

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

Prof. Dr. Klaus Richter, Technische Universität Berlin (TUB), Sektion Lichttechnik, 2024-10-01

Zum Herunterladen von Veröffentlichungen und Bildern wird als Start der folgende Link empfohlen:

<https://farbe.li.tu-berlin.de/index.html>. In der Regel arbeiten alle Links auf der TUB-Webseite wie angestrebt. Einige Webbrowser ändern in Links die Groß- in Kleinbuchstaben oder leiten die Links zum Web-Archiveserver um. Dies führt zu Fehlermeldungen, falls z. B. die folgenden Links in die Startseite einiger Webbrowser kopiert werden.

<http://farbe.li.tu-berlin.de/dissca25d.pdf> auf deutsch oder <http://color.li.tu-berlin.de/dissca25e.pdf> auf englisch

oder https://web.archive.org/web/*/http://farbe.li.tu-berlin.de/dissca25d.pdf

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

Inhalt

1. Einleitung
2. TUB-Modell achromatischer physiologischer Erregungen und psychophysische Daten
3. Definition und Ausgabe von pdf -Prüfvorlagen mit HDR- rgb^* -Werten in 2 Anwendungsfällen
4. CIELAB, IECsRGB und TUBJND: $\ln(L^*_{CIELAB})$ -Zusammenhang mit physiologischer Erregung
5. Visuelle Intervallskalierung und gleichabständige 9stufige Graugabe mit inversen Daten
6. Gleichabständige 9stufige Farbausgabe (1080 Farben, ISO 9241-306) mit inversen Daten
7. Diskussion der Ergebnisse mit Modell zur Beschreibung der Farberscheinung
8. Literatur

Anmerkung: Diese Arbeit enthält Teile der bisherigen TUB-Veröffentlichung dislum25d.pdf (siehe oben). Die vorliegende neue Arbeit wird den Namen dissca25.pdf im Internet erhalten.

Die Abschnitte 4 bis 6 enthalten neue Forschungsergebnisse. Zum Beispiel gilt angenähert:

$\ln(L^*_{CIELAB} / L^*_{CIELAB,u}) = \log(Y/Y_u)$ oder $L^*_{CIELAB,u} = e^x$ mit $x = \log(Y/Y_u)$, vergleiche $F_{ab}(x)$ in Bild 1 und in Abschnitten 4 und 7: $L^{**}_{CIELAB,u} = (e^x - e^{-x}) / (e^x + e^{-x})$ für die Farberscheinung.

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).

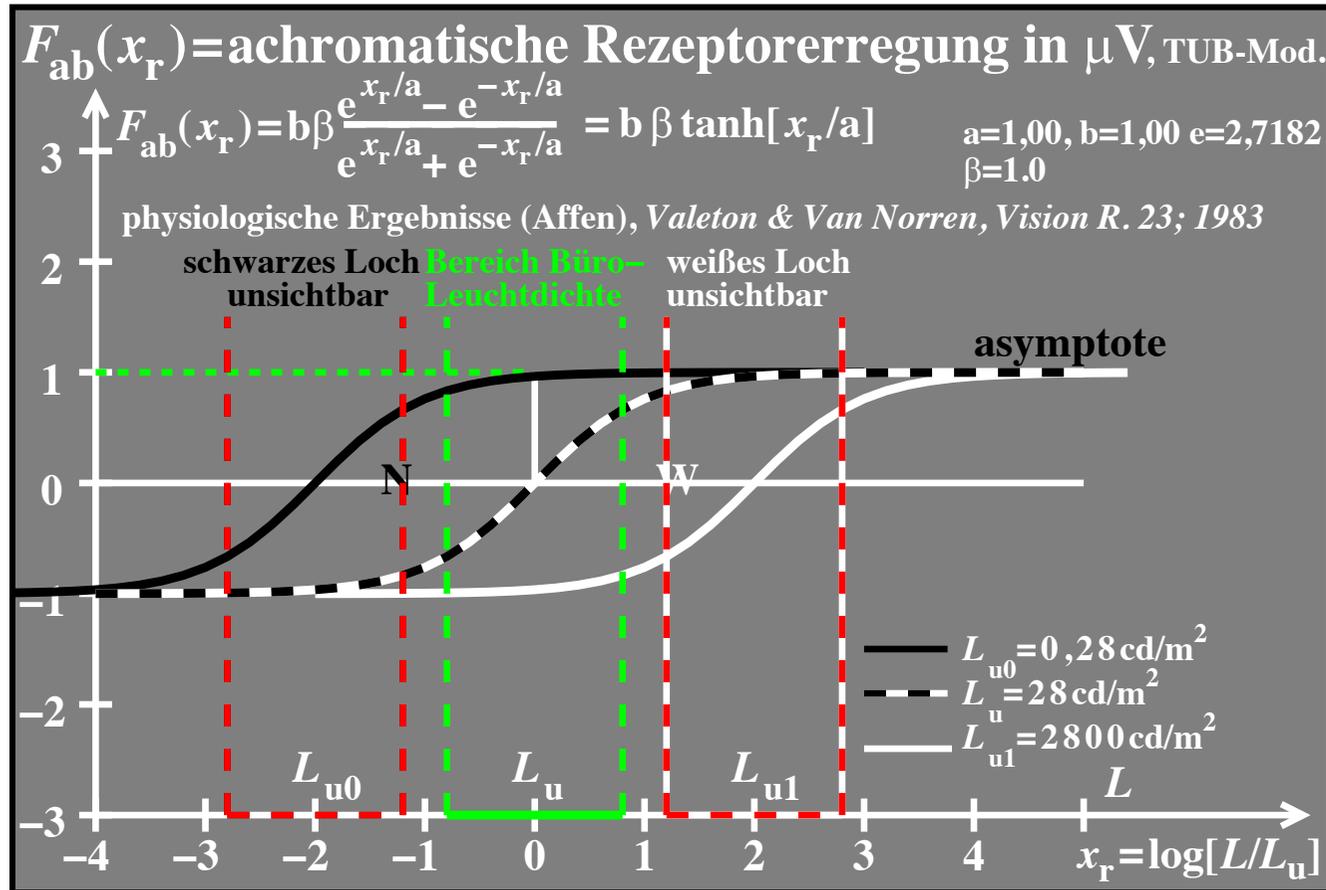
Die analoge Fotografie benutzt mindestens 4 logarithmische Leuchtdichteinheiten. Im Negativfilm wurde die Leuchtdichte als Dichte kodiert, die proportional zur logarithmischen Leuchtdichte ist. Auch die vorliegende Digitalfotografie kann mindestens 4 logarithmische Leuchtdichteinheiten speichern. Darüber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

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

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

Bild 1 zeigt eine Annäherung der visuellen Erregungen von Affen durch eine Hyperbelfunktion. Die Literatur ist im Bild angegeben. Die visuellen Erregungen liegen immer im Bereich von -1 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



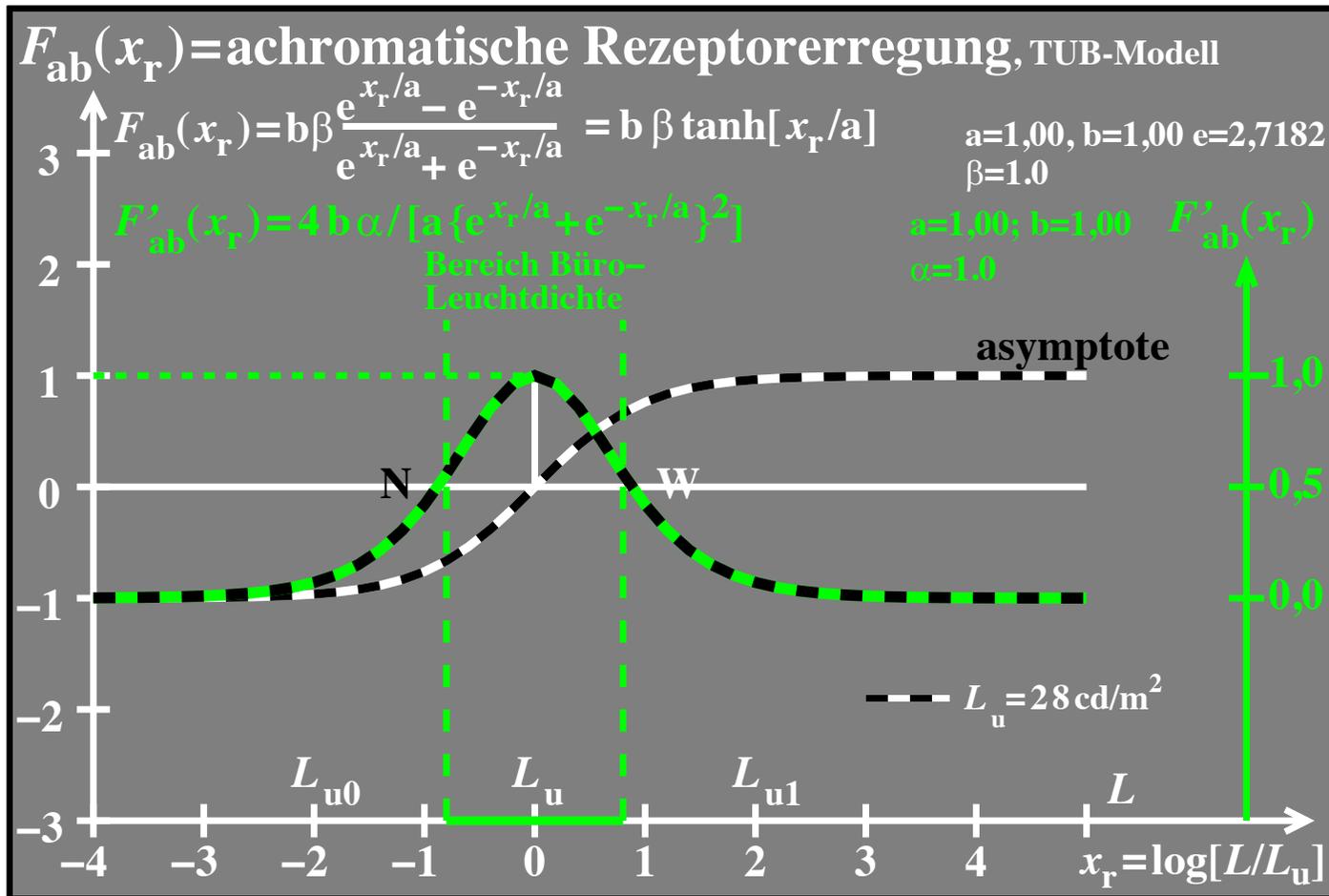
egg00-1n, eeg40-7n

Bild 1 Physiologische Erregungskurven von Affen für drei Adaptationsstufen

Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/egg0/egg00-1n.pdf>

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

Gezeigt werden die Muster Schwarz N, Grau U und Weiß W in dem Bereich der Büro-Leuchtdichte.



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*

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

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

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

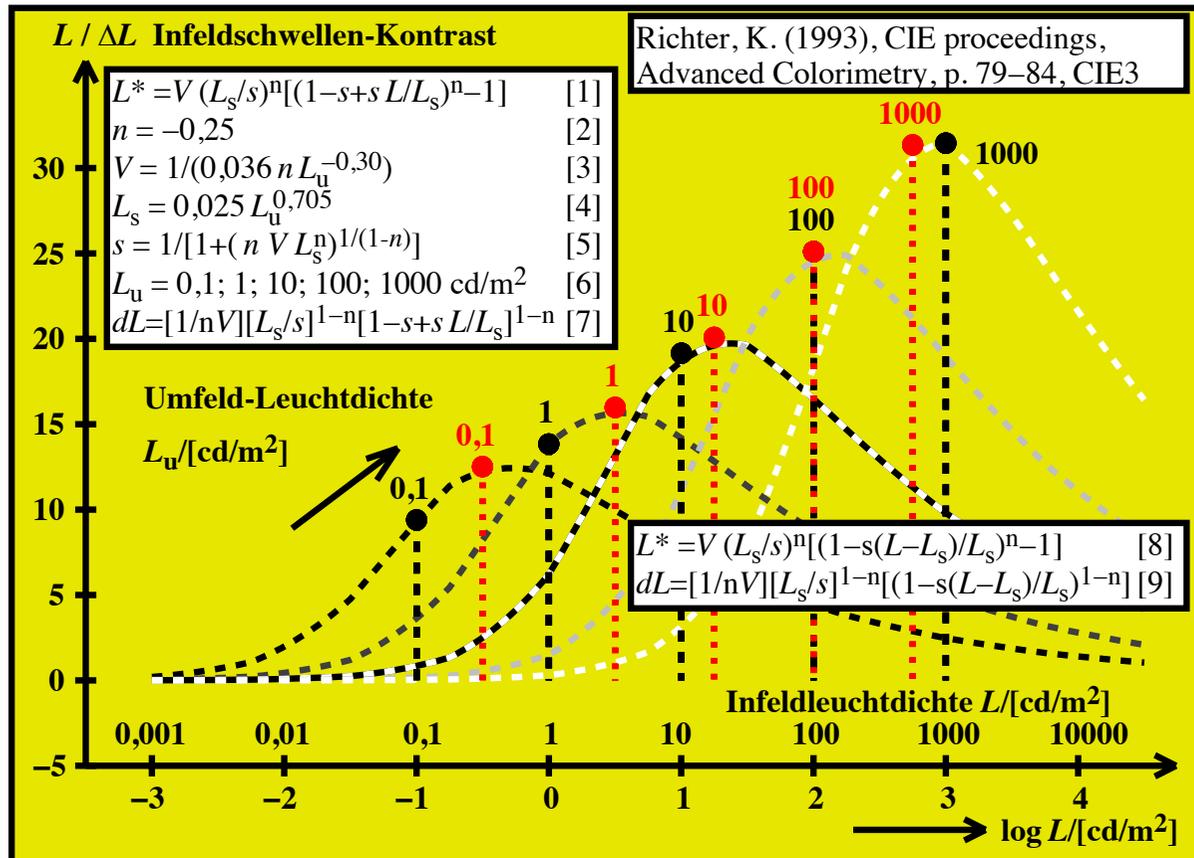
$$\frac{L}{dL} = \frac{4b \ln(10)}{a[e^{x_r/a} + e^{-x_r/a}]^2} \quad dL = \frac{a[e^{x_r/a} + e^{-x_r/a}]^2 L}{4b \ln(10)} \quad [7]$$

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.

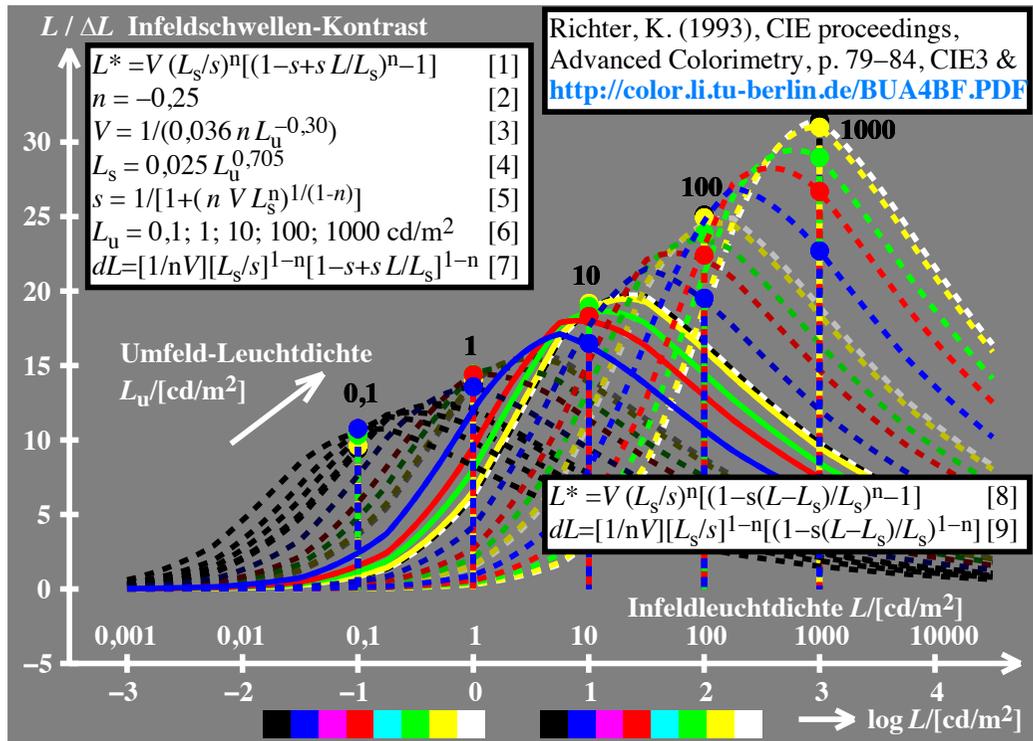


egs01-2n, ees10-2a

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 nimmt der Kontrast um etwa 10% z. Dies könnte in den meisten Anwendungen nicht sichtbar sein.



egs90-2a

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.

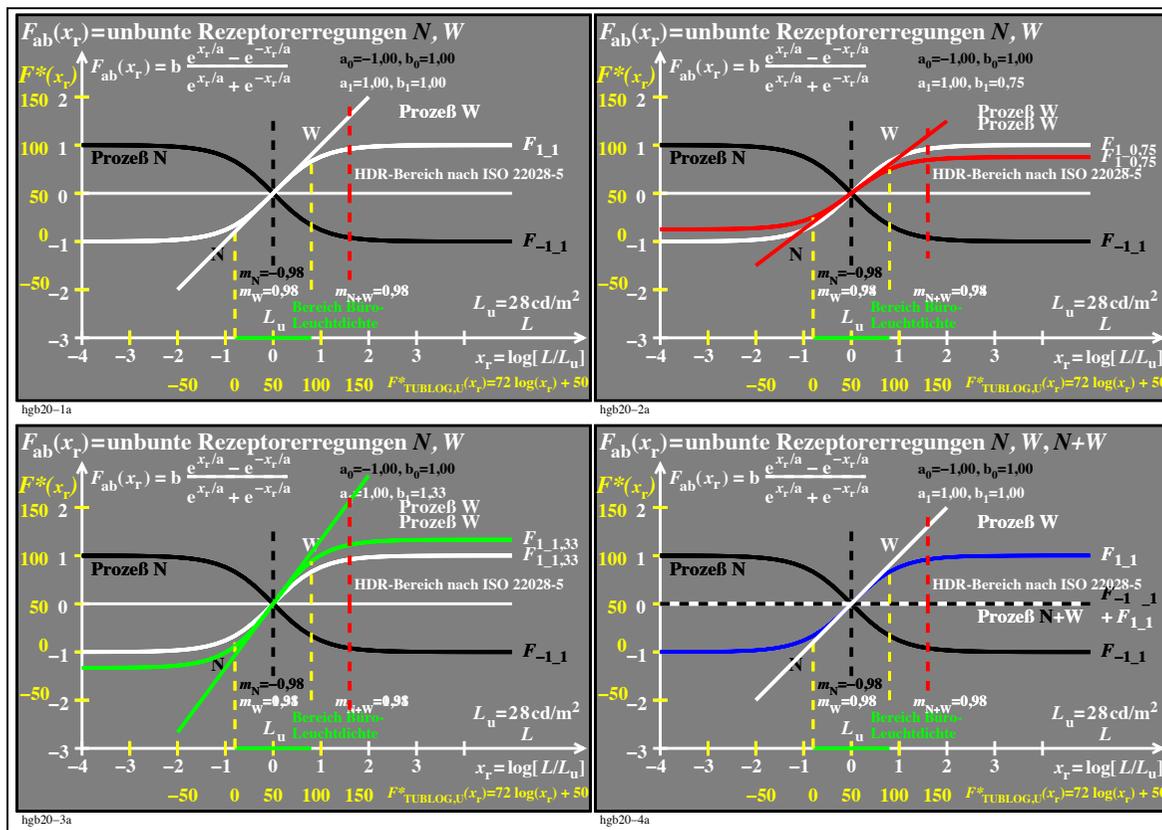


Bild 6 Modell physiologischer Erregungsfunktionen mit zwei Parametern a und b

Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/hgb2/hgb20-3n.pdf>

Für die *relative* Erregung gilt $\log(L/L_u) = 0$. Der Parameter b ändert den Kontrast zwischen W und N . Für $b=3/4$ (*rot*) ist der Kontrast kleiner und für $b=4/3$ (*grün*) ist er größer im Vergleich zu $b=1$ (*weiß*). Entsprechend ist die Steigung kleiner und größer im Vergleich zu $b=1$. Für den HDR-Bereich gilt $90 \leq Y \leq 450$, siehe weiße und rote senkrechte gestrichelte Linie. In der Bildtechnologie beschreiben die Werte $0 \leq \text{rgb}^* \leq 1$ die Helligkeiten zwischen N und W . Für den HDR-Bereich ist $\text{rgb}^* > 1$.

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

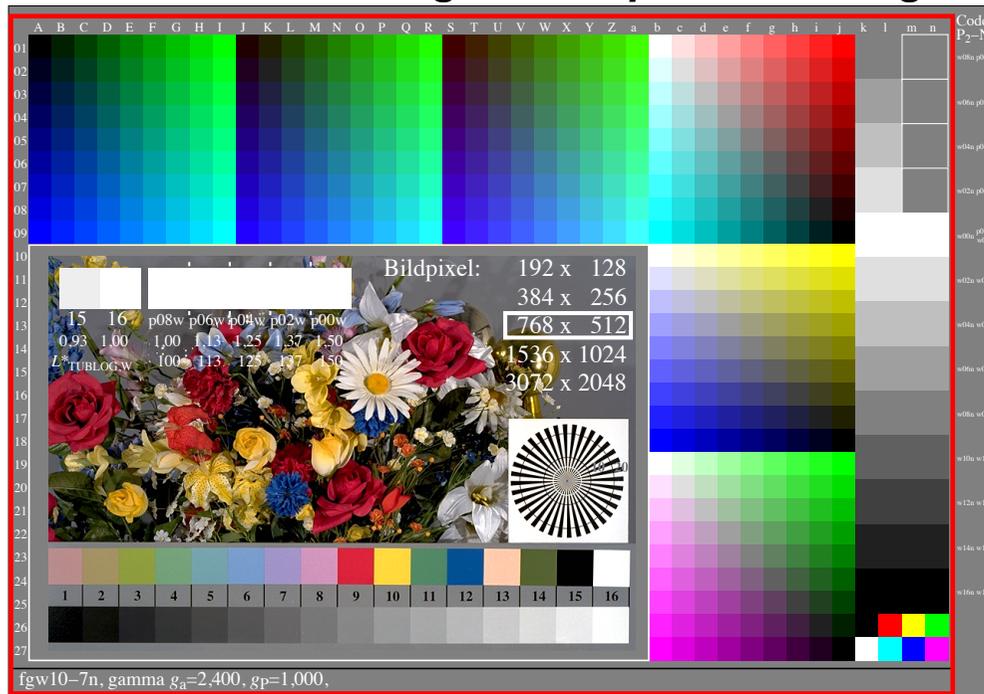


Bild 7: Ausgabe der Prüfvorlage mit Blumenbild von [1] auf SDR-Display mit Weiß *W*

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

Die Ausgabe der *pdf*-Datei von Bild 7 erzeugt 5 weiße gleiche Muster im Bereich Diffußweiß (*W*) bis Spitzenweiß (*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 $rgb^* \geq 1$ standardmäßig auf den Wert 1,0 abgeschnitten. Für den gesamten Leuchtdichtebereich Diffußschwarz *N* bis Spitzenweiß *P2* können jedoch alle *rgb**-Werte der Helligkeit $L^*_{TUBLOG,W}$ bis 150 in die *pdf*-Datei aufgenommen werden. Division der *rgb**-Daten durch den Faktor 1,5 zeigt auch die 5 verschiedenen weißen Muster *W-P2*, siehe Bild 8. Jedoch erscheinen dann alle anderen Farben zu dunkel.

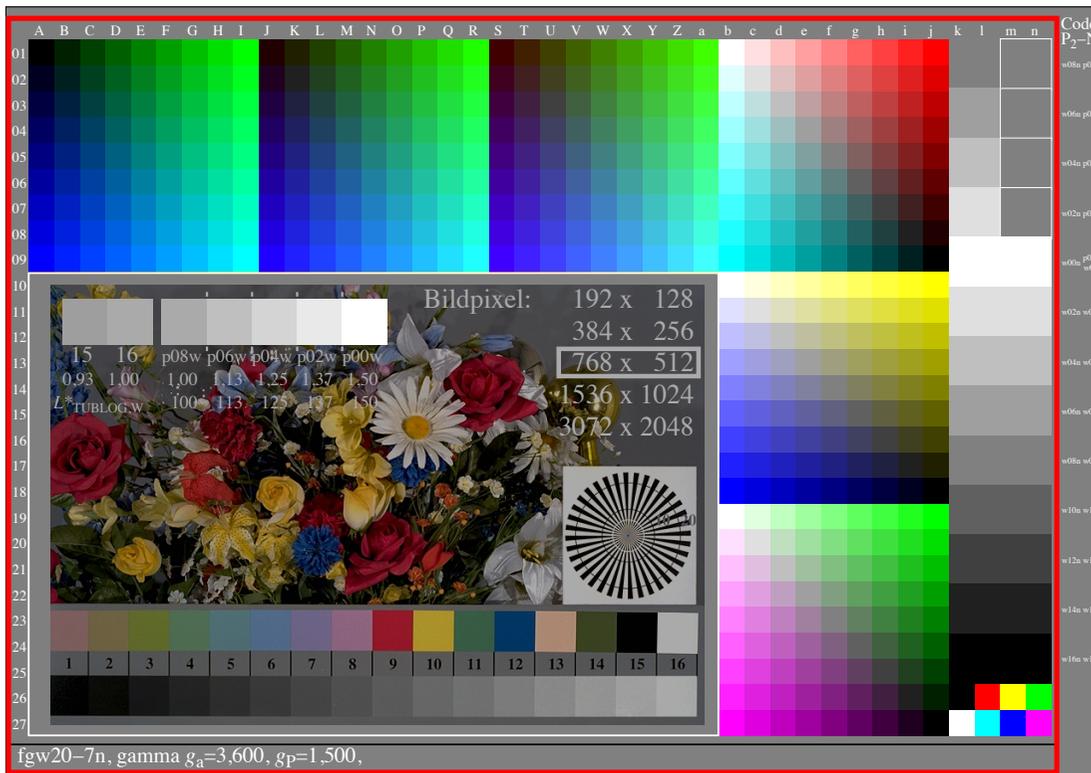


Bild 8: Ausgabe von Testchart und Blumenbild von [1] auf SDR-Display mit Weiß W

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 Stufe 16. Jedoch kann man die Leuchtdichte des Displays um den Faktor 5 von 200 auf 1000 cd/m² erhöhen. Dann ist die Leuchtdichte des Blumenmotivs in Bild 7 und 8 gleich. Jedoch, in Bild 8 sind die 5 Stufen im Bereich W-P2 gleich gestuft wie angestrebt. Sie erscheinen nicht gleich wie in Bild 7. Werte $rgb^* \geq 1$ in pdf-Dateien werden daher verwendet, um Farben im HDR-Bereich zu speichern und zu visualisieren.

4. CIELAB, IECsRGB und TUBJND: $\ln(L^*_{CIELAB})$ -Zusammenhang mit physiologischer Erregung

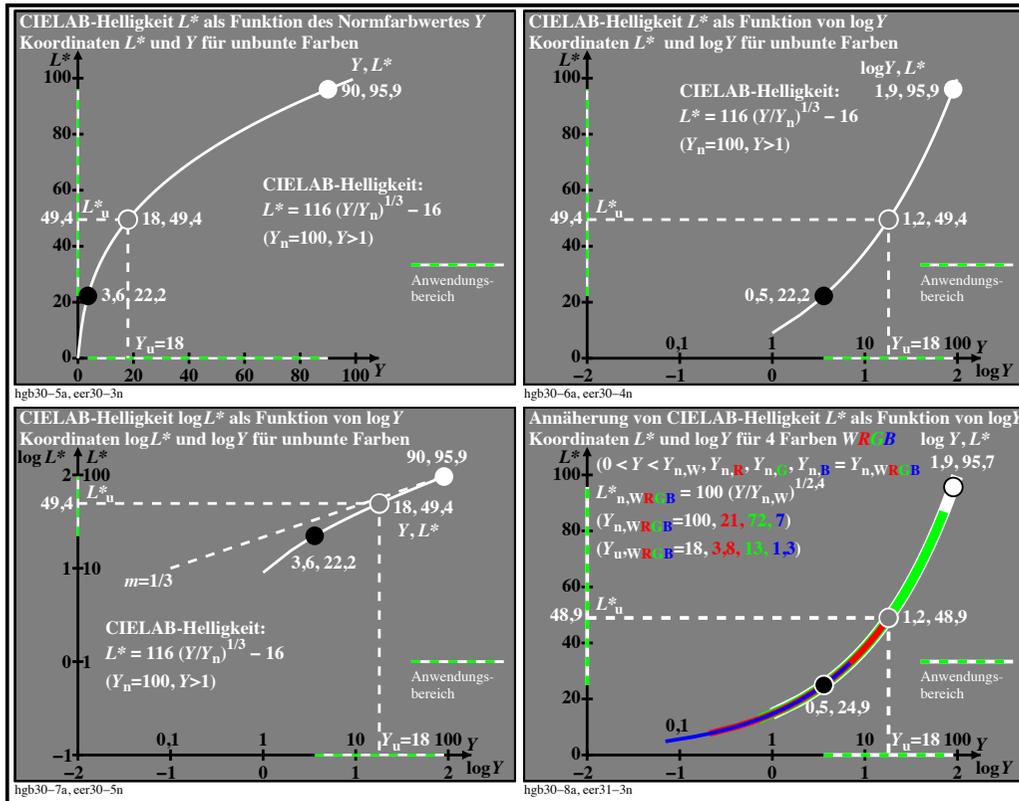


Bild 9: Helligkeit L^*_{CIELAB} und Hellbezugswert Y auf linearen und logarithmischen Achsen

Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/hdb3/hgb30-7n.pdf>

Bild 9 enthält vier Teilbilder mit linearen und logarithmischen Koordinaten auf der x- und y-Achse. Von besonderem farbmatischem Interesse ist die Ausgabe $\log L^*_{CIELAB}$ als Funktion von $\log Y$ unten links. Die Steigung ist $1/3$ bei Weiß W ($Y_w=90$) und $1/2,4$ bei Mittelgrau U ($Y_u=18$). Die Steigung $1/2,4$ wird in IEC 61966-2-1 (sRGB-Farbenraum) zur Definition der Helligkeit $T^*_{IECsRGB}$ verwendet. Die Bilder oben und unten rechts zeigen L^*_{CIELAB} für die vier Bildschirmfarben W und sRGB.

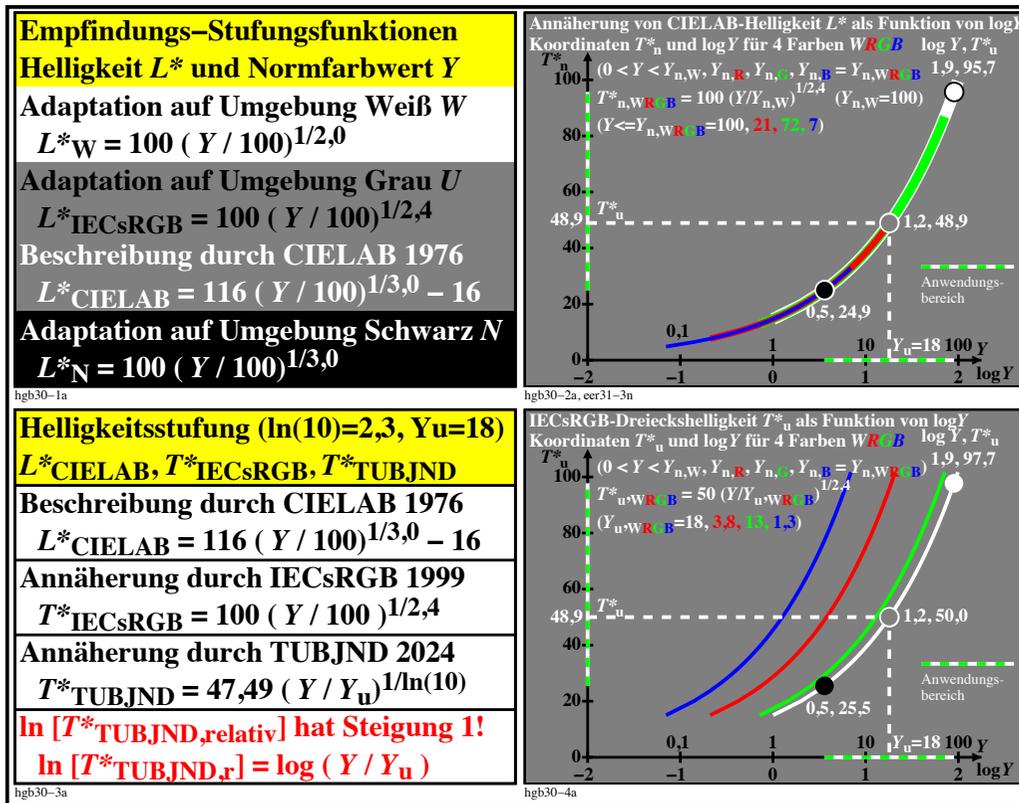


Bild 10: Vergleich der Helligkeitswerte L^*_{CIELAB} , $T^*_{IECsRGBn}$ und $T^*_{TUBJNDu}$

Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/hgh3/hgh30-3n.pdf>

Die Helligkeit L^*_{CIELAB} wird aus den *relativen* Hellbezugswerten Y/Y_n mit $Y_n=100$ für Weiß und dem Exponenten $1/3$ berechnet. Die Helligkeiten $T^*_{IECsRGBn}$ und $T^*_{TUBJNDu}$ verwenden die relativen Hellbezugswerte Y/Y_{sRGB} und einen Exponenten nahe $1/2,4$. Wenn man in Bild 9 (unten links) den *natürlichen* Logarithmus \ln anstelle von \log verwendet, so ergibt sich wegen $\ln a = \ln(10) \log a = 2,30 \log a$ die Steigung 1. Damit ergibt sich für die Helligkeit folgende Gleichung $T^*_{TUBJNDr} = e^{(X_r)}$ mit $x_r = (Y / Y_u)$. Dies gilt für einen weiten Bereich von Schwarz N bis Weiß W um Mittelgrau U mit $Y_u=18$.

5. Visuelle Intervallskalierung und gleichabständige 9stufige Graugabe mit inversen Daten

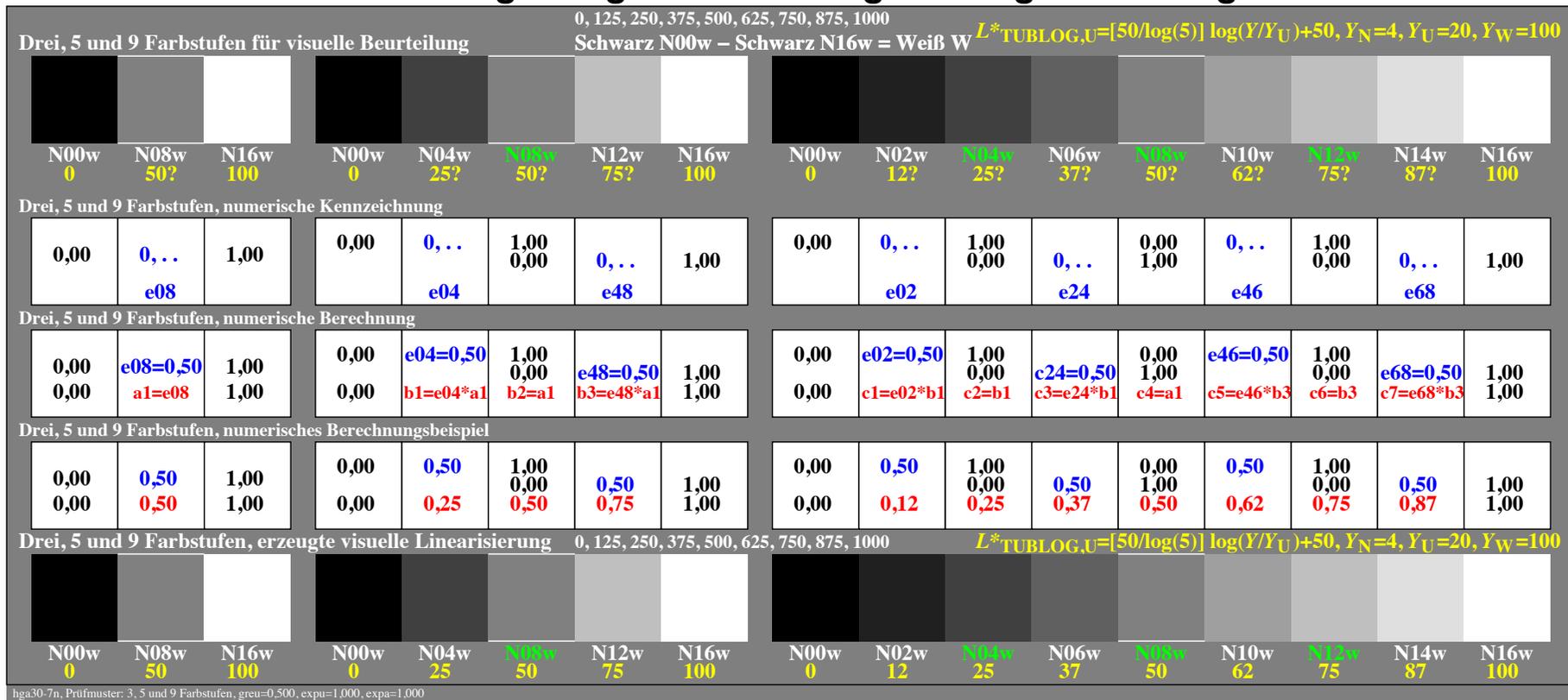


Bild 11: Drei, 5 und 9stufige Grauskalen: Intervallskalierung und gleichabständige Ausgabe

Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/hga3/hga30-7n.pdf>

Die Sehforschung steht vor der Aufgabe die Helligkeitsskalierung in einen weiten Leuchtdichtebereich von Spitzenschwarz p2 bis Spitzenweiß P2 zu erforschen. Bild 11 benutzt die visuelle Intervallskalierung zwischen benachbarten Graustufen. Es wird angenommen, daß die gleich gestuften Dateidaten $0 \leq rgb^* \leq 1$ nach ISO 9241-306 den Leuchtdichtebereich p2 bis P2 nach ISO 22028-5 erzeugen. Dann ist der Leuchtdichtebereich um den Faktor 25 im Vergleich zu SDR erhöht.

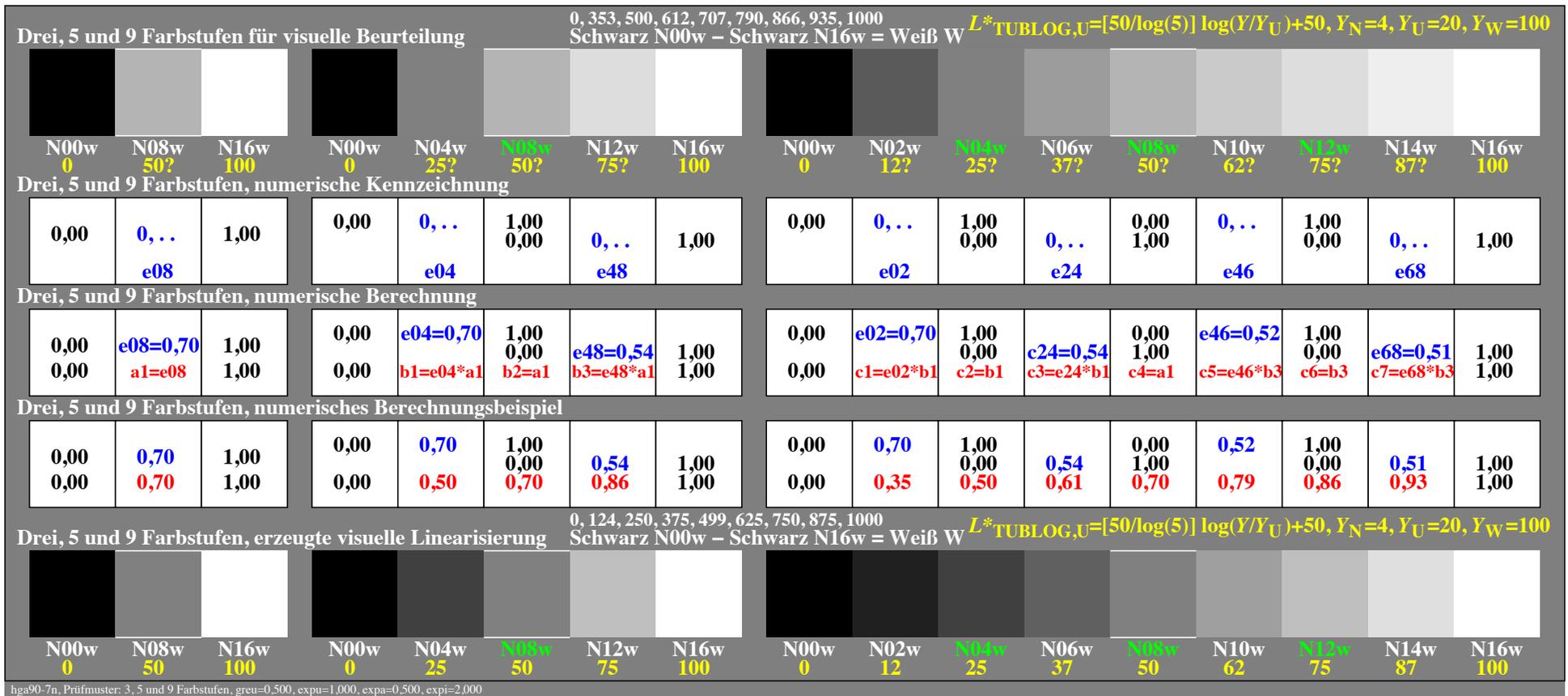


Bild 12: Drei, 5 und 9stufige Grauskalen: Intervallskalierung und gleichabständige Ausgabe

Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/hga9/hga90-7n.pdf>

Bild 12 zeigt im Vergleich zu Bild 11 große Helligkeitsabstände nahe Schwarz N. Entsprechend ergibt die visuelle Intervallskalierung einen großen Wert $e02=0,70$ nahe Schwarz N. Die Software benutzt die visuellen Werte e_{xy} (blau), um eine visuell gleichabständige Ausgabe (untere Reihe) zu erzeugen. Für die Änderung der rgb^* -Dateiwerte wird die Programmiersprache *PostScript* benutzt. Diese Änderung beruht auf 7 Werten $c1$ bis $c7$ (rot), die aus 7 Werten e_{xy} (blau) berechnet werden.

6. Gleichabständige 9stufige Farbausgabe (1080 Farben, ISO 9241-306) mit inversen Daten

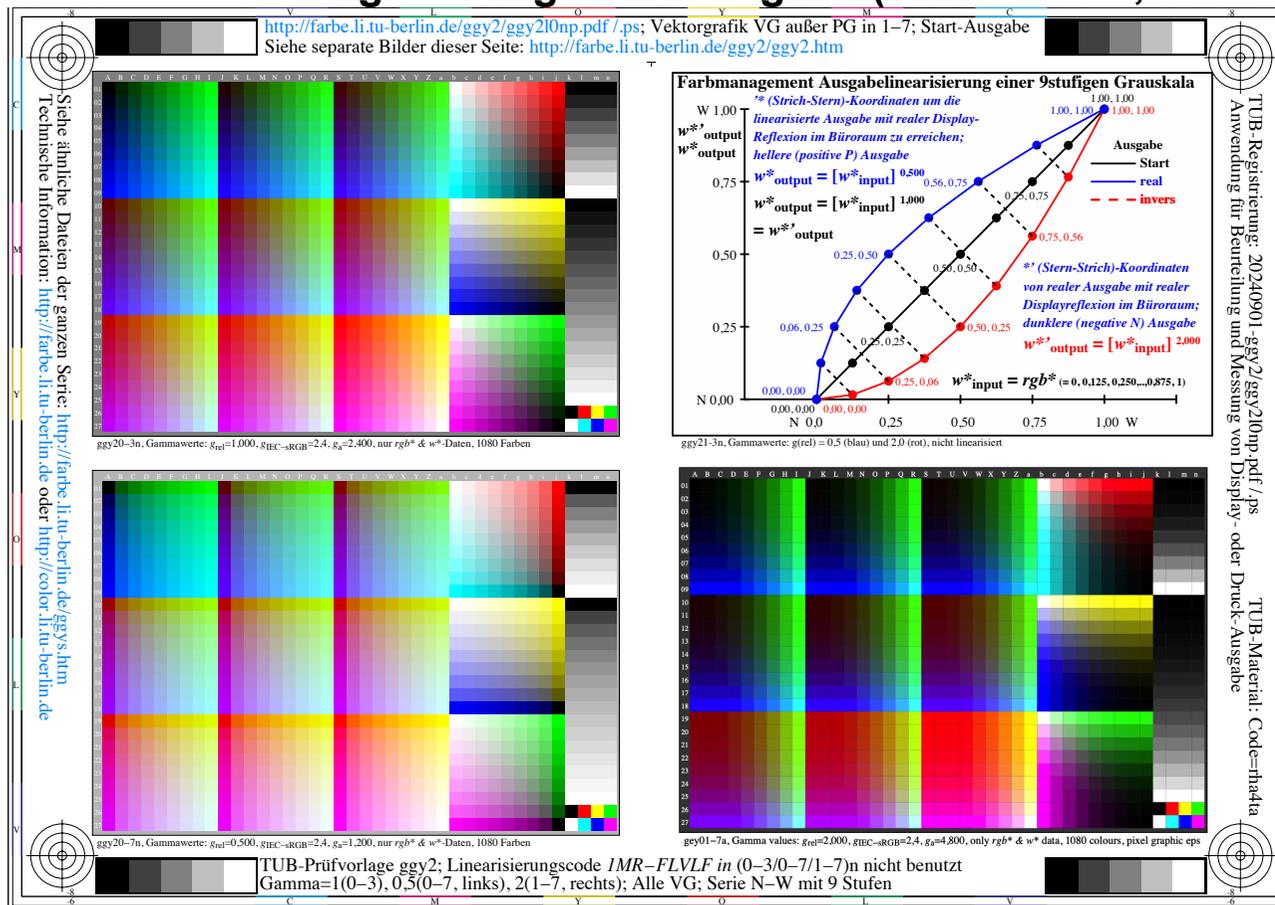


Bild 13: Drei verschiedene Ausgaben der 1080 Farben nach ISO 9241-306 und Ein-Ausgabe

Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/ggy2/ggy2l0np.pdf>

Bild 13 zeigt drei Ausgaben der 1080 Farben nach ISO 9241-306. Die Ausgabe oben links zeigt auf den meisten Displays eine gleichabständige Ausgabe. Unten links sind die Graustufen im dunklen Bereich zu groß und unten rechts zu klein. Oben rechts wird die Ein-Ausgabe für 9 Stufen gezeigt.

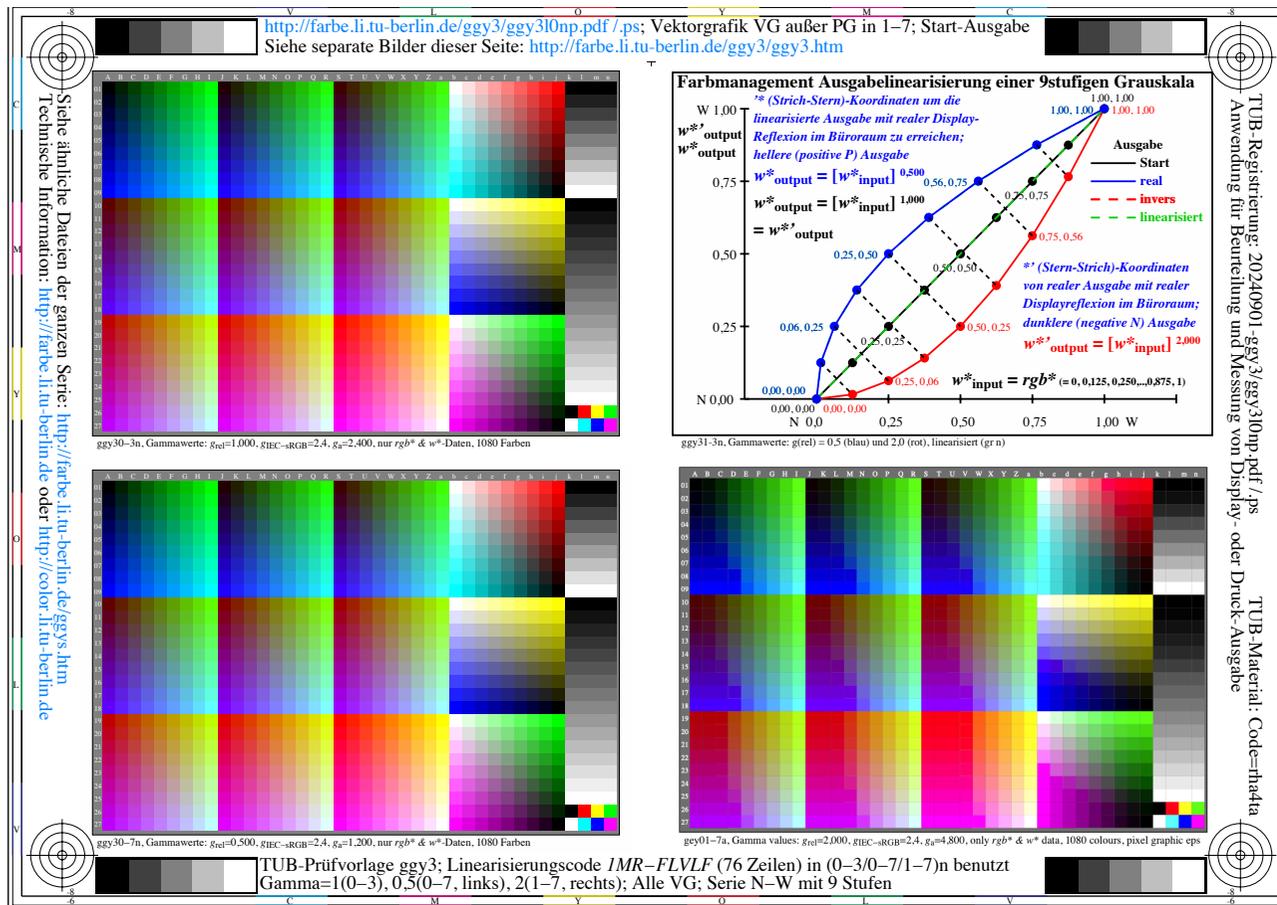


Bild 14: Drei gleiche Ausgaben der 1080 Farben nach ISO 9241-306 und Ein-Ausgabe

Zum Herunterladen dieses Bildes, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/ggy3/ggy310np.pdf>

Die visuelle Intervallskalierung und die Programmiersprache *PostScript* wird für die Änderung der rgb^* -Werte benutzt. Alle drei Bilder zeigen eine angenähert visuell gleichabständige Ausgabe. Die Ausgabe des geänderten Bildes ist schnell. Vektor- und Pixelgrafik benötigen etwa 1s. Die Software *GraphicConverter* diente zur Umwandlung der Dateiformate **pdf** in **eps** und zurück.

7. Diskussion der Ergebnisse mit Modell zur Beschreibung der Farberscheinung

Die farbmetrische Erfassung der Leuchtdichte und Farbart des Originals ist ein Hauptziel der Fotografie. In der Regel ist eine *relative* farbmetrische Wiedergabe der Leuchtdichte ausreichend.

Ein weiteres Hauptziel ist *die 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, verwendet.

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.

Kapitel 4 bis 6 enthält neue Forschungsergebnisse. Zum Beispiel gilt angenähert, vergleiche $F_{ab}(x_r)$

$$\log [L^*_{\text{CIELAB}} / L^*_{\text{CIELAB}_u}] = 1/\ln(10) x_r, \quad x_r = \log (Y/Y_u) = \log (L/L_u) \quad (Y_u=18, L_u=28 \text{ cd/m}^2)$$

oder mit der auf das Umfeld U normierten relativen (r) Helligkeit $L^*_{\text{CIELAB}_r} = L^*_{\text{CIELAB}} / L^*_{\text{CIELAB}_u}$,

$$\ln [L^*_{\text{CIELAB}_r}] = x_r. \quad \log a = \ln(a) / \ln(10), \quad L^*_{\text{CIELAB}_u} = 50 \text{ für } Y_u = 18 \text{ und } \ln(10)=2,3$$

oder

$$L^*_{\text{CIELAB}_r} = e^{x_r}$$

Mit der physiologischen komplementären Erregung e^{-x} ergibt sich die Farberscheinung

$$L^{**}_{\text{CIELAB}_r} = (e^{x_r} - e^{-x_r}) / (e^{x_r} + e^{-x_r})$$

Ergebnis: Der **Kopfraum** zwischen dem Displayweiß W und dem Kopfweiß P2 beträgt in Bild 6 ca. 72% entsprechend der Geraden $L^*_{\text{CIELAB}_r}$ und ca. 15% entsprechend der Hyperbelfunktion $L^{**}_{\text{CIELAB}_r}$. Neue Software erzeugt 9stufige gleichabständige Graureihen und ergibt wahrscheinlich etwa 15%. ISO 22028-5:2023 benutzt für den HDR-Kopfraum 72% und $100/1,72 \% = 58\%$ für den SDR-Raum.

8. 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 Dynamik Range und wide colour space 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, Farbmetrik
- [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), Farbmetrisches 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/disgam25g.pdf>

[12] *Richter, Klaus (2024)* Farbmetrische Wiedergabe von Leuchtdichte und Farbart von *rgb**-Bildern auf SDR- und HDR-Displays durch ein TUB-Farbsehmodell, siehe für das kostenlose *pdf*-Herunterladen <http://farbe.li.tu-berlin.de/dislum25g.pdf>

[13] *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".