

## TUB-Relativitätsmodell des Farbsehens für Licht- und Oberflächenfarben

Prof. Dr. Klaus Richter, Technische Universität Berlin(TUB), 22-07-21

Für diese Arbeit in englischer Sprache siehe: <http://farbe.li.tu-berlin.de/farbe2207.pdf>

Für diese Arbeit in deutscher Sprache siehe: <http://farbe.li.tu-berlin.de/farbg2207.pdf>

*Anmerkung: Nach Herunterladen und Öffnen der pdf-Datei arbeiten alle blauen Links direkt.*

### Zusammenfassung

Das TUB-Relativitätsmodell des Farbsehens basiert auf Forschungsergebnissen zum Farbsehen und vielen visuellen und psychophysischen Experimenten mit Licht- und Oberflächenfarben. Das TUB-Modell kann verwendet werden, um Farbattribute zu beschreiben, z. B. Buntheit, Helligkeit und Buntton, chromatische Adaptation, Farbschwellen, Farbunterschiede und viele visuelle Phänomene, zum Beispiel die Farbkonstanz bei CIE-Lichtarten D65, D50, A und E. Das TUB-Modell eignet sich für Anwendungen in der Bildtechnik, zum Beispiel für die Farbausgabe auf Displays oder im Druck sowie für die fotografische oder Scanner-Farbeingabe.

Die CIE-Farbmessung beruht vorwiegend auf Experimenten mit Körperfarben, zum Beispiel über Farbmerkmale und Farbunterscheidung. Die spektral breitbandigen sechs *Ostwald-Optimalfarben RYGBM* sind die buntesten Körperfarben. Die drei *komplementären Ostwald-Optimalfarbpaare R-C, Y-B, und R-M* mischen sich zu Weiß.

Lichtfarben, zum Beispiel von *sRGB*- und *OLED*-Displays, sind schmalbandiger als die *Ostwald-Optimalfarben*. Auch bei Displayfarben mischen sich die Farbpaare *R-C, Y-B, und R-M* zu Weiß. Physikalisch können sie als schmalbandige Optimalfarben beschrieben werden. *Ostwald-Optimalfarben* und die *sRGB*-Displayfarben bestehen aus sechs Farben *RYGBM*. Für beide Systeme sind alle Buntwerte  $C_{A2B2}$  in einem Bunttonhexagon angenähert gleich. Für die komplementären Optimalfarben sind die Buntwerte von *R und C, Y und B, sowie R und M* antagonistisch und ihre beiden Buntwert  $C_{A2B2}$  haben den gleichen Betrag.

Nach *Holtmark und Valberg (1969)* ist das Farbunterscheidungsvermögen für alle komplementären Optimalfarben angenähert gleich. Dieses experimentelle Ergebnis ist eine besondere Grundlage, um die CIE-Farbmessung für Körperfarben zu einer TUB-Farbmessung für *Licht- und Körperfarben* in dieser Arbeit zu erweitern.

Für viele Anwendungen verbessert die Metrik des TUB-Relativitätsmodells des Farbsehens für *Licht- und Körperfarben* auch die bisherige CIE-Messung für *Körperfarben* als Untermenge.

In einer Einführung wird eine Farbschleife dargestellt:

*ISO-Farbdatei – Farbdateiausgabe – Farbprüfvorlageneingabe – ISO-Farbdatei*

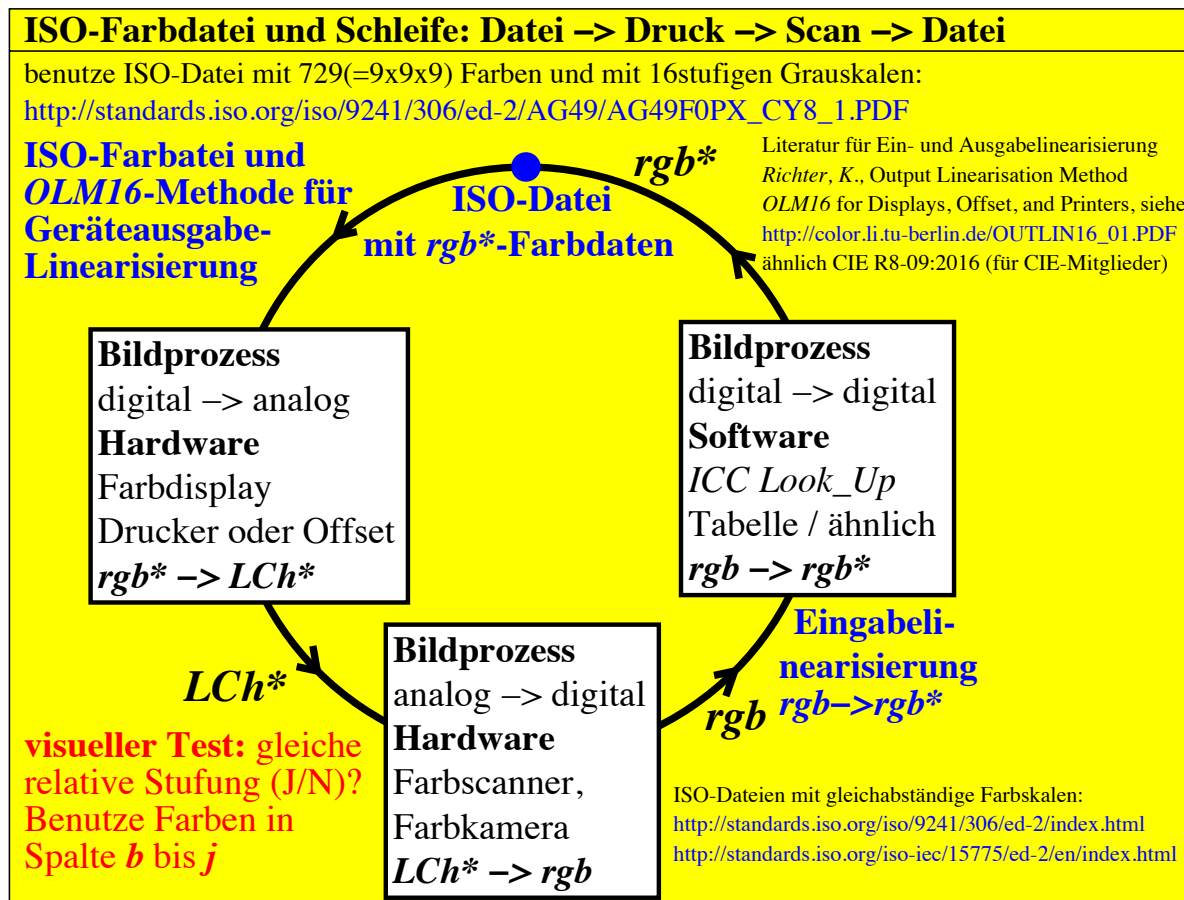
Die *rgb\**-Farbdaten in einer digitalen ISO-Farbdatei sollen für jede Soft- und Hardware-Kombination am Ende angenähert gleich sein.

Dieses Ziel ist mit einer geeigneten Metrik für *Licht- und Körperfarben* erreichbar, zum Beispiel mit der TUB-Messung für *Lichtfarben* von Displays. ISO 9241-306:2018 benutzt diese Metrik für die Displayfarbausgabe und definiert für Anwendungen acht verschiedene Displaykontraste.

*Anmerkungen:*

Viele Anwendungen in ISO-, IEC-, CEN-, CIE- und DIN-Normen und Forschungsergebnisse sind auf einem Server der Technischen Universität Berlin (TUB) in englisch, deutsch und teilweise in vier weiteren Sprachen verfügbar, siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/indexDE.html>

## 1. Einführung: Farbschleife mit *Licht-* und *Körperfarben*



CGT40-3N

**Bild 1: Farbschleife: ISO-Datei → Dateiausgabe → Prüfvorlageneingabe → ISO-Datei.**

Zum Herunterladen dieses Bildes siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/CGT4/CGT40-3N.PDF>

In der Informationstechnik wird mit digitalen und analogen ISO-Prüfvorlagen versucht, die Farbschleife von Bild 1 zu realisieren.

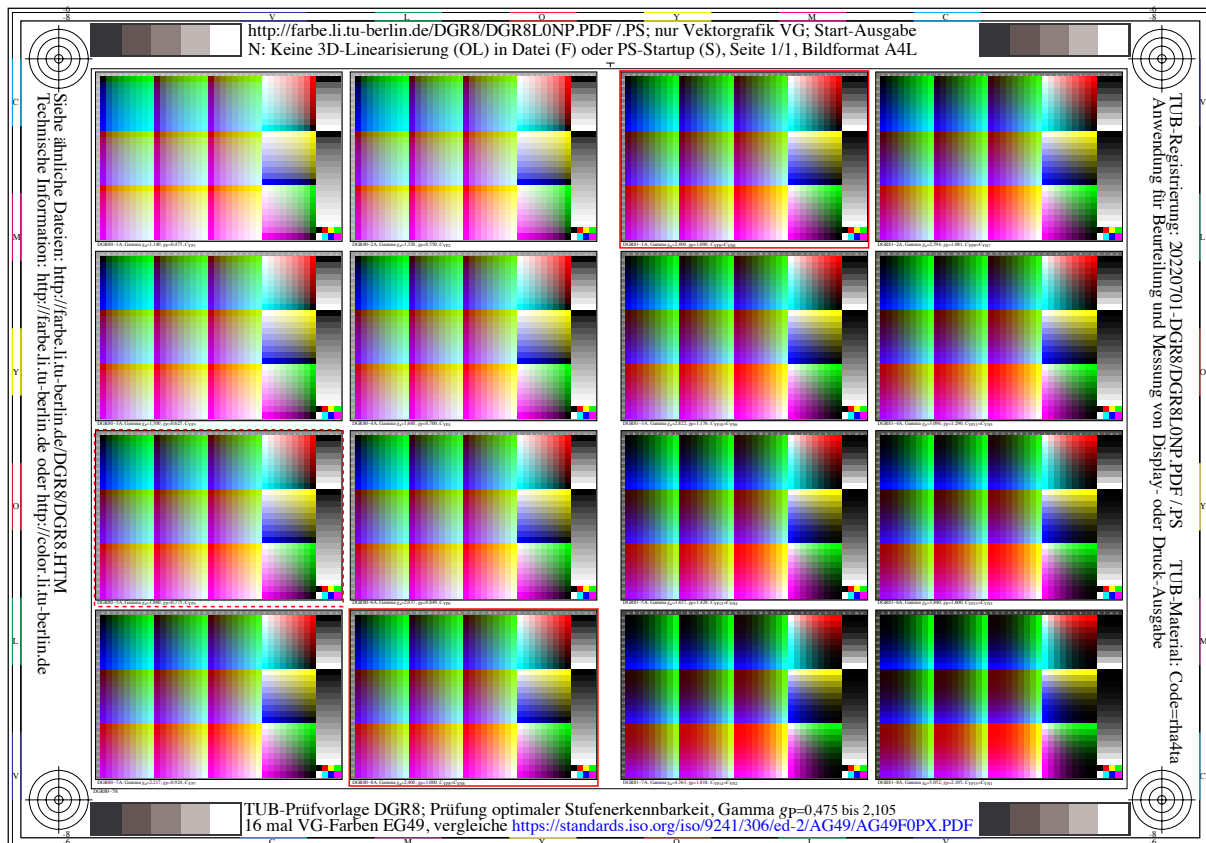
Die *rgb\**-Farbdaten in einer ISO-Datei sollen für *jede* Soft- und Hardware-Kombination am Schleifenende angenähert gleich wie am Schleifenanfang sein. Dieses Ziel ist nur mit einer geeigneten Metrik für *Licht-* und *Körperfarben* erreichbar.

Für *Lichtfarben* von Displays wurde eine besondere TUB-Farbmeterik entwickelt. Sie kann auch die *Ostwald*-Optimalfarben gut beschreiben. Diese Optimalfarben sind die *Körperfarben* mit den größten Buntwerten und Buntheiten. Daher ist die TUB-Farbmeterik für viele Anwendungen geeignet. Besondere Beispiele werden in dieser Arbeit dargestellt.

Bild 1 enthält Links zum Herunterladen der digitalen ISO-Prüfvorlagen der ergonomischen Norm ISO CEN DIN 9241-306/ed-2:2019 für die Displayausgabe. Die Norm ISO/IEC 15775/ed-2:2022 enthält ähnliche analoge (gedruckte) ISO-Prüfvorlagen für Farbkopierer. Beide Normen und die Reihe DIN 33866-1 bis 5 enthalten für alle Farbgeräte der Farbschleife auch Ausgabefragen für die visuelle Prüfung in englisch, deutsch und vier anderen Sprachen zum freien Herunterladen.

Die Farbschleife ist in der Anwendung von besonderer Bedeutung. Zum Beispiel für die Archivierung von Farbkunstwerken und Farbdokumenten und ihrer Farbwiedergabe in Museen auf Displays.

## 2. Wiedergabe von Kunstwerken und Farbdokumenten in Museen auf Displays



**Bild 2: Gleichabständig gestufte Farbreihen in  $rgb^*$  und ihre visuelle Wiedergabe mit 16 Gamma-Werten nach ISO 9241-306:2018.**

Zum Herunterladen dieses Bildes siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/DGR8/DGR8L0NP.PDF>

Bild 2 zeigt 16 mal die 1080 Farbstufen von ISO CEN DIN 9241-306:2019. Die 16 Bilder unterscheiden sich durch die *relativen* Gammawerte  $0,445 \leq g_p \leq 2,11$ . Zwischen dem *relativen* und *absoluten* Gammawert gilt die folgende Gleichung:  $g_a = 2,4 g_p$ .

Für  $g_p=1$  ergibt sich  $g_a=2,4$ . Der absolute Gammawert erzeugt eine lineare Beziehung zwischen den Farbwerten „ $rgb$ “ in einer digitalen Datei und der CIE-Helligkeit  $L^*_{CIELAB}$ . Es gilt im  $sRGB$ -Farbenraum nach IEC 61966-2-1:

$$rgb^* = L^*_{CIELAB}/100 \quad \text{mit } 0 \leq rgb^* \leq 1 \text{ und } 0 \leq L^*_{CIELAB} \leq 100. \quad [1]$$

Die Koordinaten  $rgb^*$  sind proportional zu der Empfindung Helligkeit  $L^*$  und erhalten deshalb einen Stern (\*). Die zur physikalischen relativen Leuchtdichte proportionalen Koordinaten werden mit  $rgb$  gekennzeichnet. Es gilt:

$$rgb^* = rgb^{(1/2,4)}. \quad [2]$$

Die Gleichungen [1] und [2] erfordern eine lineare Beziehung zwischen digitalen Dateidaten  $rgb^*$  im Bereich 0 bis 1 und der *relativen* Helligkeit  $L^*_{CIELAB}/100$  im Bereich 0 bis 1.

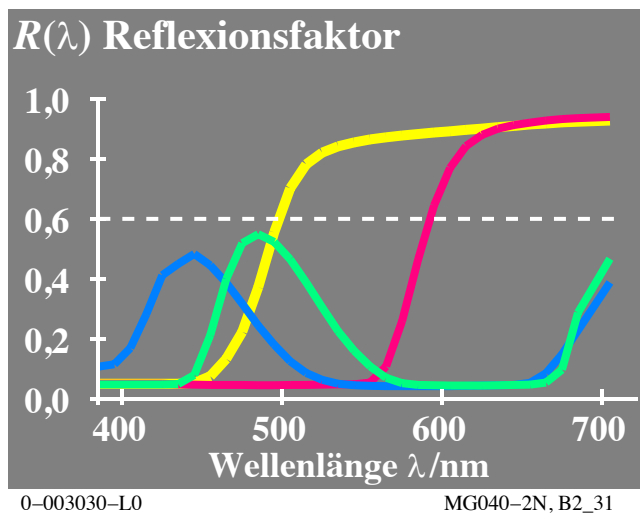
In Bild 2 variieren die Gammawerte im Bereich  $0,445 \leq g_p \leq 2,11$  oder  $1,07 \leq g_a \leq 5,06$ . Am Bildschirmarbeitsplatz kann sich der Gammawert durch zunehmende Reflexion des Umgebungslichtes auf dem Display von  $g_a=2,4$  auf nahezu  $g_a=1,0$  ändern.

Bild 2 simuliert die Änderung der Farben und ihre Stufung. Oben links in Bild 2 sind zum Beispiel die hellen Graustufen *nicht unterscheidbar*. Unten rechts in Bild 2 sind die dunklen Farbstufen *nicht unterscheidbar*. In ISO 9241-306 wird ein Gammaschieber beschrieben, der alle 16 Graustufen wieder sichtbar macht, siehe auch das folgende Bild 9. Hierzu dient im Büro ein Gamma im Bereich  $1,0 \leq g_a \leq 2,4$ . Der für die ergonomische Ausgabe erforderliche Wert hängt von der Hardware und Software des Displays und der Reflexion ab.

### 3. Weißfuß und Kontrast als Grundlage für das TUB-Relativitätsmodell des Farbsehens

Es wird angenommen, dass sich das visuelle System des Menschen ständig an einen "mittleren" unbunten Reiz mit einer "mittleren" Leuchtdichte der visuellen Szene adaptiert. In Anlehnung an das TUB-Farbsehmodell werden alle Licht- und Oberflächen-Farbempfindungen relativ zu diesen "mittleren" Messdaten von Farbe und Licht berechnet.

Farbreize werden durch ein *lineares Mittel* und Farbempfindungen angenähert durch ein *logarithmisches Mittel* beschrieben. Für kleine Kontraste und Farbabstände ist das lineare und logarithmische Mittel angenähert proportional. Daher sind für kleine Kontraste und Farbabstände auch Formeln der *linearen* Farbmatrik zur Beschreibung visueller Ergebnisse geeignet.



**Bild 3: Reflexion der Oberflächenfarben für die CIE-Testfarben 9 bis 12 nach CIE 13.3.** Zum Herunterladen dieses Bildes siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/MG04/MG040-2N.PDF>

Die Oberflächenfarben von Bild 3 und alle anderen *matten* Oberflächenfarben haben eine Grundreflexion nahe 3,6%. Diese Grundreflexion wird als Weißfuß bezeichnet. Der weiße Fuß mit der gleichen Reflexion bei allen Wellenlängen *enthält keine* Farbinformation und wird daher üblicherweise im TUB-Relativitätsmodell des Farbsehens zur Berechnung der chromatischen Farbattribute subtrahiert.

Das TUB-Modell weist daher einen grundlegenden Unterschied zur Beschreibung der Farbattribute im Vergleich zum CIELAB-Farbraum auf. Normalerweise berücksichtigt das TUB-Modell das von der Augenlinse und den Augenmedien erzeugte Streulicht mit einem Weißfuß von mindestens 1%. Dieser erhöht sich mit zunehmendem Alter, zum Beispiel auf den Wert 3,6% wie im Normbüro.

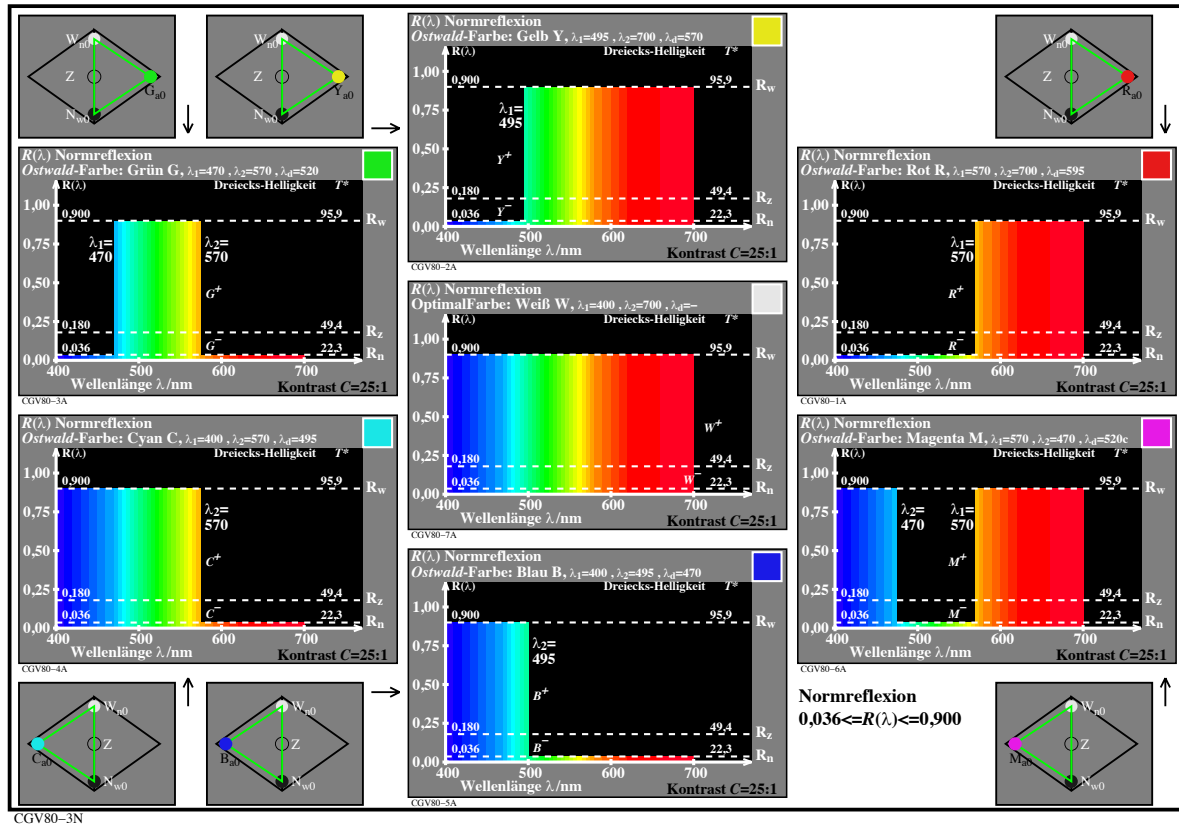
Daher ist eine Reflexion unter 1% in vielen Anwendungen nicht realistisch. Sowohl die Reflexionen der Körperfarben oder Lichtfarben als auch die der Augenmedien müssen berücksichtigt werden. Daher ist in vielen Anwendungen eine Reflexion um 3,6% realistisch.

Mit der Reflexion nahe 90% für Weiß nach der ergonomischen Norm ISO 9241-306 ergibt sich zwischen Weiß und Schwarz ein Kontrast  $C=90/3,6=25:1$ . Der Kontrast ändert sich *nicht* bei Körperfarben, zum Beispiel falls die Bürobeleuchtungsstärke von 500 lux auf 5000 lux erhöht wird.

Der Kontrast kann sich jedoch um einen Faktor 10 für eine 16-stufige Grauskala zwischen Weiß und Schwarz an Bürodисplays erniedrigen. Zum Beispiel erniedrigt sich der Kontrast von  $C=25:1$  nach  $C=2:1$  bei einer Erhöhung der Bürobeleuchtungsstärke von 500 lux auf 5000 lux. Dies erhöht die Displayreflexion um den Faktor 10 und erniedrigt den Kontrast um den Faktor 10.

### 3. Farbreize und Farbempfindung für bunte Farben: Mischung und Antagonismus

Die buntesten Oberflächenfarben sind die *Ostwald*-Optimalfarben. In vielen Anwendungen werden drei Farbpaaire *Rot-Cyan* (R-C), *Gelb-Blau* (Y-B) und *Grün-Magenta* (G-M) verwendet.



**Bild 4: Reflexionen als Funktion der Wellenlängen von sechs *Ostwald*farben und die Position ihrer Mischfarben in unterschiedlichen Bunttonebenen.**

Die Mischfarben sind oben rechts in den sieben Teilbildern dargestellt.

Zum Herunterladen dieses Bildes siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/CGV8/CGV80-3N.PDF>

Bild 4 zeigt die *Ostwald* Farben und ihre Reflexionen in einem 6-stufigen Farbkreis *RYGCBM*. Die Werte der Normreflexionen  $R_W$  von Weiß,  $R_Z$  von Mittelgrau und  $R_N$  von Schwarz (N=noir) sind um den Faktor 100 kleiner als die Normfarbwerte  $Y_W$ ,  $Y_Z$  und  $Y_N$ . Im TUB-Modell hat der Weißfuß die Reflexion  $R_N=0,036$ . Das mittlere Grau hat eine Reflexion von  $R_Z = 0,180$ . Das Weiß hat eine Reflexion von  $R_W = 0,900$ . Die drei Werte werden in Bild 4 durchgestrichelte Linien dargestellt. Die relativen Reflexionen  $R_r=R/R_Z$  liegen im Bereich

$$0,2 \leq R_r \leq 5 \quad [3] \text{ oder } -0,69 \leq \log R_r \leq 0,69 \quad [4].$$

Die *relative* Helligkeitsfunktion im Vergleich zum mittleren Grau Z

$$L^*_{TUBr} = k \log R_r \quad \text{mit } k = 40/\log(5) = 57,22 \quad [5]$$

erfüllt ein Normziel des TUB-Farbsehmodells .

Ähnlich wie im OSA-Farbsystem ist die relative Helligkeit Null für Mittelgrau Z und negativ für dunklere und positiv für hellere Farben. Die Helligkeit  $L^*_{TUBr}$  ist ein S-förmige Funktion und sättigt unterhalb von Schwarz N und oberhalb Weiß W.

Im TUB-Modell sind die Helligkeitswerte daher für Weiß (W), Grau (Z) und Schwarz (N):

$$L^*_{TUBr,W}=40, L^*_{TUBr,Z} = 0, L^*_{TUBr,N} = -40 \quad [6]$$

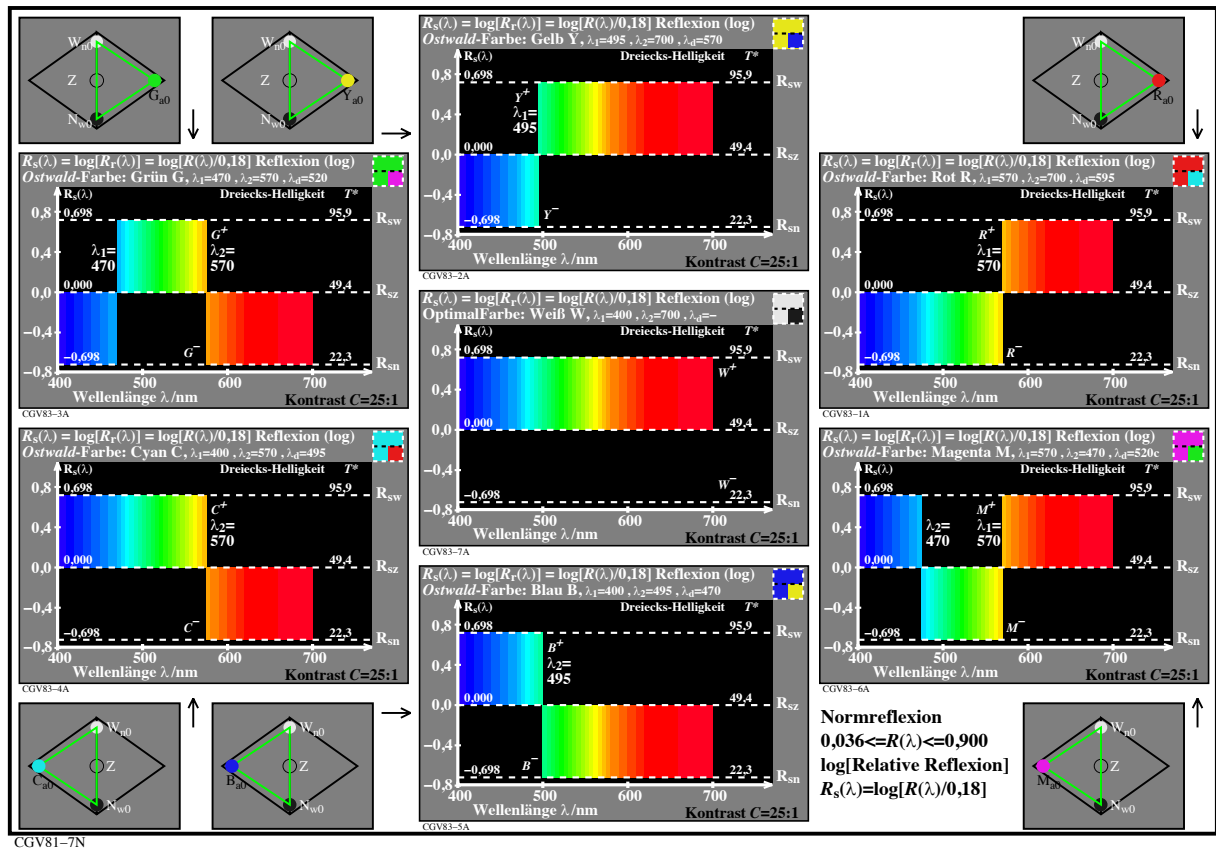
Wenn der Wert 50 für graues Z von  $L^*_{CIELAB}$  subtrahiert wird , ist die *relative* CIE-Helligkeit:

$$L^*_{CIEr} = L^*_{CIELAB} - 50 \quad [7]. \text{ Die drei Werte sind:}$$

$$L^*_{CIEr,W}=45, L^*_{CIEr,Z} = 0, L^*_{CIEr,N} = -28. \quad [8].$$

Die *symmetrische relative Helligkeit*  $L^*_{TUBr}$  [5] ist eine *logarithmische Funktion*.

#### 4. Farbempfindung für bunte Farben: Mischung, Signale und Antagonismus



**Bild 5: Antagonistische Signale  $R^+$  und  $R^-$  von sechs Ostwaldfarben und ihre Positionen in unterschiedlichen Bunttonebenen.**

Zum Herunterladen dieses Bildes siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/CGV8/CGV81-7N.PDF>

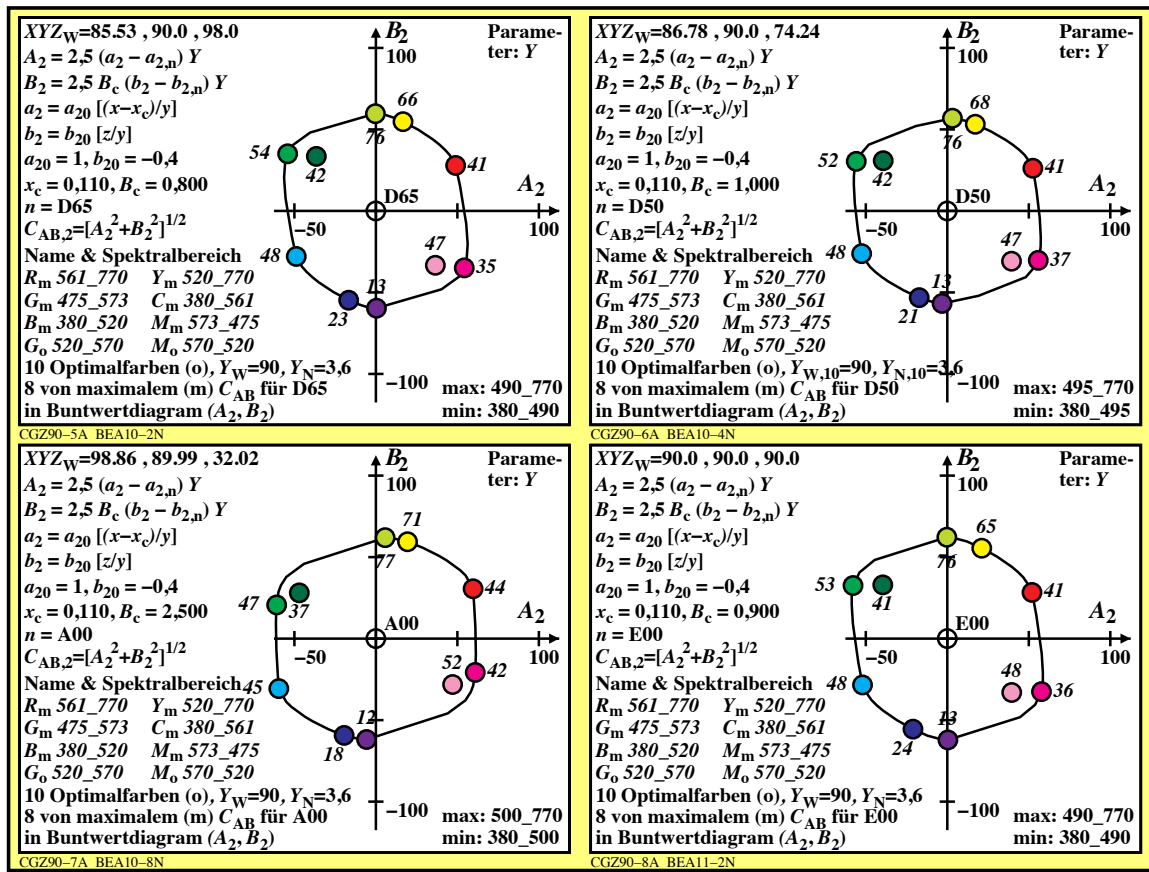
Für die Berechnung der antagonistischen Signale  $R^+$  und  $R^-$  und für die fünf anderen Bunttöne  $YGCMB$  werden die logarithmischen *relativen* Reflexionen  $R_r = R_w/R_z$  und  $R_r = R_n/R_z$  verwendet. Für die chromatischen Farbsignale wird *keine* physikalische Reflexion verwendet, die kleiner als  $R_n$  von Schwarz ist. Wir sehen eine Haupteigenschaft: Jede Reflexion, die kleiner als  $R_n$  ist, enthält keine Farbinformationen, vergleiche Bild 3. Daher wird der Reflexionsbereich zwischen 0 und  $R_n$  nicht zur Berechnung der *Buntwerte* verwendet. Dies ist ein grundlegender Unterschied zwischen einer relativen TUB- und CIE-Farbmtrik.

Zum Beispiel umfasst die relative CIE-Farbmtrik von CIELAB den Reflexionsteil  $R_{rN} = 0,036$  bis hinunter zur relativen Reflexion  $R_r = 0,0$ . Für matte Proben ist der Grenzwert  $R_{rN} = 0,036$ . In der Anwendung können retroreflektierende weiße Proben einen höheren  $R_r$ -Wert haben. Ebenso können hochglänzende schwarze Proben einen niedrigeren  $R_r$ -Wert besitzen

Im TUB-Modell sind die maximalen Reflexionsdaten der Farbpaare  $R-C$ ,  $Y-B$  und  $G-M$  gleich und gleich der Weißreflexion  $R_w = 0,900$  mit der relativen Reflexion  $R_{rw} = 5$ . Die Buntwerte  $C_{A2B2}$  sind gleich und die Farbwerte  $Y$  unterscheiden sich. Sie haben die höchsten Wert in der Nähe von Gelb und den niedrigsten Wert in der Nähe von Blau, siehe die  $Y$ -Werte in Bild 5.

Zum Beispiel unterscheiden sich die CIELAB Buntheiten  $C^*_{ab}$  und die  $RG$ - und  $YB$ -Komponenten  $a^*$  und  $b^*$  aller *Ostwald*-Farbpaare. Im TUBr-Modell sind die Buntwerte der Komponenten  $RG$  und  $YB$  jedoch wie erwartet antisymmetrisch, da sie sich zu einem Grau mischen.

**5. Gleiche Buntwerte  $C_{A2B2}$  und gleiche Bunttonwinkelunterscheidung  $\Delta h_{A2B2}$**



**Bild 6: Farbwerte von sechs Ostwald-Farben für CIE-Lichtarten D65, D50, A und E**  
 Zum Herunterladen dieses Bildes siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/CGZ9/CGZ90-7N.PDF>

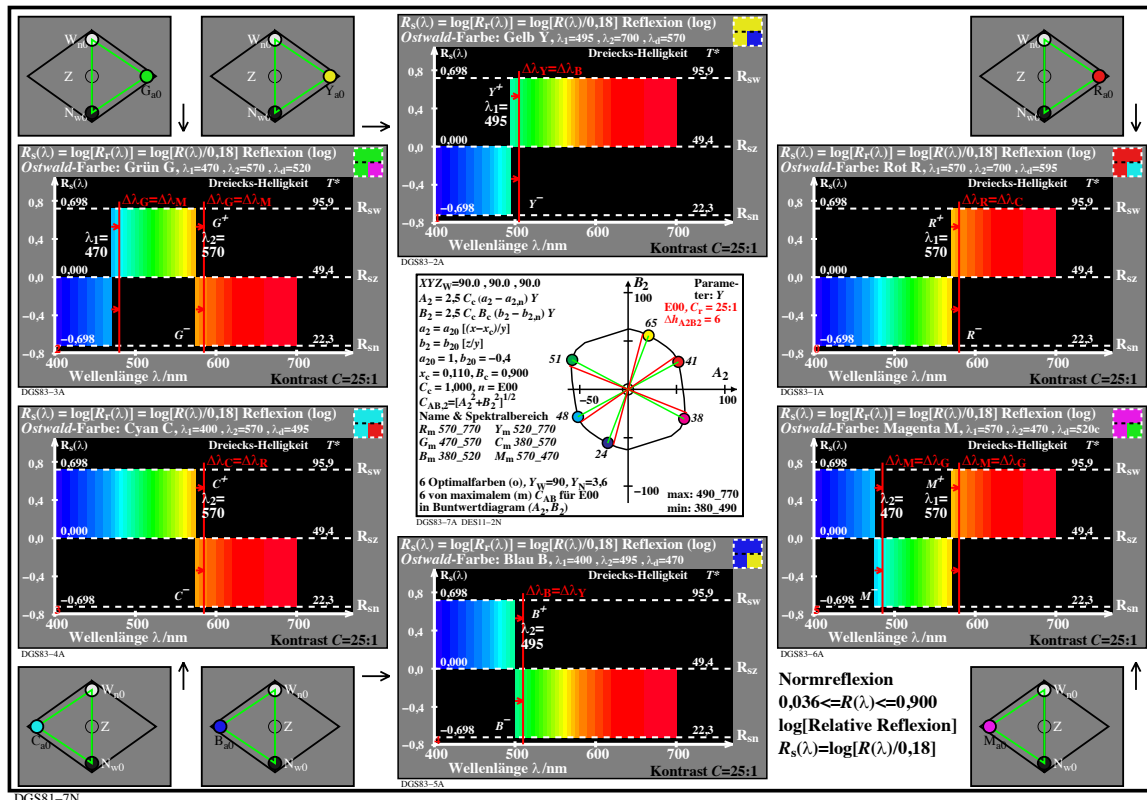
Für die Ostwald-Farben wurden CIE-Buntwerte für vier verschiedene CIE-Lichtarten berechnet. Die Buntwerte  $C_{A_2B_2}$  werden aus den CIE-Werten  $x, y, Y$  und einem Adaptationsparameter  $B_c$  ermittelt. Es gilt für  $B_c$ : 0,8 für D65, 1,0 für D50, 2,5 für A und 0,9 für die CIE-Lichtart E. Die Buntwertkomponenten  $A_2$  und  $B_2$  haben für alle Farbpaare den gleichen Betrag. Daher ist auch der radiale Buntwert  $C_{A_2B_2}$  für alle Farbpaare gleich. Zusätzlich ist der radiale Buntwert auch für alle Ostwald-Farben angenähert gleich. Dies wird nach dem Gesetz der Farbkonstanz bei einem Wechsel der Lichtart erwartet. Alle Werte des TUB-Modells sind antagonistisch und antisymmetrisch. Daher kann man annehmen, daß gleiche Bunttonwinkeländerungen  $\Delta h_{A_2B_2}$  gleiche visuelle Unterschiede erzeugen.

Für die Ostwald-Farbpaare unterscheiden sich die CIELAB-Buntheiten  $a^*$  und  $b^*$  um den Faktor 2 (hier nicht dargestellt). Daher sind die CIELAB-Buntheitswerte nicht antisymmetrisch und angenähert gleich. Dies sind Eigenschaften der linearen Buntwerte  $A_2$  und  $B_2$  des TUB-Modells. Die linearen Buntwerte des TUB-Modells ergeben wahrscheinlich auch eine gute Beschreibung der visuellen Buntheiten.

Auch bei Verwendung von nichtlinearen Formeln für den Transfer der Buntwerte zu den Buntheiten werden gleiche Buntheiten erwartet. Zum Beispiel kann das TUB-Modell mit linearen Buntwerten durch einen logarithmischen Transfer erweitert werden, der linear für kleine Buntheiten ist

*Anmerkung:* Einige Wellenlängengrenzen der Ostwald-Farben sind im Vergleich zu Bild 3 und 4 leicht verändert. Die Wellenlängengrenzen ändern sich um 5 nm mit der CIE-Lichtart, siehe in Bild 6 die Bereiche nach max rechts unten für die CIE-Lichtarten D65, D50, A und E.

## 6. Bunttonunterscheidung als Funktion von Bunttonwinkel $\Delta h_{A_2B_2}$ und Wellenlänge $\Delta \lambda$



**Bild 7: Spektral- und Buntwerte von sechs Ostwald-Farben für die CIE-Lichtart E mit Bunttonunterscheidung als Funktion von Bunttonwinkel  $\Delta h_{A2B2}$  für den Kontrast 25:1.** Zum Herunterladen dieses Bildes siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/DGS8/DGS81-7N.PDF>

Die Spektralfarbenmischung in Bild 7 erzeugt die buntesten Oberflächenfarben. Diese sind rechts oben für die sechs Farben zusammen mit komplementären Farben dargestellt. Nach den psycho-physikalischen Experimenten von *Holtmark und Valberg* (1969) ist die Schwelle der Wellenlängenverschiebung  $\Delta\lambda$  von komplementären Optimalfarben *R-C*, *Y-B*, und *G-M* ungefähr gleich, siehe die sechs Ostwald-Spektren. Der Verschiebung  $\Delta\lambda$  ist experimentell für das Paar *Y-B* kleiner als für die anderen beiden Paare (hier nicht dargestellt). In Bild 7 wird angenommen, dass die Bunttonschwelle (ein gerade wahrnehmbarer Unterschied JND) etwa 6 Grad für die 6 Farben des Ostwald-Farbkreises beträgt. Daher können etwa  $60 = (360/6)$  Bunttöne des sehr bunten Ostwald-Farbkreises unterschieden werden.

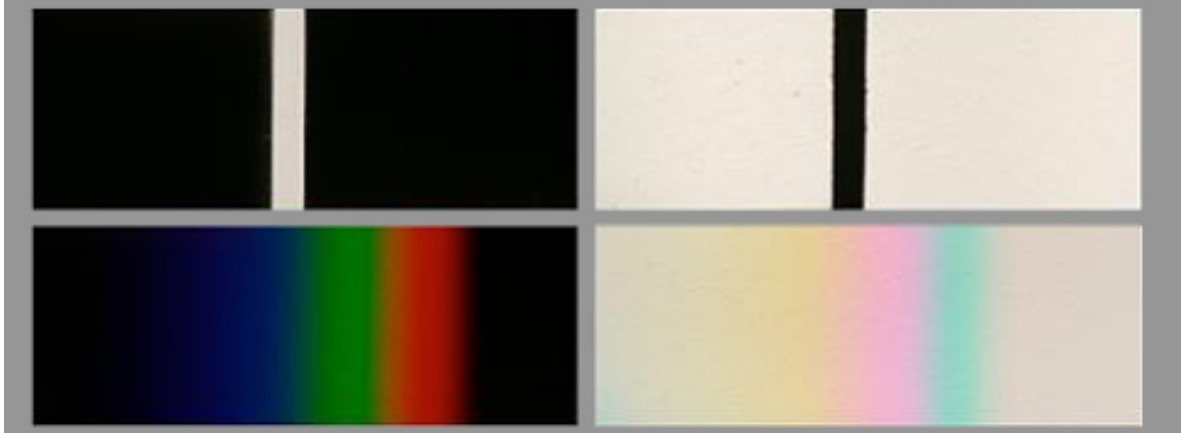
Bild 7 zeigt im mittleren Teil eine Bunttonwinkeländerung  $\Delta h_{A2B2} = 6$  Grad durch rote Linien vom Ursprung im Vergleich zu den grünen Linien. Den sechs roten Linien entsprechen sechs rote Linien in den sechs Ostwald-Spektren. Das TUB-Modell ergibt die gleiche Buntwinkelverschiebung  $\Delta h_{A2B2} = 6$  für alle sechs Ostwald-Farben. Diese Voraussage ist wegen angenähert konstanter Buntwerte bei alle Verschiebungen zu erwarten. Die nur geringe Änderung der Helligkeit im Vergleich zum Buntwert wird die Schwelle kaum beeinflussen.

*Holtmark und Valberg* (1969) haben benachbarte Optimalfarben in einer weißen Umgebung und in einem dunklen Raum verwendet. Dieser weiß-schwarze Zustand kann zu einer mittleren grauen Adaptation führen. Bei verschiedenen Adaptationen wird sich der Wert  $\Delta\lambda$  nur um einen konstanten Faktor ändern. Für purpurne Ostwaldfarben wurden die Komplementärwellenlängen  $\lambda_{1c}$  und  $\lambda_{2c}$  von *Holtmark und Valberg* angegeben.

*Holtmark, T. und Valberg, A. (1969), Colour discrimination and hue, Nature, Volume 224, October 25, S. 366-367.*  
**7. Experiment für gleiche Bunttonunterscheidung von komplementären Optimalfarben**



Es gibt ein visuelles Phänomen mit komplementären Optimalfarben, die durch eine positive und negative Maske erzeugt werden. Ein Prisma erzeugt visuell eine ähnliche Unterscheidung an entsprechenden Orten innerhalb beider Spektren. Dies deutet auf eine hohe Symmetrie im Sehvermögen hin und ist eine Grundlage für das TUB-Farbsehmodell. Darüber hinaus führt dies zu verbesserten Formeln für die Beschreibung der Farbschwelle, siehe CIE 230:2019 mit dem Titel: *Gültigkeit von Formeln zur Vorhersage kleiner Farbunterschiede*.



**Bild 8: Komplementäre Optimalfarben, die durch eine positive und negative Maske mit einem Prisma erzeugt werden.**

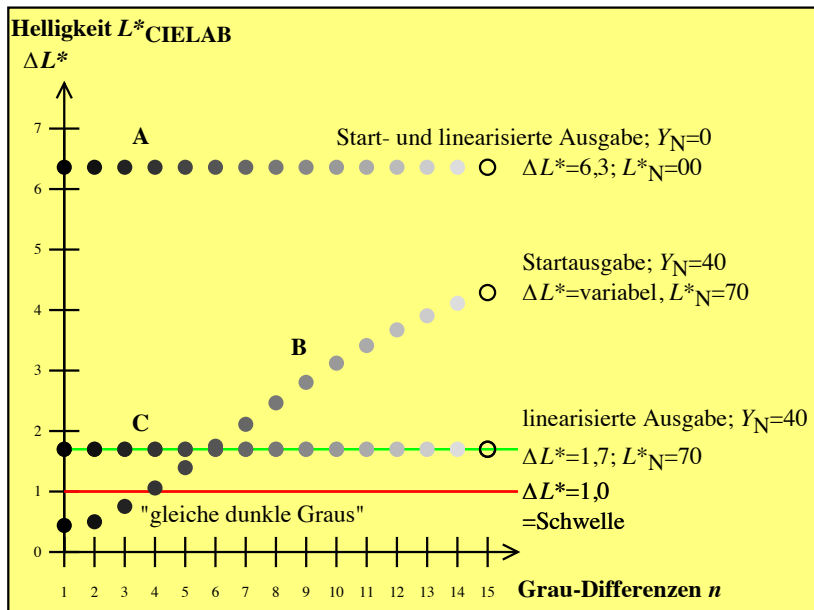
Bild 8 zeigt Optimalfarben, die durch eine Mischung aller Spektralfarben zwischen zwei Wellenlängengrenzen erzeugt werden. Wenn der Wellenlängenbereich sowohl für die positive als auch für die negative Maske etwa 100 nm beträgt, sehen wir in Bild 8 (links) drei Grundfarben *O*, *L* und *V* (Orangerot, Blattgrün und Violettblau nach ISO/IEC 15775:2022) und im Bild 8 (rechts) drei Komplementärfarben *C*, *M* und *Y* (Cyanblau, Magentarot und Gelb). Es ergibt sich das visuelle Phänomen, daß die visuelle Bunttonunterscheidung für die beiden Farbreihen *OLV* und *CMY* für entsprechende Stellen angenähert gleich ist. Dies gilt angenähert für jede Maskenbreite für alle positiven und negativen Masken und daher für *alle* komplementären Optimalfarben.

*Holtmark und Valberg* (1969) haben die Bunttonunterscheidung von Optimalfarben mit einem spektralen Farbintegrator gemessen. In einer weißen Umgebung in einem dunklen Raum mit zwei gleichen Masken haben sie zwei gleiche halbkreisförmige Zentralfelder von etwa 2 Grad Durchmesser erzeugt. Die Position einer Maske mußte verschoben werden, bis eine Bunttonschwelle sichtbar war. Das Gleiche wurde durch eine inverse Maske und für sechs Beobachter wiederholt. Die Zusammenfassung der Ergebnisse ergibt die Aussage: *Die Bunttonunterscheidung ist angenähert gleich mit einer negativen und positiven Maske.*

Die Farbänderung wird hauptsächlich durch eine konstante Bunttonwinkelverschiebung definiert, zum Beispiel  $\Delta h_{A2B2} = 6$ , siehe die Buntwerte in Bild 7. In den Experimenten von *Holtmark und Valberg* ändern sich die Buntwerte  $C_{A2B2}$  mit der Spaltbreite. Daher sind die experimentellen Ergebnisse von *Holtmark und Valberg* allgemeiner: *Alle komplementären Optimalfarben* und nicht nur komplementäre *Ostwaldfarben* erzeugen eine *gleiche* experimentelle Bunttonunterscheidung. Das TUB-Farbsehmodell bildet eine Grundlage, um auch diese zusätzlichen experimentellen Ergebnisse zu beschreiben. Hierzu dienen im folgenden experimentelle Ergebnisse über die Änderung von Helligkeit und Buntwert als Funktion Kontrastes.

*Danksagung: Ich danke Prof. Dr. Johannes Grebe-Ellis, dem Eigentümer der Website, <http://www.experimentum-lucis.de> für die Erlaubnis, in dieser Veröffentlichung ein Bild dieser Website (die viele weitere Referenzen enthält) zu verwenden.*

## **8. Änderung von Helligkeit und Helligkeitsschwelle für Kontraste $C=90:1$ und $2:1$**



**Bild 9. Helligkeitsunterschiede  $\Delta L^*_{\text{CIELAB}}$  einer 16stufigen Graureihe am *sRGB*-Display für großen Kontrast  $C>25:1$  und kleinen Kontrast  $C=2:1$ .**

Zum Herunterladen dieses Bildes siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/AGS4/AGS41-3N.PDF>

Nach Bild 9 beträgt die Helligkeitsdifferenz  $\Delta L^*_{\text{CIELAB}} = 6,3 (=100/15)$  für eine 16stufige Graureihe. Dieser Wert ergibt sich nach ISO 92421-306 für ein *sRGB*-Display nach IEC 61966-2-1 im Dunkelraum (ohne Raumlichtreflexion und ohne Augenmedienreflexion). Der Kontrast  $C=Y_W/Y_N$  ist in diesem Idealfall wegen  $Y_N=0$  für Schwarz  $N$  (=noir) unendlich groß. Jedoch in der Anwendung im Büro mit der Beleuchtungsstärke 500 lux und der Raumlichtreflexion 3,6% auf dem Display beträgt der Kontrast  $C=90:3,6=25:1$ .

In manchen Fällen erniedrigt sich der Kontrast auf  $C=2:1$ , zum Beispiel für  $C=(L_P+L_D)/L_D$ . In diesem Fall ist die Leuchtdichte  $L_P$  von einem digitalen Projektor und die Leuchtdichte  $L_D$  vom Tageslicht ( $D$ =Daylight) auf dem Projektionsschirm gleich.

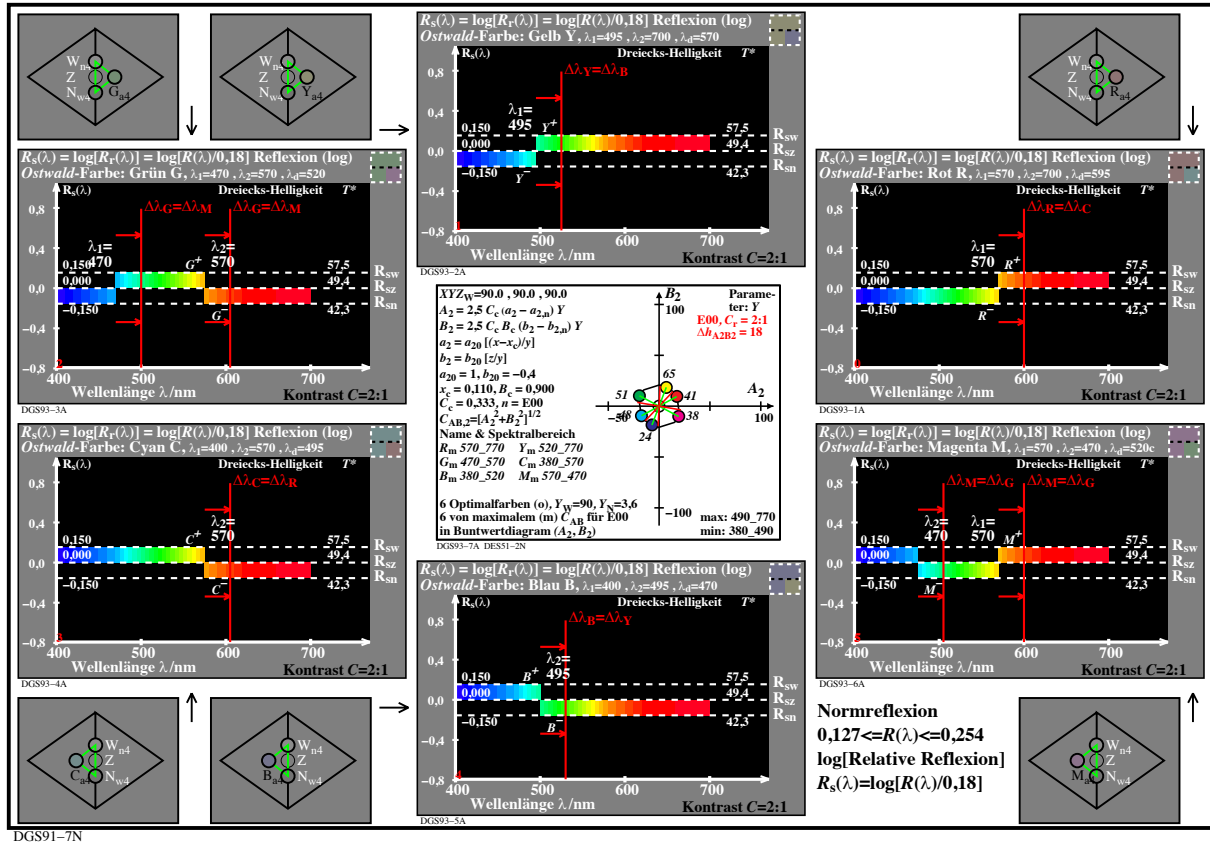
Nach Bild 9 nehmen in diesem Fall die Helligkeitsunterschiede der Graureihe im Vergleich zu  $\Delta L^*=6,3$  ab und sind *nicht mehr gleichabständig*. Für vier dunkle Stufen sind die berechneten Helligkeitsunterschiede kleiner als die Helligkeitsschwelle (threshold). Deshalb sind 4 von 16 Graustufen visuell nicht mehr unterscheidbar.

ISO 9241-306 beschreibt als Beispiel einen Gamma-Schieber auf dem *Mac*-Betriebssystem, der alle 16 Stufen mit konstantem kleineren Helligkeitsunterschied  $\Delta L^*=1,7$  erneut sichtbar macht. Damit wird die besondere Bedingung der Ergonomie für die Sichtbarkeit aller 15 Differenzen erfüllt. Im *Windows*-Betriebssystem gibt es bisher keine entsprechende Lösung. Jedoch erfüllen Anwendungsprogramme die gleiche Aufgabe. Auf beiden Systemen können zum Beispiel *ICC*-Profile mit 8 definierten Gammawerten verwendet werden.

Bei einer Reflexion von 1% der Augenmedien im Vergleich zu Weiß kann angenähert der Kontrast  $C=90:1$  und der Helligkeitsunterschied  $\Delta L^*=5,1$  betragen. Nach Bild 9 kann für den Kontrast  $C=2:1$  der Helligkeitsunterschied  $\Delta L^*=1,7$  sein. Die Bereiche von Helligkeit und Buntwert reduzieren sich auf angenähert 33%. Der dreidimensionale Farbumfang reduziert sich auf  $0,333^3=0,037$  oder angenähert 4% des Farbumfangs für  $C=25:1$ . Nach Bild 9 gilt die visuelle Folgerung:

*Auch beim Kontrast  $C=2:1$  sind 16 Grau- und Buntstufen unterscheidbar.*

## 9. Änderung von Buntwert und Bunttonwinkelschwelle für Kontraste $C=25:1$ und $2:1$



**Bild 10: Spektral- und Buntwerte von sechs Ostwald-Farben für die CIE-Lichtart E mit Bunttonunterscheidung als Funktion von Bunttonwinkel  $\Delta h_{A_2B_2}$  für den Kontrast 2:1.** Zum Herunterladen dieses Bildes siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/DGS9/DGS91-7N.PDF>

Bild 10 zeigt in der Mitte die Buntwerte, die für den Kontrast  $C=2:1$  um etwa den Faktor 3 kleiner sind als die Buntwerte für den Kontrast  $C=25:1$ , vergleiche Bild 7. Die entsprechende Reduktion der Helligkeitsunterscheidung um den Faktor 3 zeigt Bild 9.

Für die Bunttonunterscheidung  $\Delta h_{A_2B_2}$  gilt:

$$\Delta h_{A_2B_2} = C_{A_2B_2} \Delta h_{A_2B_2}. \quad [9]$$

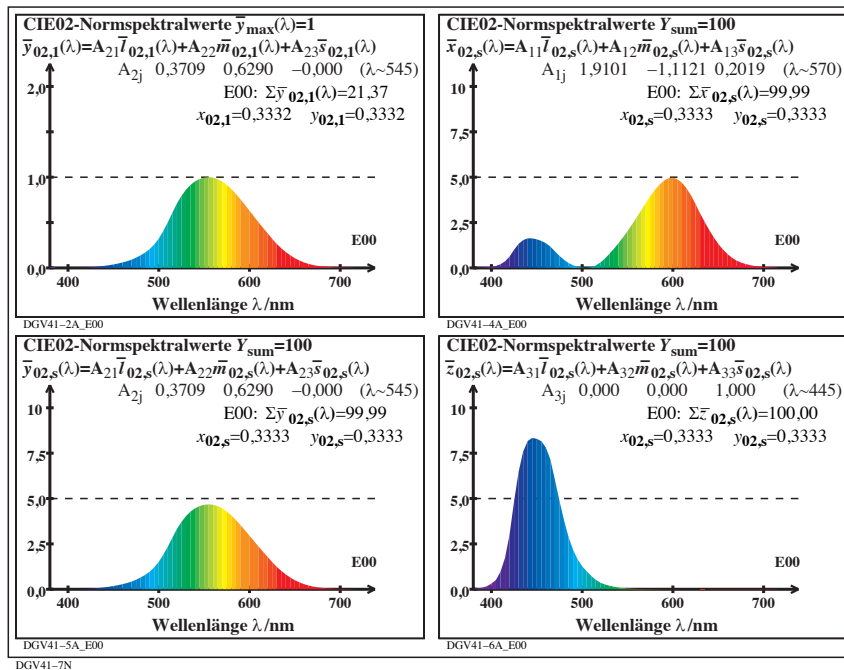
In Bild 10 ist der Buntwert  $C_{A_2B_2}$  um den Faktor 3 im Vergleich zu Bild 8 kleiner. Daher ist die Bunttonwinkeldifferenz  $\Delta h_{A_2B_2}=18$  um den Faktor 3 größer. Entsprechend erhöht sich die Wellenlängendifferenz  $\Delta\lambda$  für die sechs Ostwald-Farbspektren von Bild 10 im Vergleich zu Bild 7 um den Faktor 3.

Auch die Signale komplementärer Ostwald-Farben, zum Beispiel  $R^+$ ,  $R^-$ ,  $C^+$  und  $C^-$  sind in Bild 10 um den Faktor 3 kleiner als in Bild 7.

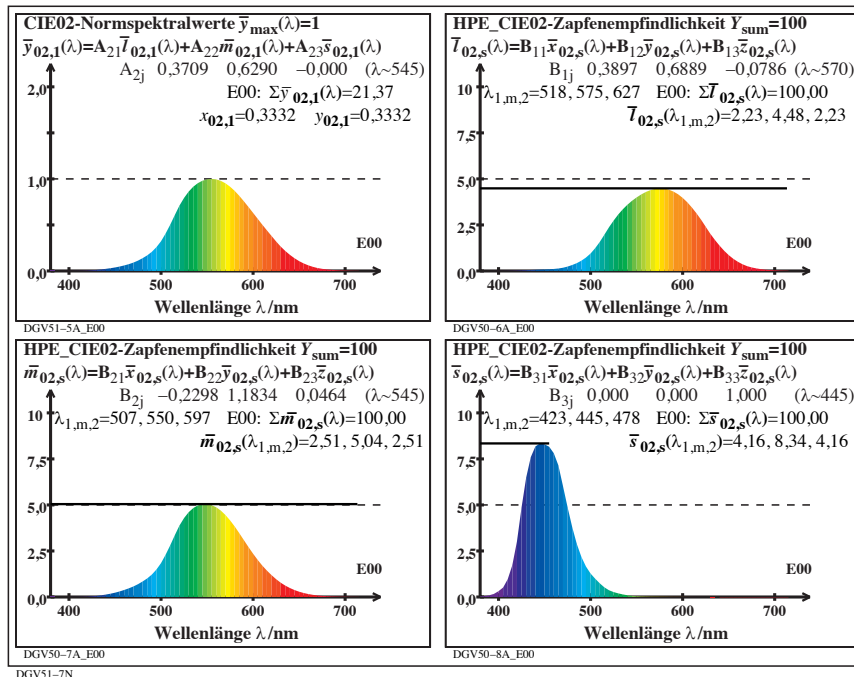
Bild 10 zeigt zusätzlich Bunttonschritte (grün) mit 5-stufigen Farbreihen (Index  $i=0$  bis 4). Zum Beispiel der Index  $w_i=4$  zeigt die verweißlichte Stufe  $w_4$  an. Entsprechend ist  $n_4$  die verschwartzlichte ( $n=noir$ ) Stufe  $n_4$ .

*Anmerkung:* Die Berechnung der vier Elementarfarben  $RYGB_e$  aus den sechs Ostwald-Gerätefarben  $RYGCBM_d$  ( $d=device$ ) wird in einer späteren Arbeit behandelt werden. Zum Beispiel Elementarrot  $R_e$  ist definiert nach dem *visuellen Kriterium weder gelblich noch bläulich*, siehe ISO/IEC 15775:2022.

## 10. Datentransfer von XYZ nach LMS mit Hunt-Pointer-Estevés (HPE)-Gleichungen



**Bild 11: HPE-Transfer von LMS nach XYZ für CIE-Lichtart E und 2-Grad-Beobachter**  
 Zum Herunterladen dieses Bildes siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/DGV4/DGV41-7N.PDF>



**Bild 12: HPE-Transfer von XYZ nach LMS für CIE-Lichtart E und 2-Grad-Beobachter**  
 Zum Herunterladen dieses Bildes siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/DGV5/DGV51-7N.PDF>

In Bild 11 sind alle spektralen CIE-Farbwerte auf die Summe 100 normiert. Das Maximum ist verschieden. In dem oberen linken Bild von Bild 11 sind die spektralen CIE-Farbwerte nahe 555 nm auf eins normiert. Diese Kurve wird spektrale Hellempfindlichkeit  $V(\lambda)$  genannt.

Bild 12 enthält die *Hunt-Pointer-Estevés* (HPE) Gleichungen, siehe CIE 015:2018, Gleichung D.9. Bild 11 zeigt die *inversen* Gleichungen, siehe CIE 015:2018, Gleichung D.59. Die HPE-Gleichungen in Bild 12 transformieren die spektralen CIE-Farbwerte auf die spektralen LMS (PDT) Zapfenempfindlichkeiten. Die Summe ist erneut auf 100 normiert.

## 12. Daten *CIEXYZ*, *TUBL\*ABCh<sub>AB2</sub>* und *CIELMS (PDT)* für *Ostwald*-Optimalfarben

<i>Ostw</i> -Daten <i>rgb*</i> , <i>XYZxy</i> und <i>L*ABCh<sub>AB2</sub></i> im <i>L*AB2JND</i> -Farbraum											
Normfarbwerte von Schwarz und Weiß: $Y_N=0,0$ , $Y_W=88,6$											
	<i>rgb*</i>	CIEXYZ-Daten					<i>L*ABCh<sub>AB2</sub></i> -Daten				
		$X_d$	$Y_d$	$Z_d$	$x_d$	$y_d$	$L_d^*$	$A_{2,d}$	$B_{2,d}$	$C_{AB2,d}$	$h_{AB2,d}$
<b>R<sub>d</sub></b>	<b>1 0 0</b>	55,28	36,99	0,67	0,594	0,397	67,26	55,67	31,68	64,06	<b>29</b>
<b>Y<sub>d</sub></b>	<b>1 1 0</b>	67,93	72,65	1,12	0,479	0,512	88,28	18,96	62,39	65,21	<b>73</b>
<b>G<sub>d</sub></b>	<b>0 1 0</b>	21,11	57,87	13,29	0,228	0,627	80,66	-61,74	39,78	73,45	<b>147</b>
<b>C<sub>d</sub></b>	<b>0 1 1</b>	28,91	51,60	95,79	0,163	0,292	77,04	-55,69	-31,68	64,07	<b>209</b>
<b>B<sub>d</sub></b>	<b>0 0 1</b>	16,26	15,93	95,34	0,127	0,124	46,89	-18,96	-62,38	65,20	<b>253</b>
<b>M<sub>d</sub></b>	<b>1 0 1</b>	63,08	30,71	83,17	0,356	0,173	62,26	61,72	-39,78	73,43	<b>327</b>
<b>N<sub>d</sub></b>	<b>0 0 0</b>	0,00	0,00	0,00	0,333	0,333	0,08	0,00	0,00	0,00	<b>0</b>
<b>W<sub>d</sub></b>	<b>1 1 1</b>	84,21	88,60	96,48	0,312	0,329	95,41	0,00	0,00	0,00	<b>0</b>
<b>N1<sub>d</sub></b>	<b>0,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,333	0,333	0,08	0,00	0,00	0,00	<b>0</b>
<b>W1<sub>d</sub></b>	<b>1,13</b>	95,05	100,01	108,30	0,313	0,329	100,00	0,16	0,48	0,51	<b>71</b>
<b>Z1<sub>d</sub></b>	<b>0,18</b>	17,10	17,99	19,49	0,313	0,329	49,48	0,03	0,08	0,09	<b>64</b>

DGV20-7N

**Bild 13.** CIE- und TUB-Daten der *Ostwald*-Farben (*Ostw*) für die CIE-Normlichtart D65, den CIE-2-Grad-Beobachter und die Normierung  $Y_W=88,60$  nach ISO 9241-306. Zum Herunterladen dieses Bildes siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/DGV2/DGV20-7N.PDF>

<i>Ostw</i> -Daten <i>rgb*</i> , <i>XYZxy</i> und <i>L* &amp; LMS(PDT)</i>										
Normfarbwerte von Schwarz und Weiß: $Y_N=0,0$ , $Y_W=88,6$										
	<i>rgb*</i>	CIEXYZ-Daten D65->E					<i>L* &amp; LMS(PDT)</i> -Daten			
		$X_d$	$Y_d$	$Z_d$	$x_d$	$y_d$	$L_d^*$	$L_P$	$M_D$	$S_T$
<b>R<sub>d</sub></b>	<b>1 0 0</b>	58,16	36,99	0,61	0,607	0,386	67,26	48,10	30,43	0,61
<b>Y<sub>d</sub></b>	<b>1 1 0</b>	71,47	72,65	1,03	0,492	0,500	88,28	77,82	69,59	1,03
<b>G<sub>d</sub></b>	<b>0 1 0</b>	22,21	57,87	12,20	0,240	0,627	80,66	47,56	63,94	12,20
<b>C<sub>d</sub></b>	<b>0 1 1</b>	30,41	51,60	87,96	0,178	0,303	77,04	40,48	58,15	87,96
<b>B<sub>d</sub></b>	<b>0 0 1</b>	17,11	15,93	87,55	0,141	0,132	46,89	10,76	18,99	87,55
<b>M<sub>d</sub></b>	<b>1 0 1</b>	66,36	30,71	76,37	0,382	0,177	62,26	41,02	24,64	76,37
<b>N<sub>d</sub></b>	<b>0 0 0</b>	0,00	0,00	0,00	0,354	0,336	0,08	0,00	0,00	0,00
<b>W<sub>d</sub></b>	<b>1 1 1</b>	88,60	88,60	88,60	0,333	0,333	95,41	88,60	88,60	88,60
<b>N1<sub>d</sub></b>	<b>0,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,354	0,336	0,08	0,00	0,00	0,00
<b>W1<sub>d</sub></b>	<b>1,13</b>	100,00	100,01	99,45	0,333	0,333	100,00	100,05	99,98	99,45
<b>Z1<sub>d</sub></b>	<b>0,18</b>	17,99	17,99	17,89	0,333	0,333	49,48	18,00	17,98	17,89

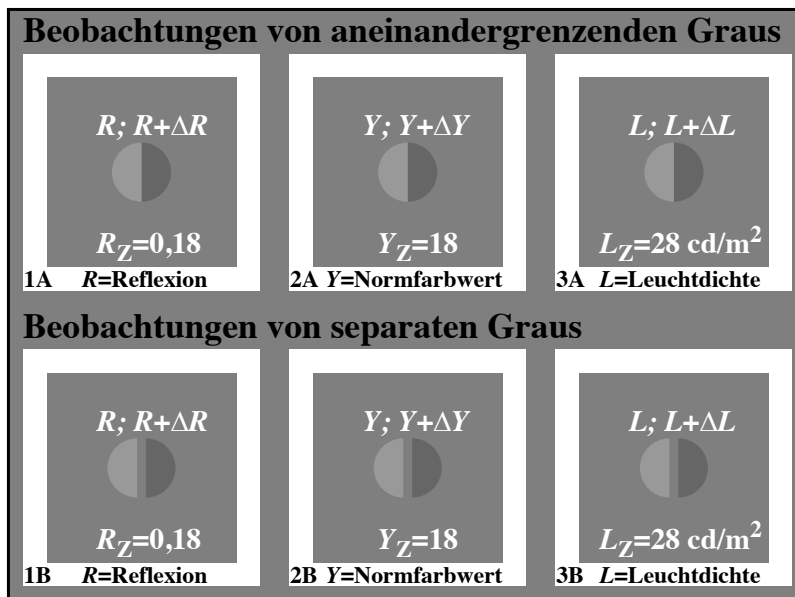
DGV30-7N

**Bild 14.** CIE- und LMS-Daten der *Ostwald*farben (*Ostw*) für die CIE-Lichtart (D65->E im Vergleich zu Bild 13) mit *HPE-LMS*-Daten berechnet nach CIE 015:2018. Zum Herunterladen dieses Bildes siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/DGV3/DGV30-7N.PDF>

Die Bilder 13 und 14 zeigen die Zusammenhänge der verschiedenen Farbkoordinaten, zum Beispiel zwischen *rgb\**, *CIEXYZ* und *LMS(PDT)*. Die Indizes P=Protanop, D=Deutanop und T=Tritanop beschreiben die drei Farbenfehlsichtigkeiten.

Die *LMS*-Werte der antagonistischen Farbpaaire *R-C*, *Y-B* und *G-M* summieren sich zu *LMS*-Werten von Weiß  $W_d$ . Diese und Kombinationen für Anwendungen werden noch diskutiert.

### 13 Beobachtungssituations Daten: Reflexion $R$ , CIE-Normfarbwert $Y$ und Leuchtdichte $L$



CGA10-2N

**Bild 15: Aneinandergrenzende (oben) und separate (unten) graue Proben, definiert durch die Reflexion  $R$ , den CIE-Normfarbwert  $Y$  und die Leuchtdichte  $L$ .**

Zum Herunterladen dieses Bildes siehe <http://farbe.li.tu-berlin.de/CGA1/CGA10-2N.PDF>

Nach Bild 15 kann man die Reflexion  $R$ , den CIE-Normfarbwert  $Y$  oder die Leuchtdichte  $L$  für die Berechnung des Kontrastes  $C$  verwenden. Alle sind proportional und daher ist das Verhältnis für die Kontrastwerte von  $R/\Delta R$  oder  $Y/\Delta Y$  oder  $L/\Delta L$  gleich. In dieser Arbeit wurde meist die Reflexion  $R$  verwendet. Damit wurde eine Schwierigkeit mit  $CIEXYZ$ -Daten vermieden. Diese hängen von der Lichtart und Adaptation ab. Diese sind für viele Anwender schwer verständlich, zum Beispiel im Bereich Design. Die Anwendungen der ISO-Prüfvorlagen ermöglichen eine spielerische Einführung in das Gebiet Farbe ohne  $XYZ$ -Werte.

An der visuellen Schwelle nehmen die gemessenen Unterschiede  $\Delta R$ ,  $\Delta Y$  oder  $\Delta L$  getrennter Proben im Vergleich zu den Unterschieden bei benachbarten Proben um mindestens den Faktor zwei zu, siehe

*Kittlmann, Philipp (2010), Visuelle Beurteilung von kleinen und großen Farbunterschieden und Beschreibung mit Farbabstandsformeln, Dissertation, Technische Universität Berlin, Fakultät IV, Elektrotechnik und Informatik (132 Seiten, 9,8 MB, PDF-Format), siehe <http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2010/2634/>.*

Für viele Anwendungen erfordert die Farbbeurteilung bei variabler geometrischer und zeitlicher Darbietung und Beobachtung mit vielen Kontrastverhältnissen mehr Forschung. Diese Arbeit und Video-Konferenzen versuchen grundlegende Eigenschaften und Anwendungen zu beschreiben, siehe zum Beispiel die Farbschleife in Bild 1.

*Anmerkung: Für Themen und Termine von Videotreffen über das TUB-Relativitätsmodell des Farbsehens für Licht- und Oberflächenfarben und Anwendungen, siehe die TUB-Webseite: <http://farbe.li.tu-berlin.de/indexDE.html>*

*Diese Webseite enthält Informationen zur Registrierung und zur Benachrichtigung via Email.*

*Danksagung: Ich danke Prof. Florian Süßl (BHT Berlin), Detlef Ruschin (HHI Berlin) und Thorstein Seim (Universität Oslo) für ihre Beiträge zur Verbesserung dieser Arbeit. Weitere Teile des TUB-Farbsehmodells für Licht- und Körperfarben sind in Vorbereitung, siehe unter Veröffentlichungen: <http://farbe.li.tu-berlin.de/XY91FDE.html>*