

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.)

Vorlesungen

Datum	Thema
24.4.	Einführung, Organisatorisches (Übungen, Klausur)
1.5./8.5.	keine Vorlesungen (wegen 1. Mai und CHI-Konferenz)
15.5.	Abtastung von Bildern, Punktbasierte Verfahren der Bildverbesserung
22.5.	Licht, Farbe, Farbmanagement
30.5.	Konvolution, Filterung im Ortsraum (Verschiebung wegen Pfingstdienstag)
5.6.	Fouriertransformation: Grundlagen
12.6.	Filterung im Frequenzraum
19.6.	Kanten, Linien, Ecken
26.6.	Segmentierung
3.7.	Segmentierung, Morphologische Operationen
10.7.	Klassifikation
17.7.	Image Matching
24.7.	Klausur (Hörsaal M 018 im Hauptgebäude, 14-16 Uhr)

Theresienstraße 39,
Raum B 133,
14-16 Uhr

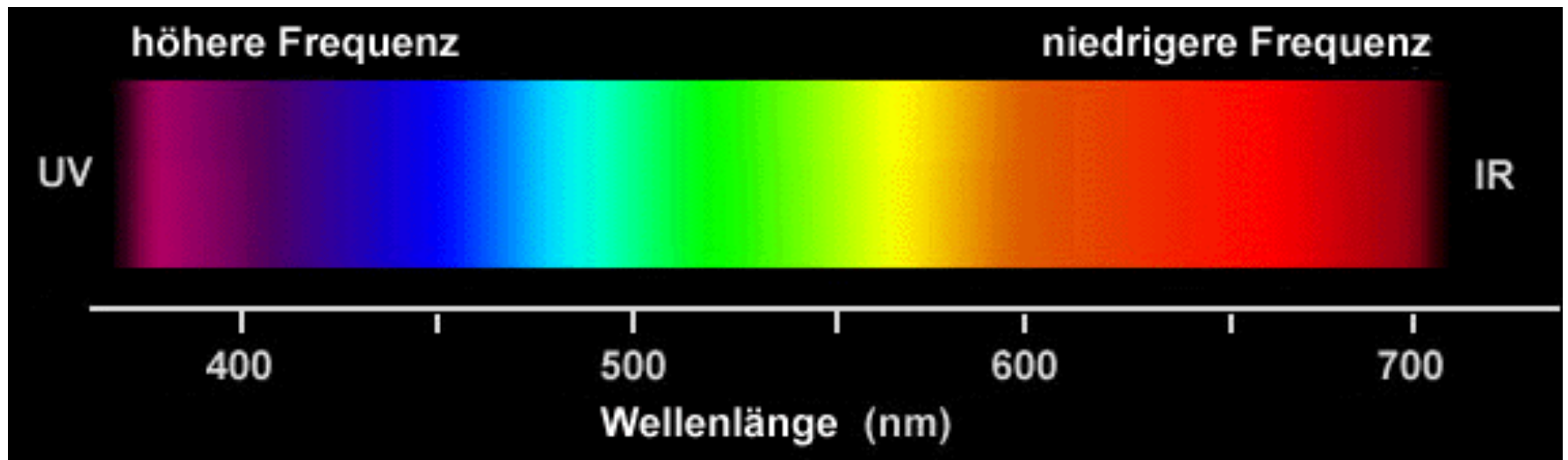
Klausurtermin
steht fest

Themen heute

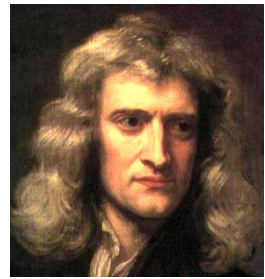
- Licht & Farbe
- Farbräume und Konvertierungen
- Ausgabe von Bildern
- Aufnahme von Bildern
- Farbmanagement

Was ist Licht?

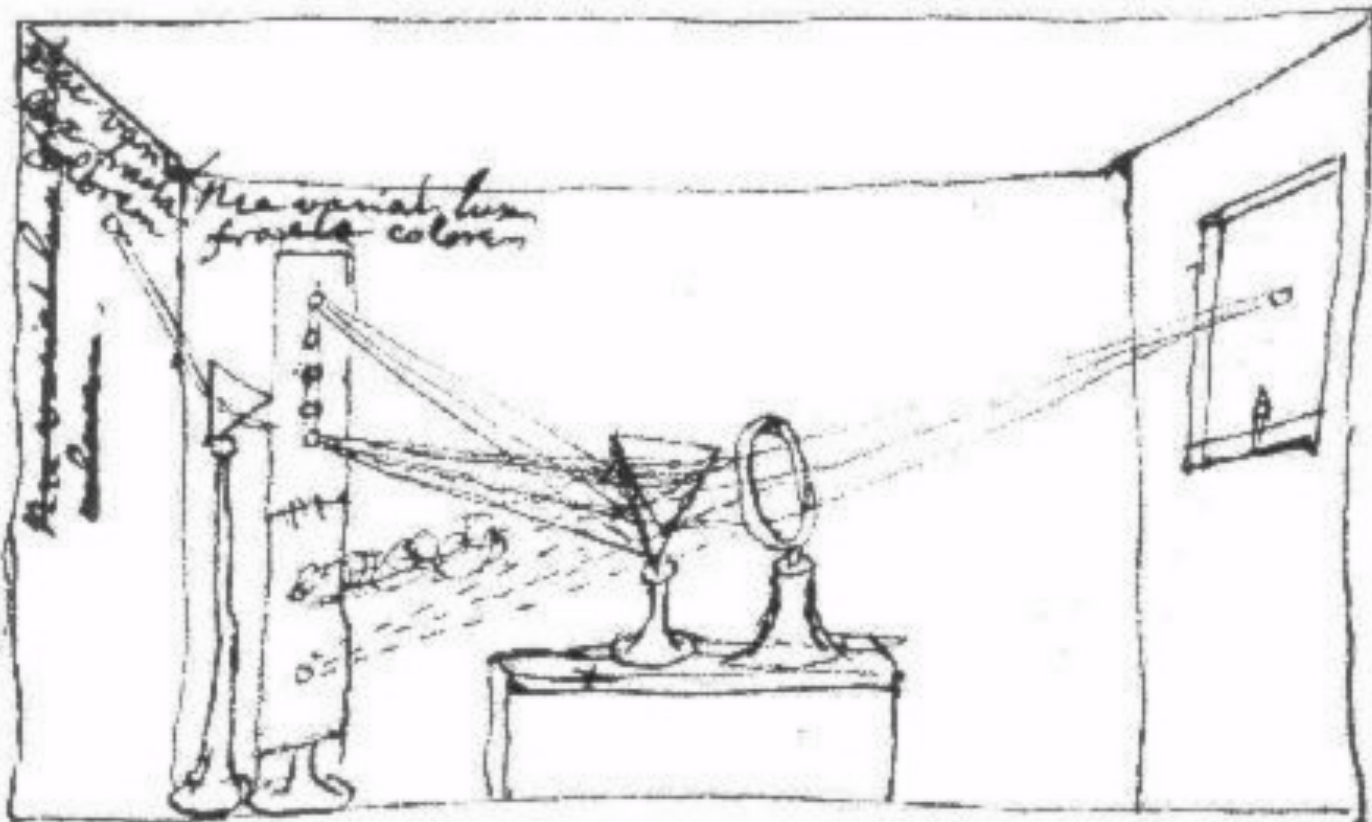
- Licht kann als elektromagnetische Welle beschrieben werden (oder als Teilchen)
- Sichtbarer Bereich zwischen 350 nm und 750 nm
- Zerlegung des Farbspektrums durch ein Prisma



Isaac Newton's Prism Experiments



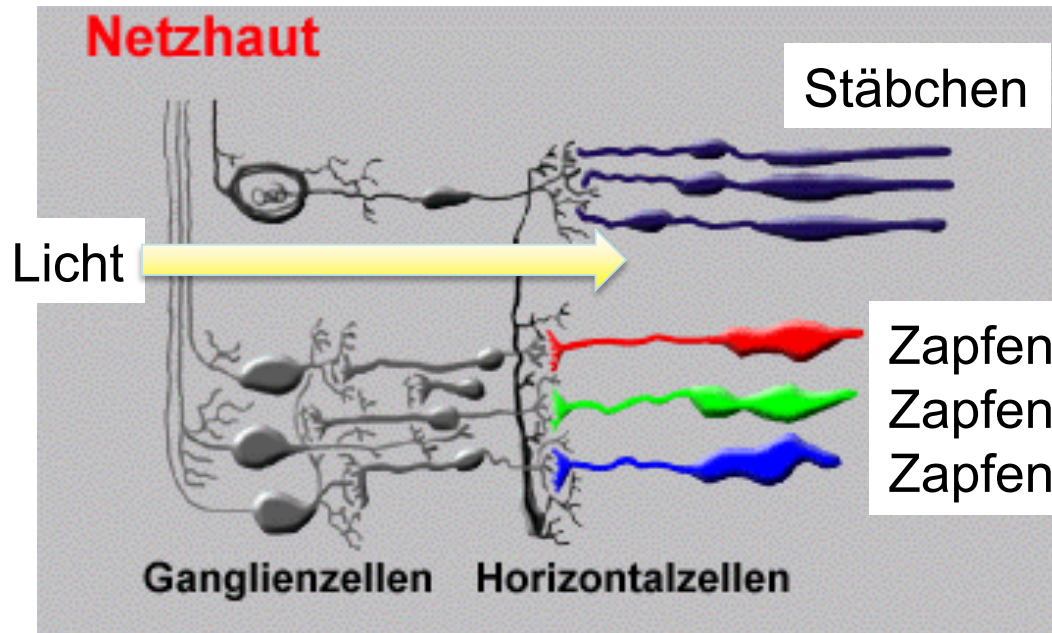
Zeichnung in Isaac Newton's Notizbuch (1664-1666)



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

Fotorezeptoren in der Retina

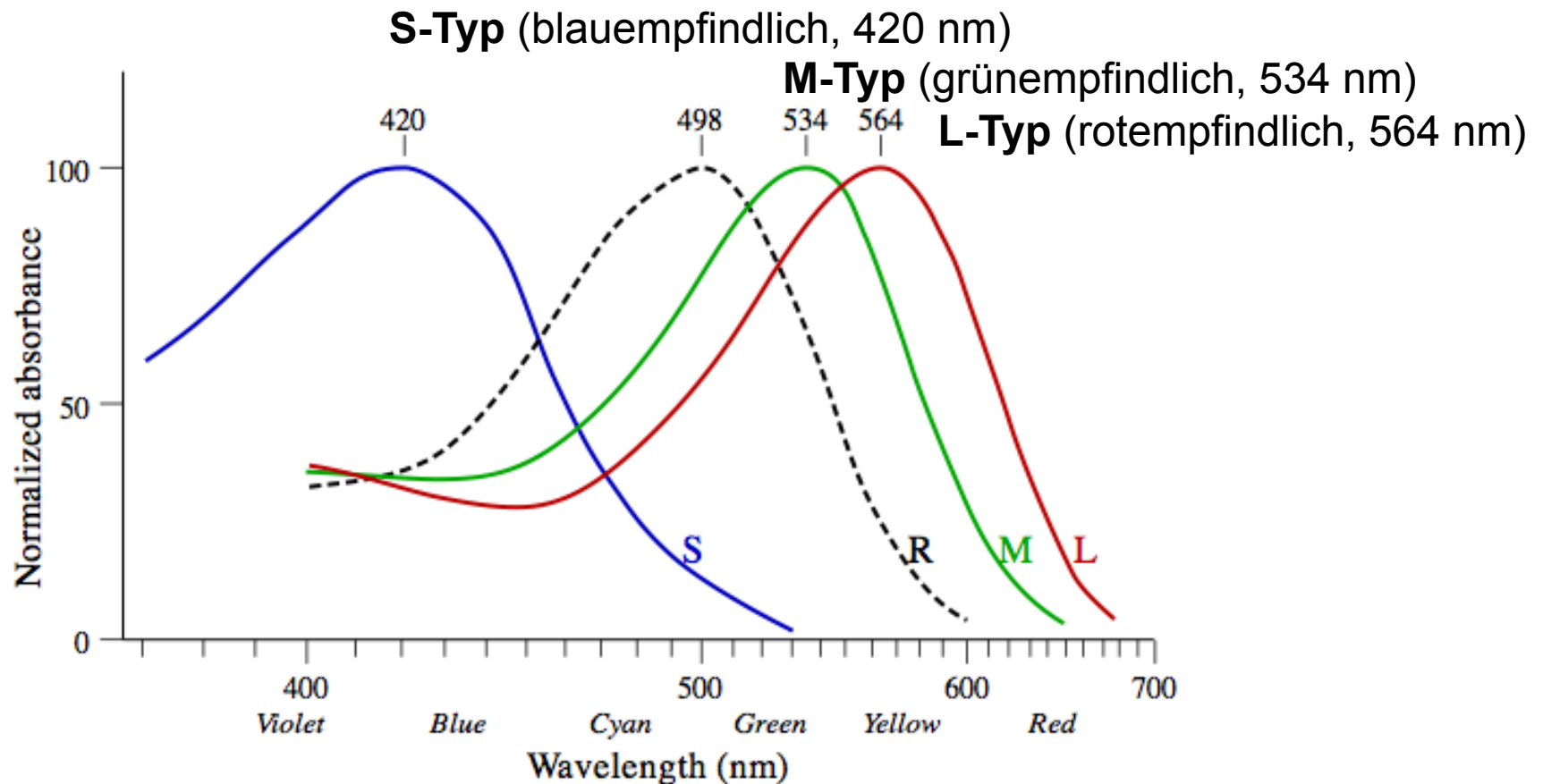
- Stäbchen: skotopisches Sehen
 - sehr lichtempfindlich
 - in der Peripherie der Retina
 - 120 Millionen pro Auge
 - maximale Sensitivität bei 500 nm
- Zapfen: photopisches Sehen
 - weniger lichtempfindlich
 - in der Fovea konzentriert
 - 6 Millionen pro Auge
 - 3 Typen (trichromatisches Sehen)
 - S-Typ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



Farbeindruck entsteht aus Kombination der Zapfenaktivierung

Trichromatisches Sehen

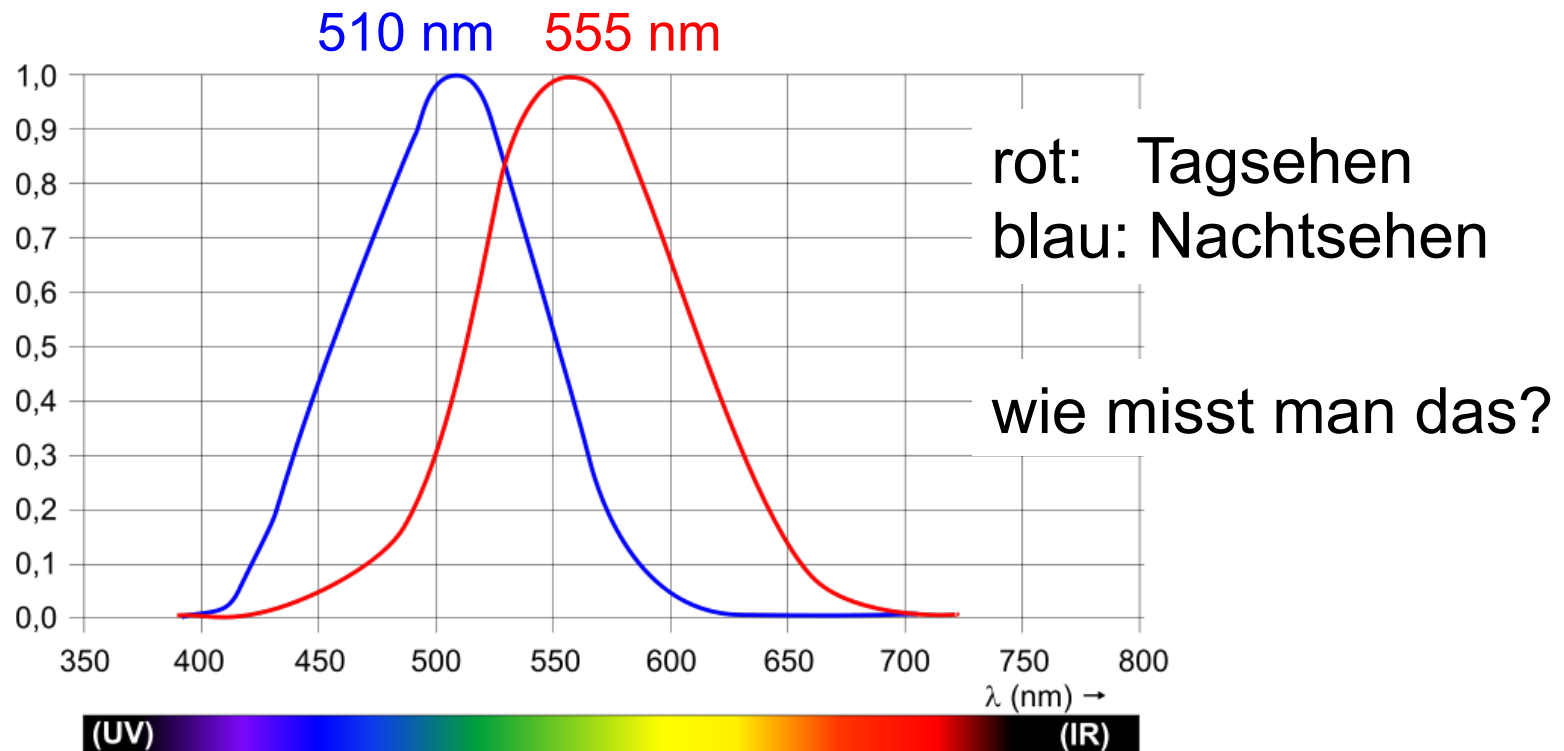
Die drei Zapfen-Typen haben unterschiedliche Empfindlichkeitsmaxima



© Maxim Razin, Bob Mellish, James Kilfiger, CC-BY-SA

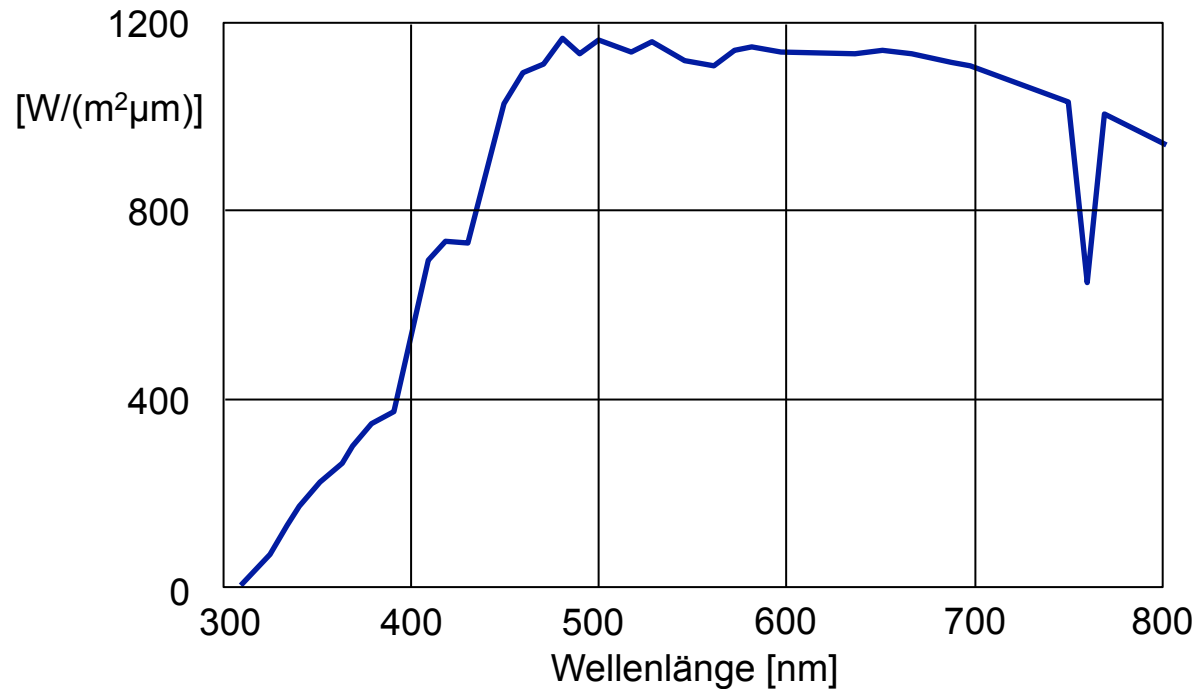
Hellempfindlichkeitskurve ($V(\lambda)$ -Kurve)

- 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

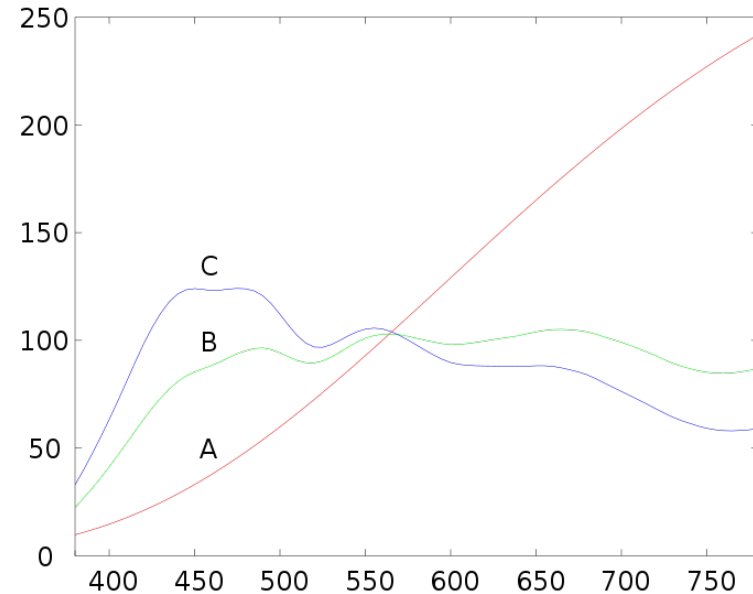
Spektrale Energieverteilung Sonnenlicht



- 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 bedecktem Himmel zur Mittagszeit



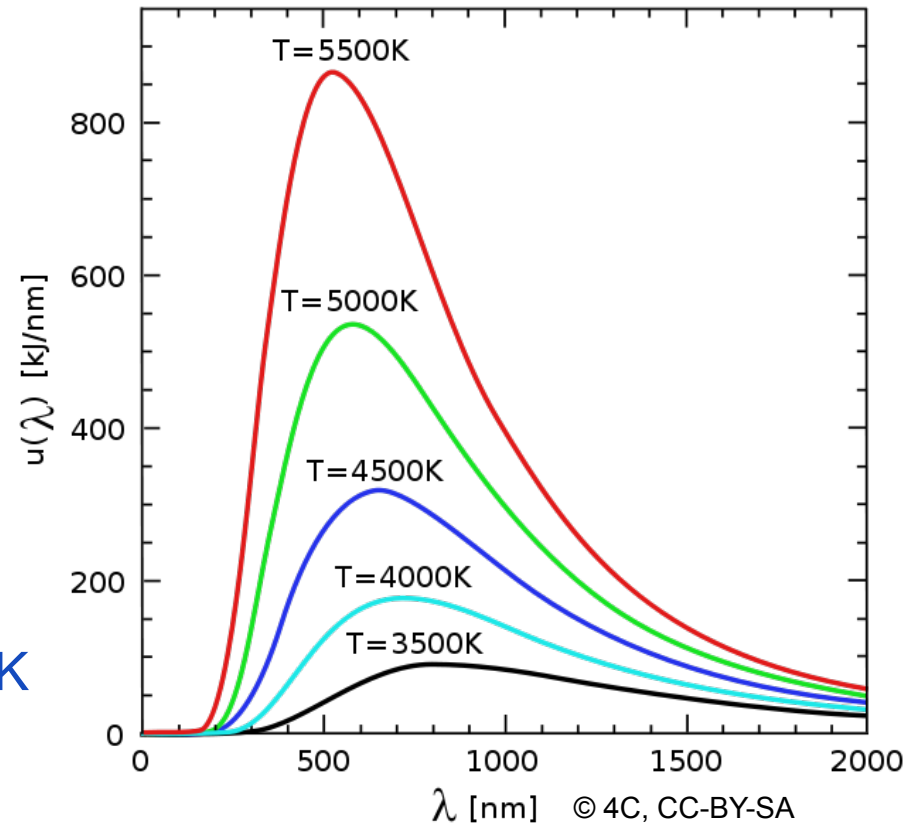
Normlichtart	Farbtemperatur	Anmerkung
A	2856 K	Wolfram-Glühlampe
B	4874 K	Glühlampe mit Kupfersulfat-Küvett
C	6774 K	mittleres Tageslicht

CIE = Commission internationale de l'éclairage

Schwarzer Körper (Schwarzer Strahler)

- Schwarzer Körper: Ideale thermische Strahlungsquelle

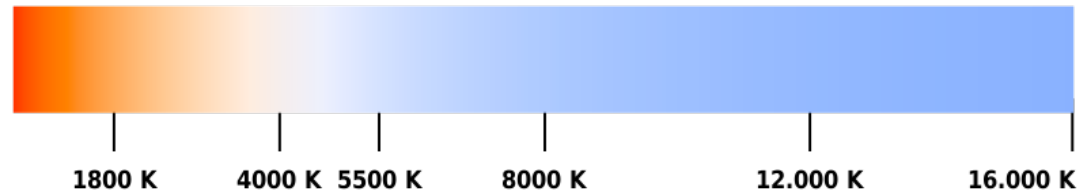
- absorbiert jede elektromagnetische Strahlung vollständig
- sendet elektromagnetische Strahlung mit von Temperatur abhängigem Spektrum
- Strahlungsspektrum bei 5500 K entspricht (ungefähr) dem Spektrum des Tageslichts
- Zusammenhang zwischen Temperatur und Wellenlänge:
 $\lambda_{\max} * T = \text{const}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

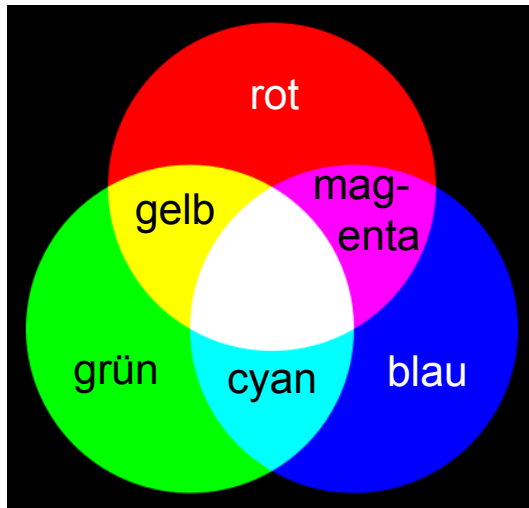
- Beurteilung von Bildern unter definierter Beleuchtung

- Normlicht CIE D65, 6504 K

Additive vs. subtraktive Farbmischung

Additive Farbmischung

- Grundfarben: Rot, Grün, Blau

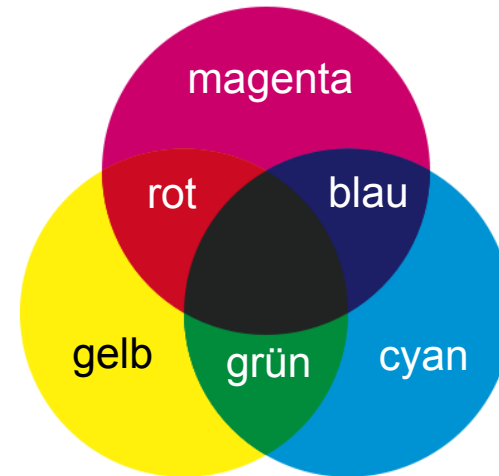


© Quark67, BY-CC-SA

- Physiologische Farbmischung
- Mischung von „Farblichtern“

Subtraktive Farbmischung

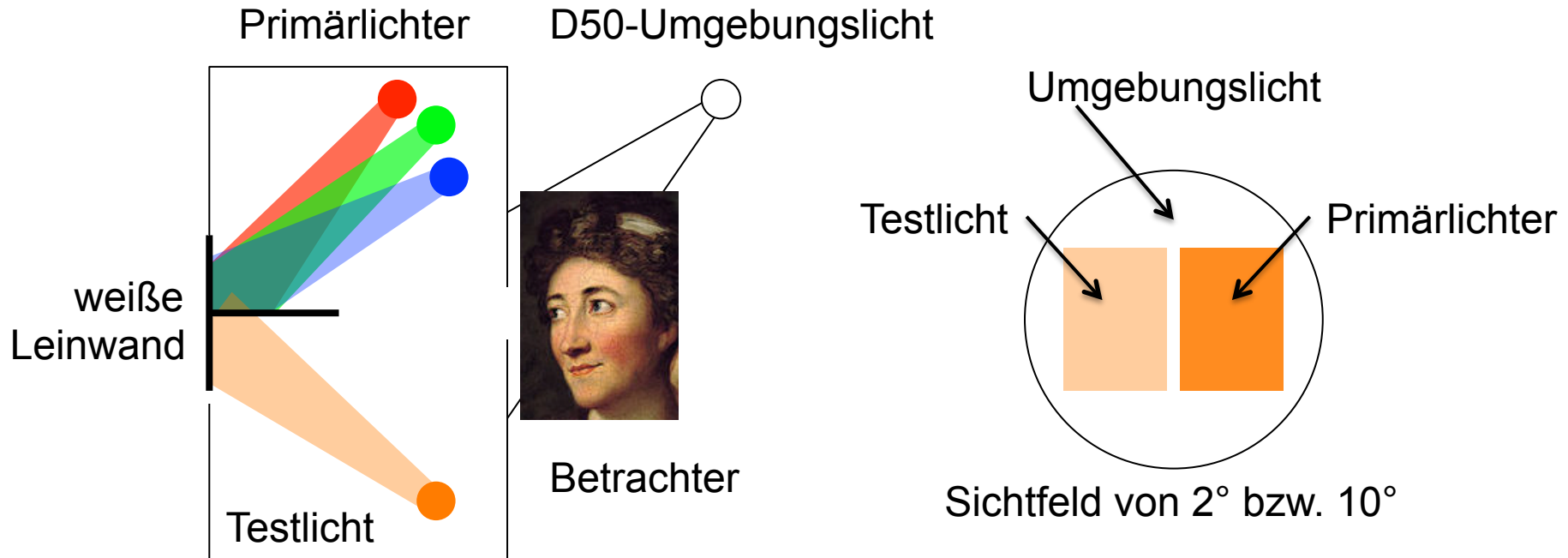
- Grundfarben: Magenta, Gelb, Cyan



© 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)

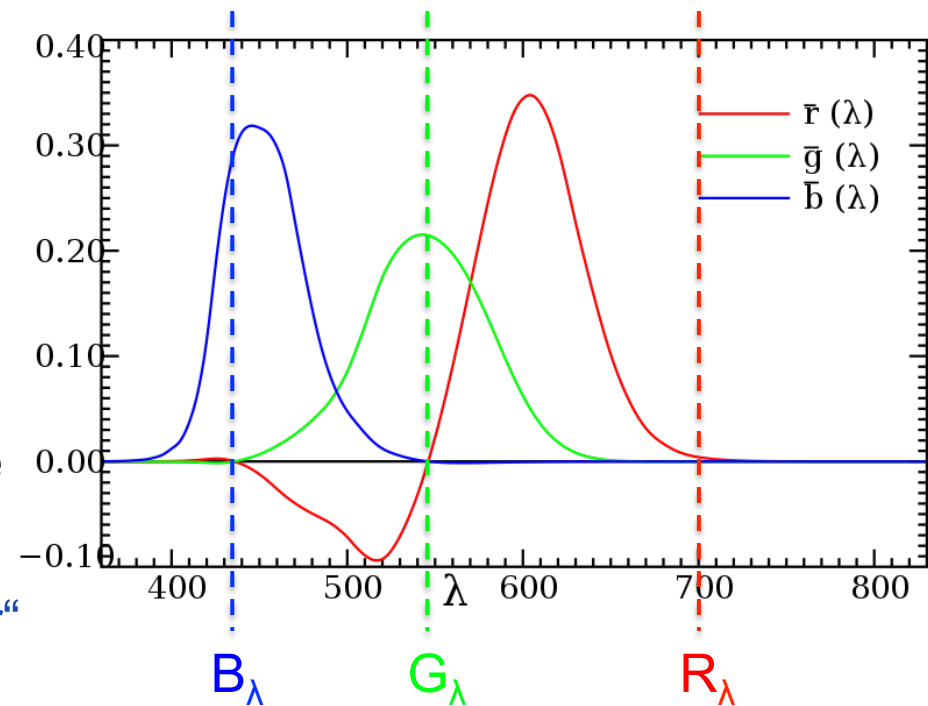
- Kurven: Durchschnittswerte

- $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$
- „CIE-Durchschnittsbetrachter“
- <0 : Änderung des Testlichts

- Skalierung: $\int_0^\infty \bar{r}(\lambda) d\lambda = \int_0^\infty \bar{g}(\lambda) d\lambda = \int_0^\infty \bar{b}(\lambda) d\lambda$

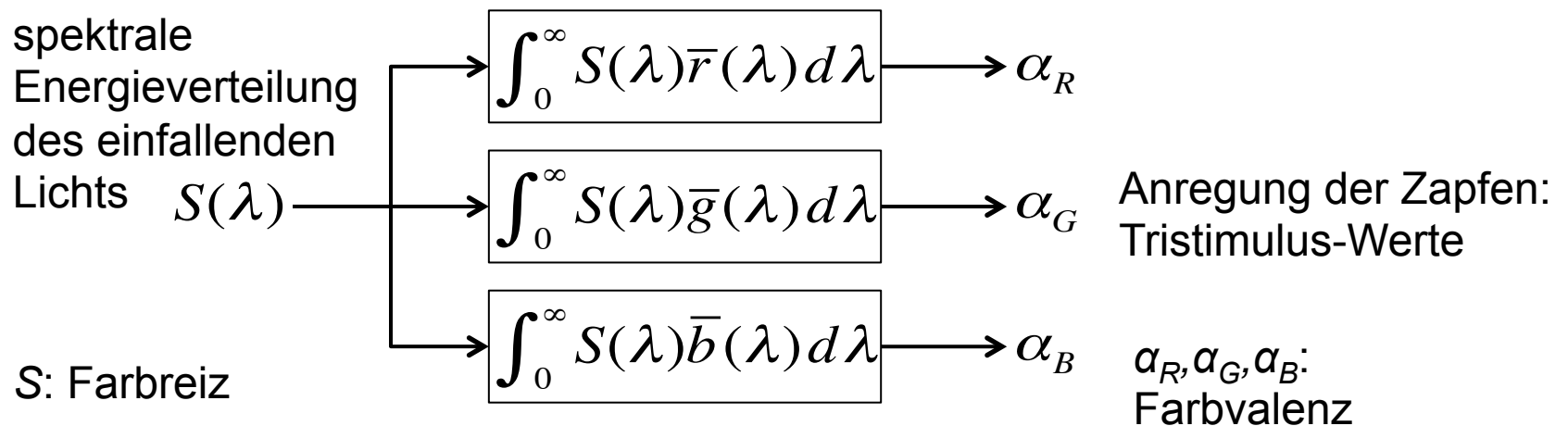
- RGB Tristimulus-Werte ($\alpha_R, \alpha_G, \alpha_B$) für ein Licht mit der Energieverteilung $S(\lambda)$:

$$\alpha_R = \int_0^\infty S(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda \quad \alpha_G = \int_0^\infty S(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda \quad \alpha_B = \int_0^\infty S(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda$$



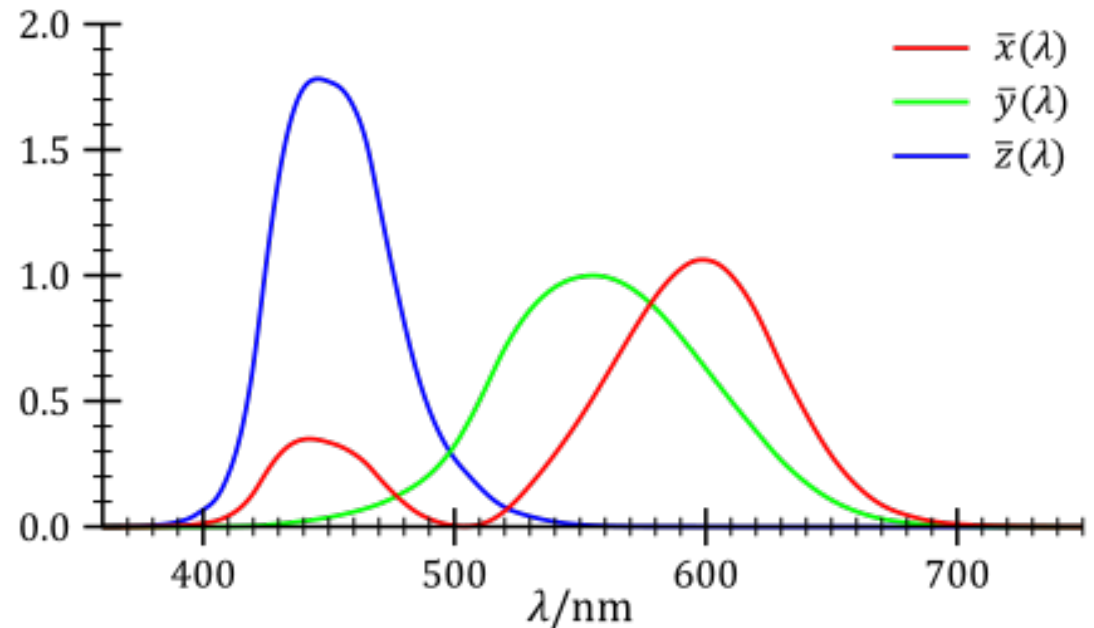
Metamerie und Tristimulus-Werte

- 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



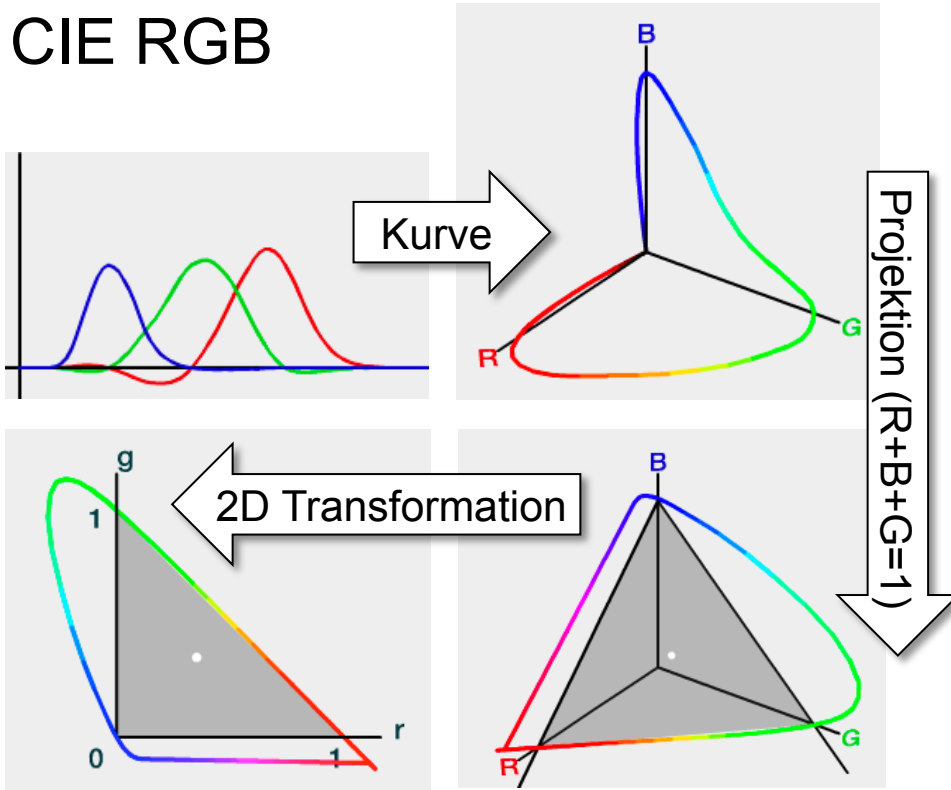
- Virtuelle Primärfarben X,Y,Z

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

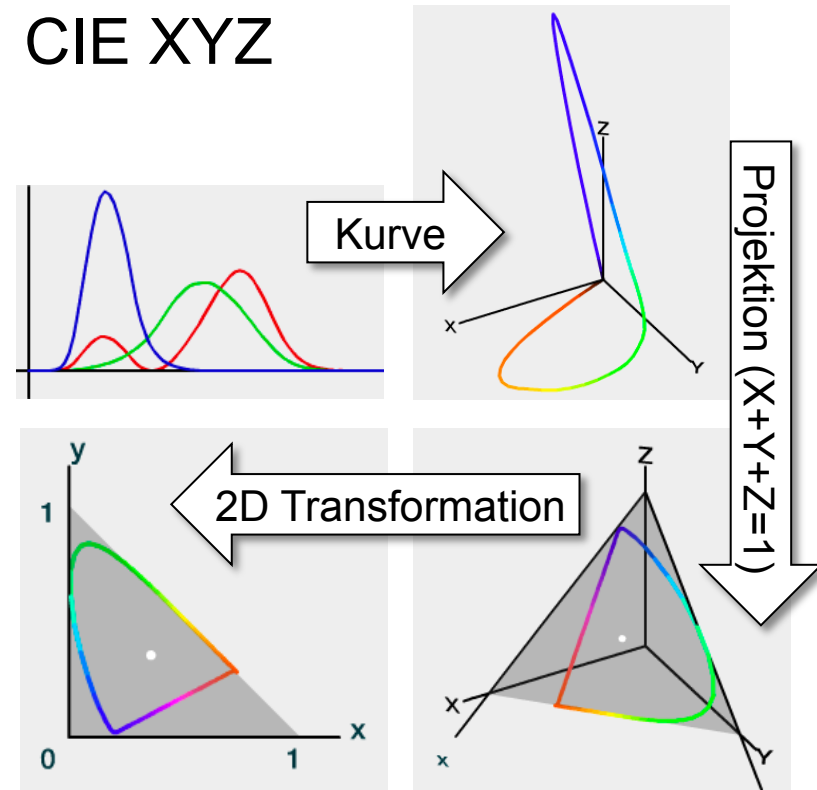
Applet: <http://graphics.stanford.edu/courses/cs178/applets/locus.html>

CIE RGB- und XYZ-Farbräume

CIE RGB

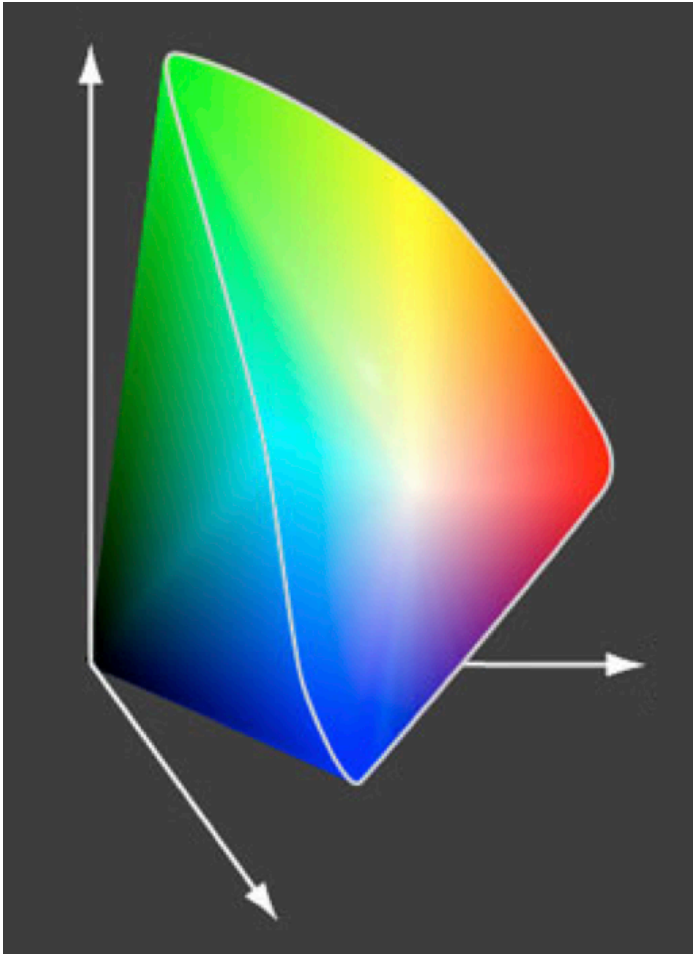


CIE XYZ



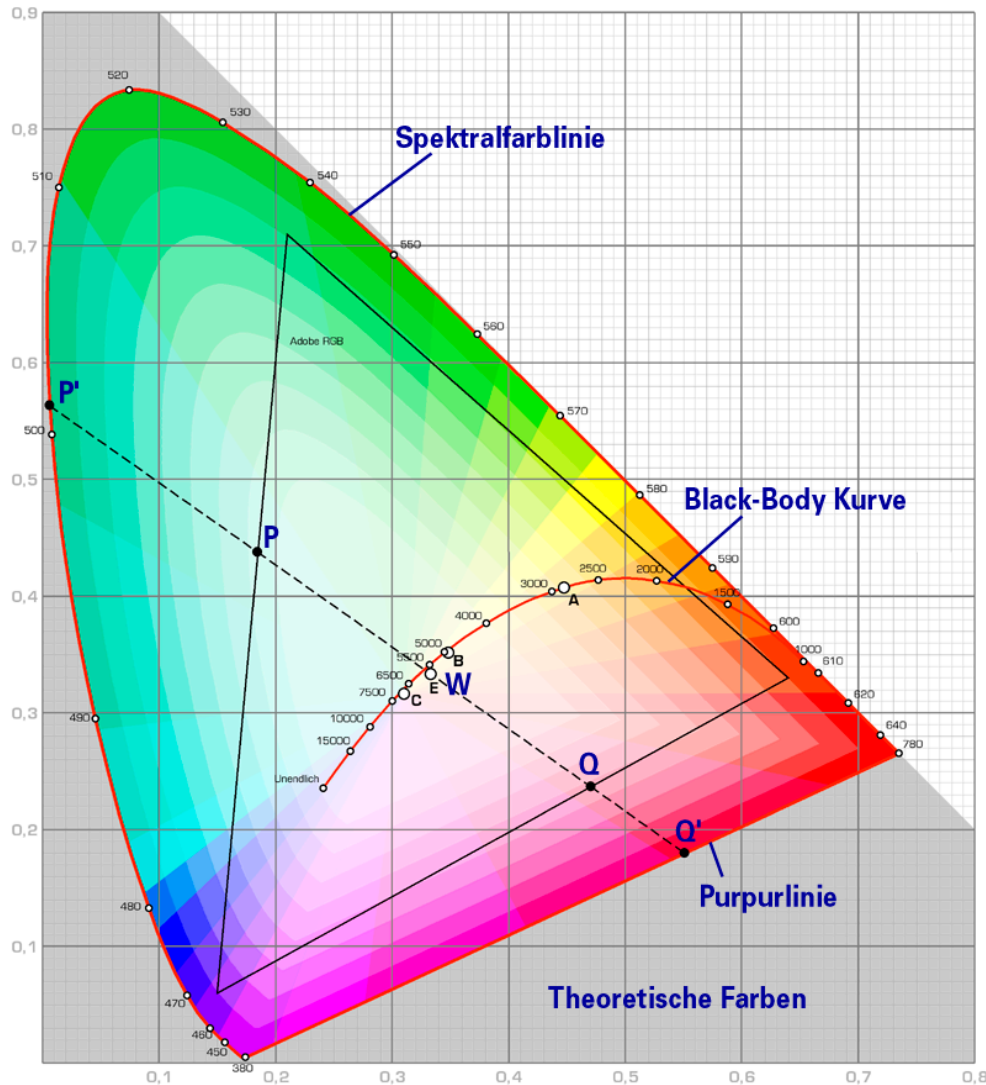
Screenshots from Applet: <http://graphics.stanford.edu/courses/cs178/applets/threedgamut.html>

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

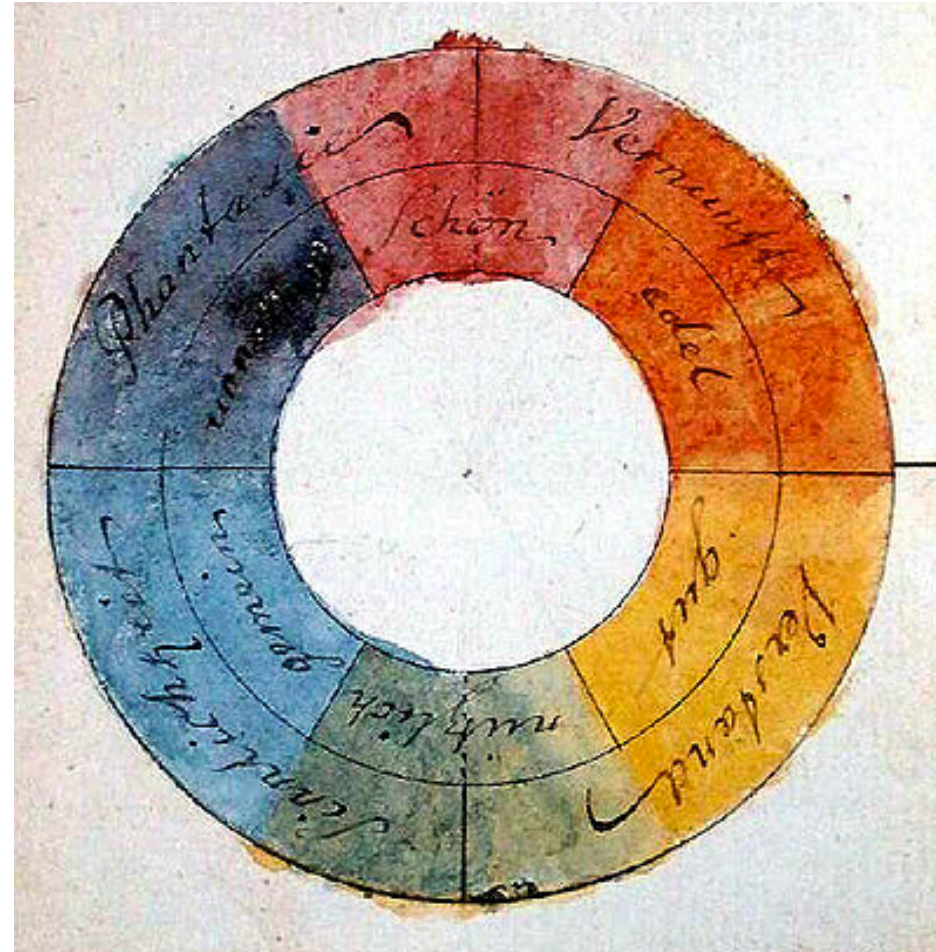


- CIE Chromatizitäts-Diagramm
Gamut der Farbwahrnehmung des Menschen
- Projektion auf Ebene $X + Y + Z = 1$ um Helligkeit nicht zu berücksichtigen
- $x = X / (X + Y + Z)$
- $y = Y / (X + Y + Z)$
- $z = Z / (X + Y + Z) = 1 - x - y$

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



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 Industrie

- Farbsystem nach A. H. Munsell

- Ziel: Farbsystem, das Farbzusammenstellung und Farbkennzeichnung erleichtert

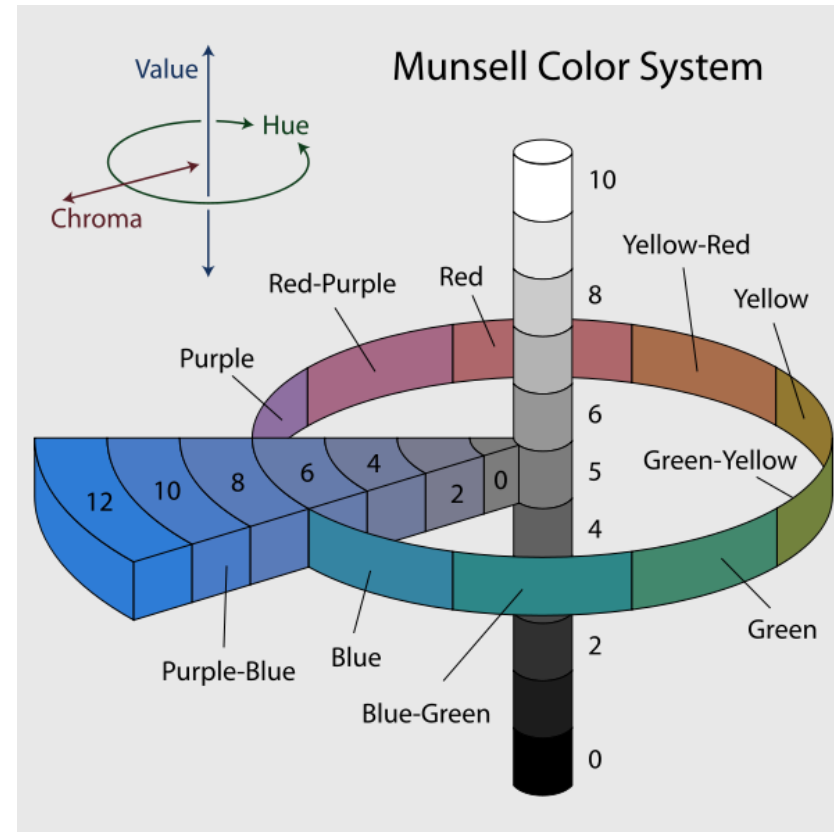
- separiert

- Farbton, Sättigung, Helligkeit

- Farbkennzeichnung

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

- Farbkatalog



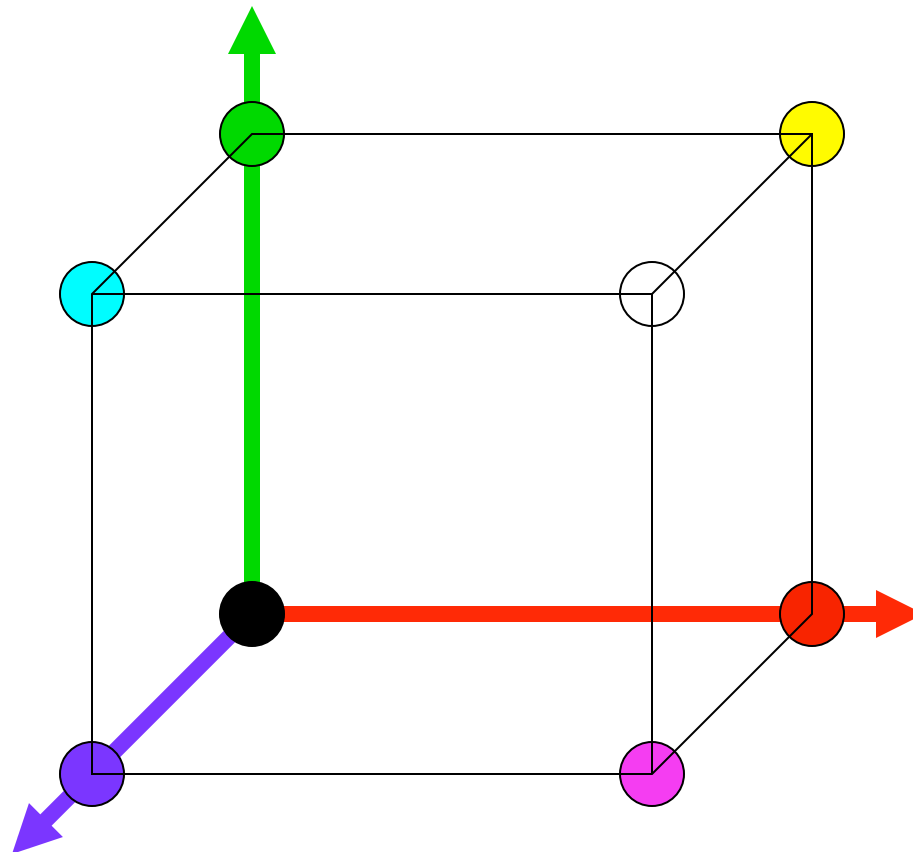
© Jacob Rus, BY-CC-SA

Circle of hues at value 5 chroma 6

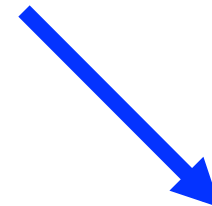
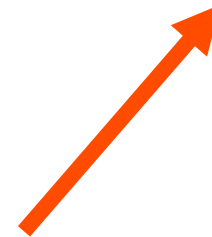
Neutral values from 0 to 10

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

RGB Farbmodell

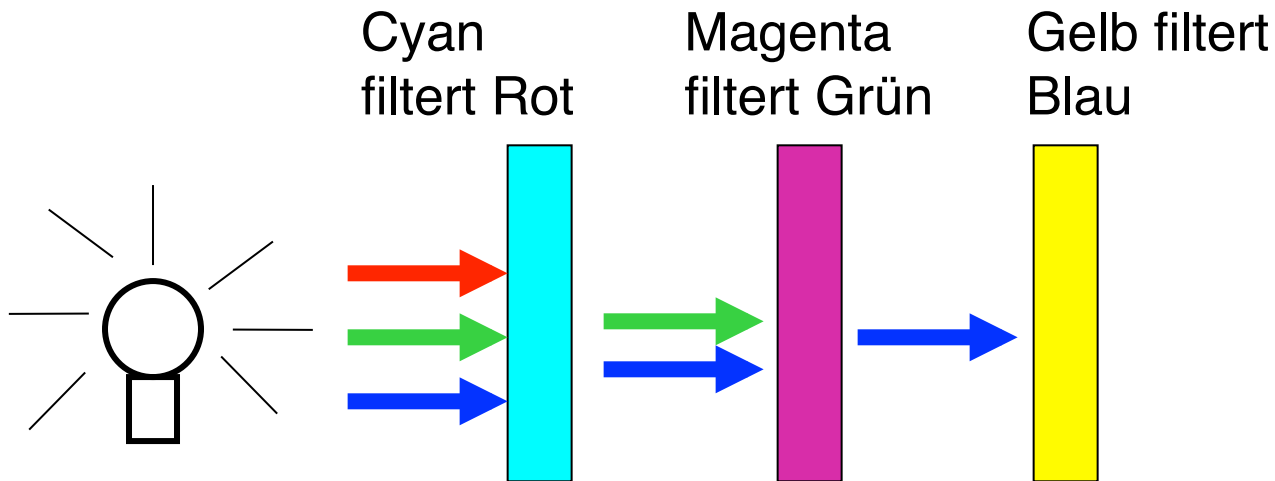


RGB Farbkanäle



Subtraktive Farbmischung

- Farbfilter absorbieren Teile des Farbspektrums

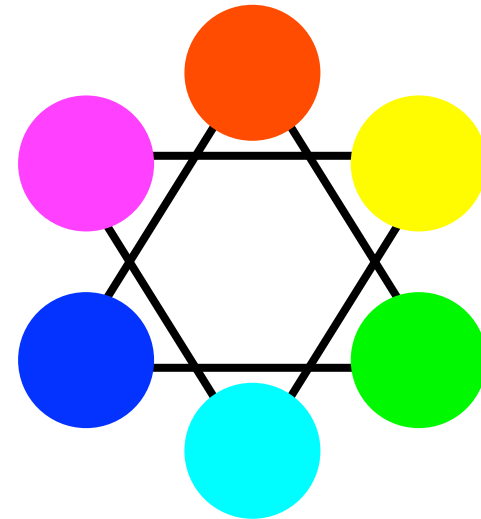


- Lambert-Beersches Gesetz: Verringerung der transmittierten Lichtintensität
 - Doppelte Menge von Pigmenten halbiert Lichtintensität
 - Doppelte Dicke des Materials halbiert Lichtintensität
 - Absorption hintereinander liegender Filter ist additiv

Umrechnung RGB – CMY

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

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



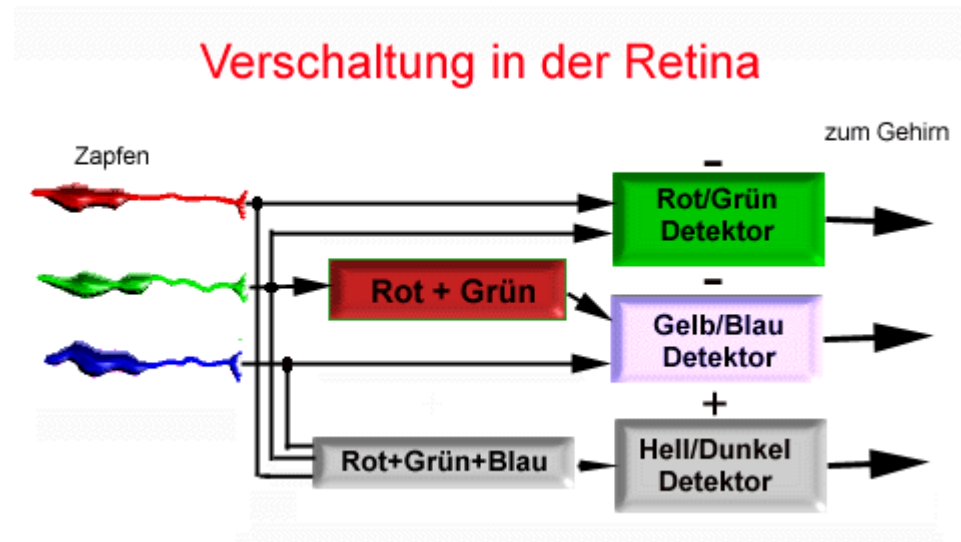
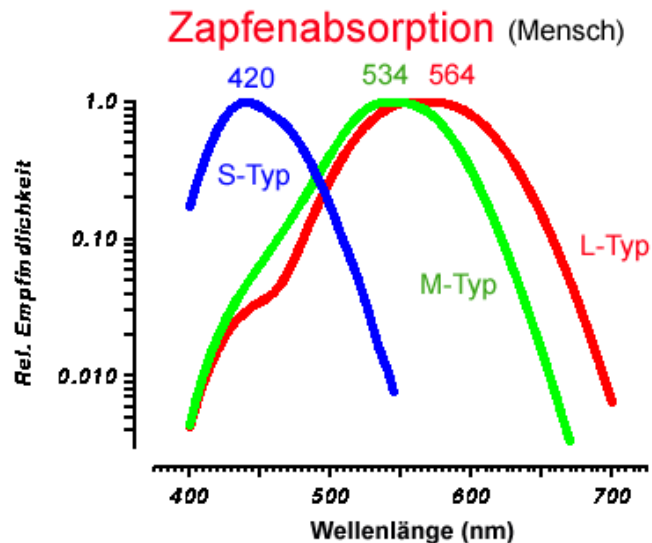
- Beispiel (8 bit/Kanal, $w_{\max} = 255$):
(255r,0g,0b) = (0c,255m,255y)

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 (2%:33%:65%)



Umwandlung RGB → Graustufen

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



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



Umrechnung RGB \rightarrow YUV

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

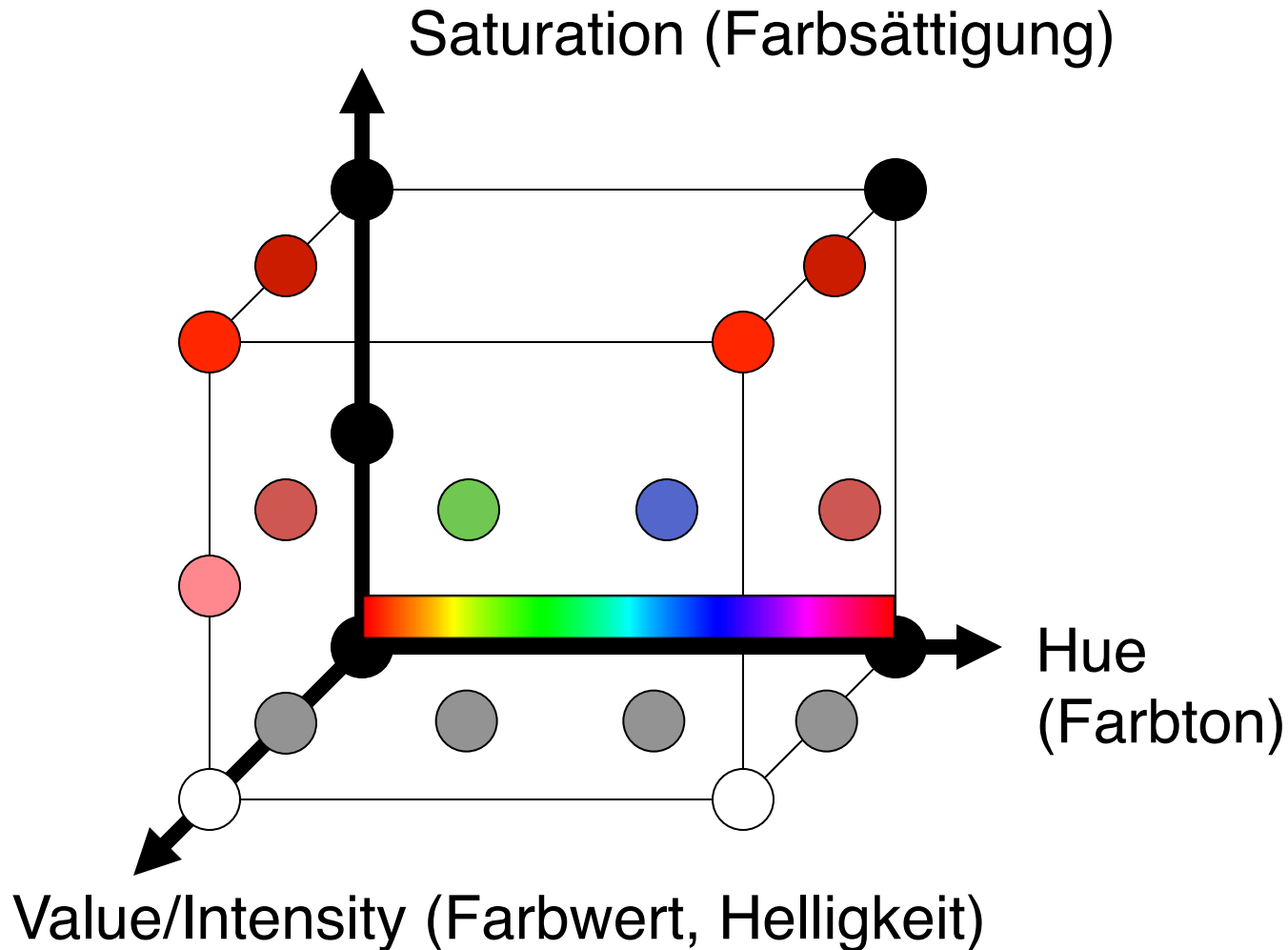
$$u = 0.493(b - y)$$

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

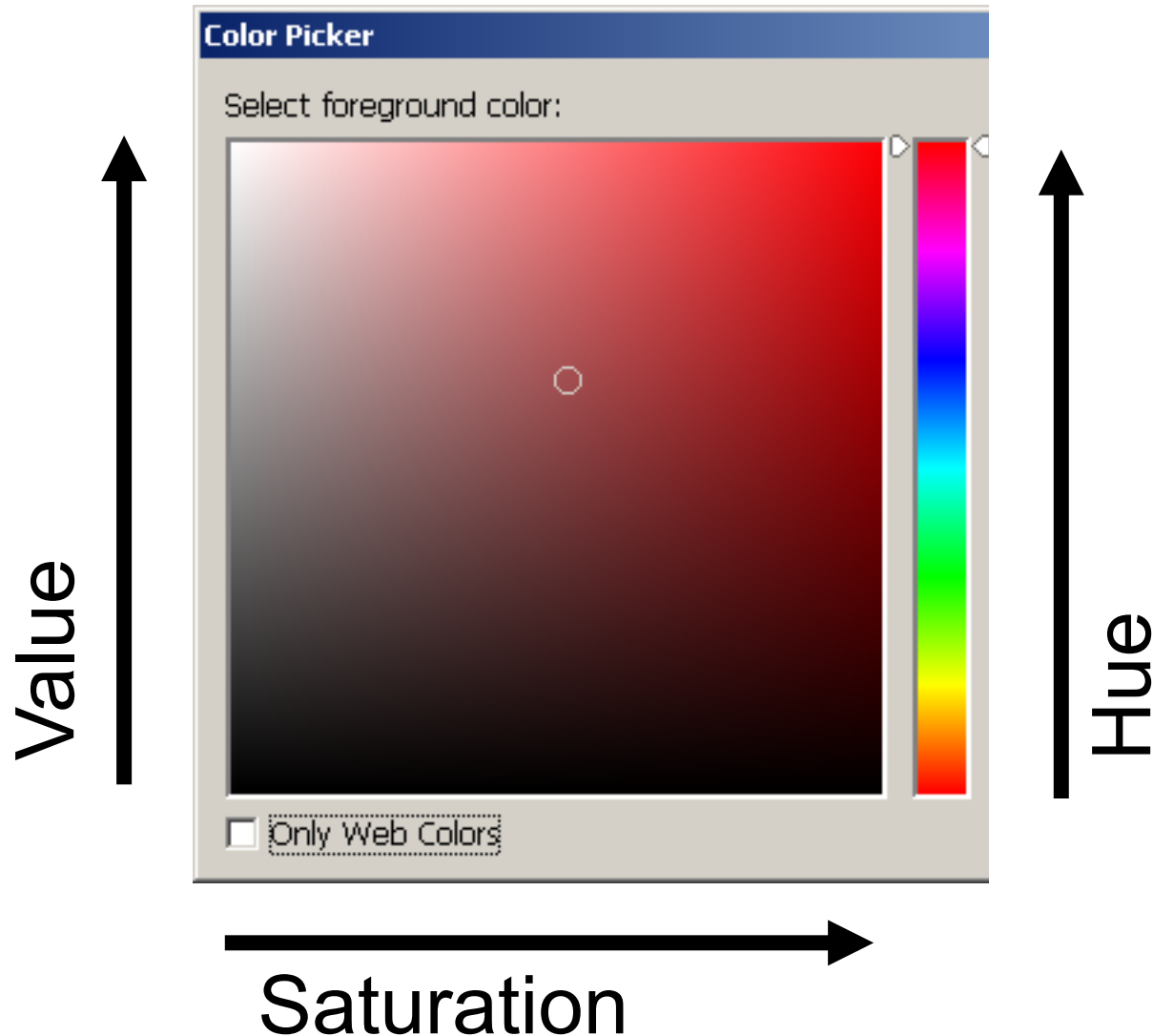
- Y = Luminanz (Helligkeit), U,V = Chrominanz (Farbanteile)
- JPEG verw. YUV und bewahrt mehr Detail in Y als in U,V
- Y alleine = Graustufenbild (\rightarrow S/W Fernseher)
- Verwendung in PAL Fernsehnorm:

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

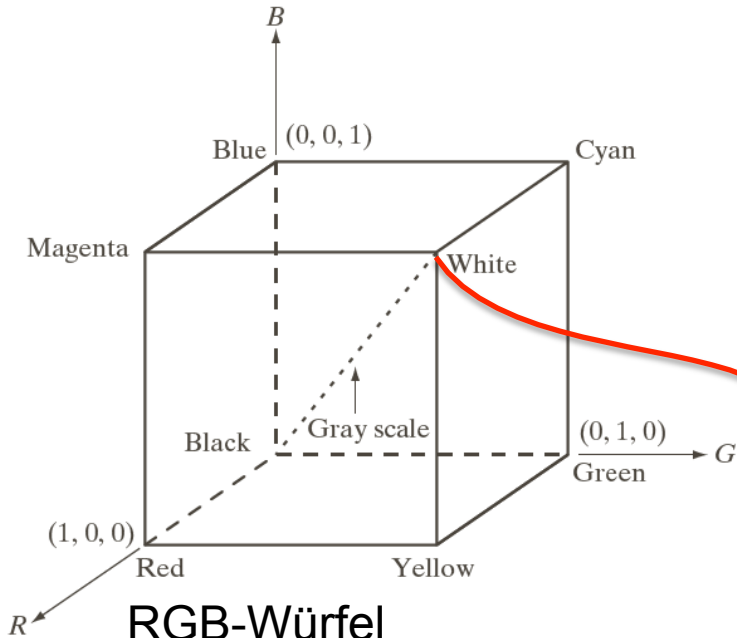
HSV (auch: HSI) Farbmodell



HSV Farbraum, andere Darstellung

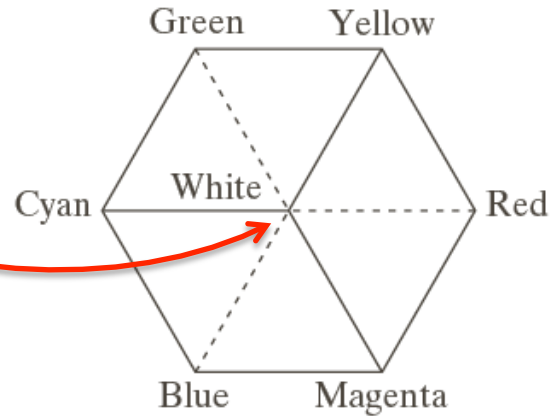


Beziehung zwischen RGB und HSV

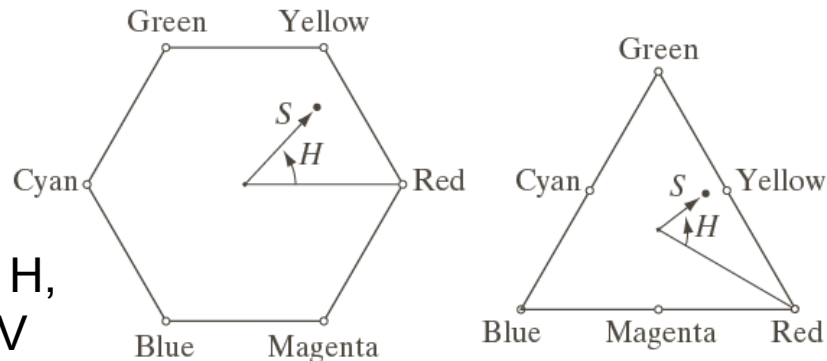


RGB-Würfel
Grauwert-Achse
diagonal

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

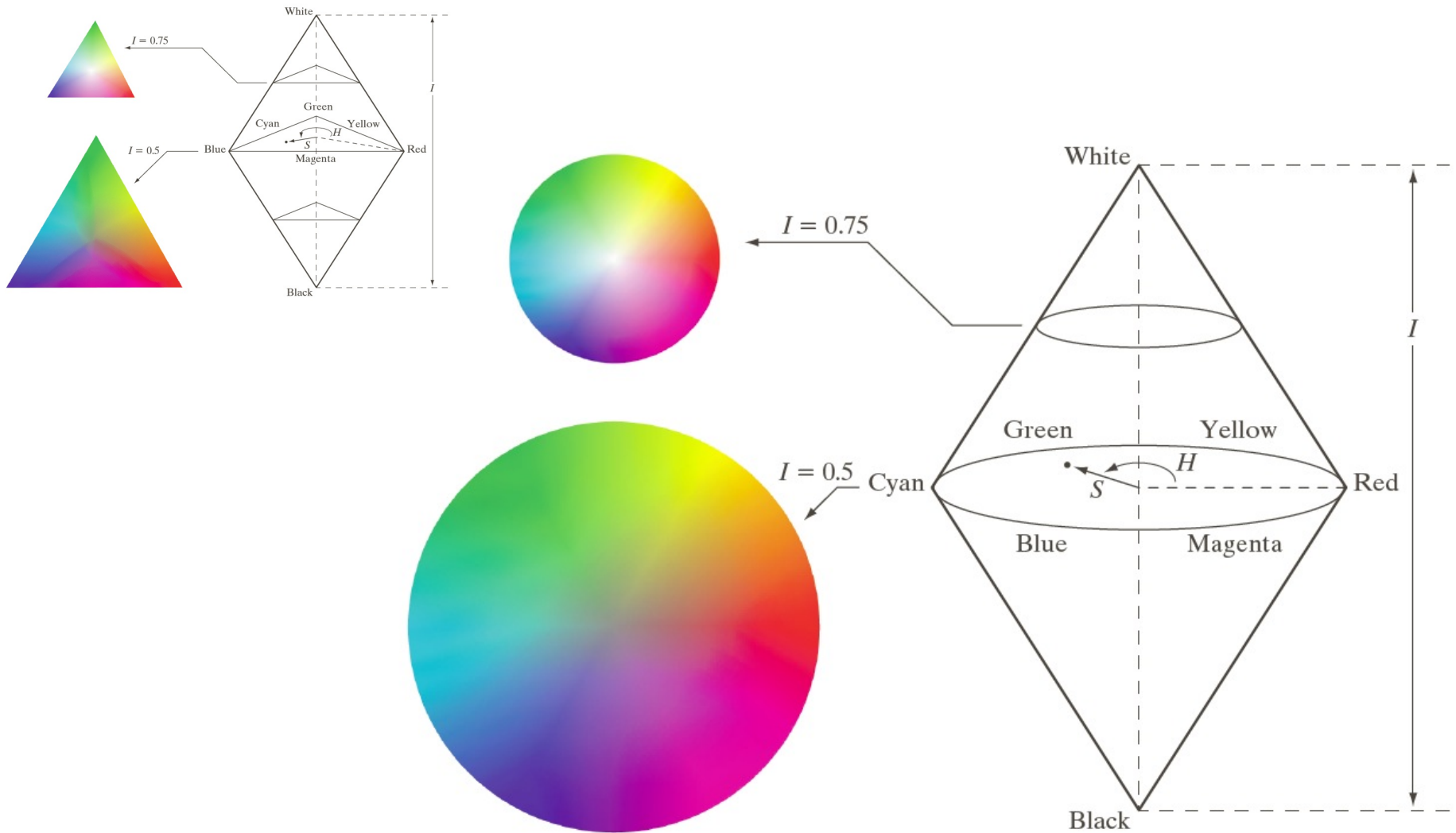


Abbildung: © R. C. Gonzalez & R. E. Woods, Digital Image Processing

Umrechnung RGB → 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 $h = h + 360^\circ$

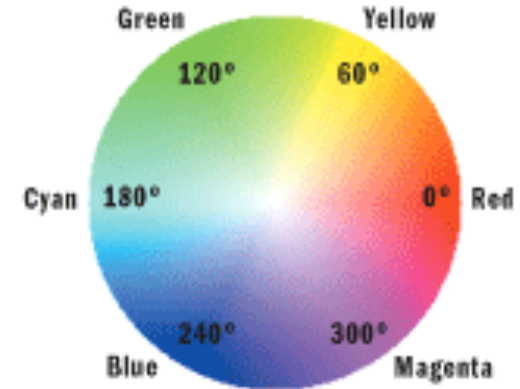
$$s = \begin{cases} 0, & \text{falls } \max = \min \\ \frac{\max - \min}{\max}, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$v = \max$$

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

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

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

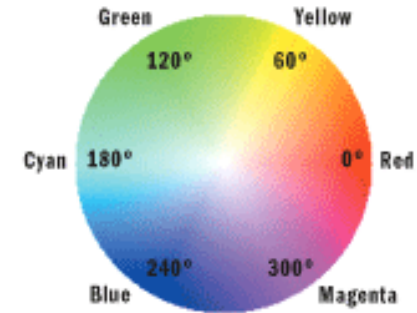


Umrechnung HSV \rightarrow RGB (Foley/van Dam)

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

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

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



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

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

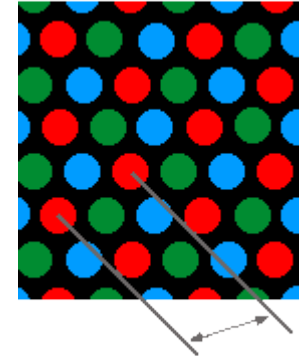
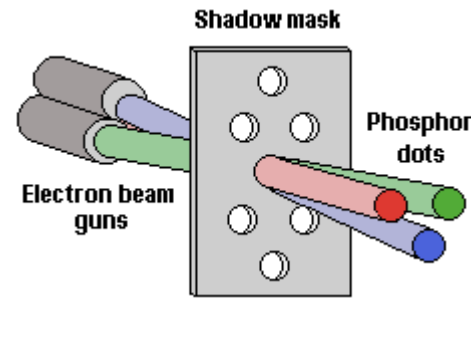
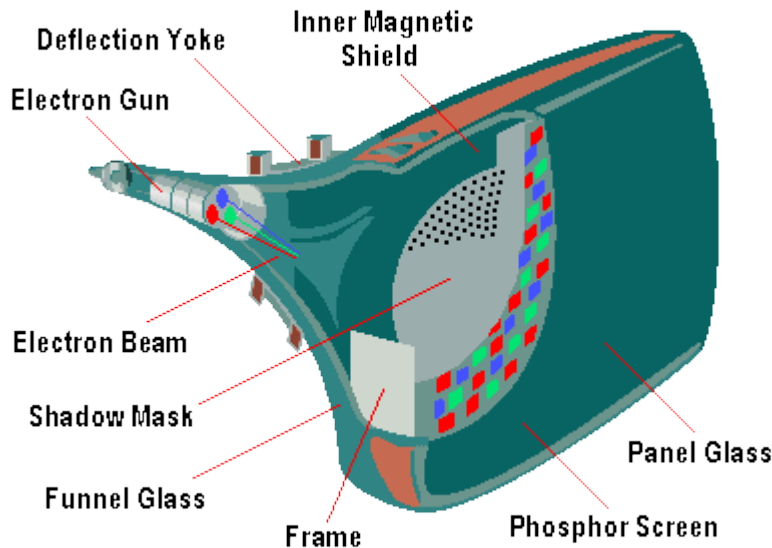
$$(R, G, B) := \begin{cases} (V, t, p), & \text{falls } h_i \in \{0, 6\} \\ (q, V, p), & \text{falls } h_i = 1 \\ (p, V, t), & \text{falls } h_i = 2 \\ (p, q, V), & \text{falls } h_i = 3 \\ (t, p, V), & \text{falls } h_i = 4 \\ (V, p, q), & \text{falls } h_i = 5 \end{cases}$$

AUSGABE VON BILDERN

Farbdarstellung

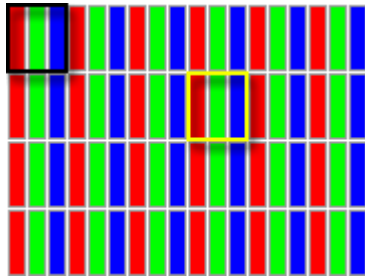
- Durch additive Mischung
 - CRT
 - LCD-Monitore
 - LCD-, DLP-Beamer
- Durch subtraktive Mischung
 - Tintenstrahldrucker
 - Fotografischer Film

Röhrenmonitore (Quelle: [pctechguide](#))

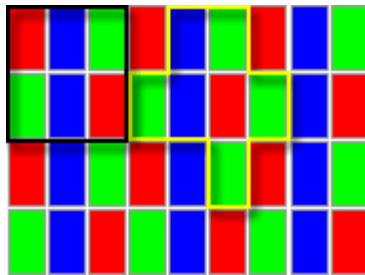


- Rote, grüne, blaue Phosphorpunkte
- Werden durch Lochmaske mit Elektronen beschossen und leuchten dadurch auf
- Je 3 Punkte = 1 Pixel

TFT Monitore



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

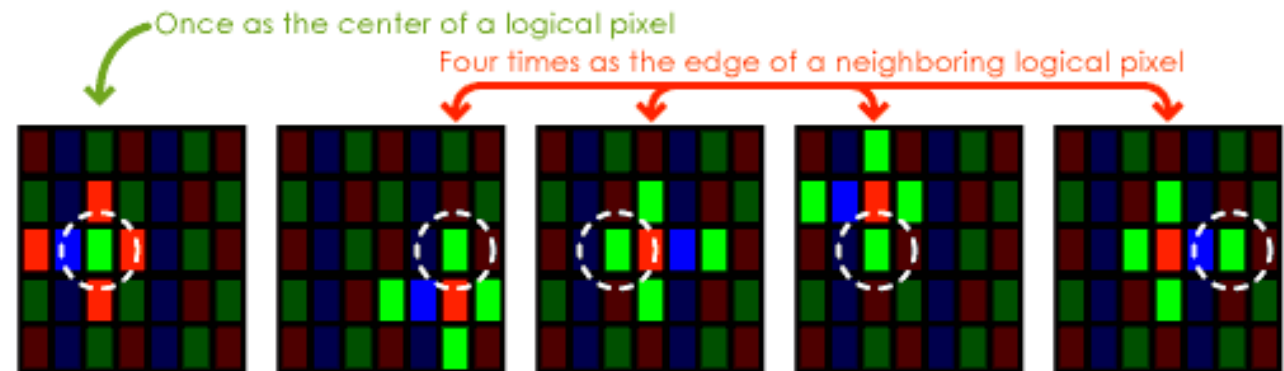


Quelle: [Samsung](#)



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

Quelle: [Pentile](#)

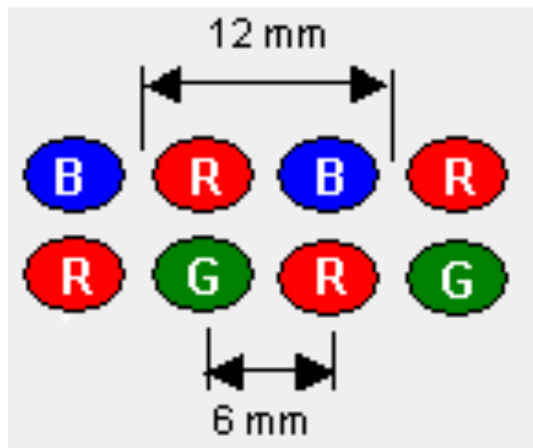
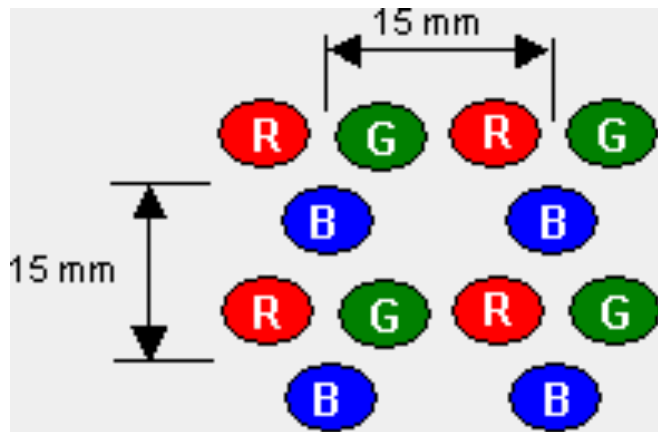


The 5 logical pixels (circled) in which a green subpixel participates

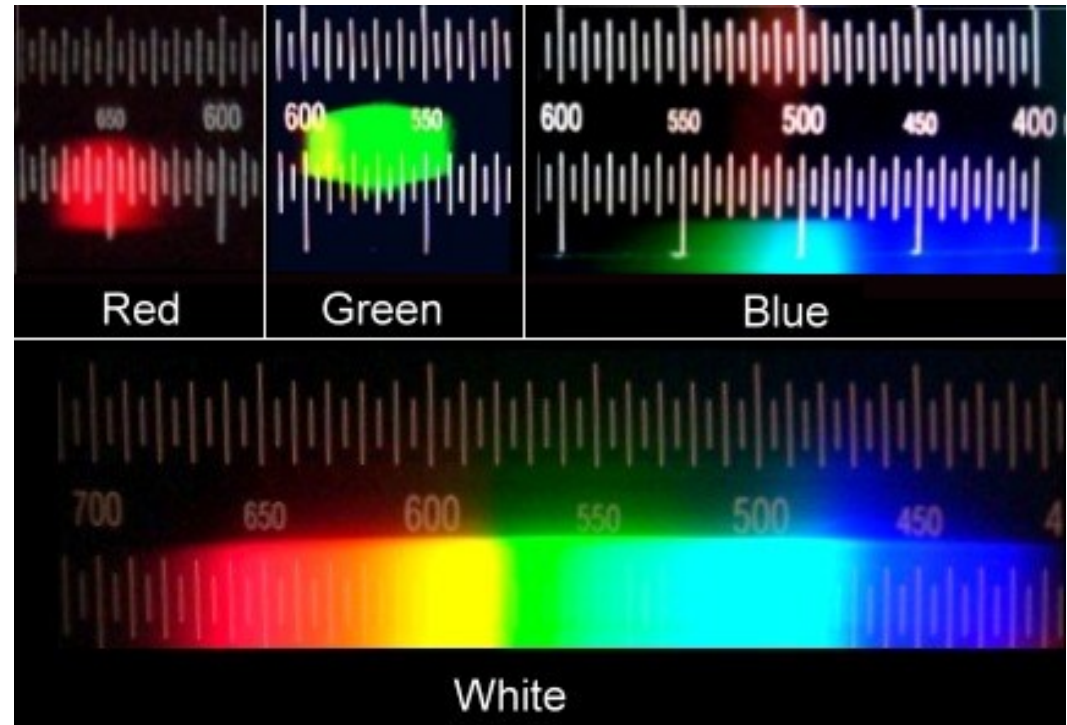
...hence a PenTile Matrix 

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

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

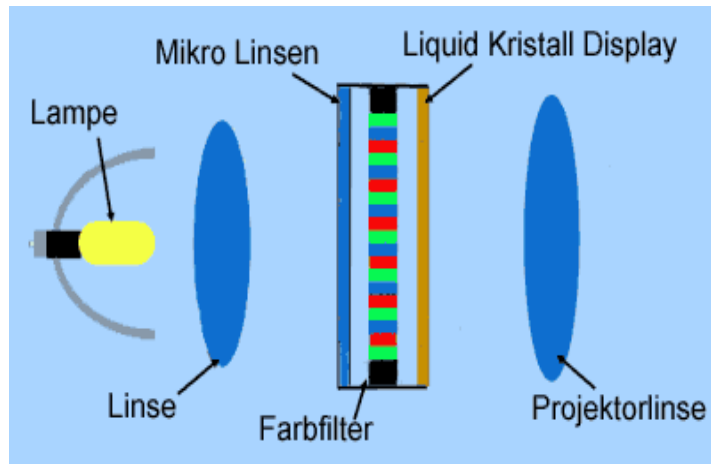


LED Farbspektren

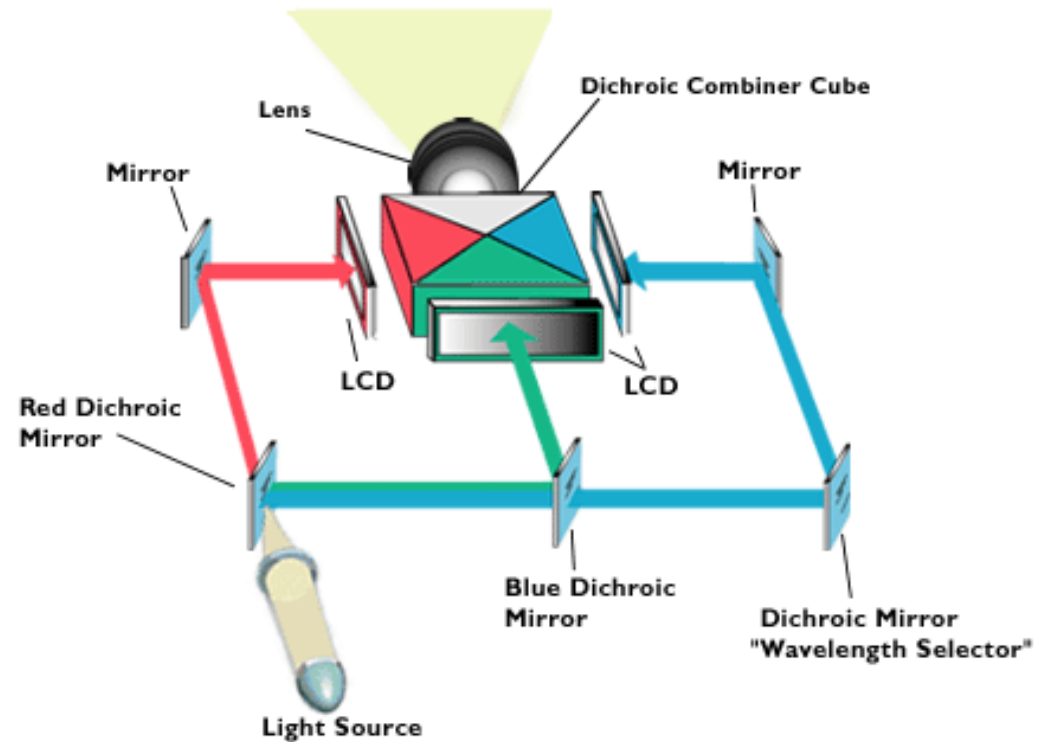


© Anton (rp), BY-CC-SA

LCD-Projektor

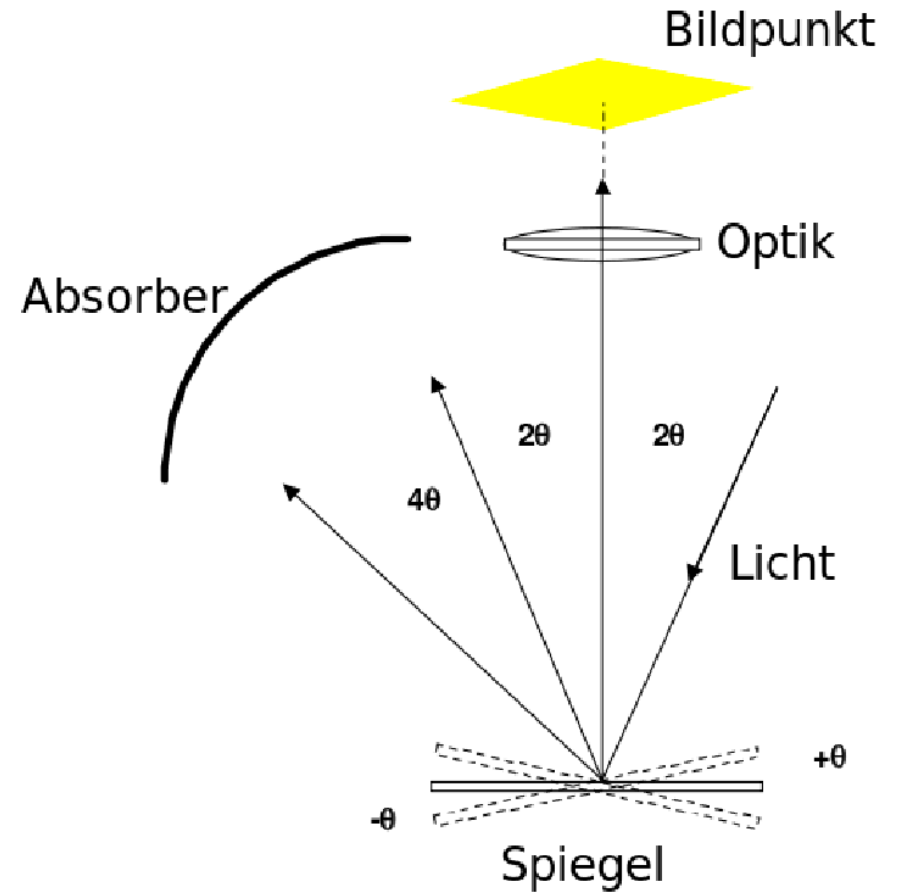
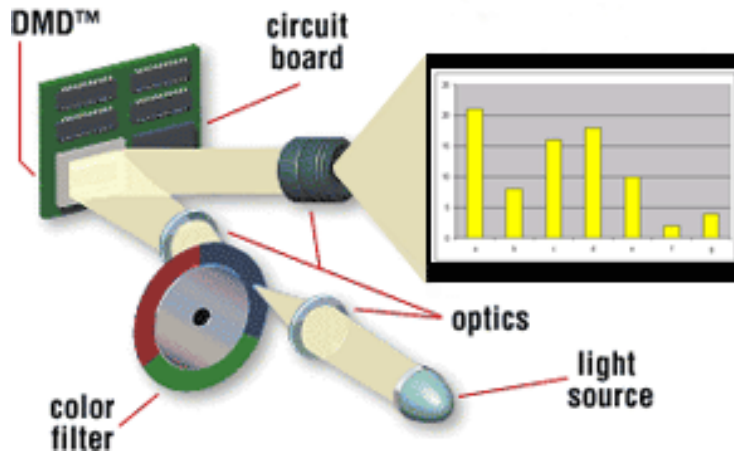
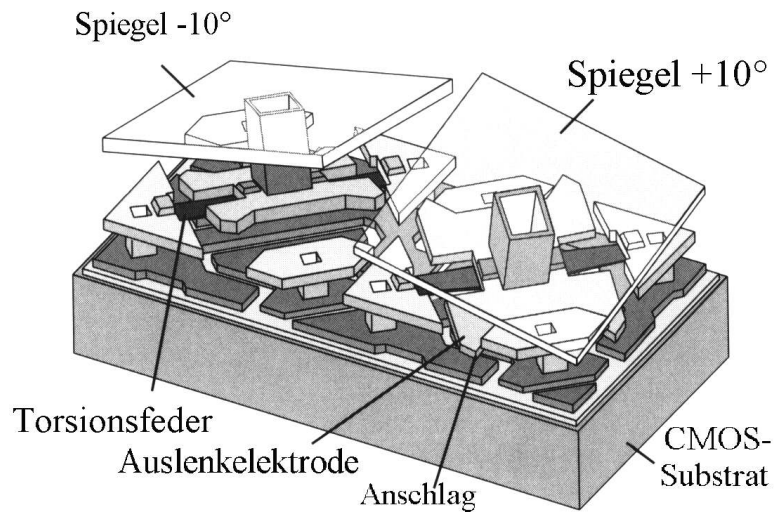


www.projektoren-datenbank.com/lcd.htm



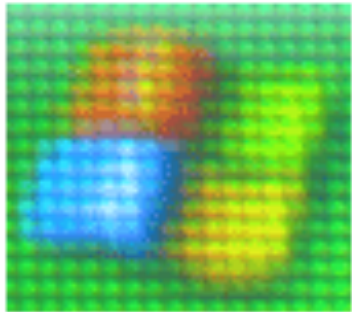
www.projectorpoint.co.uk/projectorLCDvsDLP.htm

DLP-Projektor



www.projectorpoint.co.uk/projectorLCDvsDLP.htm

Zeitliche vs. räumliche RGB Mischung



LCD

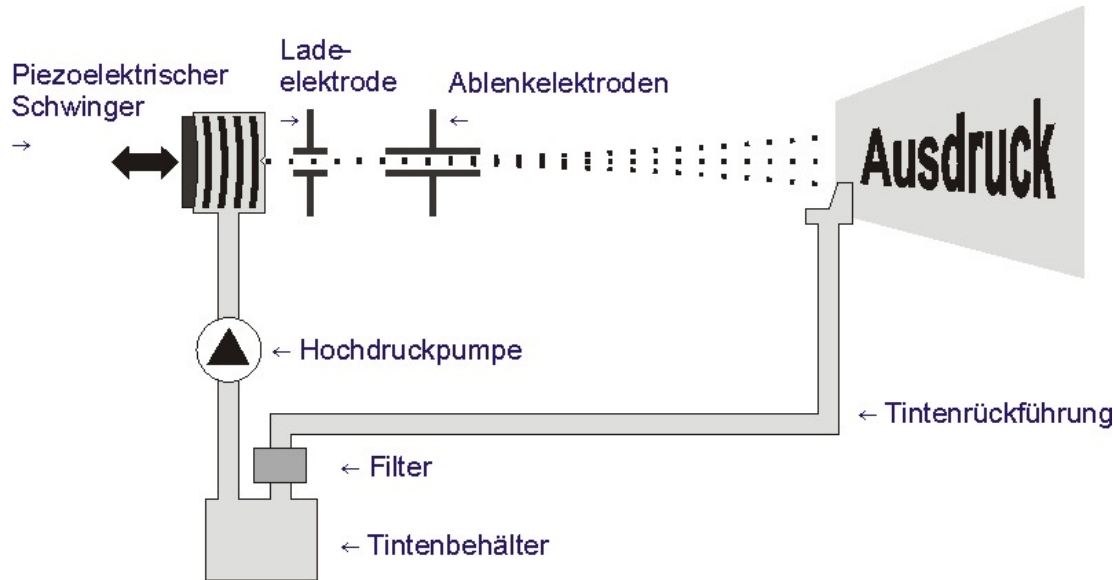


DLP

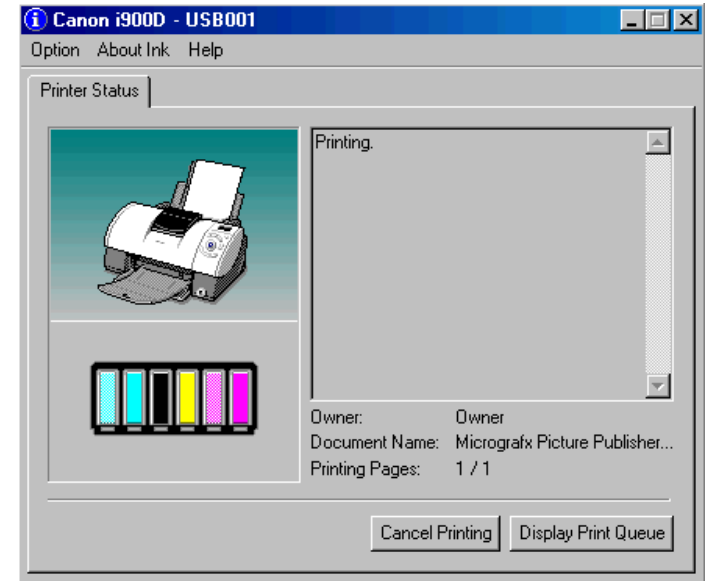
- Screendooreffekt durch Leiterbahnen beim LCD
- 1-panel LCD erzeugt R,G,B Subpixel nebeneinander
- 1-panel DLP erzeugt R,G,B Anteile zeitlich versetzt
- 3-panel LCD + DLP erzeugt echte Farbmischung



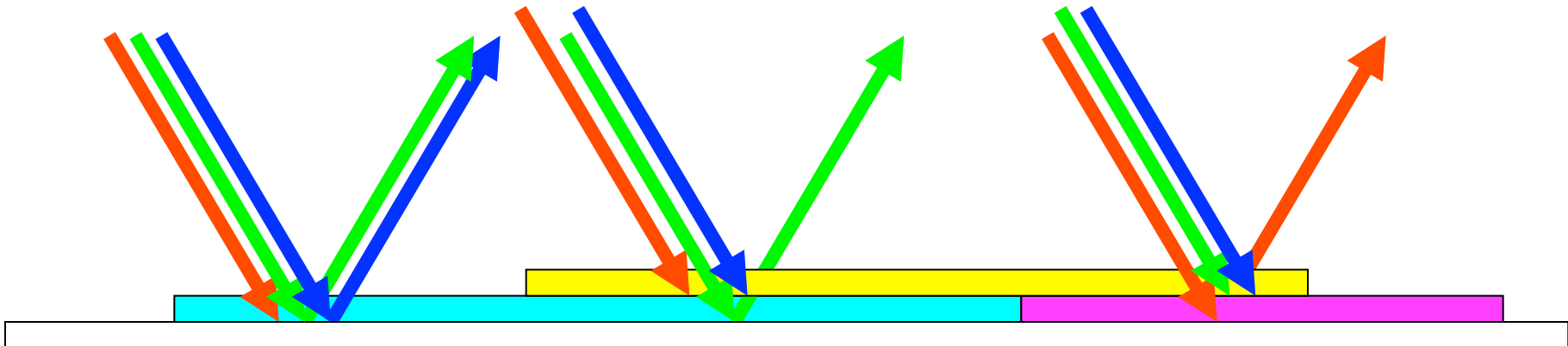
Tintenstrahldrucker



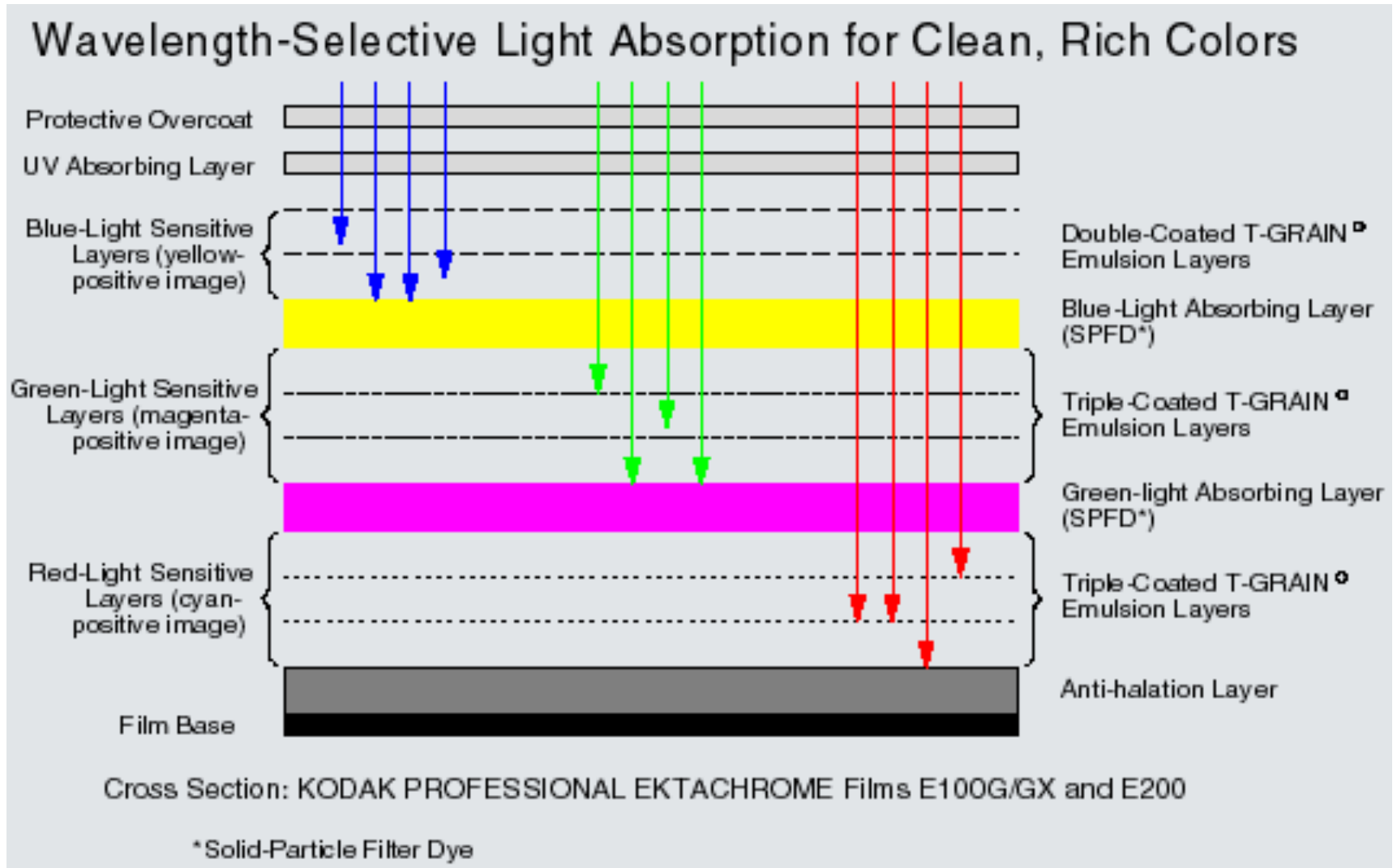
cc-by-sa, Simon Fuß



Subtraktive Mischung durch filternde Tintenschichten



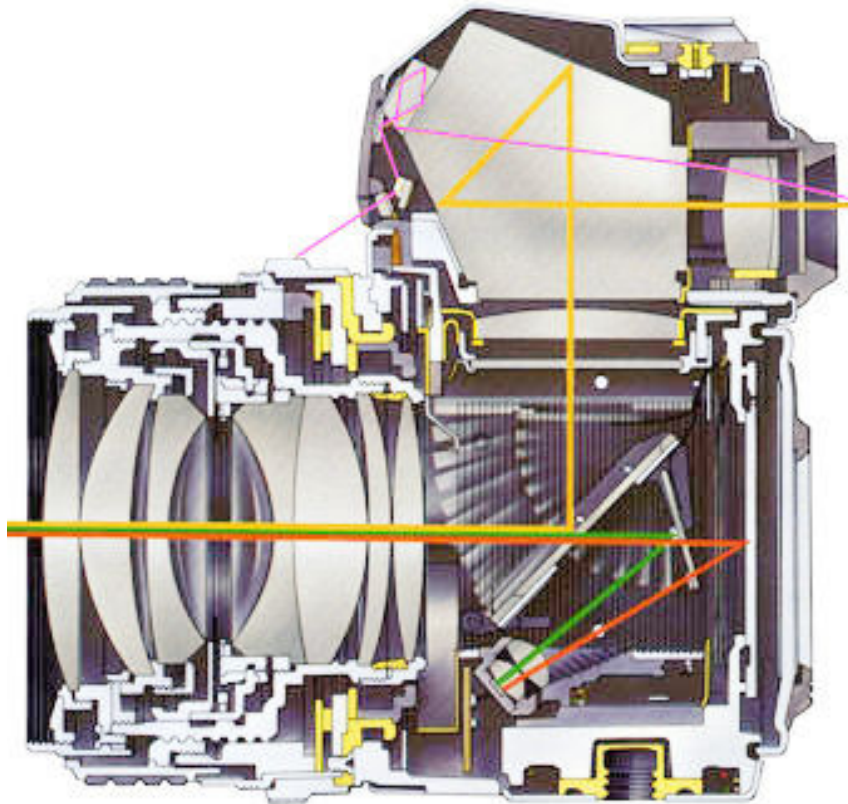
Photographischer Film (Quelle: [Kodak](#))



AUFNAHME VON BILDERN

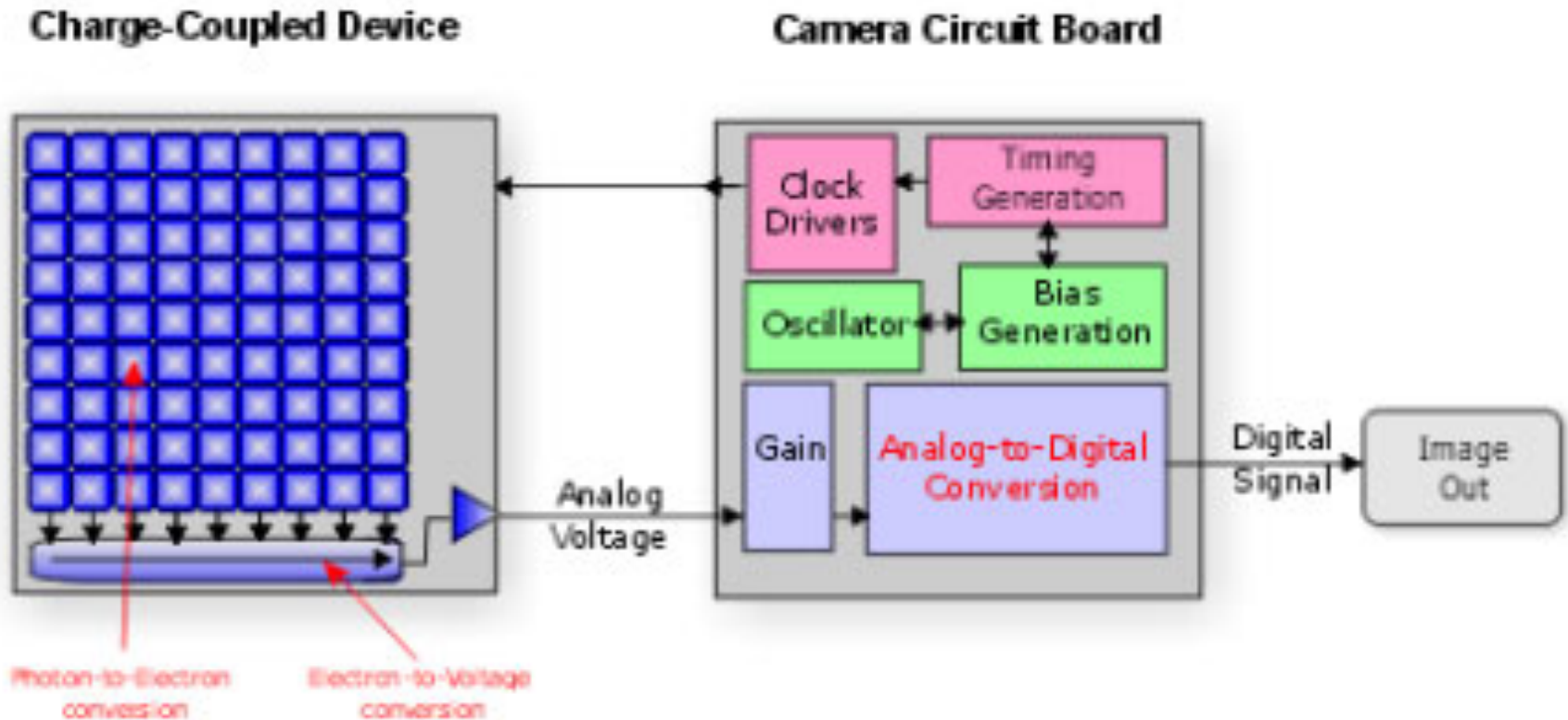
Digitale Kamera

- 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

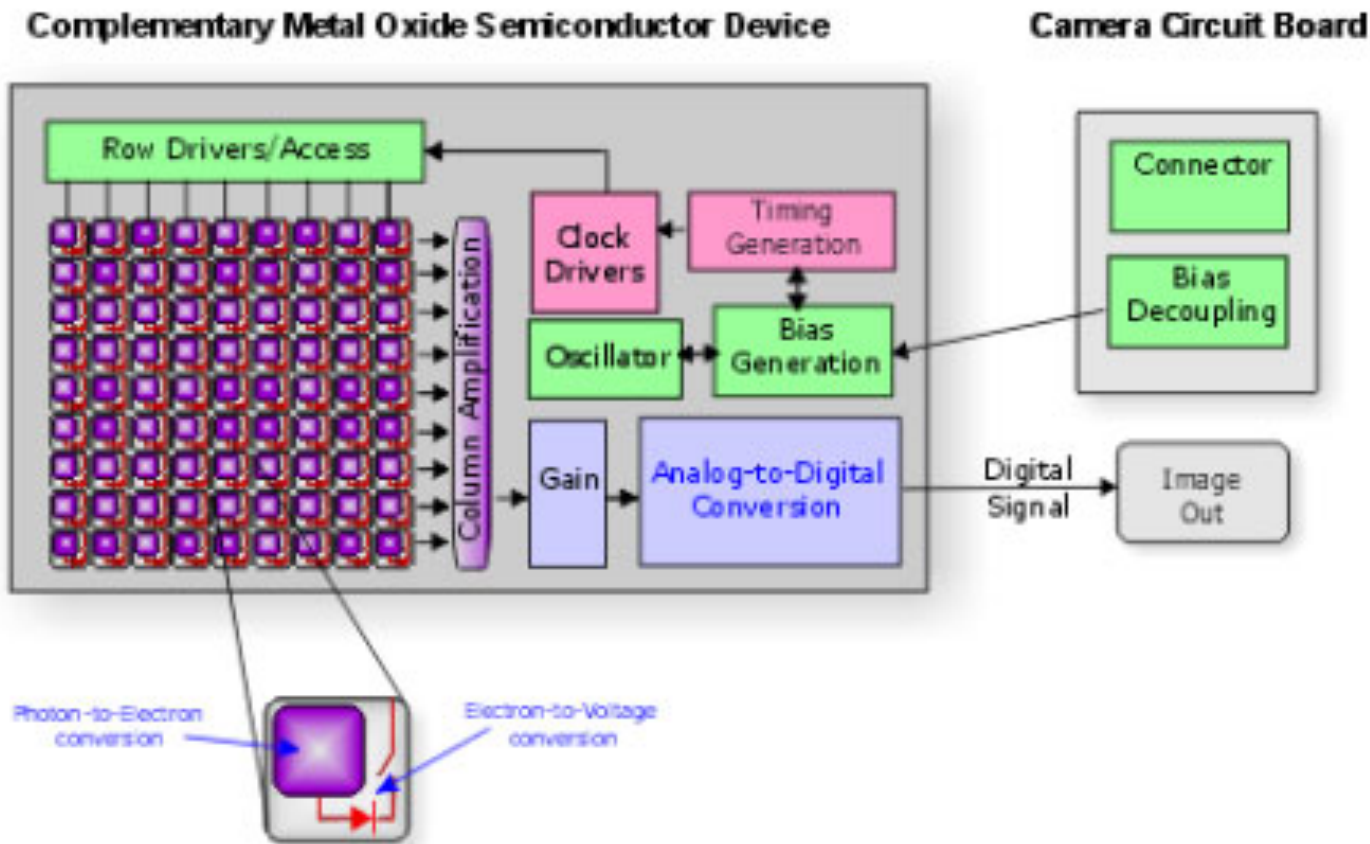
CCD Bildsensor



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

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

CMOS Bildsensor

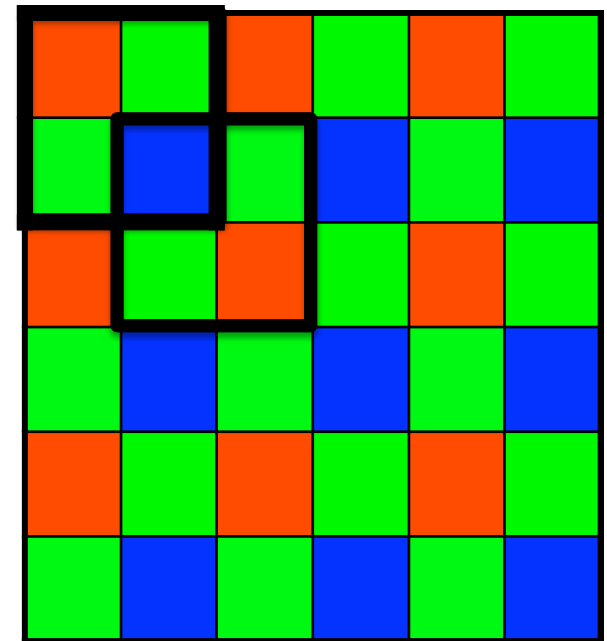
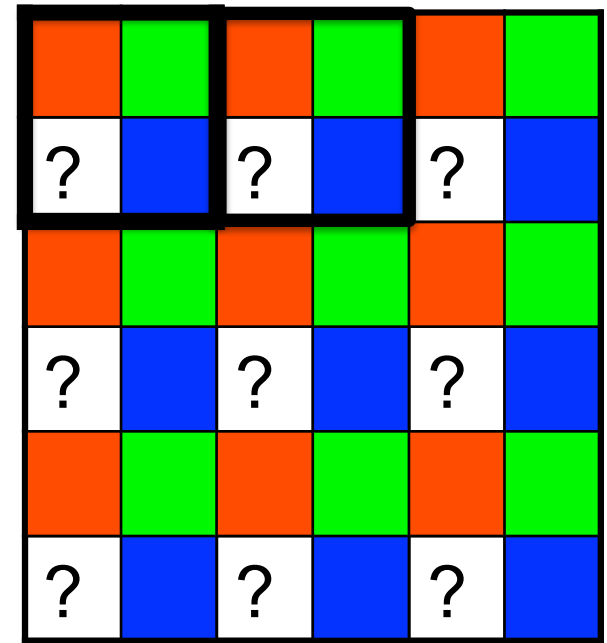


- Verstärkung schon in jedem Pixel vorhanden
 - Saubereres Signal, weniger Rauschen

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: $n-1 * n-1$

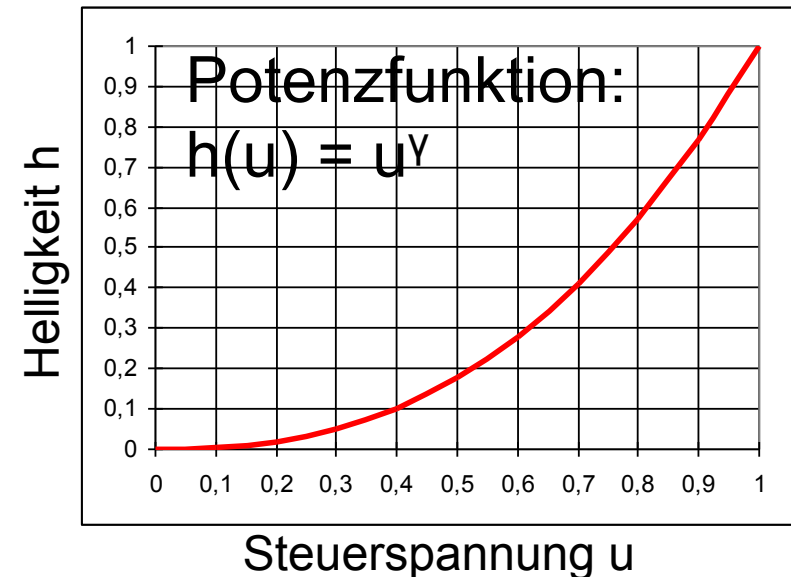
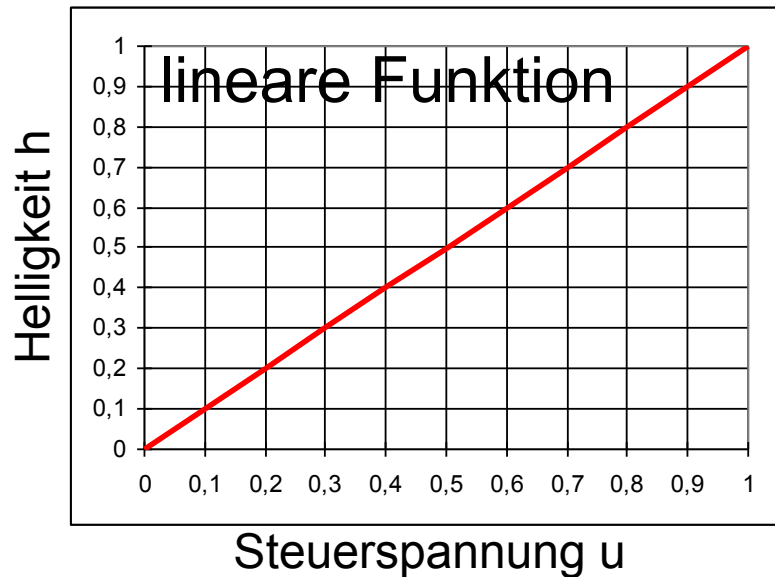


FARBMANAGEMENT

Problem: nichtlineares Verhalten

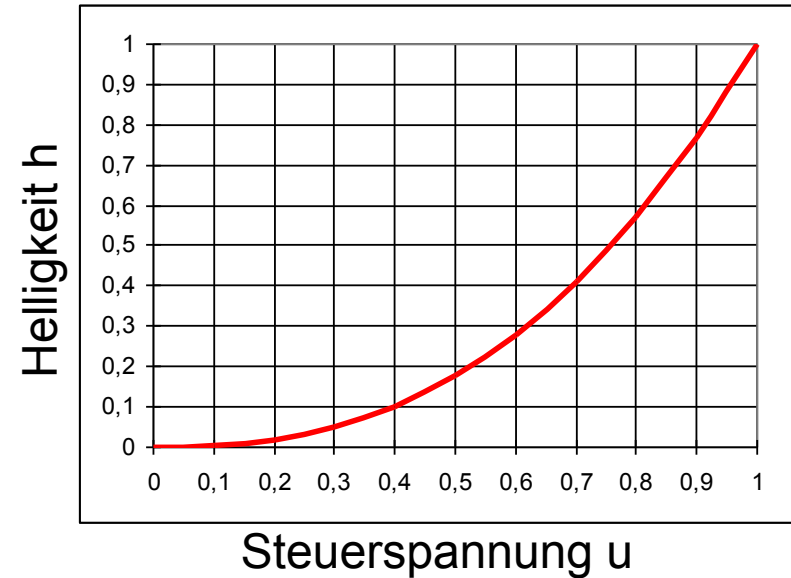
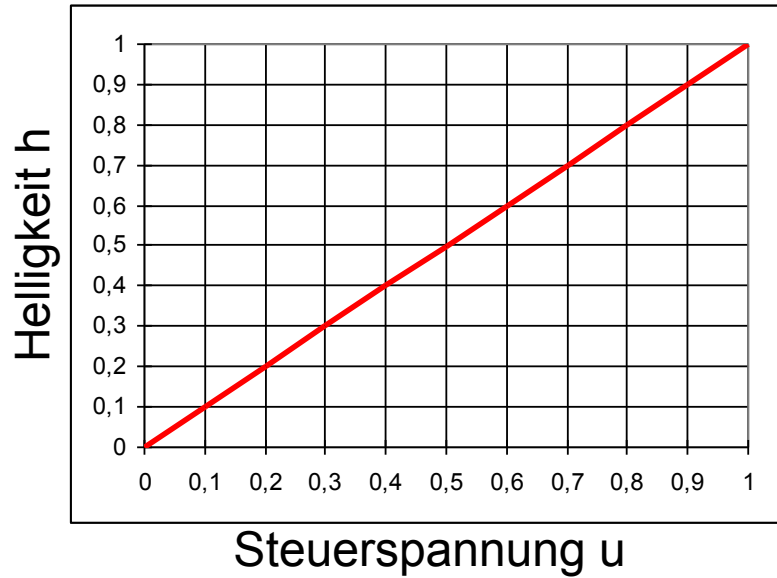
- Monitor wird durch eine elektrische Spannung angesteuert
- Gewünschtes Verhalten (linear):
 - doppelte Spannung → doppelte Helligkeit
- nichtlineares Verhalten vieler Anzeigegeräte
 - Röhrenmonitore: Potenzgesetz mit Exponent 2.5
 - TFT Monitore: komplexeres Verhalten, Hardware-korrigiert, so dass Verhalten wie Röhrenmonitore

Mathematische Beschreibung: Gamma

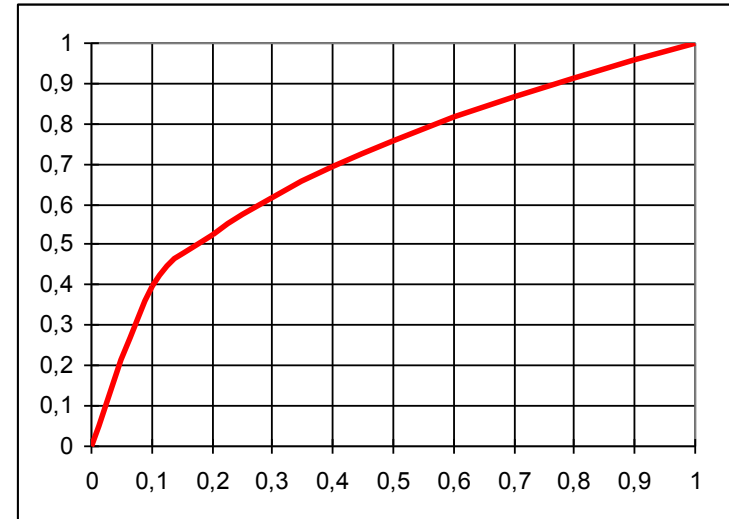
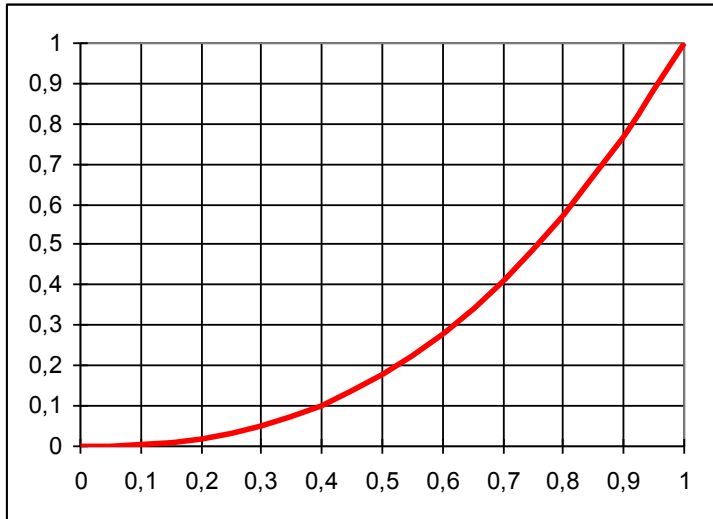


- Röhrenmonitor mit Phosphor als Leuchtstoff:
 - Steuerspannung u von 0.0 bis 1.0 * u_{\max}
 - Helligkeit h von 0.0 bis 1.0 * h_{\max}
- Verhältnis von Helligkeit eines Punktes zur Steuerspannung ist nicht linear, Potenzfunktion:
 $h(u) = u^\gamma$ mit γ (sprich: Gamma) = 2.5

Gamma = 2.5: Auswirkung

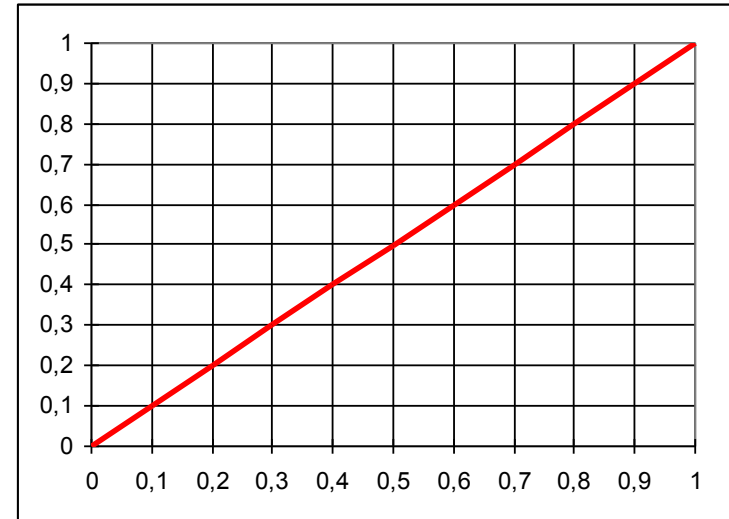
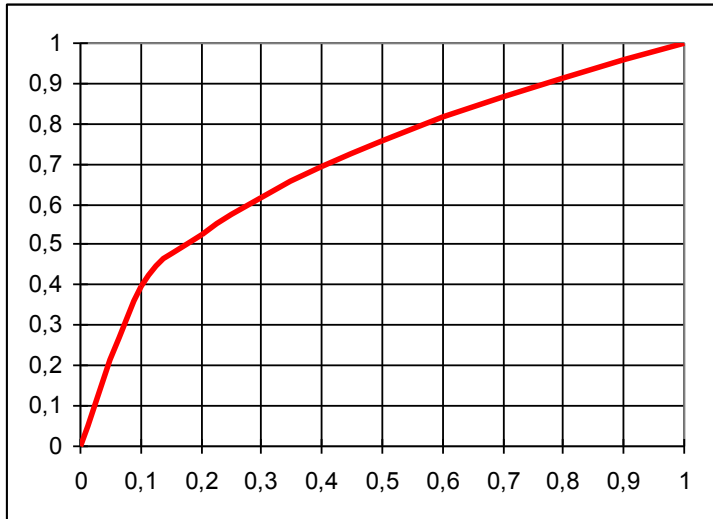


Gammakorrektur für 2.5

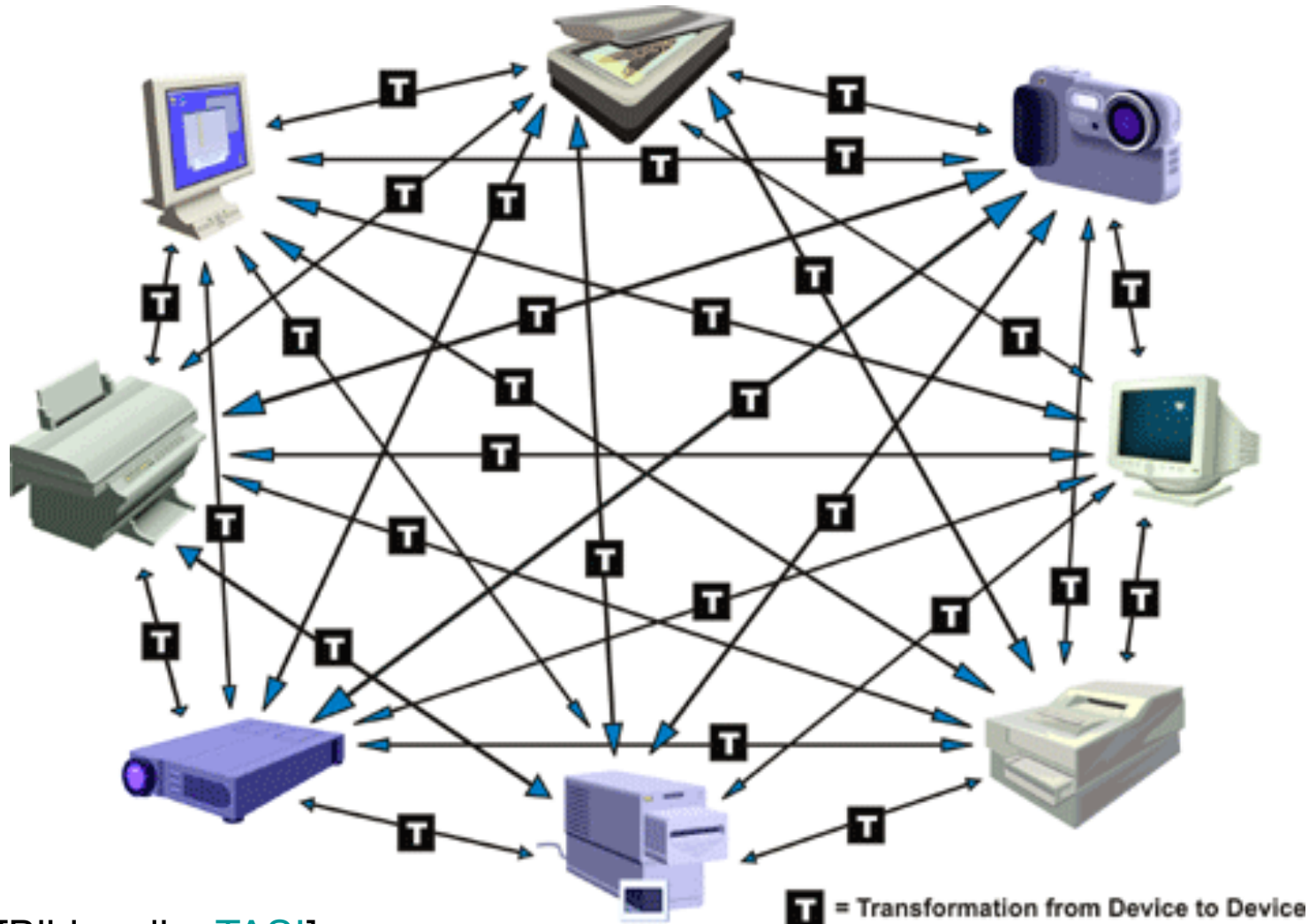


- Idee: Helligkeitswerte vorher entgegengesetzt korrigieren mit $\text{Gamma} = 1 / 2.5 = 0.4$
- $h = (u^{0.4})^{2.5} = u^{0.4 * 2.5} = u^1 = u$
- „Gammakorrektur für x“ bedeutet mit $1/x$ korrigieren

Gammakorrektur für 2.5: Auswirkung

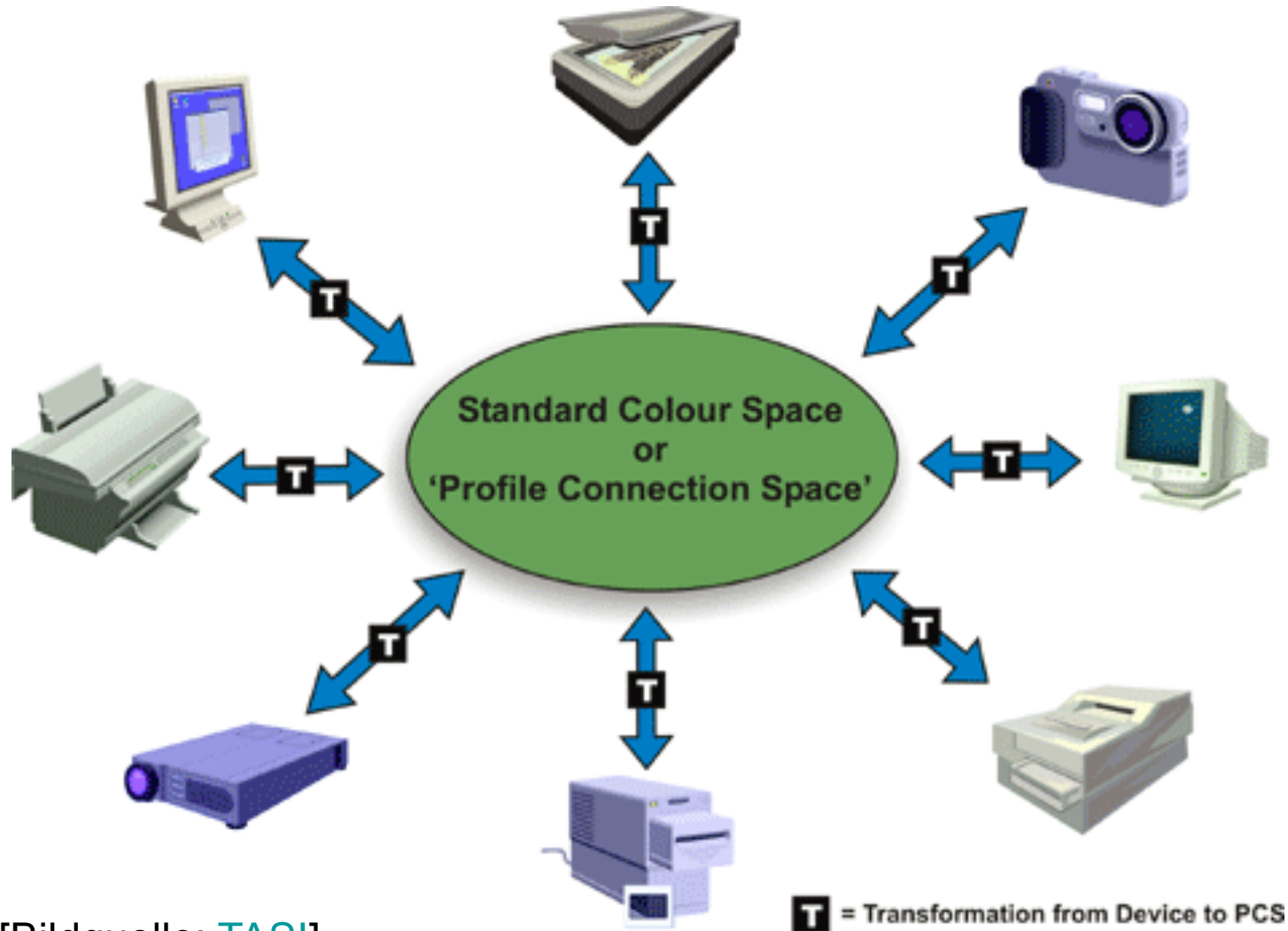


Farbmanagement: Warum?



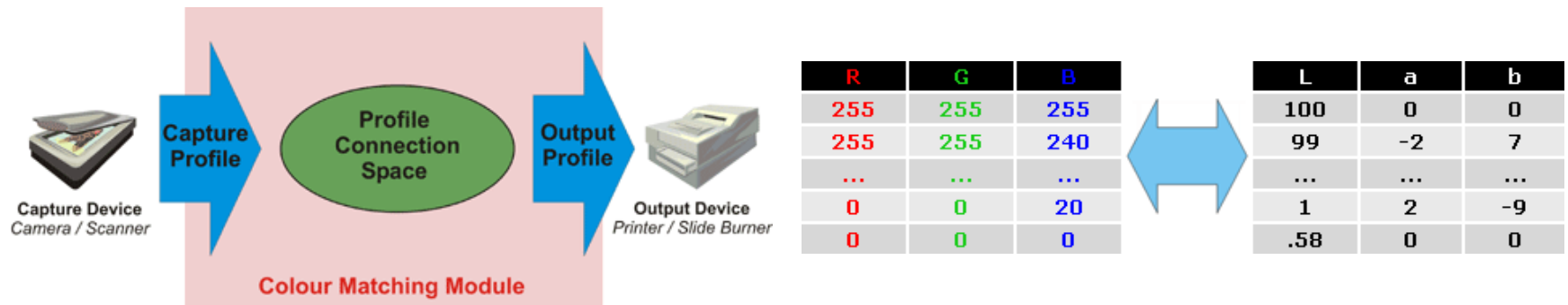
[Bildquelle: [TASI](#)]

Farbmanagement: Grundidee



[Bildquelle: [TASI](#)]

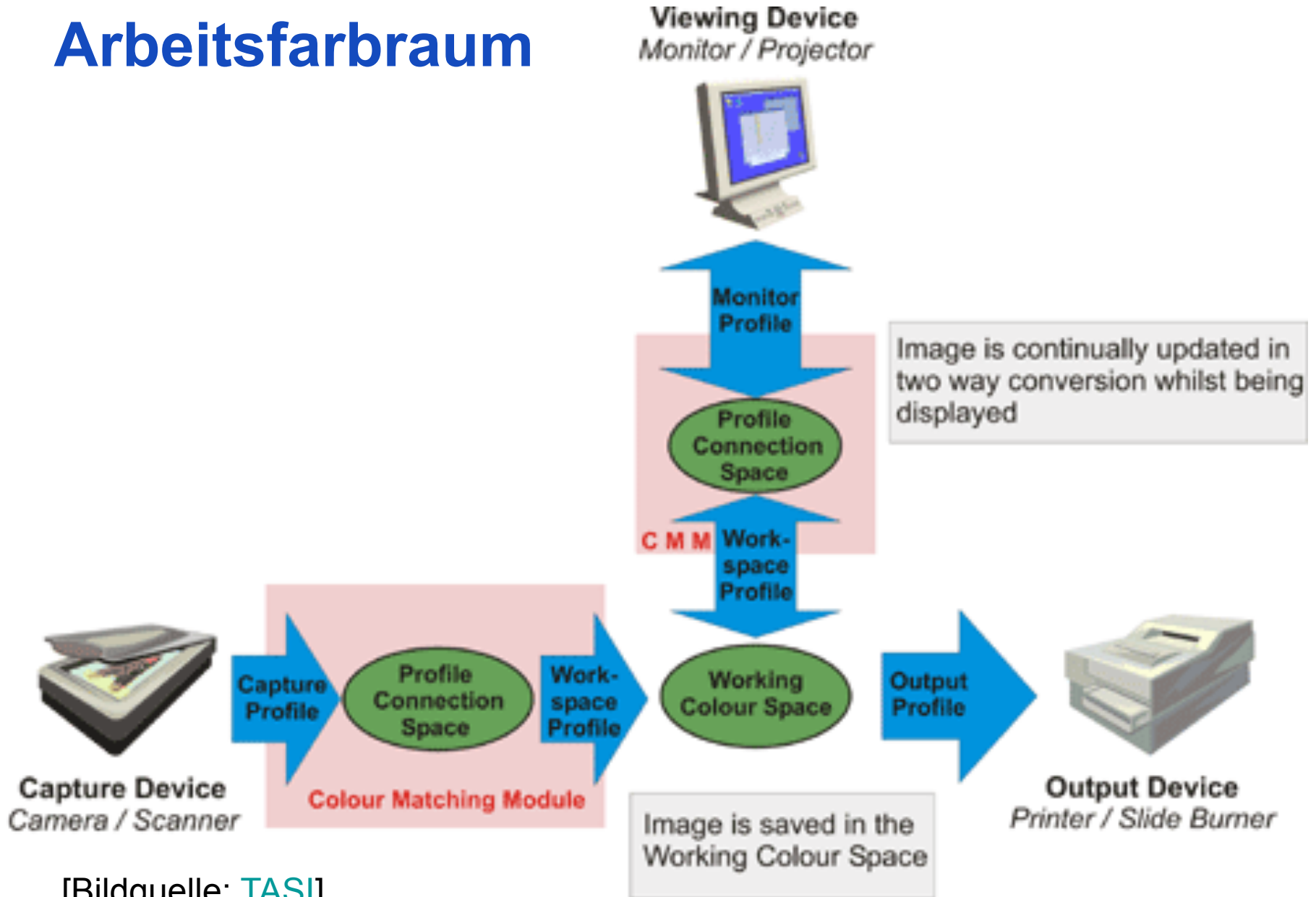
Ein- und Ausgabepprofile



- 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

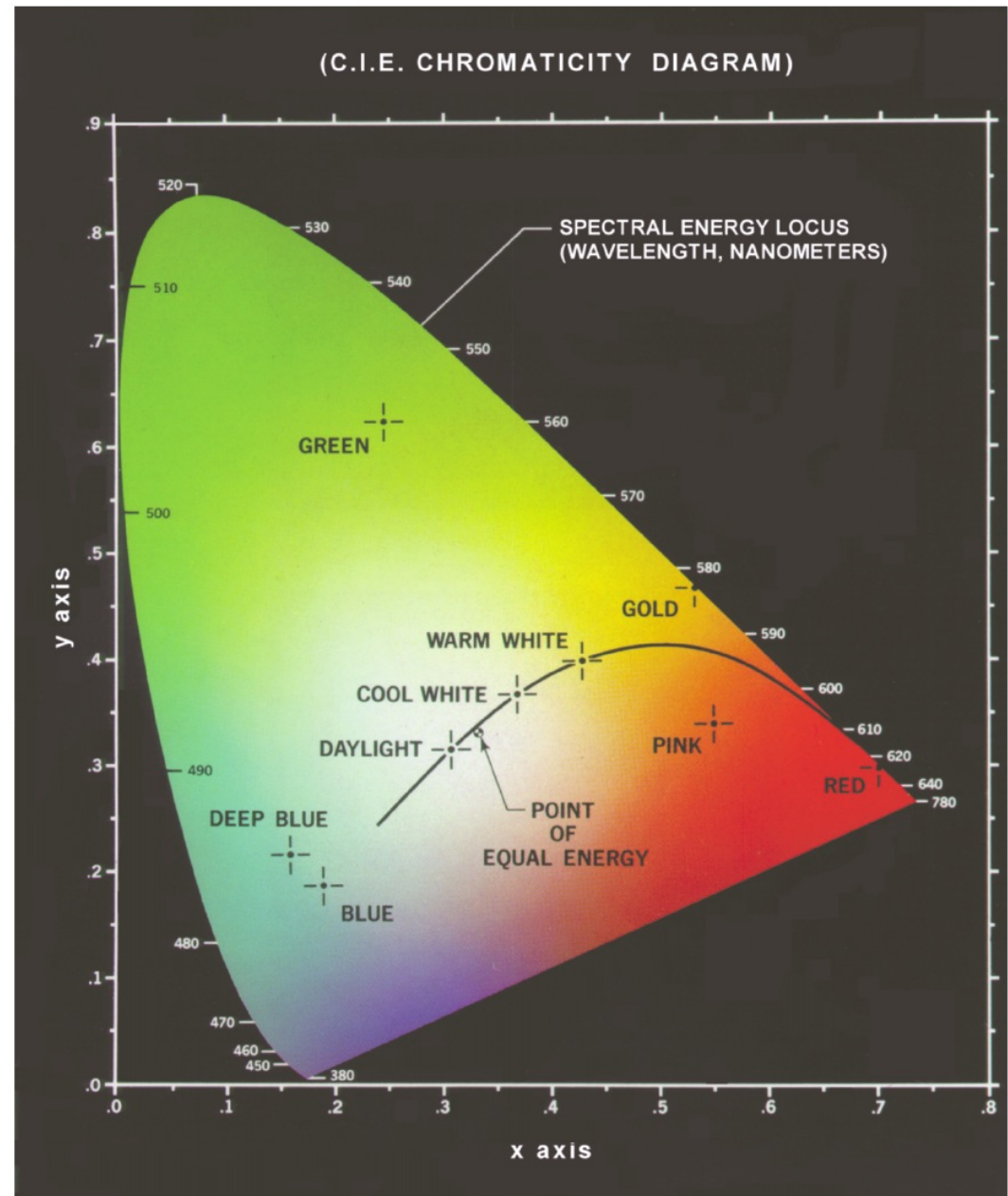
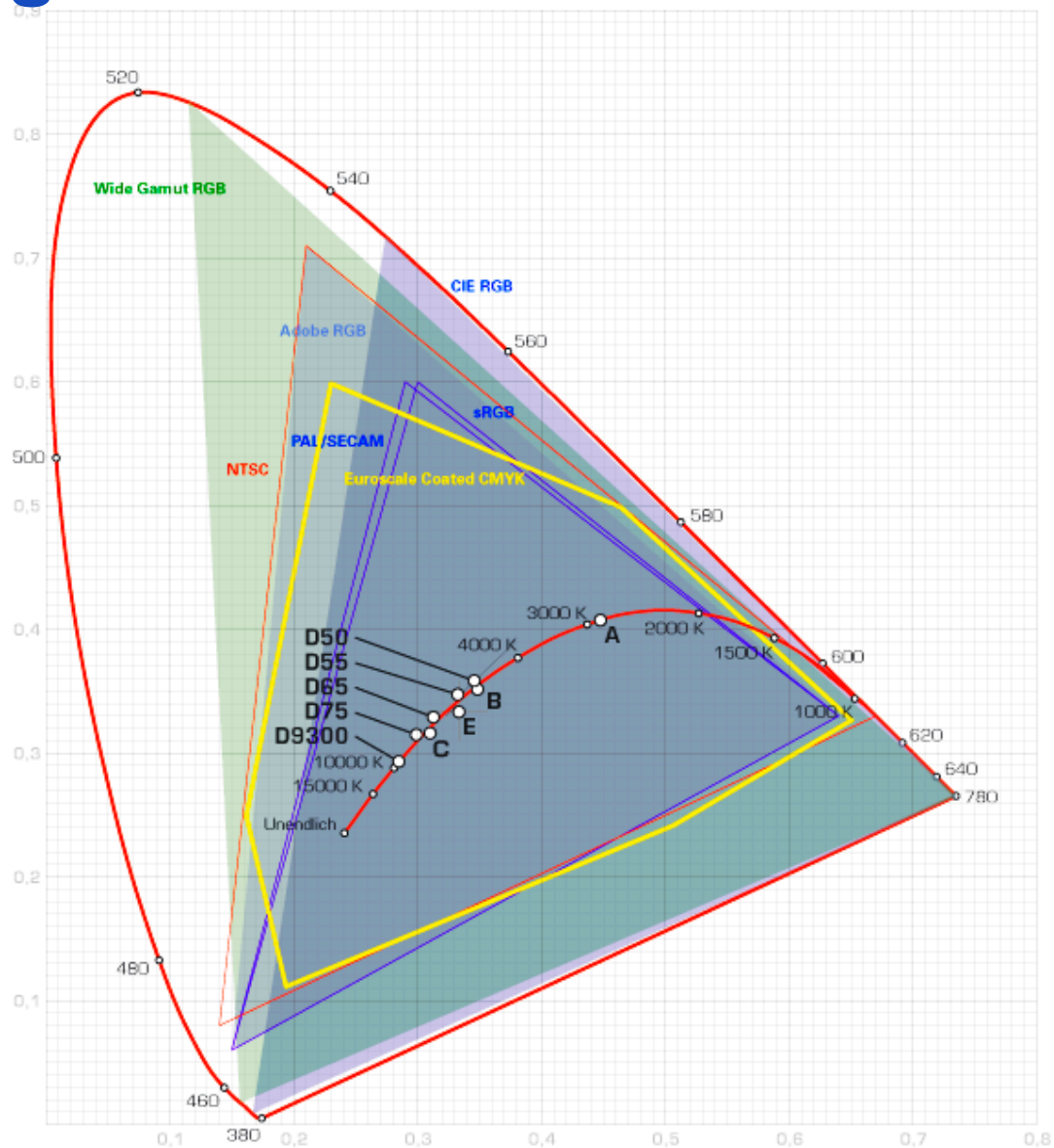


Abbildung: © R. C. Gonzalez & R. E. Woods, Digital Image Processing

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

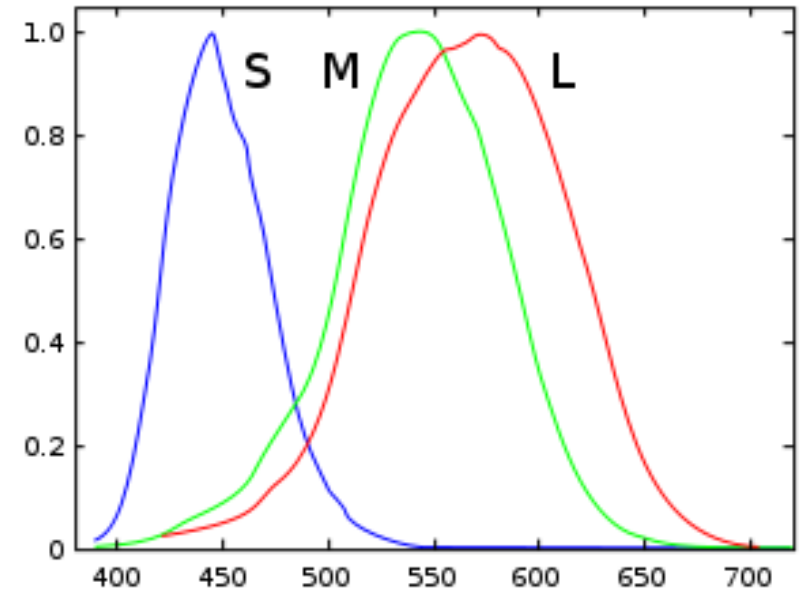
Einbettung anderer Farbräume



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

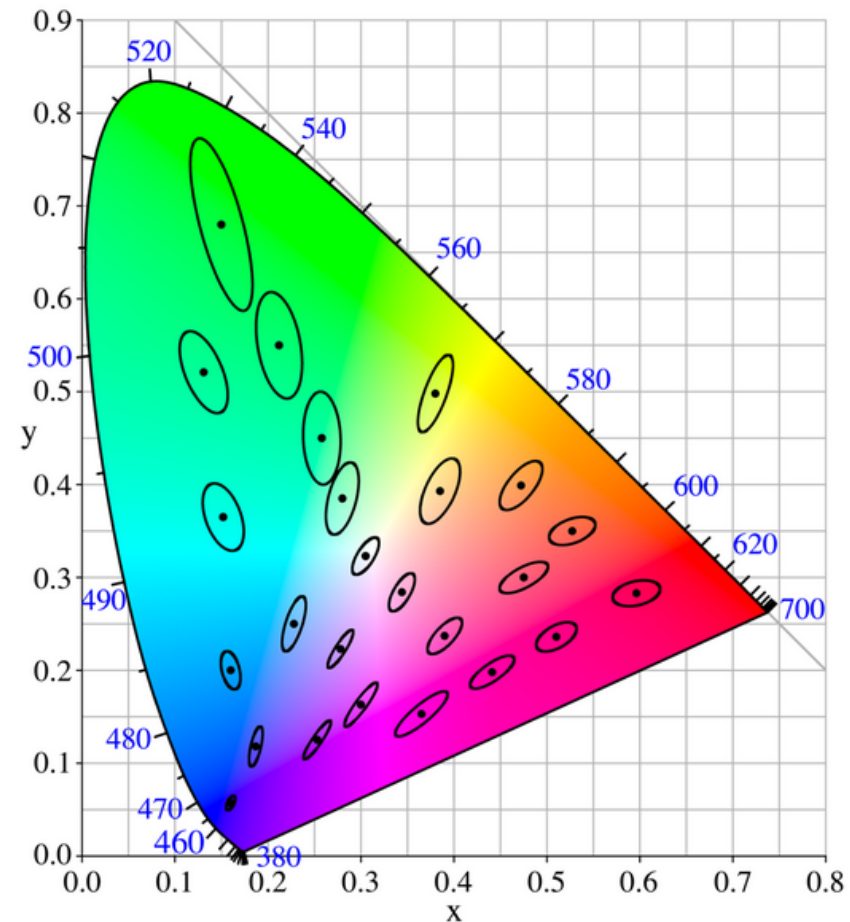
- Von Kries Hypothese
 - visuelles System erreicht Farbkonstanz (chromatische Adaption) durch unterschiedliche Verstärkung der L-, M-, S-Zapfenaktivierung
- Weißabgleich in Kameras folgt dieser Hypothese
 - Falls bekanntes (L_w, M_w, S_w) für weißen Bereich im Bild, aber Sättigung (L_w, M_w, S_w) größer 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
- MacAdam-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

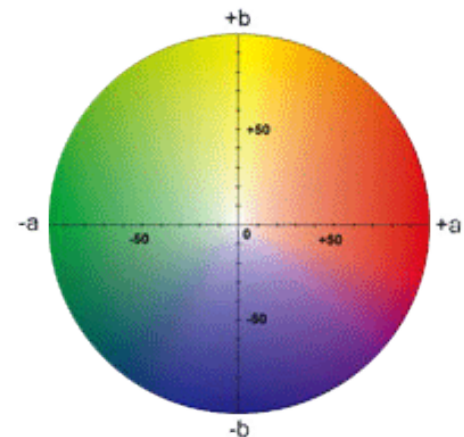
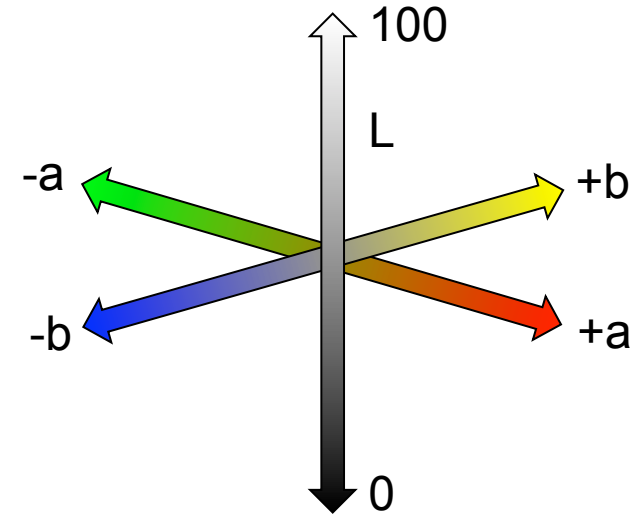
a,b = Gegenfarbenachsen

- Transformation

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

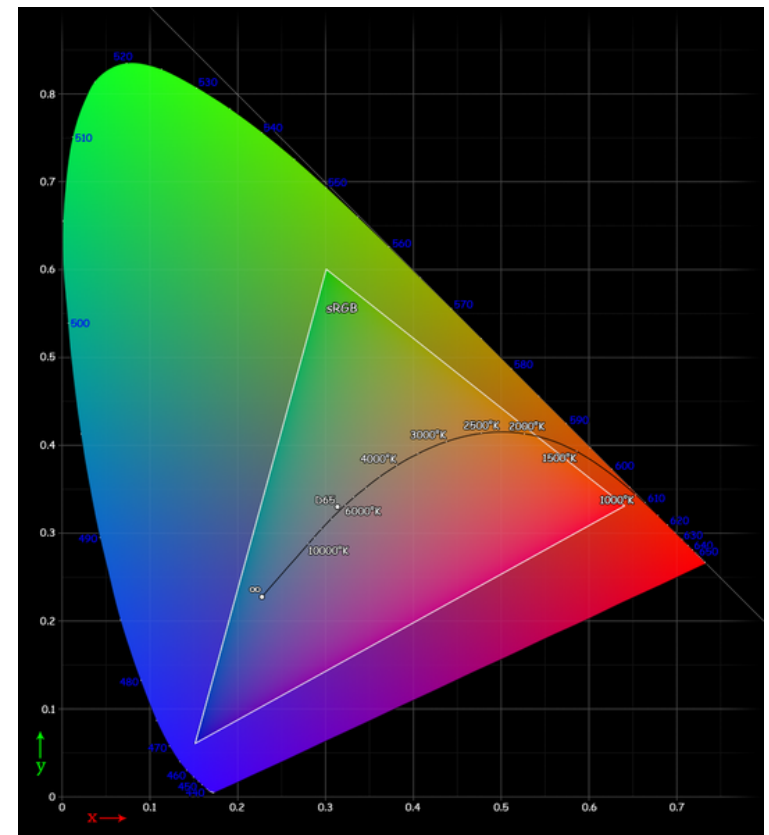
$$\text{Grün-rot: } a^* = 500 \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{X}{X_n}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} \right)$$

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



Color Space: sRGB IEC-61966-2.1 (1996)

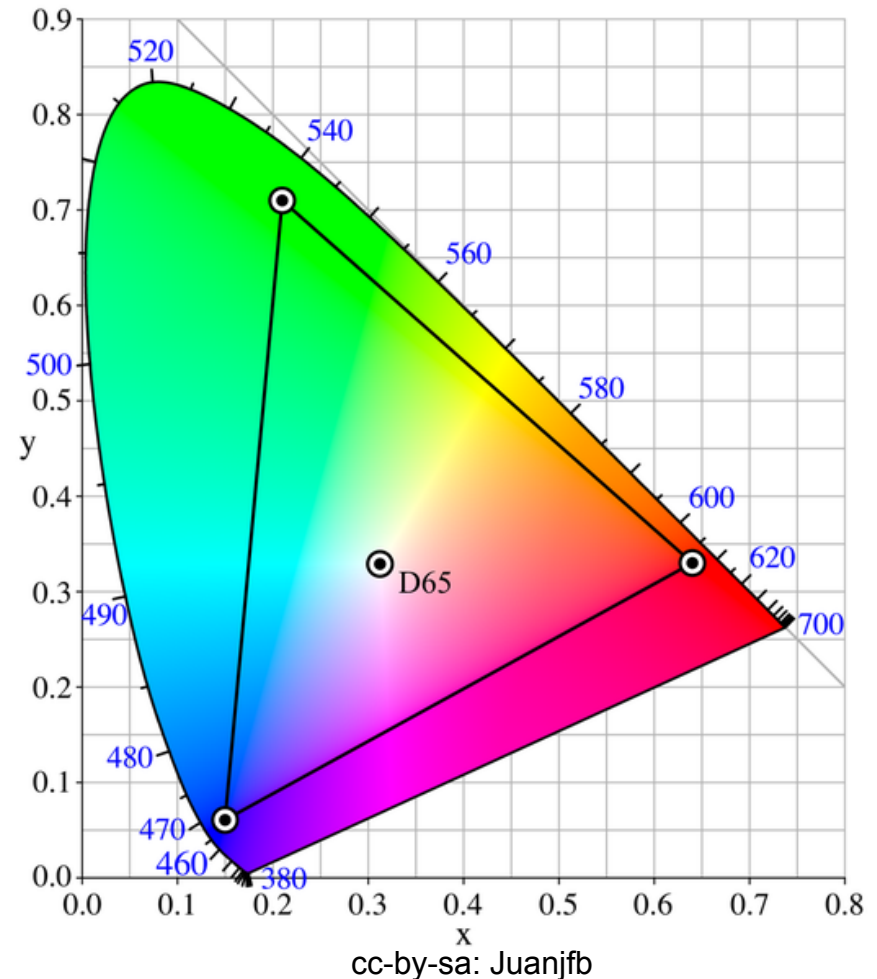
- Designed as “lowest common denominator” color space
 - Promoted by Microsoft, Hewlett Packard and others
 - Based on expected quality of consumer PC monitor ($\gamma=2.2$, D65 white point)
 - Limited color gamut
- Used by Web browsers, digital cameras, scanners
- Good for images viewed on the Internet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



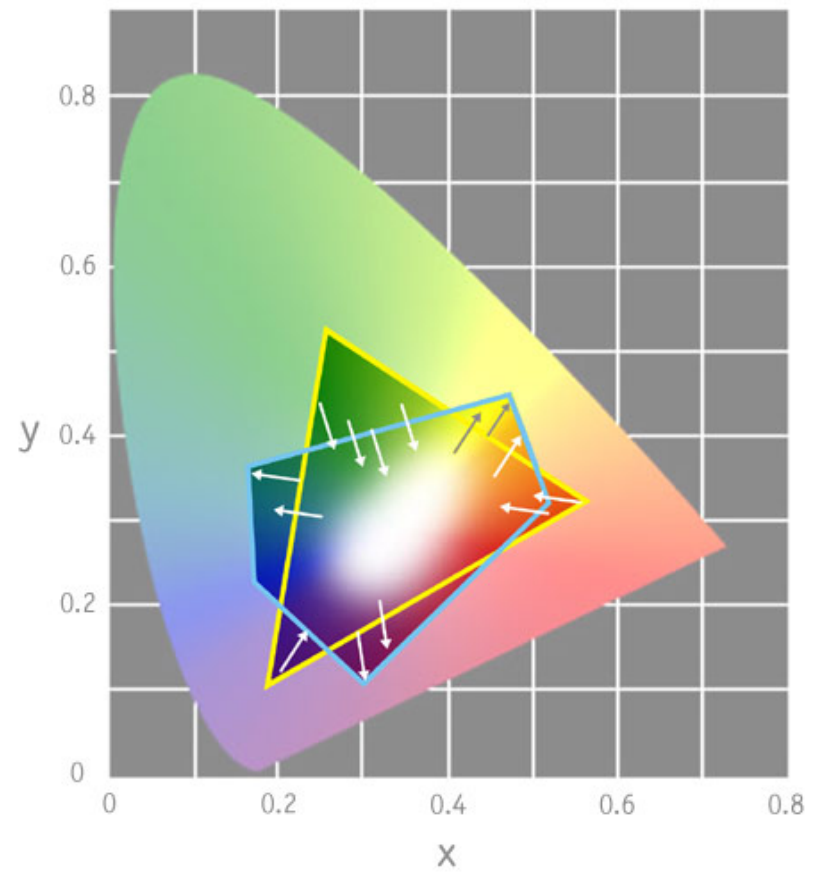
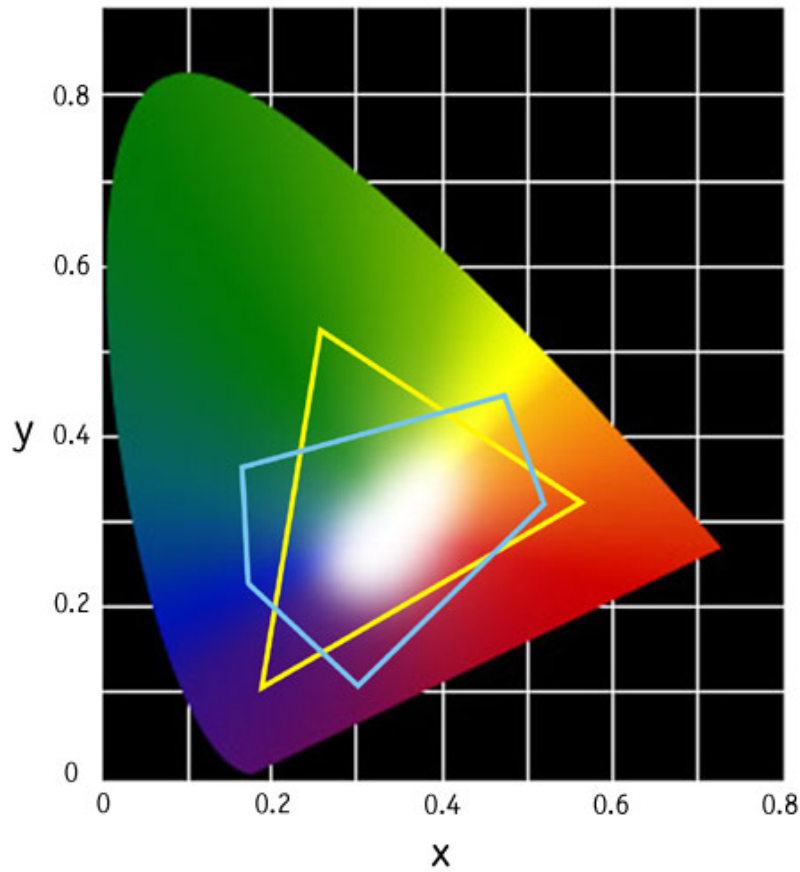
cc-by-sa: Spigget

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

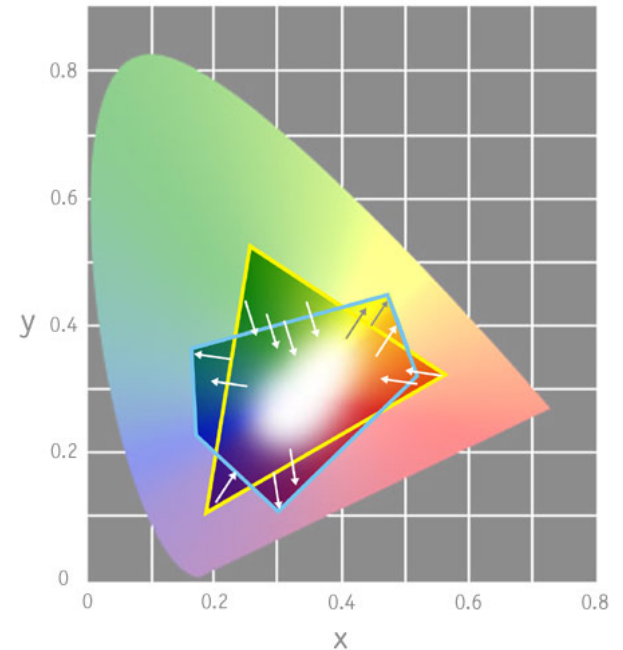
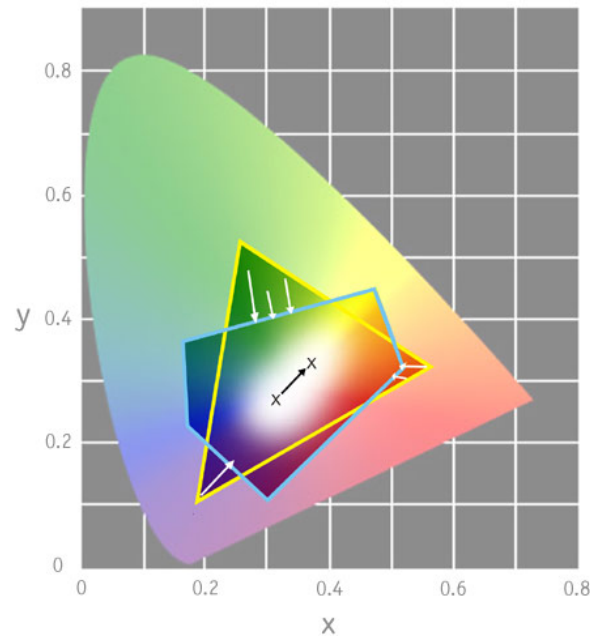
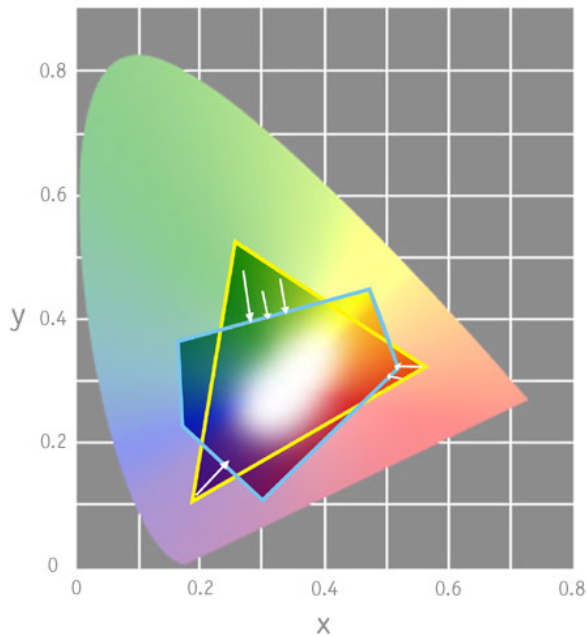


Wie wandelt man zwischen Farbräumen?

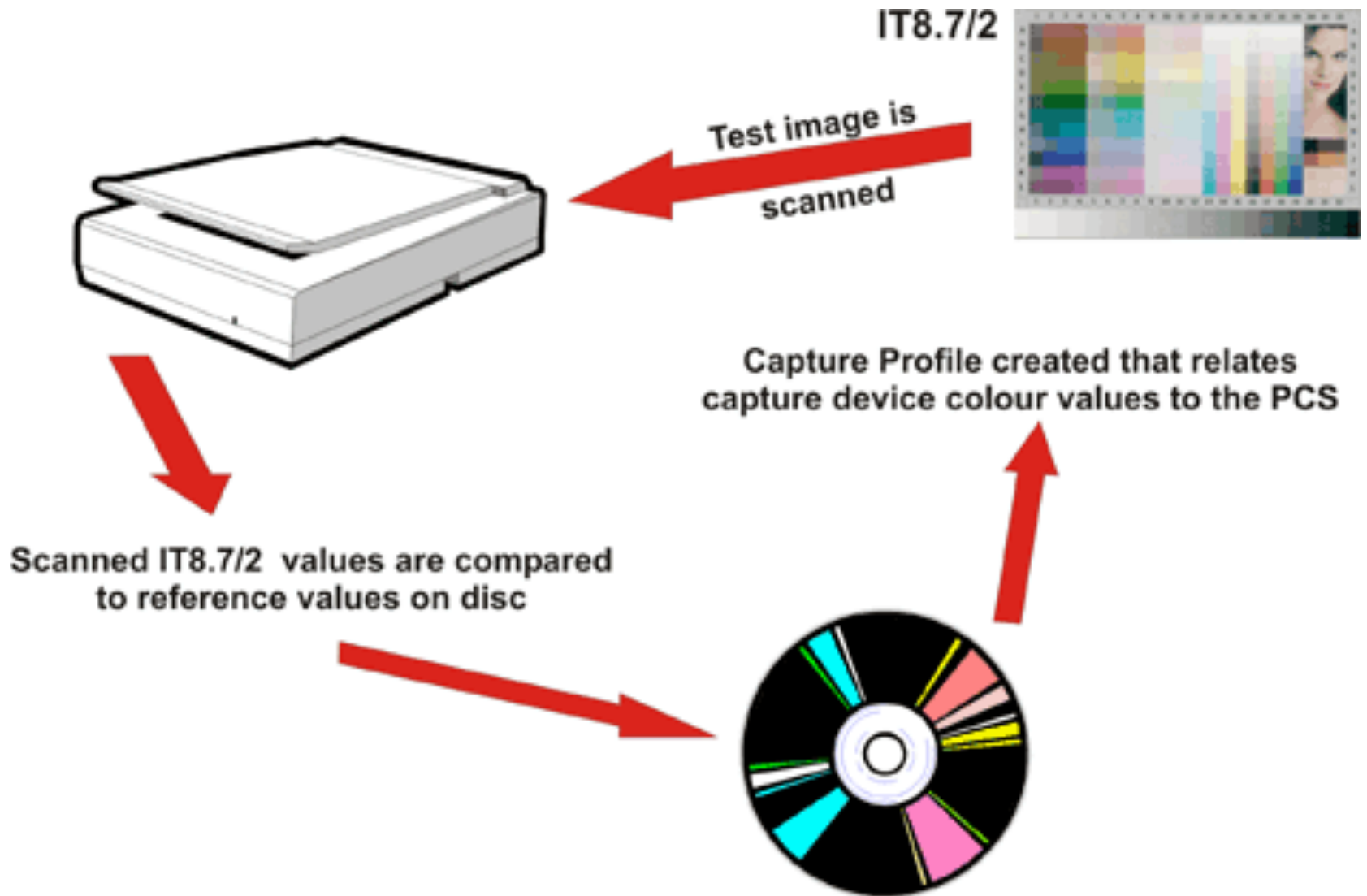


Rendering Intent

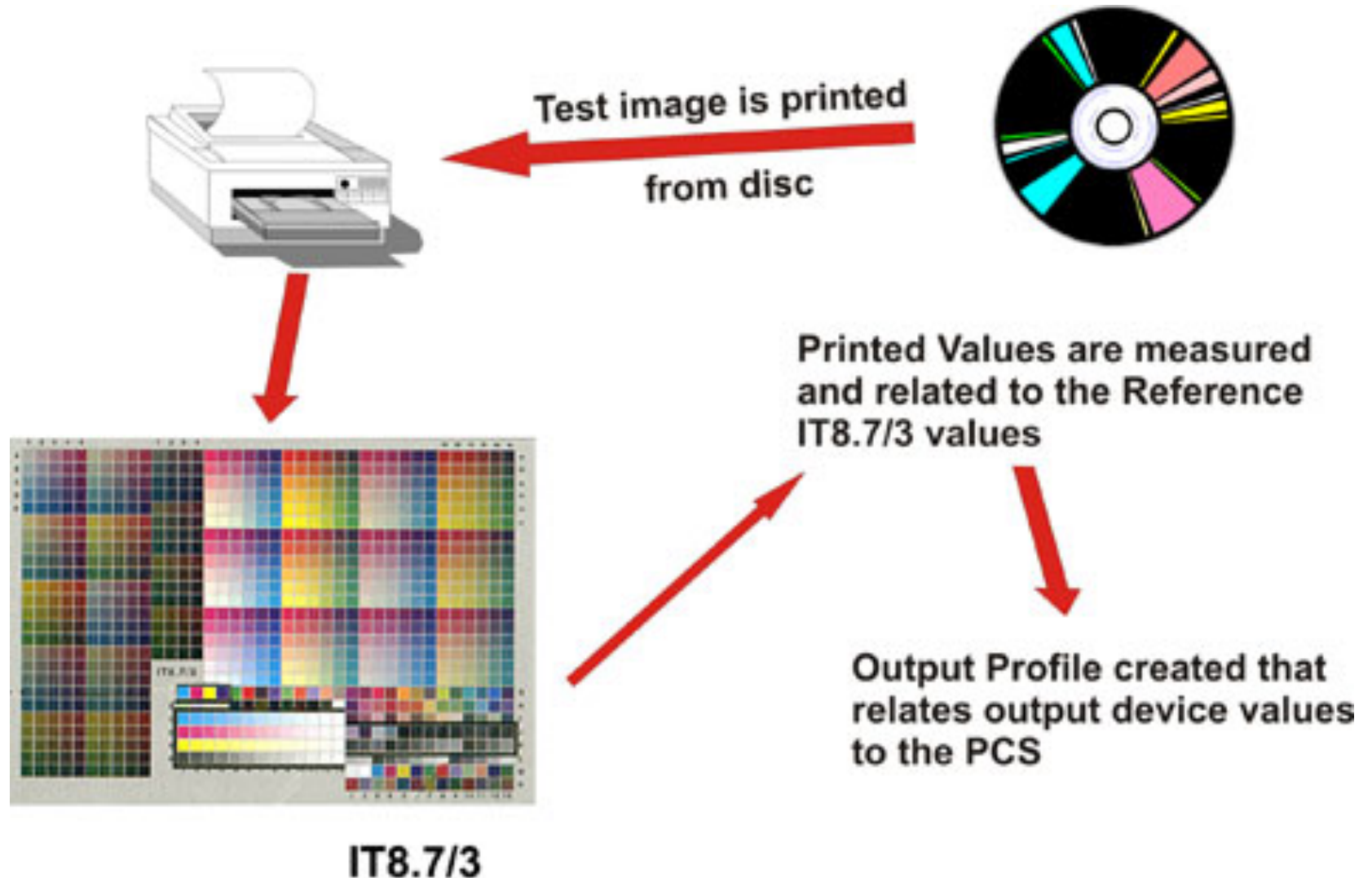
- Mögliche Probleme, falls Gamuts nicht gleich
 - Nicht alle Farben des Ursprungsraumes im Zielraum
 - Nicht alle Farben des Zielraumes ausgenutzt
- Rendering Intent gibt an, nach welchen Regeln Farben in andere umgewandelt werden



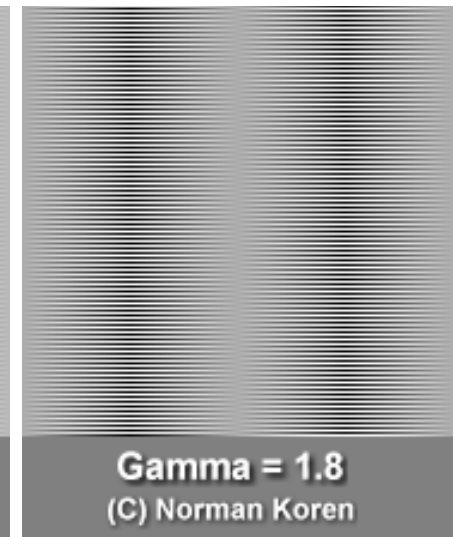
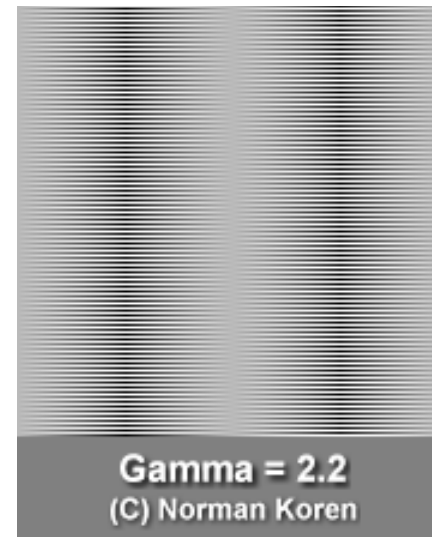
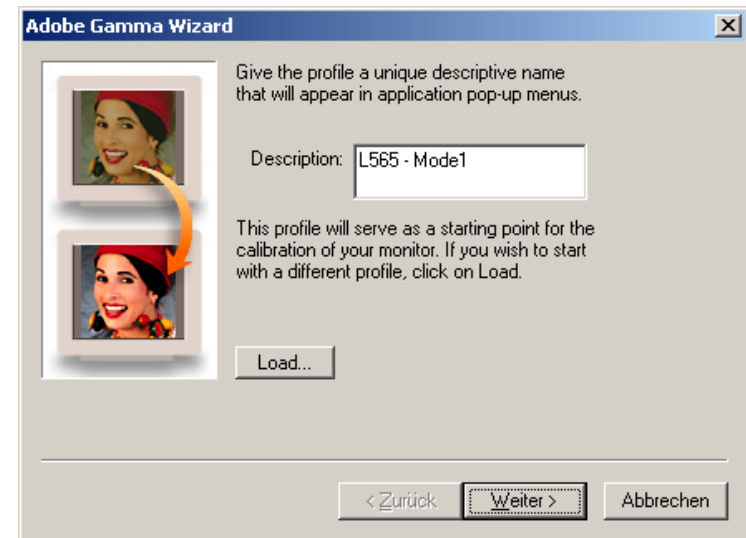
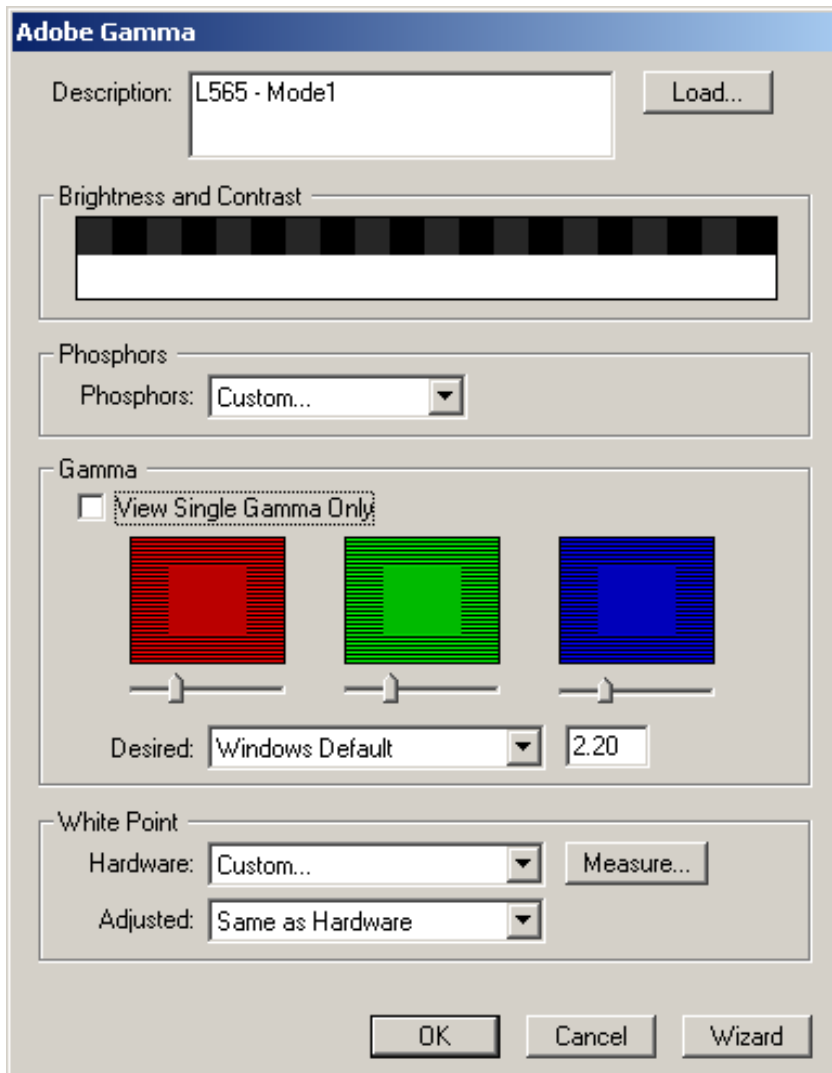
Scannerkalibrierung



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