

Farbmetrische Wiedergabe von Leuchtdichte und Farbart von *rgb**-Bildern auf SDR- und HDR-Displays durch ein TUB-Farbsehmodell

Prof. Dr. Klaus Richter, Technische Universität Berlin, Sektion Lichttechnik, 2024-07-01

Zum Herunterladen dieser Veröffentlichung siehe

<http://farbe.li.tu-berlin.de/dislum25d.pdf> auf deutsch oder <http://color.li.tu-berlin.de/dislum25e.pdf> auf englisch

oder https://web.archive.org/web/*/http://farbe.li.tu-berlin.de/dislum25d.pdf

oder siehe *Publikationen* unter <http://-farbe.li.tu-berlin.de/XY91FDE.html>

Diese Arbeit wurde zur 50-Jahr-Feier der Gründung der *Deutschen farbwissenschaftlichen Gesellschaft (DfwG)* entwickelt.

Inhalt

1. Einleitung
2. TUB-Modell achromatischer physiologischer Erregungen und psychophysische Daten
3. Skalierung der Displayfarben zwischen Schwarz N, Grau U, Weiß W und Kopfweiß P2
4. Prüfvorlagen für die Skalierung von Farb- und Graureihen von 3, 5, 9, 17 und 33 Stufen
5. Definition und Ausgabe von *pdf*-Prüfvorlagen mit HDR-*rgb**-Werten in 2 Anwendungsfällen
6. *Relative* farbmetrische Displayausgabe von Leuchtdichte und Farbart.
7. Physiologische S-förmige Rezeptorerregung $F_{ab}(x_r)$ und Annäherung $F^*(x_r)$
8. Leuchtdichte und Helligkeit für den SDR-Bereich und den HDR-Kopfraum
9. Achromatische und chromatische Prüfvorlagen für Skalierung und visuelles Gamma
10. Nutzerwunsch *gleiche relative Stufung* als Grundlage für Kennzeichnung der *Bildqualität*
11. Diskussion der Ergebnisse sowie Vorteile und Nachteile
12. Literatur

1. Einleitung

Neue Displays für den hochdynamischen Bereich HDR (High Dynamic Range) führen zu neuen Möglichkeiten für die Ausgabe der Szenenleuchtdichte im Vergleich zum Normbereich SDR (Standard Dynamic Range).

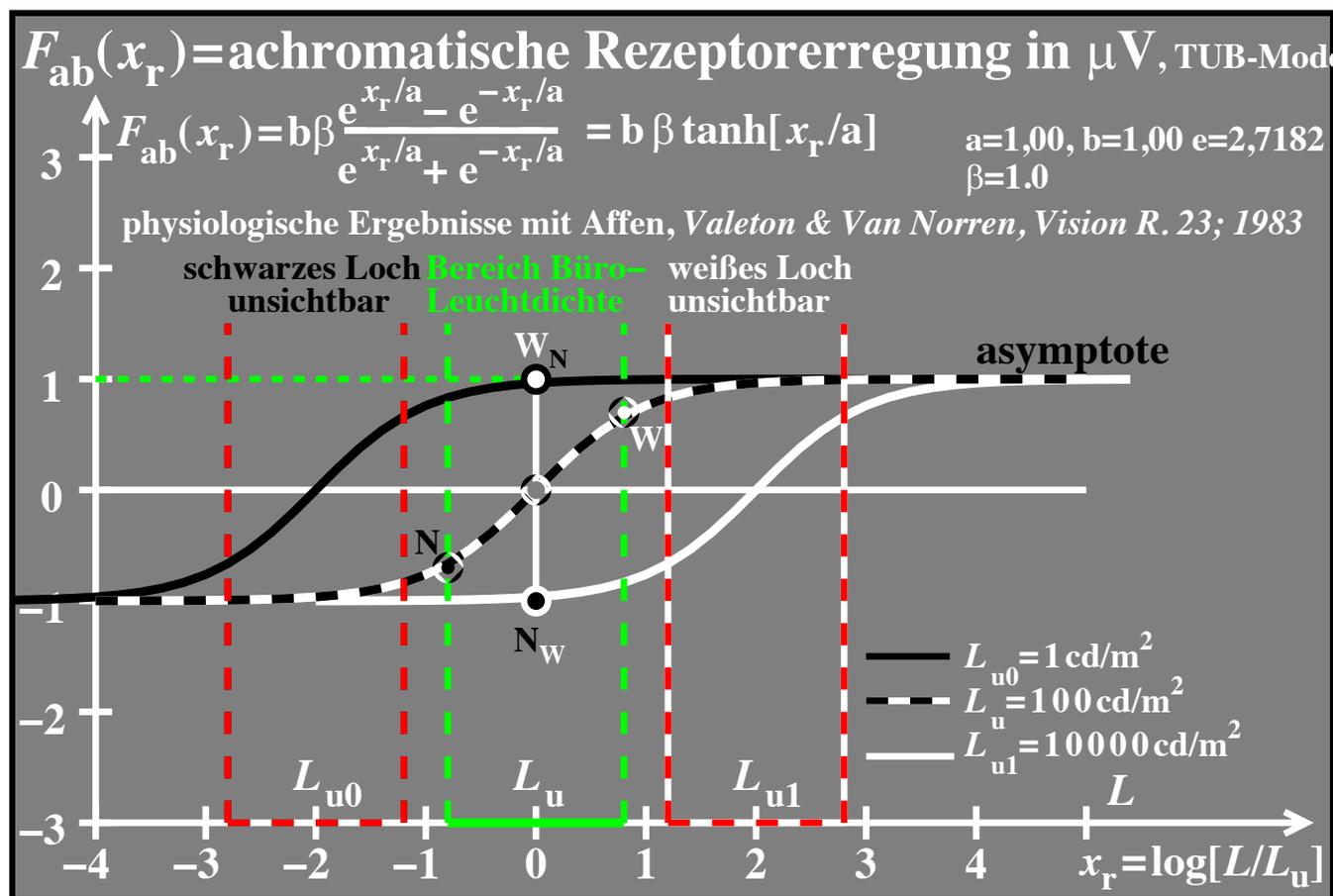
Die analoge Fotografie benutzt mindestens 4 logarithmische Leuchtdichteinheiten. Im Negativfilm wurde die Leuchtdichte als Dichte kodiert, die proportional zur logarithmischen Leuchtdichte ist. Auch die vorliegende Digitalfotografie kann mindestens 4 logarithmische Leuchtdichteinheiten speichern. Darüber hinaus stehen die Informationen direkt als digitale Bilddatei zur Verfügung.

Für jede Codierung der Szenenleuchtdichte durch eine potenzielle, logarithmische oder Hyperbelfunktion erzeugt die inverse Dekodierung die Leuchtdichte und Farbart des Displays. Es gibt jedoch immer eine Mischung aus dem emittierenden Displaylicht und dem Umgebungslicht. Diese Kontrastreduzierung wird in ISO 9241-306 und nicht in ISO 22028-5 berücksichtigt.

Für die Anwendung ist die geeignete Codierung und die inverse Codierung entsprechend den Eigenschaften des menschlichen visuellen Systems wichtig. Vorschläge und Lösungen werden im Folgenden diskutiert.

Bild 1 zeigt eine Anpassung der visuellen Erregungen von Affen durch eine Hyperbelfunktion. Die Literatur ist im Bild angegeben. Die visuellen Erregungen liegen immer im Bereich von 0 bis 1. Sie wurden für vier logarithmische Einheiten der Adaptation und für etwa 6 logarithmische Einheiten der Musterleuchtdichte gemessen.

2. TUB-Modell achromatischer physiologischer Erregungen und psycho-physikalische Daten



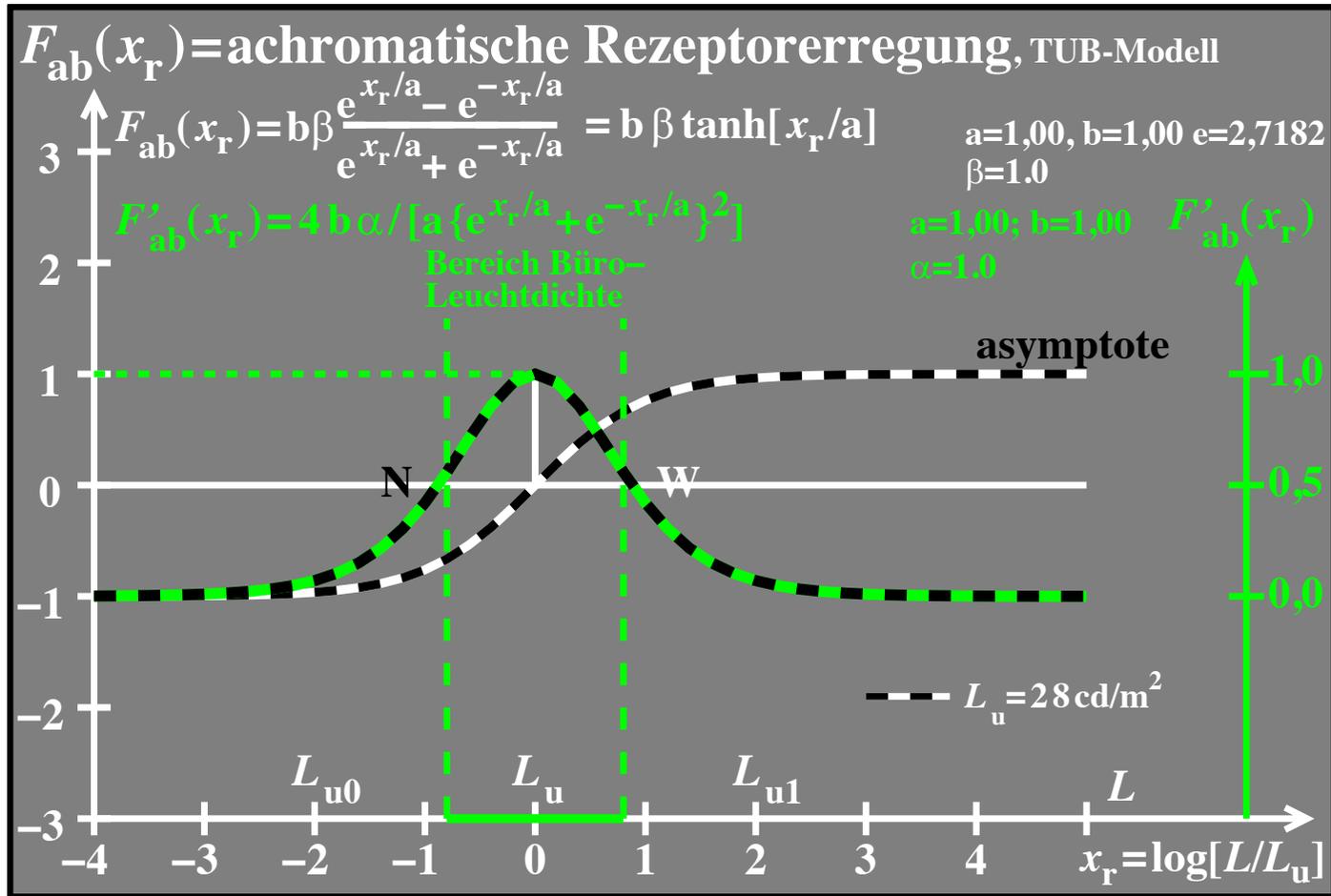
egg00-5n

Bild 1 Physiologische Erregungskurven von Affen für drei Adaptionsstufen

Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/egg0/egg00-5n.pdf>

Die Literatur, der Beispielleuchtdichtebereich und die Adaptionsstufe sind im Bild angegeben.

Gezeigt werden die Muster Schwarz N, Grau U und Weiß W nahe dem Büro-Leuchtdichtebereich.



egg00-3n

Bild 2 Physiologische Erregungskurve und Ableitung für den Büro-Leuchtdichtebereich

Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/egg0/egg00-3n.pdf>

Die *relative* Leuchtdichte sollte verwendet werden. Alle physiologischen Erregungskurven in Bild 1 sind für verschiedene Adaptionsstufen ähnlich. ISO 9241-306 definiert $L_u=28 \text{ cd/m}^2$ für Grau U.

Mathematikgleichungen der Hyperbelfunktionen

Siehe: *Handbook of mathematical functions, NBS, USA, Sec. 4.5*

$$F_{ab}(x_r/a) = b \tanh(x_r/a) = b \frac{e^{x_r/a} - e^{-x_r/a}}{e^{x_r/a} + e^{-x_r/a}} \quad [1]$$

$$\frac{dF_{ab}(x_r/a)}{dx_r} = \frac{4b}{a[e^{x_r/a} + e^{-x_r/a}]^2} \quad x_r = \log(L/L_u) \quad [5]$$
$$dx_r/dL = \ln(10)/L$$

$$\frac{dF_{ab}(x_r/a)}{dx_r} \frac{dx_r}{dL} = \frac{4b}{a[e^{x_r/a} + e^{-x_r/a}]^2} \frac{\ln(10)}{L} \quad [6]$$

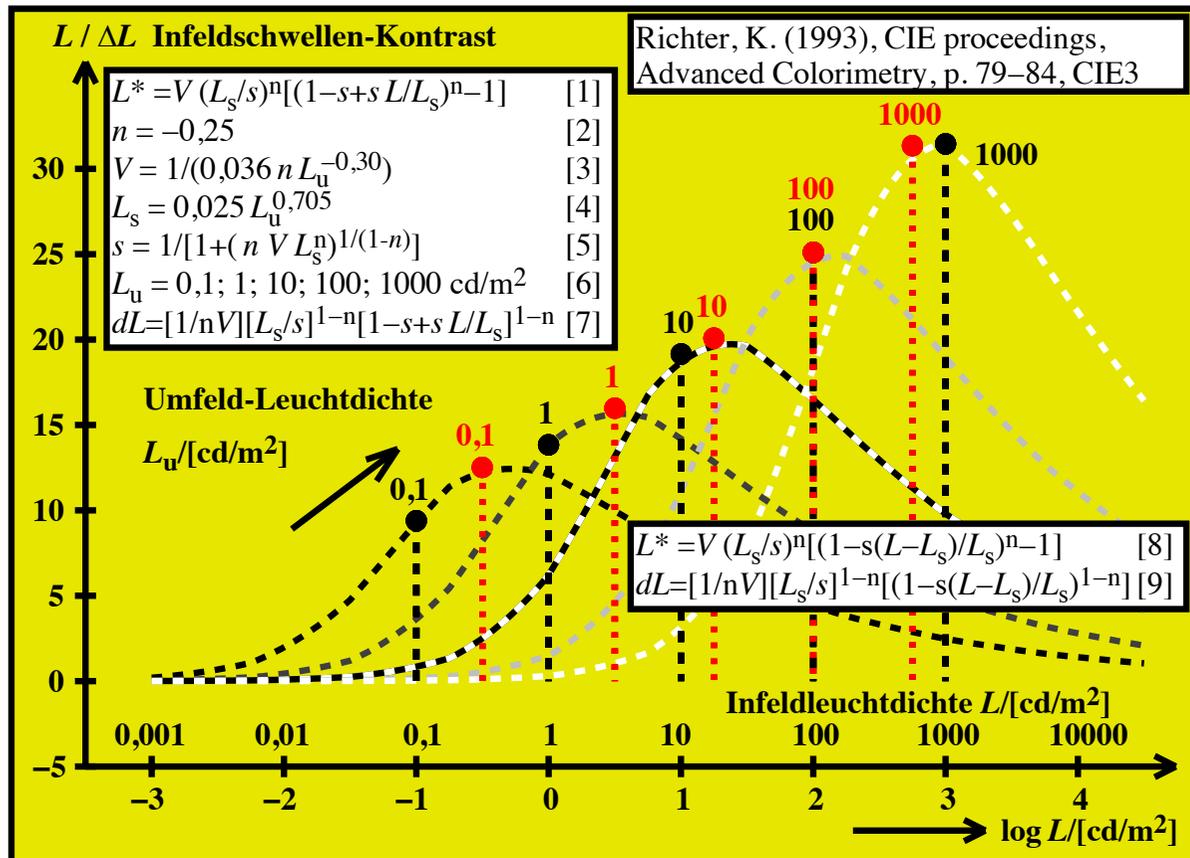
$$\frac{L}{dL} = \frac{4b \ln(10)}{a[e^{x_r/a} + e^{-x_r/a}]^2} \quad dL = \frac{a[e^{x_r/a} + e^{-x_r/a}]^2 L}{4b \ln(10)} \quad [7]$$

fgk01-7n

Bild 3 Rezeptor-Antwort-Kurven werden durch Hyperbelfunktionen beschrieben

Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/fgk0/fgk01-7n.pdf>

Die Ableitung von $F_{ab}[\log(L/L_u)]$ ist proportional zum Leuchtdichtekontrast ($L/\Delta L$). Wenn dieser Kontrast konstant ist (*Weber-Fechner-Gesetz*), dann ist die Erregungskurve eine gerade Linie.

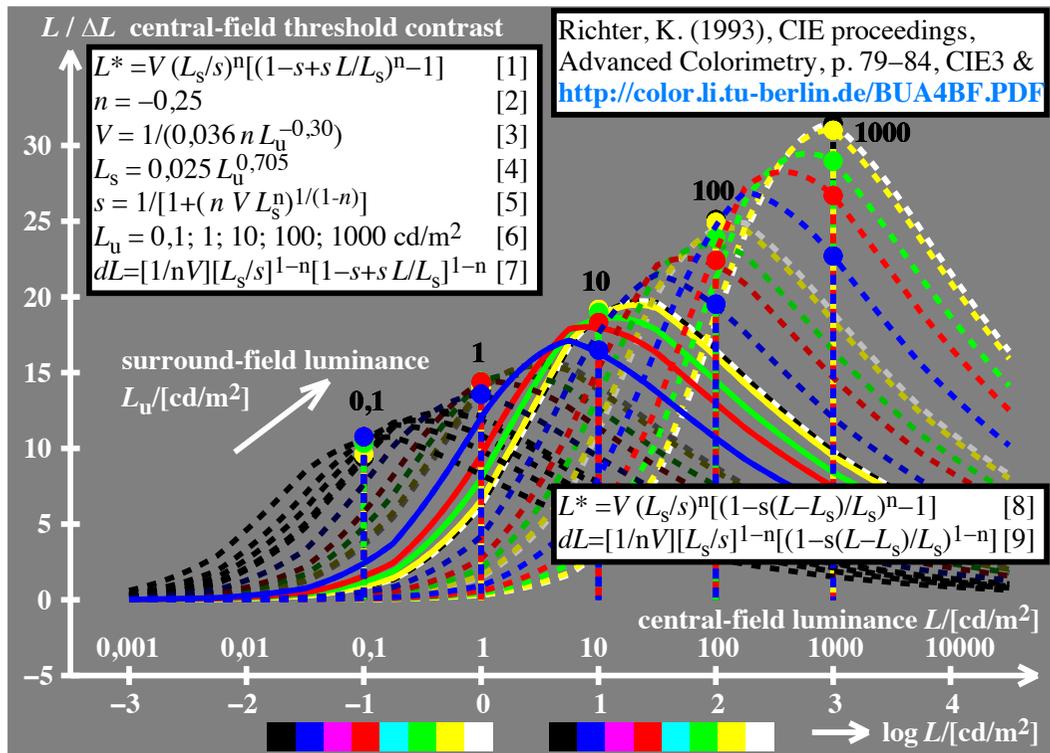


egs01-2n, ees10-2a

Bild 4 Psycho-physikalischer Leuchtdichtekontrast für unbunte Farben und 5 Adaptationen

Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/egs0/egs01-2n.pdf>

Auf der linearen Ordinate erhöht sich dieser Kontrast um ca. 20% bei einer Leuchtdichteänderung von 100 auf 1000 cd/m². Im definierten HDR-Leuchtdichtebereich zwischen 200 und 1000 cd/m² nach ISO 22028-5 kann der Kontrast um 10% zunehmen. Dies könnte in den meisten Anwendungen nicht sichtbar sein.



ees90-2a

Bild 5 Psycho-physikalischer Leuchtdichtekontrast für unbunte und chromatische Farben

Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/egs9/egs90-2a.pdf>

Für bunte verglichen mit unbunten Farben wird eine Verschiebung des Leuchtdichtekontrasts ($L/\Delta L$) angenommen. Für die Displayfarben RGBY wird die Leuchtdichte nach IEC 61966-2-1 verwendet. Die Erscheinung der 8 Farben im Bild ist über einen weiten Leuchtdichtebereich annähernd konstant und deshalb zweifach dargestellt. Bei einer Leuchtdichteänderung zwischen 100 und 1000 cd/m² (Faktor 10) ändert sich die Kontrastempfindlichkeit von 25 auf 30 (Faktor 1,2). Für alle Farben RGBY wird der maximale Kontrast auf eine niedrigere Leuchtdichte verschoben.

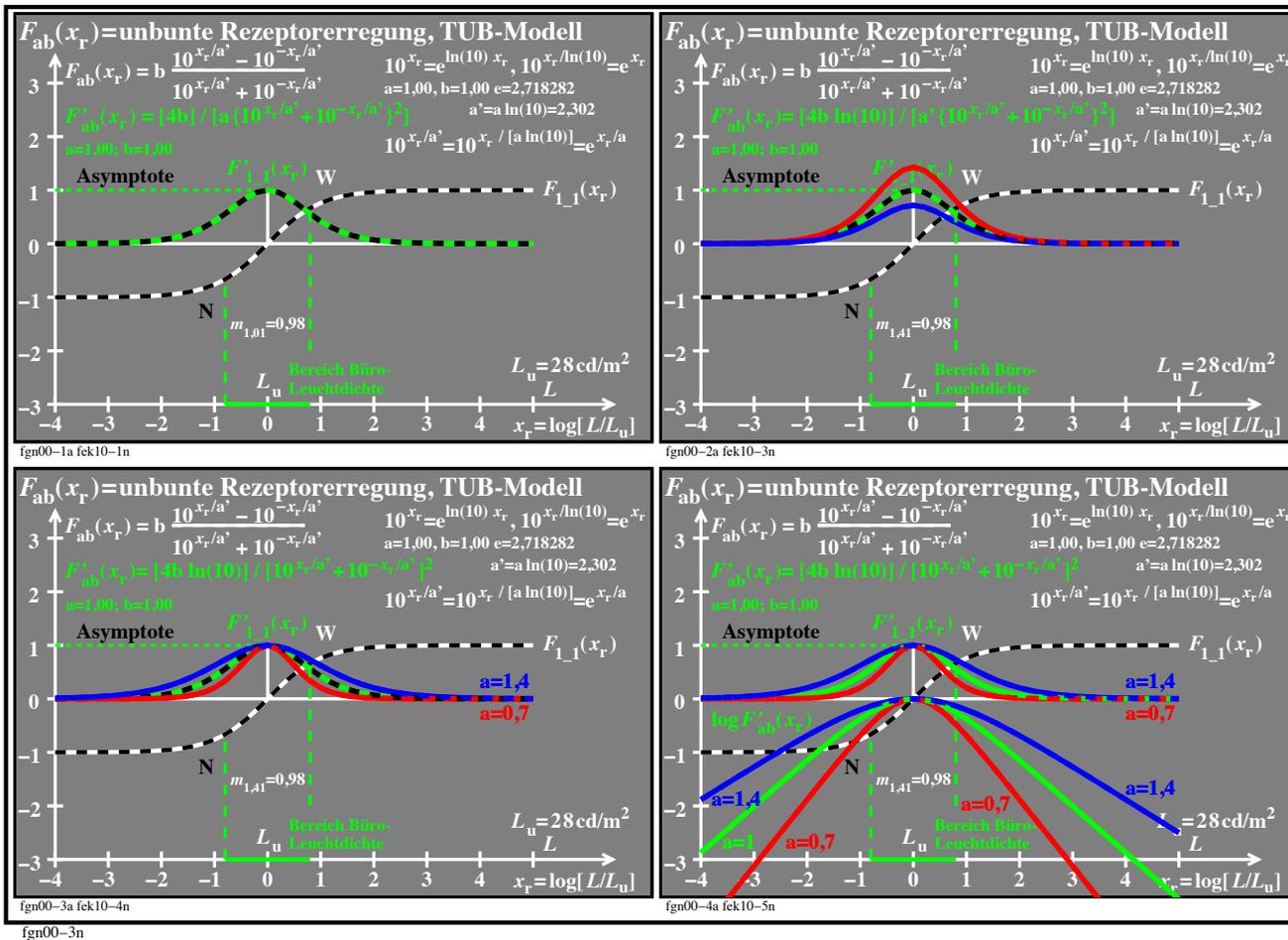


Bild 6 Modell physiologischer Erregungsfunktionen mit zwei Parametern a und b

Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/fgn0/fgn00-3n.pdf>

Die *relative* Erregung $\log(L/L_u) = 0$ ist unabhängig vom Parameter b und sollte in Anwendungen verwendet werden. Der Parameter a ändert die Bandbreite auf der x-Achse. Zum Beispiel ist bei helleren Farben mit $a=1,4$ die Steigung geringer als bei $a=1,0$, vergleiche Bild 4 und 5.

Farblinien-Element von *Stiles*

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

Drei separate Farberregungsfunktionen

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

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

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

Taylor-Ableitungen:

$$\begin{aligned} \Delta F(L_P, M_D, S_T) &= \frac{dF}{dL_P} \Delta L_P + \frac{dF}{dM_D} \Delta M_D + \frac{dF}{dS_T} \Delta S_T \\ &= \frac{9i}{1+9L_P} \Delta L_P + \frac{9j}{1+9M_D} \Delta M_D + \frac{9k}{1+9S_T} \Delta S_T \end{aligned}$$

egn31-1n

Bild 7 Logarithmisches Farblinienelement von *Stiles* (1946) mit Ableitung und Integration.

Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/egn3/egn31-1n.pdf>

Der Bericht CIE 15 *Farbmetrik* benutzt Erregungsfunktionen der drei Rezeptoren (L , M , S) oder (P =Protanop, D =Deuteranop, T =Tritanop). *Stiles* nimmt zum Beispiel an, dass die Helligkeit L^* eine logarithmische Funktion der Leuchtdichte L ist. In diesem Bereich besteht weiterer Forschungsbedarf. In Bild 7 wird eine schwarze Schwelle mit dem Wert "1" angenommen.

3. Skalierung der Displayfarben zwischen Schwarz N, Grau U, Weiß W und Kopfweiß P2

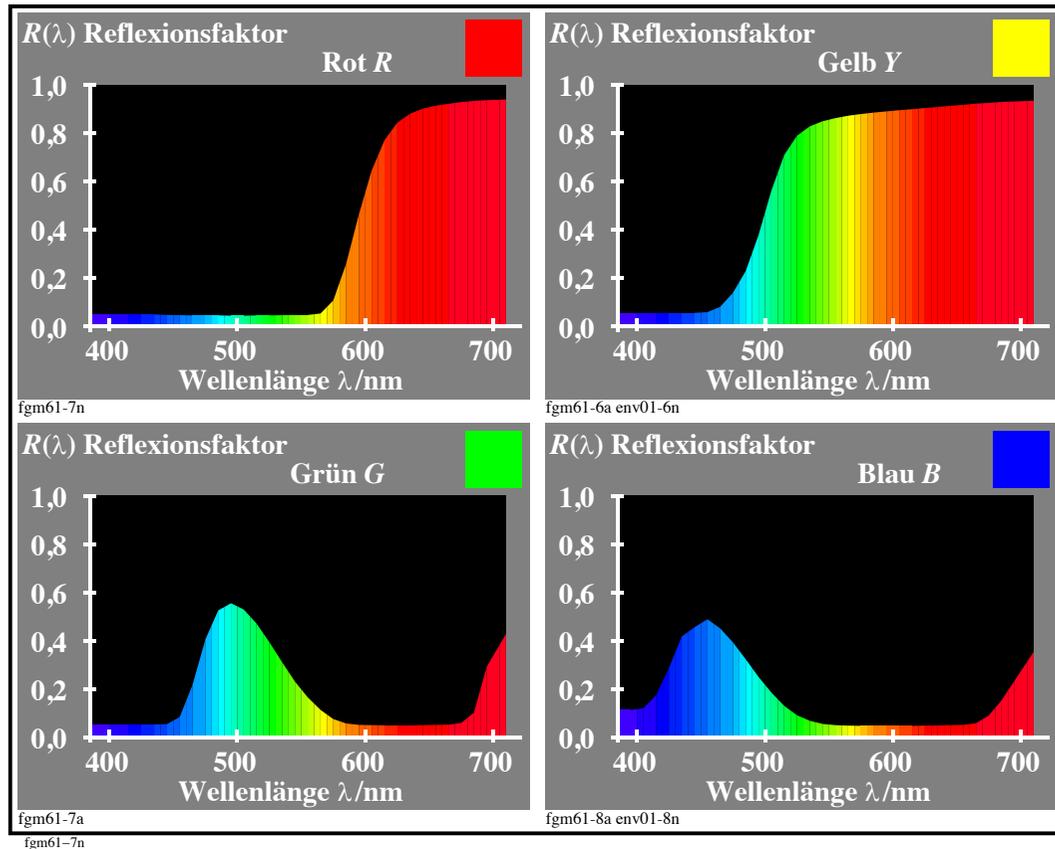


Bild 8 Reflexionskurven der CIE-Testfarben RYGB nach CIE 13.3

Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/fgm6/fgm61-7n.pdf>

Die spektrale Reflexion aller matten Oberflächenfarben liegt zwischen knapp 3,6% für Schwarz N, 18% für Grau U und 90% für Weiß W. Für Displays werden die proportionalen Werte 4, 20 und 100% verwendet. Der *Faktor 5* zwischen 4 und 20, 20 und 100 wird auch in der ISO 22028-5 [3] zwischen 200 und 1000 cd/m² verwendet. Dies führt zu der *logarithmischen* Skalierungsfunktion, siehe Bild 9.

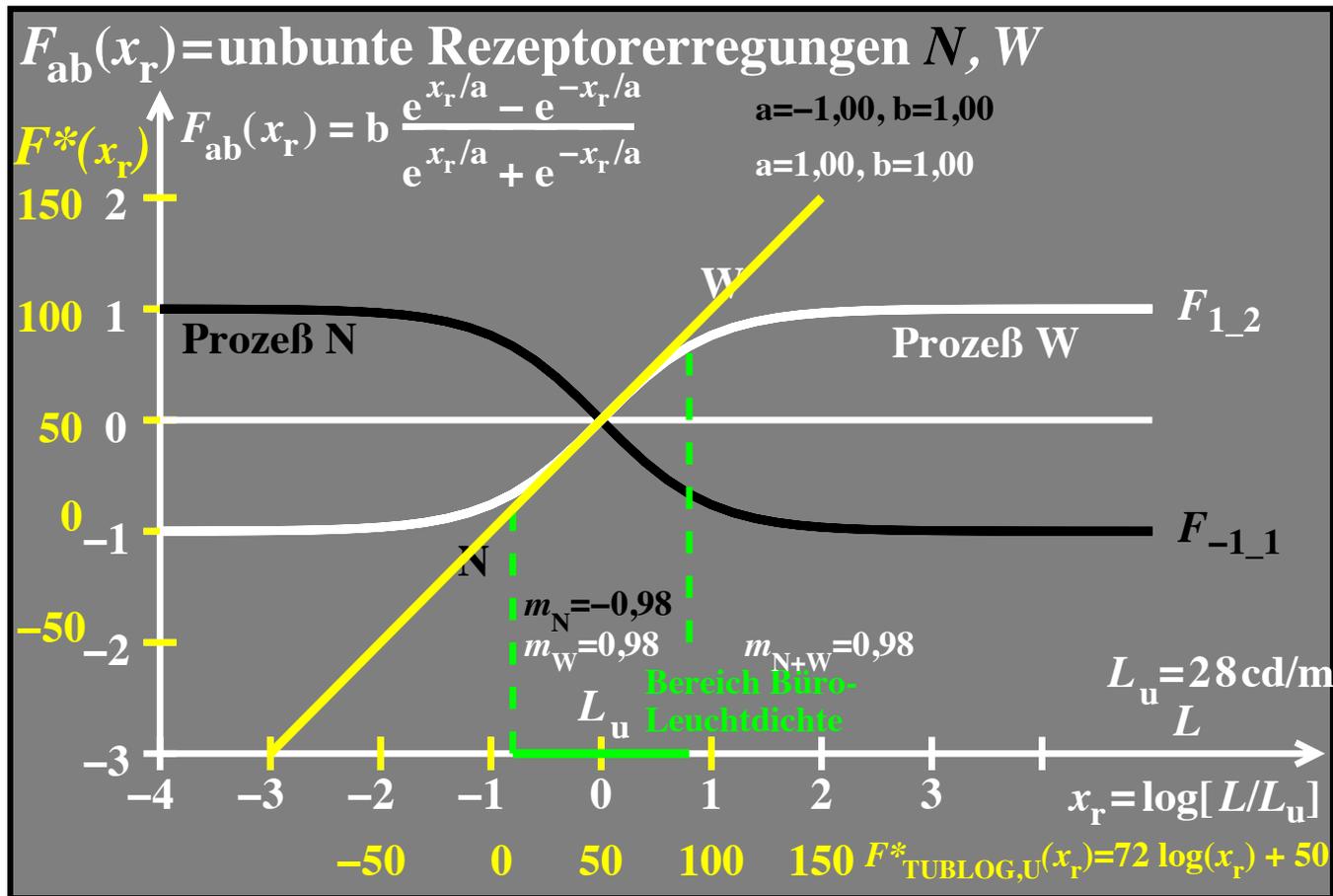
Farbmetrische Skalierung von unbunten Farben zwischen Spitzenweiß und Schwarz Beziehungen Hellbezugswert Y , Leuchtdichte L und Helligkeit L^* nach ISO-Normen						
Farbe (Licht oder Papier)	Norm-farbwert	HDR-Display Leuchtdichte	relative Leuchtdichte		CIELAB _W Helligkeit	TUBLOG _U Helligkeit
Kontrast W:N (25:1=100:4)	Y ($5^{0,5}=2,24$)	L [cd/m ²]	L_{rU} = L/L_U	L_{rW} = L/L_W	$L^*_{CIELABW}$ = $c_W L_{rW}^{1/3} - 16$	$L^*_{TUBLOGU}$ = $t_U \log(L_{rU}) + 50$
Weiß P2 (Licht)	500 = $20 \cdot 25$	1000 = $40 \cdot 25$	25	5,00	182= $132+50$ = $c(5,00)^{1/3} - 16$	150= $100+50$ = $t \log(25,0) + 50$
Weiß W (Fluoreszenzpapier)	100 = $20 \cdot 5$	200 = $40 \cdot 5$	5	1,00	100= $50+50$ = $c(1,00)^{1/3} - 16$	100= $50+50$ = $t \log(5,00) + 50$
Hellgrau H (Papier)	44,8 = $20 \cdot 2,24$	89,6 = $40 \cdot 2,24$	2,24	0,45	72= $22+50$ = $c(0,45)^{1/3} - 16$	75= $25+50$ = $t \log(2,24) + 50$
Grau U (Papier)	20	40 40 \cdot 1	1	0,20	51= $1+50$ = $c(0,20)^{1/3} - 16$	50= $0+50$ = $t \log(1,00) + 50$
Dunkelgrau D (Papier)	8,9 = $20/2,24$	17,8 40/2,24	0,45	0,09	35= $-14+50$ = $c(0,09)^{1/3} - 16$	24= $-25+50$ = $t \log(0,45) + 50$
Schwarz N (Papier)	4 = $20/5$	8 40/5	0,20	0,04	23= $-26+50$ = $c(0,04)^{1/3} - 16$	0= $-50+50$ = $t \log(0,20) + 50$
Schwarz p2 (Glanzpapier)	1,9 = $20/11,2$	3,6 40/11,2	0,09	0,022	14= $-35+50$ = $c(0,02)^{1/3} - 16$	-24= $-74+50$ = $t \log(0,09) + 50$
Es gilt: CIELAB _W : $c_W=c=116$, TUBLOG _U : $t_U=t=50/\log(5)=71,533$						

fgo90-7n

Bild 9 Helligkeits-Skalierungsfunktionen $L^*_{CIELAB,W}$ und $L^*_{TUBLOG,U}$ als Funktion von $\log(L_{ru})$

Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/fgo9/fgo90-7n.pdf>

Die *logarithmische* Helligkeits-Skalierungsfunktion $L^*_{TUBLOG,U}$ ist angenähert die Helligkeit $L^*_{CIELAB,W}$ im Bereich zwischen Schwarz N und Weiß W. Besonders die Werte zwischen Mittelgrau und Weiß sind sehr ähnlich. Es gibt mehrere Vorteile von $L^*_{TUBLOG,U}$. Der Wertunterschied beträgt 50 für die drei Serien N-U, U-W und W-P2. Die Farben W und P2 bestimmen den HDR-Kopfraum.

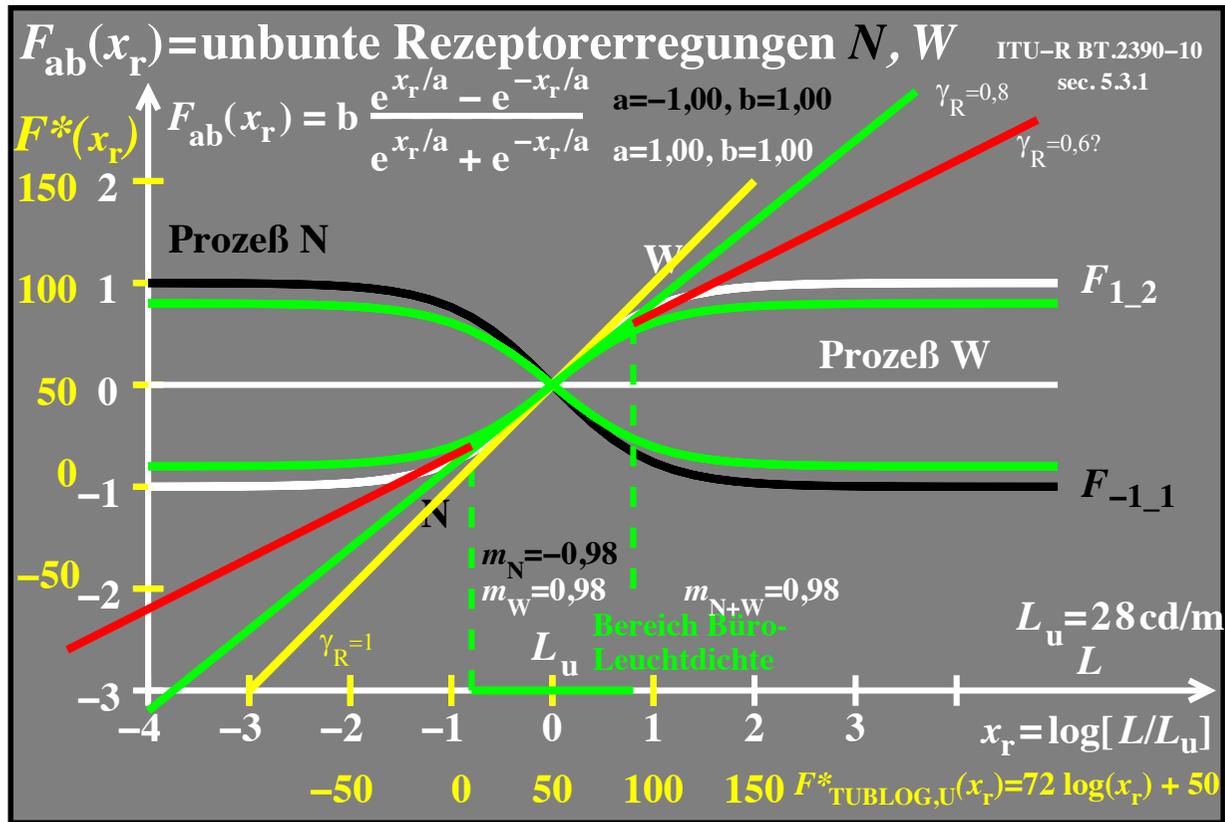


fgw30-1a

Bild 10 Physiologische und inverse Erregung $F_{ab}(x_r)$ und Helligkeit $L^*_{TUBLOG,U} = F^*(x_r)$

Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/fgw3/fgw30-1a.pdf>

Im Bereich der Büroleuchtdichte ist die Helligkeit $L^*_{TUBLOG,U} = F^*(x_r)$ (gelb) ungefähr gleich der Hyperbelfunktion $F_{ab}(x_r)$ (weiß). Die Helligkeit auf der y-Achse erzeugt eine gerade Linie in Abhängigkeit von der *logarithmischen relativen* Leuchtdichte $x_r = \log(L/L_u)$.



fgw40-1a

Bild 11 Physiologische Erregungsfunktionen $F_{ab}(x_r)$ und Helligkeit $L^*_{TUBLOG,U} = F^*(x_r)$

Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/fgw4/fgw40-1a.pdf>

In Anwendungen entspricht die gelbe Linie der weißen Erregung $F_{ab}(x_r)$ und die grüne dem unteren Kontrastbereich von 80% ähnlich wie ISO 9241-306. Für 80% Kontrast verwendet die ITU die Flankensteilheit der L^* -Funktion IECsRGB bei W zur Extrapolation. Bei $x_r=2$ (P2) weichen die 3 Helligkeitswerte 150 (gelb), 130 (grün) und 110 (rot) von $F^*(x_r)$ vom Erregungswert $F_{ab}(x_r)$ 90 (grün) ab. Daher scheinen etwa 20% HDR-Kopfraum (P2-W) angemessen zu sein.

4. Prüfvorlagen für die Skalierung von Farb- und Graureihen mit 3, 5, 9, 17 und 33 Stufen

Die folgenden fünf Bilder Bild 12 bis Bild 16 enthalten *pdf*-Prüfvorlagen. Alle Farben sind durch Werte $0 \leq rgb^* \leq 1$ definiert. Nach der ergonomischen Norm 9241-306 sollen gleichmäßig gestufte Werte, zum Beispiel 0,00, 0,25, 0,50, 0,75, 1,00 eine visuell gleichmäßig gestufte Ausgabe ergeben, siehe *pdf*-Datei AG49 mit 1080 Farben <https://standards.iso.org/iso/9241/306/ed-2/index.html>

Für Mittelgrau sind die drei Werte $rgb^* = (0,50, 0,50, 0,50)$ gleich. Die Werte sind für Primärfarben P: Rot $rgb^*_R = (0,50, 0,00, 0,00)$, Grün $rgb^*_G = (0,00, 0,50, 0,00)$, Blau $rgb^*_B = (0,00, 0,00, 0,50)$, und Cyan $rgb^*_c = (0,00, 0,50, 0,50)$, Magenta $rgb^*_M = (0,50, 0,00, 0,50)$, Gelb $rgb^*_G = (0,50, 0,50, 0,00)$.

Nach IEC 61966-2-1 (sRGB-Farbenraum) sollen die 3, 5, 9, 17 und 33 Stufen visuell gleichmäßig gestuft sein. Visuell ist die Stufung für alle Grau- und Farbreihen ähnlich.

Die Leuchtdichte von zum Beispiel Blau ist um den Faktor 10 kleiner als für Gelb. Zur farbmtrischen Beschreibung der visuell gleichmäßigen Stufung dient die *relative* Leuchtdichte L / L_P oder der *relative* Hellbezugswert Y / Y_P .

Die Prüfvorlagen dienen zur *aktuellen visuellen* Skalierung von Display- und Druckerausgaben am Arbeitsplatz. Die visuellen Daten sind sehr abhängig von der Reflexion des unbunten Umgebungslichtes auf dem Display und dem Alter des Benutzers. Mit dem Alter steigt das Streulicht in den optischen Augenmedien. Etwa 4% Reflexion reduziert den visuellen Farbraum auf 50%.

Die visuellen Daten dienen zur Berechnung der angestrebten gleichmäßig gestuften Ausgabe entsprechend der ergonomischen Norm ISO 9241-306. Arbeitsplatzrechner können die gleichmäßig gestuften Ausgaben von Farbbildern in weniger als einer Sekunde erzeugen.

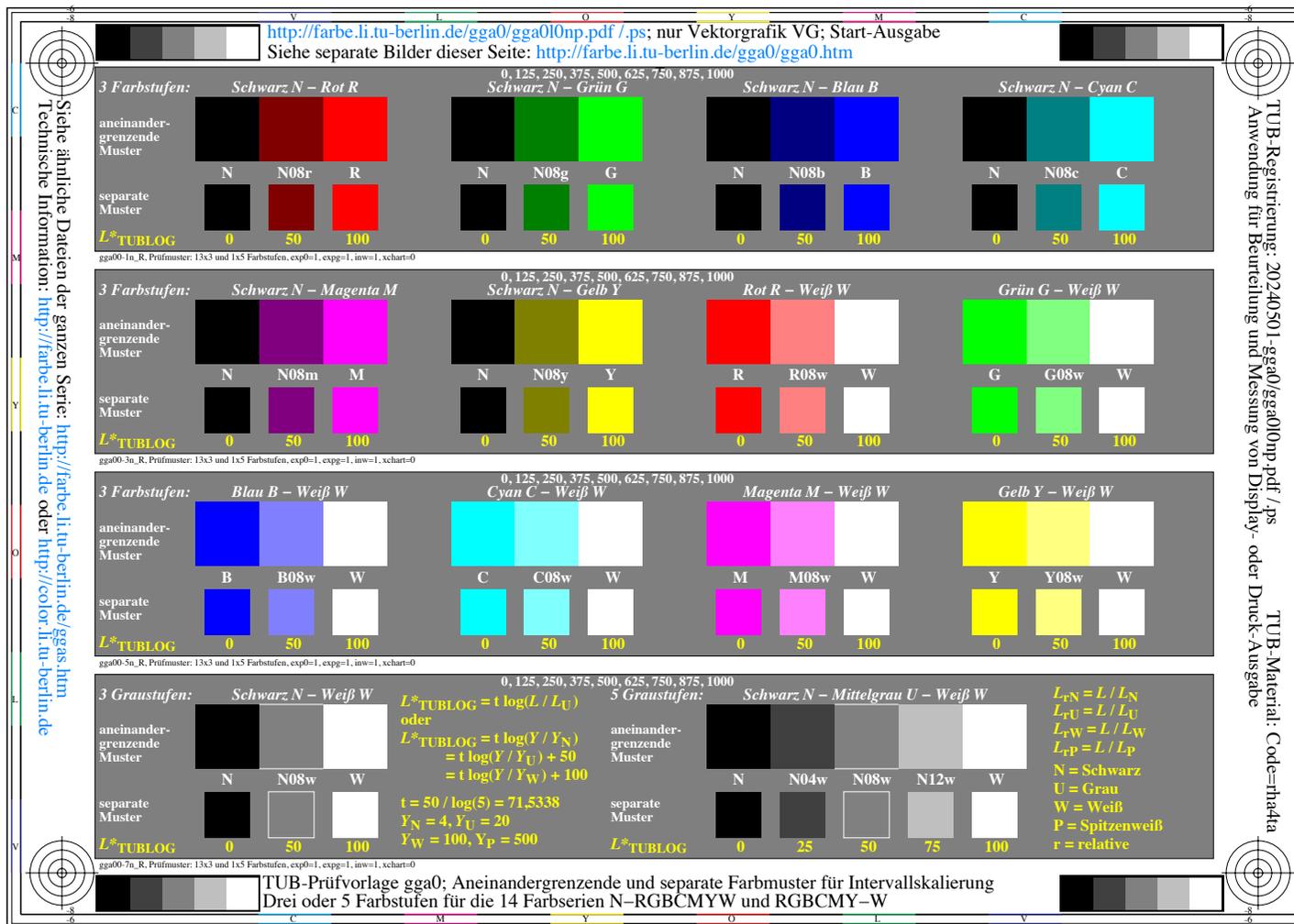


Bild 12 Farbmuster mit 3 und 5 Stufen mit gleichmäßig gestuften Dateidaten $0 \leq rgb^* \leq 1$
 Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/gga0/gga010np.pdf>.
 Visuell ist der *relative* Abstand der 3stufigen Reihen oft ähnlich. In diesem Fall arbeitet eine *Linearisierung* für graue Farben auch angenähert für alle bunten Farbskalen.

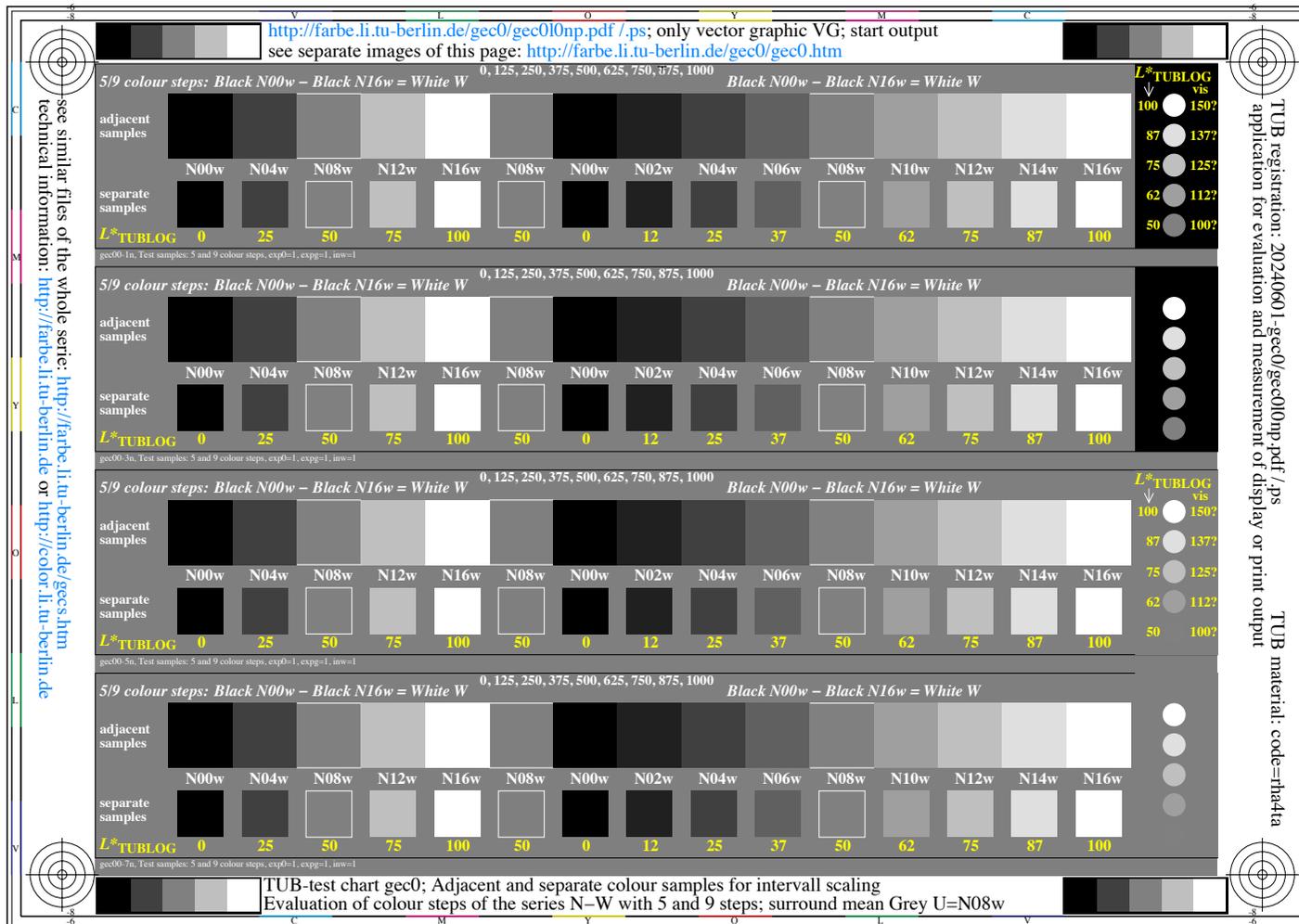


Bild 13 Graue fünf- und 9-stufige Skalen mit gleichmäßig gestuften Dateidaten $0 \leq rgb^* \leq 1$

Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/ggc0/ggc010np.pdf>

Die visuelle Intervallskalierung dient zur gleichmäßig gestuften visuellen Displayausgabe. Auch eine Gamma-Änderung mit der Software *GraphicConverter* führt oft zu diesem Ziel, siehe Richter [11].

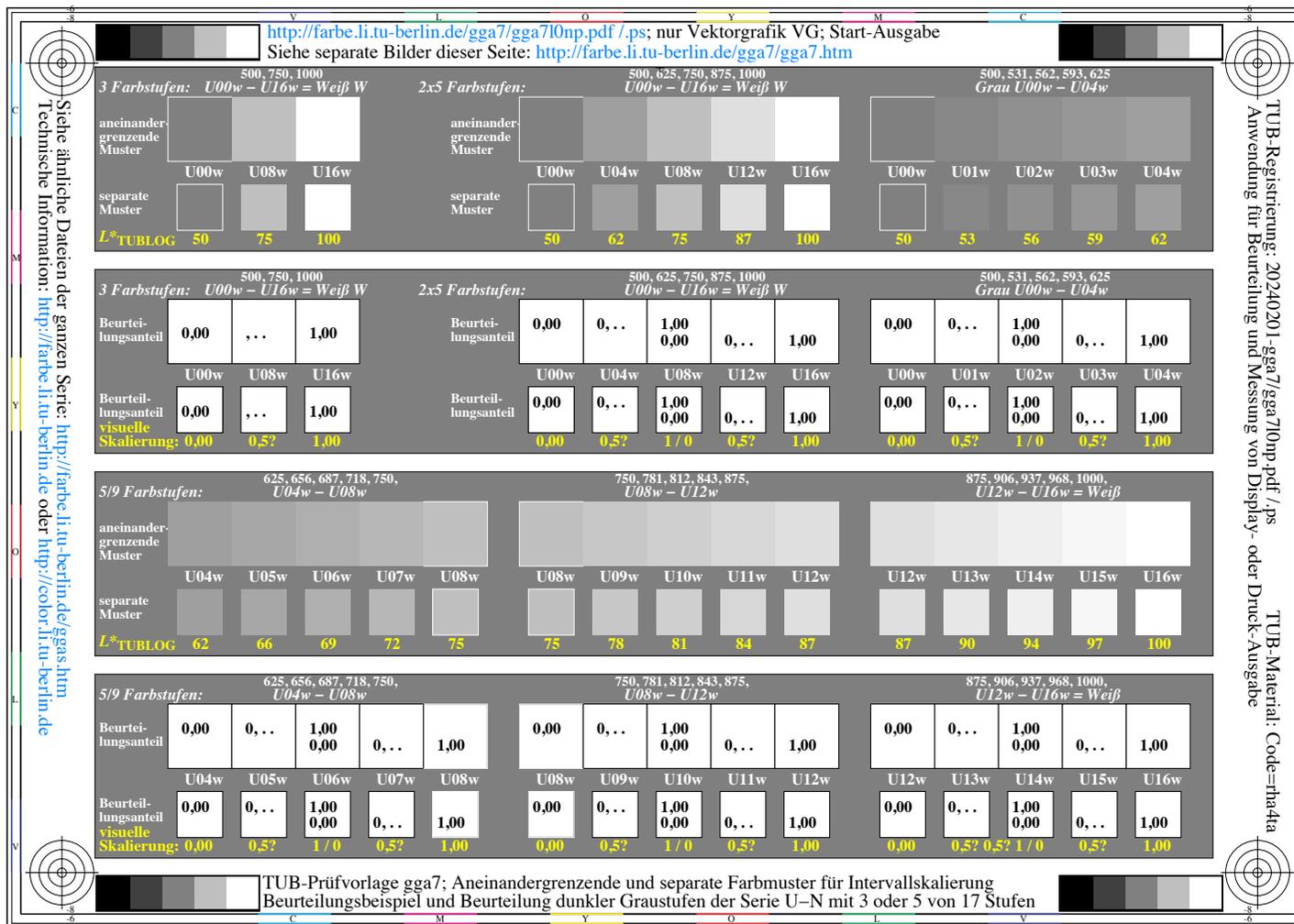


Bild 15 Hellgraue Muster, 3-, 5- & 17-stufig, mit gleichmäßig gestuften Daten $0 \leq \text{rgb}^* \leq 1$
 Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/gga7/gga710np.pdf>
 Nur hellere Graustufen zwischen Weiß W und Mittelgrau U sind enthalten. Im Bild 16 sollen die Daten für die *hellere* Graureihe zwischen mittlerem Grau U und Weiß W eingetragen werden.

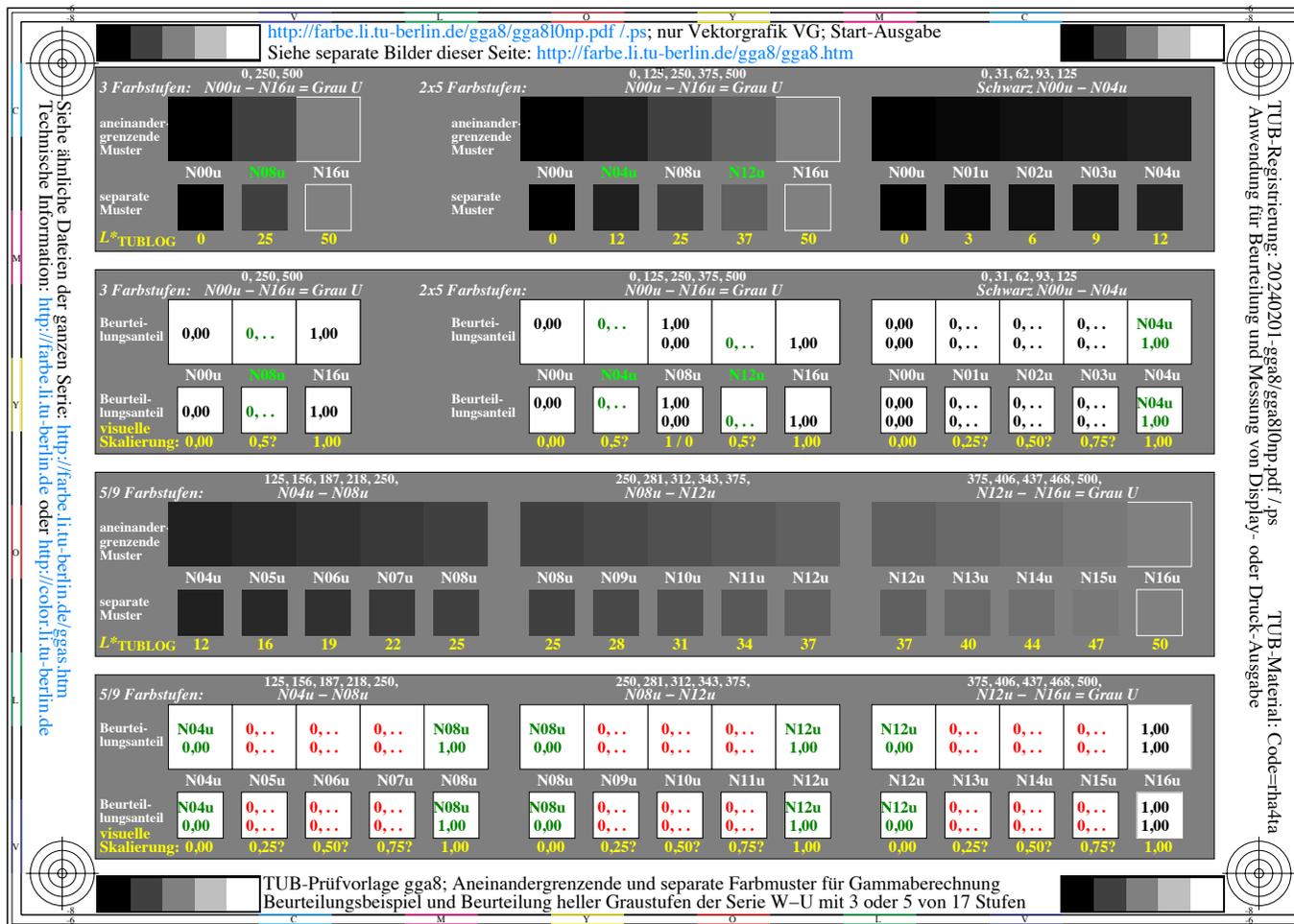


Bild 16 Dunkelgraue Muster, 3-, 5- & 17-stufig, mit gleichmäßig gestuften Daten $0 \leq \text{rgb}^* \leq 1$

Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/gga8/gga810np.pdf>

Die visuellen Daten von Bild 14 und 15 ergeben 33 Daten für die 33stufige Grauskala. Dann ist die linearisierte Displayausgabe der 33 (nahe $32=2^5$) Stufen oft eine *kontinuierliche visuelle Grauskala*.

Farbmetrische Skalierung von unbunten Farben zwischen Spitzenweiß und Schwarz. Beziehungen Hellbezugswert Y , Leuchtdichte L und Helligkeit L^* nach ISO-Normen						
Farbe (Licht oder Papier)	Norm- farbwert	HDR-Display- Leuchtdichte	relative Leuchtdichte		CIELAB _W Helligkeit	TUBLOG _U Helligkeit
Kontrast W:N (25:1=100:4)	Y ($5^{0,5}=2,24$)	L [cd/m ²]	L_{rU} = L/L_U	L_{rW} = L/L_W	$L^*_{CIELABW}$ = $c_W L_{rW}^{1/3} - 16$	$L^*_{TUBLOGU}$ = $t_U \log(L_{rU}) + 50$
Weiß P2=p00w (Licht)	500 =100*5	1000 =200*5	25 =5*5	5,00	182=50+132 = $c(5,00)^{1/3} - 16$	150=50+102 = $t \log(25,00) + 50$
Weiß p02w (Licht)	334 =100*3,34	668 =200*3,34	16,7 =5*3,3	1,00	157=50+107 = $c(3,34)^{1/3} - 16$	137=50+89 = $t \log(16,70) + 50$
Weiß p04w (Licht)	224 =100*2,24	448 =200*2,24	11,2 =5*2,2	0,45	135=50+85 = $c(2,24)^{1/3} - 16$	125=50+77 = $t \log(11,20) + 50$
Weiß p06w (Licht)	150 100*1,50	300 =200*1,5	7,5 =5*1,5	0,20	120=50+70 = $c(1,62)^{1/3} - 16$	114=50+66 = $t \log(8,10) + 50$
Weiß W=p08w (Glanzpapier)	100 =100/1	200 =200*1	5 =5*1	0,09	100=50+50 = $c(1,00)^{1/3} - 16$	100=50+52 = $t \log(5,00) + 50$
Grau U=w08n (Papier)	20 =100/5	40 =200/5	1 =5/5	0,04	51=50+1 = $c(0,20)^{1/3} - 16$	50=50+2 = $t \log(1,00) + 50$
Schwarz N=w16n (Glanzpapier)	4 =100/25	8 =200/25	0,2 =5/25	0,022	23=50-26 = $c(0,04)^{1/3} - 16$	0=50-48 = $t \log(0,20) + 50$

Es gilt: CIELAB_W: $c_W=c=116$, TUBLOG_U: $t_U=t=50/\log(5)=72$

fgw00-3n

Bild 17 CIE-Farbwert, Leuchtdichte und Helligkeit für den HDR-Kopfraum P2-W

Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/fgw0/fgw00-3n.pdf>

Für die drei Teile N-U, U-W, W-P2 unterscheiden sich die minimalen und maximalen Leuchtdichtewerte 8-40, 40-200 und 200-1000 um den Faktor 5. Eine logarithmische Helligkeitsfunktion $L^*_{TUBLOG,U}$ erzeugt für alle drei Teile den gleichen Helligkeitsbereich $\Delta L^*=50$. Der HDR-Raum benötigt 50% statt 82% für CIELAB oder für IECsRGB. *Visuelle Skalierung* mit den TUB-Prüfvorlagen in Bild 14 bis 16 erlauben die Bestimmung des *visuellen* Kopfraums, zum Beispiel nahe 20%, in realen Anwendungen.

5. Definition und Ausgabe von *pdf*-Prüfvorlagen mit HDR-*rgb**-Werten in 2 Anwendungsfällen

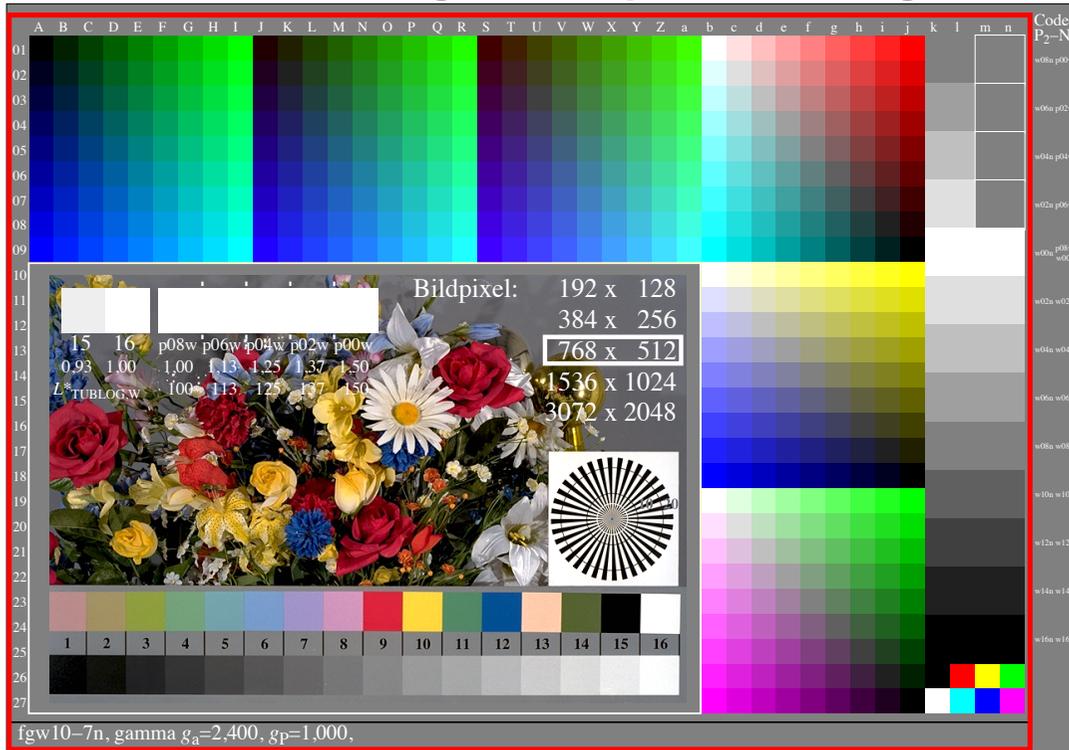


Bild 18: Ausgabe der Prüfvorlage mit Blumenbild von [1] auf SDR-Display mit Weiß W

Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/fgw1/fgw10-7n.pdf>

Die Ausgabe der *pdf*-Datei von Bild 18 erzeugt 5 weiße gleiche Muster im Bereich W-P2. In der *pdf*-Datei sind die Werte $0 \leq rgb^* \leq 1,5$ proportional zu den Helligkeitswerten $0 \leq L^*_{TUBLOG,W} \leq 150$. In *pdf*-Dateien werden alle Werte $rgb^* > 1$ standardmäßig auf den Wert 1,0 abgeschnitten. Für den gesamten Leuchtdichtebereich N-P2 können jedoch alle rgb^* -Werte der Helligkeit $L^*_{TUBLOG,W}$ bis 150 in die *pdf*-Datei aufgenommen werden. Division durch den Faktor 1,5 zeigt die 5 verschiedenen weißen Muster W-P2, siehe Bild 19. Jedoch erscheinen dann alle anderen Farben zu dunkel.

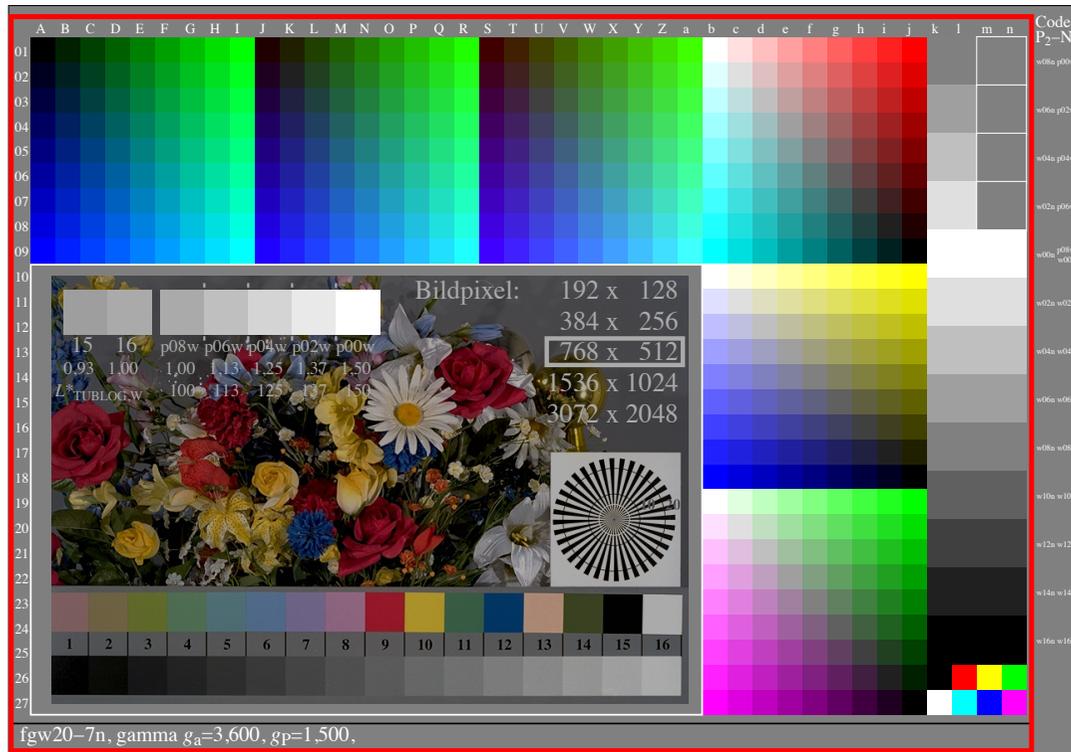


Bild 19: Ausgabe von Testchart und Blumenbild von [1] auf SDR-Display mit Weiß W

Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/fgw2/fgw20-7n.pdf>

Das Normblumenmotiv nach ISO 9241-306 sieht dunkler aus. Das Weiß $W=w00n=p08w$ entspricht in Leuchtdichte und Helligkeit der Oberflächenfarbe Weiß W der 16 Stufe. Jedoch kann man die Leuchtdichte des Displays um den Faktor 5 von 200 auf 1000 cd/m^2 erhöhen. Dann ist die Leuchtdichte des Blumenmotifs in Bild 18 und 19 gleich. Jedoch, in Bild 19 sind die 5 Stufen im Bereich W-P2 gleich gestuft wie angestrebt. Sie erscheinen nicht gleich wie in Bild 18. Werte $\text{rgb}^* \geq 1$ in pdf-Dateien werden daher vorgeschlagen, um Farben im HDR-Bereich zu visualisieren.

6. Relative farbmetrische Displayausgabe von Leuchtdichte und Farbart

Die farbmetrische Darstellung der Leuchtdichte und Farbart des Originals ist ein Hauptziel der Fotografie. Ausgehend von den ähnlichen Seheigenschaften für 100 und 1000 cd/m², siehe Bild 4 und 5, ist eine *relative* farbliche Wiedergabe der Leuchtdichte ausreichend. Die Farbart ändert sich nicht mit der Leuchtdichte.

Daher kann ein Original mit einer mittleren Leuchtdichte von 100 cd/m² durch eine Displayausgabe mit einer mittleren Leuchtdichte von 1000 cd/m² wiedergegeben werden oder umgekehrt. Die Änderung des Kontrasts ($L/\Delta L$) um den Faktor 1,2 ist im Vergleich zur Änderung der Leuchtdichte um den Faktor 10 gering. Diese geringe Änderung ist in üblichen Anwendungen kaum sichtbar.

Im ergonomischen Büro muss die Leuchtdichte des weißen Displays 142 cd/m² betragen. Für die Gründe siehe ISO 9241-306. Zum Beispiel ist die Kopfweiß-Leuchtdichte P2 mit 1000 cd/m² an Display-Arbeitsplätzen in Büros nach ISO 8995-1 nicht erlaubt.

Diese Arbeit hat nicht das diffuse Schwarz N und alle Kopfschwarz p2 (Kleinbuchstabe p) mit geringerer Leuchtdichte im Vergleich zu N diskutiert. Die Bilder 4 und 5 zeigen, dass bei *vollständiger Leuchtdichteadaptation* an das Kopfweiß P2 die folgenden visuellen Veränderungen auftreten können: W->U, U->N, N->p2. Das Kopfschwarz p2 erscheint im Vergleich zu N möglicherweise nicht schwärzer. Schwarz p2 und N erscheinen dann gleich.

Abhängig von der Display-Leuchtdichteverteilung erfolgt keine volle Adaptation an die Kopfleuchtdichte P2. Dadurch verringert sich in der Regel der W-P2-Kopfraum. Auch die oben genannte Kontrasterhöhung um den Faktor 1,2 reduziert sich.

7. Physiologische S-förmige Rezeptorerregung $F_{ab}(x_r)$ und Approximation $F^*(x_r)$

In dieser Arbeit wird die S-förmige Rezeptor-Erregungsfunktion $F_{ab}(x_r)$ als Grundlage für das TUB-Farbsehmodell verwendet.

Die Herleitung $F_{ab}(x_r)/dx$ der physiologischen S-förmigen Antwortfunktion $F_{ab}(x_r)$ erzeugt den Leuchtdichtekontrast $(L/\Delta L)$. Bei der CIE wird dieses Verhältnis auch als Kontrastempfindlichkeit bezeichnet. Das Maximum wird bei der Adaptionsleuchtdichte erreicht, siehe Verschiebungen in Bild 4 und 5. Die Integration von $(L/\Delta L) dx$ erzeugt wieder die Erregungsfunktion $F_{ab}(x_r)$ siehe Bild 1 bis 3.

Anmerkung: Wenn $L/\Delta L$ nach dem *Weber-Fechner-Gesetz* konstant ist, erzeugt diese Integration eine Funktion $G(x_r)$, die eine gerade Linie als Funktion von x_r ist, siehe gerade Linien in Bild 11.

So wird z.B. für Bürodisplays und *nur im Anwendungsbereich* die S-förmige Rezeptor-Antwortfunktion $F_{ab}(x_r)$ durch die Helligkeitsfunktion $L^*_{TUBLOG,U}=F^*(x_r)$ angenähert. Diese Funktion ist eine gerade *Linie* $F(x_r)$ als Funktion von $\log(x_r)$. Werte und ähnliche Werte von $L^*_{CIELAB,W}$ sind als Funktion von x_r angegeben, siehe Bild 9.

Außerhalb des Büro-Anwendungsbereichs erscheint die kontinuierliche Erhöhung der Helligkeit L^* durch alle Helligkeitsformeln falsch. Die nützlichere S-förmige Hyperbelbegrenzung wurde bereits durch eine Funktion beschrieben, die sehr ähnlich $\log(x_r)$ ist, siehe *Richter* (1996) [12].

Anmerkung: Die Helligkeit L^* kann nicht als Integration der Leuchtdichtedifferenzen ΔL berechnet werden. Dies wurde z.B. durch das Linienelement von *Stiles angenommen*, siehe Bild 7.

8. Leuchtdichte und Helligkeit für den SDR-Bereich und den HDR-Kopfraum

Im Vergleich zur Helligkeit L^*_{CIELAB} , die $L^*_{IECsRGB}$ sehr ähnlich ist, enthält die Helligkeit $L^*_{TUBLOG,U}$ weitere grundlegende Eigenschaften des Sehens. Zum Beispiel wird derselbe Helligkeitsbereich $\Delta L^* = 50$ zwischen N-U, U-W und W-P2 oder zwischen:

1. dem visuellen diffus Schwarz N (8 cd/m^2) und dem visuellen Mittelgrau U (40 cd/m^2),
2. dem visuellen Mittelgrau U (40 cd/m^2) und dem visuellen diffus Weiß W (200 cd/m^2),
3. dem visuellen diffus Weiß W (200 cd/m^2) und dem visuellen Kopfweiß $P2$ (1000 cd/m^2).

Innerhalb des Bereichs N-W der Büroleuchtdichte nach ISO 9241-306, siehe Bild 2, ist die Helligkeit $L^*_{TUBLOG,U}$ ähnlich der Rezeptorerregungsfunktion $F_{ab}(x_r)$. Innerhalb des Bereichs U-W ist die Helligkeit $L^*_{TUBLOG,U}$ sehr ähnlich der Helligkeit L^*_{CIELAB} .

Im HDR-Kopfraum zwischen diffusem Weiß W und Kopfweiß $P2$ und darüber gibt es eine Hyperbelbegrenzung der Rezeptorerregung $F_{ab}(x_r)$. Jedoch $L^*_{TUBLOG,U}$ und L^*_{CIELAB} bzw. $L^*_{IECsRGB}$ nehmen kontinuierlich zu. Der Bericht ITU-R BT.2390-10, Abschnitt 5.3.1, erweitert die Helligkeit $L^*_{IECsRGB}$ um eine Helligkeitsfunktion, die ebenfalls kontinuierlich zunimmt.

Bild 11 enthält 3 gerade Linien: Die gelbe gerade Linie entspricht in etwa IECsRGB oder ITU BT.709. Die grüne gerade Linie nähert sich einem niedrigeren Kontrastbereich an. Die Steigung des relativen Gammas $1/1,2 = 0,8$ ist in vielen Anwendungsfällen besser geeignet und wird z.B. im obigen ITU-Dokument und gemäß der ergonomischen Norm ISO 9241-306 und für die Displayausgabe von *Apple* bis 2007 verwendet (Gamma = $1/1,8$ statt $1/2,4$). Die 3 geraden Linien beschreiben jedoch nicht die S-förmige Erregung für den Bereich W-P2 und höher.

9. Unbunte und chromatische Prüfvorlagen für Skalierung und visuelles Gamma

Bild 11 bis 15 enthalten Prüfvorlagen, die weitere Forschungen mit 3-, 5-, 9-, 17- und 33-stufigen Farbskalen ermöglichen. Dies kann zu einer verbesserten Metrik für übliche Display-Anwendungen führen.

Zum Beispiel liefert die Auswertung der 9 Schritte in Bild 13 visuelle Daten im Bereich von 0,00 bis 1,00. Diese Datenreihe beschreibt den visuellen Gammabereich. Die Anwendung des inversen Gamma erzeugt 9 gleich gestufte Graustufen. Die Datenreihen können für den Bereich N-W und den Gesamtbereich N-P2 inklusive HDR-Kopfraum produziert werden. Beide Experimente können die Größe des HDR-Spielraums für Anwendungen definieren. Die *relativen* Unterschiede können für die aneinandergrenzenden und getrennten Graustufen gering sein.

So ändert sich beispielsweise der Kontrast ($L/\Delta L$) mit der Reflexion des Umgebungslichts auf der Displayoberfläche. Der Kontrast wird durch die 3% Standard-Displayreflexion nach ISO 9241-306 reduziert. In diesem Fall wird der Helligkeitsbereich ähnlich wie in Bild 11 durch die weißen und grünen Erregungsfunktionen $F_{ab}(x_r)$ von 100 auf 80 reduziert. Weiterhin wird der Kontrast durch das Streulicht des optischen Systems des Displaybenutzers reduziert. Das Streulicht erhöht sich mit dem Alter des Benutzers.

Reflexionsänderungen werden in ISO 22028-5 durch eine *Kinobetrachtungsbedingung* in einem schwarzen Raum ausgeschlossen. Im Vergleich zu ISO 9241-306:2009 und 2018 mit 16 verschiedenen Reflexionen in der realen Anwendung kann dieser Kinozustand als *steinzeitlicher Zustand* der Bildtechnik bezeichnet werden. Der beabsichtigte ISO-Benutzervorteil in realen Anwendungsfällen von Standbildern ist nicht klar und bedarf weiterer Erläuterungen.

10. Nutzerwunsch *gleiche relative Stufung* als Grundlage für Kennzeichnung der *Bildqualität*

Es scheint, dass eine Lösung der vielen Benutzerwünschen für verschiedene Anwendungen und Anwendungsfälle durch eine *globale* Software nicht möglich ist. *Lokale* Lösungen sind am Display-Arbeitsplatz mit dem Benutzer und für den Benutzer erforderlich. Lösungen sind z.B. durch Gammakorrekturen mit der Software *GammaAdjuster* und *GraphicConverter* möglich. Als Alternative wird das experimentelle *Gamma visuell bestimmt* und das inverse Gamma kann angewendet werden. Anwendungen mit den TUB-Prüfvorlagen in Bild 11 bis 16 werden in einer Veröffentlichung von *Richter* (2024) [11] beschrieben.

ISO 22028-5 und die meisten ITU-Dokumente vernachlässigen die beiden Änderungen von Kontrast und Farbabstufung. Beide Veränderungen können groß sein und beruhen auf mehr oder weniger Displayreflexion des Umgebungslichts sowie auf den Streulichtveränderungen des Displaybeobachters mit zunehmendem Alter.

ISO/IEC 15775 definiert einen *Regularitätsindex* g^* , der 100 beträgt, wenn eine originale *relative* Farbstufung mit gleichen Abständen in der Reproduktion gleich gestuft bleibt, z. B. durch einen Kopierer. Die Bildqualität beträgt 100, wenn die 16 Graumuster des Blumenmotivs in Bild 18 und 19 mit den 16 Helligkeitswerten $L^*_{\text{CIELAB}} = 20, 25, \dots, 90, 95$ in der Wiedergabe *relativ* gleichmäßig gestuft bleiben.

In Anwendungen ergeben sich verschiedene Helligkeitsbereiche $L^*_{\text{max}} - L^*_{\text{min}}$. Wenn jedoch zwei Stufen der Graureihe nicht unterscheidbar sind, dann hat der Regularitätsindex den Wert $g^*=0$. Die *Bildqualität* ist sehr reduziert, da in der Regel wichtige Informationen fehlen. Ohne Umgebungsreflexion liegt der CIELAB-Helligkeitsbereich zwischen 0 und 100. Für 16 Stufen

betragen die Zielwerte $L^*_{\text{CIELAB}} = 0, 7, 13, \dots, 93$ und 100. Die Standardreflexion von 4 % reduziert jedoch den CIELAB-Bereich auf 80%. Der Regularitätsindex erniedrigt sich von $g^*=100$ auf $g^*=70$. Eine Gammakorrektur kann jedoch wieder einen größeren Wert erzeugen, zum Beispiel $g^*=95$.

ISO 22028-5 sieht als Standardausgabe eine *angenehme (pleasant)* Bildausgabe vor. Es gibt jedoch keine Definition von *angenehm (pleasant)* in ISO 22028-5. Jeder Hersteller kann ein anderes Ziel anstreben. Jedes Ziel ist dann in Übereinstimmung mit ISO 22028-5. Dieser Fehler könnte im Konflikt mit dem Ziel ISO-Benutzervorteil (user benefit) jeder Normung sein

Der Anwendernutzen der ISO 22028-5 kann sich erhöhen, wenn die farbmétrische Ausgabe von *relativer* Leuchtdichte und Farbart als Standardausgabe definiert ist.

Die Bildqualität sollte durch den Regelmäßigkeitsindex g^* nach ISO/IEC 15775, Anhang G, gekennzeichnet werden. Es muss berücksichtigt werden, dass die Bildqualität beispielsweise mit der Umgebungsreflexion abnimmt. Die Anwendung eines farbmétrischen oder visuellen Gammas erhöht jedoch wieder den Regularitätsindex g^* , der die *Bildqualität* kennzeichnet.

Daher zeigen die obigen Ergebnisse, dass die relative Leuchtdichte der Szene um einen bestimmten Betrag geändert werden muss, damit die Displayausgabe eine hohe *Bildqualität erreicht*.

Verschiedene Ausgabemodifikationen, z. B. heller oder dunkler und mehr oder weniger chromatisch, können für eine *angenehme Bildausgabe spezifiziert werden*. Softwaretools können diese Änderungen zulassen.

11. Diskussion der Ergebnisse sowie Vorteile und Nachteile

Die farbmimetrische Darstellung der Leuchtdichte und Farbart des Originals ist ein Hauptziel der Fotografie. In der Regel ist eine *relative* farbmimetrische Wiedergabe der Leuchtdichte ausreichend. Die Farbart ändert sich nicht mit der Leuchtdichte. Jedoch mit zunehmender Displayreflexion der Umgebungslichtes ändert sich auch die Farbart.

Ein weiteres Hauptziel ist *der gleiche relative Stufung* im Vergleich zum Original. Andernfalls fehlen wichtige Informationen. Zur Beschreibung der *Bildqualität* wird der *Regularitätsindex* g^* nach ISO/IEC 15775, Anhang G, vorgeschlagen.

In dieser Arbeit wird die S-förmige Rezeptor-Erregungsfunktion $F_{ab}(x_r)$ als Grundlage für das TUB-Farbsehmodell verwendet. Die Ableitung $F_{ab}(x_r)/dx$ der physiologischen S-förmigen Erregungsfunktion $F_{ab}(x_r)$ erzeugt den Leuchtdichtekontrast $(L/\Delta L)$. Die Integration von $(L/\Delta L) dx$ erzeugt wieder die Erregungsfunktion $F_{ab}(x_r)$, siehe Bild 1 bis 3.

Zwischen dem Displayweiß W und dem Kopfweiß $P2$ und höher erhöhen sich die Helligkeitsfunktionen $L^*_{TUBLOG,U}$ und L^*_{CIELAB} bzw. $L^*_{IECsRGB}$ kontinuierlich. Die S-förmige Rezeptorerregungsfunktion $F_{ab}(x_r)$ ist jedoch durch eine Hyperbelfunktion begrenzt. Der HDR-Kopfraum könnte visuell 20% durch eine visuell definierte Hyperpelfunktion betragen. Daher kann dieser Anstieg sehr begrenzt sein im Vergleich zu 82 % (CIELAB) und 72% (ISO 22028-5), siehe Bild 9.

Bild 17 verwendet als Beispiel die TUB-Prüfvorlagen von Bild 12 bis 16 zur Skalierung. Für die Kodierung der Helligkeit kann man $L^*_{TUBLOG,U}$ im Bereich $0 \leq L^* \leq 150$ verwenden.

Diese Werte von L^* können in *PDF-Dateien* der Bilder dieser Arbeit eingefügt werden. Man kann die *pdf-Dateien* mit *Photoshop importieren* und die Dateien für eine gleichmäßige visuelle Skalierung bearbeiten. Diese Skalierung hängt z.B. von der Umgebungsreflexion und dem Beobachter ab.

Anmerkung: ISO 22028-5 scheint *pdf-Dateien* und die Übertragung des SDR-Bereichs in den HDR-Bereich und umgekehrt durch *pdf-Dateien* nicht zu berücksichtigen.

Für eine breite Anwendung müssen die Dateiformate der ISO 22028-5 eine klare Verbindung zu den *pdf-Dateien* und Bildern des SDR-Bereichs aufweisen

12. Literatur

[1] ISO 9241-306:2018, Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 306: Vor-Ort-Bewertungsverfahren für elektronische optische Anzeigen, siehe zum Herunterladen der Prüfvorlagen mit Benutzerfragen für eine ergonomische Ausgabe auf Displays,

<https://standards.iso.org/iso/9241/306/ed-2/index.html>

[2] ISO/IEC 15775/ed-2:2022, Informationstechnik - Büro- und Datentechnik - Verfahren zur Kennzeichnung der Bildwiedergabe von Farbkopierern und Multifunktionsgeräten mit Kopierfunktionen durch gedruckte Testvorlagen, siehe zum Herunterladen der Prüfvorlagen mit Benutzerfragen für nachhaltige Kopierer. Die Prüfvorlagen von [1] und [2] sind ähnlich, siehe

<https://standards.iso.org/iso-iec/15775/ed-2/en>

[3] ISO/TS 22028-5:2023 Fotografie und grafische Technologie - Erweiterte Farbräume für die Speicherung, Bearbeitung und den Austausch digitaler Bilder - Teil 5: High dynamic range und wide colour gamut encoding für Stehbild (HDR/WCG)

[4] Richter, Klaus (2013), Ausgabelinearisierungsmethoden für Displays, Drucker und Offsetdruck (63 Seiten, 1,4 MB, Format A4), siehe http://farbe.li.tu-berlin.de/OUTLIN13_02.PDF

[5] CIE 15, Farbmeterik

[6] IEC 61966-2-1, Multimediasysteme und -geräte - Farbmessung und -management - Teil 2-1: Farbmanagement - Standard-RGB-Farbraum - sRGB.

[7] ISO 8995-1:2002 Beleuchtung am Arbeitsplatz – Teil 1: Innenraum

[8] *Richter, Klaus (2019), Farbmétrisches Scannen, Anzeigen und Drucken für die Archivierung basierend auf der ergonomischen internationalen Norm ISO 9241-306:2018 an Arbeitsplätzen, Proc. IS&T Archiving 2019, S. 111-112, siehe für kostenlosen pdf-Download <https://doi.org/10.2352/issn.2168-3204.2019.1.0.25>*

[9] *Richter, Klaus (2024), siehe verschiedene Arbeiten insbesondere seit 2020 unter dem Link <http://farbe.li.tu-berlin.de/XY91FDE.html>*

[10] DIN 33872-1 bis 6:2010, Informationstechnik - Büro- und Datentechnik - Verfahren zur Kennzeichnung der relativen Farbwiedergabe mit JA/NEIN Kriterien -
Teil 1: Einteilung, Begriffe und Grundlagen, nur auf CD-ROM,
Teil 2 bis 6: Prüfdateien für Ausgabeeigenschaften,
Teil 2: Prüfung der Unterscheidbarkeit der 5- und 16-stufigen Farbreihen,
Teil 3: Prüfung der Gleichheit für vier äquivalente Graudefinitionen und Unterscheidbarkeit der 16 Graustufen,
Teil 4: Prüfung der Gleichheit für zwei äquivalente Farbdefinitionen mit 5- und 16-stufigen Farbreihen,

Teil 5: Prüfung der Elementarbunton-Übereinstimmung und der Bunton-Unterscheidbarkeit,
Teil 6: Prüfung der äquivalenten Stufung und der regulären chromatischen Stufung,
siehe zum Herunterladen von Prüfvorlagen <http://farbe.li.tu-berlin.de/A/33872.html>

[11] *Richter, Klaus* (2024) Frame File Colour Management (FF_CM) für die ergonomische Display-Ausgabe von SDR- und HDR-*rgb**-Bildern auf SDR- und HDR-Displays, siehe für das kostenlose pdf-Herunterladen <http://farbe.li.tu-berlin.de/disgam24g.pdf>

[12] *Richter, Klaus* (1996), Computergrafik und Farbmeterik – Farbsysteme, *PostScript* und geräteunabhängige CIE-Farben, 228 Seiten, siehe zumindest Bilder zu Skalierungs- und Antwortfunktionen auf den Seiten 104 bis 127, siehe (8,7 MB)
<http://farbe.li.tu-berlin.de/BUCHAF.PDF>

Anhang – Urheberrecht

Für freies Urheberrecht siehe:

<http://farbe.li.tu-berlin.de/CGV1/CGV10-3N.PDF>

Danksagung

Für die Diskussionen und Vorschläge zur inhaltlichen Optimierung dieser Veröffentlichung danke ich:
Detlef Ruschin, deutscher Vertreter in der CIE Div. 1 "Vision and Colour", und
Prof. Florian Suessl, deutscher Vertreter in der CIE Div. 8 "Image Technology".