

20 Jahre Farbsehen, Farbmeterik und Farberscheinung auf <http://farbe.li.tu-berlin.de>
(Prof. Dr. Klaus Richter, Technische Universität Berlin, DfwG-Tagung, Köln 2021)

Farbmetrische Modelle des Farbsehens beschreiben Verbindungen zwischen Farbphysiologie, Farbpsychophysik und Farberscheinung. Die Farberscheinung basiert auf zwei Grundbausteinen.

1. Farbartfunktionen: Die Farbarten a' und b' sind nichtlineare (Kubikwurzel-)Transformationen der Normfarbwertanteile (Farbarten) x und y .
2. Helligkeitsfunktionen: Die Helligkeit L^* von CIELAB und CIELUV ist eine nichtlineare Funktion von $(Y/Y_n)^n$ mit Y_n als Normfarbwert von Weiß und dem Exponenten $n=1/2,4$.

Physiologie und Psychophysik erfordern jedoch einen Bezug auf das graue Umfeld $Y_u=18$. Für matte Körperfarben ist das Weiß W etwa 5 mal heller ($Y_W=5Y_u=90$) und das Schwarz N etwa 5 mal dunkler ($Y_N=Y_u/5=3,6$). Unsere tägliche Umgebung erfordert daher eine *logarithmische* und *antagonistische* Helligkeitsstufung und -metrik in Bezug auf Grau Y_u , die begründet wird.

In der Informationstechnik wird die Metrik der Farbart- und Helligkeitsstufung mit dem Szenenkontrast Weiß:Schwarz geändert. Zum Beispiel von $n=1$ (linear) für den kleinen Kontrast $Y_W:Y_N=2:1$ über $n=1/2,4$ (CIELAB- und sRGB-Farbenraum von IEC 61966-2-1) für den Normkontrast $Y_W:Y_N=25:1$ bis etwa $n=1/3,6$ für den hohen Kontrast $Y_W:Y_N$ größer 288:1.

Auch die antagonistischen *Farberscheinungsmerkmale*, zum Beispiel die *Schwarzheit* N^* und *Brilliantheit* I^* , sowie die *Weißheit* W^* und die *Farbtiefe* T^* , ändern sich mit dem Exponenten n .

Für diesen Vortrag in deutsch, siehe http://farbe.li.tu-berlin.de/DfwGG_21.PDF

Für diesen Vortrag in englisch, siehe http://farbe.li.tu-berlin.de/DfwGE_21.PDF

Linien-Element von *Stiles*

(1946) mit „Farbwerten“ L_P , M_D , S_T

Drei separate Farb-Signalfunktionen

$$F(L_P) = i \ln(1 + 9 L_P)$$

$$F(M_D) = j \ln(1 + 9 M_D)$$

$$F(S_T) = k \ln(1 + 9 S_T)$$

Taylor-Ableitungen:

$$\Delta F(L_P, M_D, S_T) = \frac{dF}{dL_P} \Delta L_P + \frac{dF}{dM_D} \Delta M_D + \frac{dF}{dS_T} \Delta S_T$$

$$= \frac{9i}{1+9L_P} \Delta L_P + \frac{9j}{1+9M_D} \Delta M_D + \frac{9k}{1+9S_T} \Delta S_T$$

CGA51-1N

Bild 1: Linienelemente von Stiles (1946) für drei Rezeptoren L , M und S .

Zum Herunterladen dieses Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/CGA5/CGA51-1N.PDF>

Zum Herunterladen ähnlicher Bilder: <http://farbe.li.tu-berlin.de/CGA5/CGA5L0NP.PDF>

Linienelementbeispiel für graue Farben ($0,2 \leq x \leq 5$)

$F(x)$ ist das Linienelement der Funktion $f(x)$.

Die folgende Beziehung ist gültig für $x=Y/Y_u=Y/18$:

$$\frac{d[F(x)]}{dx} = f(x) \quad [1]$$

$$F(x) = \int \frac{f'(x)}{f(x)} dx \quad [2]$$

Beispiel für den normierten Normfarbwert $x=Y/Y_u$:

$$\frac{d[a \ln(1+bx)]}{dx} = \frac{ab}{1+bx} \quad [3]$$

$$a \ln(1+bx) = \int \frac{ab}{1+bx} dx \quad [4]$$

CGA00-1N

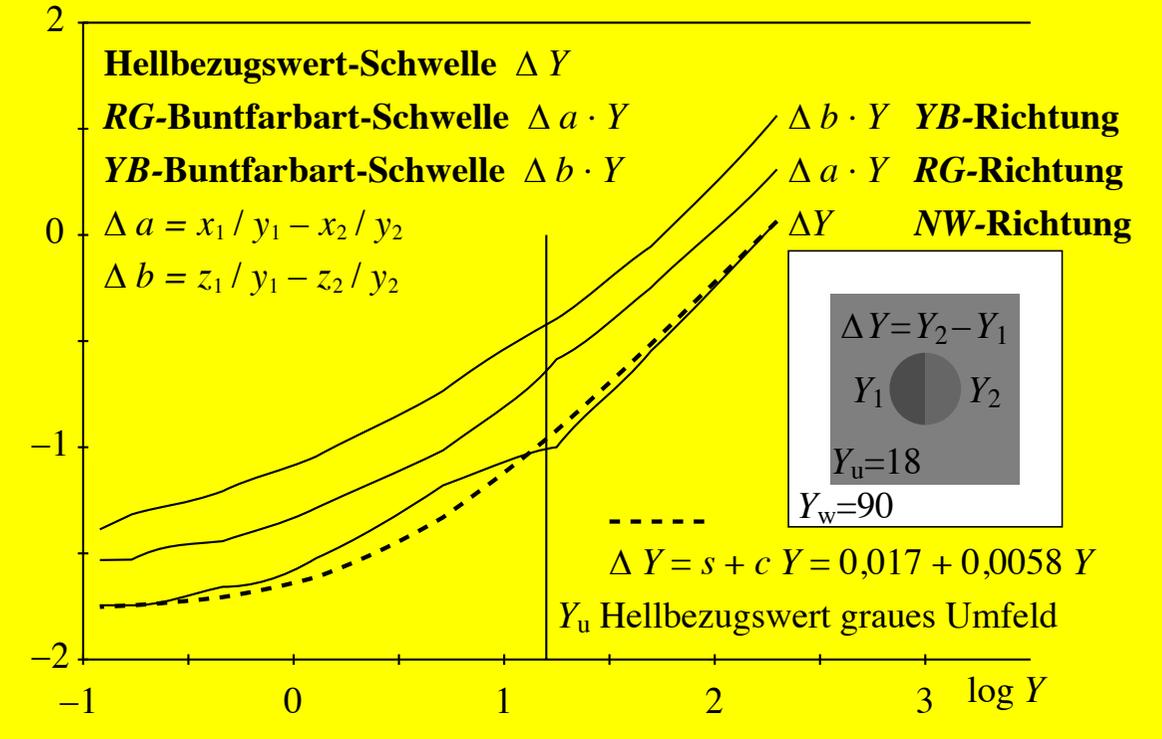
Bild 2: Zusammenhang der mathematischen logarithmischen Linienelemente

Zum Herunterladen dieses Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/CGA0/CGA00-1N.PDF>

Zum Herunterladen ähnlicher Bilder: <http://farbe.li.tu-berlin.de/CGA0/CGA0L0NP.PDF>

NW-Unbunt- sowie RG- und YB-Bunt-Schwellen als Funktion von Y

Experimente und Daten: BAM-Forschungsbericht Nr. 115 (1985), S. 72, siehe <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:b43-3350>



CGA01-3N

Bild 3: Experimentelle psychophysikalische Grauentcheidung.

Zum Herunterladen dieses Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/CGA0/CGA01-3N.PDF>

Zum Herunterladen ähnlicher Bilder: <http://farbe.li.tu-berlin.de/CGA0/CGA0L0NP.PDF>

Linienelement-Gleichungen nach CIE 230:2019

Farbunterscheidungsfunktion $f(x) = \Delta Y = \Delta x Y_u$ [0]

$\Delta Y = (A_1 + A_2 Y) / A_0$ $A_0 = 1,5$, $A_1 = 0,0170$, $A_2 = 0,0058$

$$f_u(x) = \frac{\Delta Y}{\Delta Y_u} = \frac{1 + b x}{1 + b} \quad b = A_2 Y_u / A_1 \quad x = Y / Y_u \quad [1]$$

$$F_u(x) = \int \frac{f'_u(x)}{f_u(x)} dx = \int \frac{b}{1 + b x} dx \quad [2]$$

Beispiel für $L^*(x)$ & ΔY mit $x = Y / Y_u$, $x_u = 1$, $b = 6,141$:

$$L^*_u(x) = \frac{L^*(x)}{L^*(x_u)} = \frac{\ln(1 + b x)}{\ln(1 + b)} \quad [3]$$

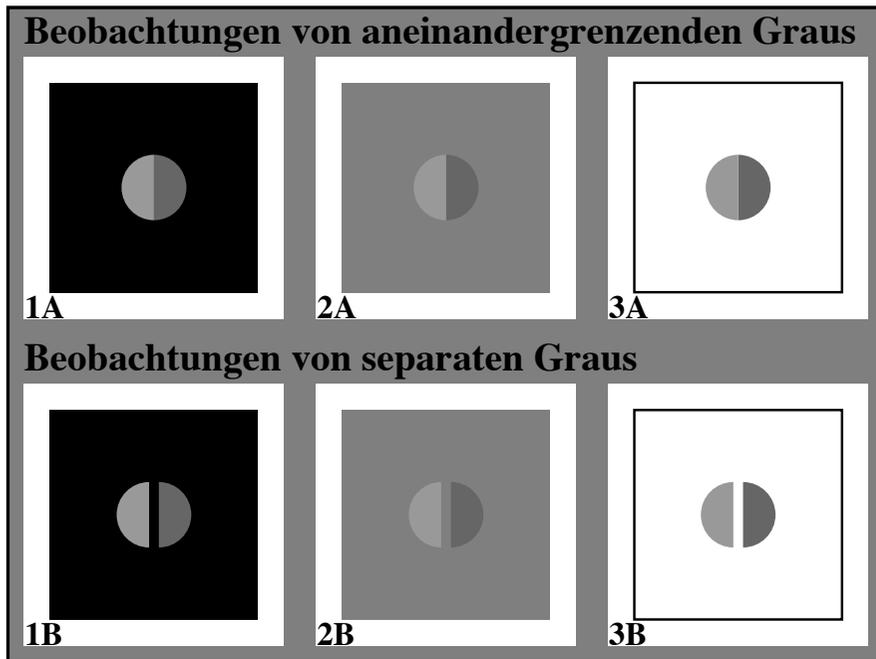
$$f_u(x) = \frac{\Delta Y}{\Delta Y_u} = \frac{1 + b x}{1 + b} \quad [4]$$

CGA00-5N

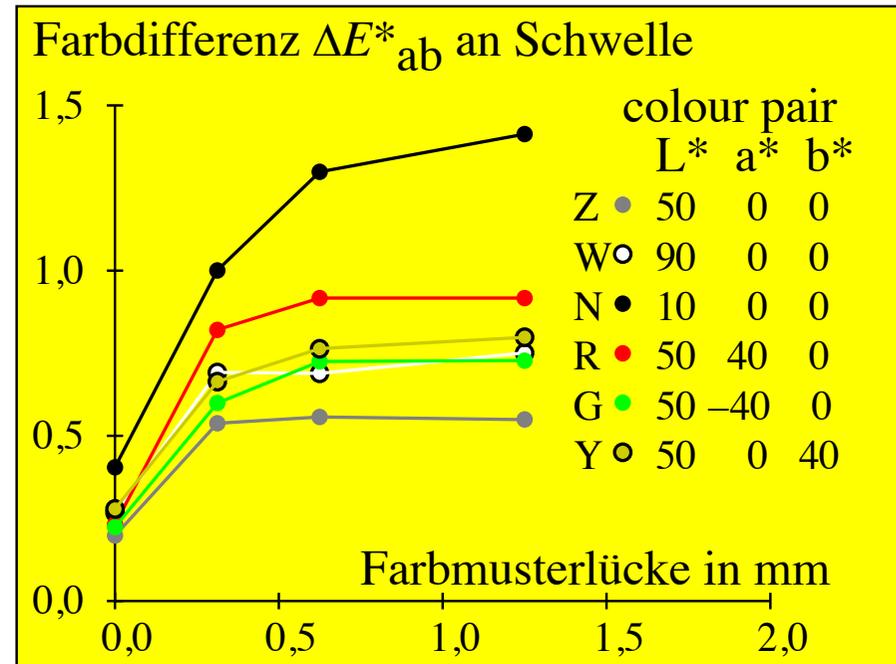
Bild 4: Logarithmische Linienelemente des Normfarbwertes Y

Zum Herunterladen dieses Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/CGA0/CGA00-5N.PDF>

Zum Herunterladen ähnlicher Bilder: <http://farbe.li.tu-berlin.de/CGA0/CGA0L0NP.PDF>



BGS00-3N



CGA10-5N

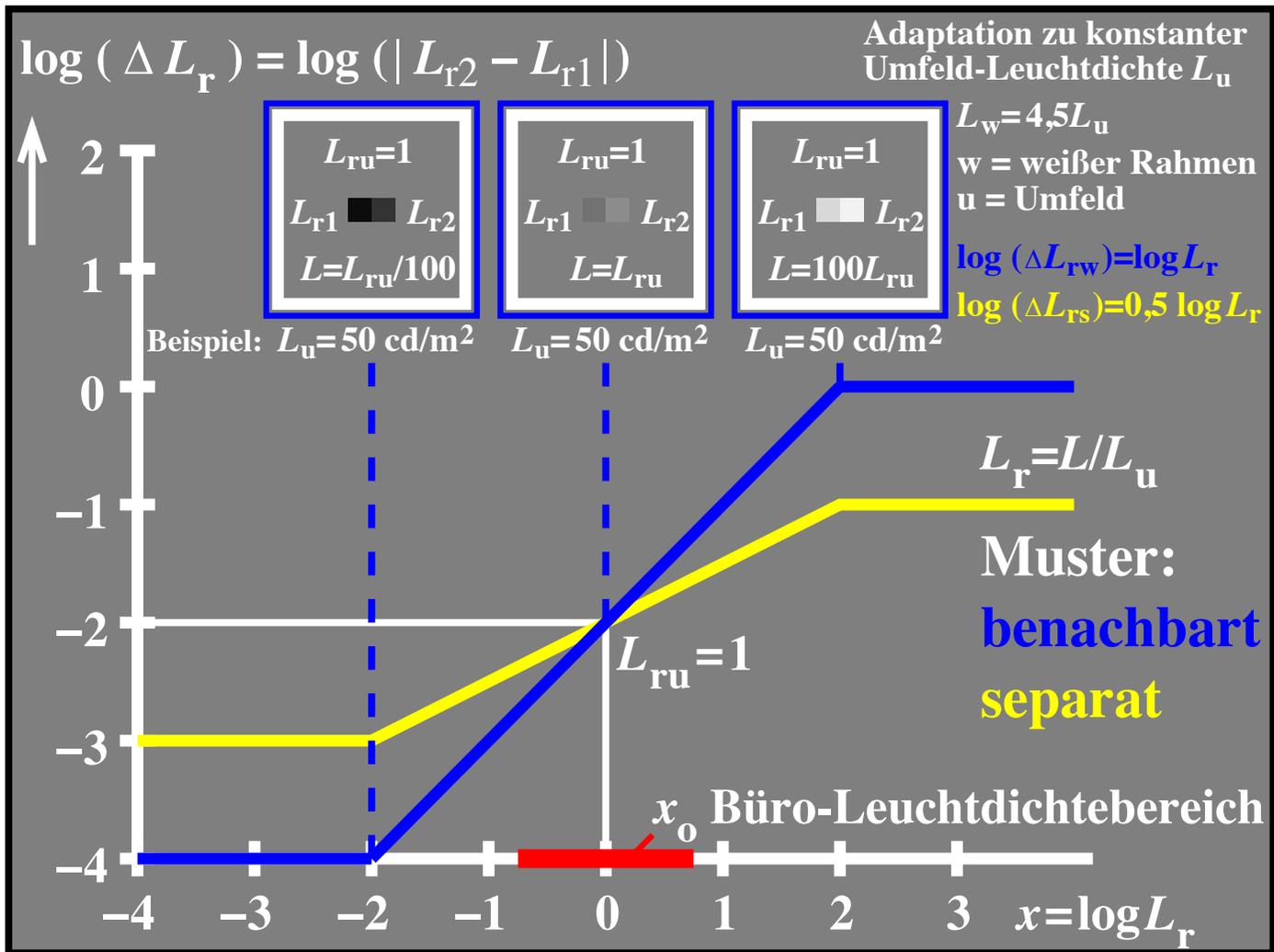
Bild 5: Unterscheidung von aneinandergrenzenden und separaten Graus.

Zum Herunterladen des linken Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGS0/BGS00-3N.PDF>

Zum Herunterladen ähnlicher linker Bilder: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGS0/BGS0L0NP.PDF>

Zum Herunterladen des rechten Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/CGA1/CGA10-5N.PDF>

Zum Herunterladen ähnlicher rechter Bilder: <http://farbe.li.tu-berlin.de/CGA1/CGA1L0NP.PDF>

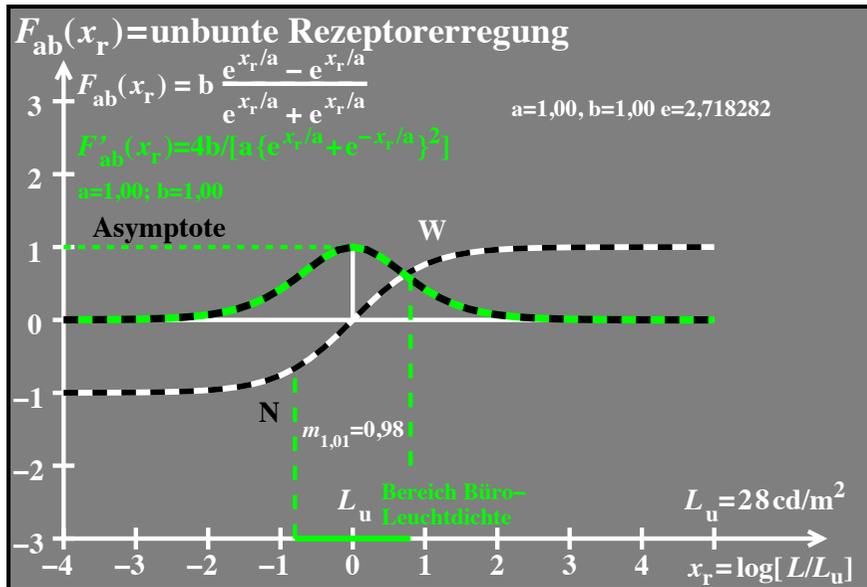


CGA30-3N

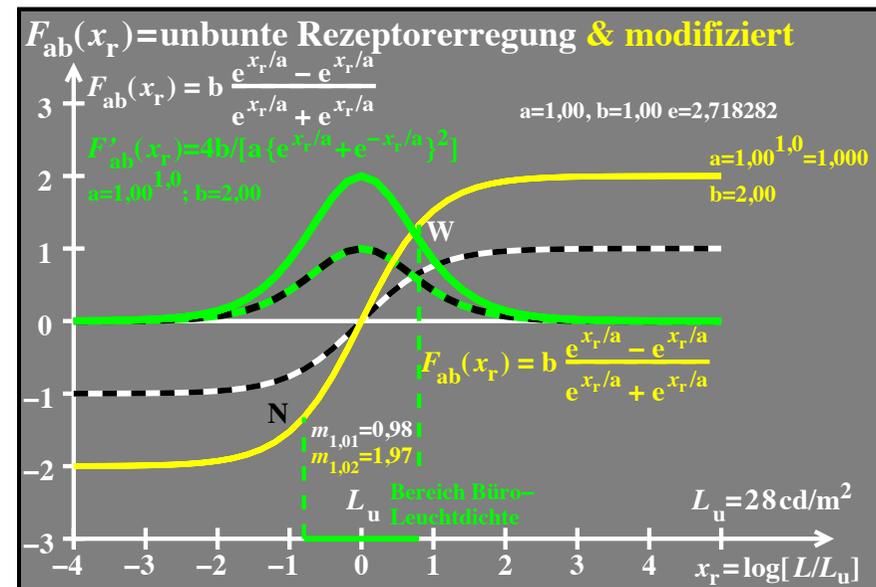
Bild 6: Zwei Helligkeitsfunktionen für aneinandergrenzende und separate Muster

Zum Herunterladen dieses Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/CGA3/CGA30-3N.PDF>

Zum Herunterladen ähnlicher Bilder: <http://farbe.li.tu-berlin.de/CGA3/CGA3L0NP.PDF>



DGA11-5N



DGA01-5N

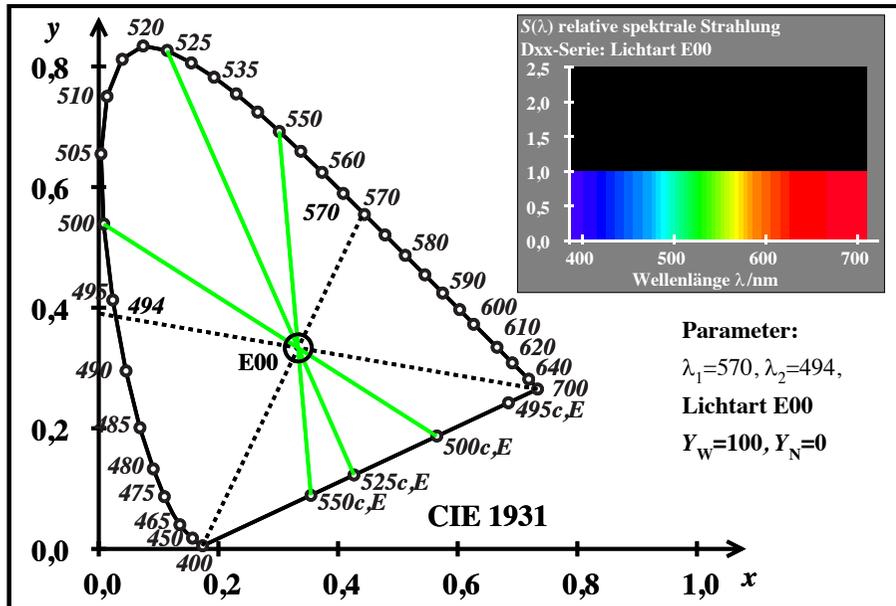
Bild 7: Linienelemente von Stiles (1946) für drei Rezeptoren L, M und S.

Zum Herunterladen des linken Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/DGA1/DGA11-5N.PDF>

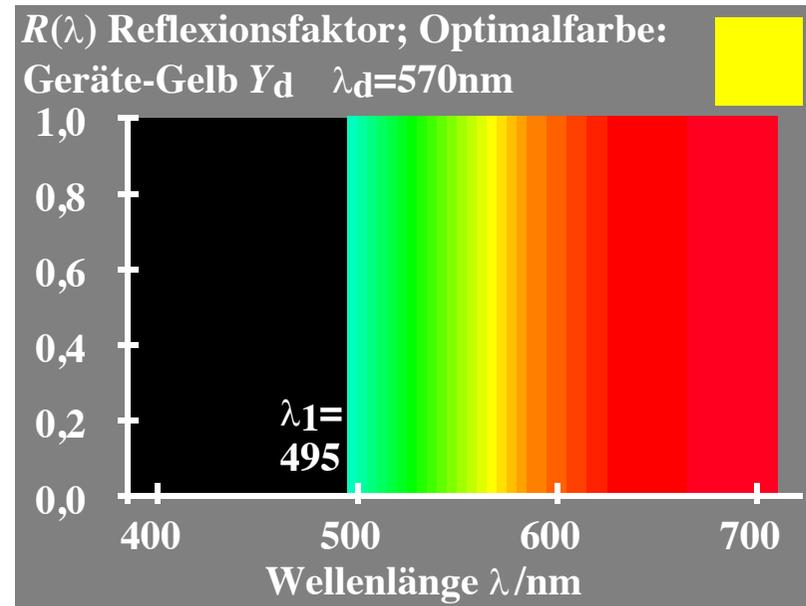
Zum Herunterladen ähnlicher linker Bilder: <http://farbe.li.tu-berlin.de/DGA1/DGA1L0NP.PDF>

Zum Herunterladen des rechten Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/DGA0/DGA01-5N.PDF>

Zum Herunterladen ähnlicher rechter Bilder: <http://farbe.li.tu-berlin.de/DGA0/DGA0L0NP.PDF>



BGA00-5 A



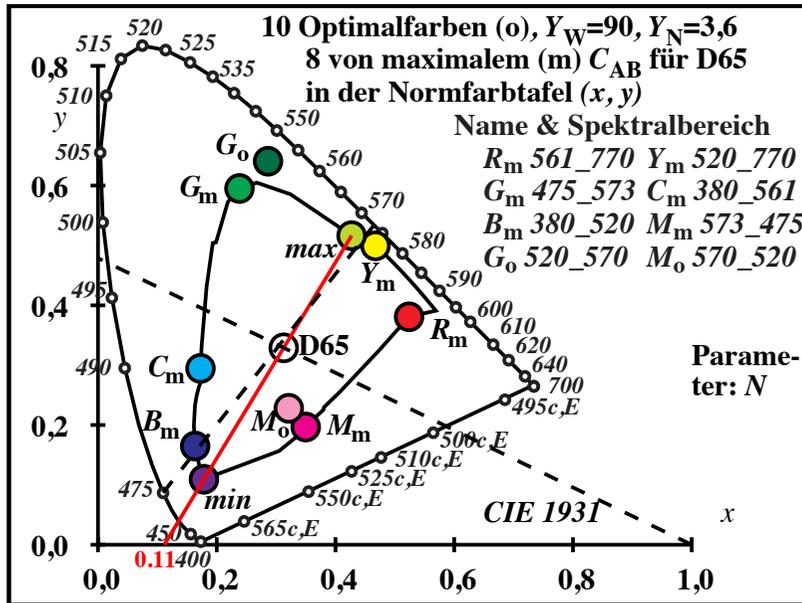
BGA00-8N

Bild 8: Wellenlängengrenzen der Ostwald-Optimalfarben für Lichtart E.

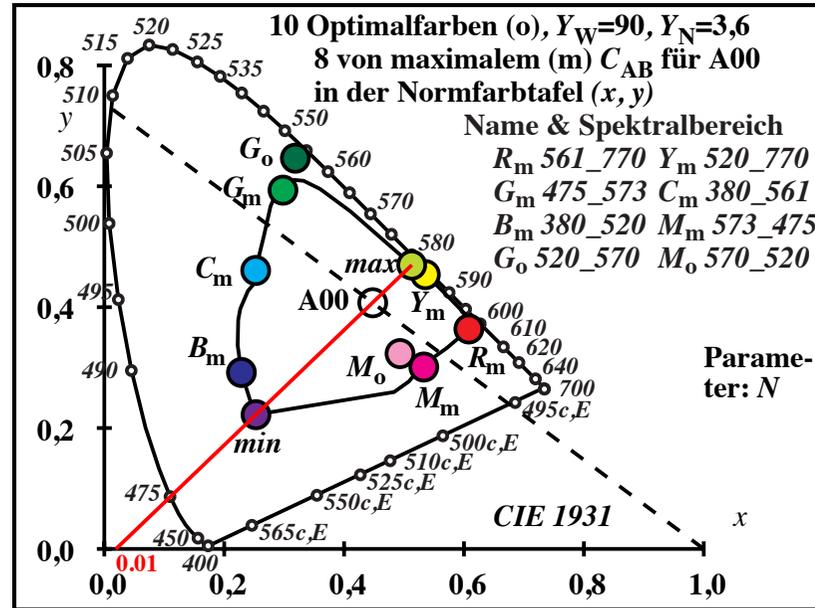
Zum Herunterladen des linken Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGA0/BGA00-1N.PDF>

Zum Herunterladen des rechten Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGA0/BGA00-8N.PDF>

Zum Herunterladen ähnlicher Bilder: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGA0/BGA0L0NP.PDF>



BGA01-3N



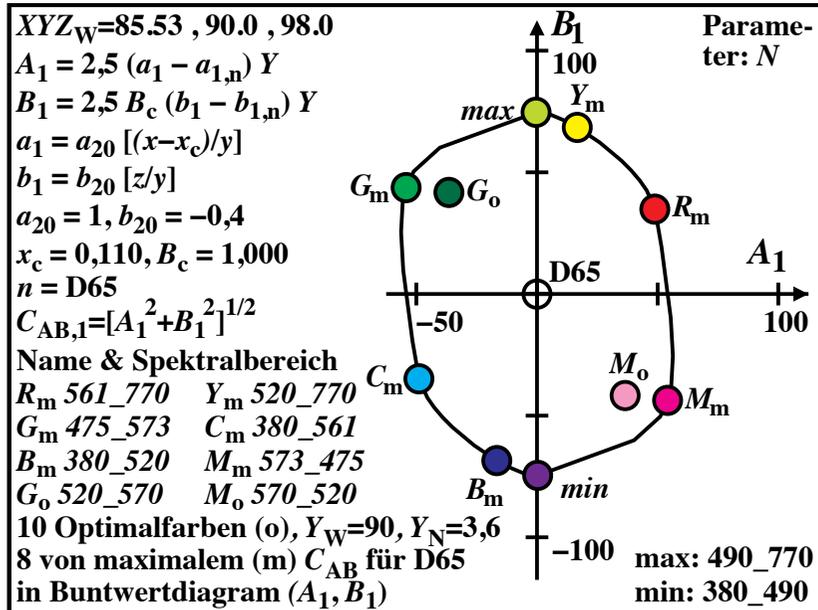
BGA01-4N

Bild 9: Ostwald-Optimalfarben für die Normlichtarten D65 und A in (x, y).

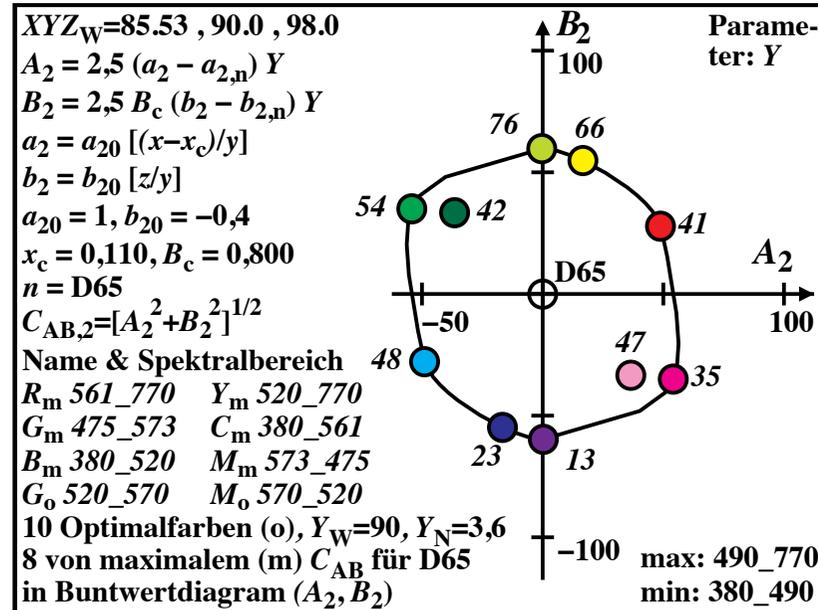
Zum Herunterladen des linken Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGA0/BGA01-3N.PDF>

Zum Herunterladen des rechten Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGA0/BGA01-4N.PDF>

Zum Herunterladen ähnlicher Bilder: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGA0/BGA0L0NP.PDF>



BGA01-5N



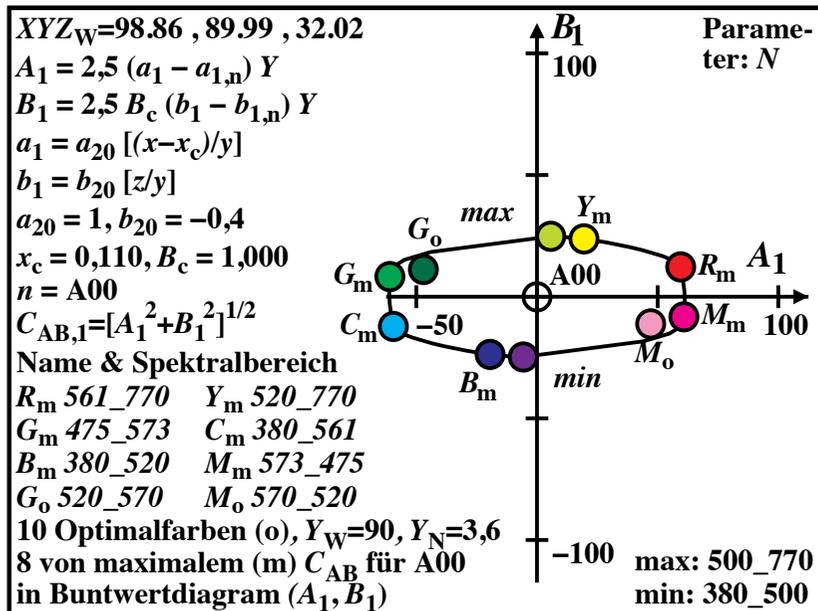
BGA01-6N

Bild 10: Ostwald-Optimalfarben für die Normlichtart D65 in (A_1, B_1) & (A_2, B_2)

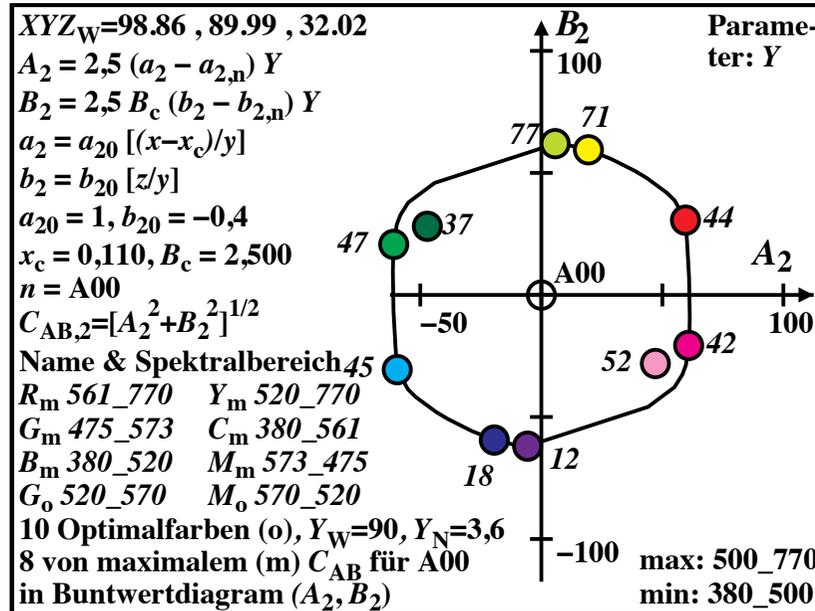
Zum Herunterladen des linken Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGA0/BGA01-5N.PDF>

Zum Herunterladen des rechten Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGA0/BGA01-6N.PDF>

Zum Herunterladen ähnlicher Bilder: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGA0/BGA0LONP.PDF>



BGA01-7N



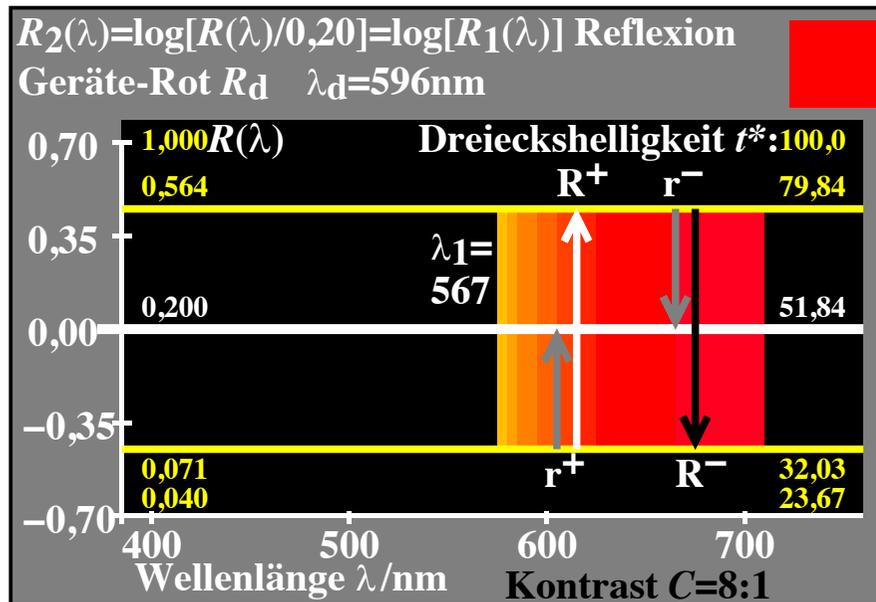
BGA01-8N

Bild 11: Ostwald-Optimalfarben für die Normlichtart A in (A_1, B_1) & (A_2, B_2)

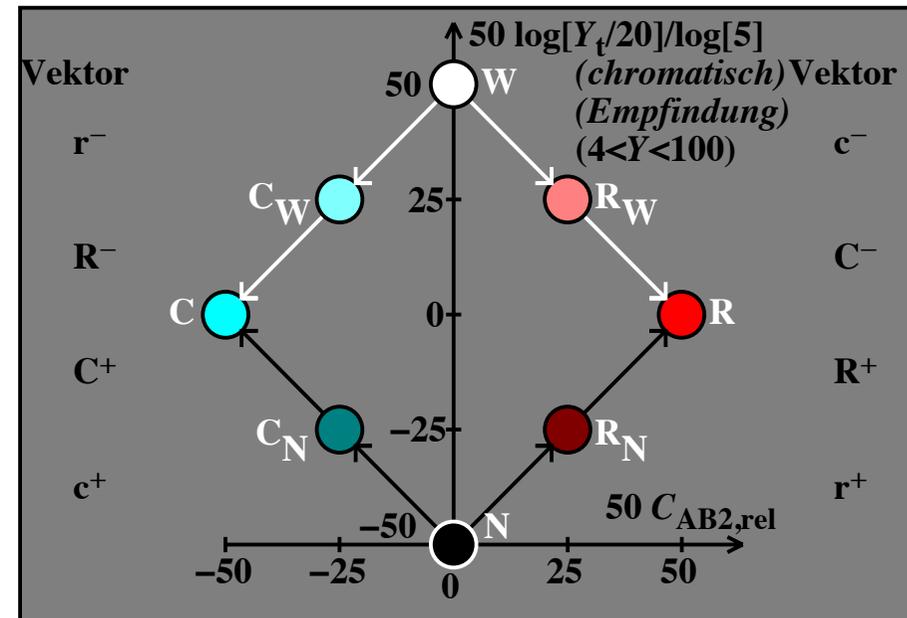
Zum Herunterladen des linken Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGA0/BGA01-7N.PDF>

Zum Herunterladen des rechten Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGA0/BGA01-8N.PDF>

Zum Herunterladen ähnlicher Bilder: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGA0/BGA0LONP.PDF>



BGS51-1A



BGS81-2A

Bild 12: logarithmische Reflexion für Kontrast 8:1 und Farbvektoren

Zum Herunterladen des linken Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGS5/BGS51-1A.PDF>

Zum Herunterladen ähnlicher linker Bilder: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGS5/BGS5L0NP.PDF>

Zum Herunterladen des rechten Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGS8/BGS80-2A.PDF>

Zum Herunterladen ähnlicher rechter Bilder: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGS8/BGS8L0NP.PDF>

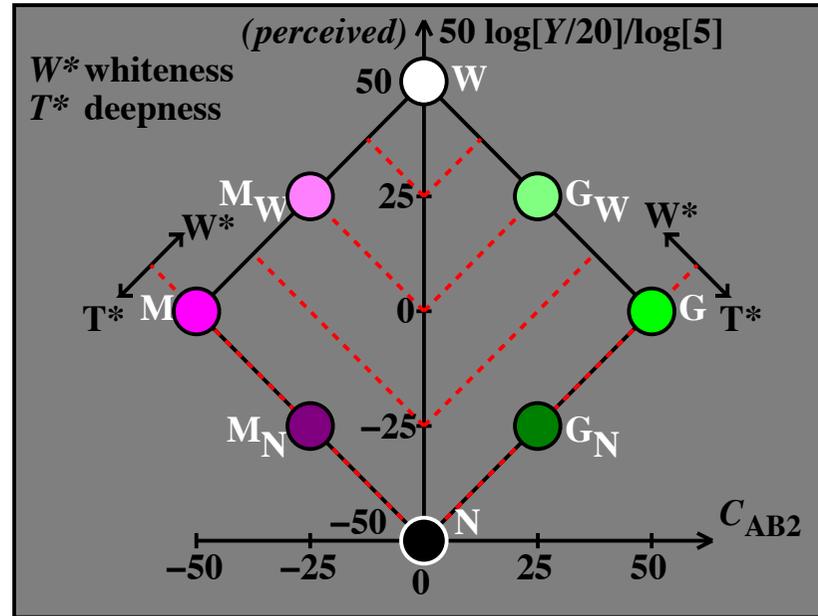
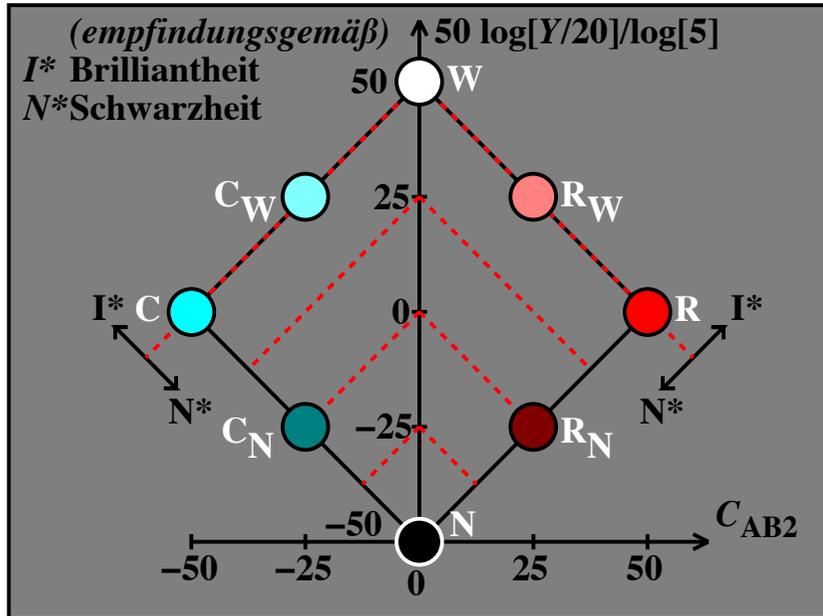


Bild 13: Antagonistische Farberscheinungen Schwarzheit und Brilliantheit sowie Weißheit und Farbtiefe.

Zum Herunterladen des linken Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BES2/BES21-6A.PDF>

Zum Herunterladen ähnlicher linker Bilder: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGS2/BGS2L0NP.PDF>

Zum Herunterladen des rechten Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGS3/BGS31-4A.PDF>

Zum Herunterladen ähnlicher rechter Bilder: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGS3/BGS3L0NP.PDF>

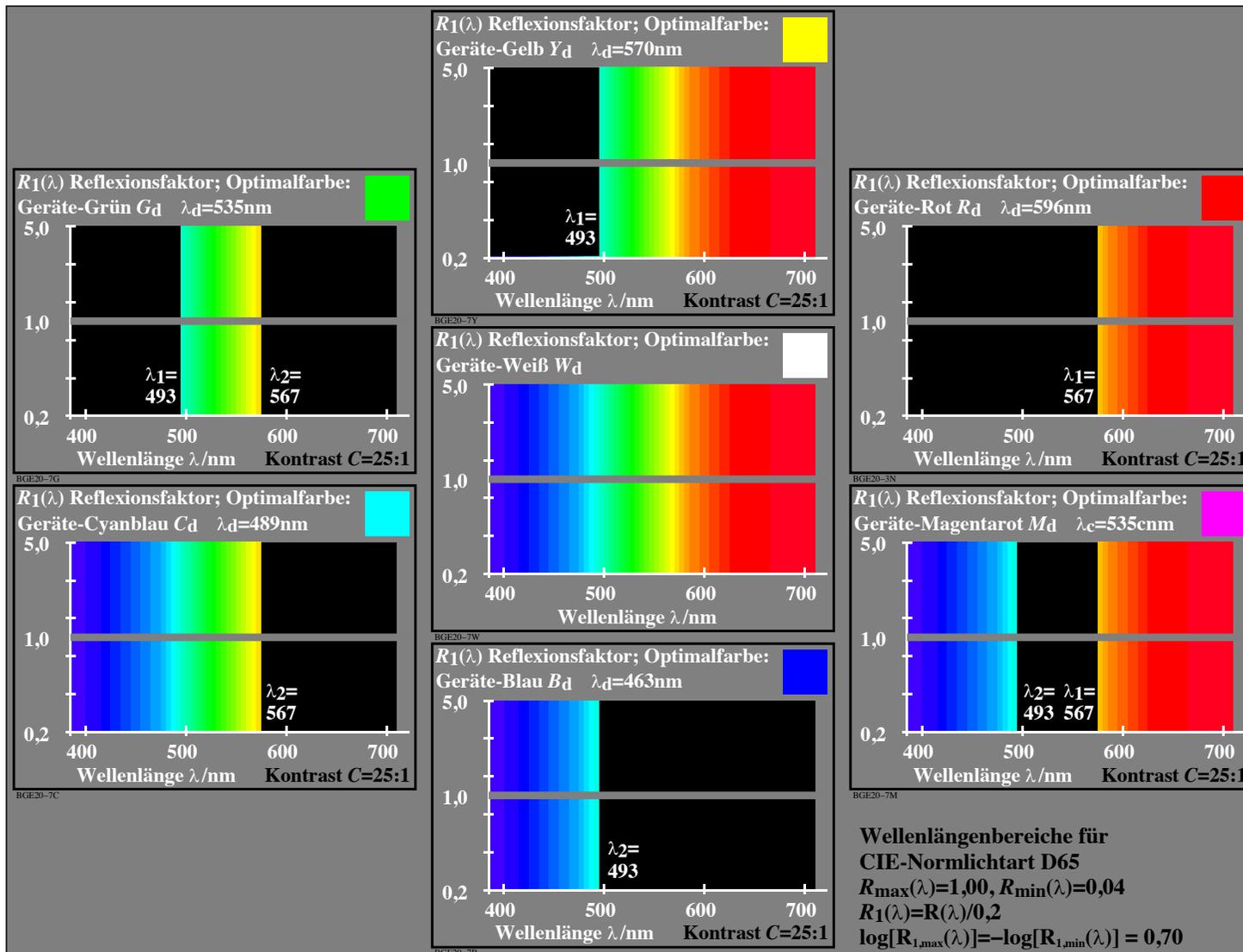
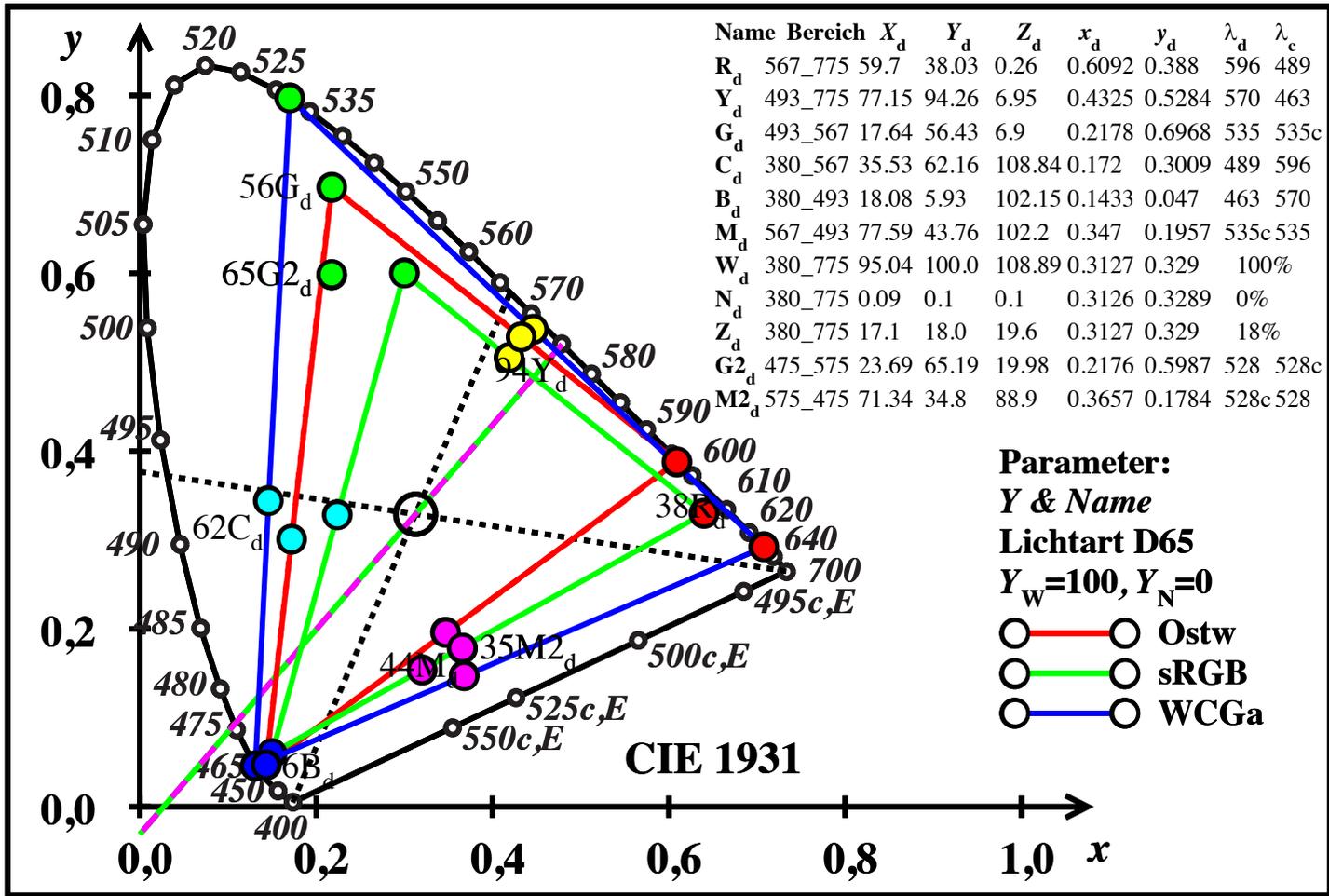


Bild 14: Normierte logarithmische Reflexion für Optimalfarben

Zum Herunterladen dieses Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGE2/BGE20-3N.PDF>

Zum Herunterladen ähnlicher Bilder: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGE2/BGE2L0NP.PDF>

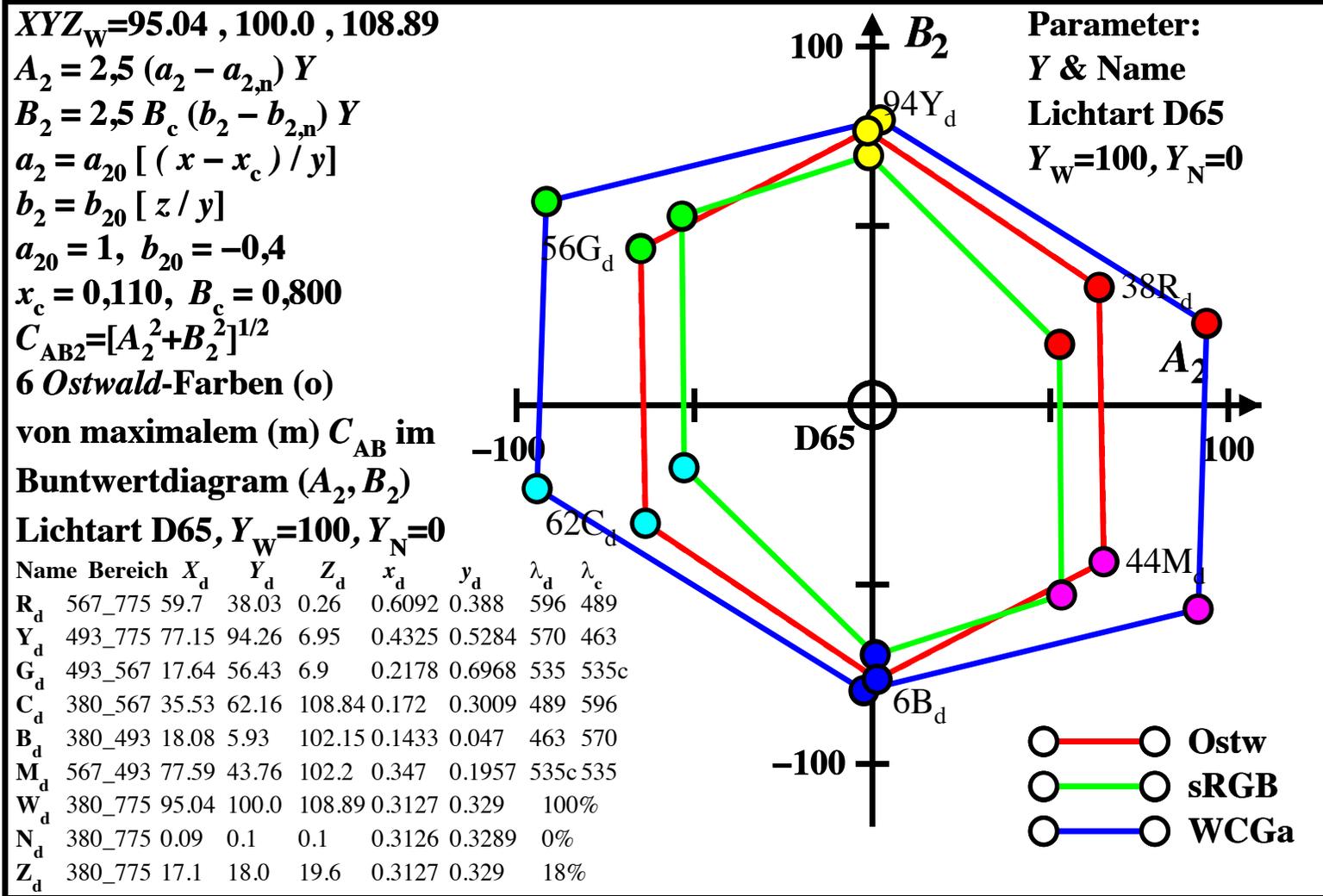


BGU00-1A

Bild 15: Farborte von Ostwald-, sRGB- und WCGa-Farben in (x, y).

Zum Herunterladen dieses Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGU0/BGU00-8N.PDF>

Zum Herunterladen ähnlicher Bilder: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGU0/BGU0L0NP.PDF>



BGU00-1A

Bild 16: Ostwald-, sRGB- und WCGa-Farben in Buntdiagramm (A_2, B_2).

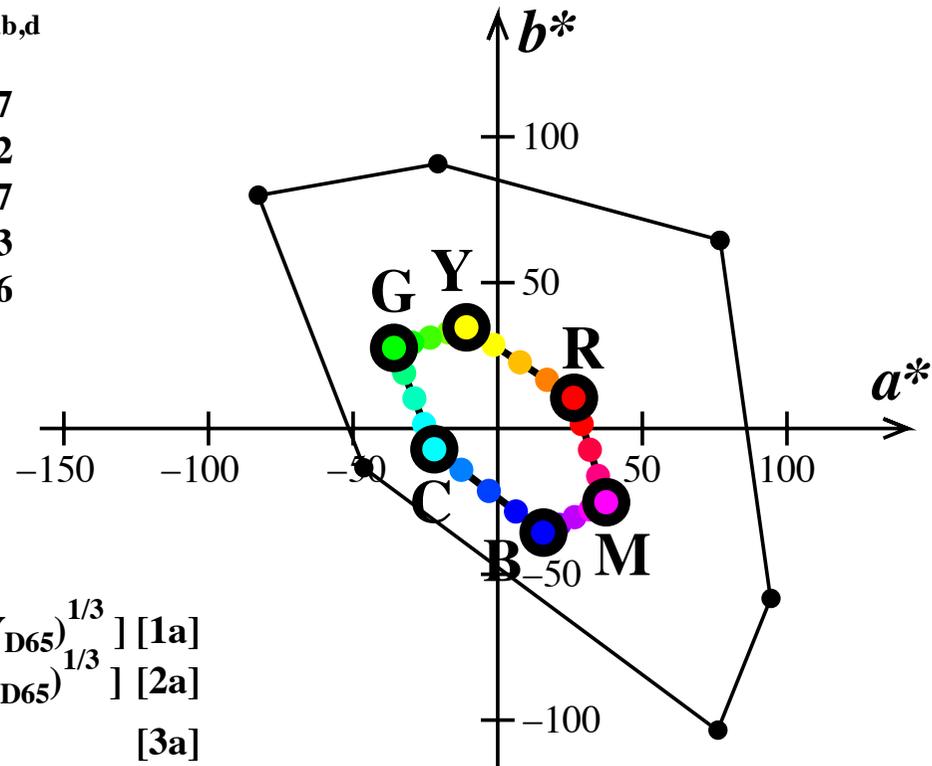
Zum Herunterladen dieses Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGU0/BGU01-8N.PDF>

Zum Herunterladen ähnlicher Bilder: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGU0/BGU0L0NP.PDF>

sRGB-Daten rgb^* , XYZxy und LabC* h_{ab} im CIELAB-Farbraum

Normfarbwerte von Schwarz und Weiß: $Y_{Nn}=40,3$, $Y_{Wn}=88,6$, $Y_{Wa}=88,6$.

	rgb^*_d	L^*_d	a^*_d	b^*_d	$C^*_{ab,d}$	$h_{ab,d}$
R_d	1 0 0	76	26	10	28	21
Y_d	1 1 0	93	-10	34	36	107
G_d	0 1 0	89	-35	27	45	142
C_d	0 1 1	90	-21	-7	23	197
B_d	0 0 1	72	15	-35	38	293
M_d	1 0 1	78	37	-25	45	326
N_d	0 0 0	69	0	0	0	0
W_d	1 1 1	95	0	0	0	0



$$a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_{D65}} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_{D65}} \right)^{1/3} \right] \quad [1a]$$

$$b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_{D65}} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_{D65}} \right)^{1/3} \right] \quad [2a]$$

$$C^*_{ab} = \left[a^{*2} + b^{*2} \right]^{0,5} \quad [3a]$$

$$h_{ab} = \text{atan} \left[b^* / a^* \right] \quad [4a]$$

BGE31-2N

Bild 17: WCGa-Farben im CIELAB-Buntheitsdiagramm (a^* , b^*).

Zum Herunterladen dieses Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGE3/BGE31-2N.PDF>

Zum Herunterladen ähnlicher Bilder: <http://farbe.li.tu-berlin.de/BGE3/BGE3L0NP.PDF>

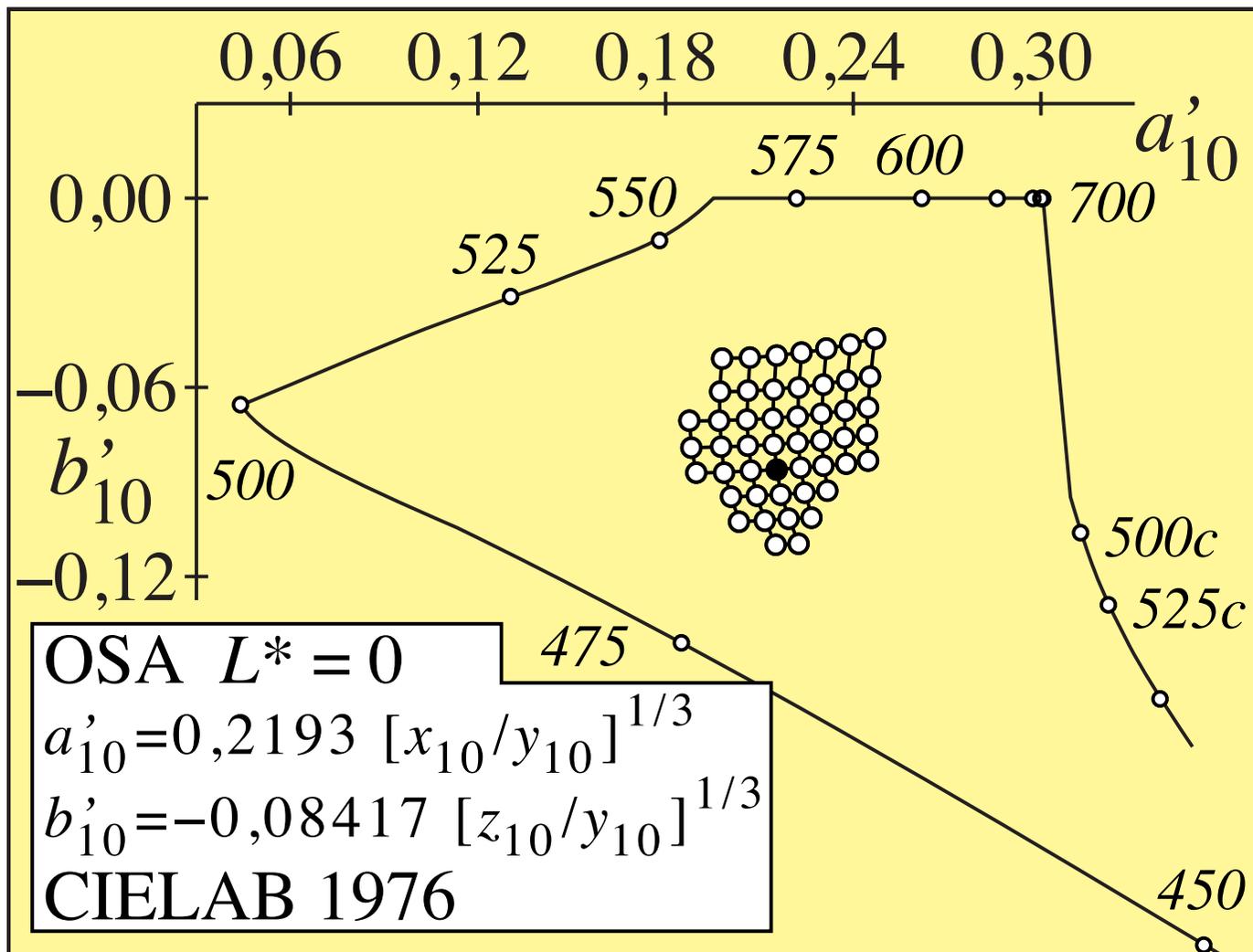
Höhere Farbmatrik (Farbdaten: nichtlineare Beziehung zu CIE 1931)		
nichtlineare Farbgrößen	Name und Zusammenhang mit Normfarbwerten und -anteilen	Bemerkungen
Helligkeit	$L^* = 116 (Y / 100)^{1/3} - 16 \quad (Y > 0,8)$ Näherung: $L^* = 100 (Y/100)^{1/2,4} \quad (Y > 0)$	CIELAB 1976
Buntheit	<i>nichtlineare Transformation Buntwerte A, B</i>	
Rot-Grün	$a^* = 500 [(X / X_n)^{1/3} - (Y / Y_n)^{1/3}]$ $= 500 (a' - a'_n) Y^{1/3}$	CIELAB 1976
Gelb-Blau	$b^* = 200 [(Y / Y_n)^{1/3} - (Z / Z_n)^{1/3}]$ $= 500 (b' - b'_n) Y^{1/3}$	CIELAB 1976
radial	$C^*_{ab} = [a^{*2} + b^{*2}]^{1/2}$	n=D65 (Umfeld)
Farbart	<i>nichtlinearer Transfer Farbarten x/y, z/y</i>	<i>vergleiche log Zapfensättigung</i>
Rot-Grün	$a' = (1 / X_n)^{1/3} (x / y)^{1/3}$ $= 0,2191 (x / y)^{1/3} \quad \text{für D65}$	$\log[L / (L+M)]$
Gelb-Blau	$b' = -0,4 (1 / Z_n)^{1/3} (z / y)^{1/3}$ $= -0,08376 (z / y)^{1/3} \quad \text{für D65}$	$\log[S / (L+M)]$
radial	$c'_{ab} = [(a' - a'_n)^2 + (b' - b'_n)^2]^{1/2}$	

AGS01-7N

Bild 18: Farbtafel (Kubikwurzelfarbtabelle) (a' , b') zu CIELAB 1976

Zum Herunterladen des Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/AGS0/AGS01-7N.PDF>

Zum Herunterladen ähnlicher Bilder: <http://farbe.li.tu-berlin.de/AGS0/AGS0L0NP.PDF>



MG150-7, B4_14_2

Bild 19: OSA-Farben in der Farbarttafel (a' , b') von CIELAB 1976

Zum Herunterladen des Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/MG15/MG150-7N.PDF>

Zum Herunterladen ähnlicher Bilder: <http://farbe.li.tu-berlin.de/MG15/MG15L0NP.PDF>

Zusammenfassung

Unsere tägliche Umgebung erfordert eine *logarithmische* und *antagonistische* Helligkeitsstufung und zusätzlich eine antisymmetrische Metrik verglichen mit Mittelgrau mit $Y_U=18$. Die Helligkeit L^* hat eine Asymptote für ein sehr helles Weiß und ein tiefes Schwarz (sie ist gedeckelt). Dies gilt auch für die Buntheit Gelb-Blau.

In der Informationstechnik wird die Metrik der Farbart- und Helligkeitsstufung mit dem Szenenkontrast *Weiß:Schwarz* geändert, siehe ISO 9241-306:2018 mit Prüfvorlagen unter <http://standards.iso.org/iso/9241/306/ed-2/index.html>

Zum Beispiel gilt $n=1/1,2$ (nahezu linear) für den kleinen Kontrast $Y_W:Y_N=2:1$ über $n=1/2,4$ (CIELAB- und sRGB-Farbenraum von IEC 61966-2-1) für den Normkontrast $Y_W:Y_N=25:1$ bis etwa $n=1/3,6$ für den hohen Kontrast $Y_W:Y_N$ größer 288:1. Auch die Metrik der antagonistischen *Farberscheinungsmerkmale Schwarzheit und Brilliantheit, Weißheit und Farbtiefe* ändern sich mit dem Exponenten n .

In 1976 wurde das Farbartdiagramm (a', b') für CIELAB 1976 nicht akzeptiert. Jedoch ist die chromatische angenähert eine lineare Translation in (a', b') . Dies ist durch haploskopische Eperiments bestätigt, siehe K. Richter (1980) in CR&A. Eine ähnliche lineare Translation wird auch in (u', v') von CIELUV 1976 für die Farbumstimmung benutzt. Jedoch ist die gleichabständige Stufung der OSA-Farben im Farbartdiagramm (a', b') von Bild 19 viel weniger gleichabständig im Farbartdiagramm (u', v') .

Die Farbart a' ist angenähert eine lineare Funktion von x und y . Die Farbart b' ändert sich mit dem Szenenkontrast. Es gilt $n=1/1,2, 1/2,4$ (CIELAB) und $1/3,6$ für die Szenenkontraste 2:1, 36:1 (ISO 9241-306) und $>288:1$, zum Beispiel für Wide Colour Gamut Displays (WCGa). Gleiche Gelb-Blau-Buntheiten, zum Beispiel für D65 und A, erfordern gleiche Farbartdifferenzen $b'-b'_n$. Für ein konstantes Y entspricht dies einer linearen Translation.

Zur Information farbmeterischer Daten in vielen Sprachen, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/index.html>
Für andere Publikationen der Forschungsgruppe, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/XY91FDE.html>

Anhang A

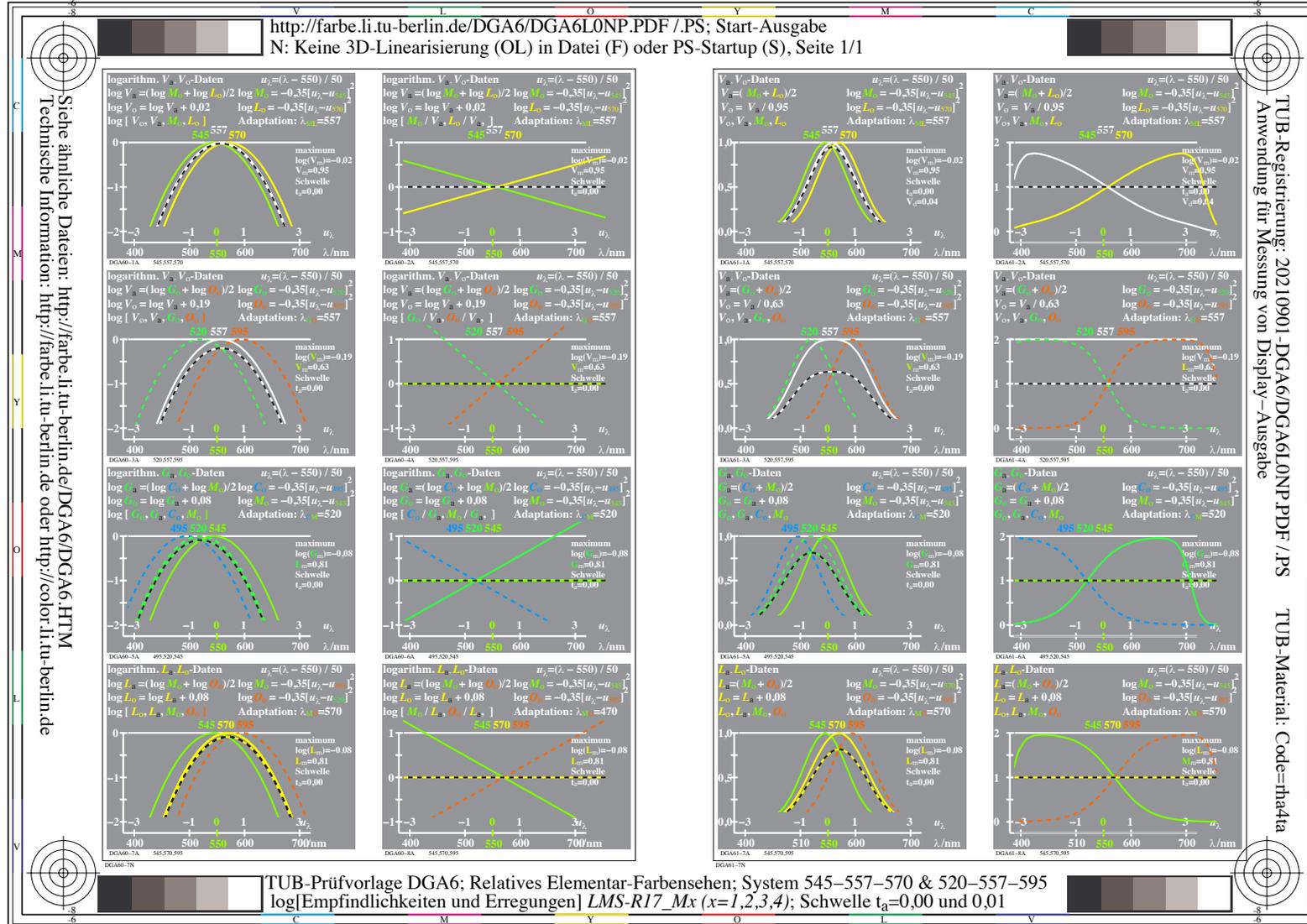


Bild A.1: Summen und Differenzen von L- und M-Rezeptorfarbwerten in log- und lin-Darstellung
 Zum Herunterladen des Bildes: <http://farbe.li.tu-berlin.de/DGA6/DGA6L0NP.PDF>