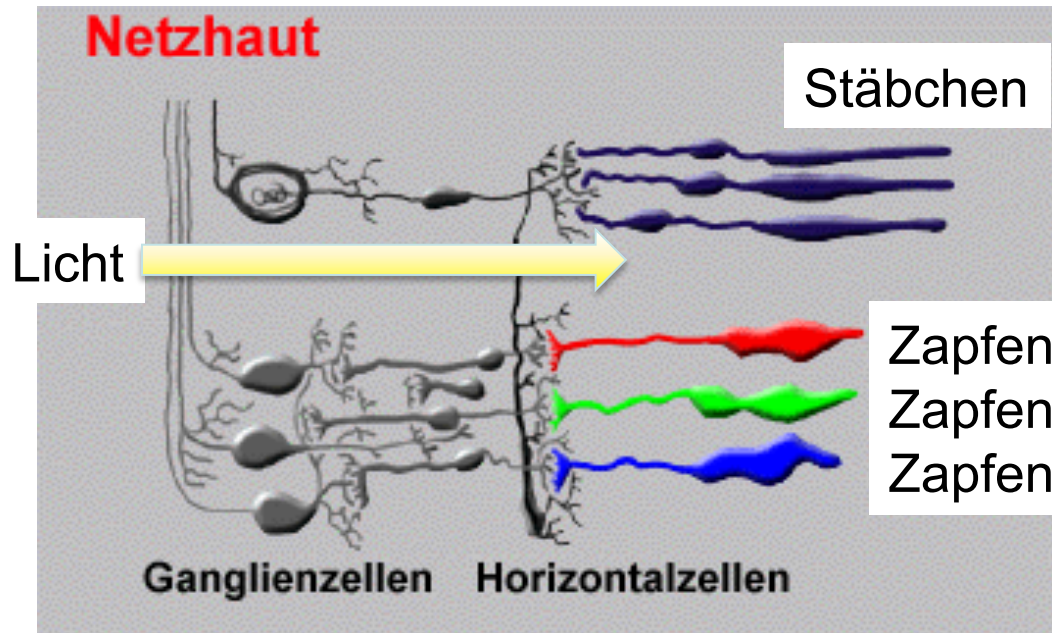
Zeichnung in Isaac Newton's Notizbuch (1664-1666)



Bildquelle: P. Whitfield, Landmarks in Western Science, Routledge, 1999

Fotorezeptoren in der Retina

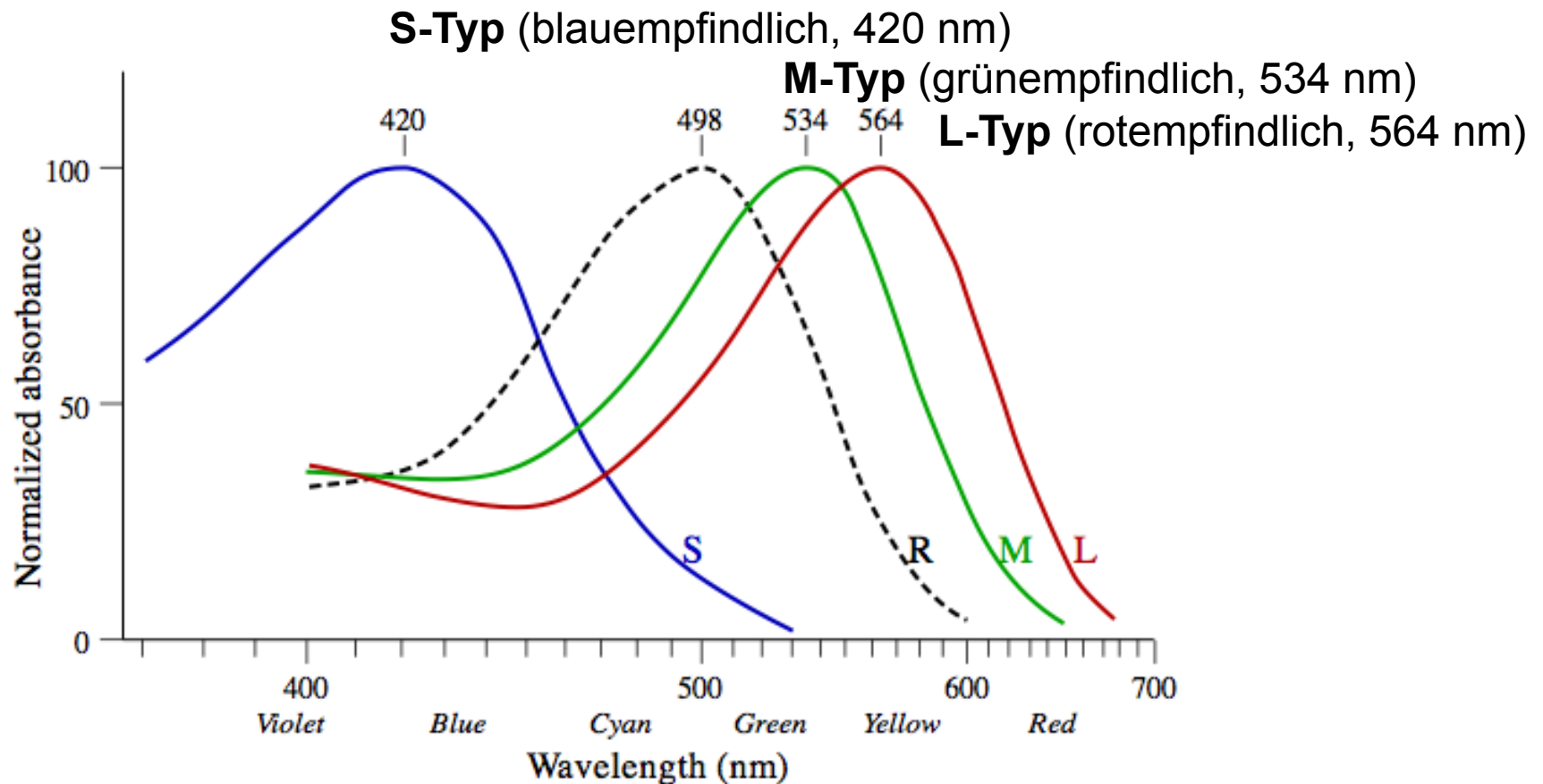
- Stäbchen: skotopisches Sehen
 - sehr lichtempfindlich, langsam
 - in der Peripherie der Retina
 - 120 Millionen pro Auge
 - maximale Sensitivität bei 500 nm
- Zapfen: photopisches Sehen
 - weniger lichtempfindlich, schnell
 - in der Fovea konzentriert
 - 6 Millionen pro Auge
 - 3 Typen (trichromatisches Sehen)
 - S-Typ (blauempfindlich, 420 nm)
 - M-Typ (grünempfindlich, 534 nm)
 - L-Typ (rottempfindlich, 564 nm)



Farbeindruck entsteht aus Kombination der Zapfenaktivierung

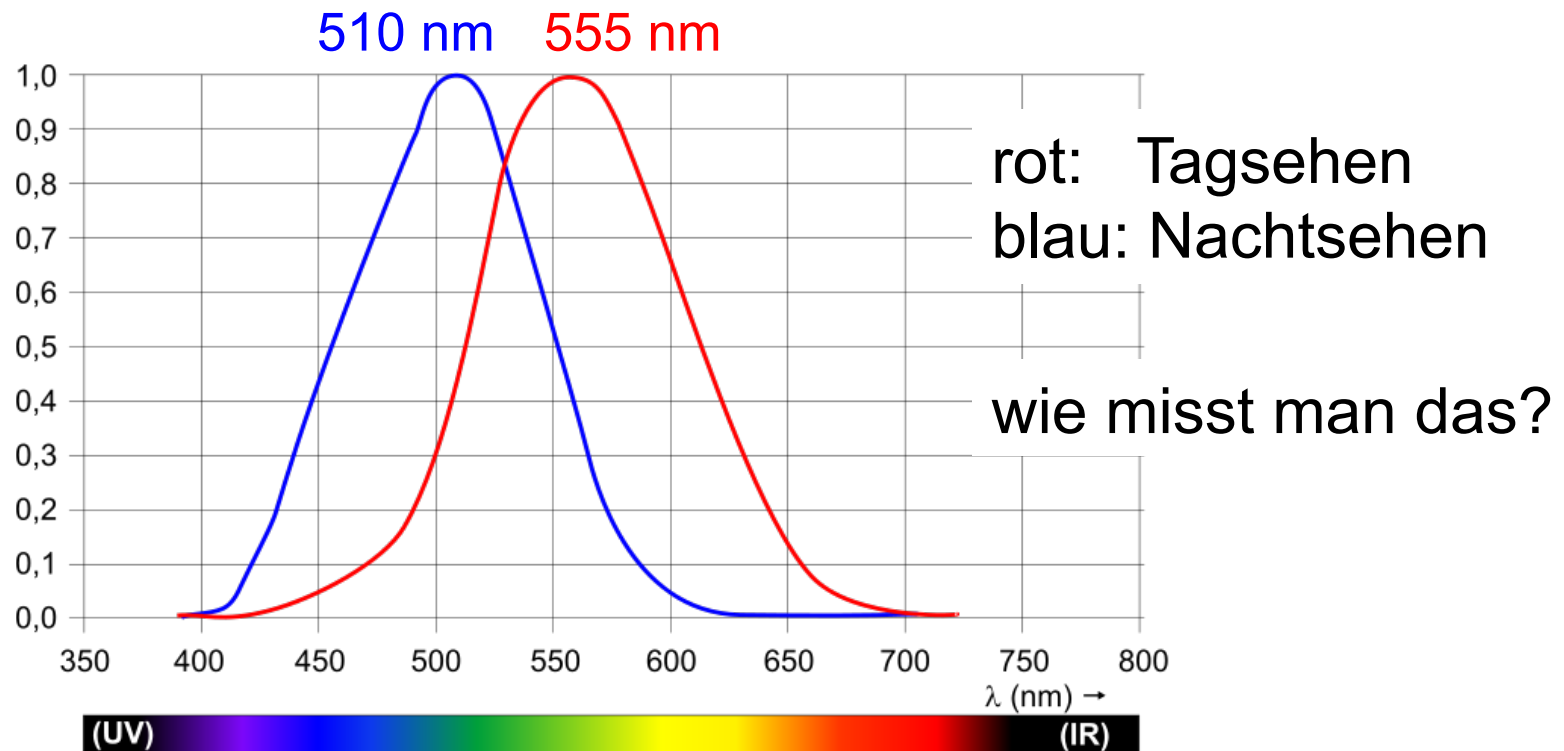
Trichromatisches Sehen

Die drei Zapfen-Typen haben unterschiedliche Empfindlichkeitsmaxima



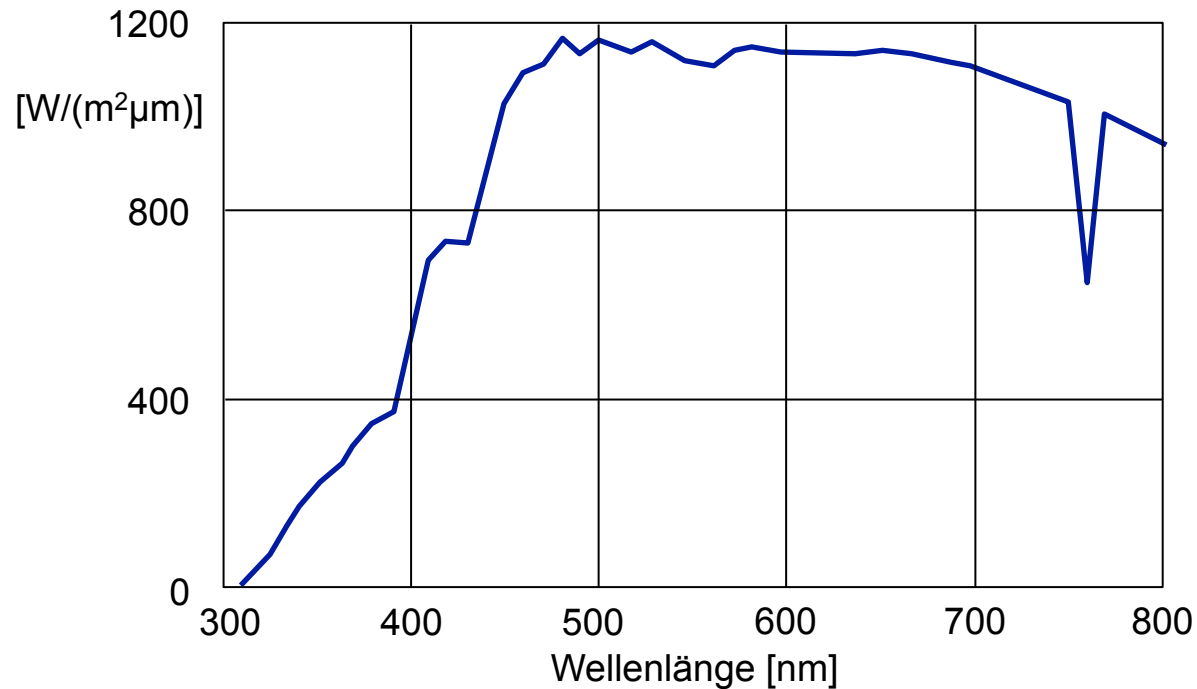
Hellempfindlichkeitskurve ($V(\lambda)$ -Kurve)

- Spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges
 - im Bereich 360nm bis 830nm in 1nm Schritten gemessen
 - (sichtbares) Licht \Leftrightarrow spektrale Hellempfindlichkeit $V(\lambda) > 0$



© HHahn, BY-CC-SA

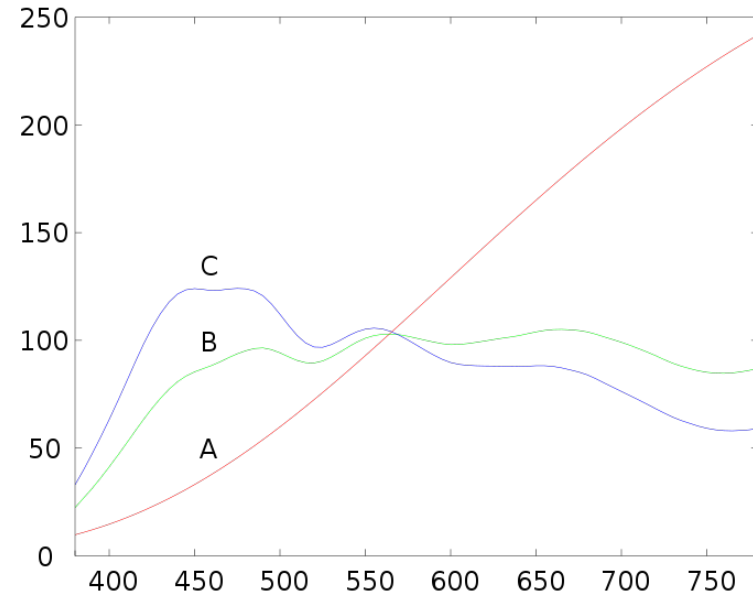
Spektrale Energieverteilung Sonnenlicht



- Sonnenlicht auf Erdoberfläche
- bei Sonnenstand 30° über Horizont

Energieverteilung einer Lichtquelle

- Energieverteilung über den sichtbaren Spektralbereich
- Unterschiedliche Lichtquellen mit unterschiedlichen Verteilungen
 - Tageslicht, Abendsonne
 - Glühbirne, Neonröhre
- Normlicht CIE D65
 - Definiert relative spektrale Energieverteilung 300-830 nm
 - Farbtemperatur 6504 K
 - Tageslicht bei klarem Himmel zur Mittagszeit



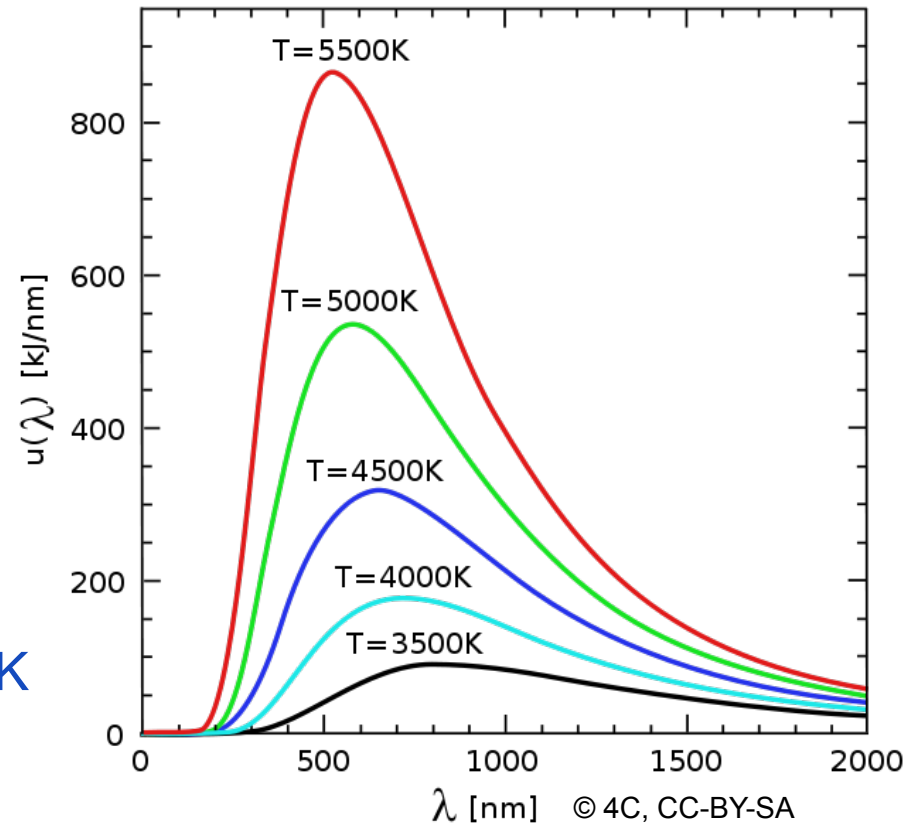
| Normlichtart | Farbtemperatur | Anmerkung |
|--------------|----------------|-----------------------------------|
| A | 2856 K | Wolfram-Glühlampe |
| B | 4874 K | Glühlampe mit Kupfersulfat-Küvett |
| C | 6774 K | mittleres Tageslicht |

CIE = Commission internationale de l'éclairage

Schwarzer Körper (Schwarzer Strahler)

- Schwarzer Körper: Ideale thermische Strahlungsquelle

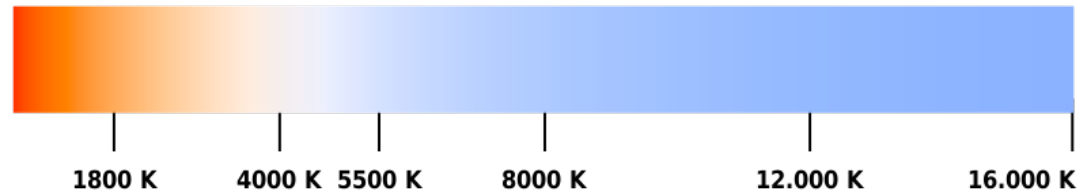
- absorbiert jede elektromagnetische Strahlung vollständig
- sendet elektromagnetische Strahlung mit von Temperatur abhängigem Spektrum
- Strahlungsspektrum bei 5500 K entspricht (ungefähr) dem Spektrum des Tageslichts
- Zusammenhang zwischen Temperatur und Wellenlänge:
 $\lambda_{\max} * T = \text{const} = 0,0029$ (Wiensches Verschiebungsgesetz)



anschauliche Erklärung: www.filmscanner.info/Farbtemperatur.html

Farbtemperatur

- Farbtemperatur einer Lichtquelle: Temperatur eines schwarzen Körpers dessen Licht den gleichen Farbeindruck hervorruft wie die Lichtquelle



- Glühlampe, 2800 K
 - Strahlungsmaximum im nahen Infrarot-Bereich
 - Farbeindruck: gelblich
- Mittleres Sonnenlicht, 5500 K
 - Tageslicht
- Bedeckter Himmel, 6500-7500 K
 - Strahlungsmaximum im sichtbaren Bereich
 - Farbeindruck: bläulich

Farbtemperatur in der Fotografie

- Farbtemperatur beschreibt Lichtsituation

- Tageslichtfilme

- korrekte Farbwiedergabe bei 5500 K

- Kunstlichtfilme

- korrekte Farbwiedergabe bei 3100-3400 K

- Digitalkameras

- Weißabgleich



aufgenommen bei Tageslicht, Kameraeinstellung wie angegeben

- chromatische Adaption: kontinuierlicher „Weißabgleich“ beim visuellen System des Menschen

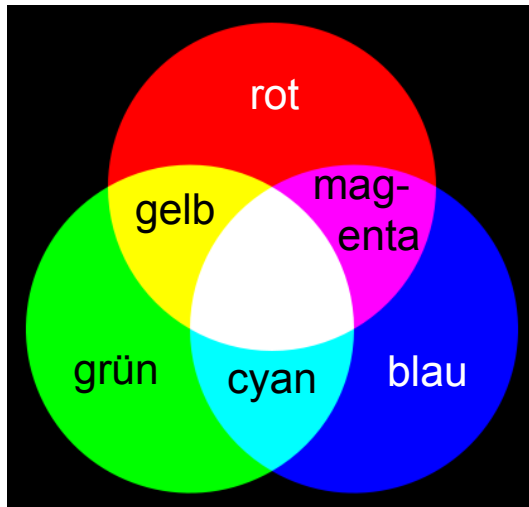
- Beurteilung von Bildern unter definierter Beleuchtung

- Normlicht CIE D65, 6504 K

Additive vs. subtraktive Farbmischung

Additive Farbmischung

- Grundfarben: Rot, Grün, Blau

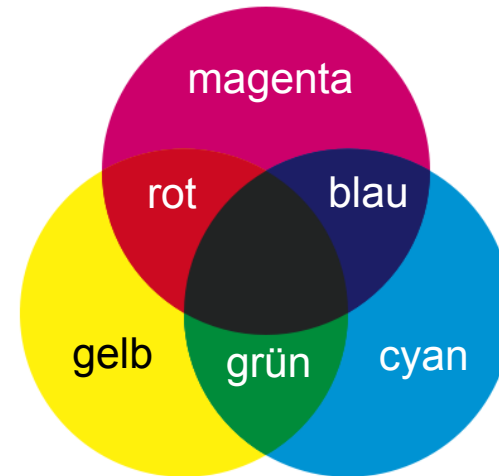


© Quark67, BY-CC-SA

- Physiologische Farbmischung
- Mischung von „Farblichtern“

Subtraktive Farbmischung

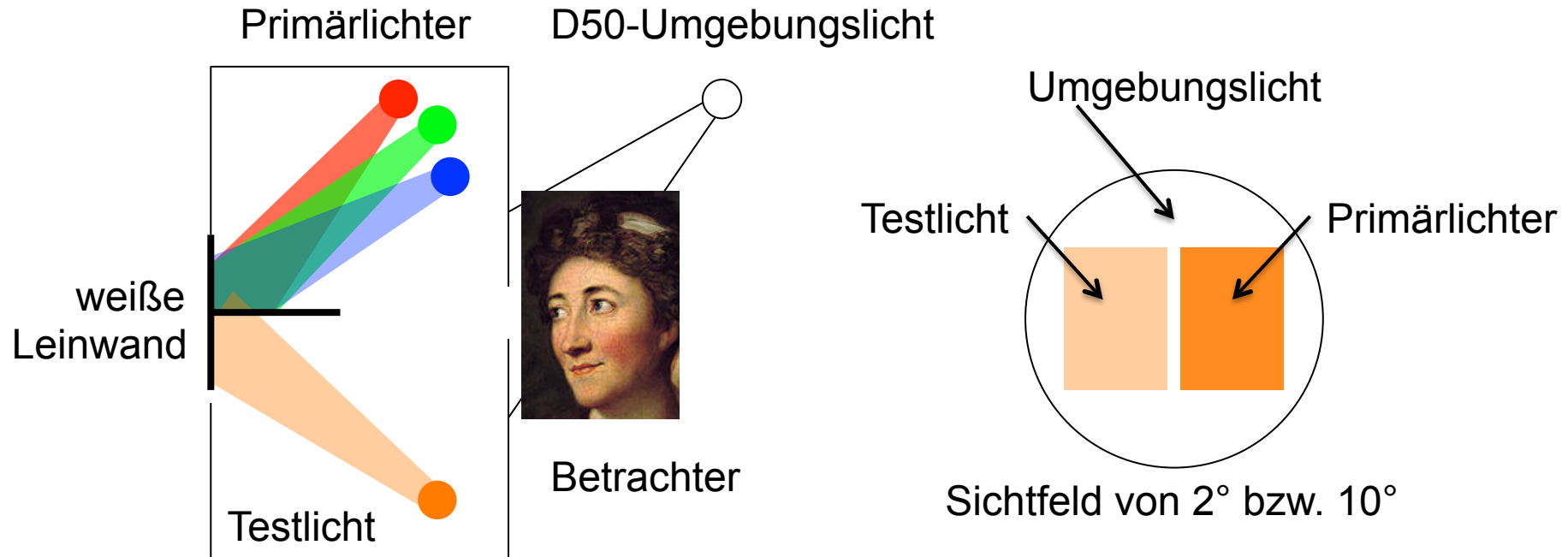
- Grundfarben: Magenta, Gelb, Cyan



© Quark67, BY-CC-SA

- Physikalische Farbmischung
- Absorption bei Reflexion an Oberfläche oder Transmission durch Filter

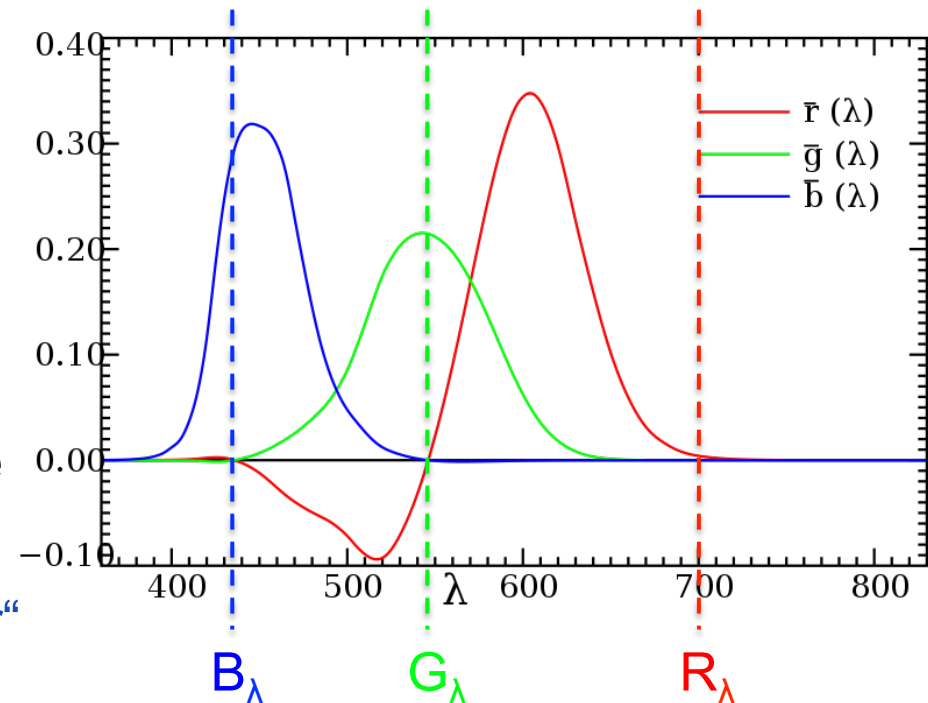
Experiment zum Farbabgleich



- monochromatisches Testlicht hat Wellenlänge λ
- Beobachter ändert Intensitäten der Primärlichter, bis Mischung identisch zu Testlicht
- Applet zum Farbabgleich:
<http://graphics.stanford.edu/courses/cs178/applets/colormatching.html>

CIE 1931 RGB Color Matching Functions

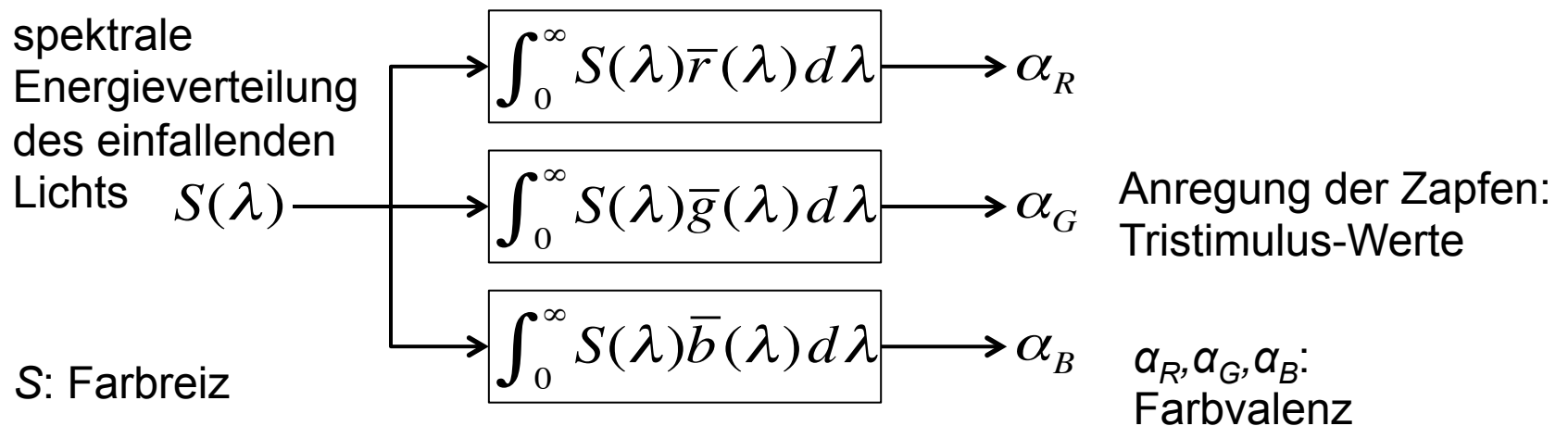
- monochrome Primärfarben
 - R_λ : 700 nm (rot)
 - G_λ : 546.1 nm (grün)
 - B_λ : 435.8 nm (blau)
 - skaliert: $R_\lambda + G_\lambda + B_\lambda$ weiß
- Kurven: Durchschnittswerte
 - $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$
 - „CIE-Durchschnittsbetrachter“
 - <0 : Änderung des Testlichts
- RGB Tristimulus-Werte für ein Licht mit der Energieverteilung $I(\lambda)$:



$$R = \int_0^{\infty} I(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda \quad G = \int_0^{\infty} I(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda \quad B = \int_0^{\infty} I(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda$$

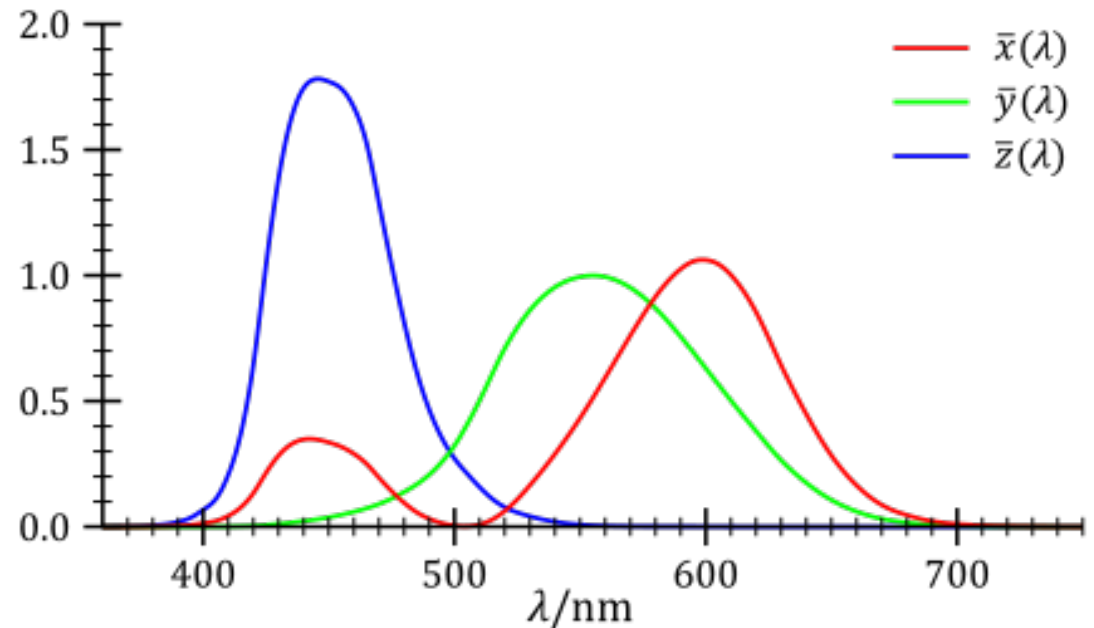
Metamerie und Tristimulus-Werte

- Metamerie: zwei Lichtquellen (Farbreize) unterschiedlicher spektraler Verteilungen können den gleichen Farbeindruck (Farbvalenz) hervorrufen (metamere Farben)
- zwei Lichtquellen, die den gleichen Farbeindruck hervorrufen, haben die gleichen Tristimulus-Werte
- Tristimulus-Werte: Aktivierungsstärke der Rezeptoren



CIE 1931 XYZ Color Matching Functions

- Eigenschaften
 - Funktionswerte ≥ 0
 - $X = Y = Z$ ist weiß
 - $Y(\lambda) = V(\lambda)$, Hell-empfindlichkeitskurve



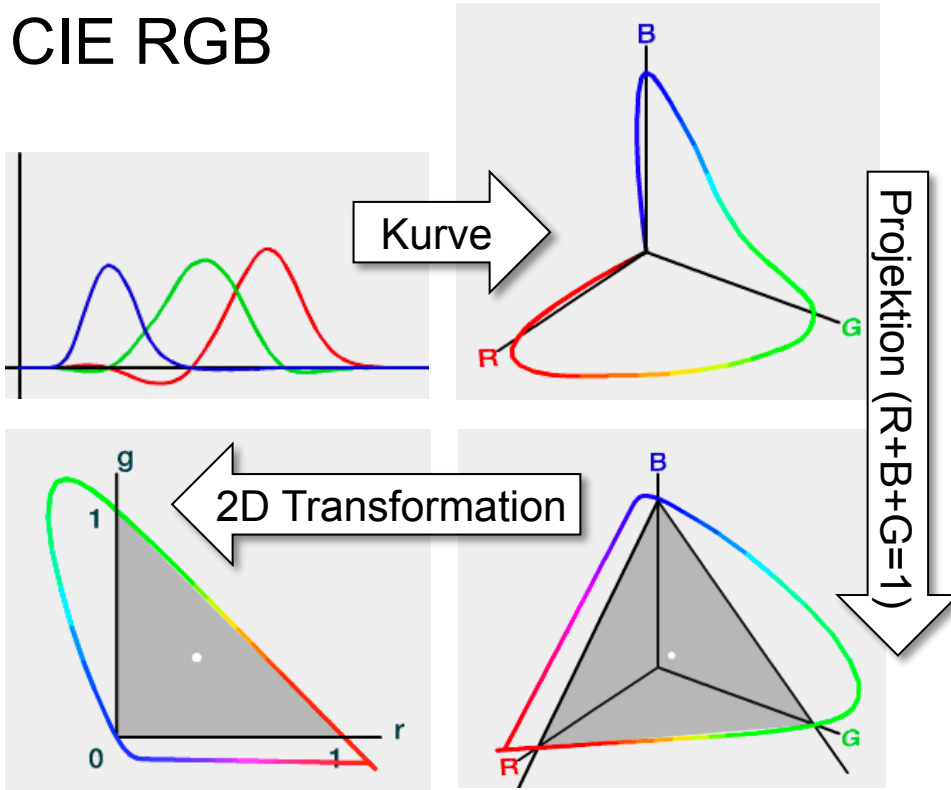
- Virtuelle Primärfarben X,Y,Z

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \frac{1}{.177} \begin{pmatrix} .490 & .310 & .200 \\ .177 & .812 & .011 \\ .000 & .010 & .990 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_\lambda \\ G_\lambda \\ B_\lambda \end{pmatrix}$$

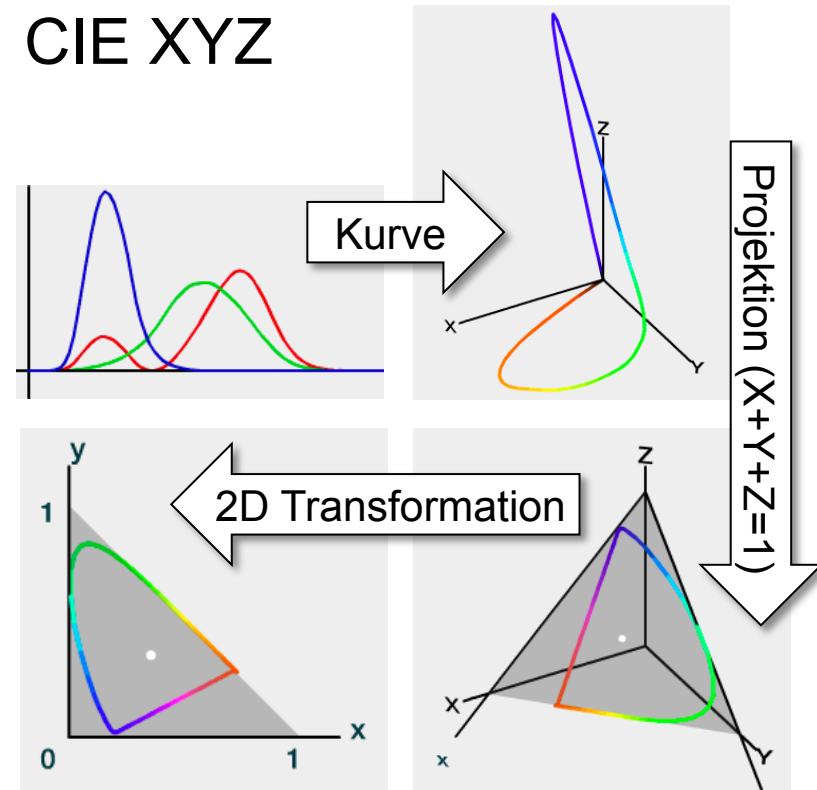
Applet: <http://graphics.stanford.edu/courses/cs178/applets/locus.html>

CIE RGB- und XYZ-Farbräume

CIE RGB

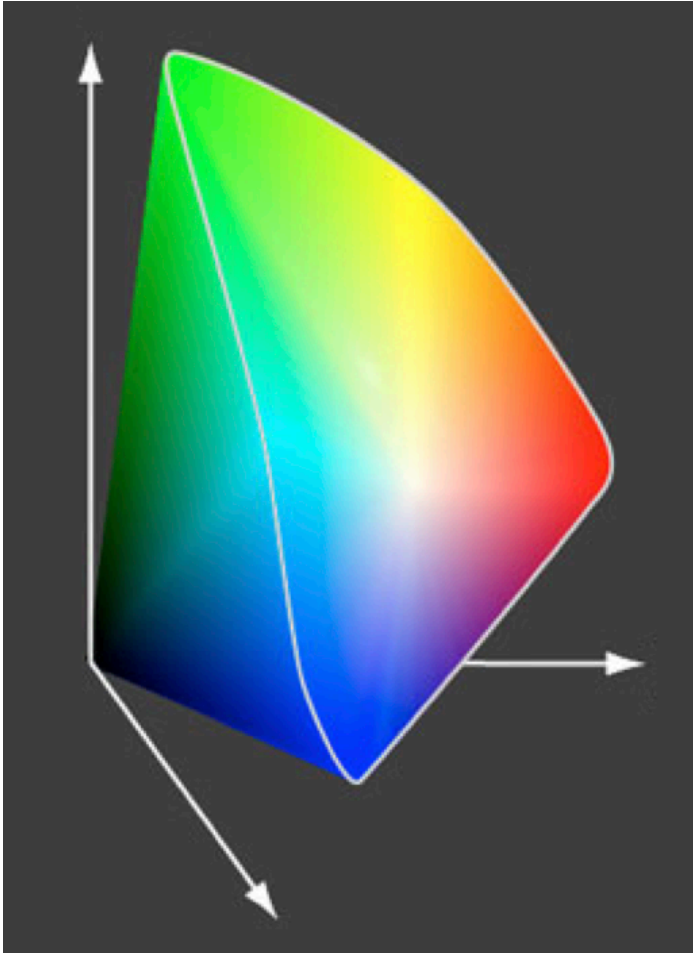


CIE XYZ



Screenshots from Applet: <http://graphics.stanford.edu/courses/cs178/applets/threedgamut.html>

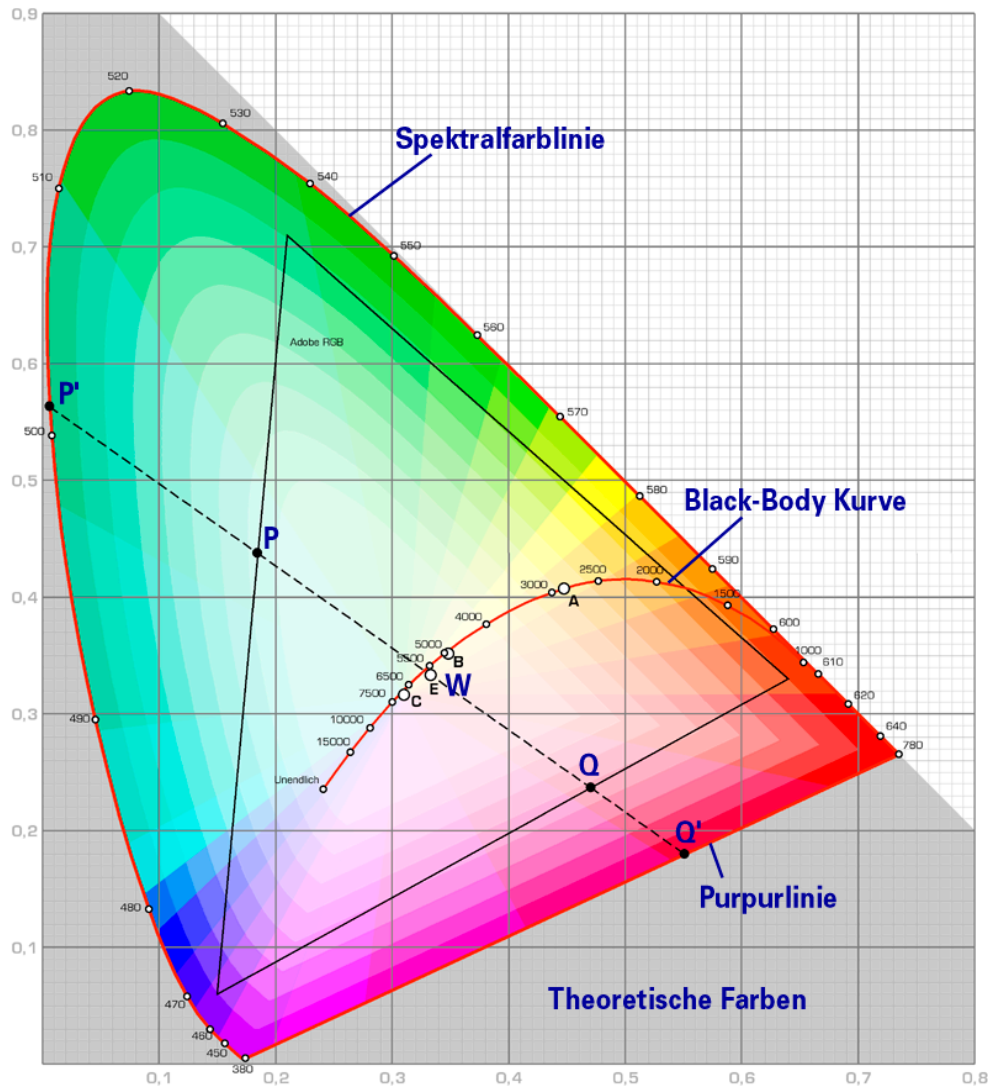
CIE XYZ-Farbraum



- Schwarz im Ursprung
- Helligkeit = Distanz zum Ursprung
- Spektralfarben entlang der weißen Linie
- weniger gesättigte Farben im Inneren

- Projektion auf Ebene $X + Y + Z = 1$ um Helligkeit nicht zu berücksichtigen

Projektion auf eine Ebene

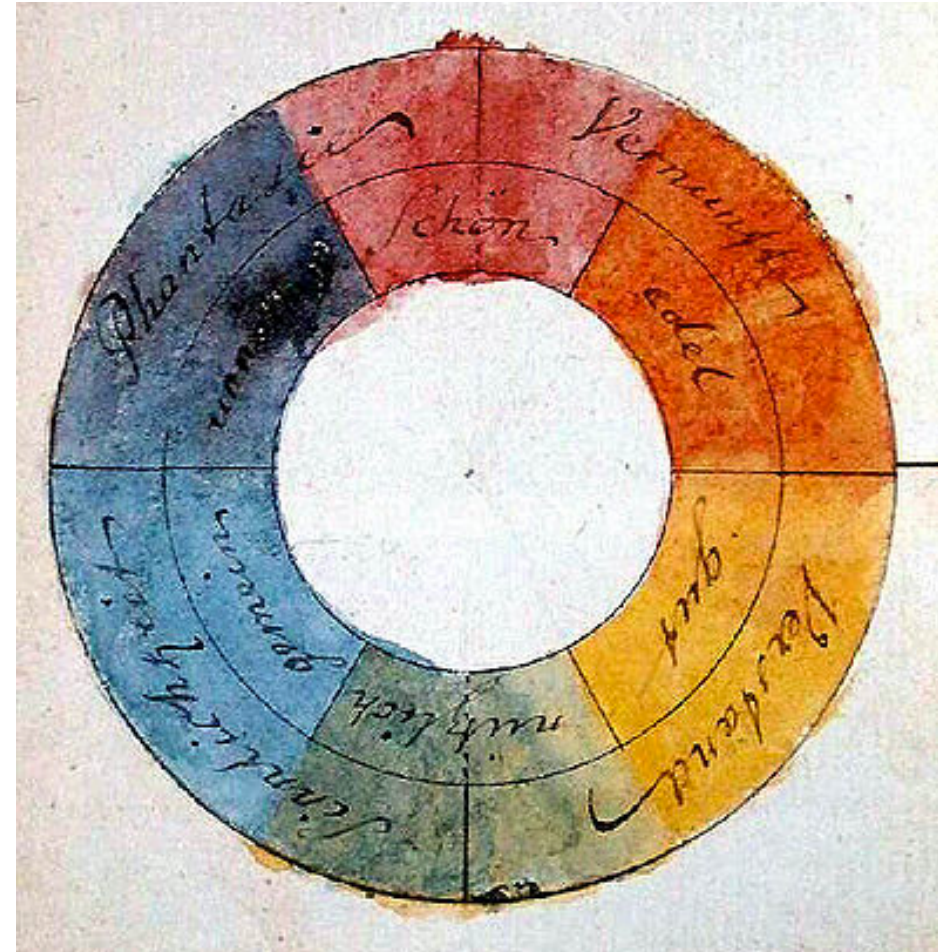


- CIE Chromatizitäts-Diagramm
Gamut der Farbwahrnehmung des Menschen
- Projektion auf Ebene $X + Y + Z = 1$ um Helligkeit nicht zu berücksichtigen
- $x = X / (X + Y + Z)$
- $y = Y / (X + Y + Z)$
- $z = Z / (X + Y + Z) = 1 - x - y$

Farbenkreis nach Goethe

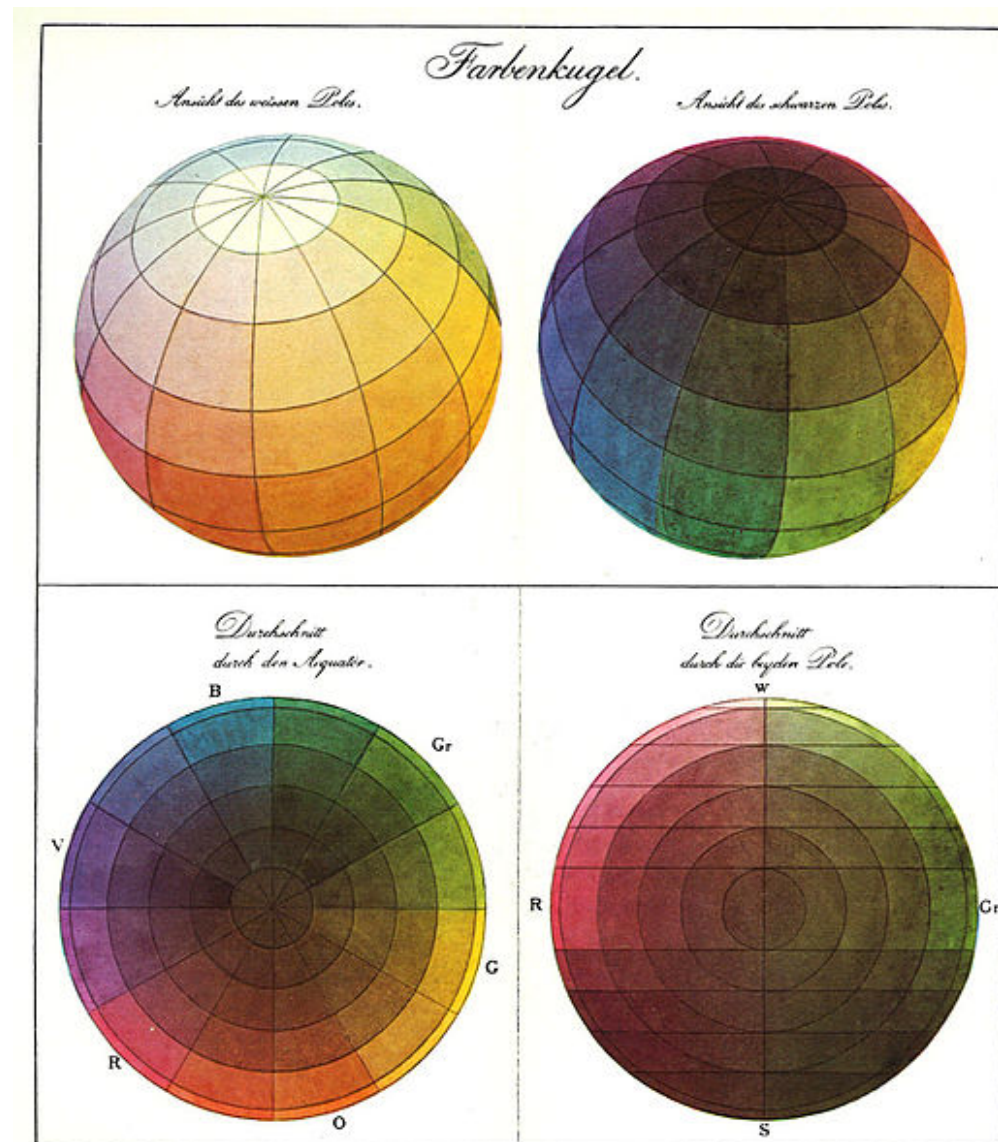


- Farbenkreis (1809, rechts) symbolisiert menschliches Geistes- und Seelenleben
 - Zuordnung von Farben zu Verstand, Sinnlichkeit, Phantasie, Vernunft
- Goethes Farbenlehre wissenschaftlich nicht haltbar
- Großer Einfluss auf zeitgenössische Maler
 - z.B. Philipp Otto Runge



Farbenkugel nach Philipp Otto Runge

- Schrift zur Farbenkugel (1810)
- erstes dreidimensionales Farbsystem



Farbenlehre in der Kunst

- Farbkreis nach Johannes Itten (1961)
 - Lehrer am Bauhaus in Weimar
 - Untersuchungen zur Wirkung von Farben
 - Primärfarben: rot, gelb, blau
 - Sekundärfarben: grün, orange, violett



Farbenlehre in der Kunst

- Farbsystem nach A. H. Munsell

- Ziel: Farbsystem, das Farbzusammenstellung und Farbkennzeichnung erleichtert

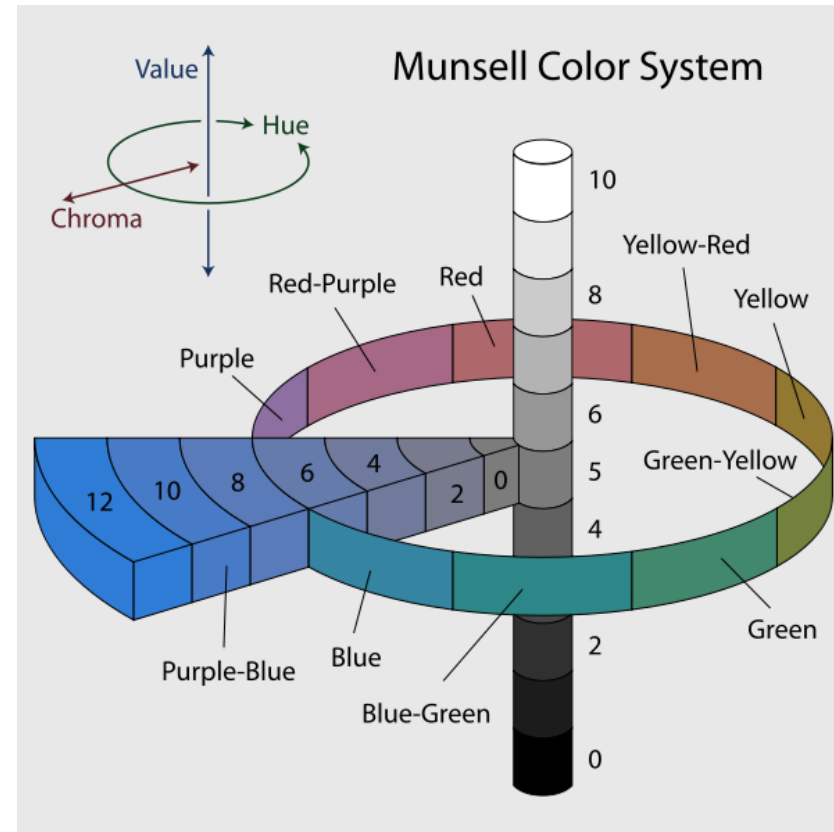
- separiert

- Farbton, Sättigung, Helligkeit

- Farbkennzeichnung

- e.g. 5PB 5/10:
- mittleres purple-blue (5PB)
- mittlere Helligkeit (5 von 10)
- maximale Sättigung (10 von 10)

- Farbkatalog



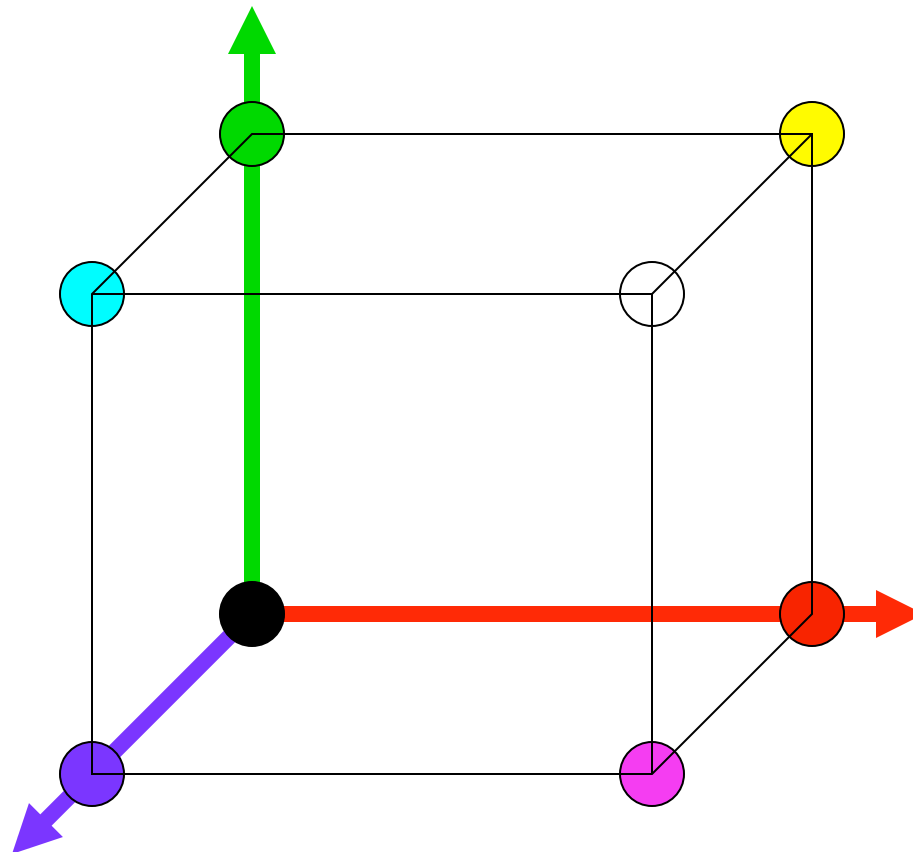
© Jacob Rus, BY-CC-SA

Circle of hues at value 5 chroma 6

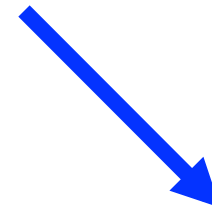
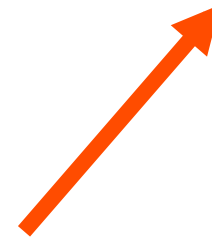
Neutral values from 0 to 10

Chromas of purple-blue (5PB) at value 5

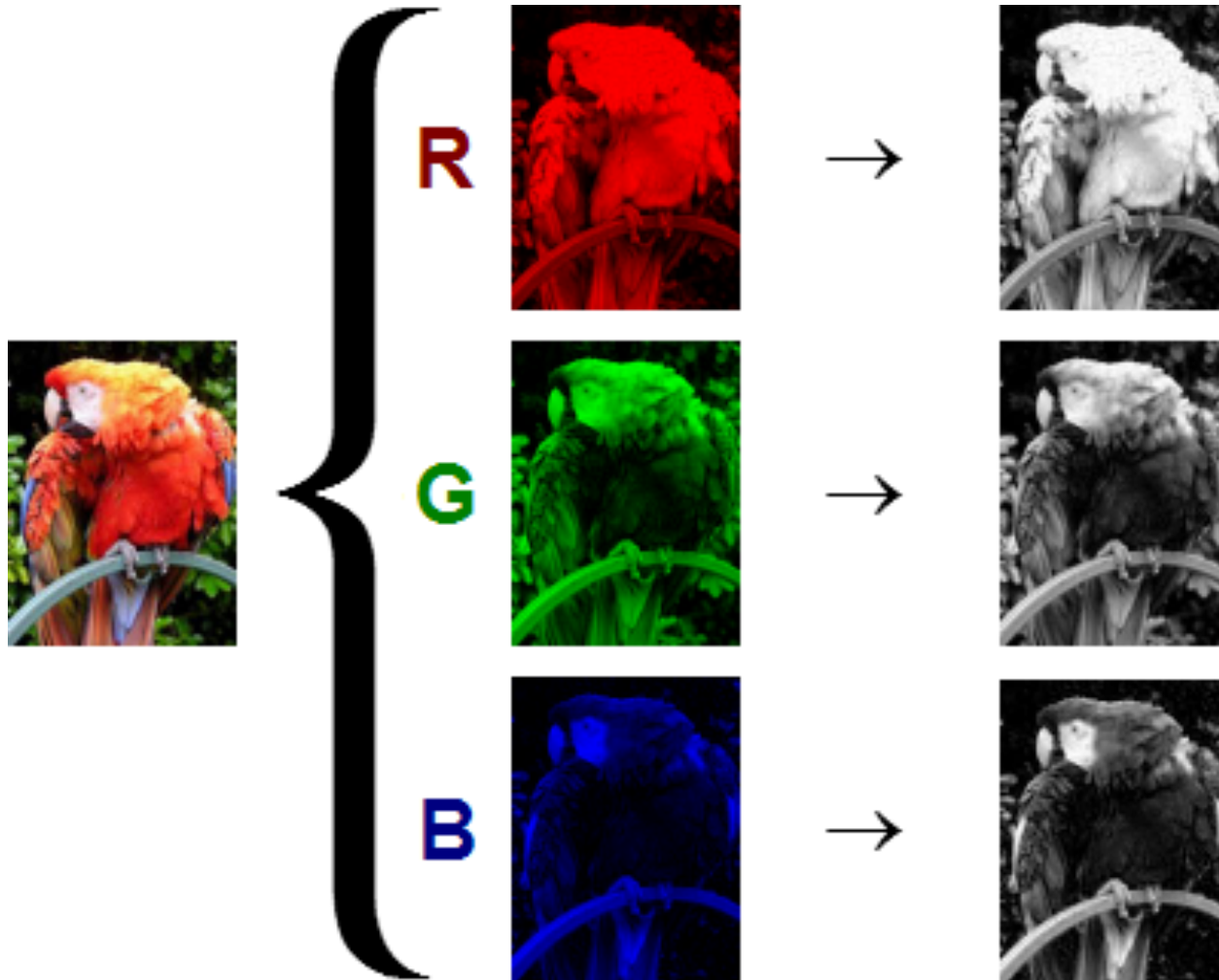
RGB Farbmodell



RGB Farbkanäle



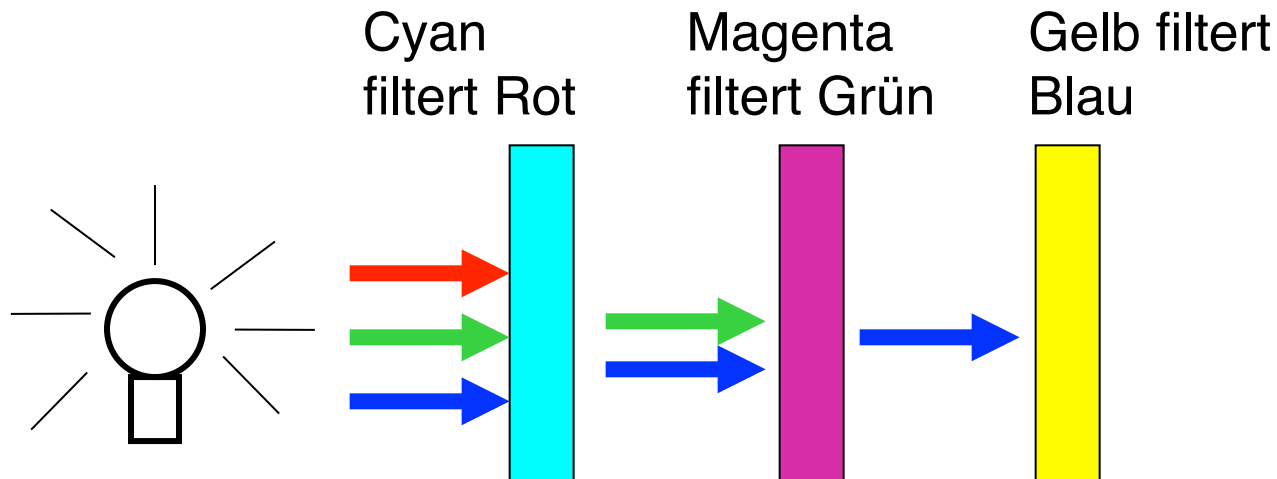
RGB Farbkanäle



Ricardo Cancho Niemietz, public domain

Subtraktive Farbmischung

- Farbfilter absorbieren Teile des Farbspektrums

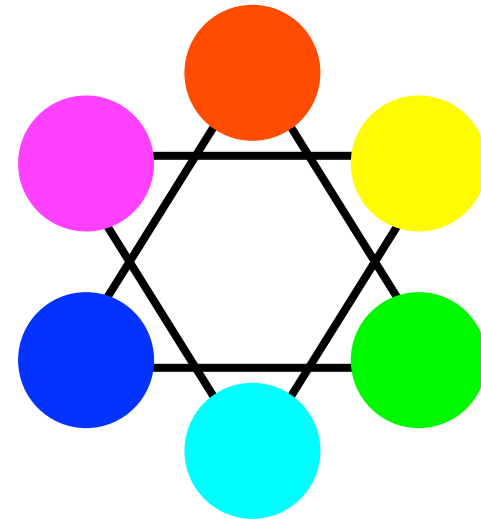


- Lambert-Beersches Gesetz: Verringerung der transmittierten Lichtintensität
 - Doppelte Menge von Pigmenten halbiert Lichtintensität
 - Doppelte Dicke des Materials halbiert Lichtintensität
 - Absorption hintereinander liegender Filter ist additiv

Umrechnung RGB – CMY

$$\begin{pmatrix} \textit{red} \\ \textit{green} \\ \textit{blue} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_{\max} \\ w_{\max} \\ w_{\max} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \textit{cyan} \\ \textit{magenta} \\ \textit{yellow} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \textit{cyan} \\ \textit{magenta} \\ \textit{yellow} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_{\max} \\ w_{\max} \\ w_{\max} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \textit{red} \\ \textit{green} \\ \textit{blue} \end{pmatrix}$$



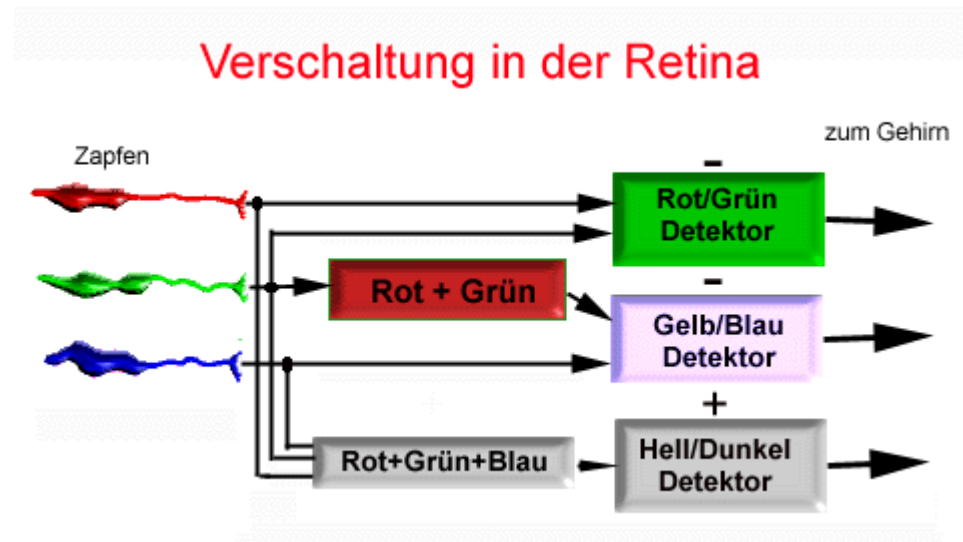
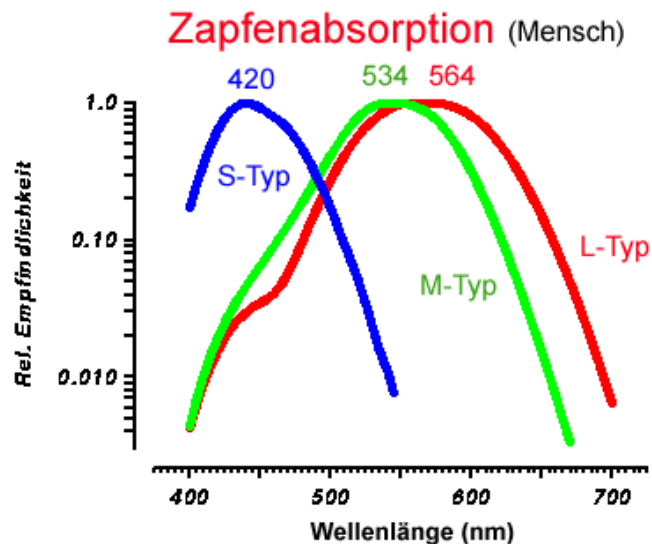
- Beispiel (8 bit/Kanal, $w_{\max} = 255$):
(255r,0g,0b) = (0c,255m,255y)

Umwandlung RGB → Graustufen

$$grey = 0,3red + 0,59green + 0,11blue$$



- Naiver Ansatz: $g = (r+g+b) / 3$ führt zu falschen Helligkeiten (bzgl. unserer Wahrnehmung)
- Farbrezeptoren im Auge: 1:20:40



Umwandlung RGB → Graustufen

$$g = (r + g + b) / 3$$



$$g = 0.30 r + 0.59 g + 0.11 b$$



Umrechnung RGB \rightarrow YUV

$$y = 0.299r + 0.587g + 0.144b$$

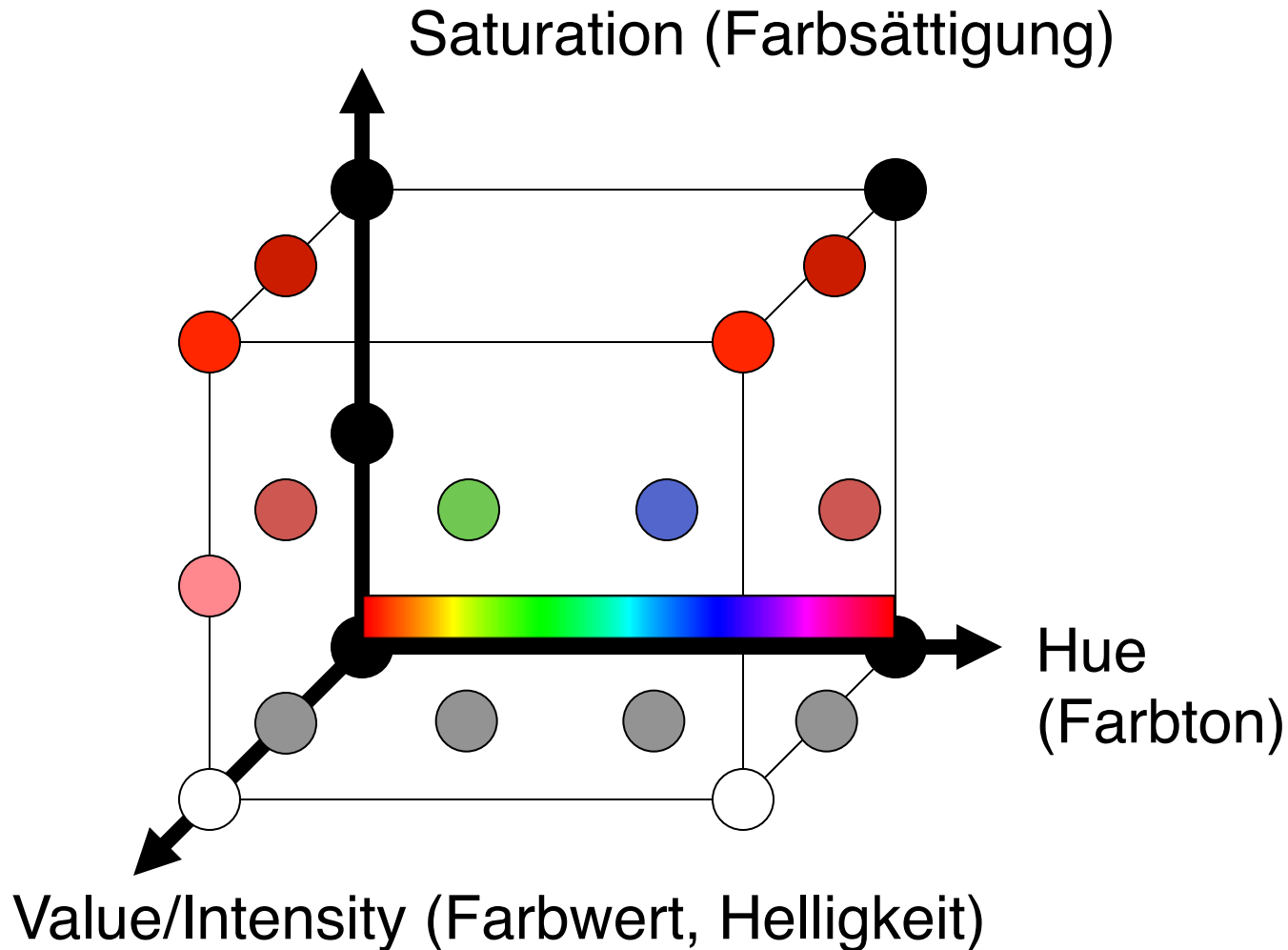
$$u = 0.493(b - y)$$

$$v = 0.877(r - y)$$

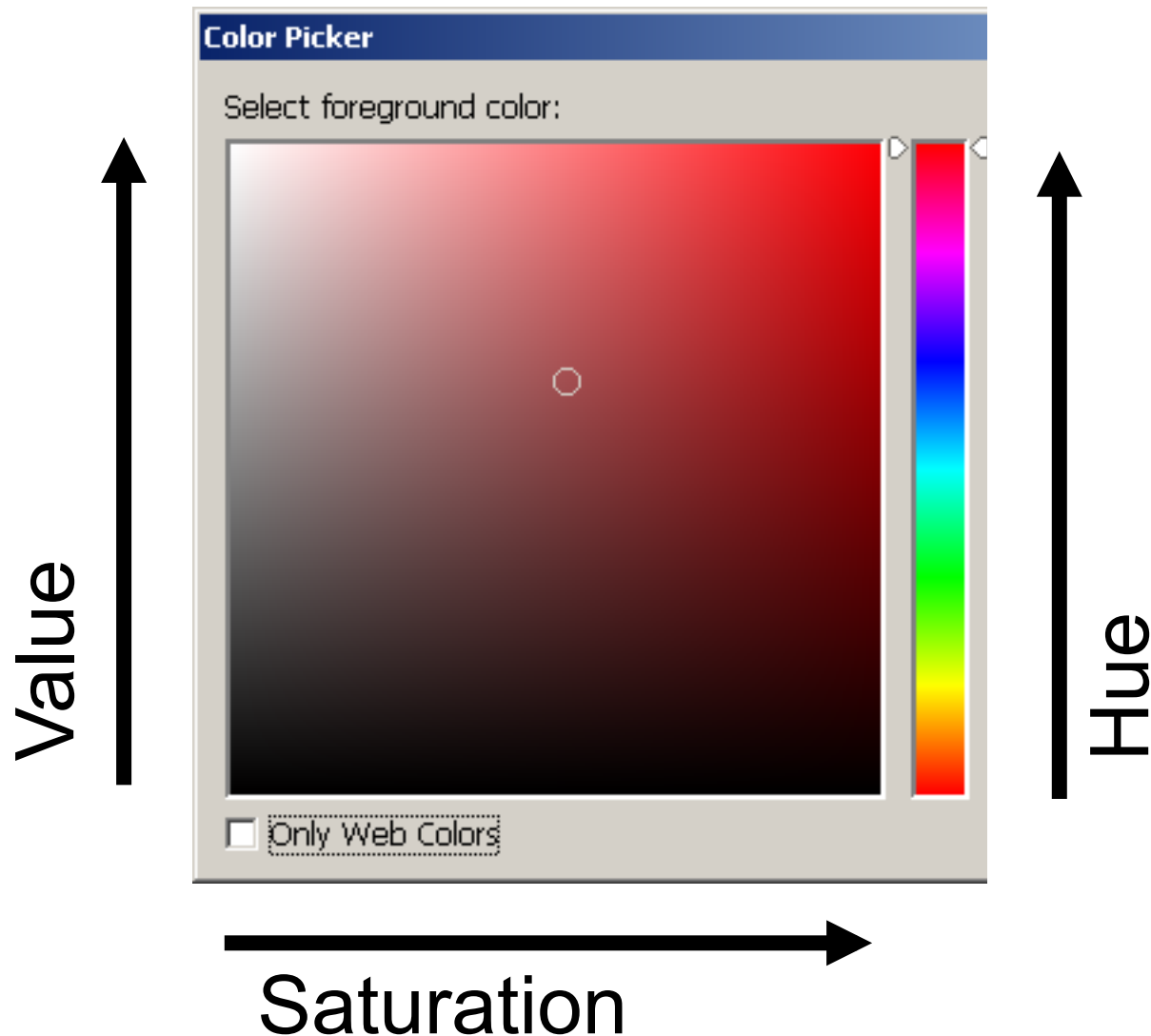
- Y = Luminanz (Helligkeit), U,V = Chrominanz (Farbanteile)
- JPEG verw. YUV und bewahrt mehr Detail in Y als in U,V
- Y alleine = Graustufenbild (\rightarrow S/W Fernseher)
- Verwendung in PAL Fernsehnorm:

$$\begin{pmatrix} y \\ u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,256788 & 0,504129 & 0,097906 \\ -0,148223 & -0,290993 & 0,439216 \\ 0,439216 & -0,367788 & -0,071427 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix}$$

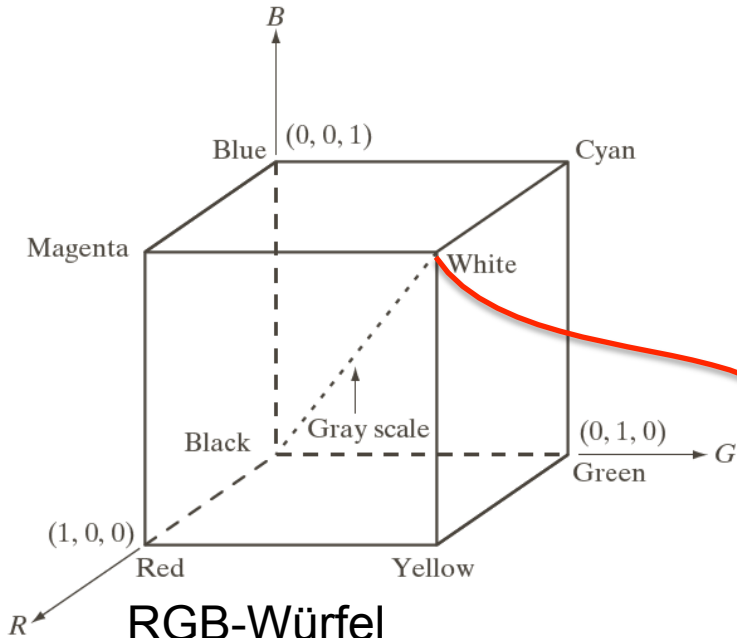
HSV (auch: HSI) Farbmodell



HSV Farbraum, andere Darstellung

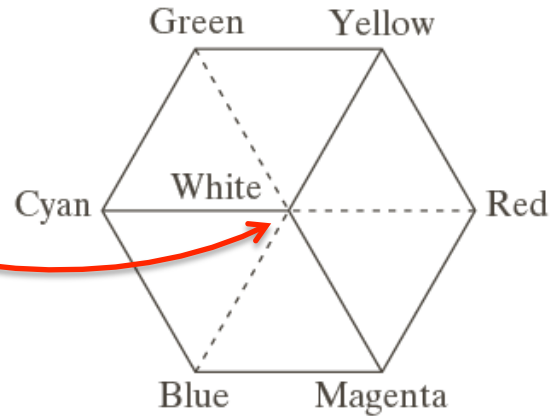


Beziehung zwischen RGB und HSV

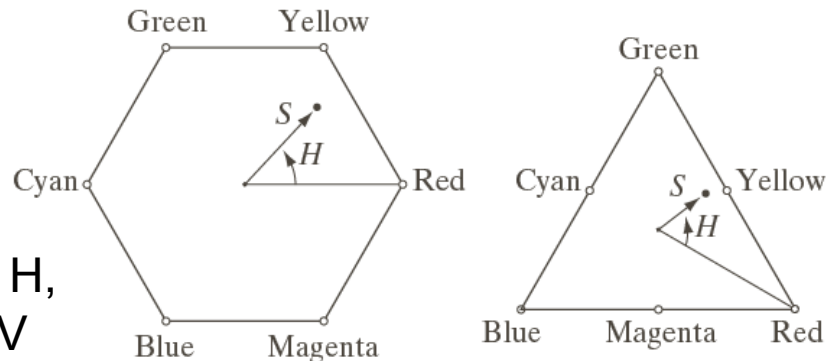


RGB-Würfel
Grauwert-Achse
diagonal

RGB-Würfel auf die schwarze Ecke gestellt: Grauwert-Achse senkrecht, weiß oben



waagerechter Schnitt in Höhe V:



Farbe in Ebene V
definiert durch: hue H,
saturation S, value V



Abbildungen: © R. C. Gonzalez & R. E. Woods, Digital Image Processing

Struktur des HSV (HSI) Modells

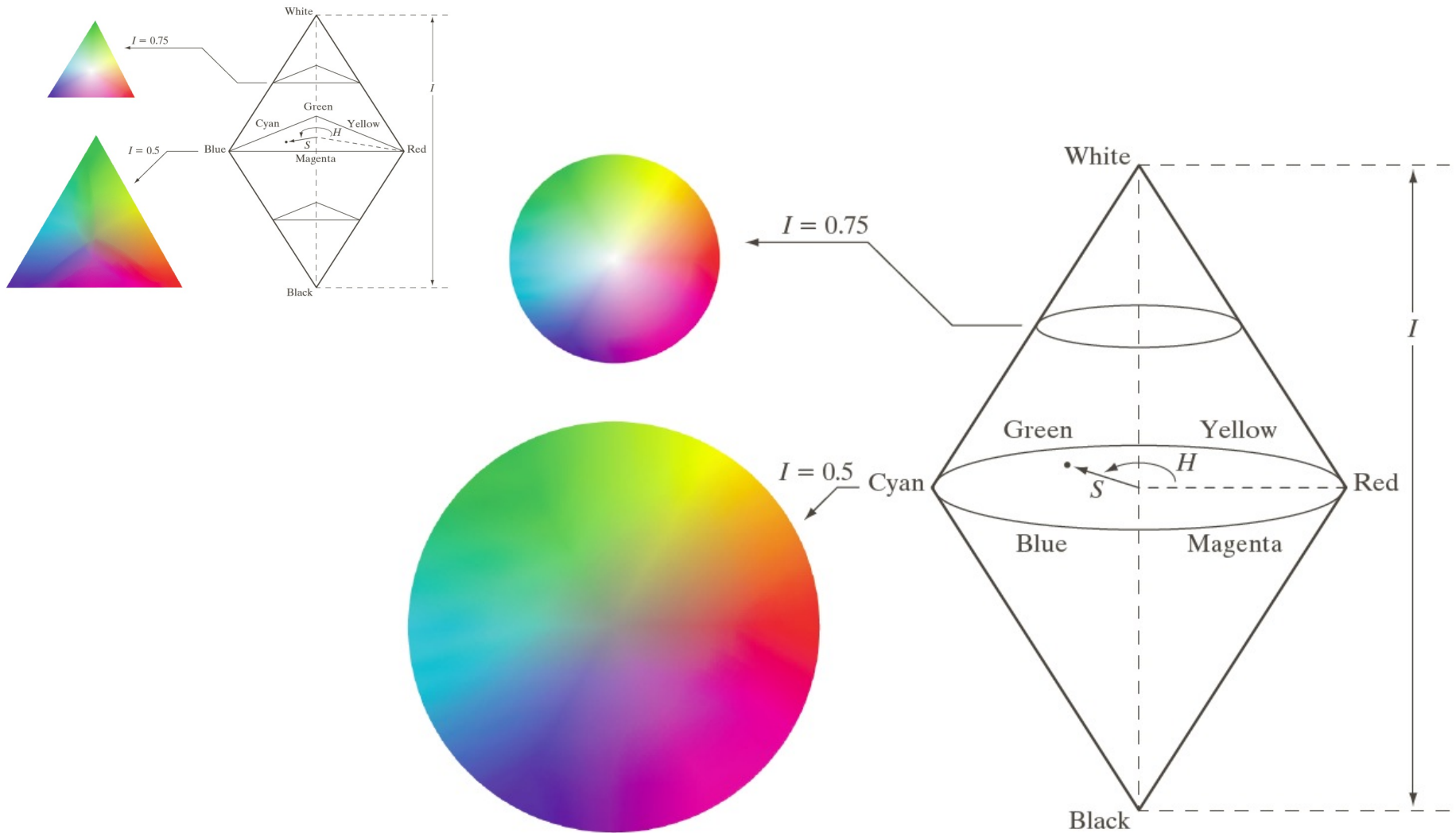


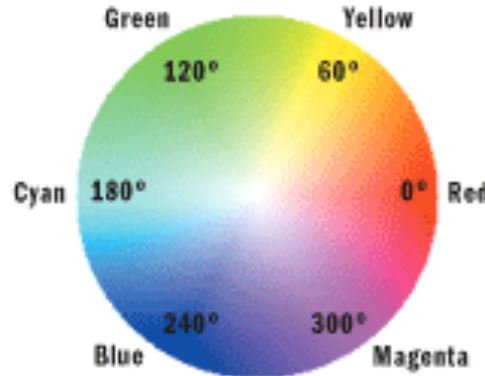
Abbildung: © R. C. Gonzalez & R. E. Woods, Digital Image Processing

Umrechnung RGB \Leftrightarrow HSV (Gonzalez/Woods)

$$h \in [0 \dots 360^\circ]$$

$$s, v \in [0 \dots 1]$$

$$r, g, b \in [0 \dots 1]$$



$$h = \begin{cases} \theta & \text{falls } b \leq g \\ 360 - \theta & \text{sonst} \end{cases}$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\frac{1}{2}(2r - g - b)}{\sqrt{(r - g)^2 + (r - b)(g - b)}} \right)$$

$$s = 1 - \frac{3 \min(r, g, b)}{r + g + b}$$

$$v = \frac{1}{3}(r + g + b)$$

$$0^\circ \leq h < 120^\circ : \begin{cases} b = v(1 - s) \\ r = v \left(1 + \frac{s \cos(h)}{\cos(60^\circ - h)} \right) \\ g = 3v - r - b \end{cases}$$

$$120^\circ \leq h < 240^\circ : \begin{cases} h' = h - 120 \\ r = v(1 - s) \\ g = v \left(1 + \frac{s \cos(h')}{\cos(60^\circ - h')} \right) \\ b = 3v - r - g \end{cases}$$

$$240^\circ \leq h < 360^\circ : \begin{cases} h' = h - 240 \\ g = v(1 - s) \\ b = v \left(1 + \frac{s \cos(h')}{\cos(60^\circ - h')} \right) \\ r = 3v - g - b \end{cases}$$

Umrechnung RGB → HSV (Foley/van Dam)

$$\max = \max(r, g, b)$$

$$\min = \min(r, g, b)$$

$$h = \begin{cases} 0^\circ, & \text{falls } \max = \min \\ 60^\circ \cdot \left(0 + \frac{g - b}{\max - \min}\right), & \text{falls } \max = r \\ 60^\circ \cdot \left(2 + \frac{b - r}{\max - \min}\right), & \text{falls } \max = g \\ 60^\circ \cdot \left(4 + \frac{r - g}{\max - \min}\right), & \text{falls } \max = b \end{cases}$$

falls $h < 0$ dann $h = h + 360^\circ$

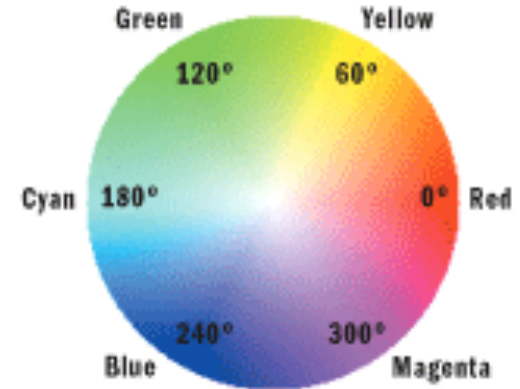
$$s = \begin{cases} 0, & \text{falls } \max = \min \\ \frac{\max - \min}{\max}, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$v = \max$$

$$h \in [0 \dots 360^\circ]$$

$$s, v \in [0 \dots 1]$$

$$r, g, b \in [0 \dots 1]$$

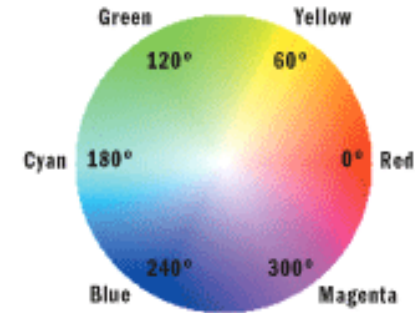


Umrechnung HSV \rightarrow RGB (Foley/van Dam)

$$h \in [0 \dots 360^\circ]$$

$$s, v \in [0 \dots 1]$$

$$r, g, b \in [0 \dots 1]$$



$$h_i := \left\lfloor \frac{H}{60^\circ} \right\rfloor; \quad f := \left(\frac{H}{60^\circ} - h_i \right)$$

$$p := V \cdot (1 - S); \quad q := V \cdot (1 - S \cdot f); \quad t := V \cdot (1 - S \cdot (1 - f))$$

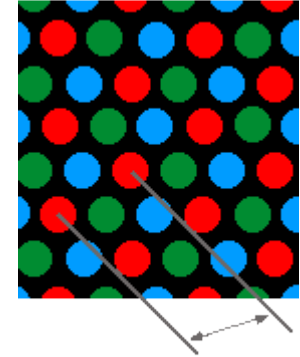
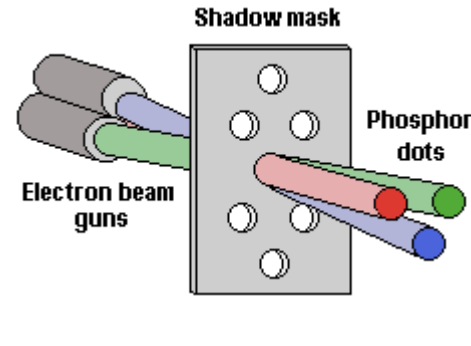
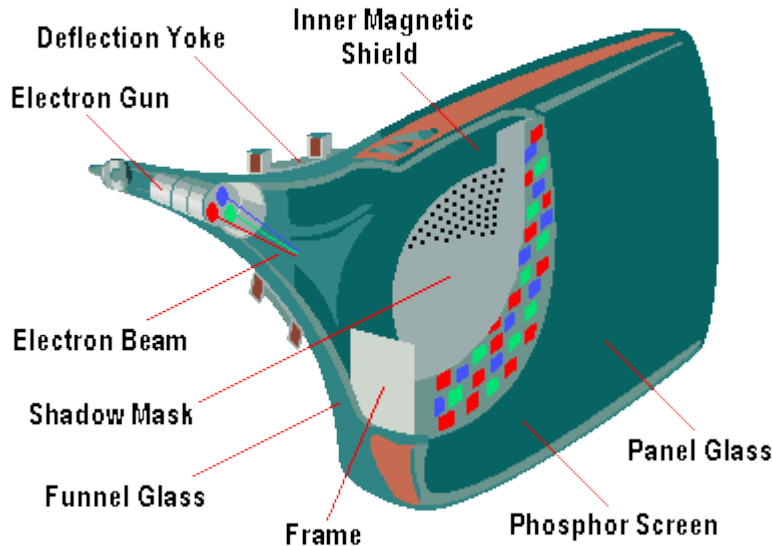
$$(R, G, B) := \begin{cases} (V, t, p), & \text{falls } h_i \in \{0, 6\} \\ (q, V, p), & \text{falls } h_i = 1 \\ (p, V, t), & \text{falls } h_i = 2 \\ (p, q, V), & \text{falls } h_i = 3 \\ (t, p, V), & \text{falls } h_i = 4 \\ (V, p, q), & \text{falls } h_i = 5 \end{cases}$$

AUSGABE VON BILDERN

Farbdarstellung

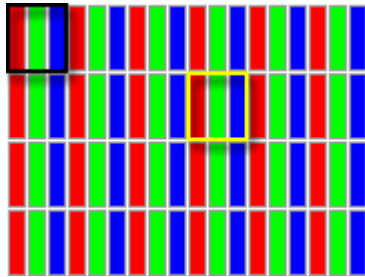
- Durch additive Mischung
 - CRT, LCD Monitore
 - CRT, LCD, DLP Beamer
- Durch subtraktive Mischung
 - Tintenstrahldrucker
 - Fotografischer Film

Röhrenmonitore (Quelle: [pctechguide](#))

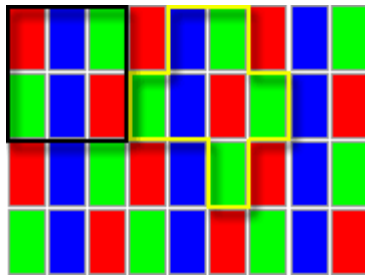


- Rote, grüne, blaue Phosphorpunkte
- Werden durch Lochmaske mit Elektronen beschossen und leuchten dadurch auf
- Je 3 Punkte = 1 Pixel

TFT Monitore



- 1 RGB Pixel = 3 oder mehr Punkte in R, G und B
- Verschiedene Anordnungen
- Verschiedene Ansteuerungen

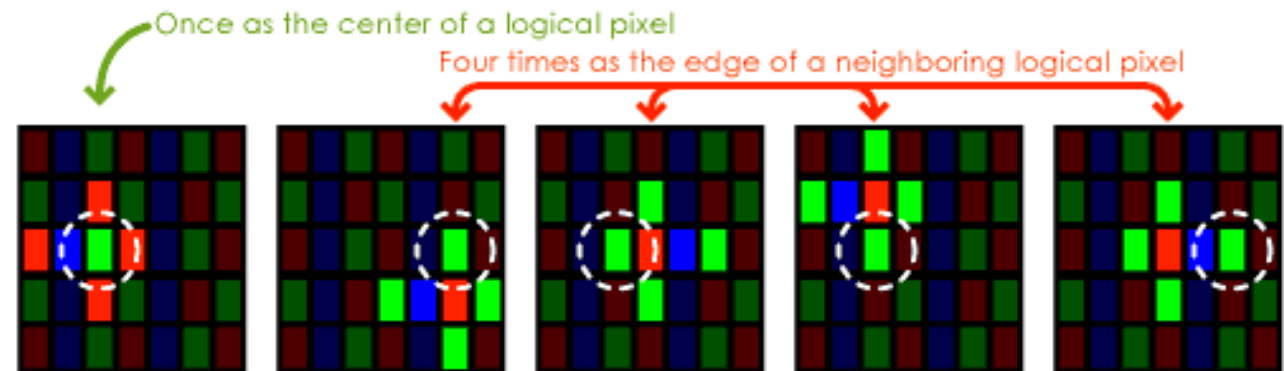


Quelle: [Samsung](#)



Each red and green subpixel is used five times...

Quelle: [Pentile](#)

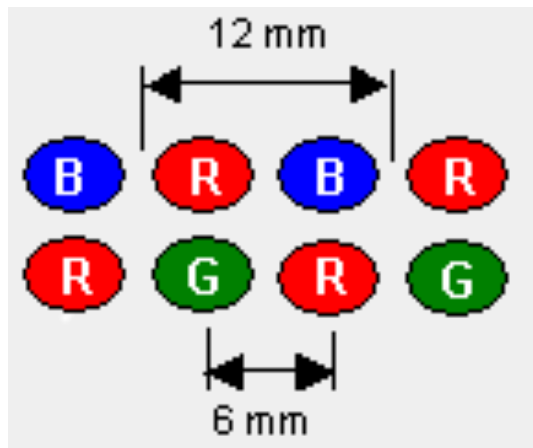
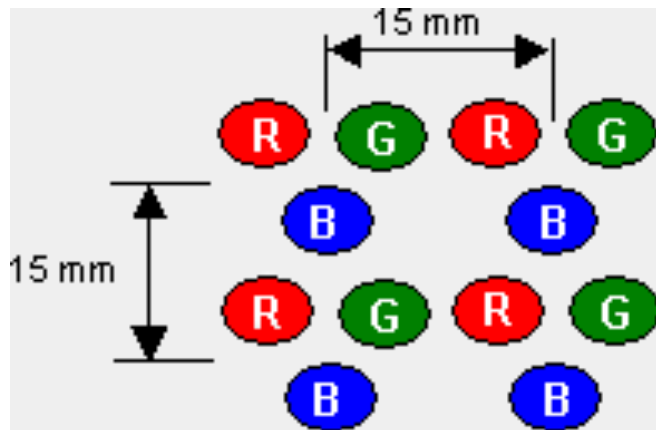


The 5 logical pixels (circled) in which a green subpixel participates

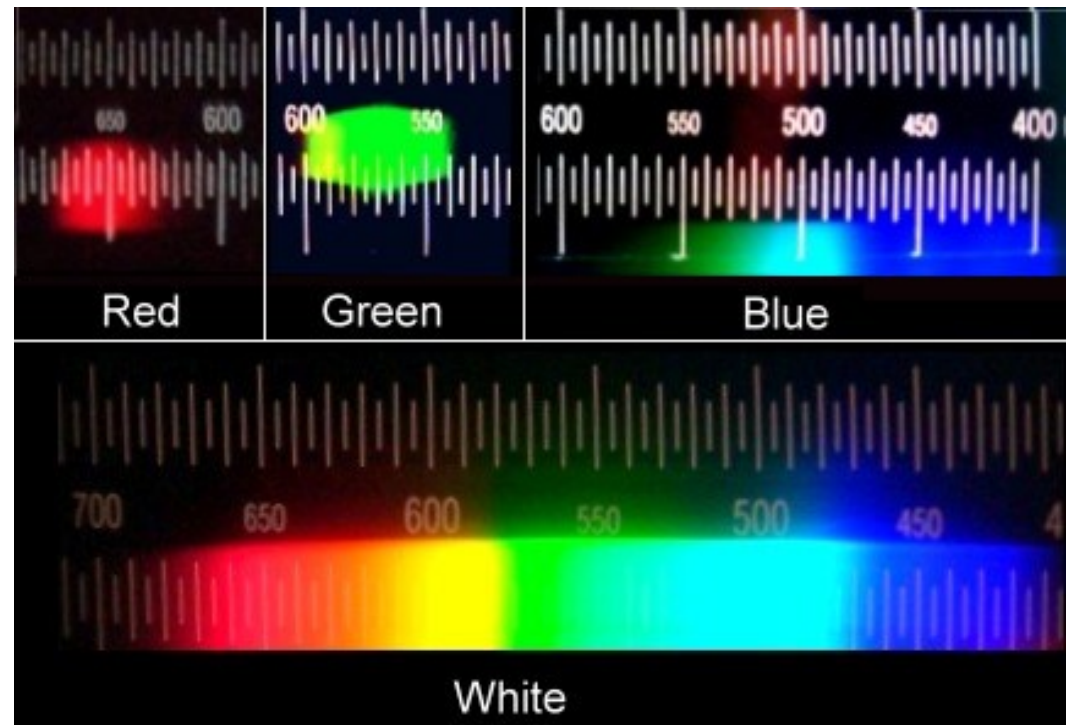
...hence a PenTile Matrix 

LED arrays (Quelle: [Mitsubishi](#))

- Dots = R,G,B LEDs
- 1 Pixel \geq 3 Dots

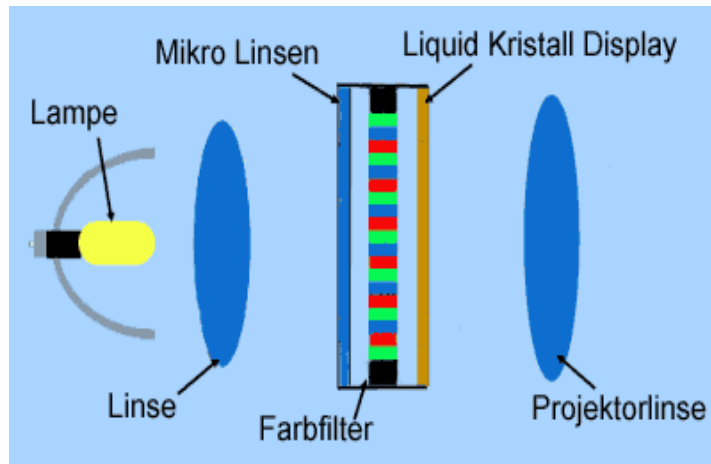


LED Farbspektren

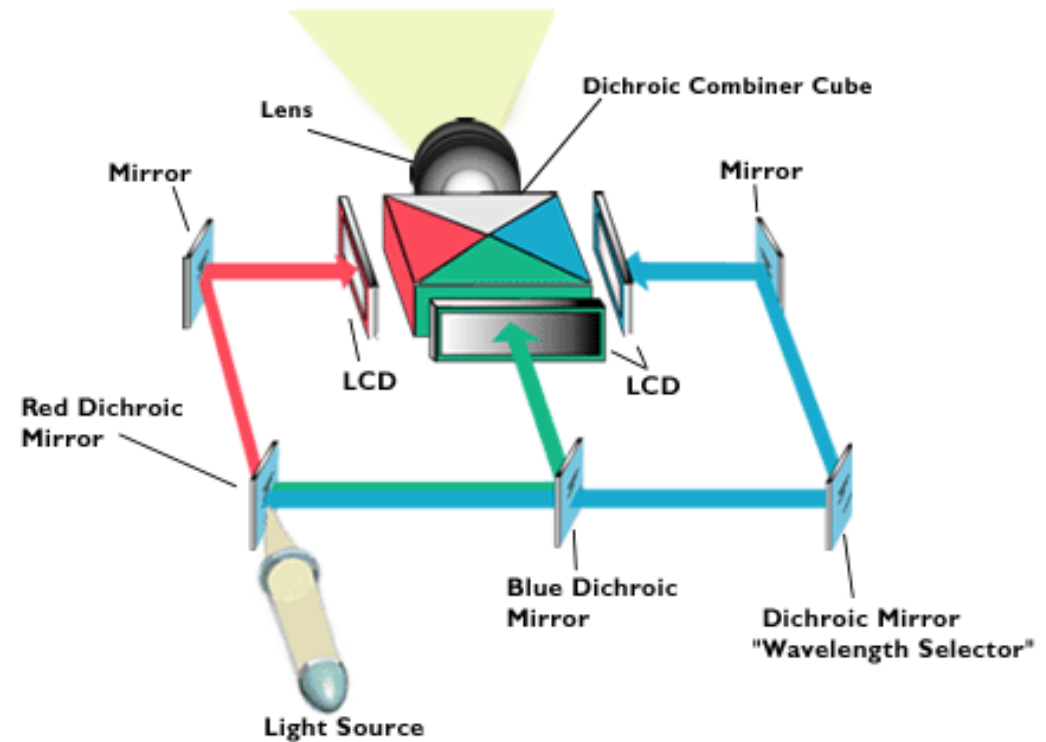


© Anton (rp), BY-CC-SA

LCD Projektor

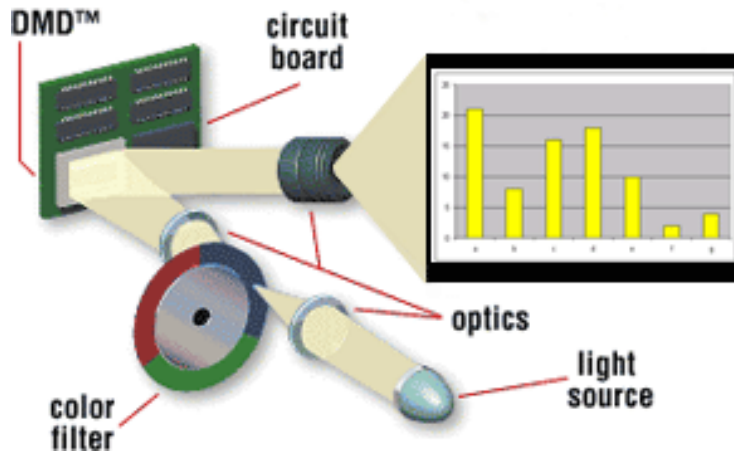
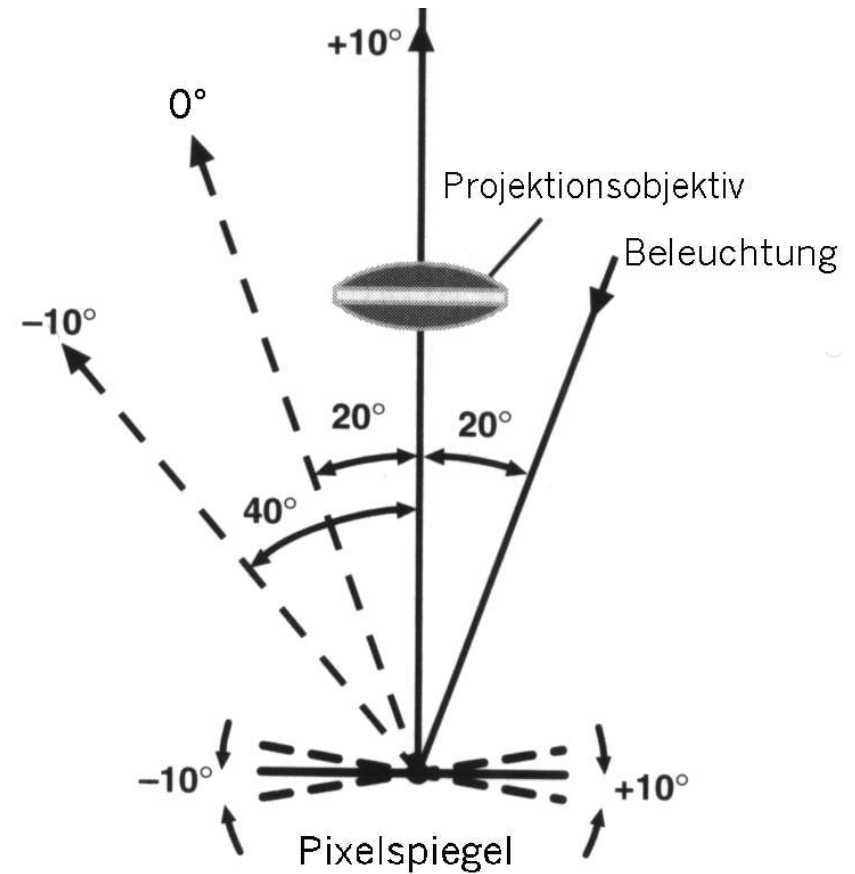
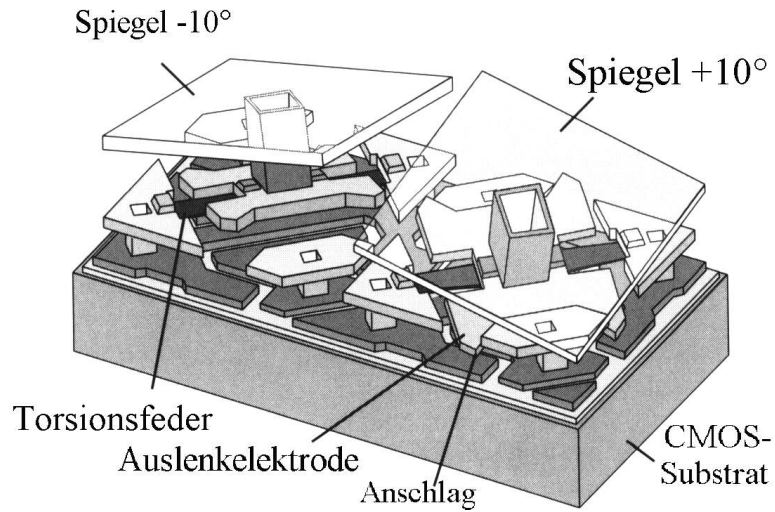


www.projektoren-datenbank.com/lcd.htm

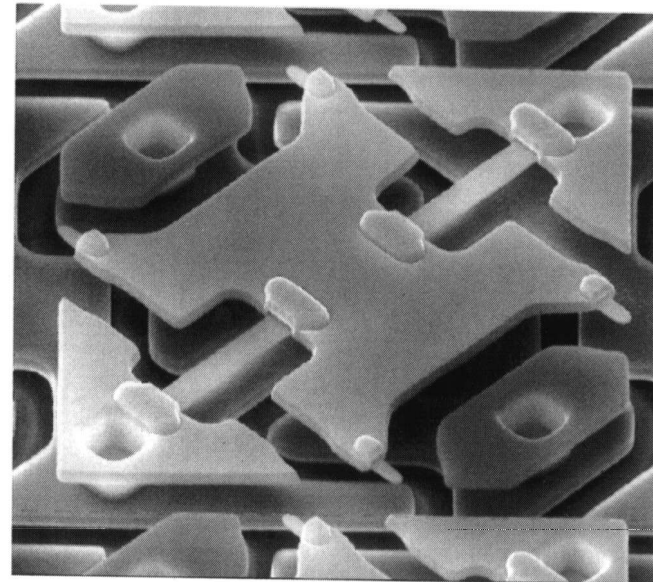
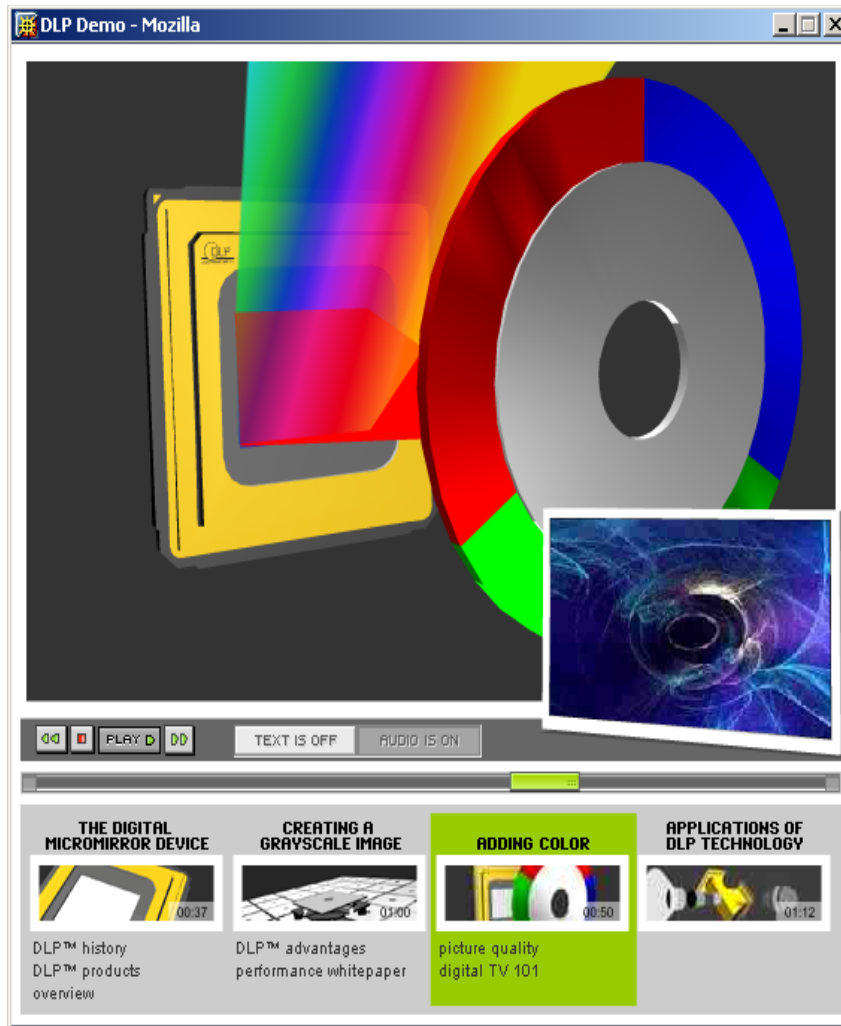


www.projectorpoint.co.uk/projectorLCDvsDLP.htm

DLP Projektor

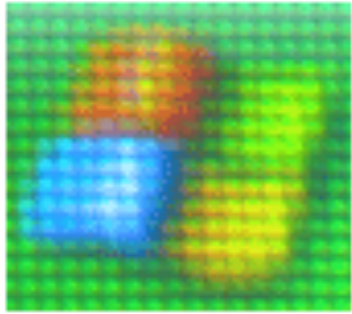


DLD Projektor (Werbefilm)



<http://www.dlp.com/>

Zeitliche vs. räumliche RGB Mischung



LCD

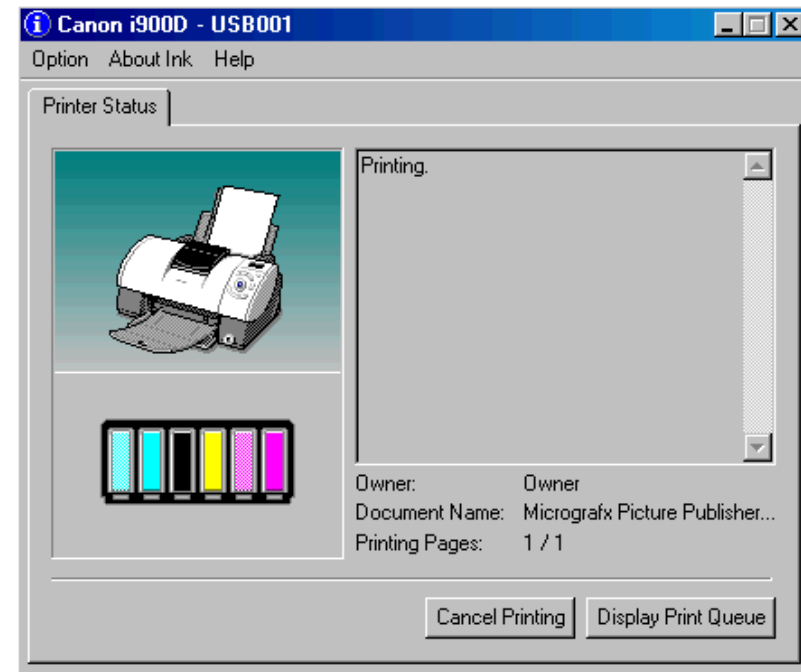
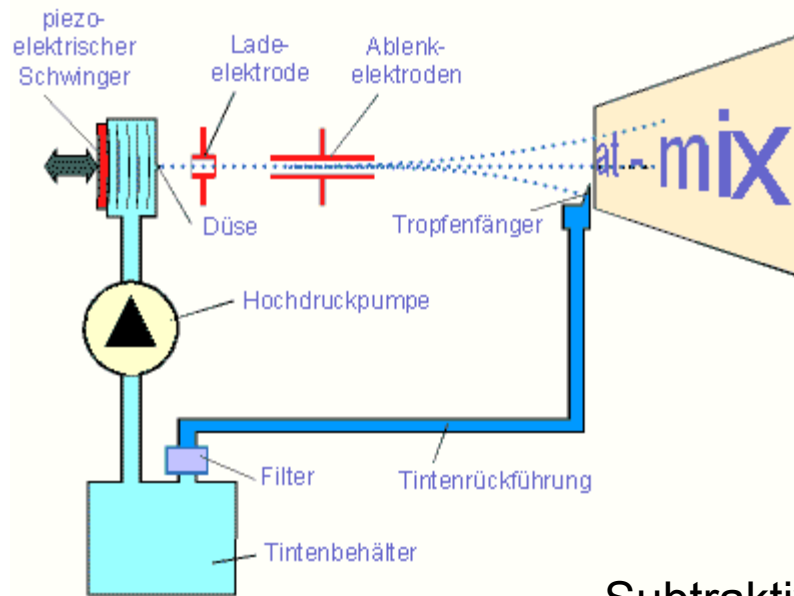


DLP

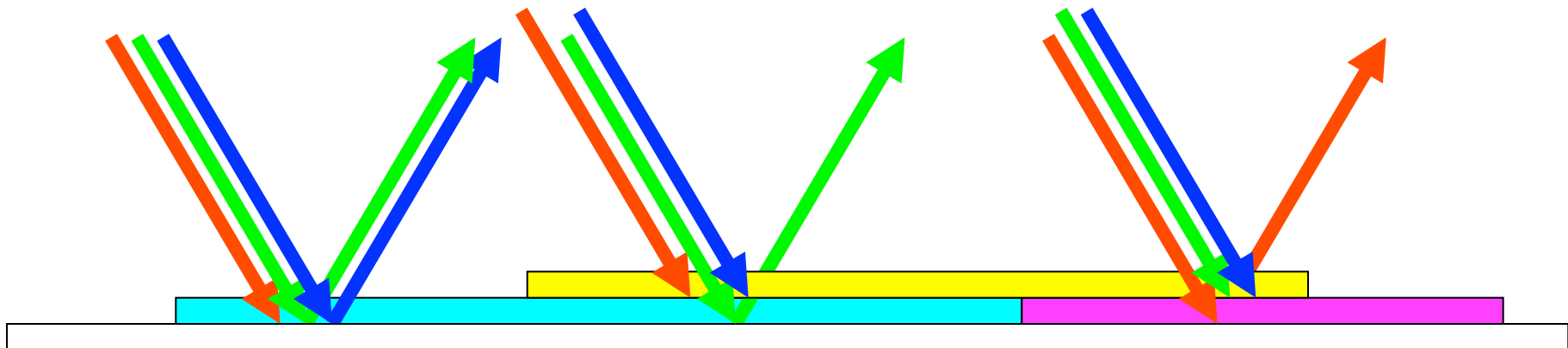
- Screendooreffekt durch Leiterbahnen beim LCD
- 1-panel LCD erzeugt R,G,B Subpixel nebeneinander
- 1-panel DLP erzeugt R,G,B Anteile zeitlich versetzt
- 3-panel LCD + DLP erzeugt echte Farbmischung



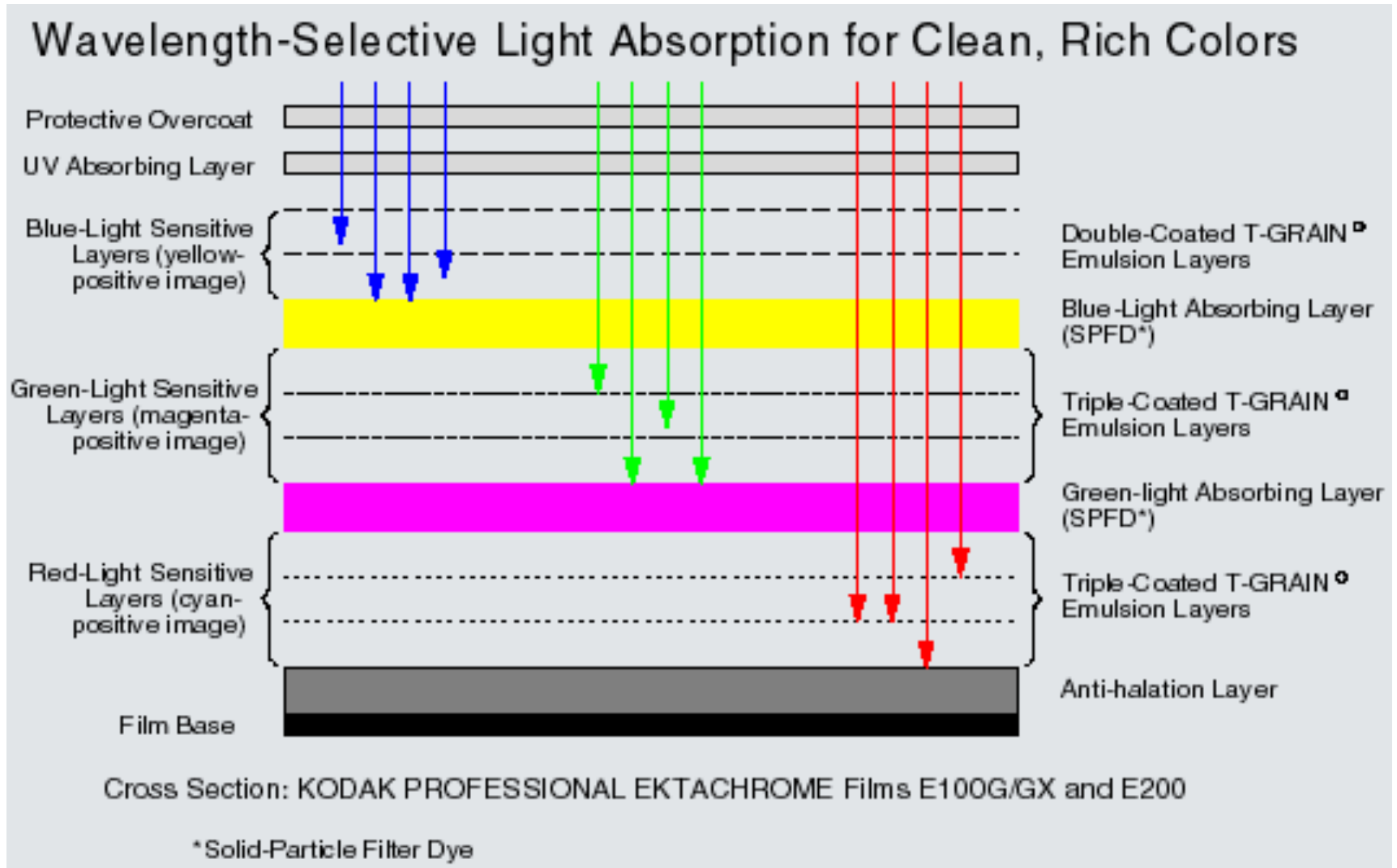
Tintenstrahldrucker



Subtraktive Mischung durch filternde Tintenschichten



Photographischer Film (Quelle: [Kodak](#))



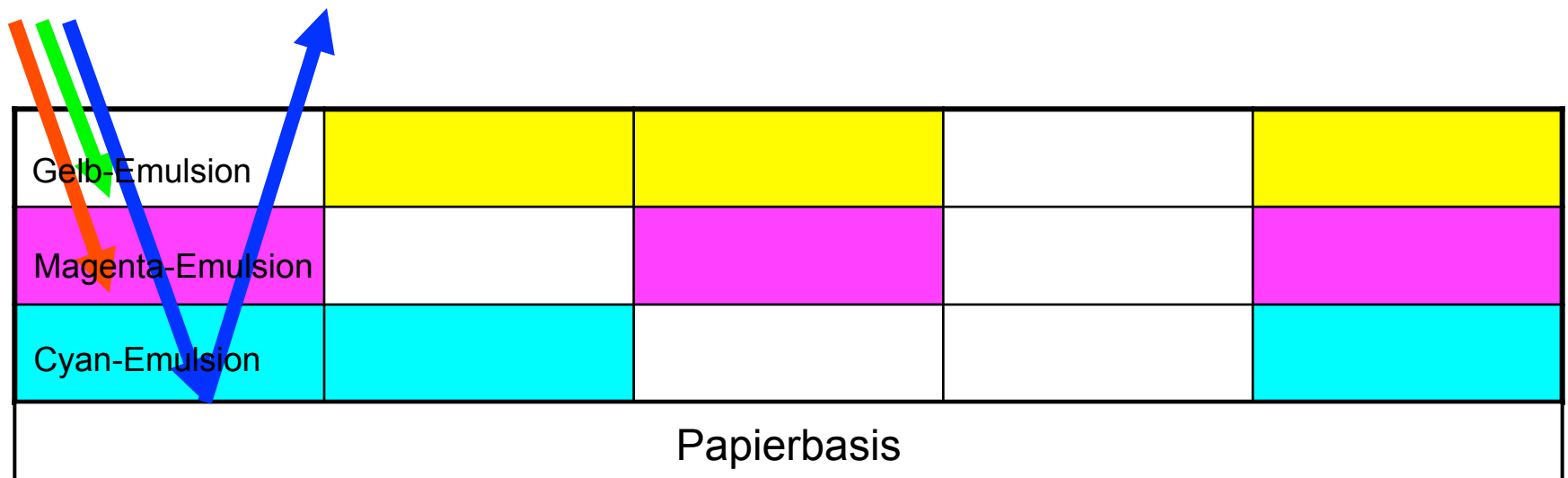
Ausbelichtung auf Photopapier



Farbe bei der Belichtung



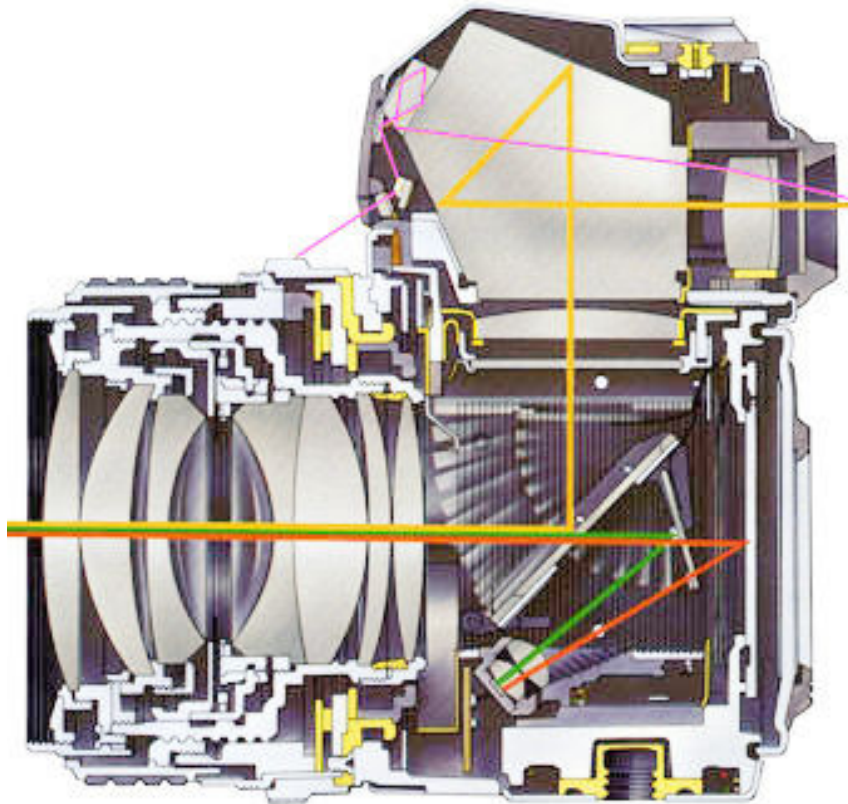
Entstehendes Bild



AUFNAHME VON BILDERN

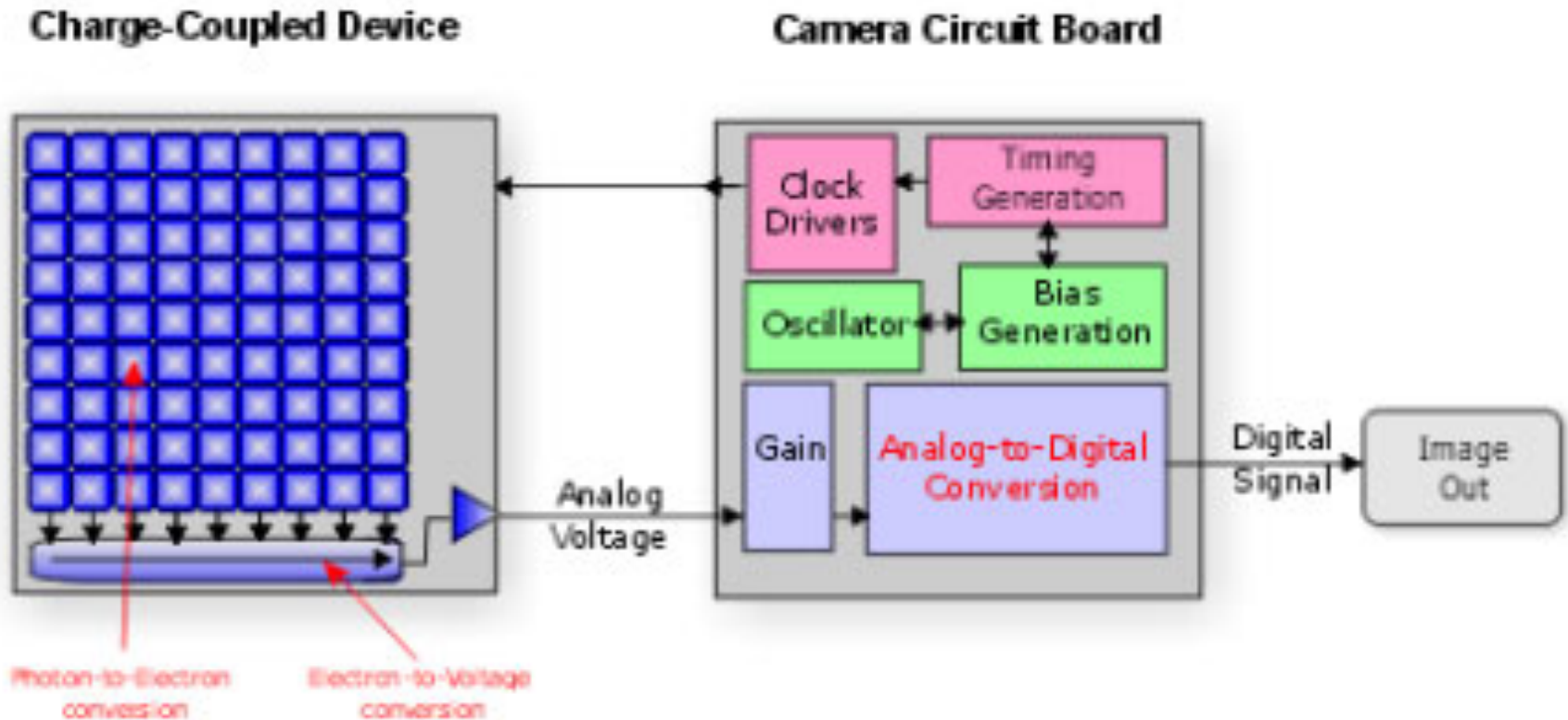
Digitale Kamera

- z.B. Spiegelreflex:



- Optik bildet Umgebung auf eine Bildebene ab
- Beweglicher Spiegel lenkt Bild ins Auge oder auf den Sensor
- Verschluss gibt Sensor für exakten Zeitraum frei
- Bildsensor wandelt Licht in elektrische Signale

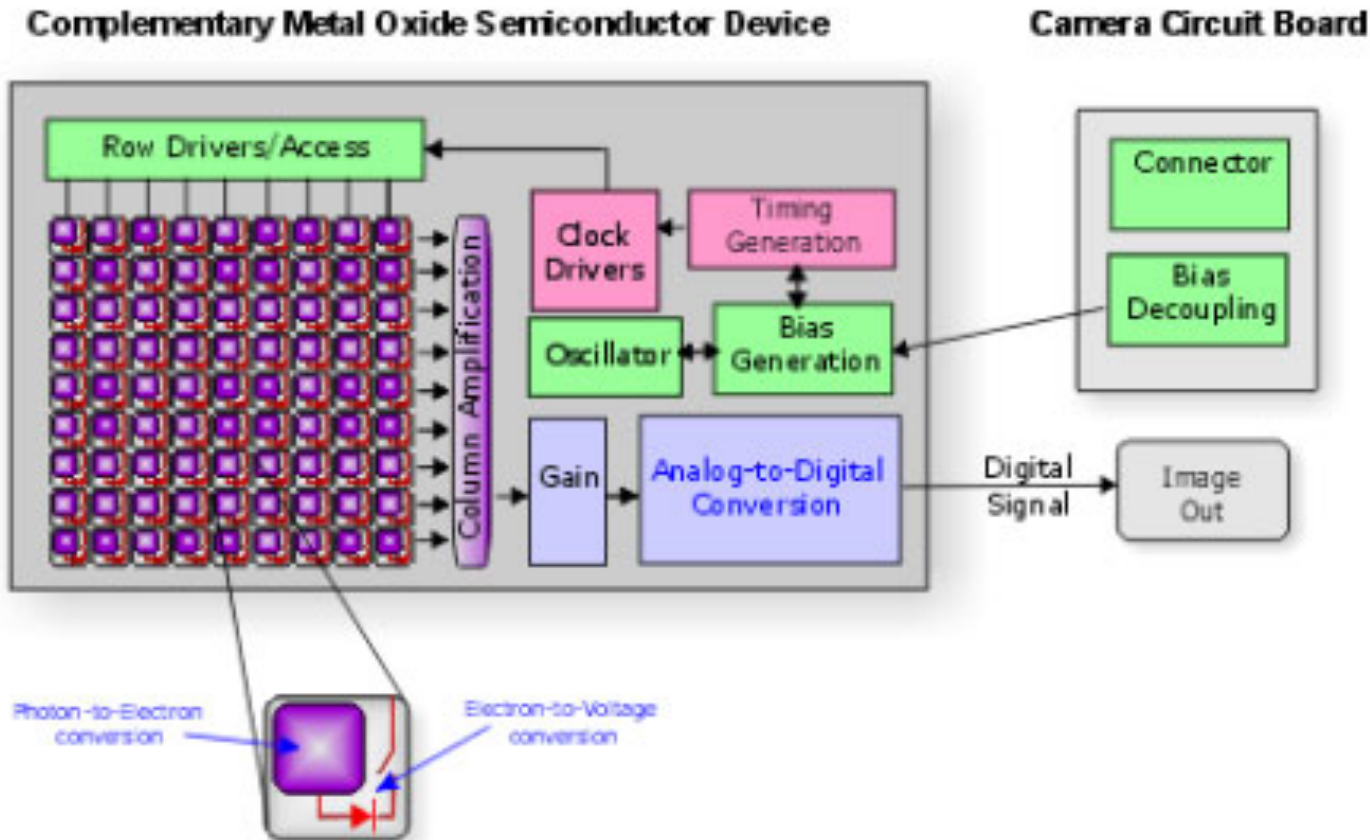
CCD Bildsensor



- Belichtung baut in jedem Pixel Ladung auf
 - Zeilen- und spaltenweise auslesen
 - Weiter verstärken und verarbeiten

Bildquelle: <http://www.pictureline.com/>

CMOS Bildsensor

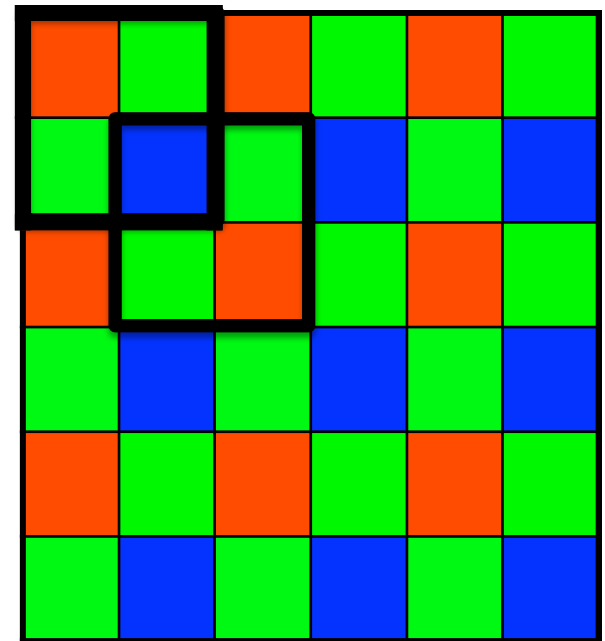
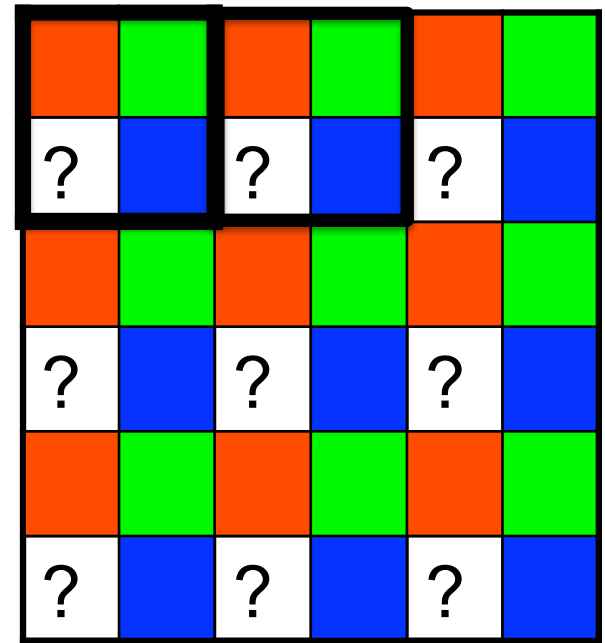


- Verstärkung schon in jedem Pixel vorhanden
 - Saubereres Signal, weniger Rauschen

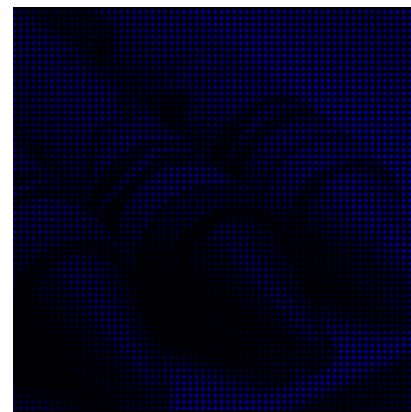
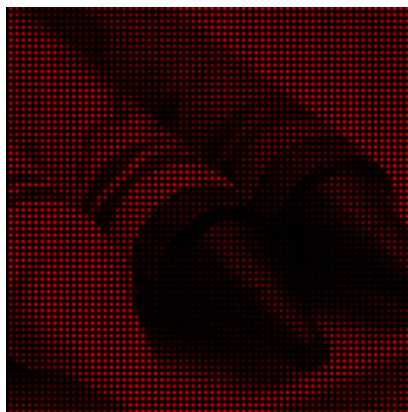
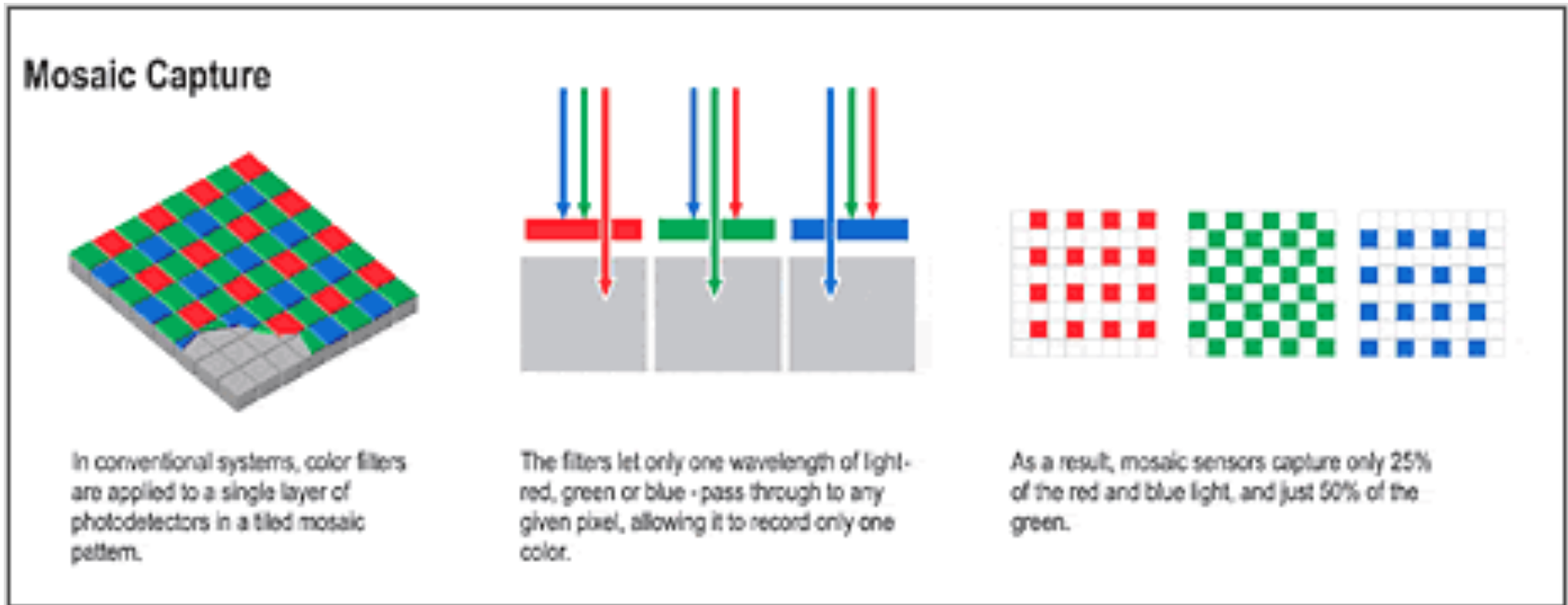
Bildquelle: <http://www.pictureline.com/>

Bildsensor: Farbe

- $6 \times 6 = 36$ Sensor-Elemente
- \rightarrow wie viele Farbpixel?
- Naiver Ansatz
 - je 4 Pixel bilden eine Gruppe
 - $\rightarrow 3 \times 3 = 9$ Farbpixel
- Bayer-Muster
 - jede quadratische 4er-Gruppe enthält alle Grundfarben
 - $\rightarrow 5 \times 5 = 25$ Farbpixel
 - allgemein: $n-1 * n-1$

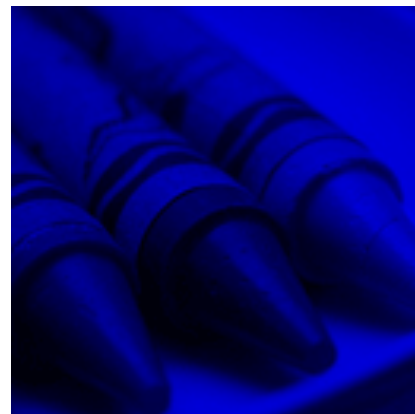
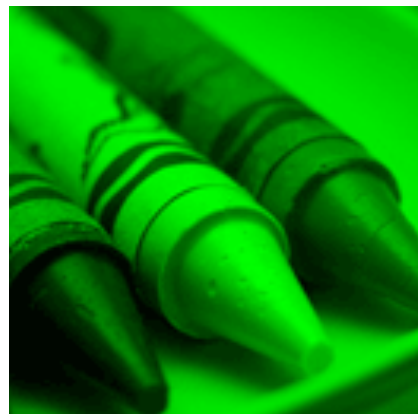
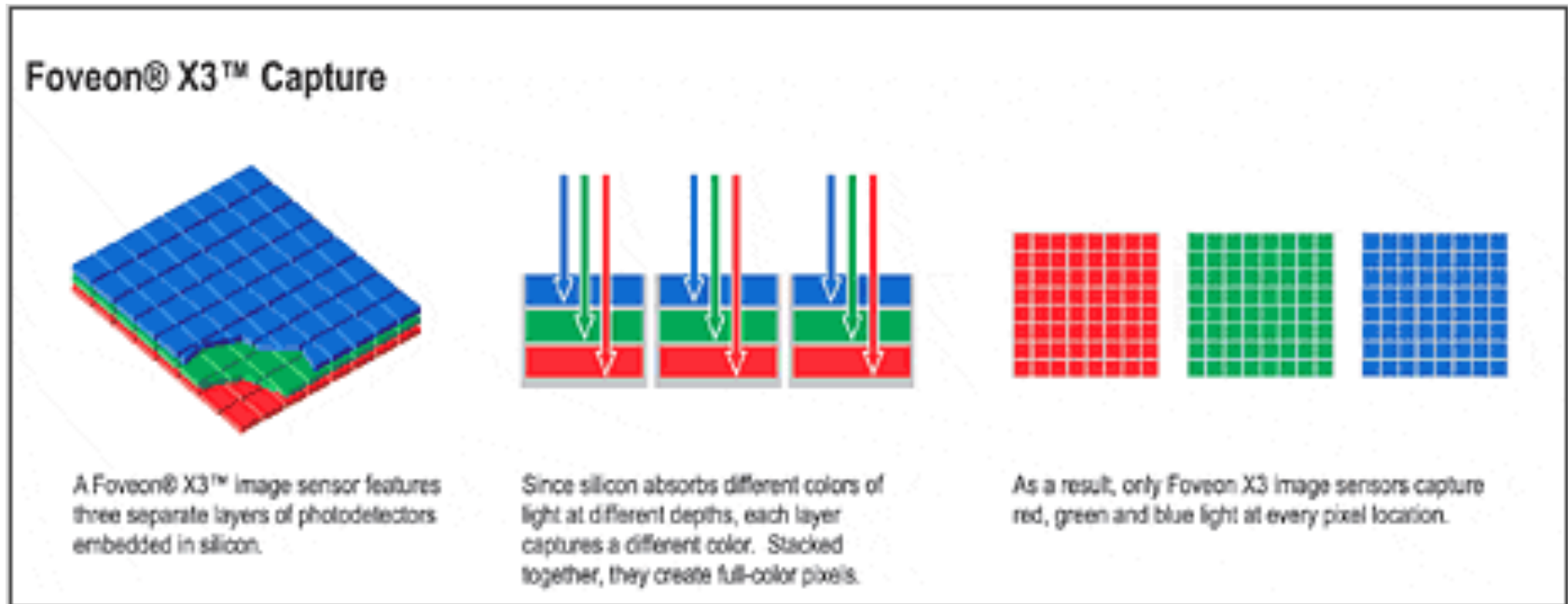


Bildsensor: Bayer-Muster



Bildquelle: <http://www.dpreview.com/>

Bildsensor: Foveon (Sigma)



Bildquelle: <http://www.dpreview.com/>

Scanner



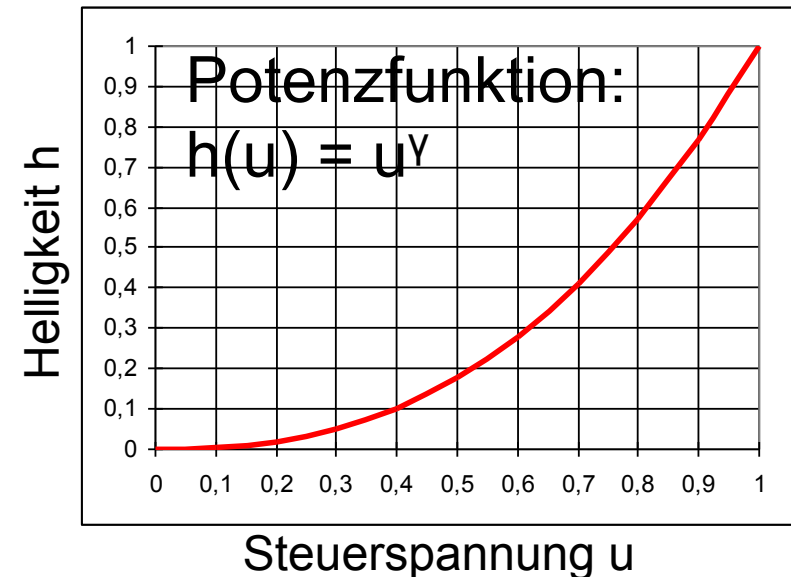
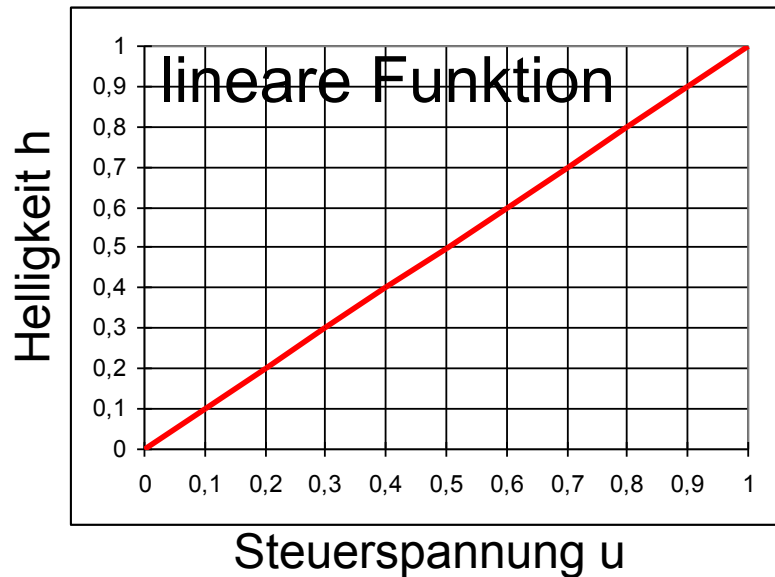
- Gleiches Sensor-Prinzip wie Kamera
 - Nur 1 Zeile mit Pixeln
- Sensor (1 Zeile) wird mechanisch über das Bild geführt

FARBMANAGEMENT

Problem: nichtlineares Verhalten

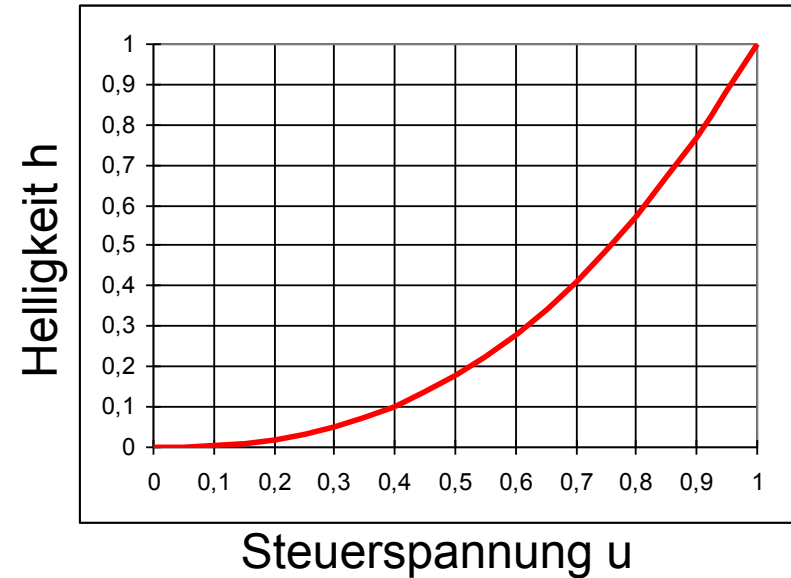
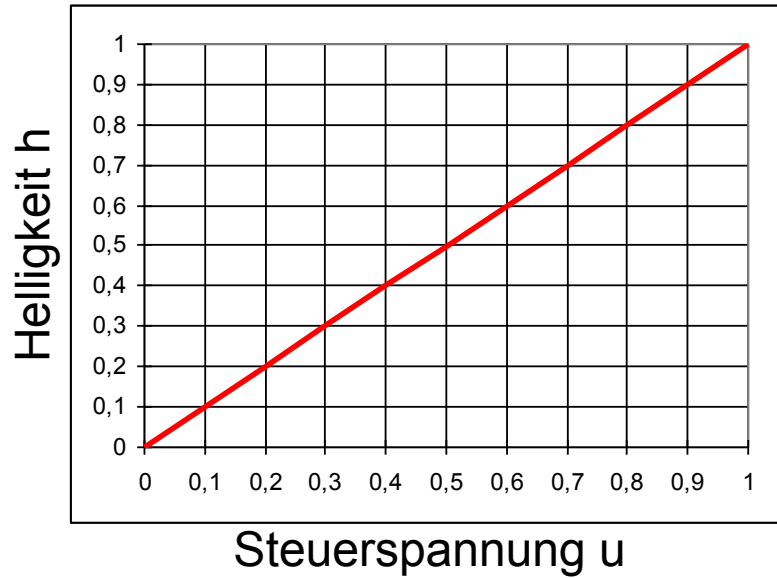
- Monitor wird durch eine elektrische Spannung angesteuert
- Gewünschtes Verhalten (linear):
 - doppelte Spannung → doppelte Helligkeit
- nichtlineares Verhalten vieler Anzeigegeräte
 - z.B. doppelte Spannung → fache Helligkeit
 - Röhrenmonitore: Potenzgesetz mit Exponent 2,5
 - TFT Monitore: komplexeres Verhalten, Hardware-korrigiert, so dass Verhalten wie Röhrenmonitore

Mathematische Beschreibung: Gamma

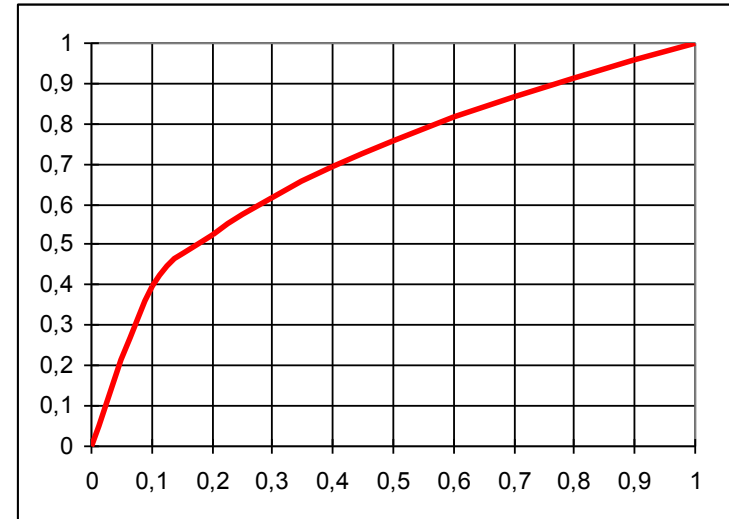
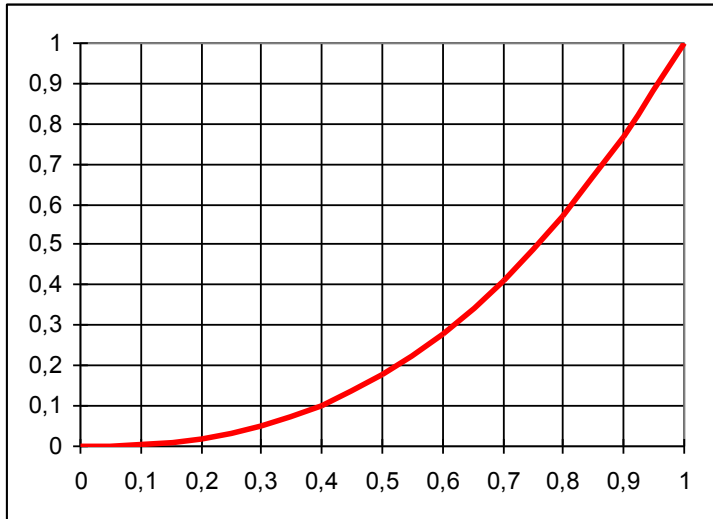


- Röhrenmonitor mit Phosphor als Leuchtstoff:
 - Steuerspannung u von 0,0 bis 1,0 * u_{\max}
 - Helligkeit h von 0,0 bis 1,0 * h_{\max}
- Verhältnis von Helligkeit eines Punktes zur Steuerspannung ist nicht linear, Potenzfunktion: $h(u) = u^\gamma$ mit γ (sprich: Gamma) = 2,5

Gamma = 2,5: Auswirkung

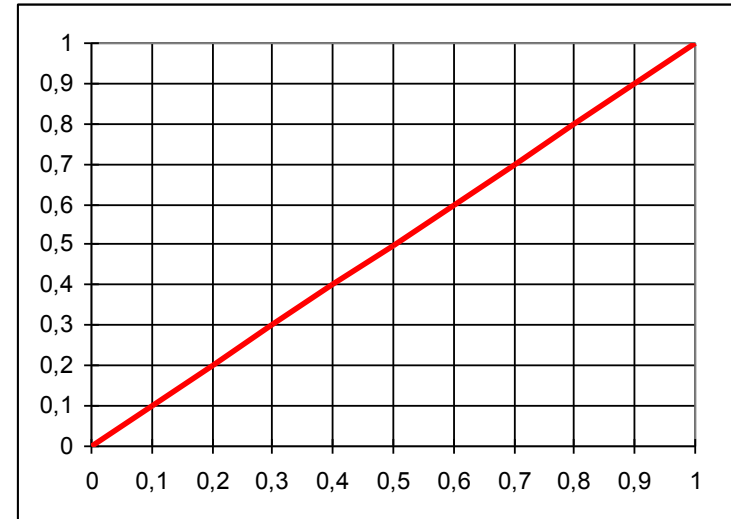
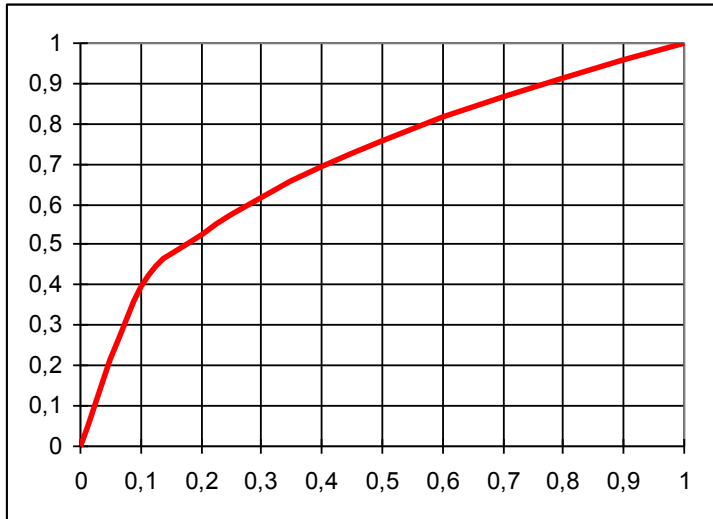


Gammakorrektur für 2,5

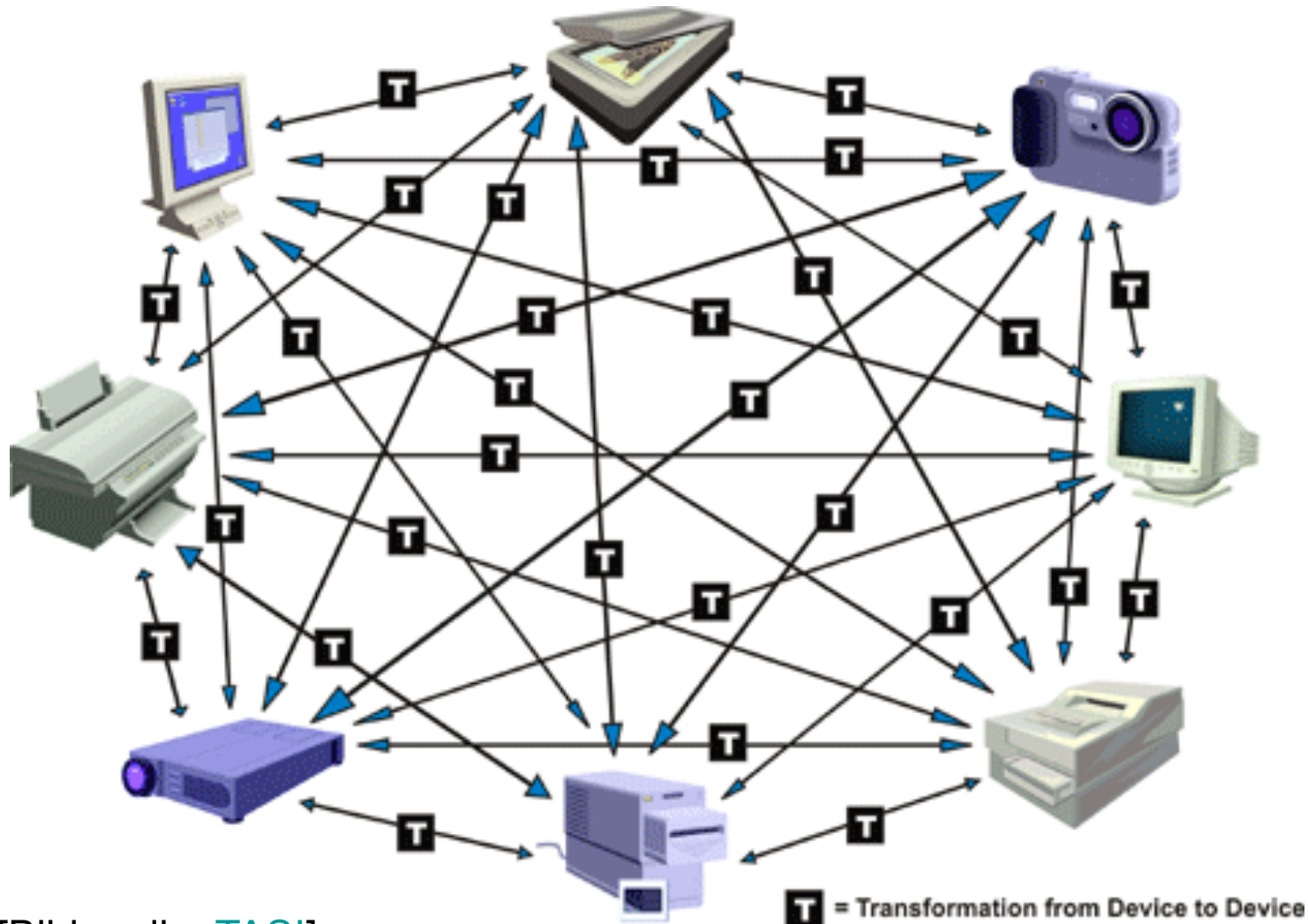


- Idee: Helligkeitswerte vorher entgegengesetzt korrigieren mit $\text{Gamma} = 1 / 2,5 = 0,4$
- $h = (u^{0,4})^{2,5} = u^{0,4 * 2,5} = u^1 = u$
- „Gammakorrektur für x“ bedeutet mit $1/x$ korrigieren

Gammakorrektur für 2,5: Auswirkung

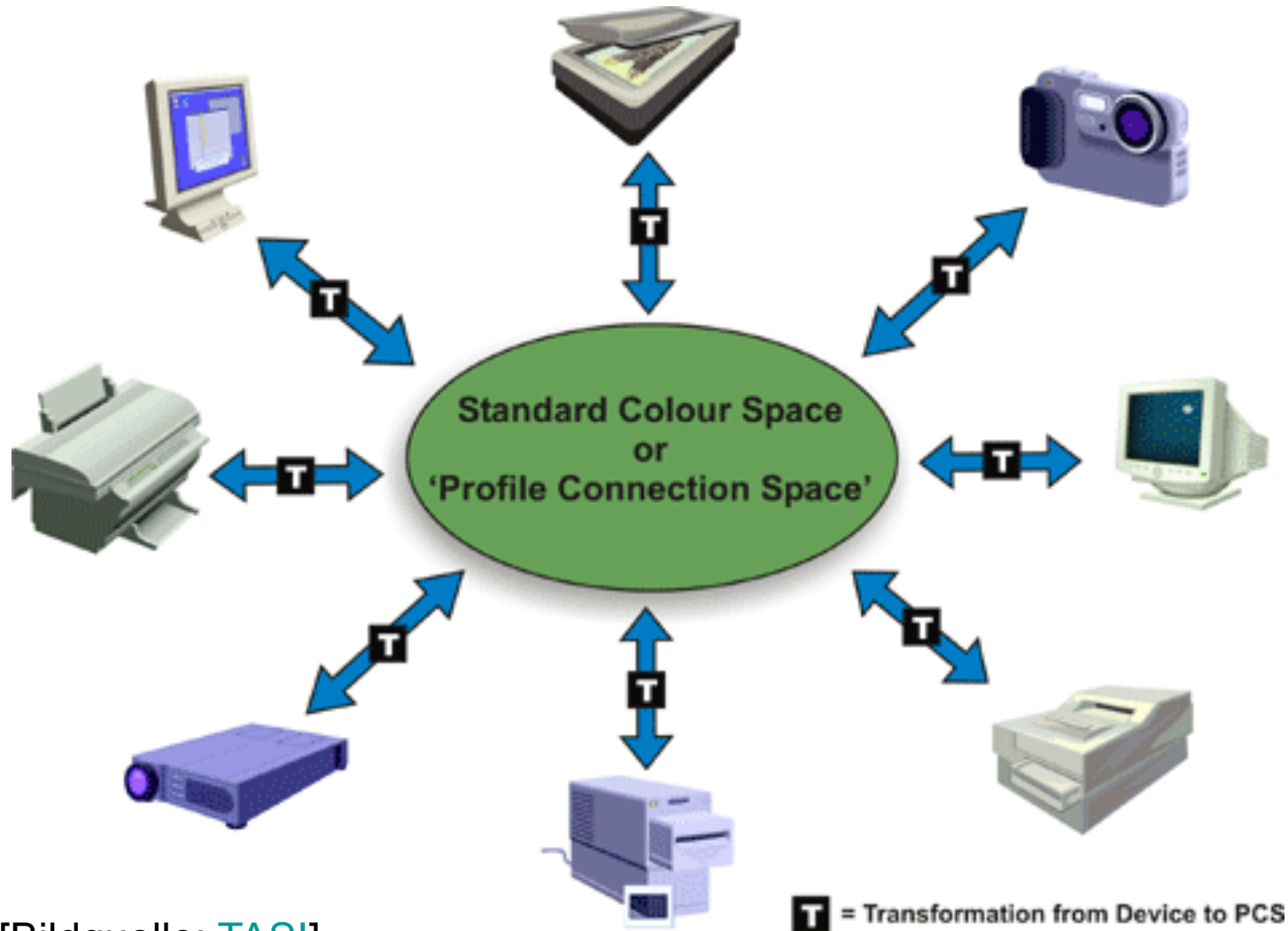


Farbmanagement: Warum?



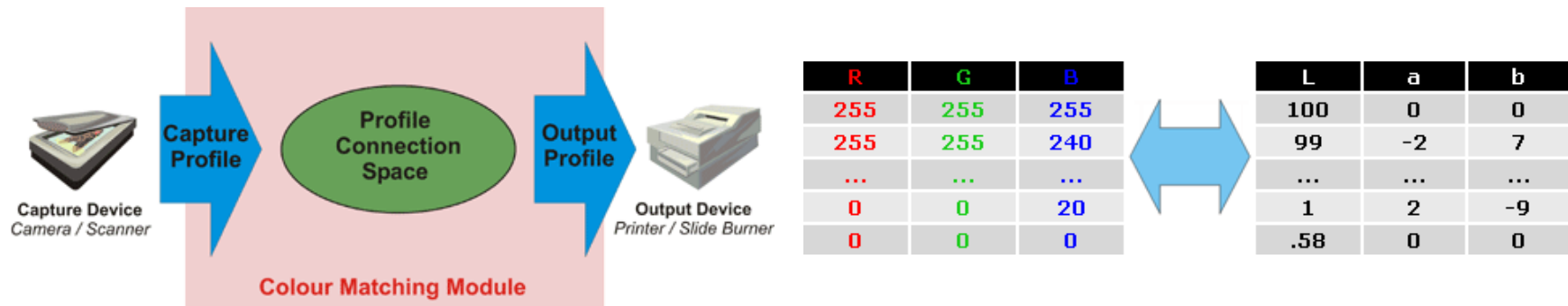
[Bildquelle: [TASI](#)]

Farbmanagement: Grundidee



[Bildquelle: [TASI](#)]

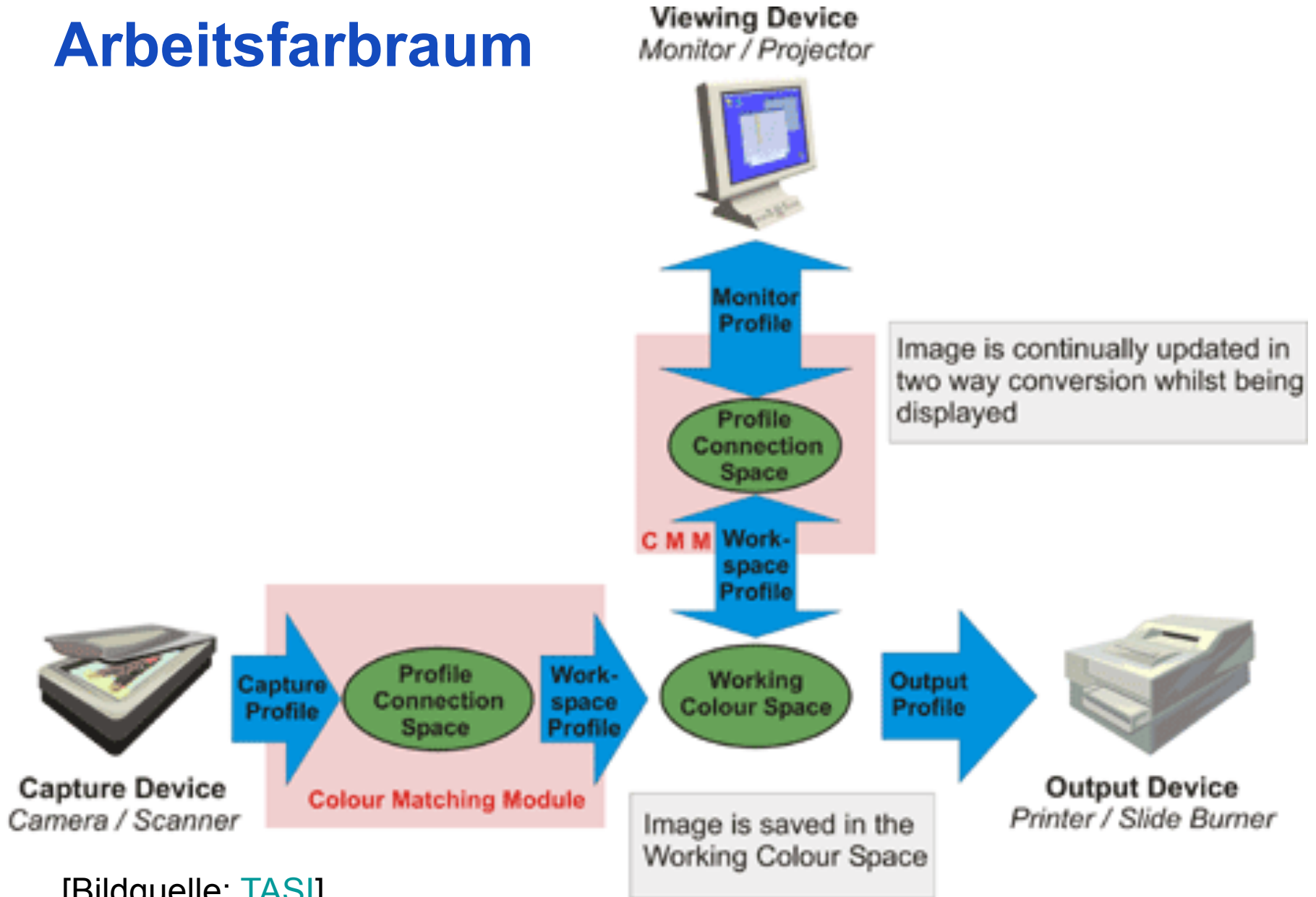
Ein- und Ausgabepprofile



- Definiert in Form von Tabellen (lookup-tables)
- Format und Verarbeitung durch ICC genormt
ICC = International Color Consortium
- <http://www.color.org/>

[Bildquelle: [TASI](#)]

Arbeitsfarbraum



[Bildquelle: [TASI](#)]

CIE Chromatizitäts-Diagramm

- Chromacity = (Hue, Saturation)
- Farbart = (Farbton, Sättigung)
- ein Punkt im Diagramm repräsentiert alle Farben gleicher Farbart aber unterschiedlicher Helligkeit

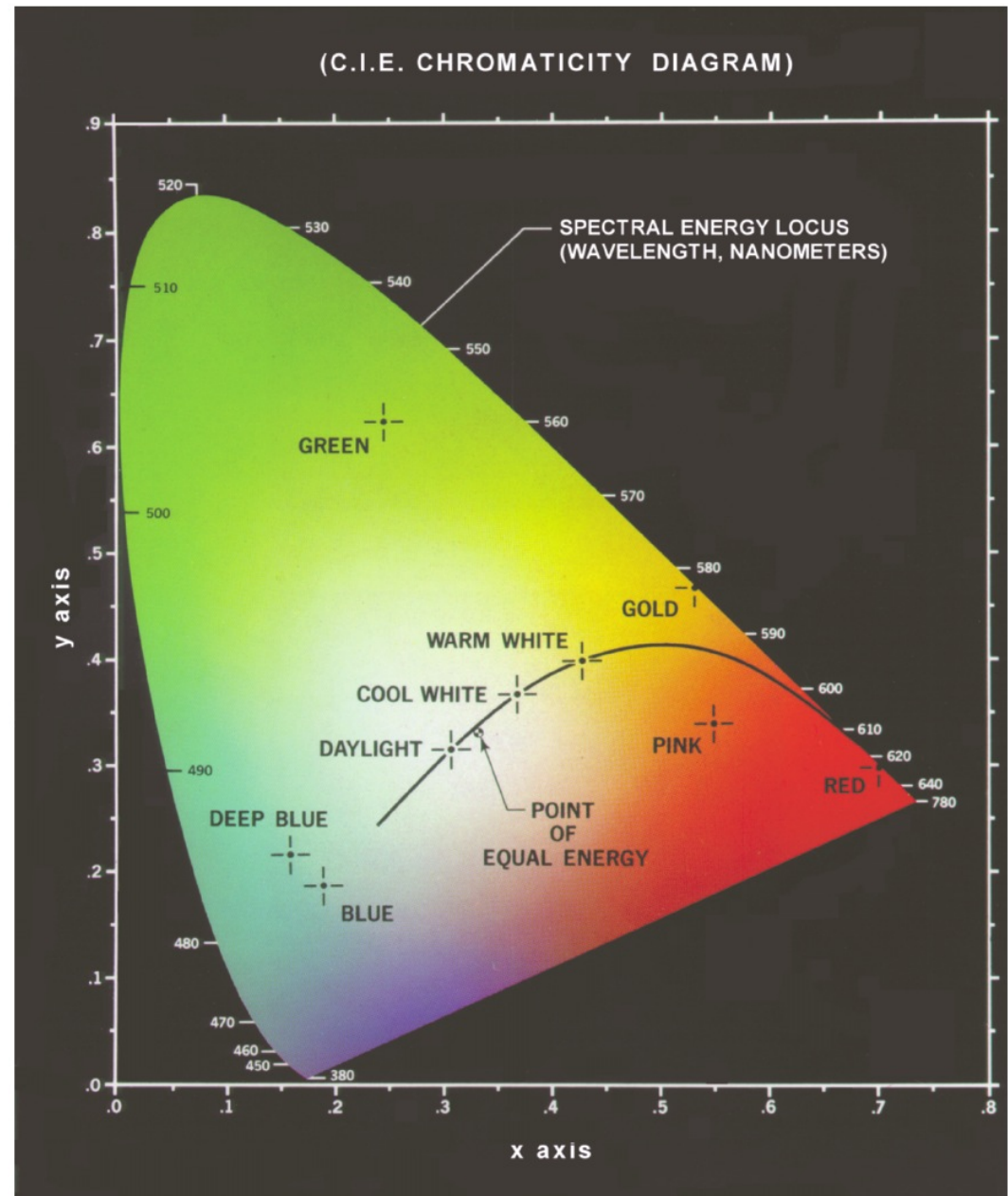
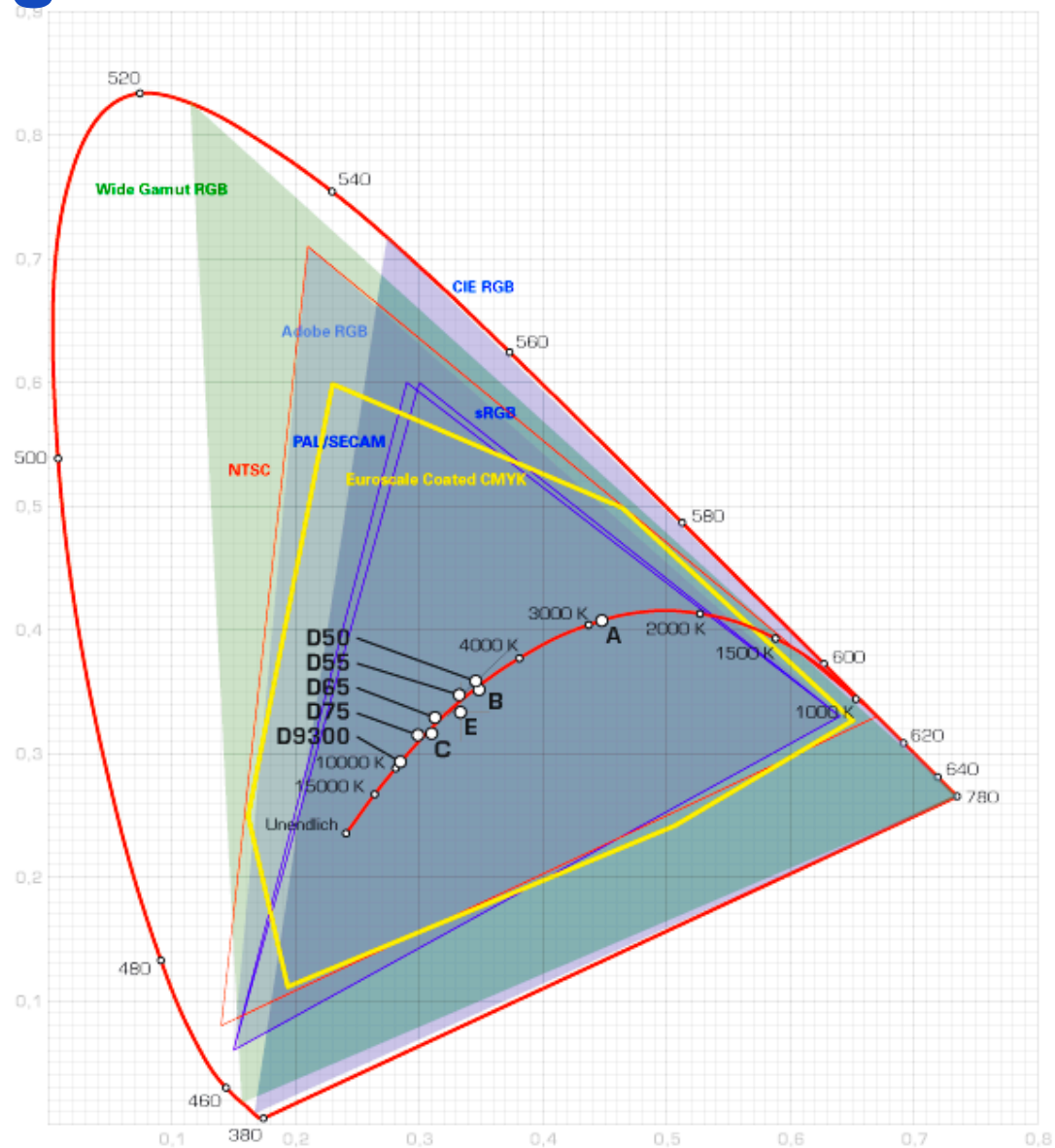


Abbildung: © R. C. Gonzalez & R. E. Woods, Digital Image Processing

Weißpunkte

| CIE-Normbeleuchtung | X-Wert | Y-Wert | Bemerkung |
|-----------------------|----------|----------|--|
| CIE-Normbeleuchtung A | 0,4476 | 0,4047 | Lichtspektrum einer Glühbirne ähnlich |
| CIE-Normbeleuchtung B | 0,3484 | 0,3516 | - |
| CIE-Normbeleuchtung C | 0,3101 | 0,3162 | Weißpunkt der NTSC-TV-Norm |
| CIE-Normbeleuchtung E | 1/3 | 1/3 | Weißpunkt des CIE-RGB-Farbraumes; X, Y und Z zu exakt gleichen Anteilen |
| D5000 bzw. D50 | 0,3457 | 0,3585 | Weißpunkt für Wide-Gamut-RGB und Color-Match-RGB |
| D5500 bzw. D55 | 0,3324 | 0,3474 | Lichtspektrum ähnlich dem von durchschnittlichem Tageslicht, Spektrum einem Schwarzkörper bei 5500 Kelvin ähnlich |
| D6500 bzw. D65 | 0,312713 | 0,329016 | Weißpunkt für sRGB, Adobe-RGB und die PAL/SECAM-TV-Norm, Spektrum einem Schwarzkörper bei 6504 (sic!) Kelvin ähnlich |
| D7500 bzw. D75 | 0,2990 | 0,3149 | Spektrum einem Schwarzkörper bei 7500 Kelvin ähnlich |
| D9300 | 0,2848 | 0,2932 | Spektrum einem Schwarzkörper bei 9300 Kelvin ähnlich |

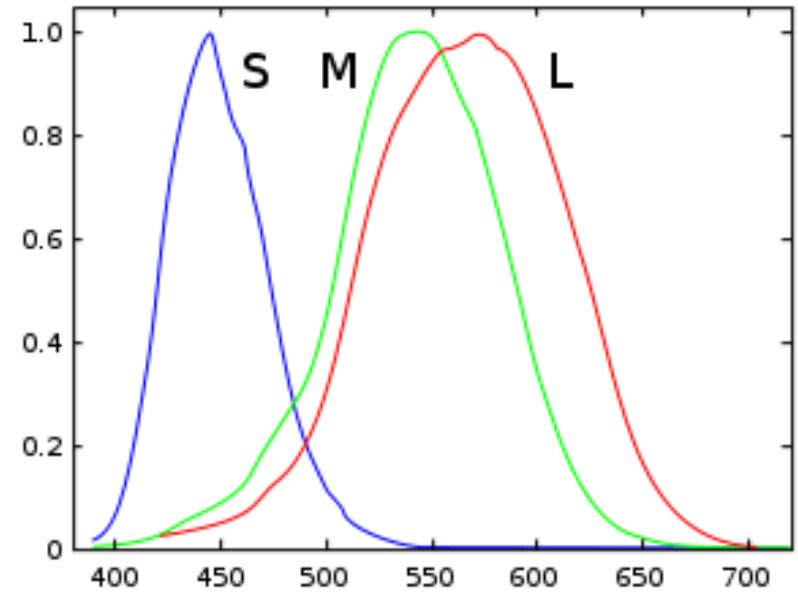
Einbettung anderer Farbräume



LMS-Farbraum = Zapfenfarbraum

- Primärfarben definiert durch Maxima der Zapfenempfindlichkeiten
- XYZ nach LMS (Bradford)

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8951 & 0.2664 & -0.1614 \\ -0.7502 & 1.7135 & 0.0367 \\ 0.0389 & -0.0685 & 1.0296 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$



- Chromatische Adaption (von Kries Transformation):

$$D = D_1^{-1} D_2 = \begin{bmatrix} L_2/L_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2/M_1 & 0 \\ 0 & 0 & S_2/S_1 \end{bmatrix}$$

- Verwendung bei Weißabgleich

Weißabgleich, Farbkonstanz

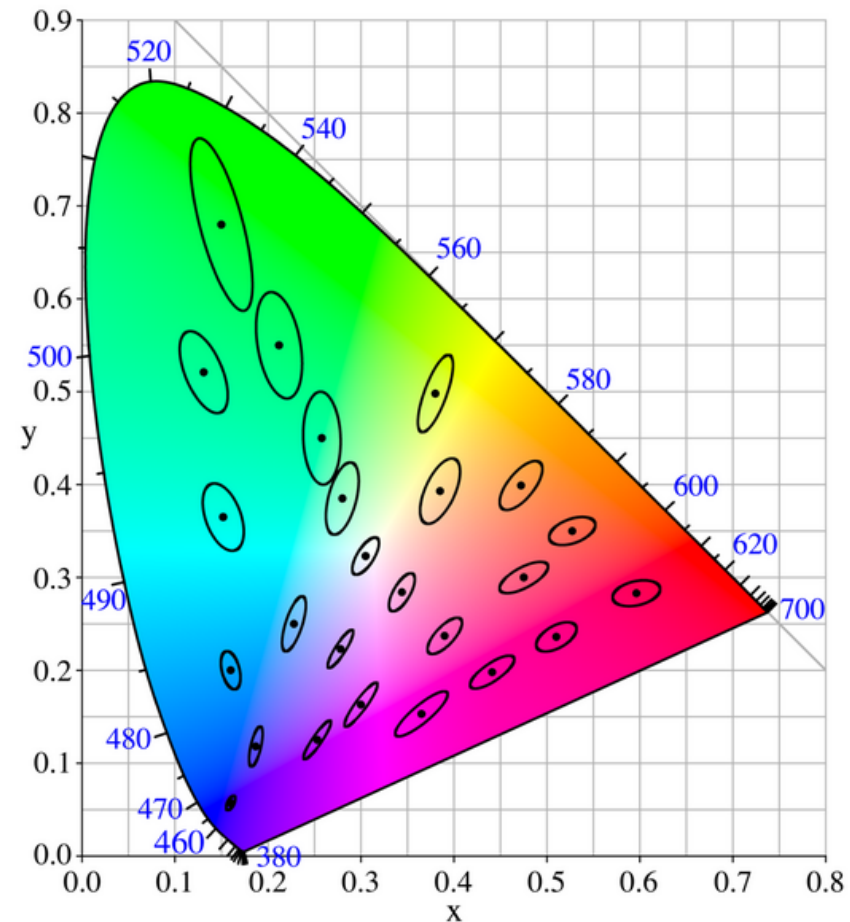
- Von Kries Hypothese
 - visuelles System erreicht Farbkonstanz (chromatische Adaption) durch unterschiedliche Verstärkung der L-, M-, S-Zapfenaktivierung
- Weißabgleich in Kameras folgt dieser Hypothese
 - Falls bekanntes (L_w, M_w, S_w) für weißen Bereich im Bild, aber Sättigung (L_w, M_w, S_w) größer 0
 - berechne (k_L, k_M, k_S) so dass Sättigung von $(k_L L_w, k_M M_w, k_S S_w) = 0$, z.B. $k_L = 1/L_w, k_M = 1/M_w, k_S = 1/S_w$
 - angewandt auf Bild

$$\begin{pmatrix} L' \\ M' \\ S' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/L_w & 0 & 0 \\ 0 & 1/M_w & 0 \\ 0 & 0 & 1/S_w \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix}$$

Abstand von Farben

- Problem: Im CIExy-Diagramm entsprechen Distanzen nicht wahrgenommenen Farbunterschieden
- MacAdams-Ellipsen zeigen „just noticeable difference“
 - Farben auf Rand einer Ellipse haben jnd-Abstand zum Zentrum
 - Uniformer Farbraum (Ellipsen werden zu Kreisen) nur durch nicht-lineare Transformation
 - Problem: MacAdams Daten basieren auf 1 VPN

MacAdam-Ellipsen
(10-fach vergrößert)



© PAR, BY-CC-SA

CIELAB-Farbraum (L*a*b*-Farbraum)

- Uniformer Farbraum, durch nicht-lineare Transformation aus CIE-XYZ Farbraum

- Achsen

L = Luminanz

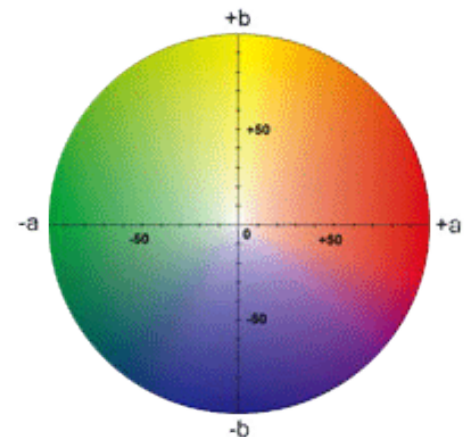
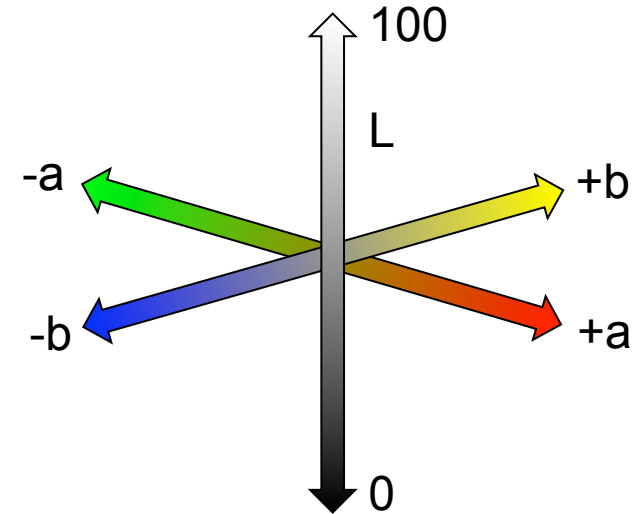
a,b = Gegenfarbenachsen

- Transformation

Helligkeit: $L^* = 116 \cdot \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - 16$

Grün-rot: $a^* = 500 \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{X}{X_n}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} \right)$

Gelb-blau: $b^* = 200 \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_n}} \right)$



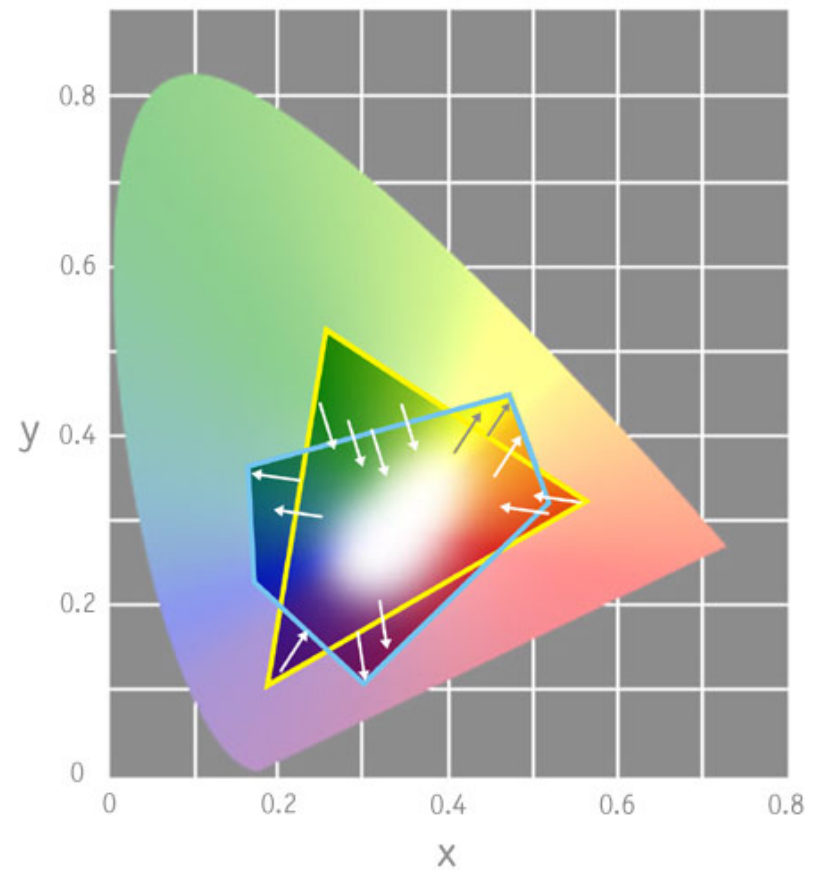
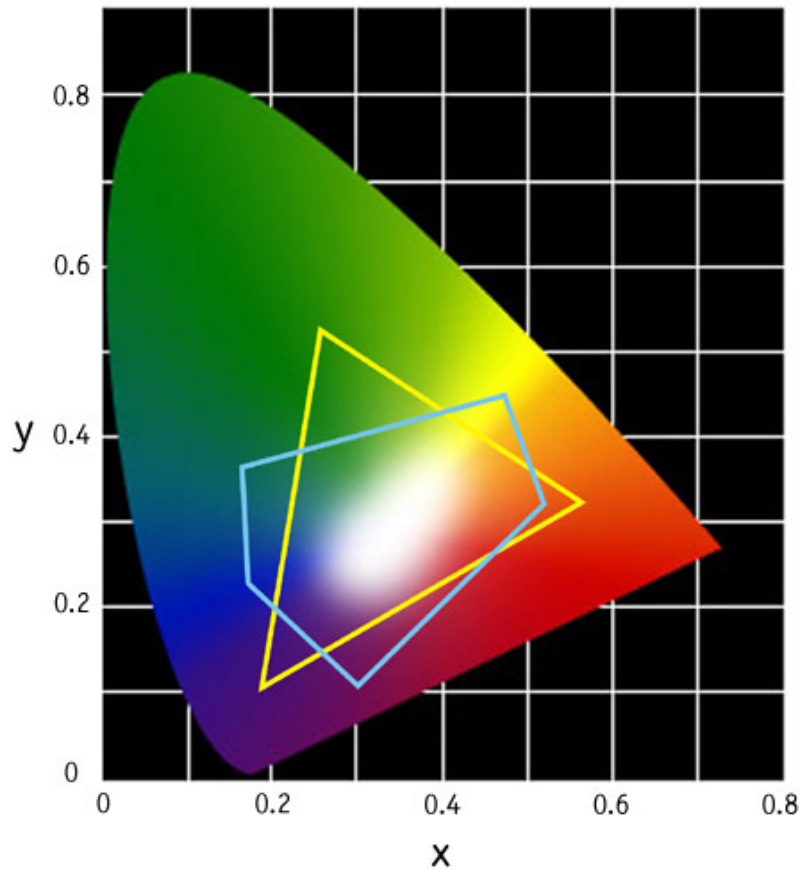
Color Space: sRGB IEC-61966-2.1

- Designed as “lowest common denominator” color space
 - Promoted by Microsoft, Hewlett Packard and others
 - Based on expected quality of consumer PC monitor ($\gamma=2.2$, D65 white point)
 - Limited color gamut
- Used by Web browsers, digital cameras, scanners
- Good for images viewed on the Internet
- Bad for high quality print

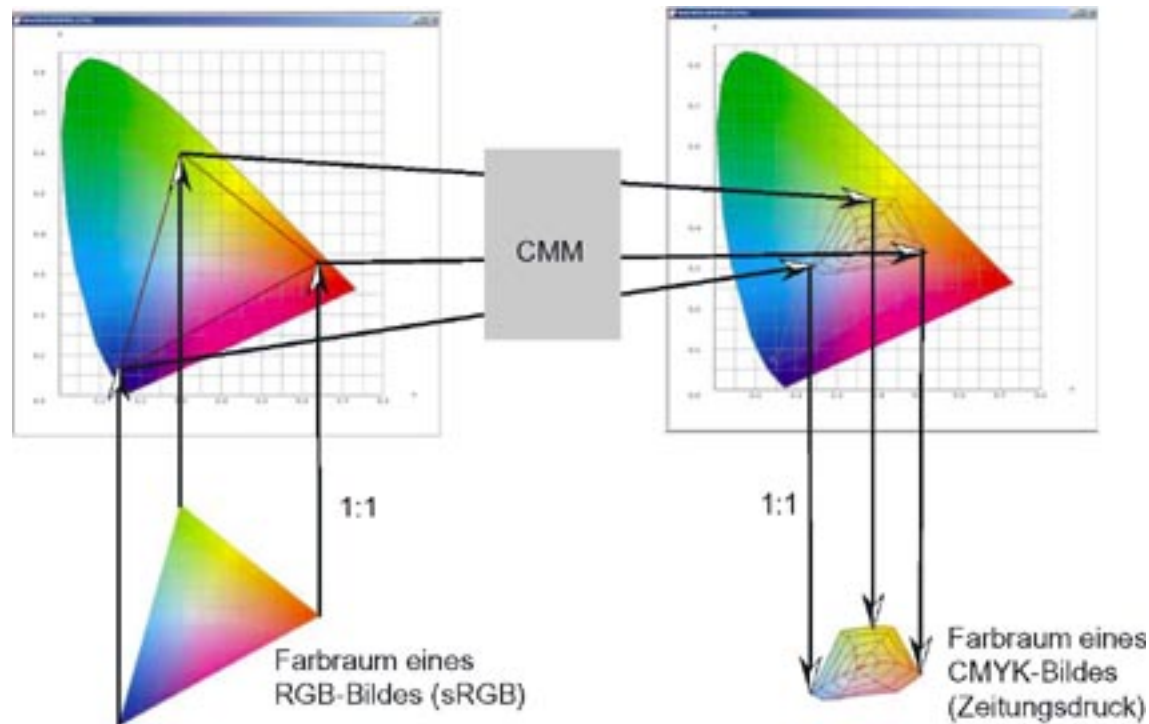
Color Space: Adobe RGB (1998)

- Recommended for images to be converted to CMYK for print
- Likely to become an ISO standard
- Good compromise between quality and gamut size

Wie wandelt man zwischen Farbräumen?



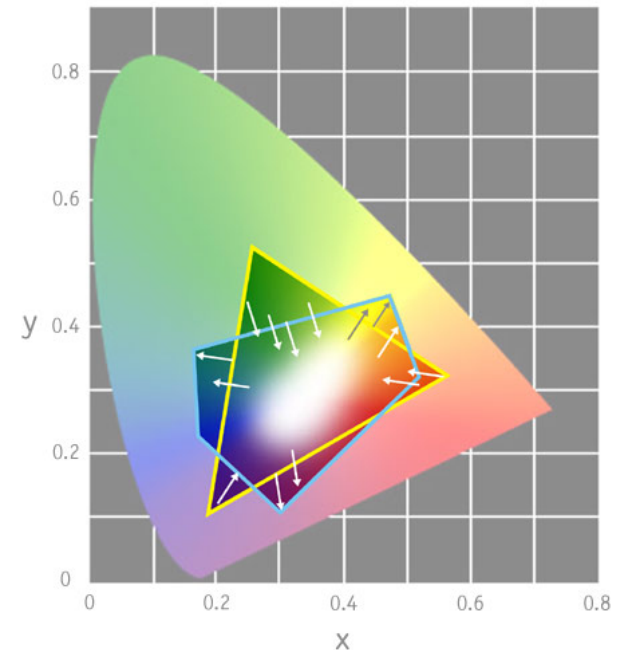
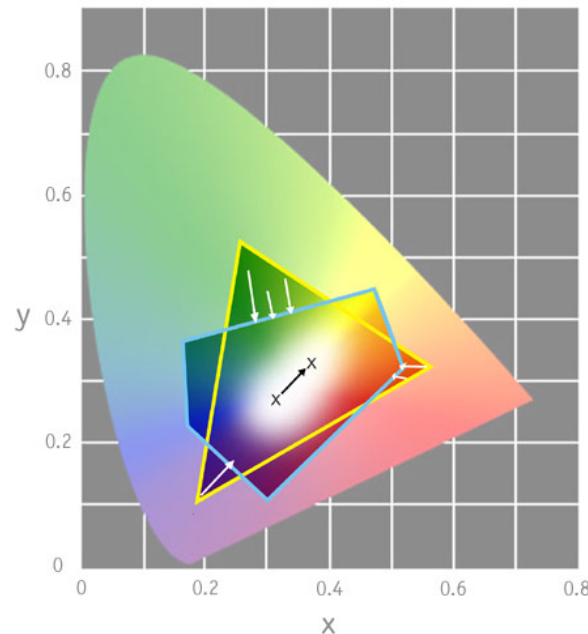
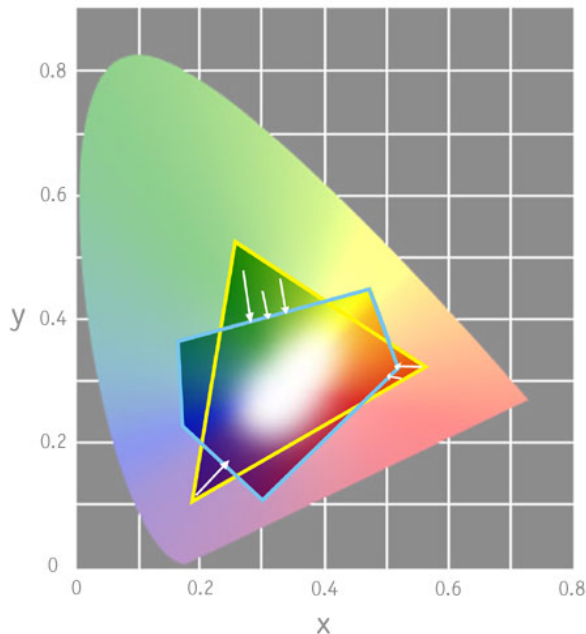
Umwandlung zwischen Farbräumen



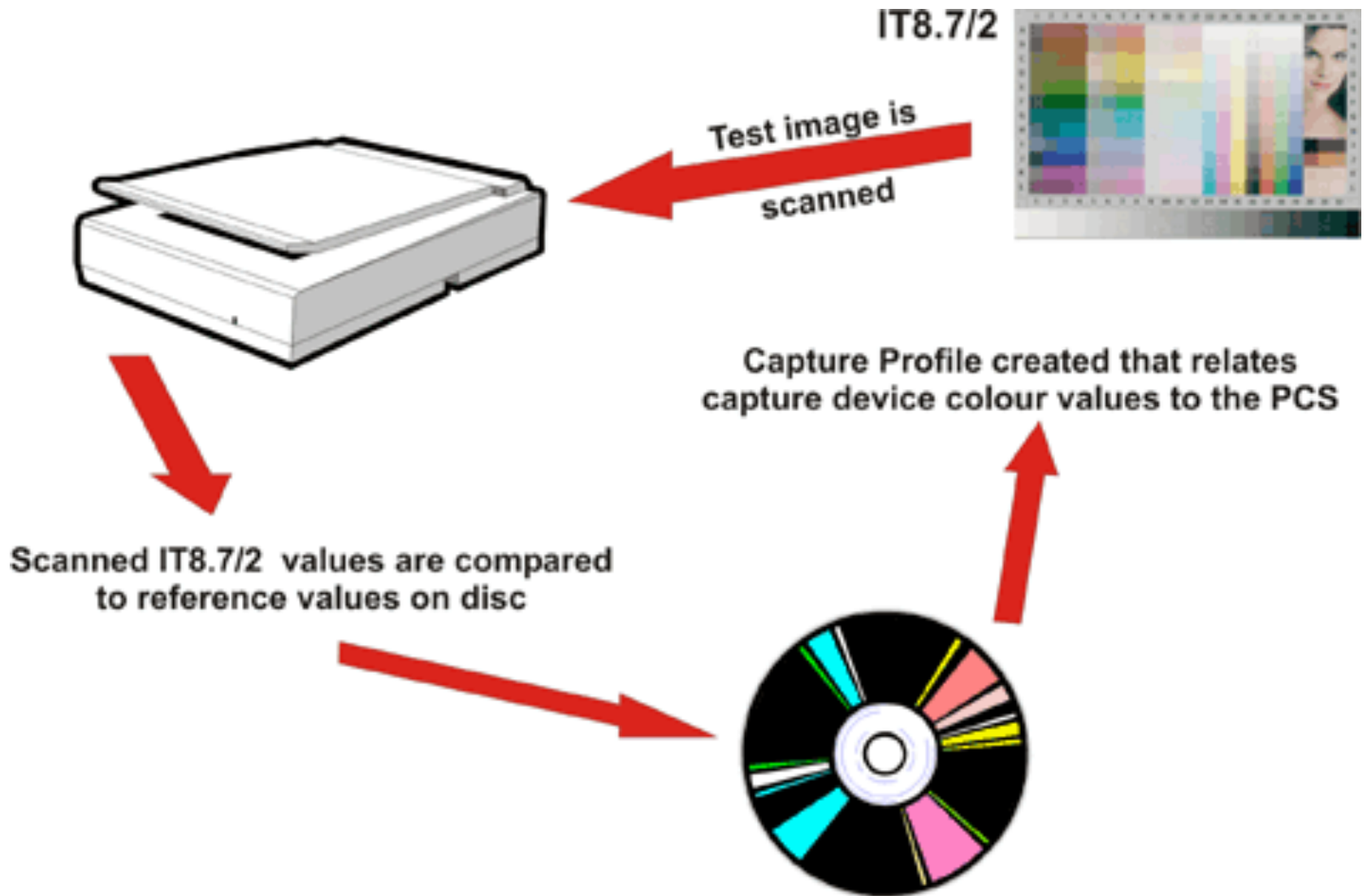
http://www.medicalpicture.de/cont_36.onlinelexikon.php

Rendering Intent

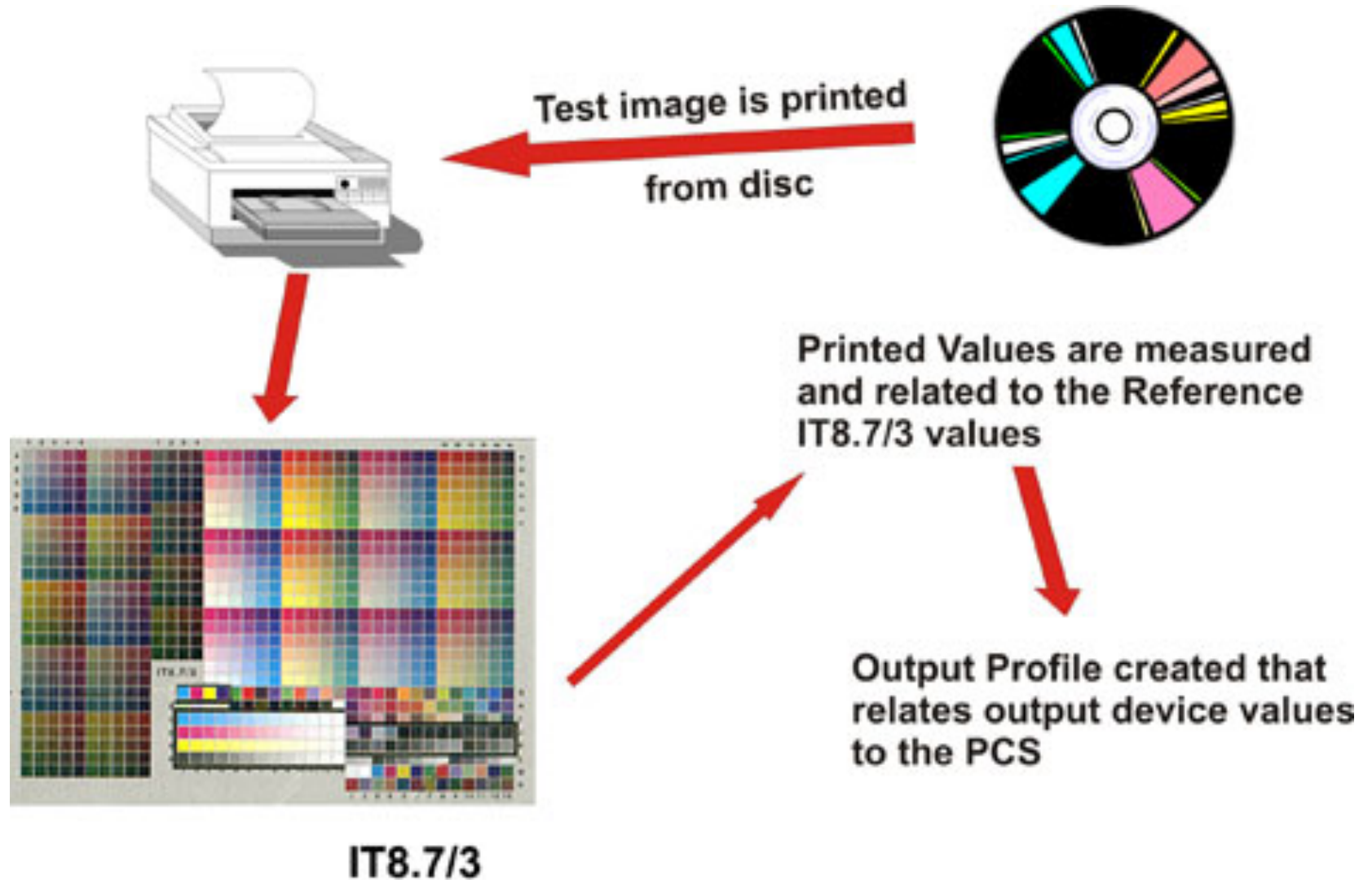
- Mögliche Probleme, falls Gamuts nicht gleich
 - Nicht alle Farben des Ursprungsraumes im Zielraum
 - Nicht alle Farben des Zielraumes ausgenutzt
- Rendering Intent gibt an, nach welchen Regeln Farben in andere umgewandelt werden



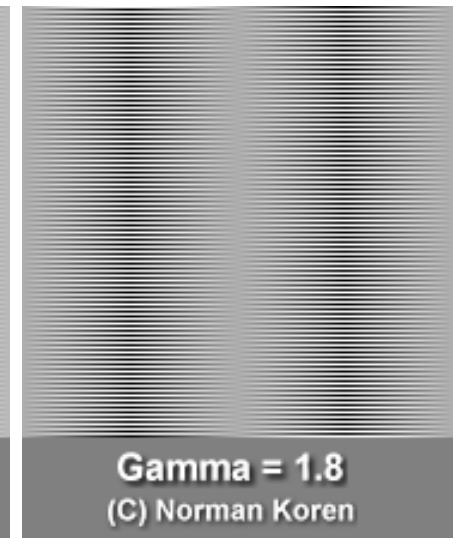
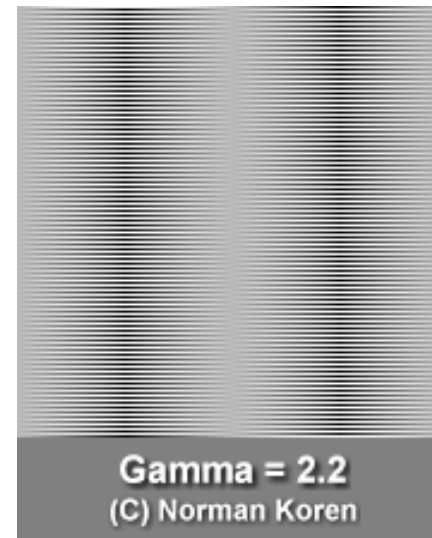
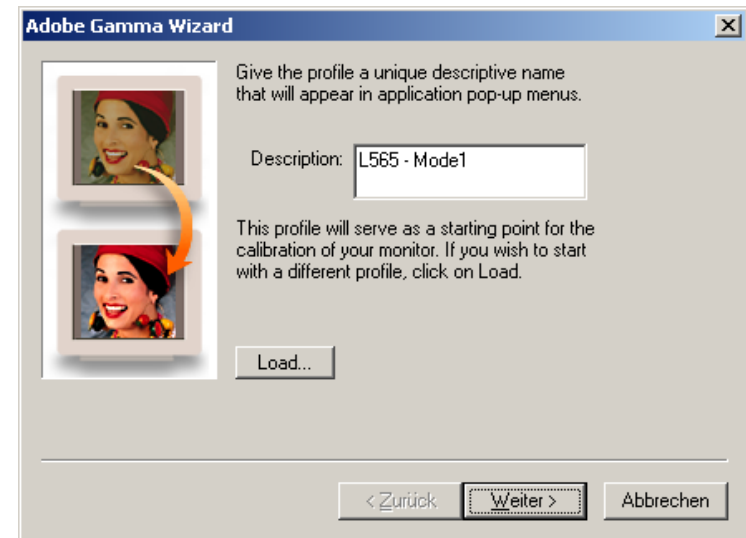
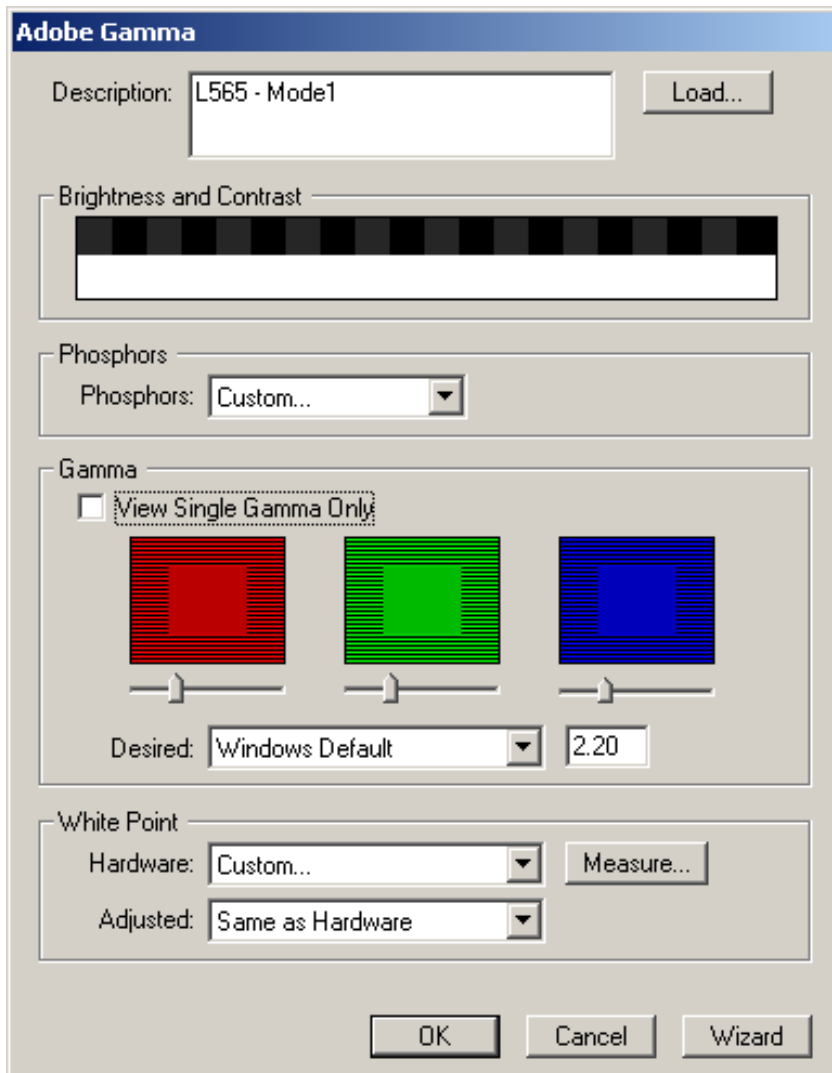
Scannerkalibrierung



Druckerkalibrierung



Monitorkalibrierung – manuell



Monitorkalibrierung: mit Testprint



- Testbild (Print) im Profilabor abholen
- Zugehörige Datei downloaden
- Kontrollierte Lichtsituation herstellen



- Testbild neben den Monitor halten und abgleichen, bis beide übereinstimmen

Monitorkalibrierung – durch Messung



- Genauestes Verfahren
- Erstellt individuelles ICC Profil
- Funktioniert auch für ältere (ausgebrannte) Monitore