Deduktive und induktive antagonistische TUB-Farbmetrik zur Verbesserung der CIE-Farbmetrik für weite Bereiche von Leuchtdichte- und chromatischer Adaptation

Prof. Dr. Klaus Richter, Technische Universität Berlin, Sektion Lichttechnik, 06.10.2023 Zum Herunterladen dieser Arbeit siehe in deutsch, siehe <u>http://color.li.tu-berlin.de/dfwg23d.pdf</u> oder <u>https://web.archive.org/web/*/http://color.li.tu-berlin.de/dfwg23d.pdf</u> oder in englisch <u>http://color.li.tu-berlin.de/dfwg23e.pdf</u>

Einleitung

In Anwendungen für Oberflächen- und Bildschirmfarben werden meist der CIELAB-Farbenraum und die zugehörige CIELAB-Farbabstandformel benutzt. Zur Beschreibung der Farbdifferenzen empfiehlt CIE 230:2019 für alle Farbabstände die Farbabstandsformel CIEDE2000_PF und für kleine Farbabstände LABJND_PF. Beiden fehlt ein zugehöriger Farbenraum.

Die *deduktive* und *induktive* antagonistische TUB-Farbmetrik enthält Möglichkeiten zur Verbesserung und Erweiterung der CIE-Farbmetrik für weite Bereiche von Leuchtdichteund chromatischer Adaptation.

Die TUB-Farbmetrik vewendet *physiologische* Daten in der Netzhaut von Affen und *psychophysikalische* Daten über Leuchtdichteschwellen sowie Bunttonschwellen von *Ostwald*-Optimalfarben.

Das TUB-Modell liefert eine *zweistufige* Farbmetrik zur Berechnung der farbmetrischen Koordinaten L^* und F^* durch mathematische Integration der Leuchtdichteschwellen dL und des Kontrastes (L/dL). Die mathematische Ableitung von L^* und F^* berechnet erneut dL und (L/dL).

Physiologische Rezeptorerregung von Affen als Funktion der Sehfeldleuchtdichte bei drei Umgebungsleuchtdichten



Bild 1 Physiologische Rezeptorsignale in 3 unbunten Adaptationsumfeldern L_u.



egg00-3n

Bild 2 Physiologisches Rezeptorsignal und mathematische Ableitung zur Beschreibung der Signaldifferenz.



ego41-8n

Bild 3 Rezeptorsignal *F* und Gleichheit von Ableitung *F*⁺ und Kontrast *L/dL*



egs01–2n, ees10–2a

Bild 4 Kontrastschwellen L/dL für 5 Adaptationsleuchtdichten

Die Daten von *Lingelbach und Haberich* (1977) wurden durch *Richter* (1993) mit einer Lautheitsformel ([1] in Bild 4) von *Zwicker und Feldkeller* (1967) angenähert.



Bild 5 Relative Helligkeit und relativer Kontrast von LABJND, CIELAB und CIEDE2000

Bild 4 berechnet den *relativen* CIELAB-Kontrast $(L/dL)/(L/dL)_u$ aus der *relativen* CIELAB-Helligkeit (L^*/L^*_u) . Der CIELAB-Kontrast ist im Bereich $L>L_u$ größer als der LABJND-Kontrast. Der CIEDE2000- und LABJND-Kontrast sind für $L>L_u$ mehr ähnlich. Im Bereich $L<L_u$ ist der LABJND-Kontrast größer als der CIEDE2000-Kontrast.

Bisherige *einstufige* CIELAB-Farbmetrik:

Die Ableitung der CIELAB-Helligkeit *L** ergibt die Leuchtdichtedifferenz *dL*:

 $L^*= 116 (L/L_n)^{(1/3)} - 16$ (L ist proportional zu Y und wird hier verwendet.) Es folgt für $dL^*=1$

 $dL = (3/116) (L/L_u)^{2/3}$

Ergebnis: Die aus CIELAB berechnete Leuchtdichtedifferenz $\underline{dL_{CIELAB}}$ und die visuelle psychophysikalische Leuchtdichtedifferenz $dL_{CIEDE2000}$ der CIEDE2000-Experimente unterscheiden sich. (Auch deshalb wurde CIEDE2000 ohne Farbenraum entwickelt).

Als Ergebnis dieser Arbeit erscheint eine *zweistufige* Farbmetrik notwendig. Der Erfolg von CIELAB in vielen Anwendungen ist unbestritten. Jedoch ist die CIELAB-Helligkeit nicht S-förmig wie die Rezeptorsignale in Bild 1. CIELAB ist daher für Leuchtdichtebereiche mit Kontrasten C>25:1 zunehmend fehlerhaft.

Mögliche Lösungen der Probleme

Induktive Farbmetrik durch mathematische Integration:
Die Integration des visuellen Kontrastes (L/dL) ergibt die Signalerregung F*.
Die Integration der Leuchtdichteschwelle dL ergibt die Funktion L*, deren visuelle und farbmetrische Bedeutung noch zu klären ist, vergleiche deduktive Farbmetrik.
Psychophysikalische Experimente ergeben die visuelle Leuchtdichteschwelle dL.

2. Deduktive Farbmetrik durch mathematische Ableitung: Die Ableitung der Signalerregung F^* ergibt den Kontrast (L/dL). Die Ableitung der Funktion L^* ergibt die Leuchtdichtedifferenz dL.

Auch die Farbeigenschaften als Funktion der chromatischen Adaptation erfordern eine *zweistufige* Farbmetrik. Ausgangspunkt sind psychophysikalische Experimente über Bunttonschwellen komplementärer Optimalfarben von *Holtsmark und Valberg* (1969), siehe nächstes Bild.



egz80-31

Bild 6 Gleiche Bunttonunterscheidung von komplementären Optimalfarben

Spektralfarben werden zu Optimalfarben (oben rechts) gemischt. Zum Beispiel die Bunttonunterscheidung von Rot und der Komplementärfarbe Cyan ist gleich, siehe Pfeile. Die Buntwerte $C_{AB,2}$ und Bunttonwinkeldifferenz $dh_{AB,2}$ sind gleich.



Bild 7 Für die Normlichtarten D65 und A sind die Buntwerte C_{AB,1} verschieden. Die Konstante *B*_c beschreibt die chromatische Adaptation, siehe Bild 8.



Bild 8 Gelb (max) und Blau (min) definieren Buntwertkoordinaten A₂ und B₂.

Für 3,6% Schwarzreflektion sind die radialen Buntwerte $C_{AB,2}$ und auch die Verhältnisse $Y_E: Y_G$ von Eigenfarbe (E) und Gegenfarbe (G) ungefähr gleich.

Die Hellbezugswerte Y von Gelb, Grün, Rot und Blau dienen zur Verkleinerung des Kontrastes (L/dL) für bunte Farben gegenüber unbunten Farben in Bild 9.



egs90–2a

Bild 9: Kontrast (*L/dL*) von unbunten und bunten Farben als Funktion der chromatischen und Leuchtdichteadaptation.

Für zum Beispiel die Umfeldleuchtdichte 100 cd/m² nimmt der Kontrast (*L/dL*) von Unbunt über Gelb, Grün, Rot und Blau ab. Da in diesem Fall *L* konstant ist, so steigt die Leuchtdichtedifferenz *dL* und die radiale Farbartdifferenz *dc*_{AB,2}. Dieser radiale Anstieg ist von psychophysikalischen Experimenten bekannt.



Bild 10: Radialer Anstieg der Farbartdifferenz dc_{xy} für psychophysikalische Farbschwellen in rot-grün und gelb-blau Richtung nach *Richter* (1985).

Ähnliche experimentelle Ergebnisse sind zum Beispiel von *MacAdam* (1941) und dem *Munsell* Farbsystem (*Newhall et all, 1943*) bekannt. Die farbmetrische Ursache dieser radialen Schwellenerhöhung wird Bild 9 anschaulich sichtbar.

Zusammenfassung

Die *deduktive* Farbmetrik benutzt *physiologische* Erregungen bei Affen nach *Valeton* & *van Norren* (1983) und beschreibt die Leuchtdichtesignale *F**.

Die *induktive* Farbmetrik benutzt psychophysikalische Leuchtdichteschwellen von *Lingelbach und Haberich* (XXX) sowie die Buntschwellen von *Ostwald*-Optimalfarben von *Holtsmark und Valberg* (1969) zur Leuchtdichte- und chromatischen Adaptation, die durch nur einen Parameter B_c beschrieben wird.

Die Zusammenführung ergibt eine *zweistufige* Farbmetrik. Der visuelle Schwelle dL erlaubt durch Integration des Kontrastes (L/dL) die Berechnung der Erregung F^* und ihrer Differenzen dF^* . Die Erregung F^* kann daher *nicht* durch Integration von dL, sondern nur durch Integration von (L/dL) ermittelt werden.

1. Die Ableitung dL_{CIELAB} der Helligkeit L^*_{CIELAB} kann daher nicht mit der visuellen Differenz $dL_{CIEDE2000}$ übereinstimmen.

2. Auch die Integration von $dL_{CIEDE2000}$ kann daher nicht mit der Helligkeit L^*_{CIELAB} übereinstimmen.

Die *zweistufige* TUB-Farbmetrik kann die die *einstufige* CIELAB- und CIEDE2000-Farbmetrik ersetzen. Dies kann die Lösung der bestehenden Probleme 1 und 2 sein.

Literatur

Zwicker E., Feldkeller R., (1967), Das Ohr als Nachrichtenempfänger (the ear as information receiver), Hirzel-Verlag, 232 pages, see 133–139

Richter, Klaus., (1969), Antagonistic signals in colour vision and relation with the perceived colour order (in German), Dis. Universität Basel, 150 pages, see 115-123, 74 MB, siehe freies Herunterladen <u>https://edoc/unibas.ch/72306/</u>

Newhall, S.M., Nickerson, D., Judd, D.B. (1943), Final report of the O.S.A. subcommittee on the spacing of Munsell Colors, OSA 33, 385-418, see p. 417

Richter, Klaus, 2016, Colour and Colour Vision and Elementary Colours in Colour Information Technology, 85 pages (A5), (available in 5 languages), see http://color.li.tu-berlin.de/color.

For an english version for the (mobile) display output, see <u>http:/standards.iso.org/iso/9241/306/ed-2/ES15.PDF</u>.

This paper includes the printed achromatic and chromatic test charts with elementary colours according to ISO/IEC 15775:2022, see http://standards.iso.org/iso-iec/15775/ed-2/en.

and according to ISO 9241-306:2018, Annex D, see for example test chart AE49 on

http://standards.iso.org/iso/9241/306/ed-2/index.html.

Oleari, Claudio, 2016, Standard Colorimetry, Definitions, Algorithms and Software, Wiley.

Richter, Klaus, 1996, Computergrafik und Farbmetrik, Farbsysteme, see http://farbe.li.tu-berlin.de/buche.html.

Thorstein Seim, (2009), Reportership Report CIE R1-47, Hue angles of elementary colours, see (35 pages), http://web.archive.org/web/20160304130704/http://files.cie.co.at/526.pdf.

Thorstein Seim, (2013), Reportership Report CIE R1-57, Border between Blackish and Luminous Colours, see (23 pages), http://web.archive.org/web/20150413002133/http://files.cie.co.at/716 CIE%20R1-57%20Report%20Jul-13%20v.2.pdf.

Holtsmark, T. and Valberg, A. (1969), Colour discrimination and hue, Nature, Volume 224, 366-367*Stiles, W.S.* (1971), The line element in colour theory, A historical review, in Proceedings of the Helmholtz Memorial Symposium on Color Metrics, AIC/Holland, Soesterberg, see https://aic-color.org/publications,

go to AIC 1971 to download the paper of Stiles as pdf file.

Acknowledgements: I would like to thank Prof. Florian Süßl (BHT Berlin), Detlef Ruschin (HHI Berlin) and Thorstein Seim (University of Oslo) for their contributions to improving this work. Further parts of the TUB-relativity model of colour vision for light and surface colours are in preparation, see under publications: http://color.li.tu-berlin.de/XY91FEN.html

Appendix

Stiles describes a general colour scaling function F^* as function of the receptor responses. In former times the receptor responses were named by the three colour vision deficiencies Protanop (P), Deuteranop (D), and Tritanop (T). One receptor type is missing for these observers. CIE has named the three receptors LMS instead of PDT. In the next figure therefore LMS with an index PDT is used.



een31-1n

Figure 11: Line element of colour vision of Stiles connecting thresholds and scaling data

Deduktive und induktive antagonistische TUB-Farbmetrik zur Verbesserung der CIE-Farbmetrik für weite Bereiche von Leuchtdichteund chromatischer Adaptation

Für eine Zusammenfassung siehe <u>http://color.li.tu-berlin.de/dfwg_23e.pdf</u> in englisch oder http://color.li.tu-berlin.de/dfwg_23d.pdf in deutsch.

Prof. Dr. K. Richter, Technische Universität Berlin (TUB), http://color.li.tu-berlin.de/index.html

Einleitung

Die ISO/CIE-Farbmetrik, z.B. von CIELAB, CIELUV und CIEDE2000 nach ISO/CIE 11664-2, 5 und 4, wird für Oberflächenfarben mit dem Hellbezugswertbereich Y_N =2,5 <= Y <=90= Y_W angewendet, siehe ISO/IEC 15775:2022. Das Verhältnis Y_W/Y_N =36 deckt 1,5 logarithmische Einheiten ab. Bei der Normbeleuchtungsstärke 500 Lux in Büros entspricht dies dem Leuchtdichtebereich 4 cd/m² <= L <= 142 cd/m² bei grauer Umfeldleuchtdichte L_u =28 cd/m².

Die folgende TUBLAB-Farbmetrik ist für den Umfeldleuchtdichtebereich $10 \le L_u \le 10000$ vorgesehen. Der Umfeldleuchtdichteverhältnis beträgt 1000:1 und der Musterleuchtdichte-bereich ist zusätzlich um den Faktor 36 größer. Die TUB-Farbmetrik basiert sowohl auf *physiologischen* als auch auf *psychophysikalischen* experimentellen Daten des Farbsehens. Für etwa fünf logarithmische Einheiten der Leuchtdichtebereichs werden *physiologische* Daten von visuellen Erregungen und psychophysikalische Daten von Leuchtdichteschwellen analysiert. Ein TUB-Modell für alle unbunten und bunten Farben enthält die antagonistischen Eigenschaften der komplementären *Ostwald*-Optimalfarben für alle Farbumstimmungen.

Deduktive und induktive TUB-Farbmetrik für einen weiten Leuchtdichtebereich

Die deduktive TUB-Farbmetrik beginnt mit *physiologischen* Daten, z.B. von *Valeton und Van Norren (1973*), die hier durch die Funktion tanh(*x*) *(tangens hyperbolicus)* approximiert werden. Alle Erregungsfunktionen, siehe <u>http://color.li.tu-berlin.de/eeg0/eeg00-5n.pdf</u> sind S-förmig und ähnlich. Die Ableitung einer Erregungsfunktion ist *Gauß*-förmig, siehe <u>http://color.li.tu-berlin.de/eeg0/eeg00-3n.pdf</u>

Die *induktive* TUB-Farbmetrik beginnt mit *psychophysikalischen* Daten, z.B. von *Lingelbach* und *Haberich* (1977), die von *Richter* (1993) angenähert wurden, z.B. die Leuchtdichteschwelle *dL* als Funktion von *L* und *L*_u, siehe <u>http://color.li.tu-berlin.de/egn4/egn40-1a.pdf</u>. Das Verhältnis *L/dL* wird als Kontrast bezeichnet und ist *Gauß*-förmig, siehe <u>http://color.li.tu-berlin.de/egn4/egn40-2a.pdf</u>. Die *physiologischen* und *psychophysischen* Kontrastfunktionen stimmen überein.

Physiologische und psychophysische Kontrastberechnung und Interpretation

Nur bei hohen Leuchtdichten liegt der maximale Kontrast bei der Leuchtdichte L_u des Umfeldes. Dies stimmt mit den physiologischen Daten (1973) überein. Die Symmetrie des physiologischen Kontrastes verschwindet in den psychophysikalischen Daten. Bei kurzen Betrachtungszeiten (<0,1s) der beiden benachbarten Musterleuchtdichten ist der psychophysikalische Kontrast jedoch symmetrisch. Daher gibt es weite Übereinstimmung der *deduktiven* und *induktiven* Kontrastes als Funktion der Leuchtdichten L und L_u .

TUB-Farbmetrik für ein breiten Bereich von chromatischer Adaption

Richter (2020) hat die farbmetrischen Eigenschaften der komplementären *Ostwald*-Optimalfarben untersucht. Für Farbwerte, Wellenlängengrenzen, Farbarten und Buntwerte für die Normlichtart D50, siehe <u>http://color.li.tu-berlin.de/egh3/egh3.htm</u>. Alle *Ostwaldfarben (o)* eines *Farbenhalbs* haben unterschiedliche Hellbezugswerte Y_o, siehe <u>http://color.li.tu-berlin.de/eeg8/eeg81-5n.pdf</u>. Die beiden Buntwerte *C*_{AB,2} und *C*_{AB,3} ergeben jedoch ungefähr den gleichen radialen Buntwert für jeden Buntton und jede Farbstimmung. Siehe <u>http://color.li.tu-berlin.de/eeg8/eeg81-7n.pdf</u> für die Farbstimmung D50 als Beispiel.

TUBLAB-Farbmetrik für einen breiten Bereich von Leuchtdichte- und Buntadaptionen

Das antagonistische Modell TUBLAB für das Farbsehen kann daher für einen weiten Bereich von Leuchtdichte- und chromatischer Adaptation angewendet werden, zum Beispiel anstelle von CIECAM16