

Licht- und Displaytechnik

Farbe

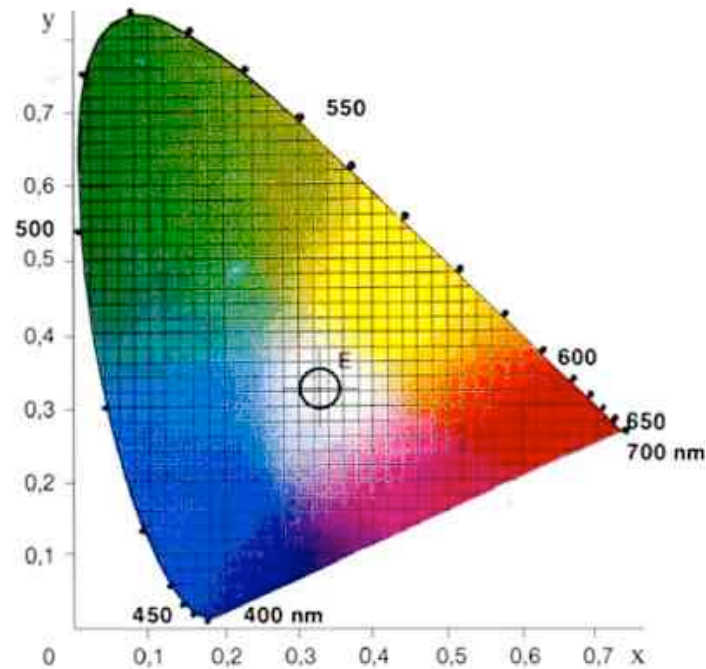
von

Karsten Klinger

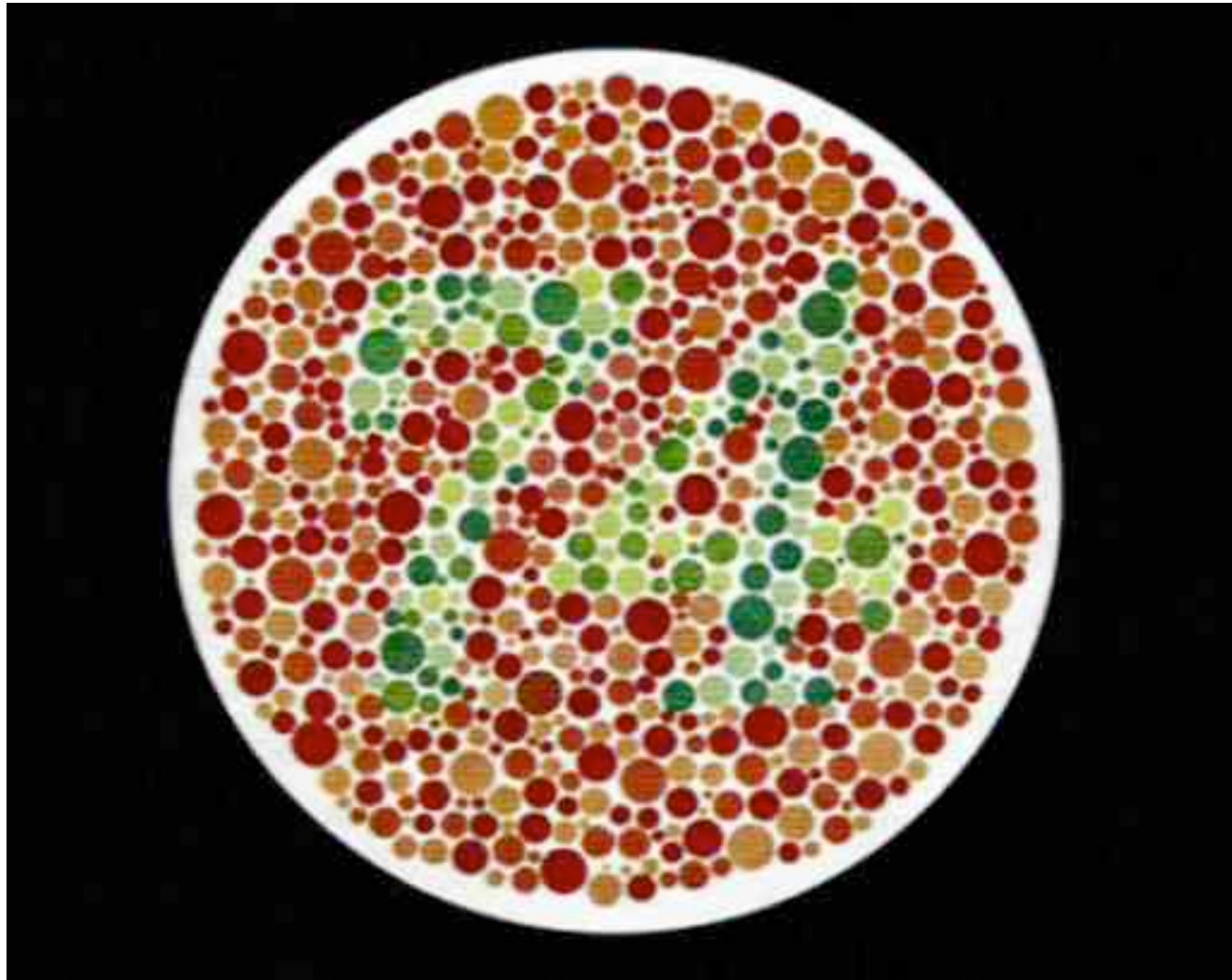
Wintersemester 2008/2009

Inhalt

- Auge
- Farbdreieck
- Farbwiedergabe
- Farbsysteme
- Farbabstand



Farbsehschwächen erkennen



Das Auge

Nachtsehen

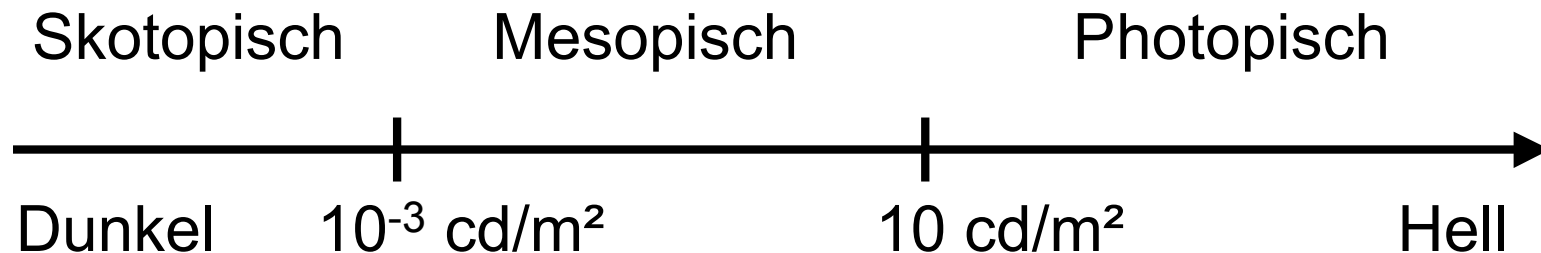
- Stäbchen
- Anzahl: 100.000.000

Zapfenarten

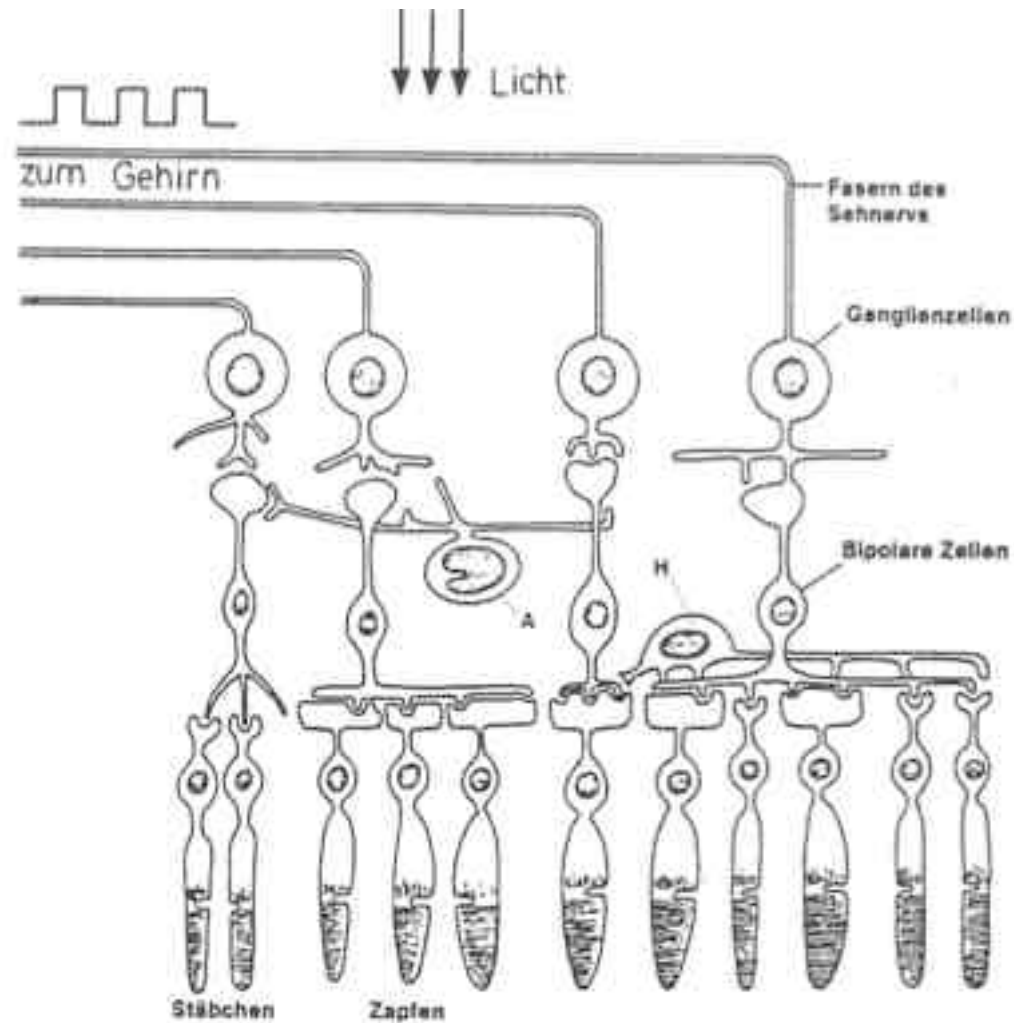
- L-Typ rot 570 nm
- M-Typ grün 540 nm
- S-Typ blau 430 nm

Tagsehen

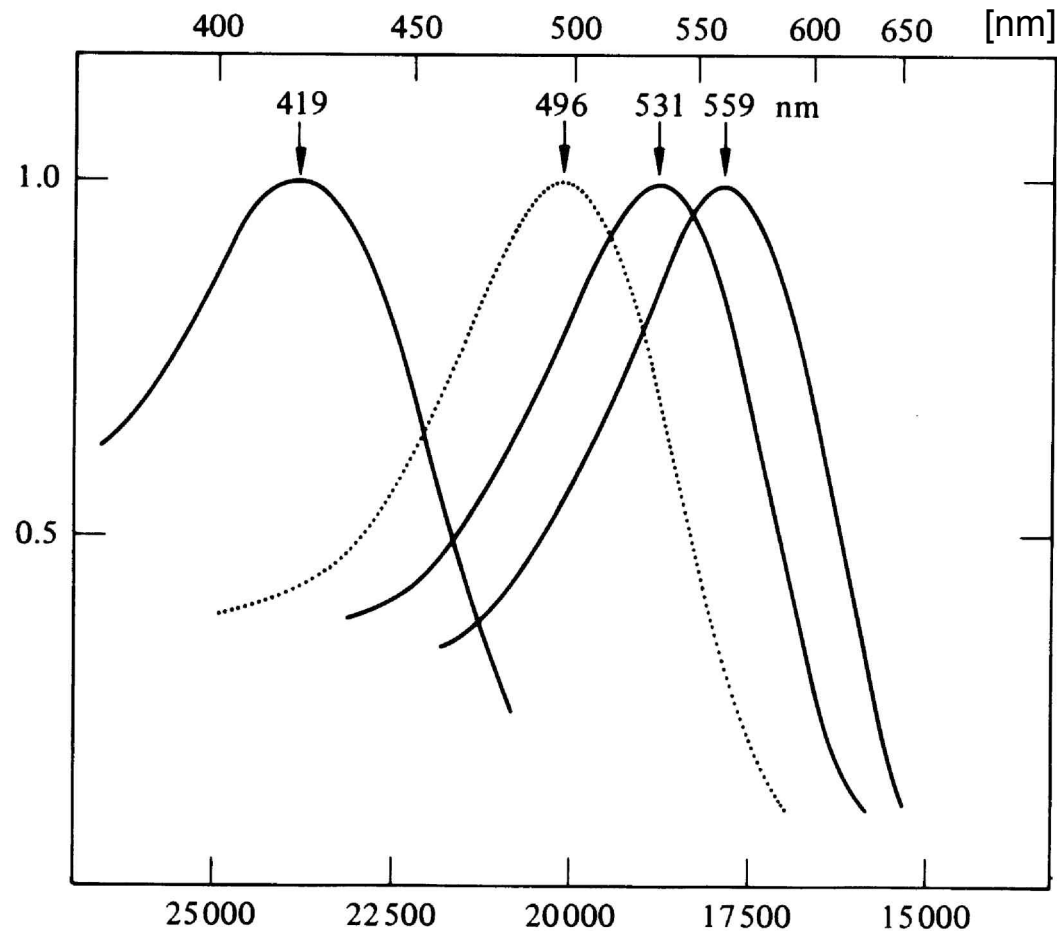
- Zapfen
- Anzahl: 5.000.000
- Rot : Grün : Blau
4 : 16 : 1



Innerer Aufbau des Auges



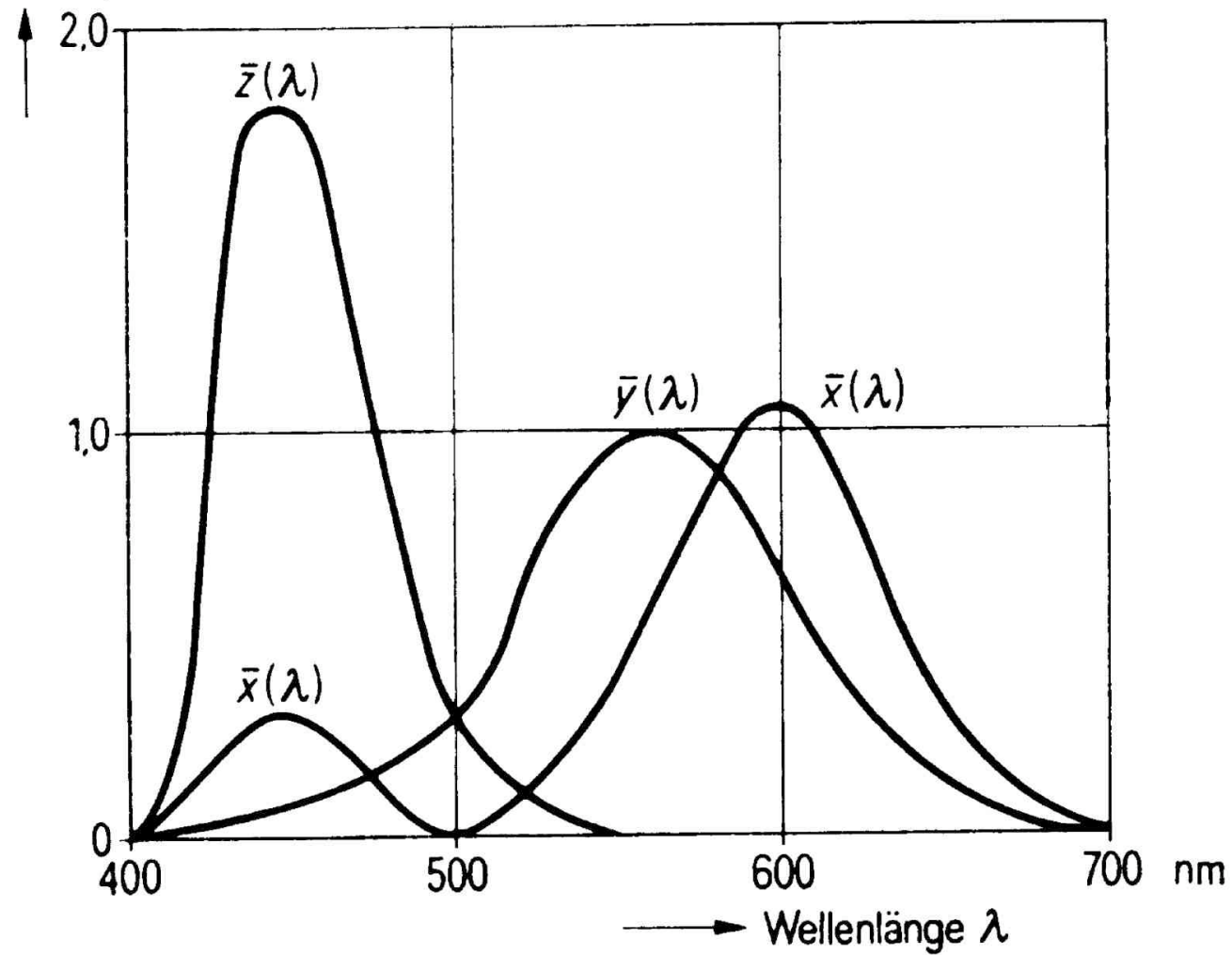
Absorptionskurven von Zapfen und Stäbchen



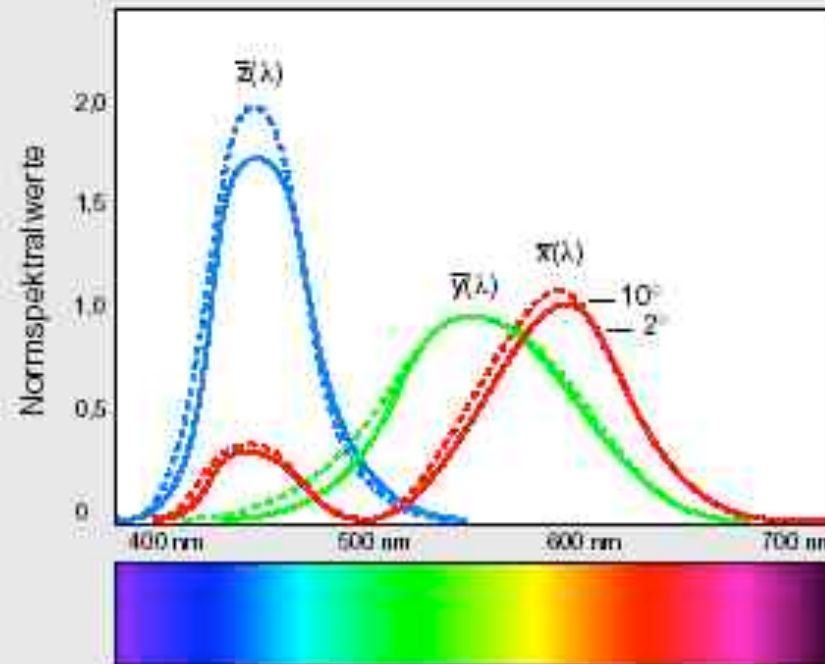
Absorptionskurven der drei Spektraltypen von Zapfen in der Netzhaut (durchgezogene Linien) und der Stäbchen (gestrichelt).

Normspektralwertfunktionen

Normspektralwerte

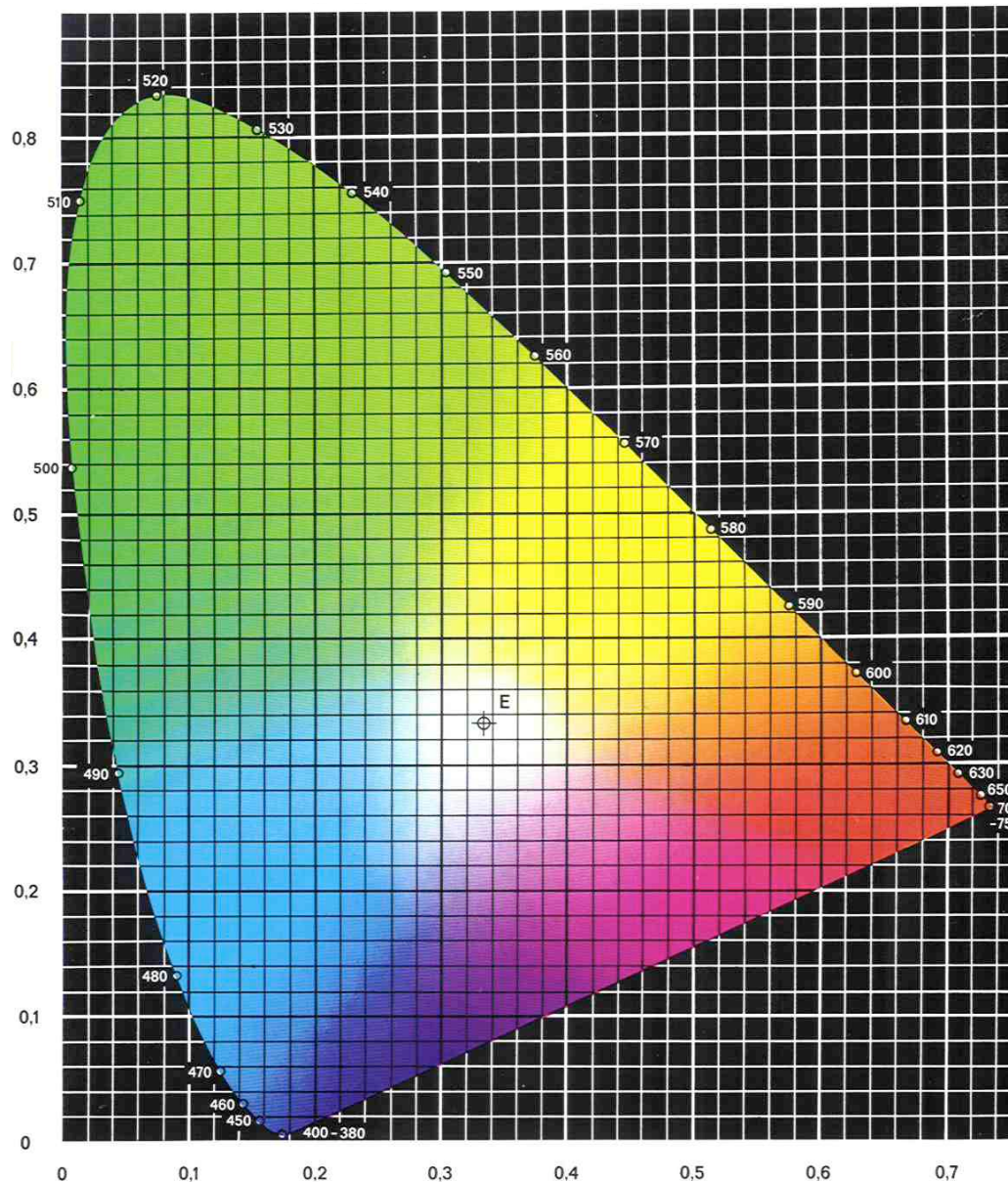


Normspektralwertfunktionen 2° und 10°



So sieht der Mensch die Farben.
Die Normspektralwertfunktionen für den
2°- und 10°- Normalbeobachter beschreiben
unsere Empfindlichkeit für Rot, Grün, und Blau.

Normfarbtafel - Farbdreieck



$$X = k \int \varphi(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = k \int \varphi(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = k \int \varphi(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

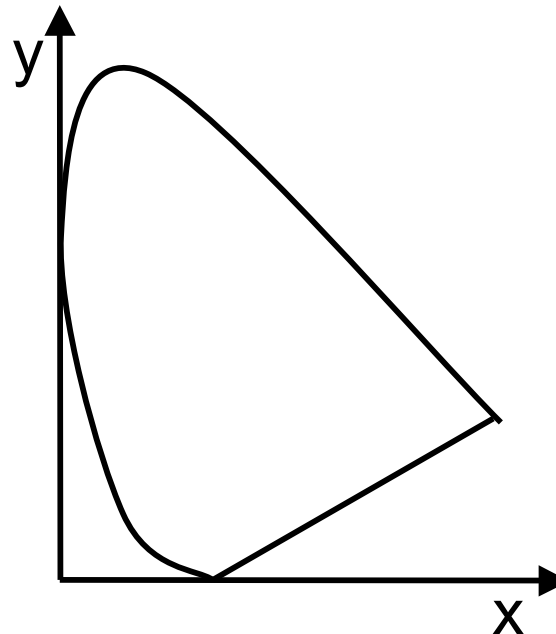
$$z = 1 - x - y$$

Koordinaten im CIE-Farbdreieck

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$z = 1 - x - y$$



Farbe:

Weiss

Farbwertanteile:

$$x_W = 0,333$$

$$y_W = 0,333$$

Lage:

Etwas unterhalb der Plankschen Strahlung

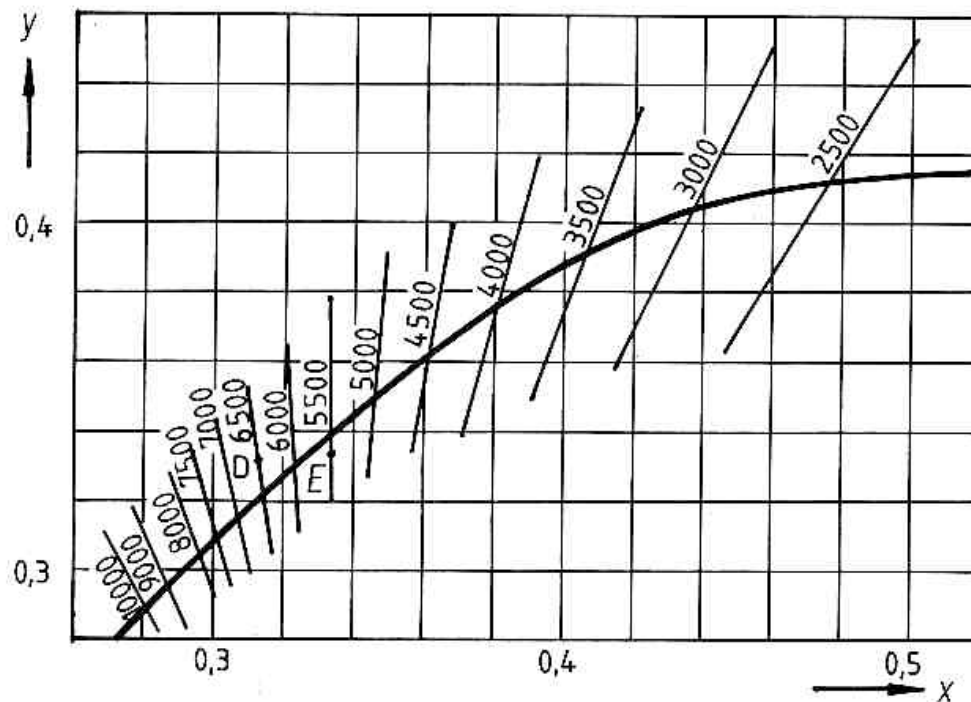
Ähnlichste Farbtemperatur:

5500 K

Ähnlichste Farbtemperatur

Farbtemperatur:

Farbort des schwarzen Strahlers bei einer bestimmten Temperatur



← Plancksche Kurve

Normlichtart A

Glühlampe

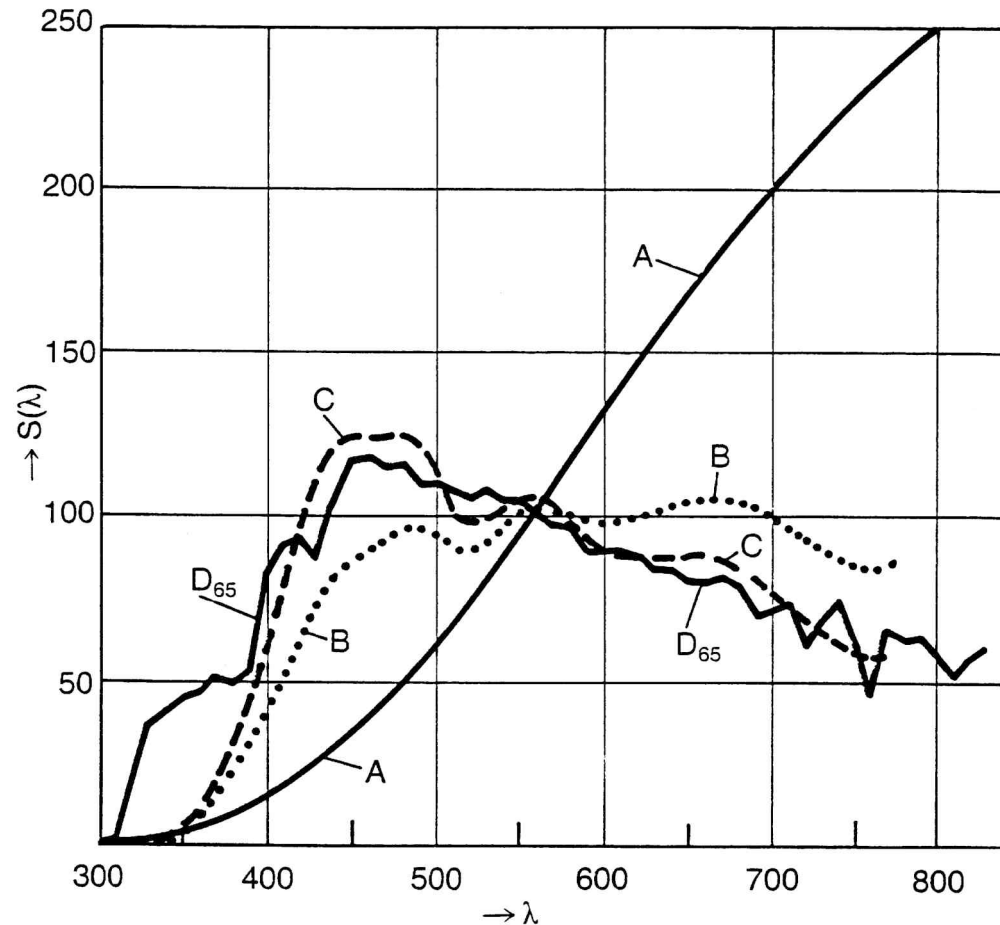
Farbtemperatur 2856 K

Normlichtart D 65

Mittlere Tageslichtphase

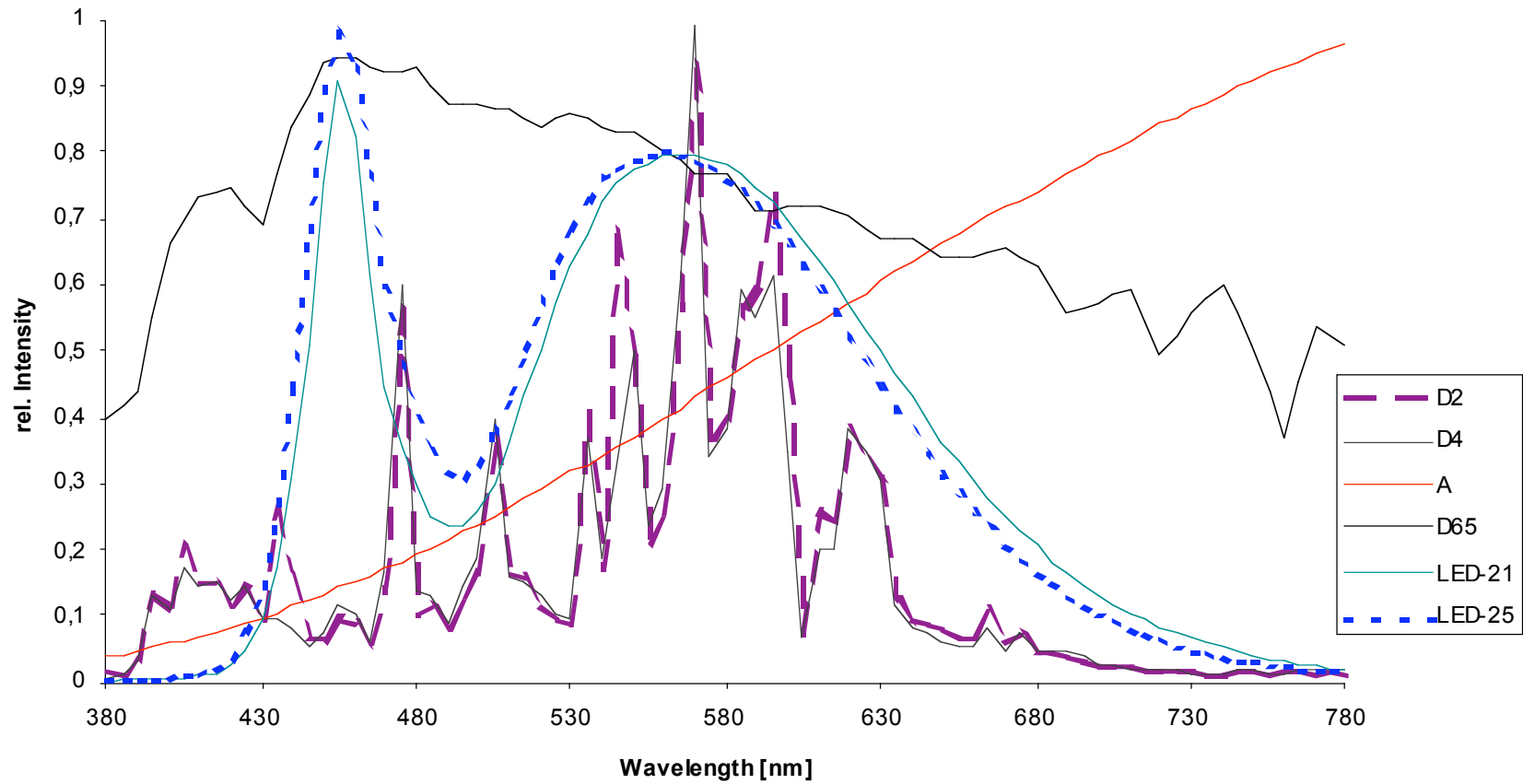
Ähnlichste Farbtemperatur 6500 K

Spektren der Normlichtarten



Strahlungsfunktionen der Normlichtarten A und D65 sowie der Lichtarten C, B und D55

Spectral Distribution of Different Light Sources



Stufe	subjektive Bewertung	R _a -Bereich
1A	sehr gut	> 90
1B		80 - 90
2A	gut	70 - 80
2B		60 - 70
3	mäßig	40 - 60
4	schlecht	20 - 40

Farbwiedergabeindex R_a

Farbtongleiche Wellenlänge

Farbe F im CIE - Farbdreieck

Farbwertanteile:

$$x_F, y_F$$

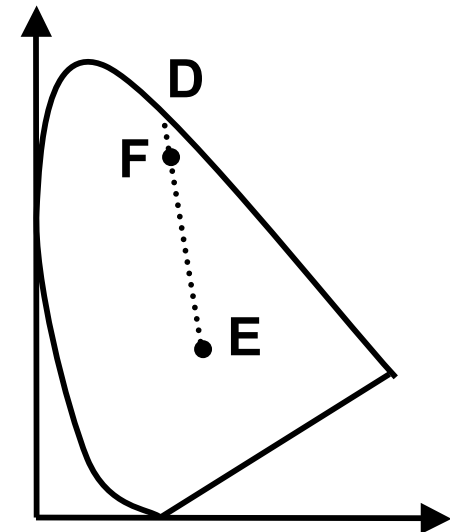
Farbtongleiche Wellenlänge

- Gerade von Unbuntpunkt E durch Farbe F
- Schnittpunkt mit Spektralfarbenzug ist die Spektralfarbe der farbtongleichen Wellenlänge
- Farbwertanteile:

$$x_d, y_d$$

Berechnung spektraler Farbanteil

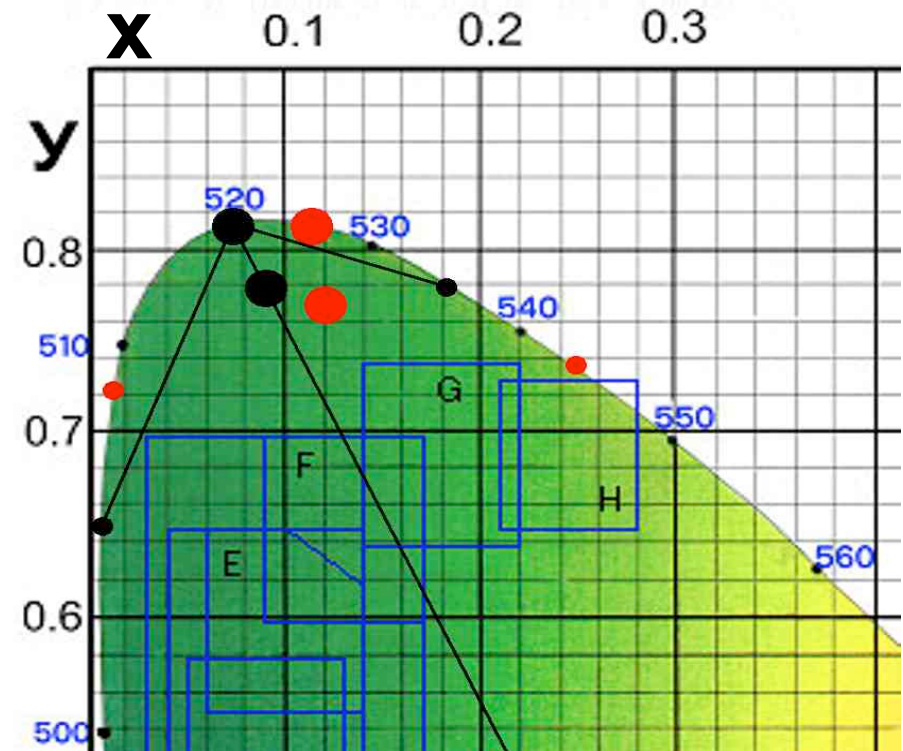
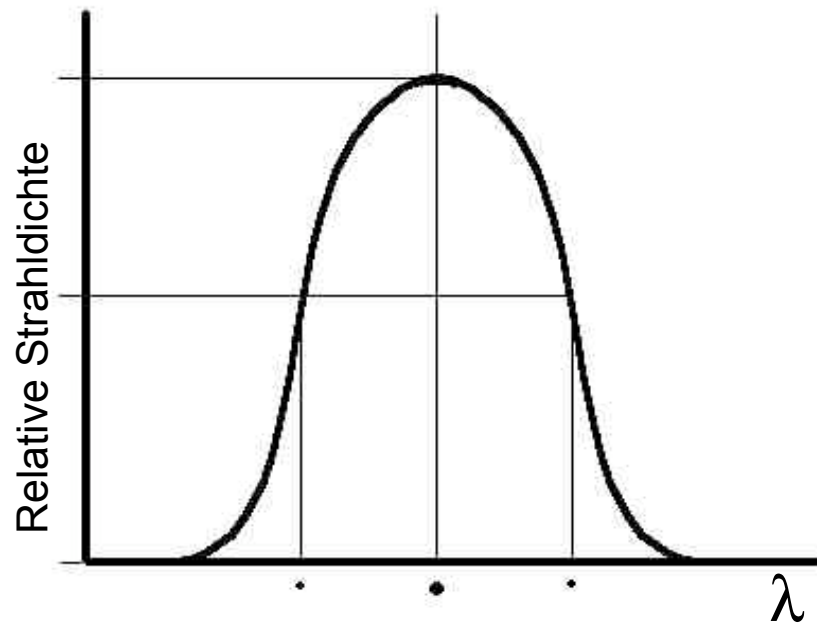
$$p_e = \frac{y_F - y_w}{y_d - y_w} \quad \text{oder} \quad p_e = \frac{x_F - x_w}{x_d - x_w}$$



Dominante Wellenlänge

Vorteil: Beschreibt die Farbe einer LED mit **einem** Wert

Nachteil: Keine exakte Beschreibung des tatsächlichen Farbortes



Adaption des Auges an

- mittlere Leuchtdichte
- vorherrschende Farbe (bei geringer Sättigung)

Farbstimmung

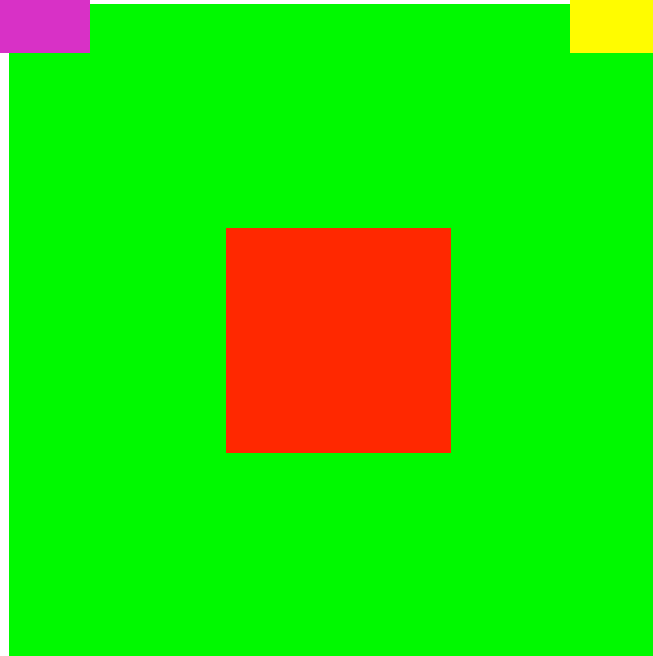
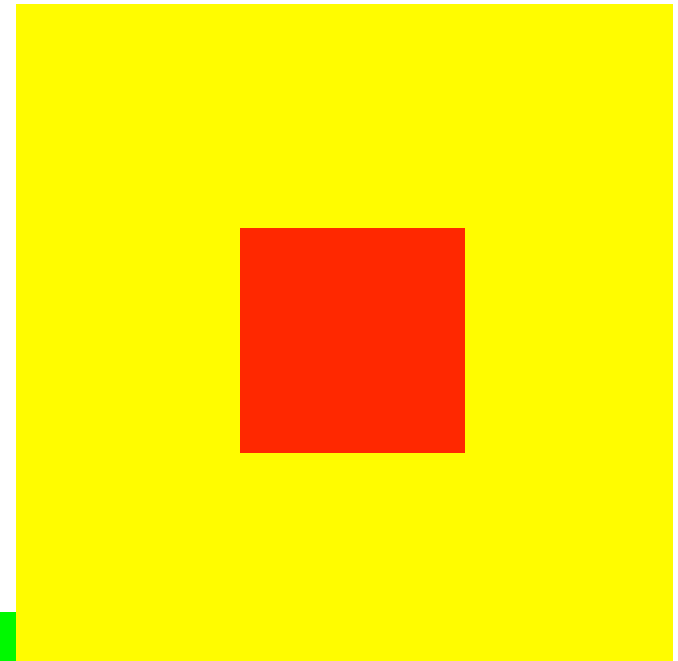
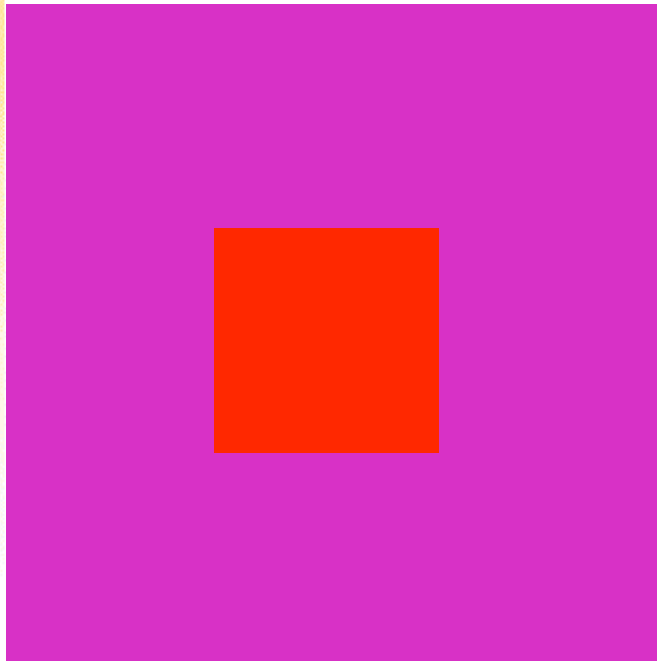
Weißabgleich

Farbumstimmung

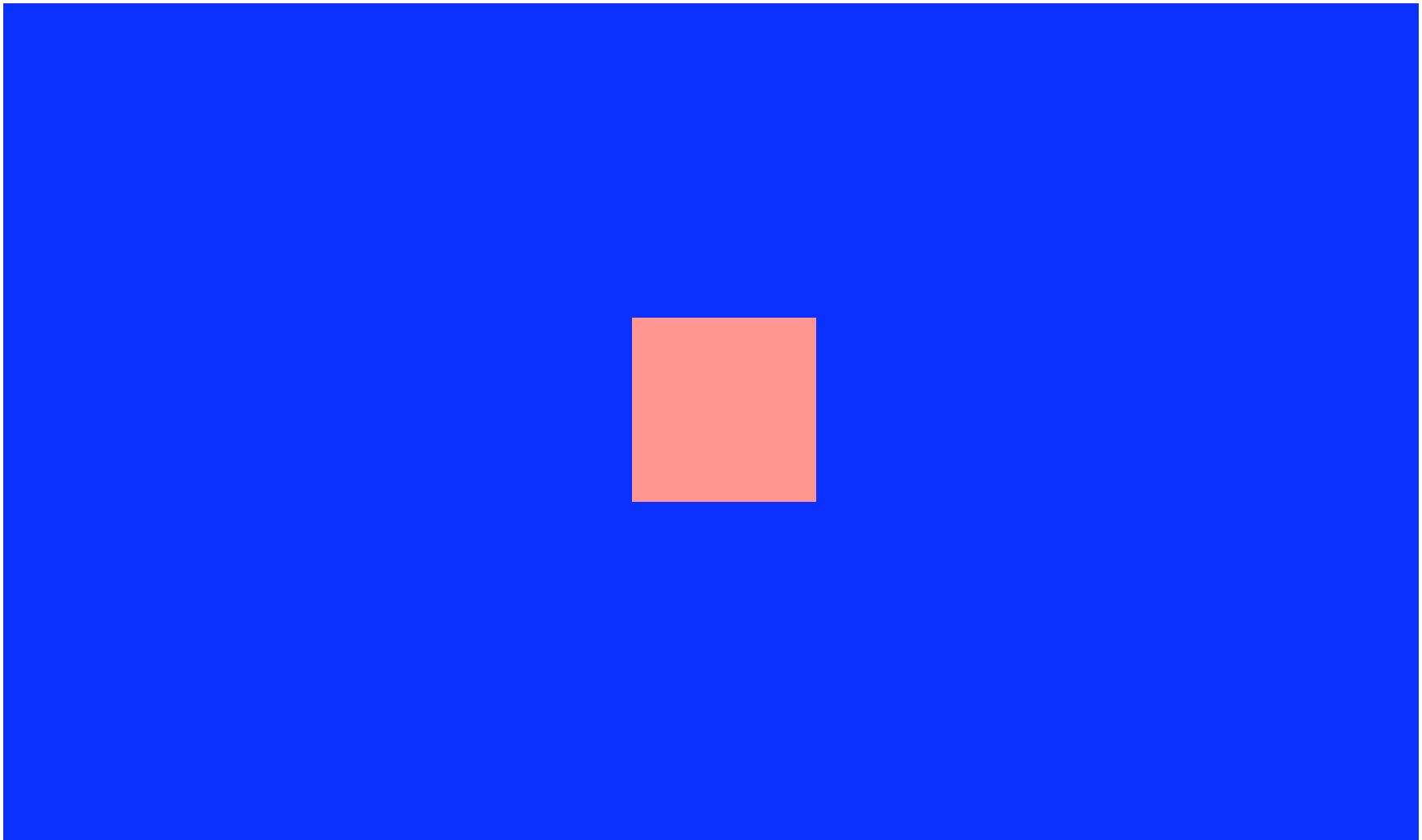
Farbstich

DIN 5033 Teil 1 Absatz 12:

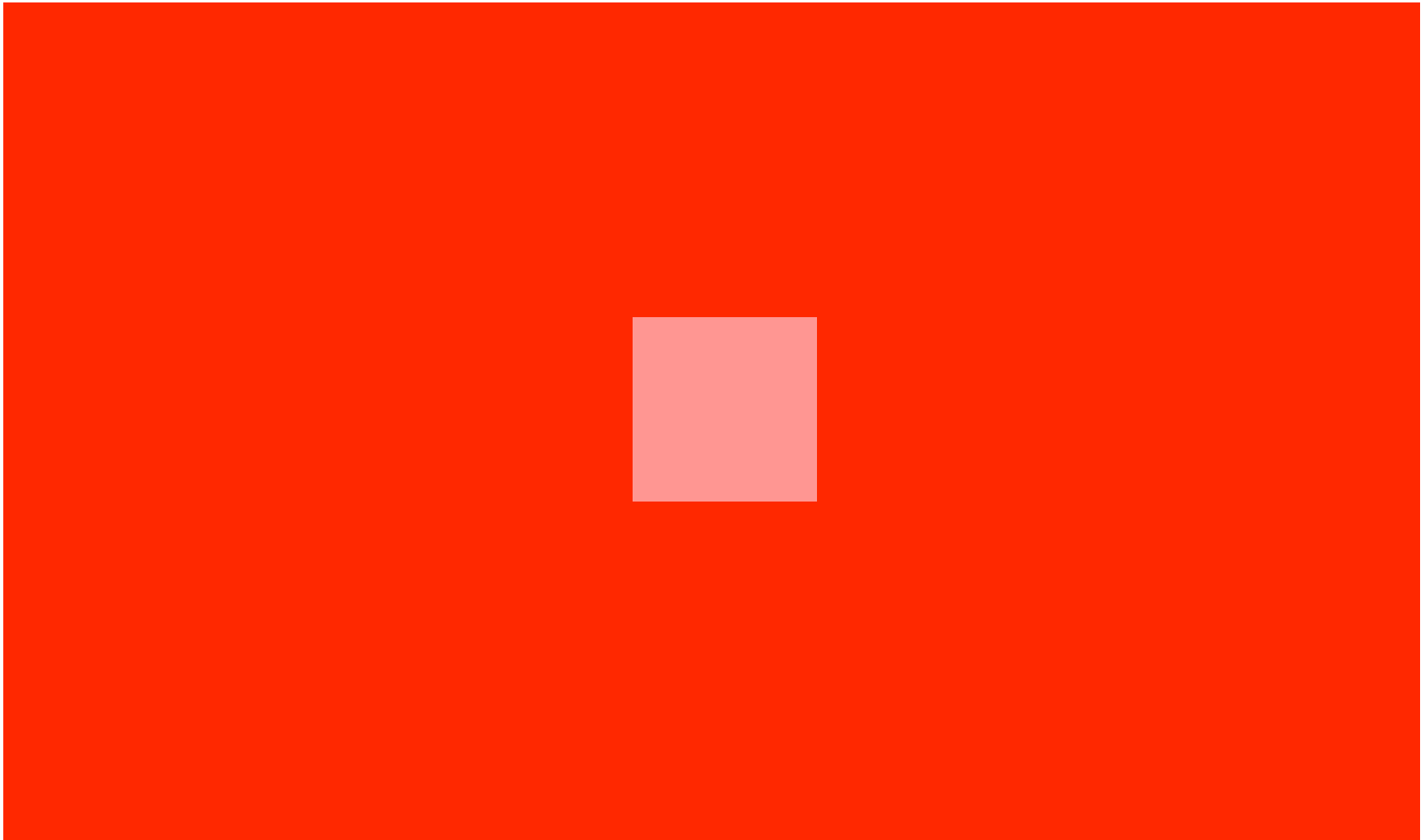
Die Farbstimmung wird durch diejenige Farbart beschrieben, die jeweils als unbunt empfunden wird.



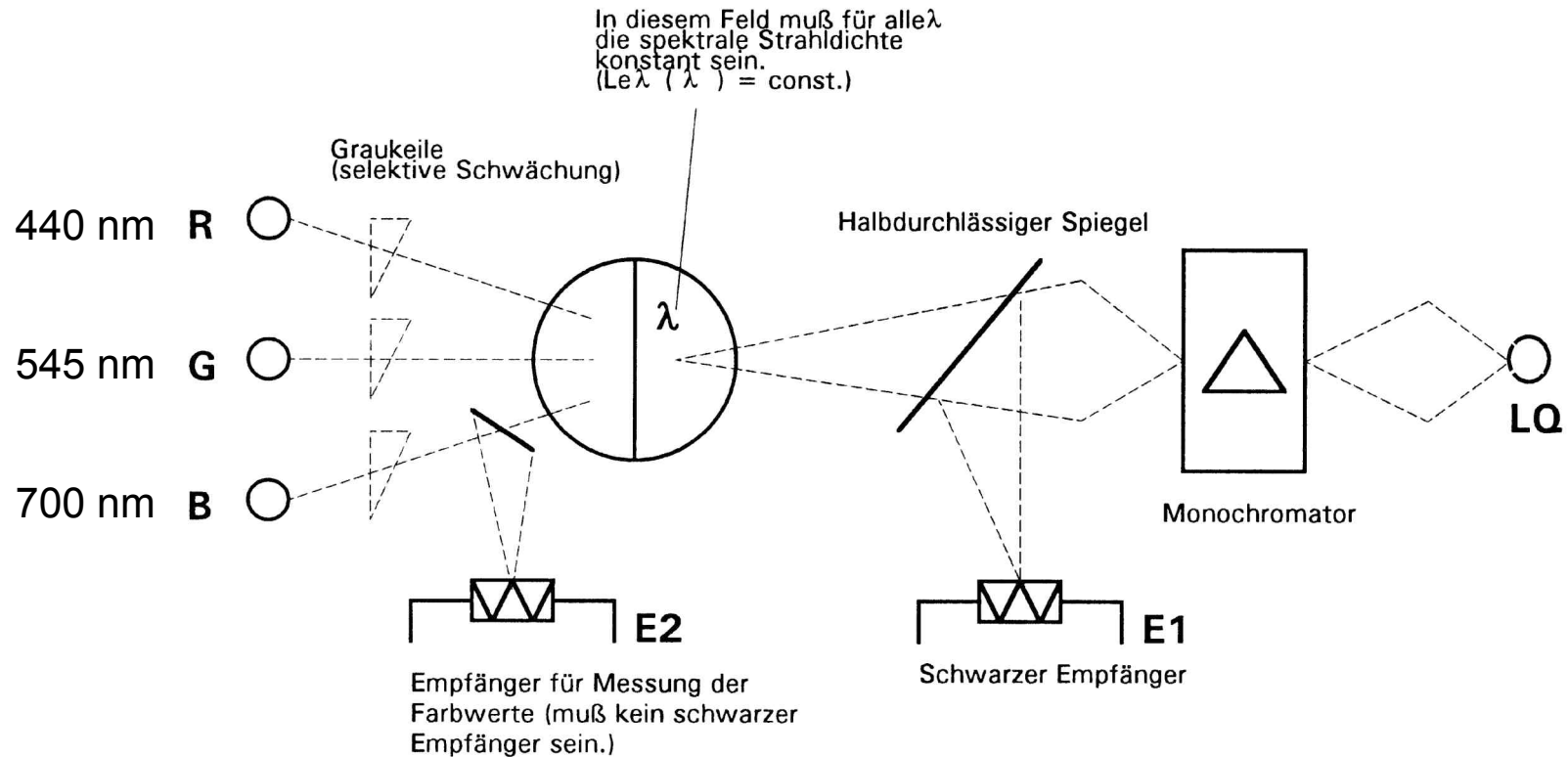
Farbstimmung - Beispiel



Farbstimmung - Beispiel



Farbabgleich - Helmholtz'scher Farbmischapparat



Schematischer Versuchsaufbau zur Messung von spektralen Farbwerten

Die realen Messungen erfolgten mittels spezieller optischer Geräte, z.B. dem Helmholtz'schen Farbmischapparat. Im linken Photometerfeld werden die 3 Grundfarben so gemischt, dass eine Farbgleichheit zwischen diesem Feld und der vorgegebenen Spektralfarbe besteht.

Farbabgleich ist extensiv

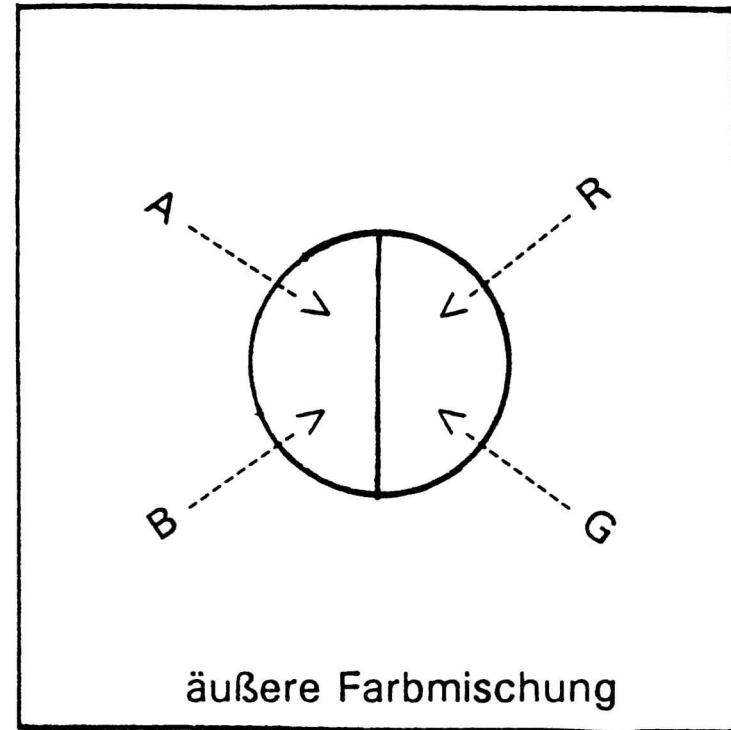
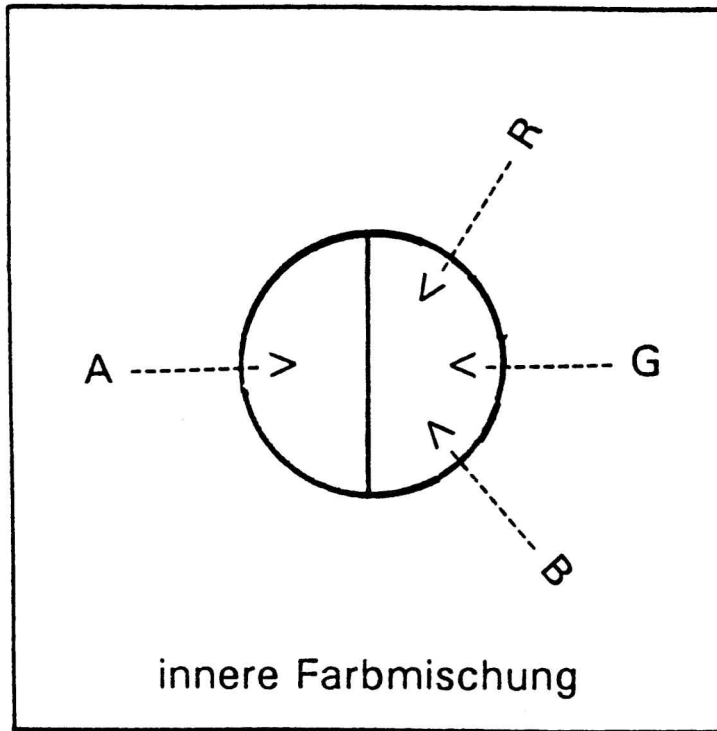
Gleichheit ist vollständig

Heterochromer Helligkeitsabgleich ist intensiv

Gleichheit gilt nur für Helligkeit

Farbattribute Buntton und Buntheit können unterschiedlich sein

Innere und äußere Farbmischung



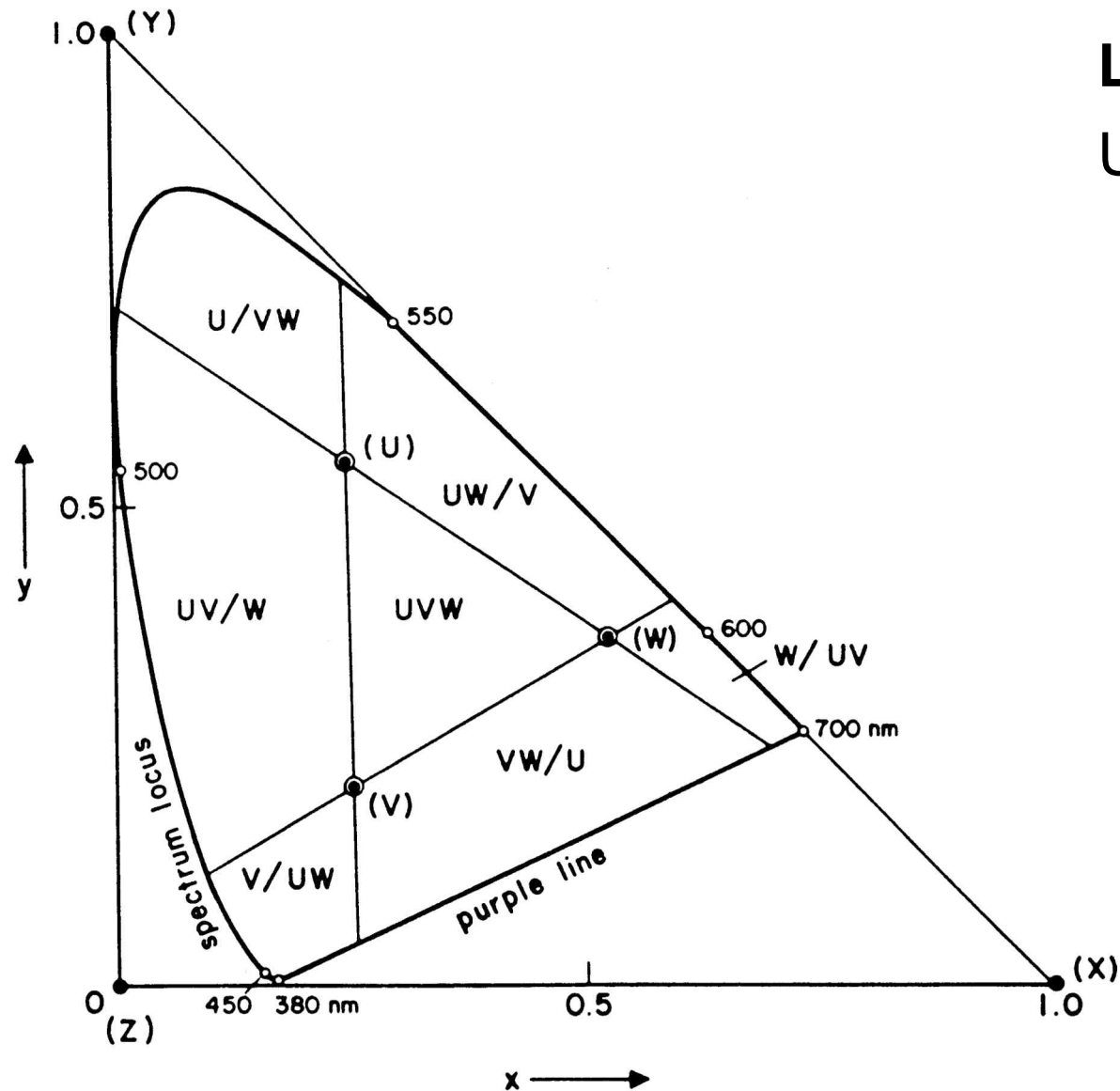
R: Rot
G: Grün
B: Blau

A: zu bestimmende Farbe

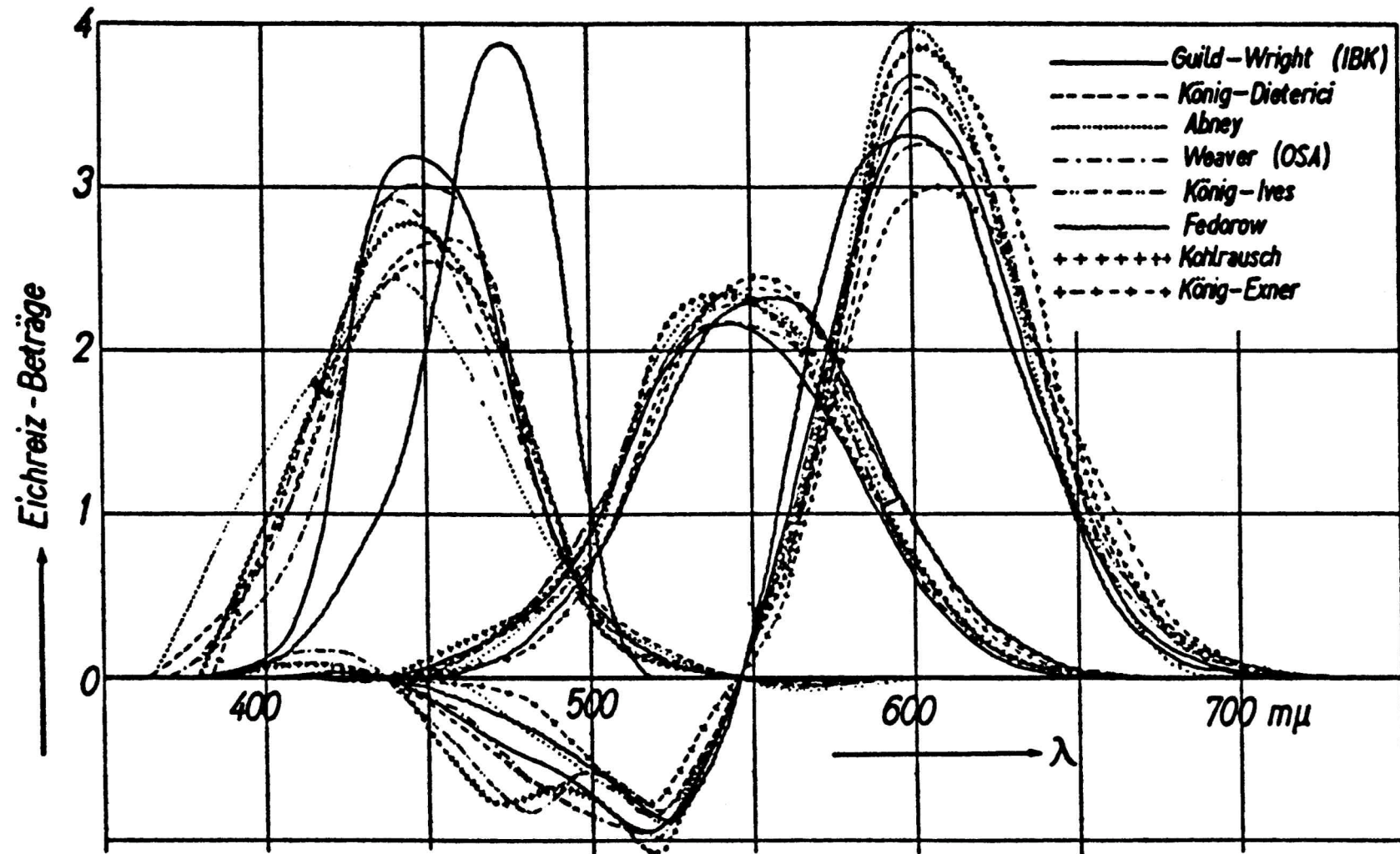
Farbmischungen in der Farbtafel

Lichtquellen:

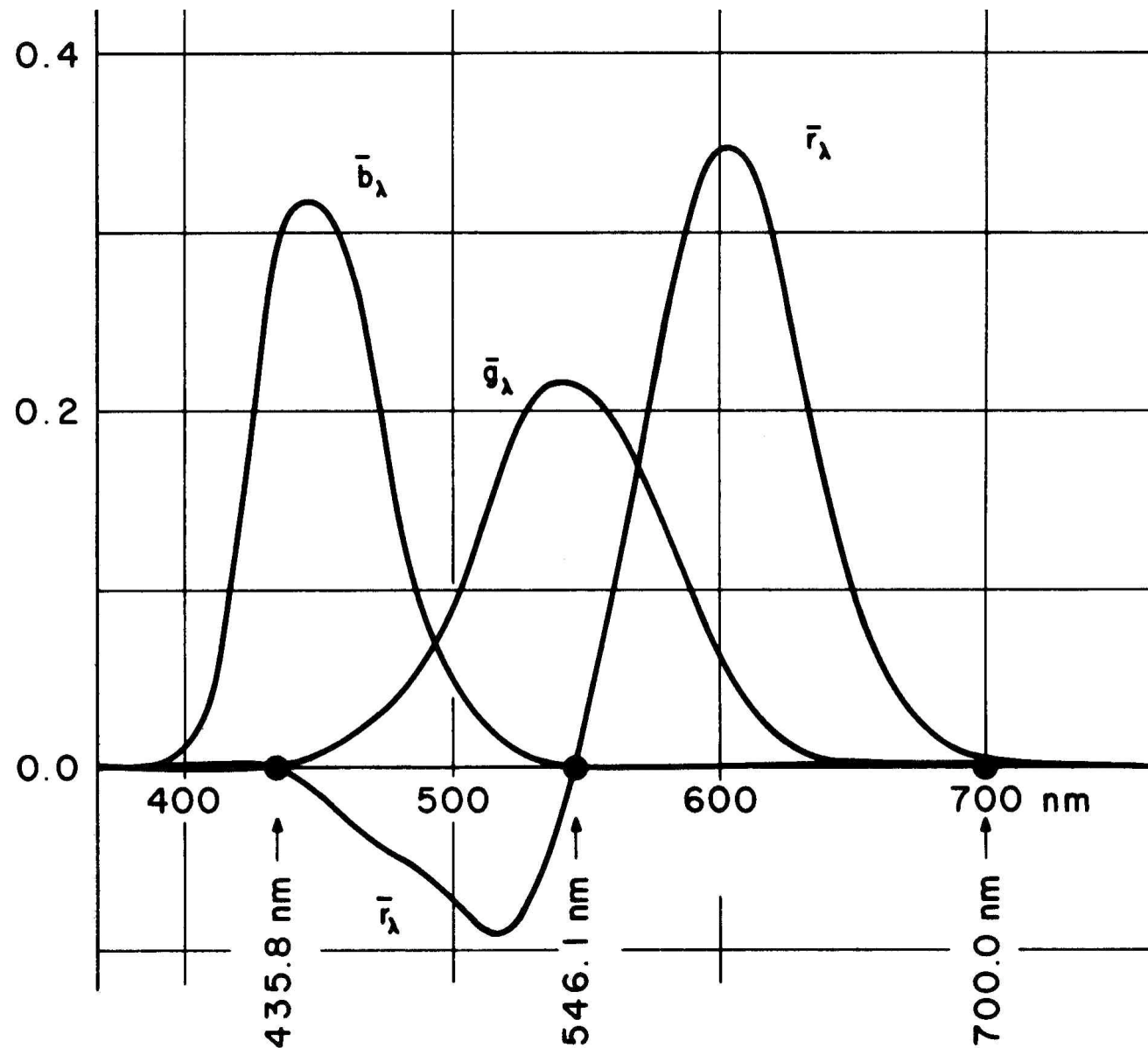
U, V, W



Gemessene Spektralwertfunktionen



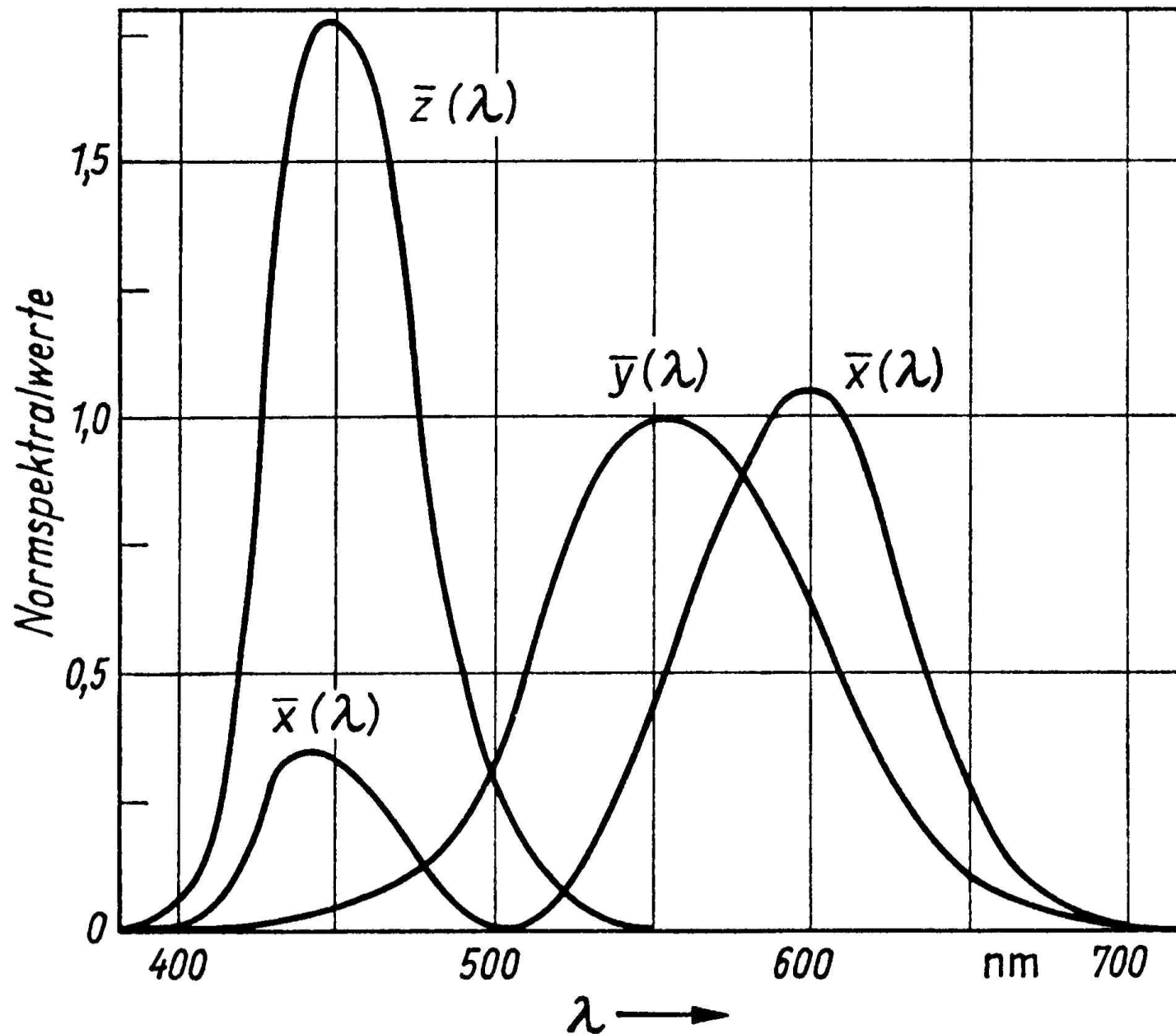
CIE-RGB Spektralwertfunktionen



Umrechnung CIE-RGB zu CIE-xyz

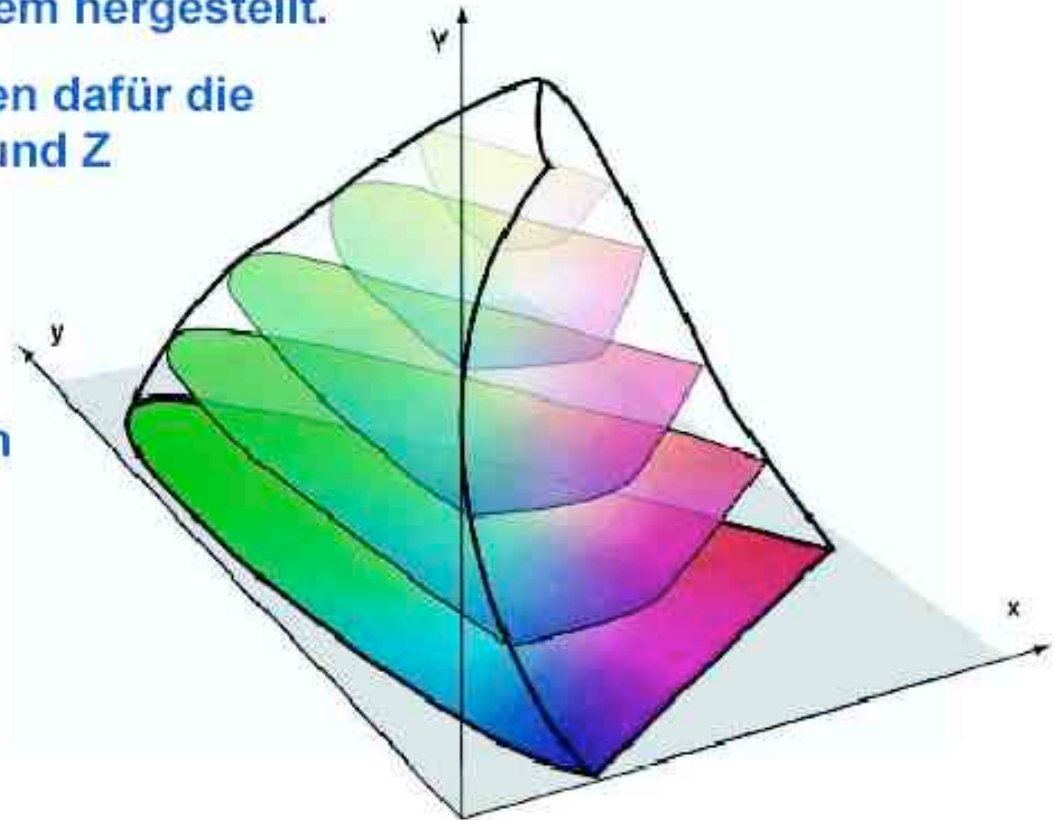
$$\begin{aligned}\bar{x}(\lambda) &= 2,7689 \bar{r}(\lambda) + 1,7518 \bar{g}(\lambda) + 1,1302 \bar{b}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) &= 1,0000 \bar{r}(\lambda) + 4,5907 \bar{g}(\lambda) + 0,0601 \bar{b}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) &= 0,0000 \bar{r}(\lambda) + 0,0565 \bar{g}(\lambda) + 5,5943 \bar{b}(\lambda)\end{aligned}$$

CIE-xyz Normspektralwertfunktionen

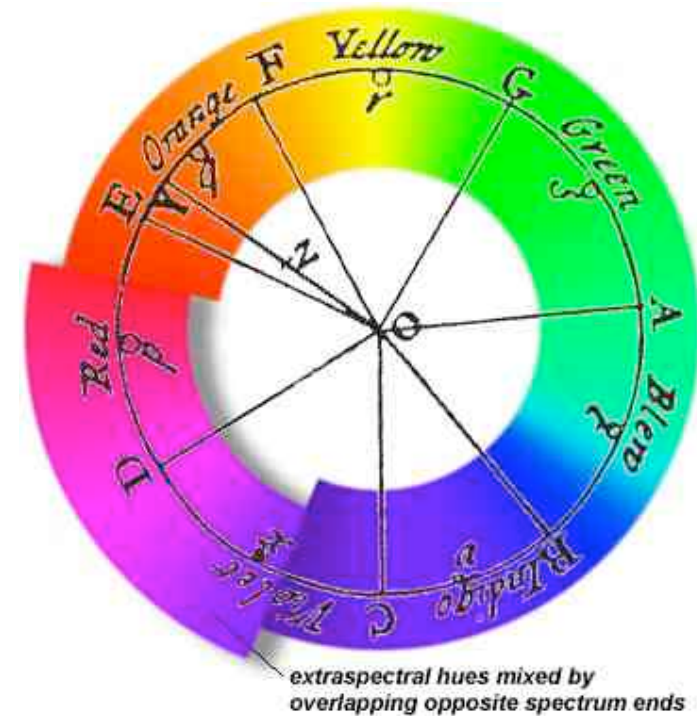
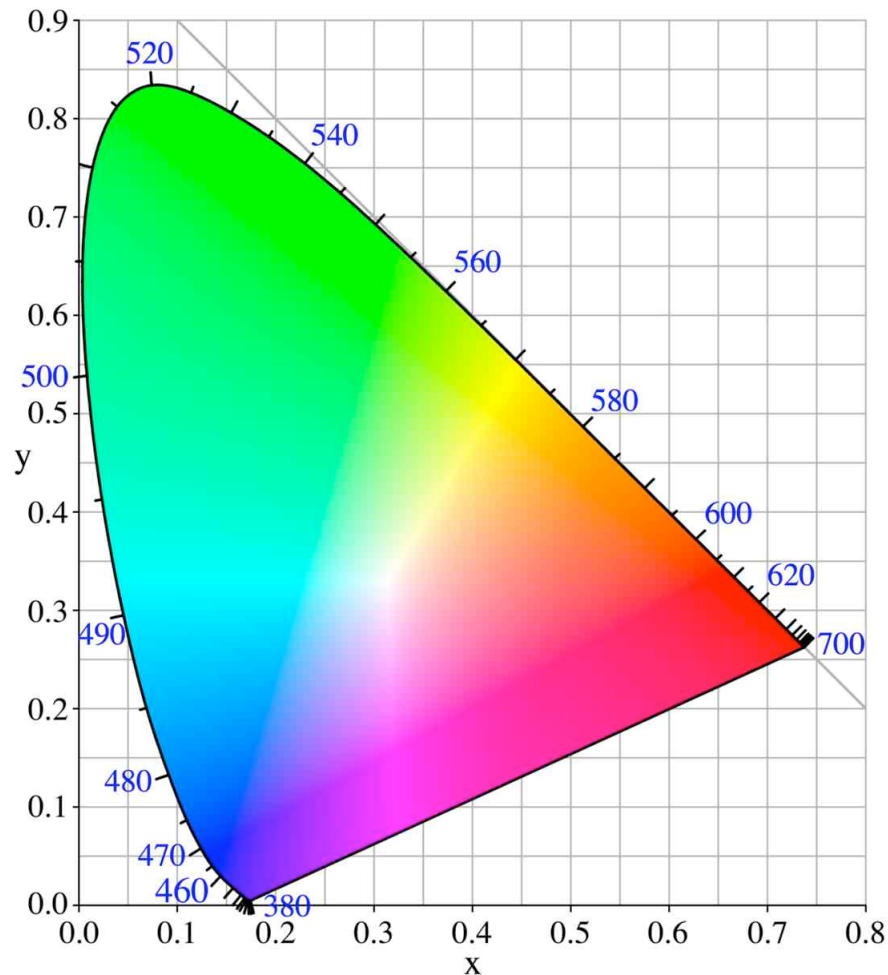


CIE-xyY-System

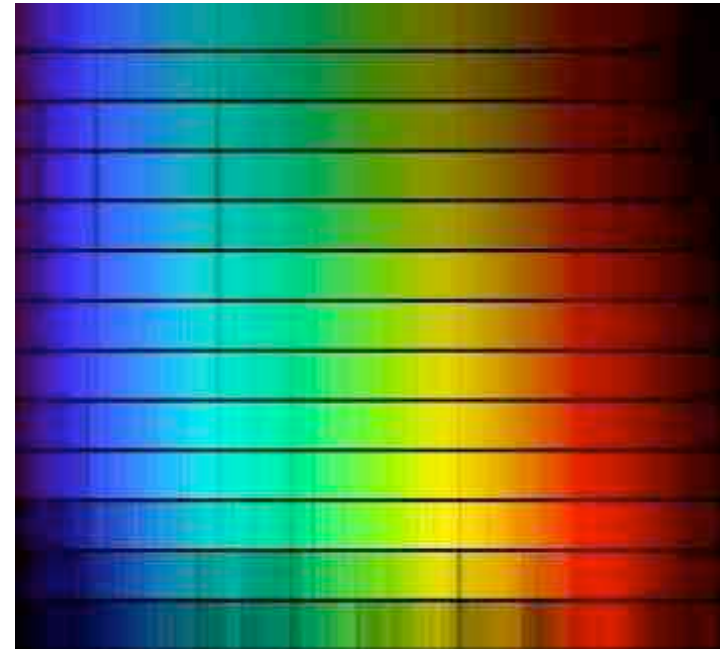
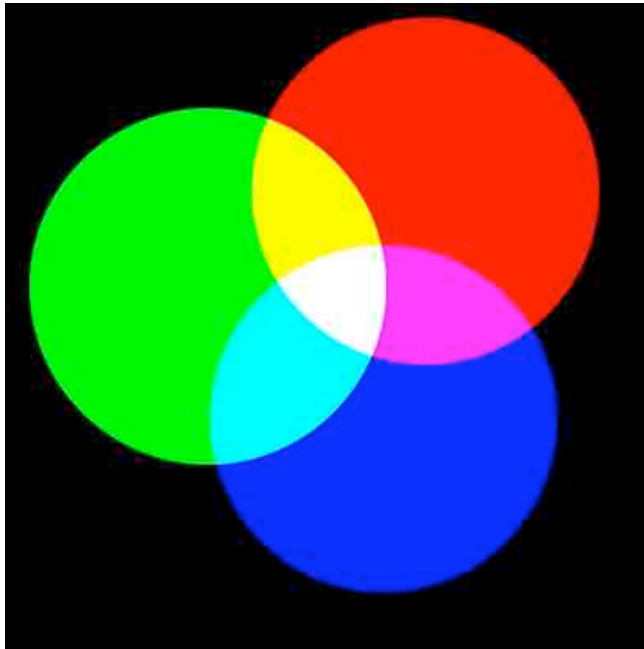
- Für die visuell gleichabständigen Farbsysteme wird eine Beziehung zwischen gesehenem Farbunterschied und dem Farbabstand im Farbsystem hergestellt.
- Im CIE-xyY-System werden dafür die drei Normfarbwerte X , Y und Z verwendet. Durch mathematische Umformung hat man diese drei Werte auf x und y reduziert und durch einen Hellbezugswert (Y) ergänzt.



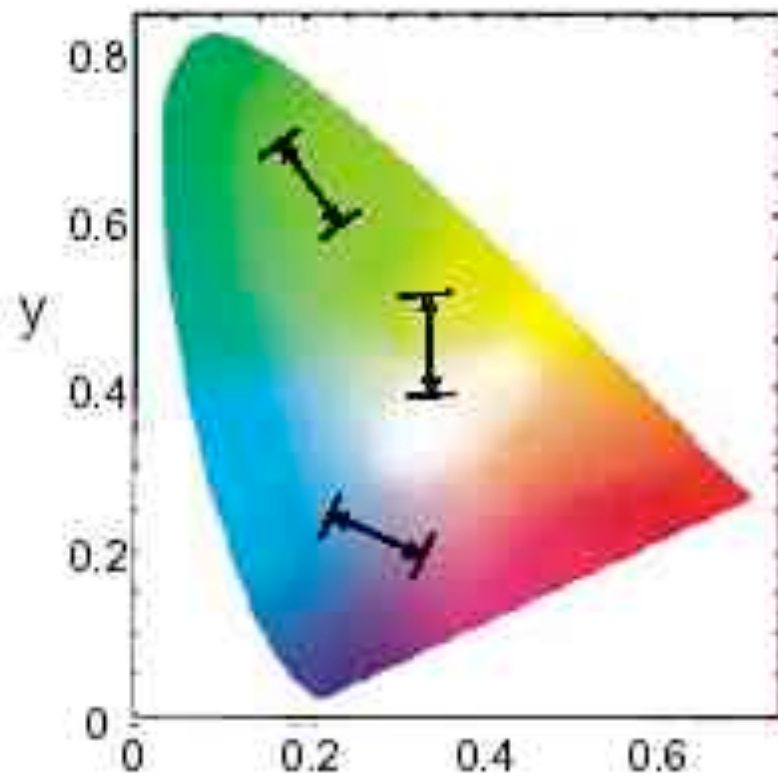
Farbdreieck CIE und Farbkreis nach Newton



Magenta im Spektrum durch additive Farbmischung



[Quellen: jumk.de/astronomie/about-stars/measured-values.shtml
www.handprint.com/HP/WCL/color2.html]



Liegen bei gleicher Strecke auch gleiche Farbabstände vor?

DIN 5033 Teil 1 Absatz 18:

Die Größe des empfindungsgemäßen Unterschiedes zwischen zwei Farben heißt Farbabstand.

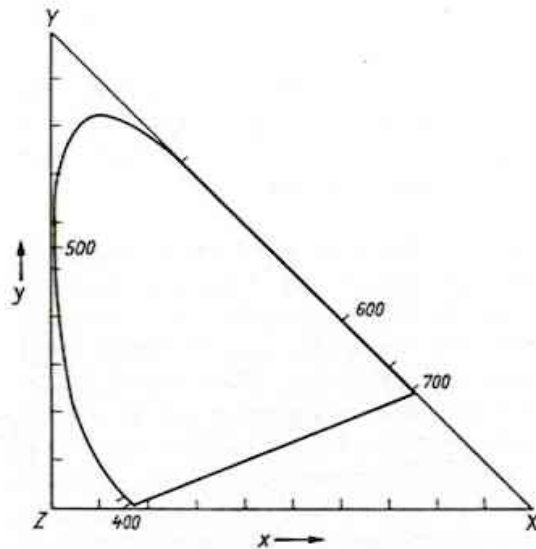
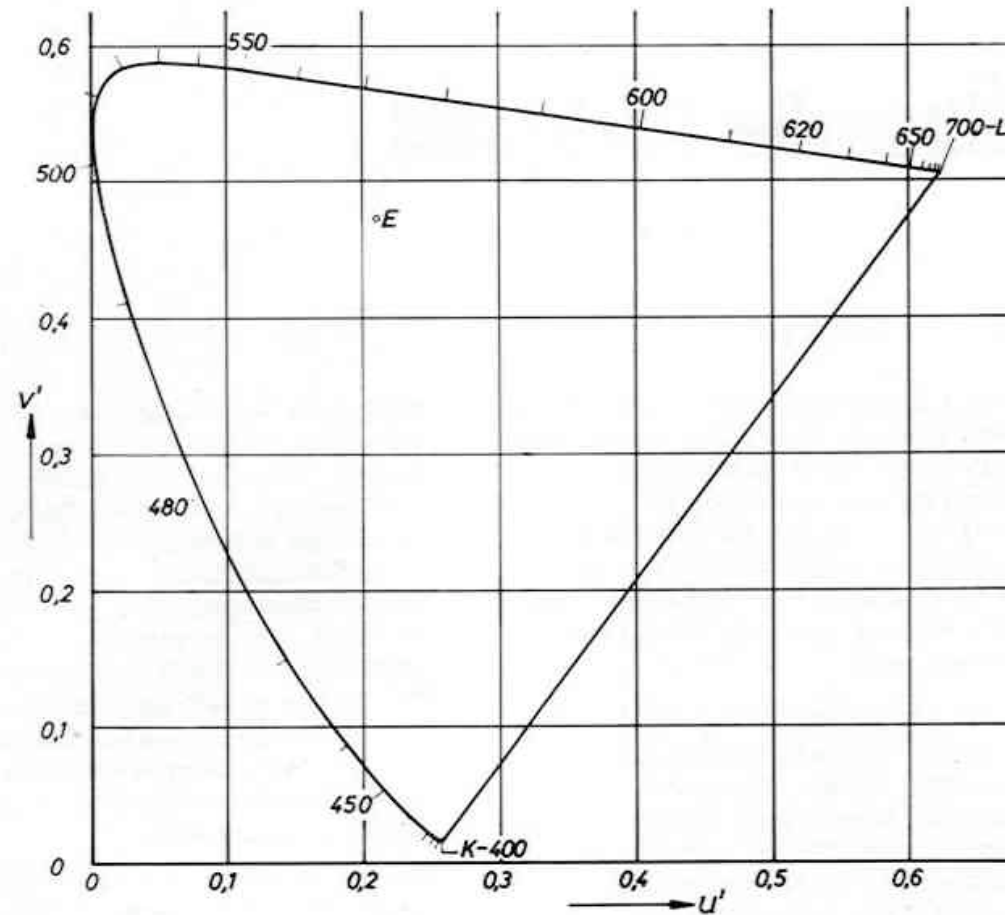


Bild 1: Gestalt der Normfarbtabelle nach DIN 5033.

Bild 2: Von der CIE 1976 empfohlene UCS-Farbtabelle (UCS = Uniform Chromaticity Scale, also etwa „Gleichabständige Farbart-Tafel“).



UCS Lu'v' Berechnung

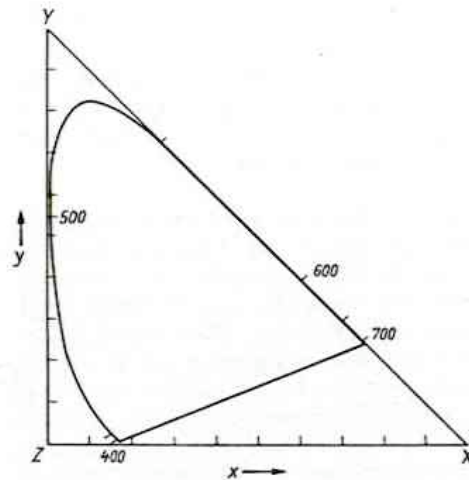
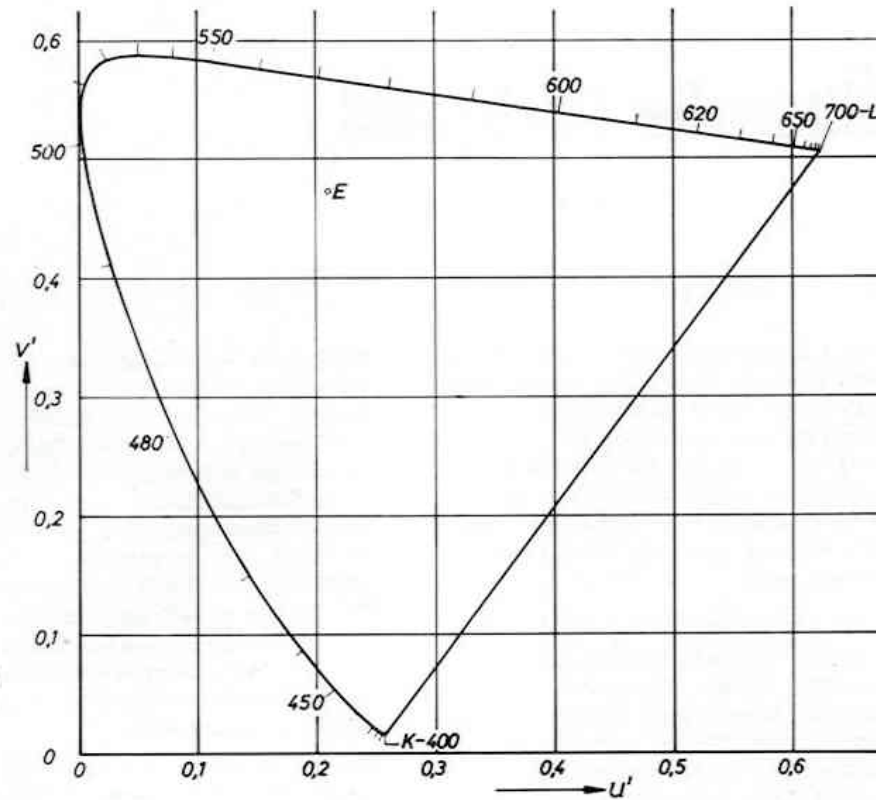


Bild 1: Gestalt der Normfarbtabel nach DIN 5033.

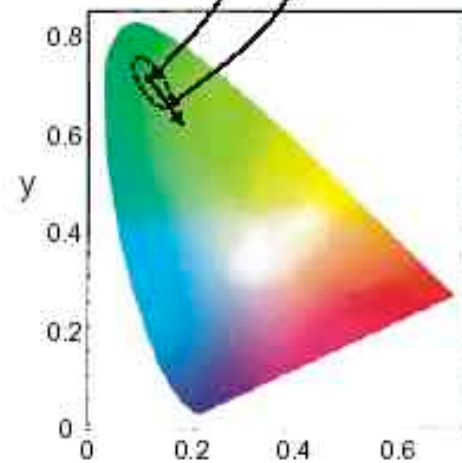
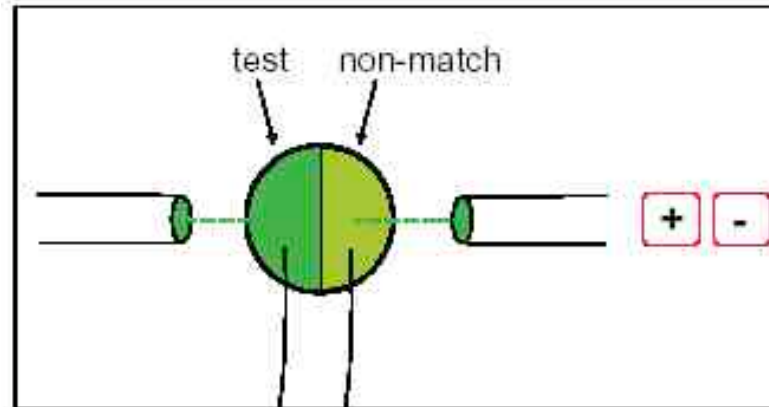
$$u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$

$$v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}$$

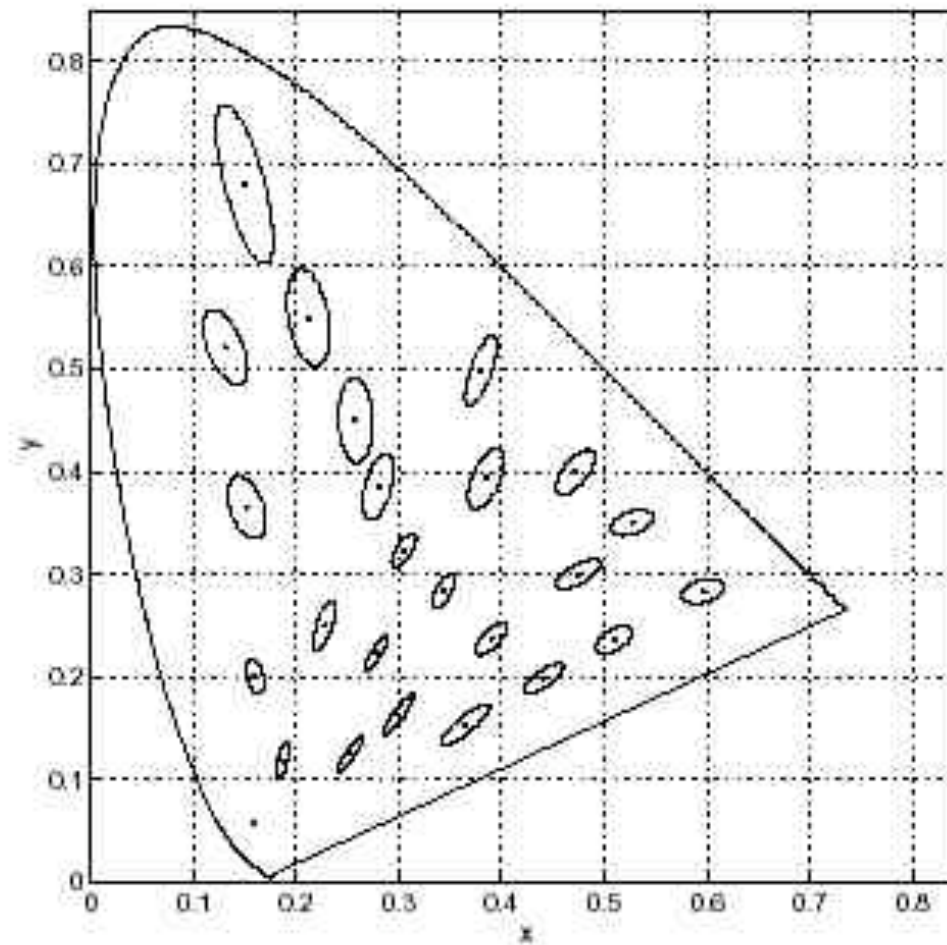


MacAdam Experiment

MacAdam - JND (Just Noticeable difference)

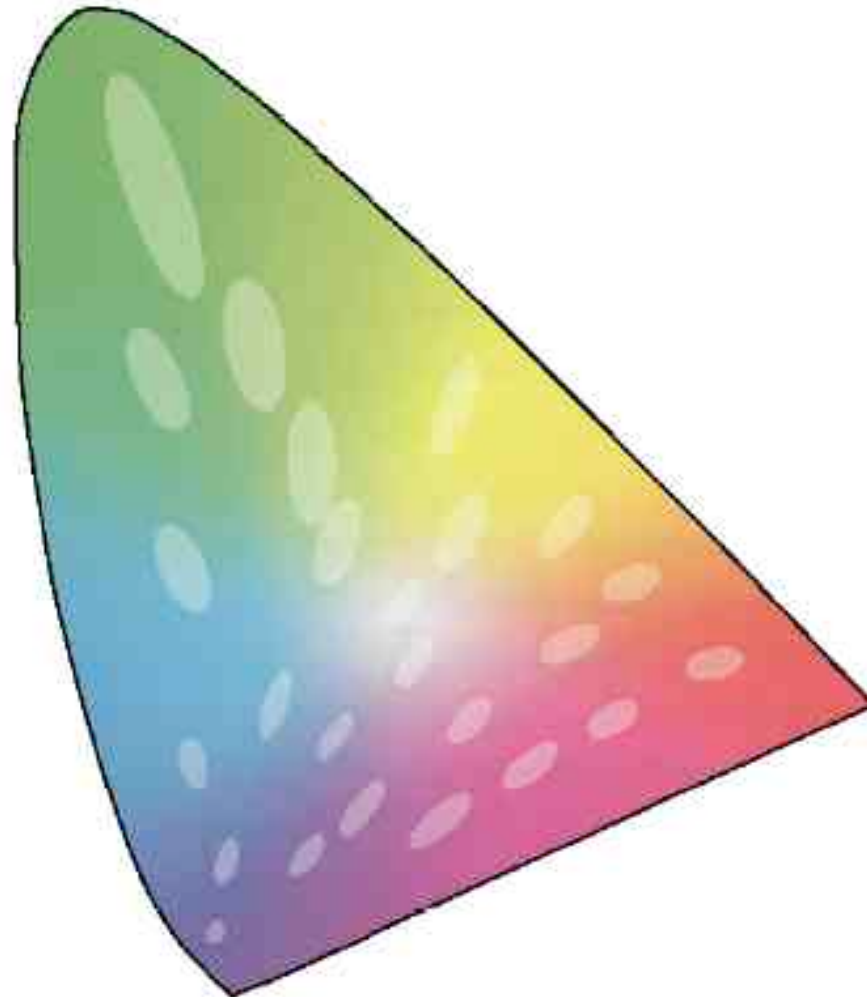


MacAdam Ellipsen in xy-Koordinaten



Ellipsen in zehnfacher Vergrößerung dargestellt

MacAdam Ellipsen



MacAdam Ellipsen in u^*v^* -Koordinaten

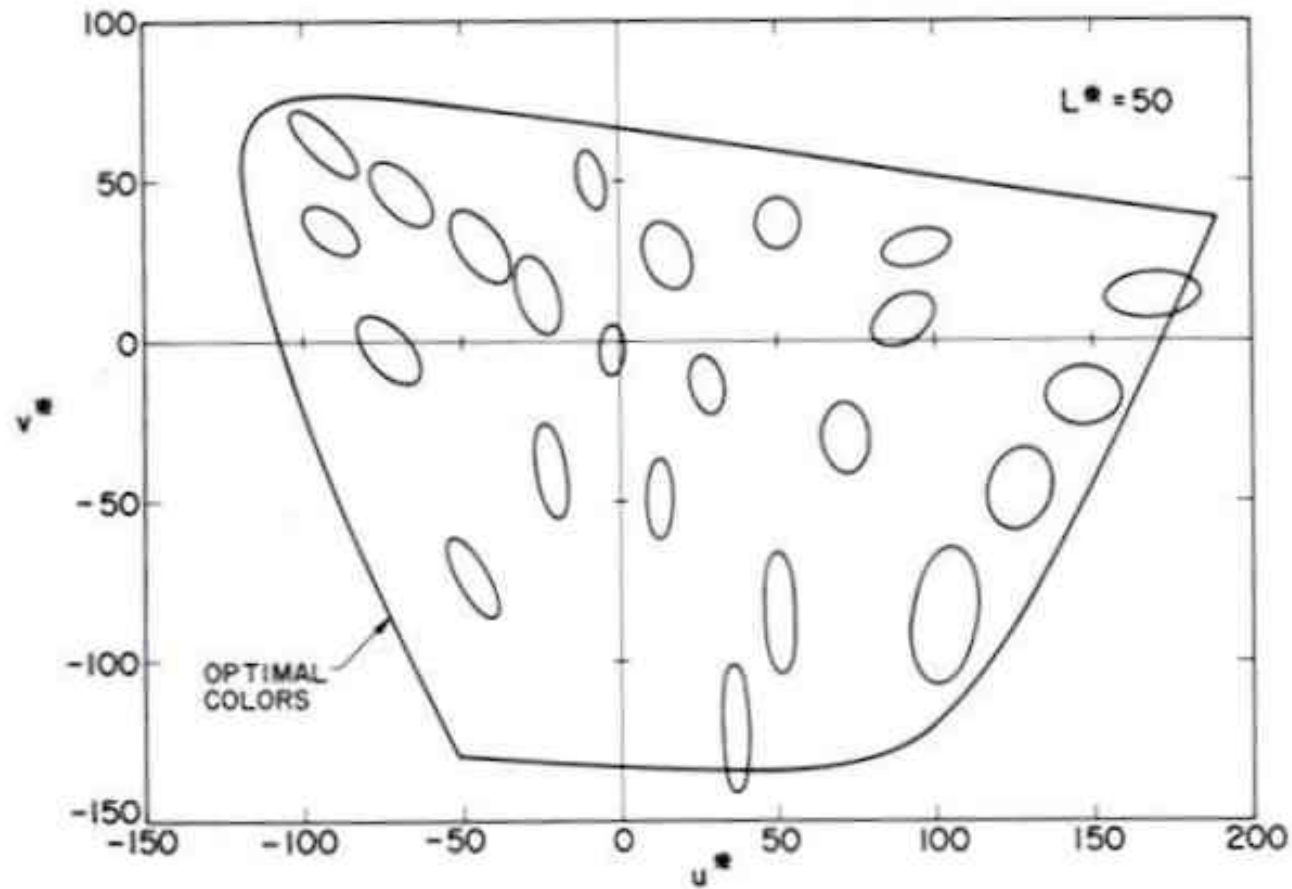


Fig. 3(5.4.1). MacAdam (1942) ellipses plotted in CIE 1976 (u^* , v^*)-diagram (Robertson, 1977).

MacAdam Ellipsen als Kreise

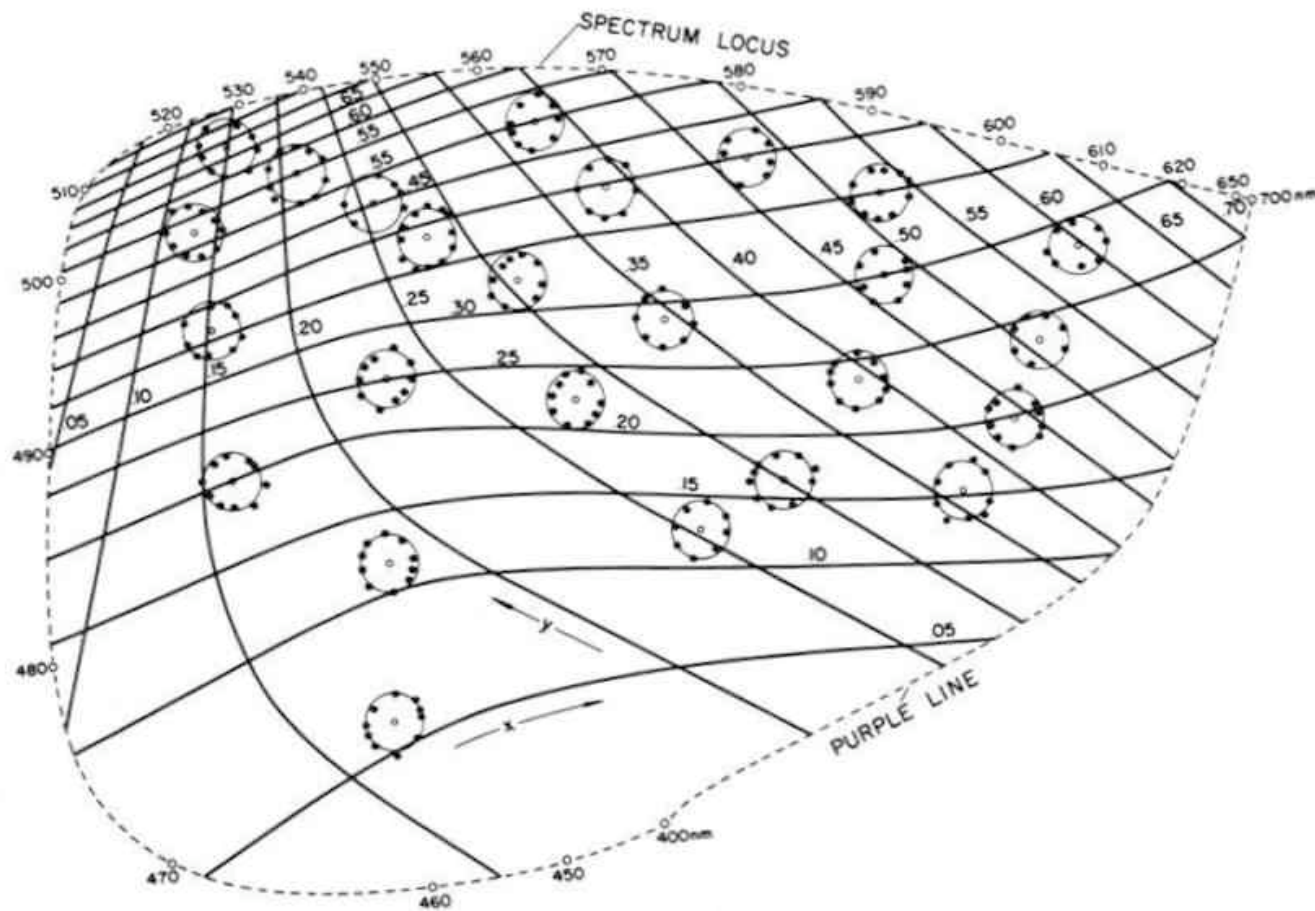


Fig. 4(5.4.1). Nonlinear transformation of CIE 1931 (x, y) -chromaticity diagram designed to make MacAdam's (1942) ellipses approximately equal to circles of identical size (from Farnsworth, 1958).

CIE-UVW und CIE-Lu*v* Koordinaten

CIE- UVW Coordinates

The transformation from XYZ space to perceptual space is **Non Linear**:

Linear approximation defined by CIE (1976);
CIE Uniform Chromaticity Scale (UCS) :

$$U = \frac{2}{3} X$$

$$V = Y$$

$$W = \frac{-X + 3Y + Z}{2}$$

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.66 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -0.5 & 1.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

CIE-uv Chromaticity Coordinates:

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$

$$v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3}$$

CIE- L*u*v* Coordinates

CIE- L*u*v* Coordinates = modified UCS system
(1964, 1976)

$$u^* = 13 L^*(u' - u'_0)$$

$$v^* = 13 L^*(1.5v' - v'_0)$$

$$L^* = \begin{cases} 116(Y/Y_0)^{1/3} - 16 & \text{for } Y/Y_0 > 0.01 \\ 903(Y/Y_0) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$u_0 v_0 Y_0$ = coordinates of reference white

$$u' = u$$

$$v' = 1.5 v$$

CIE- $L^*a^*b^*$ Coordinates

$$a^* = 500 \left[(X/X_0)^{1/3} - (Y/Y_0)^{1/3} \right] \quad *$$

$$b^* = 200 \left[(X/X_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3} \right]$$

$$L^* = \begin{cases} 116(Y/Y_0)^{1/3} - 16 & \text{for } Y/Y_0 > 0.01 \\ 903(Y/Y_0) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$X_0 Y_0 Z_0$ = coordinates of reference white

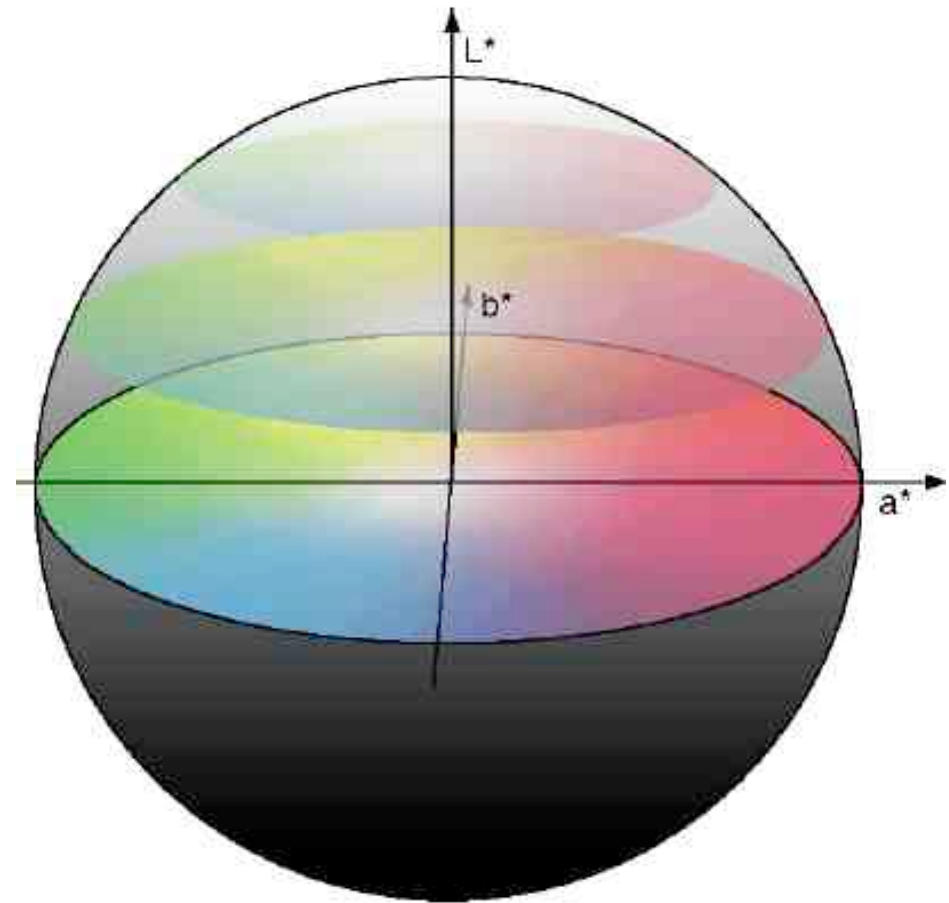
L – Luminance

a – ranges from green to red

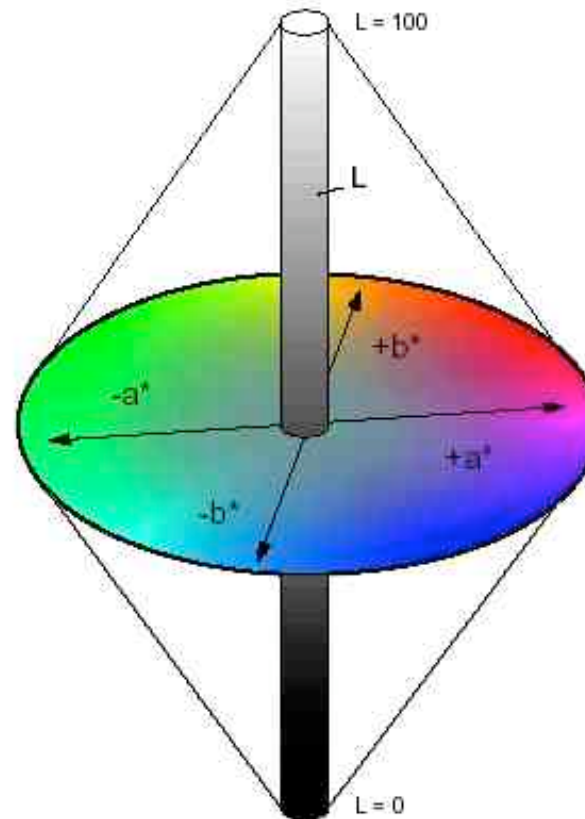
b – ranges from blue to yellow

L – ranges from 0..100 with 50 average gray and 100 reference white.

a, b – unbounded but usually between -120..+120



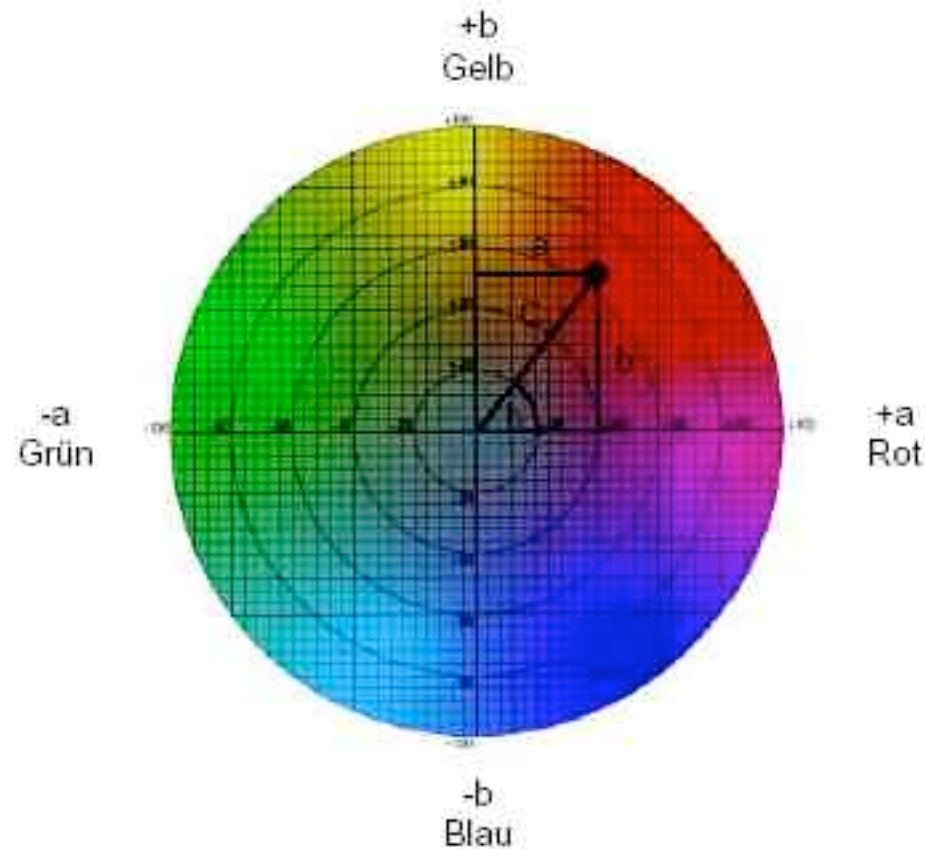
Farben sind relativ zu Referenzweiß $X_0/Y_0/Z_0$



Farbort

Helligkeitskoordinate L

Farbkoordinaten a und b



CIELAB Kreis zeigt Querschnitt des Farbenraums

CIELAB Farbabstand ($L^*a^*b^*$)

Bezugsfarbe B

Probenfarbe P

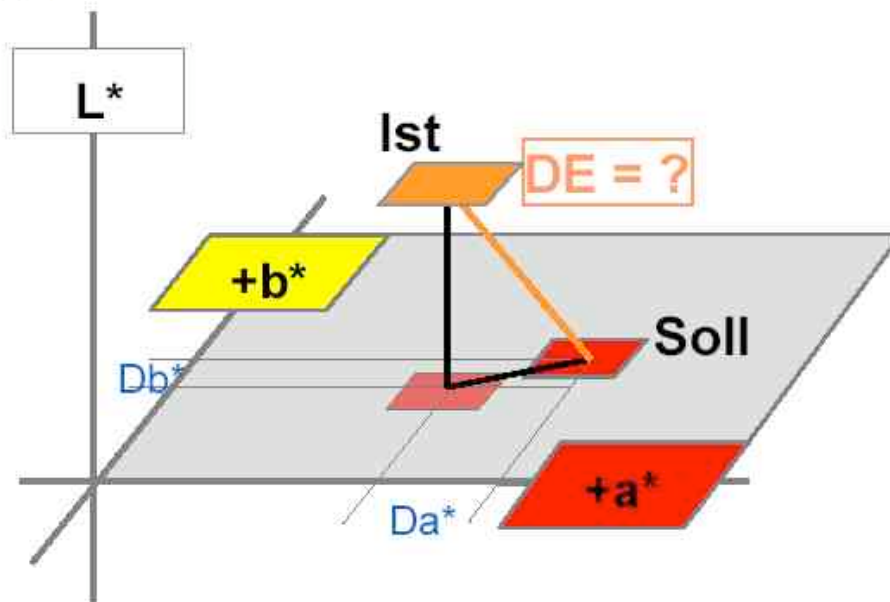
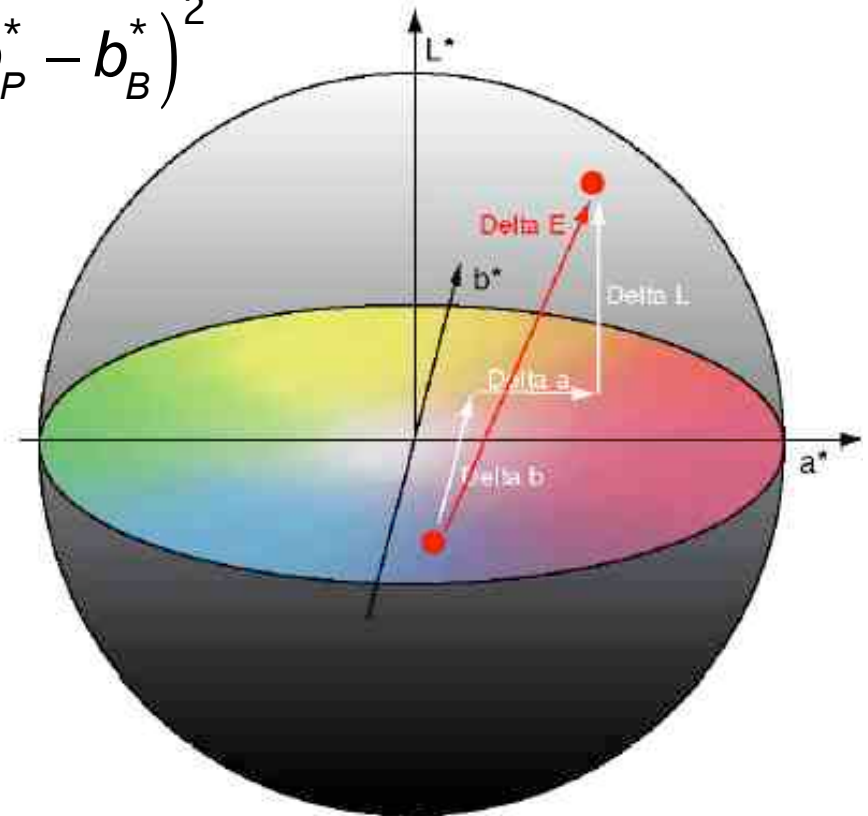
$$\Delta E = \sqrt{\left(L_P^* - L_B^*\right)^2 + \left(a_P^* - a_B^*\right)^2 + \left(b_P^* - b_B^*\right)^2}$$

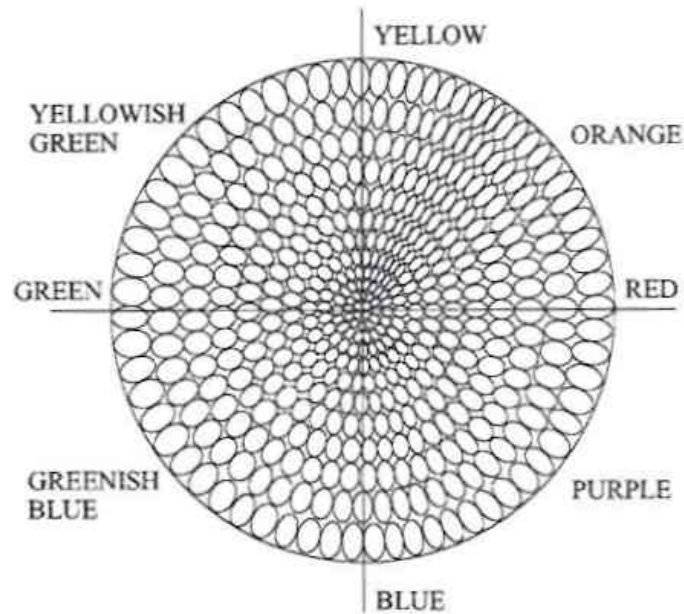
Ungenauigkeit:

Helligkeitsdifferenz geht mit gleicher Gewichtung in Farbabstand ein, wie Farbdifferenz

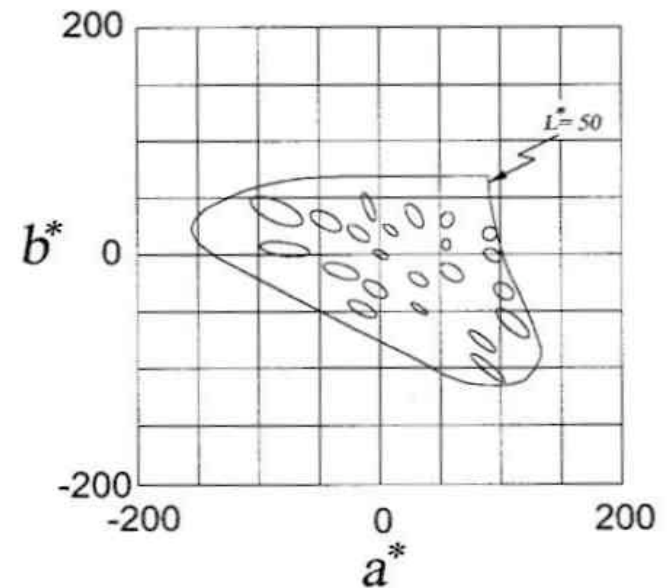
CIELAB Farbabstand Beispiel

$$\Delta E = \sqrt{(L_P^* - L_B^*)^2 + (a_P^* - a_B^*)^2 + (b_P^* - b_B^*)^2}$$





Toleranzellipsen im
 $L^*a^*b^*$ -System in der
Ebene $L^*=50\%$
Color Difference System
CMC (l:c)



Toleranzellipsen im
 $L^*a^*b^*$ -System

Zwei alternative Systeme

- basieren auf CIELAB
- Vergleichbare Exaktheit
- DIN99
- CIE-DE2000
- DIN99 einfacher berechenbar

Helligkeit

$$L_{99} = 105,51 \cdot \ln(1 + 0,0158 \cdot L^*)$$

Differenz

$$\Delta = 0,045 \sqrt{(a^* \cdot \cos 16^\circ + b^* \cdot \sin 16^\circ)^2 + (0,7(b^* \cdot \cos 16^\circ - a^* \cdot \sin 16^\circ))^2}$$

Abminderung

$$k = \frac{\ln(1 + \Delta)}{\Delta}$$

Helligkeit

$$L_{99} = 105,51 \cdot \ln(1 + 0,0158 \cdot L^*)$$

Rot-Grün Buntheit

$$a_{99} = \frac{\ln(1 + \Delta)}{\Delta} \cdot (a^* \cdot \cos 16^\circ + b^* \cdot \sin 16^\circ)$$

Gelb-Blau Buntheit

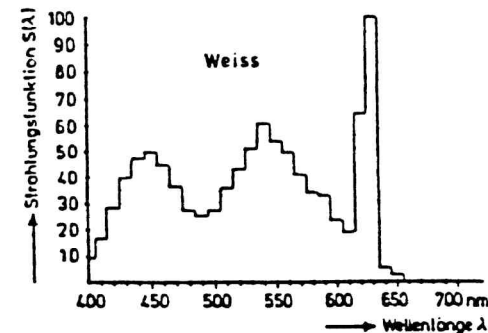
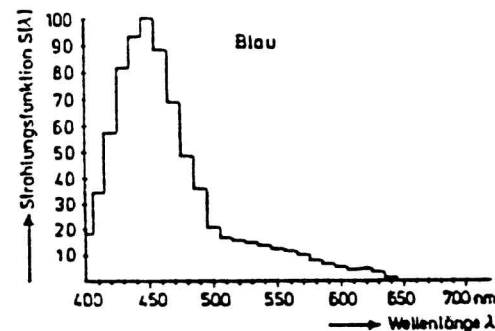
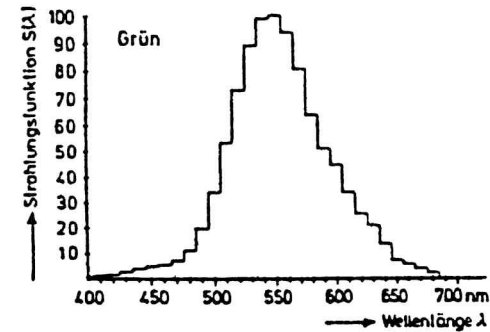
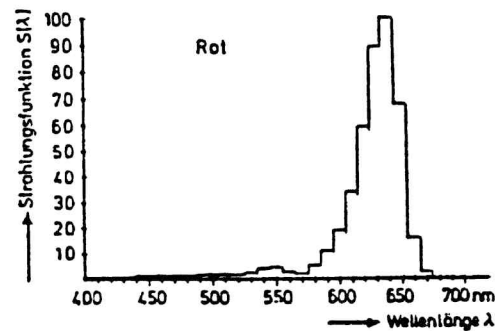
$$b_{99} = \frac{\ln(1 + \Delta)}{\Delta} \cdot (0,7(b^* \cdot \cos 16^\circ - a^* \cdot \sin 16^\circ))$$

Bezugsfarbe B

Probenfarbe P

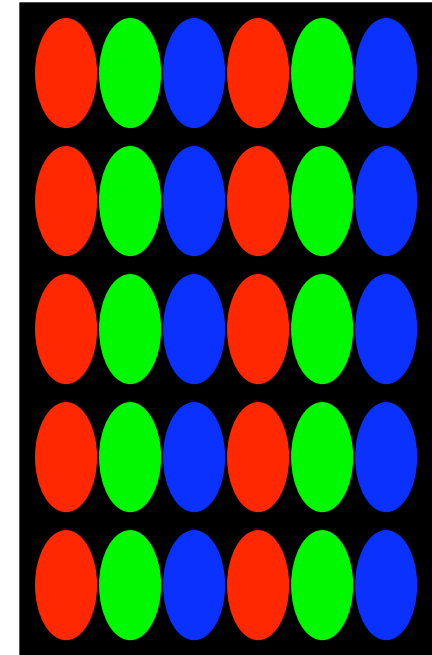
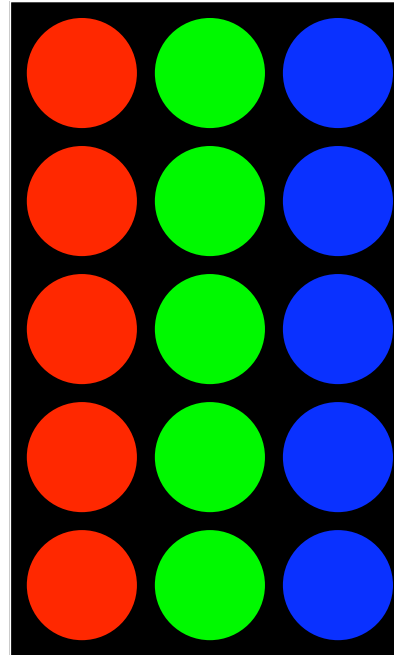
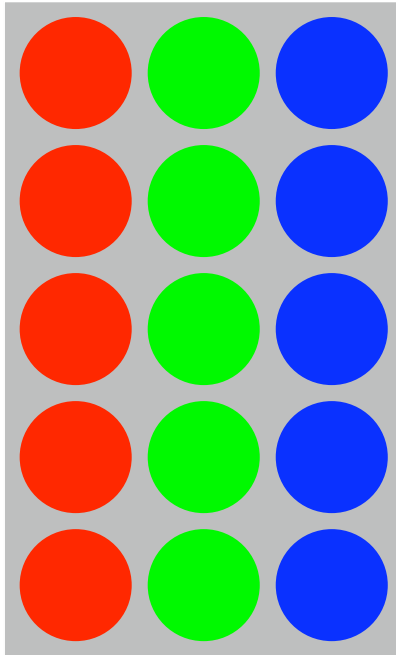
$$\Delta E_{99} = \sqrt{\left(L_{99P} - L_{99B}\right)^2 + \left(a_{99P} - a_{99B}\right)^2 + \left(b_{99P} - b_{99B}\right)^2}$$

CRT-Monitor Farbphosphore

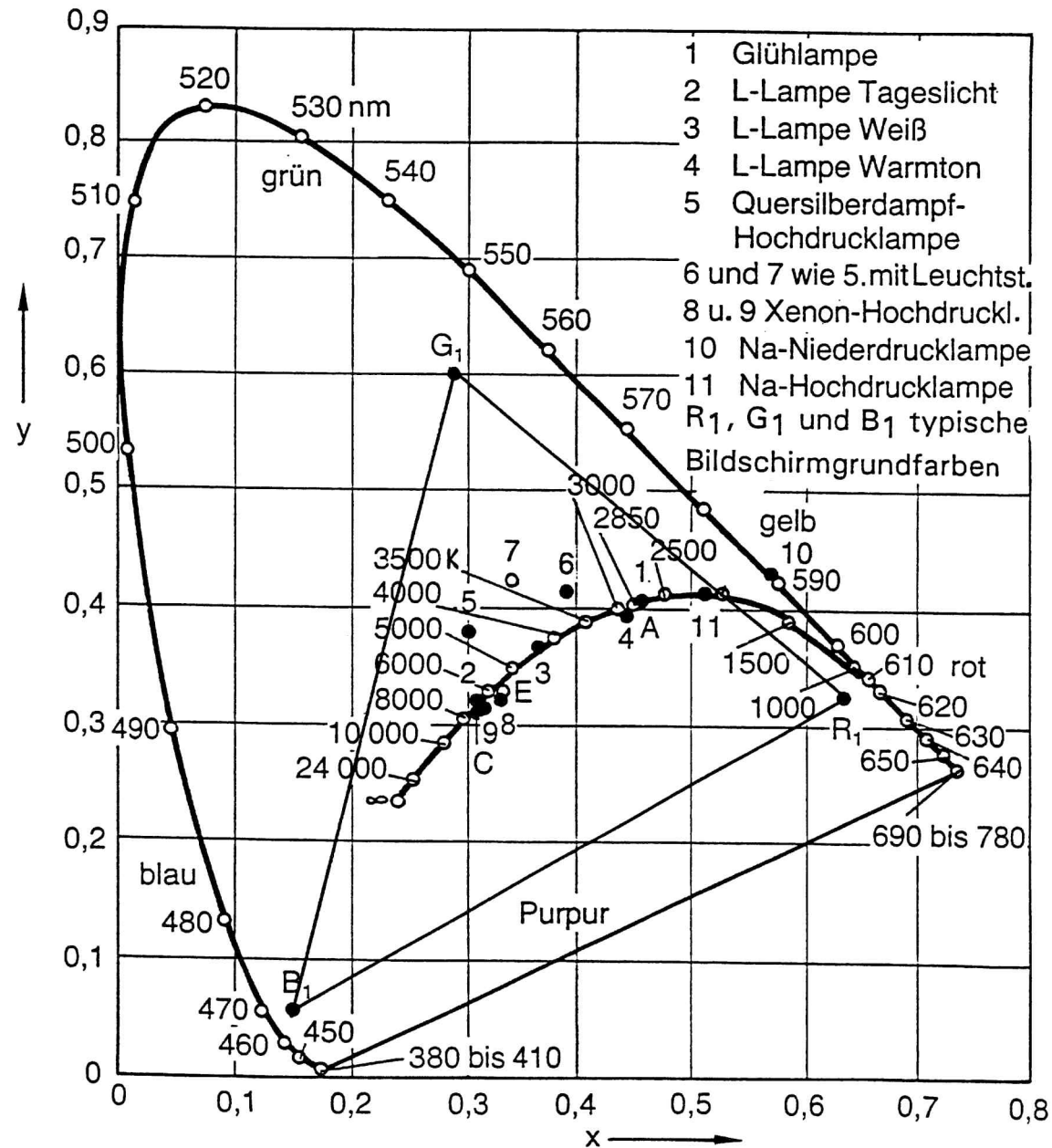


Relative spektrale Strahldichteverteilungen der drei Grundfarben
 Rot, Grün und Blau eines Farbbildschirms
 Maximalwert jeweils auf 100 normiert
 Weiterhin gemeinsames Spektrum Weiß

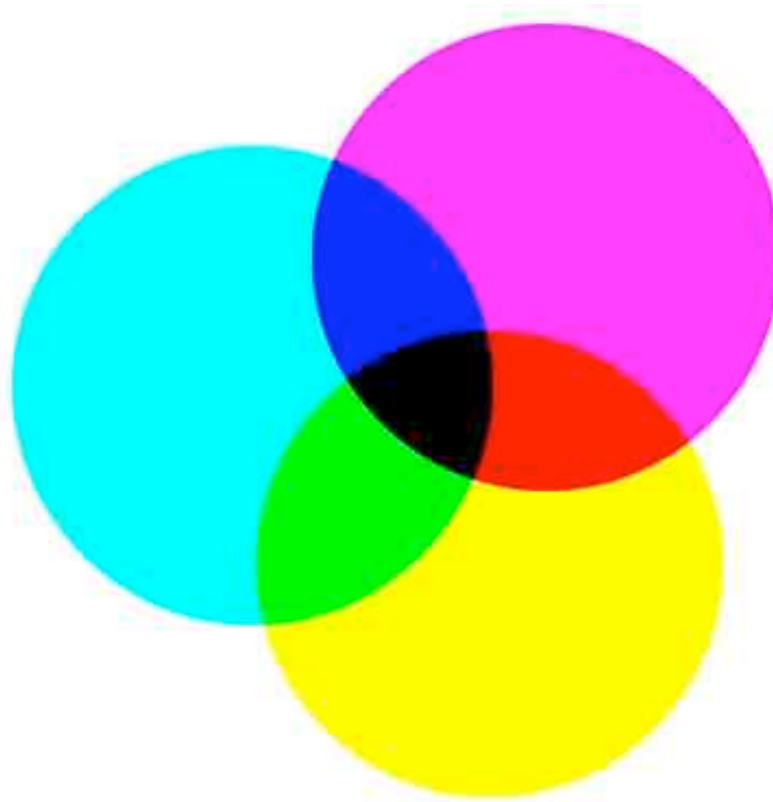
Detail Monitorbildmaske



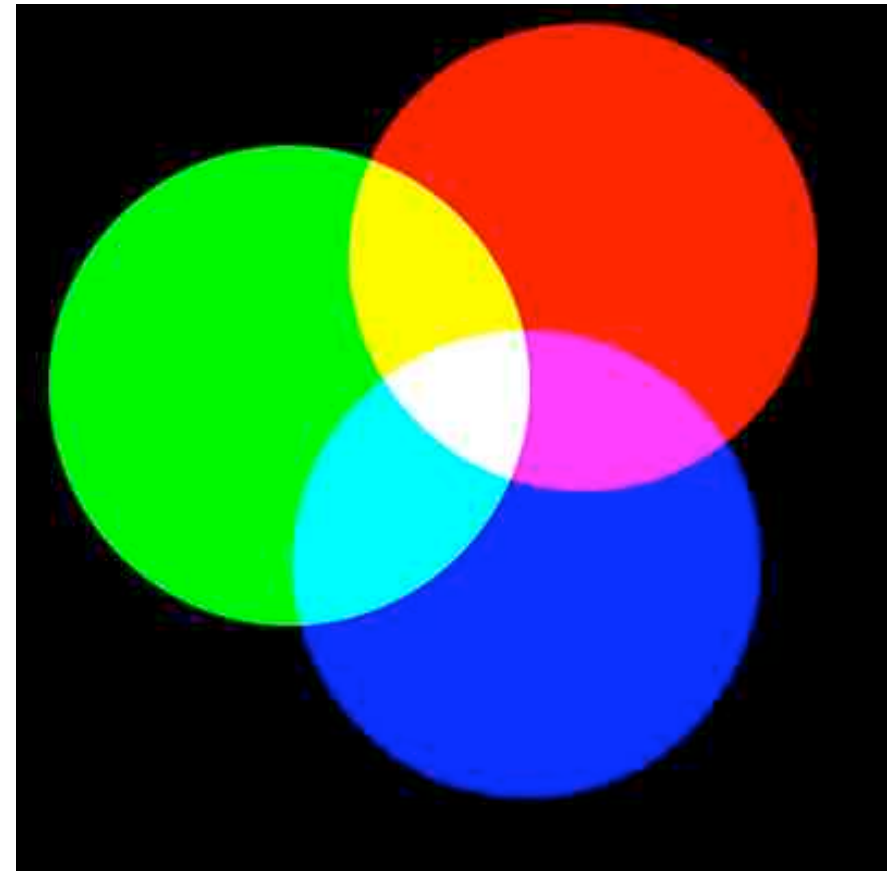
Farbdreieck mit verschiedenen Lichtquellen



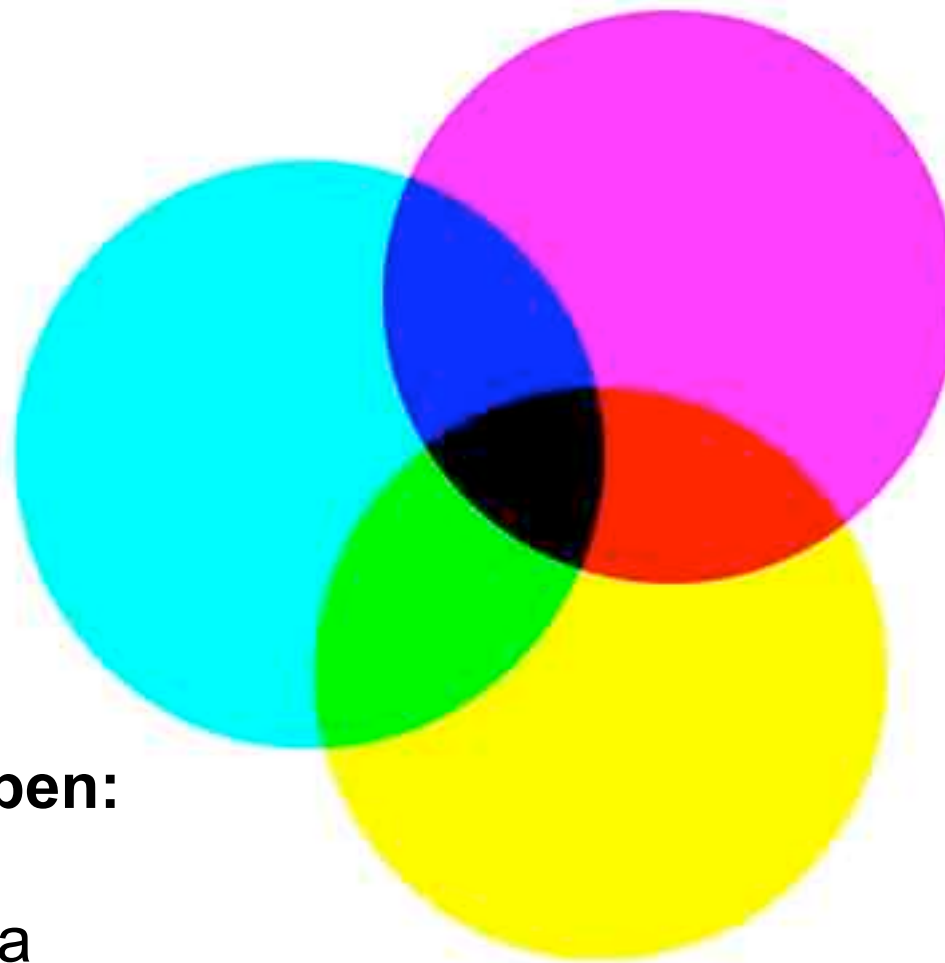
Substraktive Farbmischung



Additive Farbmischung



Trichromatische substraktive Farbmischung



Grundfarben:

C cyan

M magenta

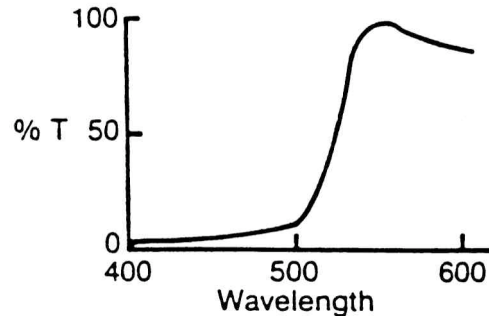
Y yellow

Mischfarbe:

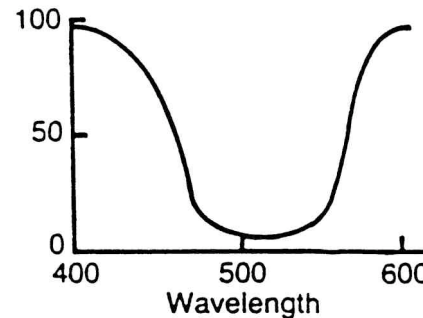
Schwarz

Substraktive Farbmischung

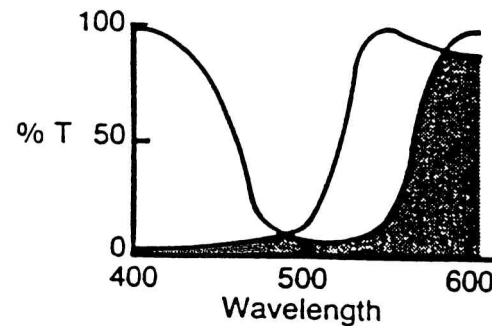
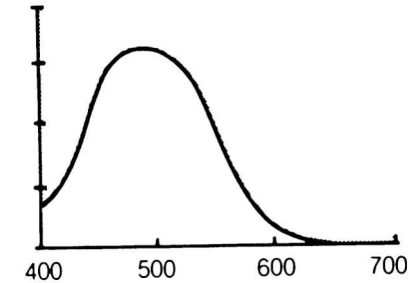
Gelb



Magenta



Cyan



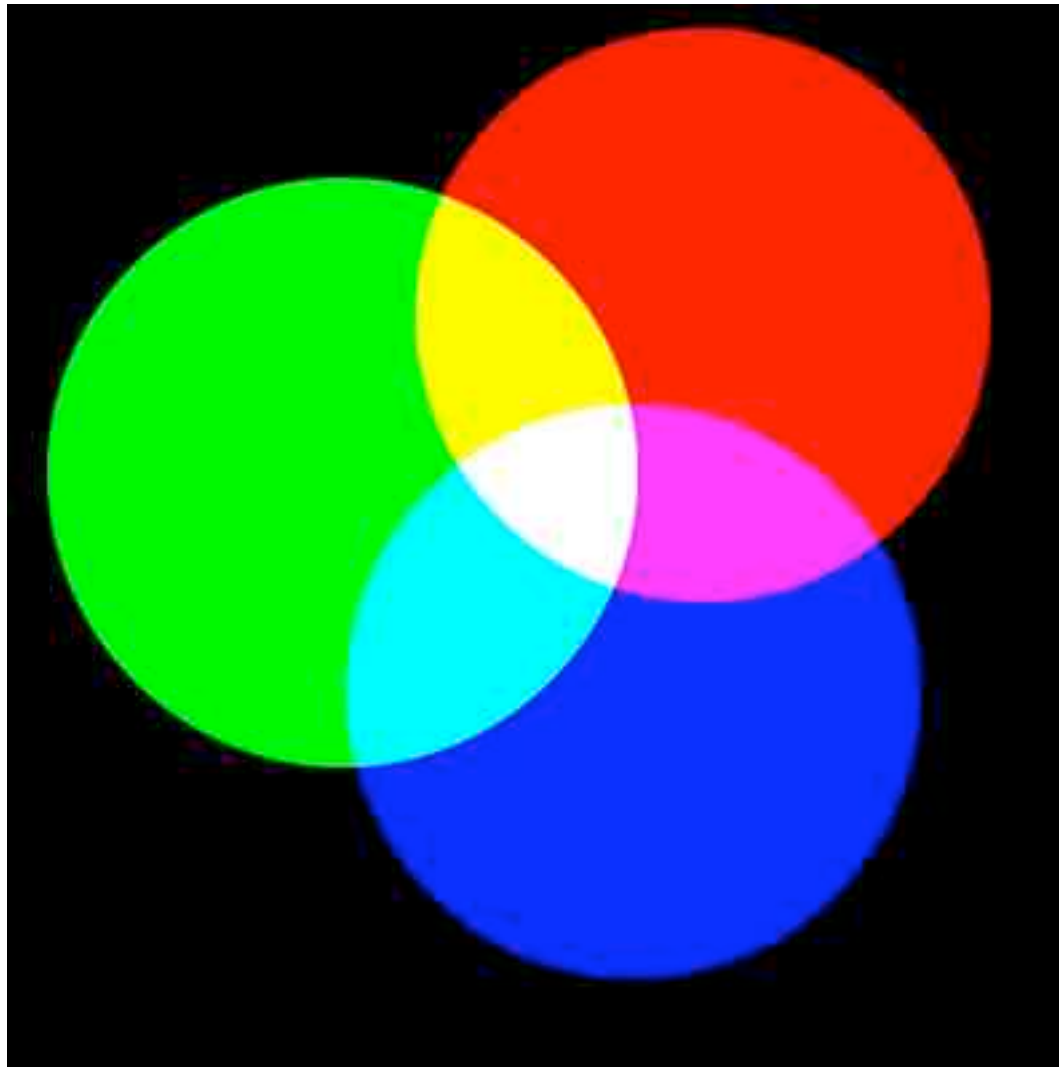
Relative spektrale Transmissionsgrade der Farbpigmente Gelb, Magenta und Cyan, die bei Farberzeugungsprozessen nach dem Prinzip der substraktiven Farbmischung eingesetzt werden. Werden z.B. die Pigmente Gelb und Magenta hintereinander angeordnet, dann wird nur Strahlung im Langwelligen durchgelassen. Das Ergebnis wäre ein rötlich aussehendes Pigment.

Substraktive Farbmischung - Mischfarben

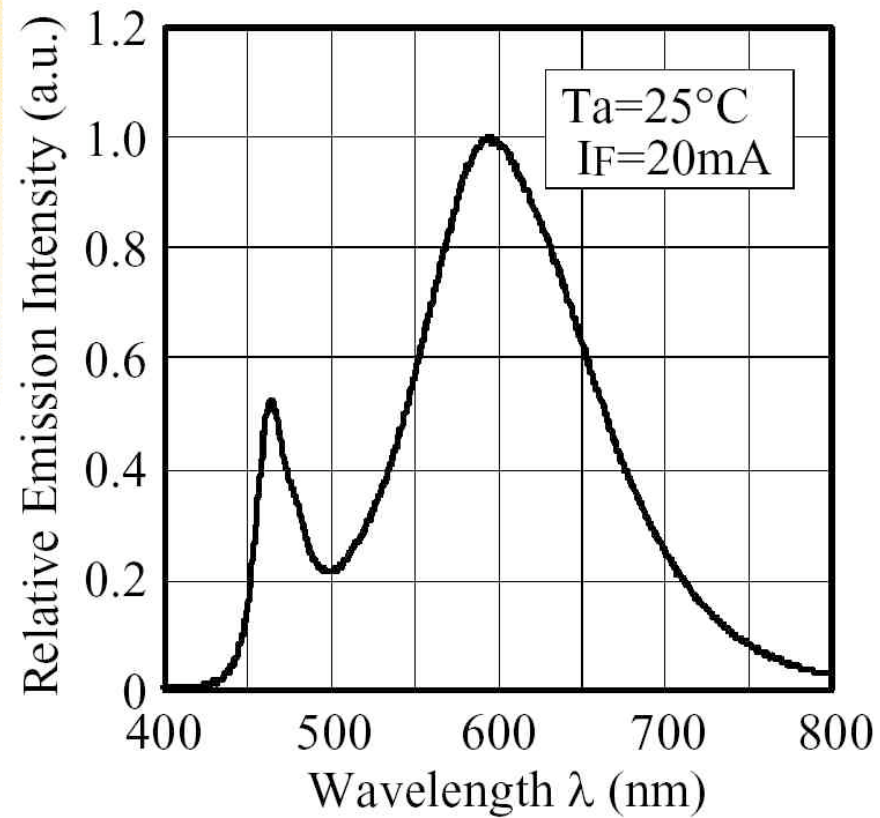
Gelb			und	Magenta	ergibt	Rot
Gelb	und	Cyan			ergibt	Grün
		Cyan	und	Magenta	ergibt	Blau
Gelb	und	Cyan	und	Magenta	ergibt	Schwarz

Bei Farbdrukken werden neben den Grundfarben Gelb, Cyan und Magenta auch sowohl Schwarz als auch, bei nichtweißen Papieren, Weiß und Schmuckfarben (Gold, Silber, ...) verwendet.

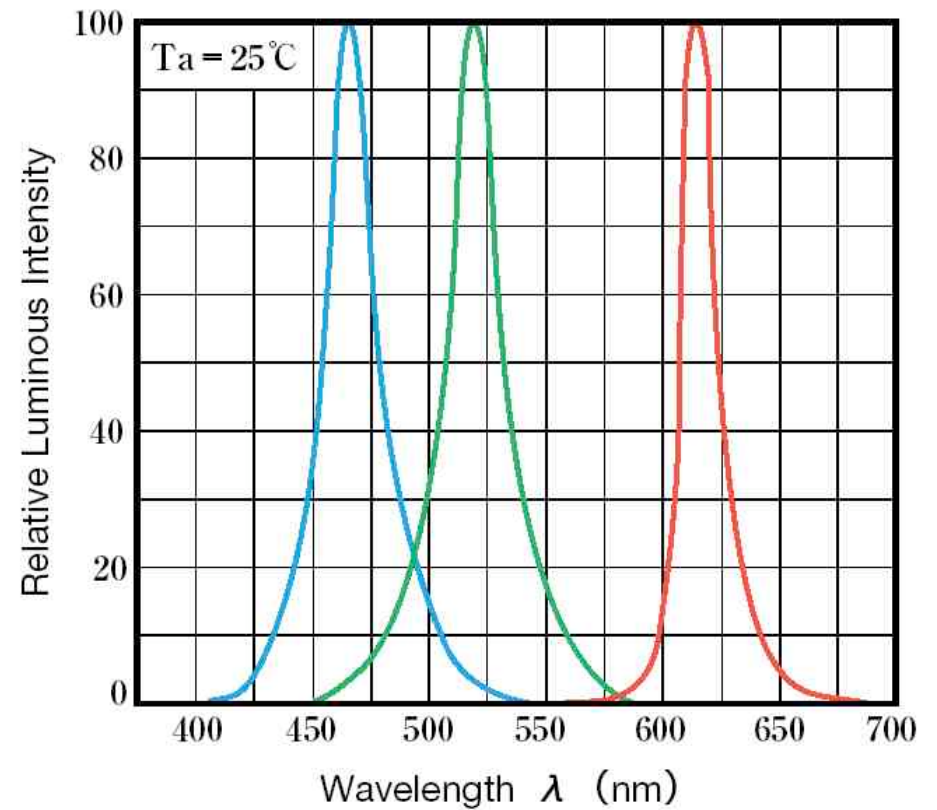
Additive Farbmischung



Blau und Leuchtstoff



RGB - Spektrum



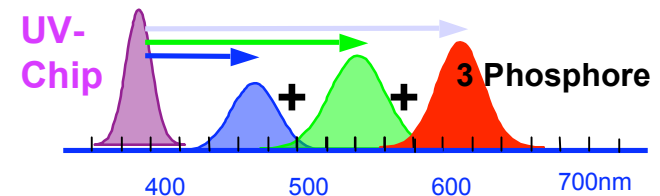
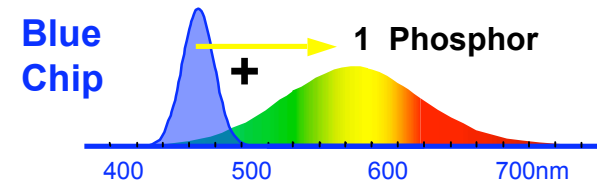
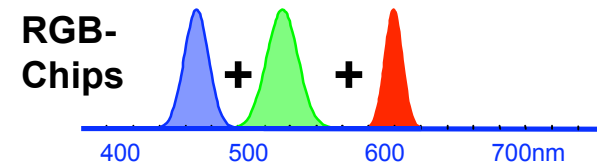
Erzeugung von Licht der Farbe Weiß durch additive Farbmischung

Benutzung drei einzelner roter, grüner und blauer LEDs

Bei passender Abstimmung ergibt sich weiß

LED-Chip der Farbe Blau zusammen mit einem Phosphor-Überzug (Gelb) ergibt weiß

UV-LED und drei Phosphore der Farben Rot, Grün, Blau ergibt weiß



Mischungsregeln bei additiver Farbmischung

Rot	und	Grün	und	Blau	ergibt	Unbunt
Rot	und	Grün			ergibt	Gelb
Rot			und	Blau	ergibt	Magenta (Purpur, Pink)
		Grün	und	Blau	ergibt	Cyan (Blaugrün)