

„Red Tail“ :
Auswirkung eines zusätzlichen
tiefroten Spektralanteils auf das
Weißlicht von LED-Scheinwerfern
- am Beispiel der Beleuchtung von Hauttönen im
TV-Bereich

Bachelor-Thesis
zur Erlangung des akademischen Grades B.Sc.

Matthias Held
2182712



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Design, Medien und Information
Department Medientechnik

Erstprüfer: Prof. Dr. Roland Greule
Zweitprüfer: Dipl. Ing. (FH) Matthias Allhoff

vorläufige Fassung vom 9. Juli 2018

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Grundlagen und Kenngrößen der Lichttechnik	6
2.1	Lichtstrom Φ	6
2.2	Beleuchtungsstärke E	6
2.3	Lichtstärke I	6
2.4	Leuchtdichte L	6
3	Farbe und Farbräume	7
3.1	Farben mit dem Auge sehen	7
3.2	RGB Farbraum	11
3.3	CIE-XYZ Farbraum	13
3.4	CIE-LUV Farbraum	15
3.5	CIE-LAB Farbraum	15
4	Lichtechnische Parameter	16
4.1	CIE: Color Rendering Index (CRI)	16
4.2	NIST: Color Quality Scale (CQS)	19
4.3	EBU: Television Lighting Consistency Index (TLCI)	21
4.4	IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition (TM-30-15)	25
5	Leuchtmittel	30
5.1	Glühlampe	30
5.2	Halogenglühlampe	30
5.3	Entladungslampen	30
5.4	LEDs	30
6	Vormessungen	31
6.1	Ziel	31
6.2	Aufbau	31
6.3	Fazit aus der Vormessung	31
7	Hauptmessung	32
7.1	Messaufbau	32
8	Messergebnisse	33
8.1	Unterkapitel mit Mathematik, Bildern und Querverweisen	33

Inhaltsverzeichnis

9 Umfrage	34
9.1 Unterkapitel mit Mathematik, Bildern und Querverweisen	34
10 Umfrageergebnisse	35
10.1 Unterkapitel mit Mathematik, Bildern und Querverweisen	35
11 Auswertung aller Ergebnisse	36
11.1 Unterkapitel mit Mathematik, Bildern und Querverweisen	36
12 Fazit	37
12.1 Unterkapitel mit Mathematik, Bildern und Querverweisen	37
Abbildungsverzeichnis	38
Tabellenverzeichnis	40
Literaturverzeichnis	41

Abstract

Form and layout of this L^AT_EX-template incorporate the guidelines for theses in the Media Technology Department „Richtlinien zur Erstellung schriftlicher Arbeiten, vorrangig Bachelor-Thesis (BA) und Master-Thesis (MA) im Department Medientechnik in der Fakultät DMI an der HAW Hamburg“ in the version of December 6, 2012 by Prof. Wolfgang Willaschek.

The thesis should be printed single-sided (simplex). The binding correction (loss at the left edge due to binding) might be adjusted, according to the type of binding. This template incorporates a binding correction as BCOR=1mm (suitable for adhesive binding) in the L^AT_EX document header.

This is the english version of the opening abstract (don't forget to set L^AT_EX's language setting back to ngerman after the english text).

Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Auswirkung eines zusätzlichen tiefroten Spektralan-teils auf das kaltweiße Lichtspektrum von LED-Scheinwerfern. Es soll dabei überprüft werden, ob Personen unter diesen Umständen im Kamerabild natürlicher aussehen, wie es in der „Red Tail“ - Theorie der mo2 design GmbH angenommen wird.

Zunächst wird auf wichtige Kenngrößen der Lichttechnik eingegangen und verschiedene Leuchtmittel und lichttechnische Parameter werden erläutert. Im Folgenden werden die Messungen beschrieben.

Bei diesen wird ein LED-Scheinwerfer und ein rotgefilterter PAR-Scheinwerfer, der den „Red Tail“ simulieren soll, auf einen Messpunkt ausgerichtet. Der LED-Scheinwerfer wird zuerst allein auf eine kaltweiße Referenzlichtquelle bestmöglich abgeglichen und spektral vermessen. Anschließend wird der rotgefilterter PAR-Scheinwerfer dazugeschaltet und auch dieses Lichtgemisch wird auf die Referenzlichtquelle abgeglichen und spektral vermessen. Bei der Auswertung werden die gemessenen lichttechnischen Parameter betrachtet und zusätzlich werden bei einer Umfrage Bilder verglichen, auf denen Probanden verschiedener Hauttöne mit und ohne „Red Tail“ beleuchtet wurden.

1 Einleitung

2 Grundlagen und Kenngrößen der Lichttechnik

2.1 Lichtstrom Φ

2.2 Beleuchtungsstärke E

2.3 Lichtstärke I

2.4 Leuchtdichte L

3 Farbe und Farbräume

In diesem Kapitel wird auf die Grundlagen der Farben und Farbräume eingegangen.

3.1 Farben mit dem Auge sehen

Es gibt zwei verschiedene Fälle, in denen der Mensch die Gesichtsempfindung Farbe verspürt: Entweder leuchtet ein Objekt von selbst, sodass dessen Licht aus einem Spektralbereich des sichtbaren Spektrums ins Auge gelangt und dann im Zusammenspiel mit dem Gehirn ein Farbreiz $\phi(\lambda)$ erzeugt. In diesem Fall nennt man das Objekt einen Selbstleuchter. Die zweite Möglichkeit ist, dass das Objekt von einer Lichtquelle beleuchtet wird und das reflektierte Lichtspektrum wahrgenommen wird. Der Gegenstand absorbiert und transmittiert bestimmte spektrale Anteile des Lichts und reflektiert den für den Farbton verantwortlichen Rest (Kapitel 2). Daher erscheint beispielsweise ein roter Apfel von blauem Licht beleuchtet unbunt, da kein roter Spektralanteil im blauen Licht vorhanden ist. In diesem zweiten Fall spricht man von Körperfarben¹.

Damit ein Mensch so einen Farbreiz wahrnehmen kann, gibt es im Auge zwei Arten von lichtempfindlichen Rezeptoren in der Netzhaut, die für unsere Farbwahrnehmung verantwortlich sind: Zapfen und Stäbchen.

Die Stäbchen nehmen verschiedene Helligkeitseindrücke wahr, können aber keine Farben unterscheiden. Daher sind sie für das skotopische Sehen (Nachtsehen) von $3 \cdot 10^{-6} \frac{cd}{m^2}$ bis $0,03 \frac{cd}{m^2}$ verantwortlich². Die verschiedenen spektralen Anteile des Lichts wirken sich auf die Zapfen aus und verantworten so den Farbeindruck. Außerdem sind die Zapfen für das photopische Sehen (Tagessehen), ab einer Leuchtdichte von $3 \frac{cd}{m^2}$, zuständig³.

Der Mensch kann Wellenlängen von 380nm bis 780nm wahrnehmen. Jedoch ist das Auge nicht für alle Farben gleich empfindlich. Grüne Gegenstände (555nm) wirken immer heller als blaue (485nm) oder rote (680nm). Dieser Sachverhalt wurde mit der $V(\lambda)$ -Kurve aufgezeigt (Abbildung 3.1).

¹(Hentschel 1993: 103)

²DocCheck Flexikon (2014)

³DocCheck Flexikon (2014)

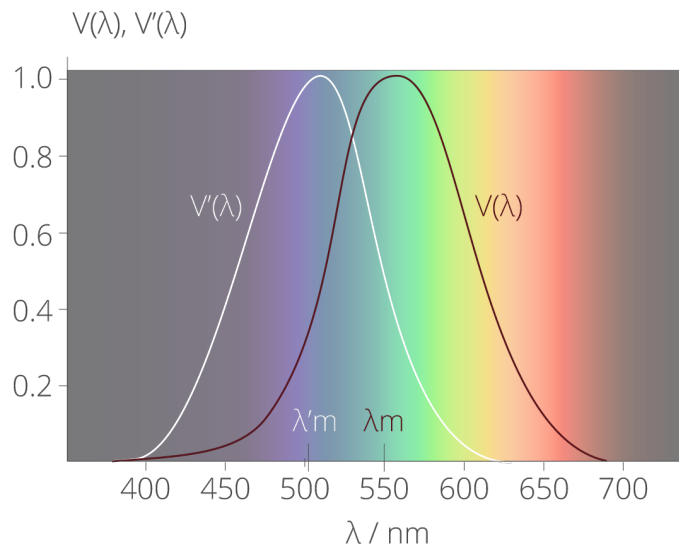


Abbildung 3.1: Die $V(\lambda)$ -Kurve zeigt, wie das Auge die verschiedenen Wellenlänge beim photopischen Sehen gewichtet. Die weiße Kurve ($V'(\lambda)$) beschreibt, wie sich das Farbsehen beim Nachtsehen verschiebt. ⁴

Mit den Zapfen und Stäbchen kann ein Mensch bis zu 200 verschiedene Farbtöne wahrnehmen. Wenn man die verschiedenen möglichen Helligkeiten und Weißkombinationen dieser Farbtöne zusätzlich in Betracht zieht, kann man von ca. 20 Millionen unterschiedlichen Farben sprechen, die ein Mensch erkennen kann ⁵.

Um all diese Farben unterscheiden zu können gibt es nach Young und Helmholtz drei Rezeptortypen. Die „Trichromatische Theorie“ besagt, dass es grüne, blaue und rote Zapfen gibt, die unterschiedlich empfindlich für die jeweiligen Spektralanteile des Lichtes sind. Aus diesen drei Farbinformation (RGB-Werte) entsteht dann im Gehirn eine Farbe. Auf diese Weise lassen sich aber nicht alle Phänomene der Farbwahrnehmung erklären. 1878 hat Hering eine andere Theorie entwickelt, wie Farben wahrgenommen werden und diese „Gegenfarbentheorie“ genannt. Die Theorie besagt, dass es immer zwei Farben gibt, die sich gegensätzlich verhalten: rot und grün, blau und gelb und der unbunte Gegensatz schwarz (dunkel) und weiß (hell).

Nach ein paar Jahren der Uneinigkeit, welche der genannten Theorie denn nun korrekt ist, hat 1905 v. Kries mit seiner „Zonentheorie“ herausgestellt, dass beide Theorien zugleich zutreffen. In der ersten Zone wird im Auge nach der „Trichromatische Theorie“ eine Farbe als RGB-Stimulus wahrgenommen, dieser wird dann in der zweiten Zone nach der „Gegenfarbentheorie“ im Gehirn mit den drei Farbgegensätzen ausgewertet ⁶ (Abbildung 3.2).

⁴<https://www.gigahertz-optik.de/assets/Uploads/Abb.-II.13-neu-v03.png>

⁵Bladowski & Maus (2010)

⁶(Hentschel 1993: 104)

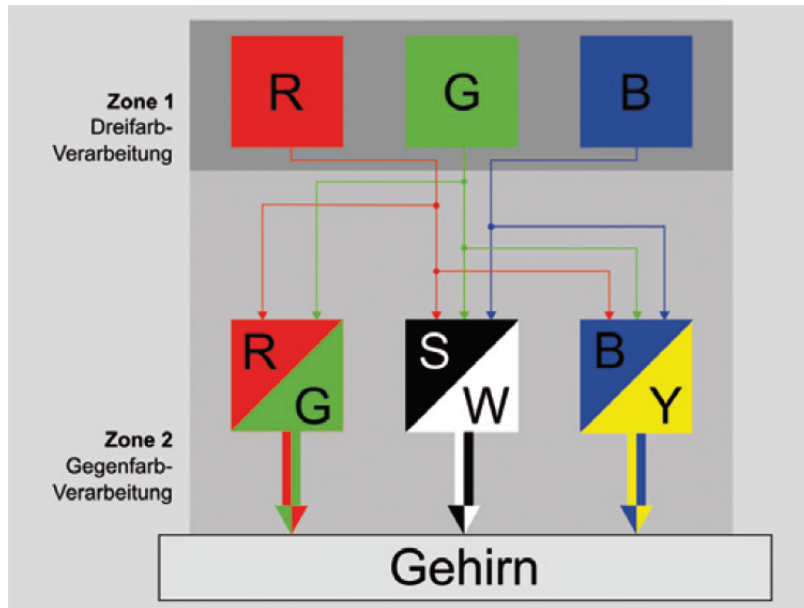


Abbildung 3.2: Darstellung der „Zonentheorie“ von v. Kries ⁷

Bei der additiven Farbmischung werden die Spektralanteile verschiedener Farbtöne als Mischfarbe erkannt. Dies kann auf unterschiedliche Weisen passieren. Entweder treffen zwei verschiedene Spektralanteile auf den gleichen Punkt auf der Netzhaut und lösen so einen Farbreiz aus. Oder das Licht verschiedener Wellenlängen trifft auf unterschiedliche Teile der Netzhaut, die so dicht aneinander sind, dass das Auge daraus eine Farbe mischt (örtliche Nähe). Oder derselbe Punkt auf der Netzhaut wird von zwei verschiedenen Spektralanteilen mit einer Wechselfrequenz von $f \geq 25Hz$ getroffen (zeitliche Nähe). Oder das Licht verschiedener Wellenlängen trifft auf unterschiedliche Teile der Netzhaut, die so dicht aneinander sind, dass das Auge daraus eine Farbe mischt.

Grundsätzlich werden bei jeder Art der additiven Farbmischung die Strahlungsleistungen der Spektralanteile $\Phi_{e\lambda,i}(\lambda)$ zusammenaddiert⁸(Gleichung 3.1).

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \Phi_{e\lambda,1}(\lambda) + \Phi_{e\lambda,2}(\lambda) + \Phi_{e\lambda,3}(\lambda) \quad (3.1)$$

1853 hat Grassmann zur additiven Farbmischung drei allgemein gültige Regeln aufgestellt ⁹:

⁷(Greule 2014: 153)

⁸(Greule 2014: 83)

⁹(Hentschel 1993: 105)

1. Für das Ergebnis einer additiven Farbmischung ist nur das Aussehen, nicht die spektrale Zusammensetzung der Komponenten maßgebend.
2. Alle Farbmischungen verlaufen stetig.
3. Zum Festlegen einer Farbe sind drei Bestimmungsstücke notwendig und hinreichend.

Die erste Regel beschreibt beispielweise das Verhalten einer Tomate unter gemischtem und ungemischtem magentafarbenen Licht. Wird die Tomate von einem magentanen Licht bestrahlt, dessen Spektrum nur Anteile im Magentabereich hat, so wird die Tomate weitestgehend unbunt erscheinen, weil diese alle spektralen Anteile des Lichts, außer den roten, absorbiert. Falls man aber rotes Licht mit blauem Licht mischt und so die selbe Lichtfarbe wie von dem reinen magentafarbenen Licht erzeugt, so erscheint die Tomate unter diesem Licht wiederum trotzdem rot, da die Rot-Anteile im Spektrum vorhanden sind. Man kann jedoch mit dem bloßen Auge diese beiden Farben nicht unterscheiden (metamere Farben), da der Mensch die spektrale Zusammensetzung von Licht nicht wahrnimmt.

Die zweite Regel zeigt auf, dass bei der additiven Farbmischung die Farben stets ineinander übergehen und kein Sprung dabei entsteht, wenn zwei Farben zu einer Mischfarbe werden.

Die dritte Regel besagt, dass die additive Farbmischung beispielsweise über die Grundfarben Rot, Blau und Grün definiert werden kann. In der Abbildung 3.3 ist dargestellt wie aus den Grundfarben die Farben gemischt werden.

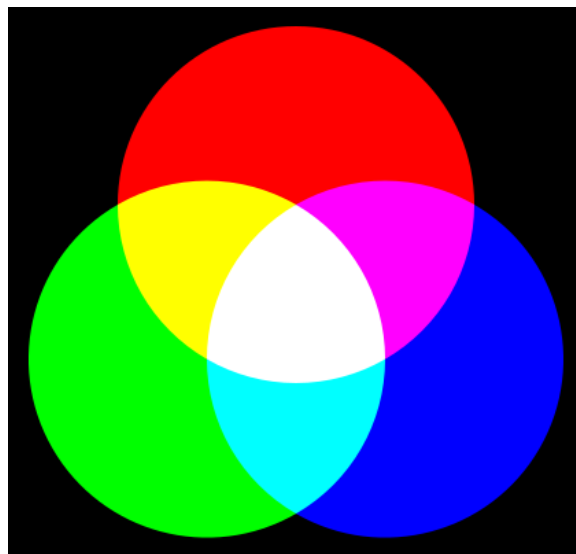


Abbildung 3.3: Die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau der additiven Farbmischung ergeben zusammen weiß (unbunt).¹⁰

¹⁰<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e0/Synthese%2B.svg/420px-Synthese%2B.svg.png>

Bei der subtraktiven Farbmischung geht es nicht um die Farbwahrnehmung des Auges, sondern um Licht im rein physikalischen Sinne. Ein subtraktives Farbgemisch entsteht, wenn die Transmissions- und Reflektionseigenschaften zweier Farben miteinander multipliziert werden¹¹ (Gleichung 3.2).

$$T(\lambda) = T_1(\lambda) \cdot T_2(\lambda) \cdot T_3(\lambda) \quad (3.2)$$

Die Formel stellt ein Beispiel für das Produkt der Transmissionswerte dar. Hierbei handelt es sich um ein wesentlich komplizierteren Prozess als bei der additiven Farbmischung. Da durch diese Multiplikation der Farben ein spektraler Anteil entfällt, spricht man von einer subtraktiven Farbmischung, obwohl das Produkt der Farbeigenschaften gebildet wird (Abbildung 3.4).

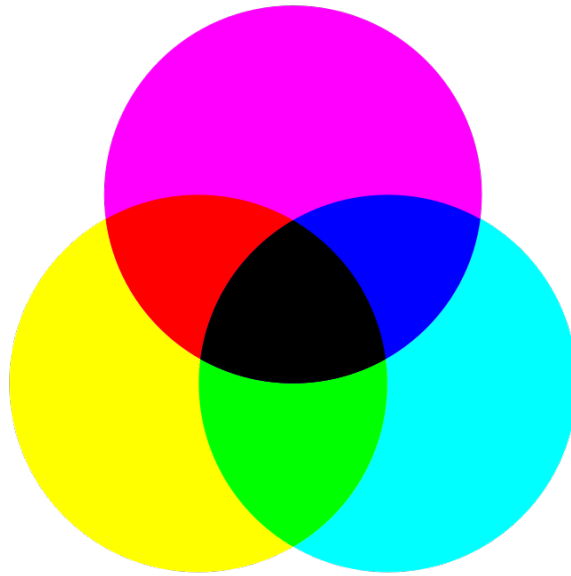


Abbildung 3.4: Die drei Grundfarben Cyan, Magenta und Gelb der subtraktiven Farbmischung ergeben zusammen schwarz (unbunt).¹²

Wenn man alle drei Grundfarben der subtraktiven Farbmischung mischt entsteht schwarz, weil dann alle Anteile im Licht abgezogen wurden.

3.2 RGB Farbraum

Durch die Festlegung verschiedener Farbräume hat die CIE die Farben von Licht immer besser einordnen und beschreiben können. Der große Vorteil bei diesen Farbräumen besteht darin, dass man durch eine lineare Transformation von einer Farbraum-

¹¹(Greule 2014: 84)

¹²https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/64/CMY_ideal_version_rotated.svg/649px-CMY_ideal_version_rotated.svg.png

darstellung in die nächste Wechslen kann und die spektrale Empfindlichkeitskurve mit transformiert wird. So wird sichergestellt, dass jede Farbe nach der natürlichen Wahrnehmung des Menschen gewertet wird. Angefangen hat all dies mit dem RGB-Farbraum. Dieser Farbraum wird mit den drei Grundfarben der additiven Farbmischung, den Primärvalenzen Rot, Grün und Blau aufgespannt. Die Farben ergeben jeweils die Ecken und in der Mitte entsteht so der Weißpunkt des Farbraumes. Eine Farbe lässt sich dann über die Farbwertanteile r , g und b in diesem Farbraum orten¹³ (Gleichung 3.3).

$$r = \frac{R}{R + G + B}, \quad g = \frac{G}{R + G + B}, \quad b = \frac{B}{R + G + B} \quad (3.3)$$

Der RGB-Farbraum ist so konstruiert, dass jede Kombination aus den drei Farbkordinaten zusammen 1 ergibt. Es reichen also zwei Koordinaten aus, um den sogenannten Farbort bestimmen zu können, da sich die dritte Koordinate von selbst erschließt (Gleichung 3.4).

$$b = 1 - r - g \quad (3.4)$$

Man kann den RGB-Farbraum auch dreidimensional als Würfel aufspannen. Dort ist die Farbe schwarz der Ursprung und weiß die Kombination aus allen drei Farbvektoren (Abbildung 3.5).

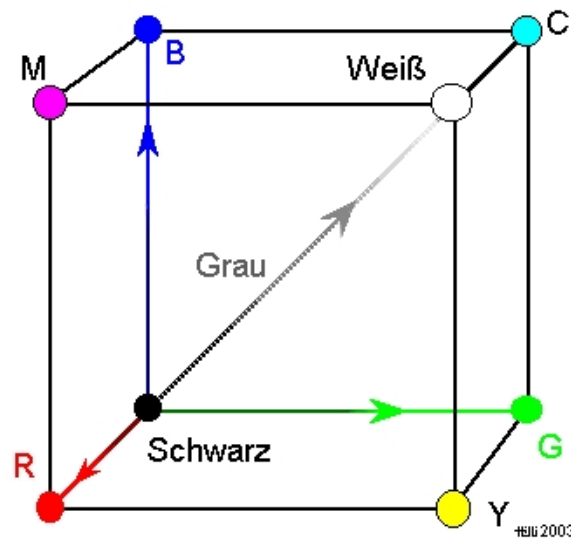


Abbildung 3.5: Beim RGB-Würfel werden alle Primärvalenzen R,G, B als gleich lange Vektoren angenommen.¹⁴

¹³(Hentschel 1993: 106)

3.3 CIE-XYZ Farbraum

Der RGB-Farbraum kann nicht alle Farben des sichtbaren Spektrum abbilden. Wright und Guild haben dazu Tests mit einem Monochromator gemacht. Ein Proband, der Farbflächen von 2° Gesichtsfeldgröße sieht, sollte mit 700nm rot, 546nm grün und 435nm blau die gesehene Farbe nachmischen. Bei einer Referenzfarbe von 500nm blau-grün gab es keine Möglichkeit, diese Farbe mit den drei RGB-Farben zu mischen. Es musste sogar auf der Referenzfarbe rot dazugemischt werden, damit man auf das Blau-Grün abgleichen konnte. Dies würde ein negativen Rot-Anteil im RGB-Farbraum bedeuten, den es so nicht geben kann. Daher hat die CIE 1931 ein virtuelles Primärvalenzsystem erarbeitet¹⁵.

Im CIE-XYZ Farbraum gibt es die Primärvalenzen X, Y und Z, die aus einer linearen Transformation des RGB-Farbraum entstanden sind¹⁶ (Gleichungen 3.5 - 3.7).

$$X = R_x \cdot R + G_x \cdot G + B_x \cdot B \quad (3.5)$$

$$Y = R_y \cdot R + G_y \cdot G + B_y \cdot B \quad (3.6)$$

$$Z = R_z \cdot R + G_z \cdot G + B_z \cdot B \quad (3.7)$$

Der Y-Wert entspricht dabei der Farbfunktion y_λ , die der $V(\lambda)$ -Kurve (Abbildung 3.1) gleicht, und steht daher für die Helligkeit der Farbe. Dies ist eine Erweiterung zum RGB-Farbraum, in dem die Helligkeit nicht direkt mit einbezogen wurde.

Aus diesen Primärvalenzen lassen sie dich Farbanteile ausrechnen, die auf der Farbtabelle des CIE-XYZ Farbraums dargestellt werden (Gleichung 3.8).

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}, \quad z = 1 - x - y \quad (3.8)$$

Auch hier reichen zwei Normfarbwertanteile aus, um den Farbort (x,y) zu bestimmen. Aus x und y kann jedoch kein Rückschluss auf die X, Y und Z Normalvalenzen gezogen werden und so ist zum Beispiel eine Bestimmung der Helligkeit (Y) aus dem Farbort nicht möglich¹⁷.

Die Grenzen des mit x und y aufgespannten Farbraums erstrecken sich von 380nm blau über grün und gelb zu 780nm rot. Die beiden Enden des Farbraumes sind auf der gegenüberliegenden Seite über die theoretische Purpur-Graden miteinander verbunden. Auf diese Weise schließt der CIE-Farbraum alle sichtbaren Farben mit ein. Der Unbuntpunkt liegt bei $x = y = 0,33$ (Abbildung 3.6).

¹⁵(Greule 2014: 77)

¹⁶(Greule 2014: 76-77)

¹⁷(Greule 2014: 79)

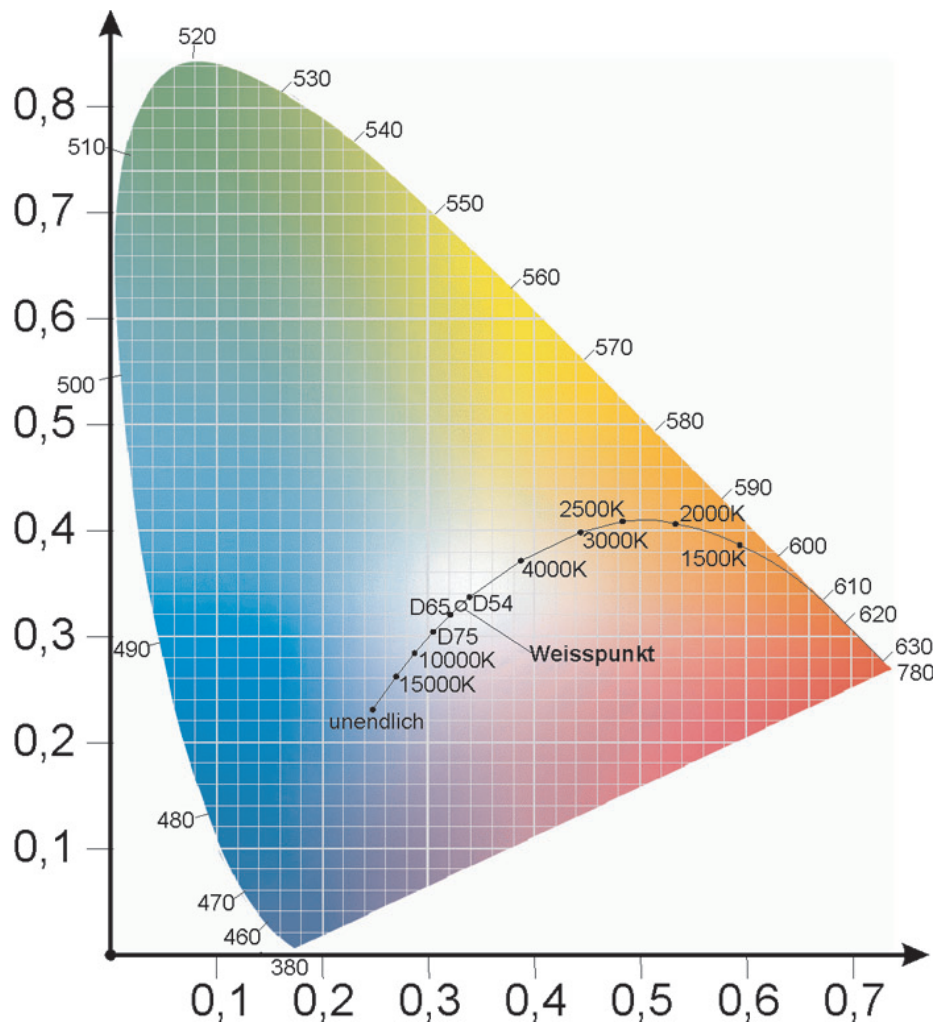


Abbildung 3.6: Darstellung der CIE-XYZ Farbtabelle eines 22° Normalbeobachter. Diese Bezeichnung entstammt aus den Tests von Wright und Guild. ¹⁸

Im XYZ-Farbdiaagramm ist der Plank'sche Kurvenverlauf eingezeichnet. Wenn ein Farbpunkt auf diese Kurve trifft wird ihm die jeweilige Farbtemperatur zugeschrieben. Landet der Farbpunkt in der Nähe dieser Kurve spricht man von einer korrelierten Farbtemperatur (CCT). Bei Entladungslampen und LED-Scheinwerfer spricht man von CCT, weil diese versuchen bestimmte Farbtemperaturen mit ihrem Licht nachzuahmen. Es wurden so genannte „Geraden ähnlichster Farbtemperatur“ bestimmt, die anzeigen welche korrelierte Farbtemperatur vom Farbpunkt getroffen wird (Abbildung 3.7)

¹⁸<https://www.production-partner.de/wp-content/uploads/2018/02/Farbdreieck.jpg>

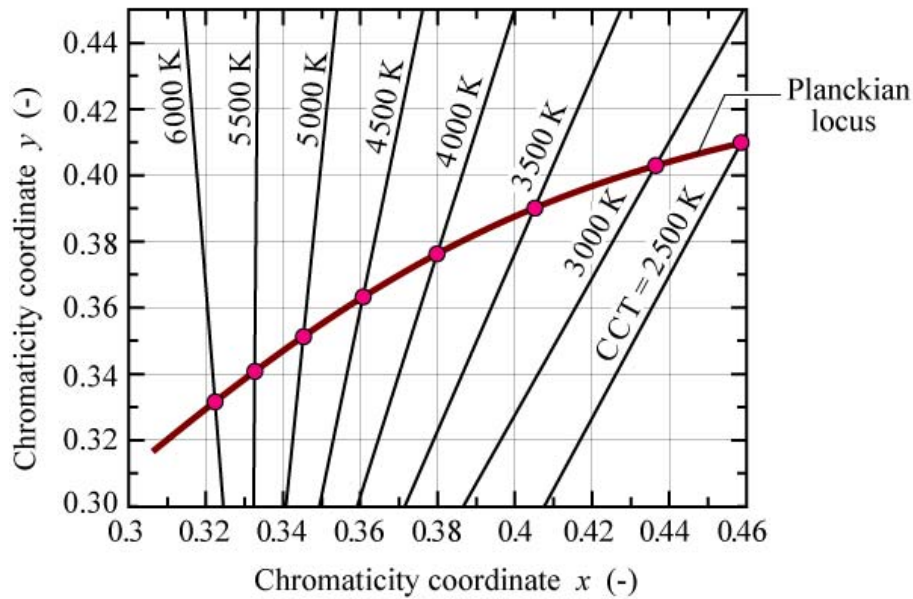


Abbildung 3.7: Zoomansicht des XYZ-Farbraumes mit den „Geraden ähnlichster Farbtemperatur“¹⁹

Trifft eine Leuchte mit ihren x , y Normfarbwertanteilen auf einem Punkt über der Plank'schen Kurve, so erscheint der Weißton grünstichig, trifft sie unter die Kurve, dann erscheint das Weiß magentastichig. Ist der Farbtort zu weit von der Plank'schen Kurve entfernt, kann keine Farbtemperatur bestimmt werden.

Außerdem sind in diesem Beispiel die von der CIE festgelegten Normweißlichtarten D54, D65 und D75 angegeben. Dieses Normweißlicht stellt ein einheitlichen Referenzwert für Leuchten dar.

3.4 CIE-LUV Farbraum

3.5 CIE-LAB Farbraum

¹⁹<http://www.light.fi/blog/wp-content/uploads/2016/04/xyChromaticity-diagram.png>

4 Lichttechnische Parameter

Es gibt mehr als vierzig verschiedene Methoden, um die Farbwiedergabe einer Leuchte zu beurteilen. In diesem Kapitel sollen die in der Medien- und TV-Branche typischen Farbwiedergabeindizes vorgestellt und deren Relevanz für die Messung mit dem „Red Tail“ aufgezeigt werden.

4.1 CIE: Color Rendering Index (CRI)

Da der Farbort allein keine eindeutige Aussage über die Zusammensetzung des Spektrums zulässt, wurde 1965 von der Commission Internationale de l’Eclairage ein Testverfahren entwickelt, mit dem man die Farbwiedergabe (Color Rendering Index) einer Leuchte bestimmen kann. Dafür hat man acht Referenzfarben festgelegt. Bei einer CRI-Messung überprüft man also, wie gut eine Lichtquelle diese Körperfarben wiedergeben kann. Es wird dabei zwischen einem schwarzen Strahler ($< 5000\text{K}$) und Tageslicht ($> 5000\text{K}$) differenziert. Die gemessenen Unterschiede zu den Referenzfarben werden mit Werten von 0 bis 100 gewichtet (R_1 - R_8), wobei ein Wert von 100 aussagt, dass die Farbe bestmöglich wiedergegeben wird. Zuerst werden die einzelnen Indexwerte R_i aus den Farbdifferenzen ΔE_i berechnet (Gleichung 4.1)¹.

$$R_i = 100 - 4,6 \cdot \Delta E_i \quad (4.1)$$

Diese acht Werte werden schließlich arithmetisch gemittelt und es ergibt sich der Gesamtwert R_a (Gleichung 4.2)².

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (4.2)$$

In der DIN 6169 werden zur besseren Beurteilung der Farbwiedergabe die R_a -Werte in verschiedene Stufen unterteilt (Tabelle 4.1).

Ein hoher R_a -Wert beschreibt aber nur bedingt die Farbwiedergabe einer Leuchte, da beispielsweise keine Angabe über die Sättigung der Farben gemacht wird. Außerdem sind die acht Referenzfarben nur Pastelltöne, weil der CRI damals für Glühlicht entwickelt wurde. Gesättigte Farben fließen nicht in die Bewertung mit ein. Das wirkt sich auch auf die Vergleichbarkeit von Leuchten aus. Zwei Scheinwerfer mit dem selben

¹Davis & Ohno (2006)

²Production Partner (2018)

³(Hentschel 1993: 111)

Stufen des CRI		
1A	$R_a \geq 90$	sehr hohe Anforderung
1B	$90 > R_a \geq 80$	sehr hohe Anforderung
2A	$80 > R_a \geq 70$	hohe Anforderung
2B	$70 > R_a \geq 60$	hohe Anforderung
3	$60 > R_a \geq 40$	mittlere Anforderung
4	$40 > R_a \geq 20$	geringe Anforderung

Tabelle 4.1: R_a eingeteilt in verschiedene Stufen³

R_a -Wert von 90 können sehr unterschiedliche Spektren haben und damit sehr unterschiedlich Farben darstellen, trotz gleichem Farbwiedergabeindex. Außerdem kann man nur schwer eine Aussage darüber machen, ob sich eine Leuchte mit einem guten CRI für Personenbeleuchtung eignet, weil Rottöne und Hauttöne in diesem Bewertungsverfahren fehlen.

Leuchtstofflampen nutzten den CRI aus, indem durch gezielte schmalbandige Peaks im Spektrum die Referenzfarben getroffen werden. Auf diese Weise kann zwar ein hoher CRI-Werte erreicht werden, aber kein breitbandiges und ausgefülltes Lichtspektrum entstehen. Daher sah sich die CIE gezwungen den Farbwiedergabeindex zu erweitern. In dem neueren R_e -Wert gibt es nun auch gesättigte Farben und eine Hautfarbe wird miteinbezogen (Abb. 4.1).

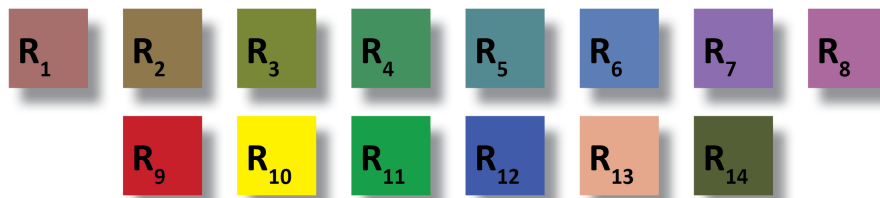


Abbildung 4.1: Alle Referenzfarben des Farbwiedergabeindexes: R_1 Altrosa, R_2 Senfgelb, R_3 Gelbgrün, R_4 Hellgrün, R_5 Türkisblau, R_6 Himmelblau, R_7 Asterviolett, R_8 Fliederviolett, R_9 Rot gesättigt, R_{10} Gelb gesättigt, R_{11} Grün gesättigt, R_{12} Blau gesättigt und R_{13} Rosa (Hautfarbe), R_{14} Blattgrün⁴

⁴https://www.elementalLED.com/wp/wp-content/uploads/2015/08/CRI_chart.jpg

Bei einer warmweißen LED konnte ein CRI von 82 gemessen werden (Abbildung 4.2). Der R_e -Wert ist naturgemäß schlechter als der R_a -Wert, aber auch dieser ist mit 77 noch akzeptabel, wenn man bedenkt, dass der R_9 -Wert nur 15 Punkte erbringt. Diese Leuchte entspricht „sehr hohen Anforderungen“ (Tabelle 4.1) und ist damit nach Definition sehr gut in der Farbwiedergabe. Jedoch ist der R_9 -Wert ein Hinweis darauf, dass man mit dieser Aussage vorsichtig sein sollte.

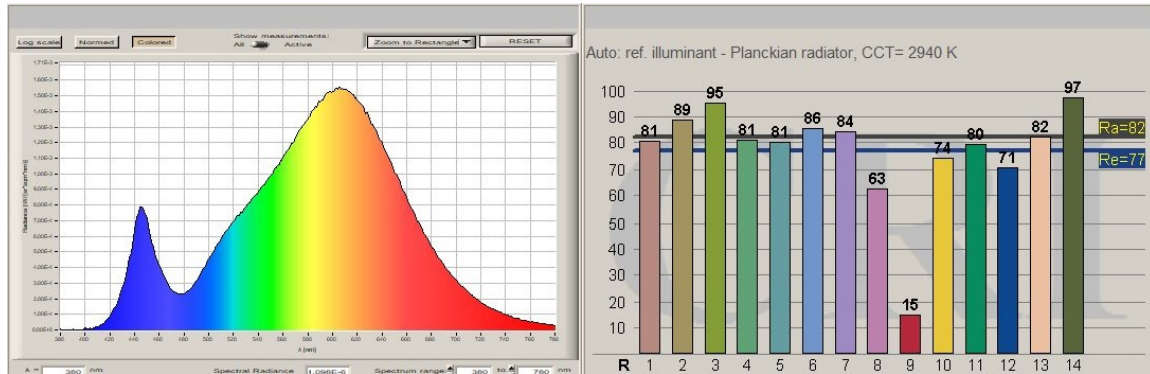


Abbildung 4.2: Messung einer warmweißen LED-Leuchte (Ausschnitt aus dem Demofile des Programmes „LiVal“ von der Firma JETI): Links ist das Lichtspektrum der Leuchte dargestellt, rechts die gemessenen CRI-Werte ⁵

Daher ist auch mit einem einzigen Rot- und Hautton der CRI zu wenig ausschlaggebend, um damit eine Leuchte für Personenbeleuchtung zu bewerten (Kap. 3.1). Zusätzlich entsteht bei LED-Leuchtmitteln ein ähnliches Problem, wie bei den Leuchtstoffröhren. Man kann das Spektrum mit den Peaks gut auf die Referenzfarben ausrichten, ohne das gesamte Spektrum abdecken zu müssen. Gerade bei LED-Leuchten kann dieses Verhalten des CRI ausgenutzt werden, um kritische Bereiche zu verschleiern. Zusätzlich wird dies durch die arithmetische Mittlung der Referenzfarbwerte begünstigt. Ein, zwei schlechtere Werte mindern den R_a -Wert nicht beträchtlich. Beispielsweise wird bei Weißen-LEDs der fehlende Rotanteil nur am niedrigen R_9 -Wert sichtbar, aber im CRI-Wert sind diese Schwächen einer LED-Leuchte kaum erkennbar ⁶. Der CRI kann daher eher als richtungsweisend betrachtet werden: Eine Leuchte mit guter Farbwiedergabe wird auch immer einen guten CRI-Wert haben. Zum Vergleich für Leuchten eignen sich andere Farbwiedergabewerte heutzutage besser ⁷.

Aus diesen Gründen und der Erkenntnis der CIE, „dass die CRI-Methode generell nicht anwendbar ist, um eine Anzahl von Lichtquellen gemäß ihrer Farbwiedergabe einzuordnen, wenn weiße LEDs darunter sind“⁸, wird sich diese Arbeit hauptsächlich auf andere Farbwiedergabewerte konzentrieren, den CRI aber mit aufführen, weil

⁶Davis & Ohno (2006)

⁷Production Partner (2018)

⁸(Commission Internationale de l'Eclairage 2007: VI)

dieser in der Scheinwerfer- und Fernsehbranche (noch) einen hohen Stellenwert inne hat.

4.2 NIST: Color Quality Scale (CQS)

Der Color Quality Scale, der von dem National Institute of Standards and Technology (NIST) erarbeitet wurde, orientiert sich an der Grundidee des CRI und versucht dessen Probleme anzugehen und ihn zu ersetzen. So gibt es fünfzehn voll saturierte Referenzfarben, die auch auf LED-Leuchten anwendbar sind. Über Skaleneffekte soll der CQS auch indirekt eine Aussage über die Farbwiedergabe von Pastelltönen ermöglichen (Abb. 4.3).



Abbildung 4.3: Alle Referenzfarben des CQS mit voller Sättigung⁹

Bei dem Farbvergleich des CRI wurden weniger Punkte für eine Farbe vergeben, wenn diese übersättigt wurde, also die Leuchte eine höhere Farbigkeit hatte als das Referenzlicht des CRI. Wenn beispielsweise eine Oberfläche eines Objekts beleuchtet wird, kann eine übersättigte Farbe jedoch hilfreich sein und ist daher nicht pauschal negativ einzuordnen. Deswegen wertet der CQS eine Übersättigung der Farbe nicht, nur eine Abweichung von Farbton oder Helligkeit wird bestraft. Außerdem errechnet sich der CQS aus dem quadratischen Mittel (root-means-square) der einzelnen Farben und es ist deutlicher erkennbarer, wenn einzelne Farbe schlechte Werte erzielen (Gleichung 4.3)¹⁰.

$$\Delta E_{rms} = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} \Delta E_i^2} \quad (4.3)$$

Aus diesem Farbdifferenzwert wird ähnlich wie beim CRI (Gleichung 4.1) ein Farbwiedergabewerte errechnet (Gleichung 4.4).

$$Q_{f,rms} = 100 - 3,0305 \cdot \Delta E_{rms} \quad (4.4)$$

⁹<https://www.lemoledlight.com/wp-content/uploads/2016/04/LED-Lighting-CRI-5.jpg>

¹⁰Davis & Ohno (2006)

Schließlich wird der CQS auf Werte von 0 bis 100 skaliert. Dadurch entfallen beim CQS negative Farbwerte, die beim CRI sehr schwierig zu interpretieren sind (Gleichung 4.5).

$$Q_f = 10 \ln(e^{\frac{Q_{f,rms}}{10}} + 1) \quad (4.5)$$

Der CQS wird mit seinen fünfzehn Referenzfarborten (abhängig von der Farbtemperatur) im CIELAB-Farbraum eingezeichnet. Da die Abstände von Farborten in diesem Farbraum in etwa wahrgenommenen Farbunterschieden entsprechen (Kap. 3.5), kann man gut erkennen, wie stark sich die Farbwiedergabe einer Leuchte den Referenzwerten ähneln (Abb. 4.4 und 4.5).

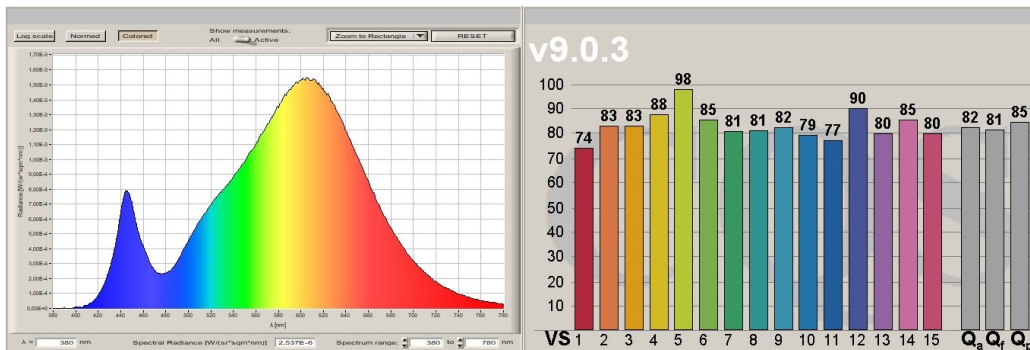


Abbildung 4.4: Ausschnitt aus dem Programm „LiVal“ von der Firma JETI: Demo Spektrum einer warmweißen LED (2942K) mit $Q_f = 81$

Auf die in den Abbildung 4.4 und 4.5 erwähnten Werte Q_a (optimierter CQS-Wert für kaum übersättigte Farben), Q_p (optimierter CQS-Wert für viele übersättigte Farben) und Q_g (optimierter CQS-Wert im Zusammenhang mit dem Gamut Area Index) wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen, weil sie über den Rahmen dieser Bachelorarbeit hinaus gehen¹¹.

Da der CQS ähnlich wenige Referenzfarben nutzt wie der CRI, und keine besondere Aussage über die Farbwiedergabe von Hauttönen im TV-Bereich liefert, wird bei den Messungen dieser Arbeit das Hauptaugenmerk nicht auf dem CQS liegen. Der CQS eignet sich besser zur Einschätzung der Farbwiedergabe ohne Bezug zu einer TV-Kamera.

¹¹(Khanh & Bodrogi & Vinh 2007: 60-62)

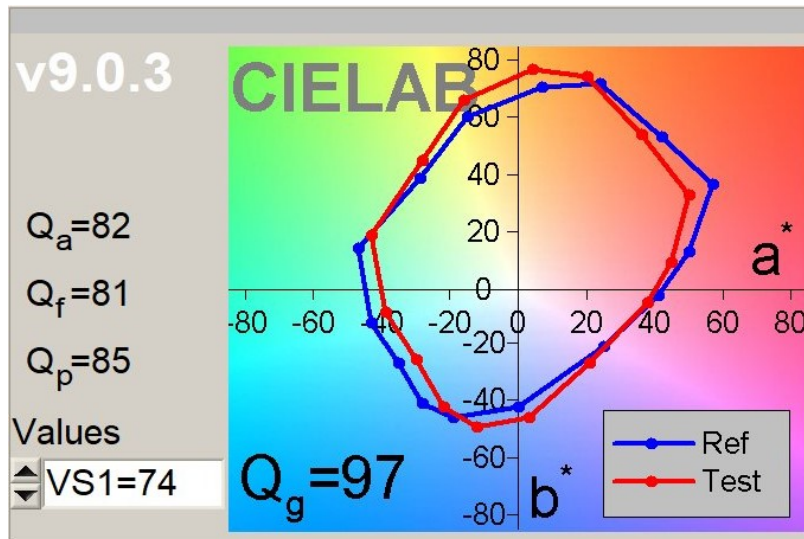


Abbildung 4.5: Ausschnitt aus dem Programm „LiVal“ von der Firma JETI: Die fünfzehn Referenzfarben (blau) im CIELAB-Farbraum im Vergleich zu den gemessenen Werten (rot)

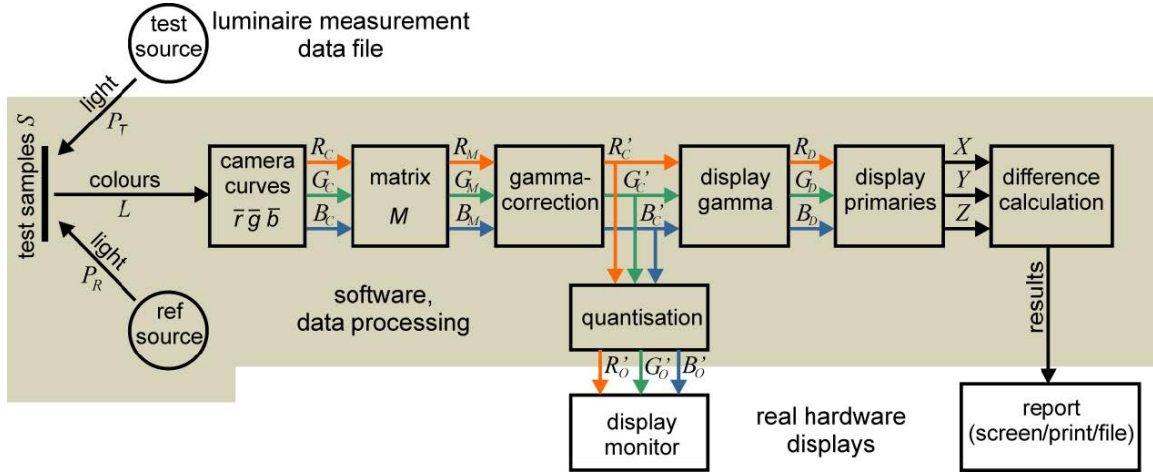
4.3 EBU: Television Lighting Consistency Index (TLCI)

Der CRI-Wert einer Leuchte ist im Fernsehbereich kaum aussagekräftig, weil kein Bezug zur Videokamera besteht und die Farbwiedergabe von menschlichen Hauttöne kaum gemessen wird. Daher hat die European Broadcast Union (EBU) 2012 einen neuen Farbwiedergabe bestimmt, der auf den Film- und Fernsehbereich zugeschnitten ist, den Television Lighting Consistency Index. Wie eine Messung des TLCI vonstattengeht ist in diesem Blockschaltbild der EBU verdeutlicht (4.6):

Die von der Kamera gefilmten Farben werden dann in einem Datenfile gespeichert. Die Daten werden analysiert, um die Farbtemperatur zu bestimmen und so die Referenzdaten zu erstellen.

Zur Ermittlung des TLCI wird eine Testtafel mit 24 Farben von einer „Standartkamera“ gefilmt. Diese Tafel wird von der zu testenden Leuchte bestrahlt. Die Kamera ist an einen „Standartbildschirm“ angeschlossen, auf dem die TLCI-Messergebnisse angezeigt werden. Im ersten Schritt gewichtet die Kamera die reflektierten Farben mit ihren \bar{r} -, \bar{g} - und \bar{b} -Kamerakurven und die Farbtemperatur wird bestimmt. Die so entstandenen R_C , G_C und B_C -Werte werden dann im zweiten Schritt farblich abgeglichen (R_{Cb} , G_{Cb} und B_{Cb}) und mit einer linearen Matrix M bewertet, um die Werte

¹²(Roberts 2015: 15)


 Abbildung 4.6: Blockschaltbild einer TLCI-Wertbestimmung ¹²

des RGB-Signals zu erhalten .

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,182 & -0,209 & 0,027 \\ 0,107 & 0,890 & 0,003 \\ 0,004 & -0,134 & 1,094 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{Cb} \\ G_{Cb} \\ B_{Cb} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Ein Weißabgleich wird vorgenommen und die RGB-Werte werden in einer zweiten Matrix verrechnet, damit die Sättigungswerte der Farben stimmen (Empfehlung der EBU: 90 % Sättigung). Im nächsten Schritt werden die R_M , G_M und B_M -Werte der einzelnen Farben von der Gammakurve der Kamera vorverzerrt. Beim Bildschirm angekommen werden die $R'_G'B'$ -Werte der Farben mit der Gammakurve des Bildschirms wieder entzerzt (Empfehlung der EBU: $\gamma = 2,4$). Für die 24 Farben werden dann im vorletzten Schritt mit der XYZ()-Matrix die Farbkoordinaten X,Y und Z für den Bildschirm errechnet. Schließlich wird mit den Referenzenfarbwerten der selben Farbtemperatur die Farbunterschiede ermittelt (Gleichung 4.7).

$$\Delta E_a^* = \left(\sum_{i=1}^{18} (\Delta E_i^*)^4 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4.7)$$

Das Ergebnis wird als TLCI-Wert ausgegeben. Für optimale Werte wird mit $k = 3,16$ (eine Tageslichtleuchtstoffröhre erreicht dabei den TLCI-Wert 50) und $p = 4$ (für ein balanciertes Verhältnis zwischen hohen und niedrigen Werten) gerechnet¹³ (Gleichung 4.8).

$$Q = \frac{100}{1 + \left(\frac{\Delta E^*}{k} \right)^p} \quad (4.8)$$

¹³(Roberts 2015: 16-22)

Der TLCI lässt wie der CQS keine negativen Ergebnisse zu (Kapitel 4.2) und die Werte von 0-100 sind für den Coloristen in der Nachbearbeitung des Videomaterials wie folgt zu deuten(Tabelle 4.2):

Abstufungen des TLCI	
$100 \geq Q_a \geq 85$	Farben korrigierbar bzw. nicht notwendig
$85 > Q_a \geq 75$	nach Korrektur noch akzeptabel
$75 > Q_a \geq 50$	Aufbereitung sehr zeitaufwendig
$50 > Q_a \geq 25$	nicht mehr zu retten - verbesserbar
$25 > Q_a \geq 0$	ist und bleibt nicht akzeptierbar

Tabelle 4.2: Q_a eingeteilt in verschiedene Stufen¹⁴

Anhand der Tabelle ist eine Art Kostenvergleich möglich, in dem die Farbwiedergabequalität einer Leuchte gegen den Nachbearbeitungsaufwand des Coloristen gegengerechnet werden kann. Der TLCI gibt sogar eine Empfehlung ab, an welchen Parametern der Colorist Verbesserungen vornehmen muss (Abbildung 4.7).

¹⁴Production Partner (2018)

Die Messung des TLCI-Werts ergibt ein Ergebnisprotokoll, bestehend aus drei Abschnitten: eine Farbtabelle mit den 24 Farbfeldern, eine Empfehlung für den Coloristen zur nachträglichen Bildbearbeitung und ein Vergleich von Referenz- und Testspektrum (Abbildung 4.7):

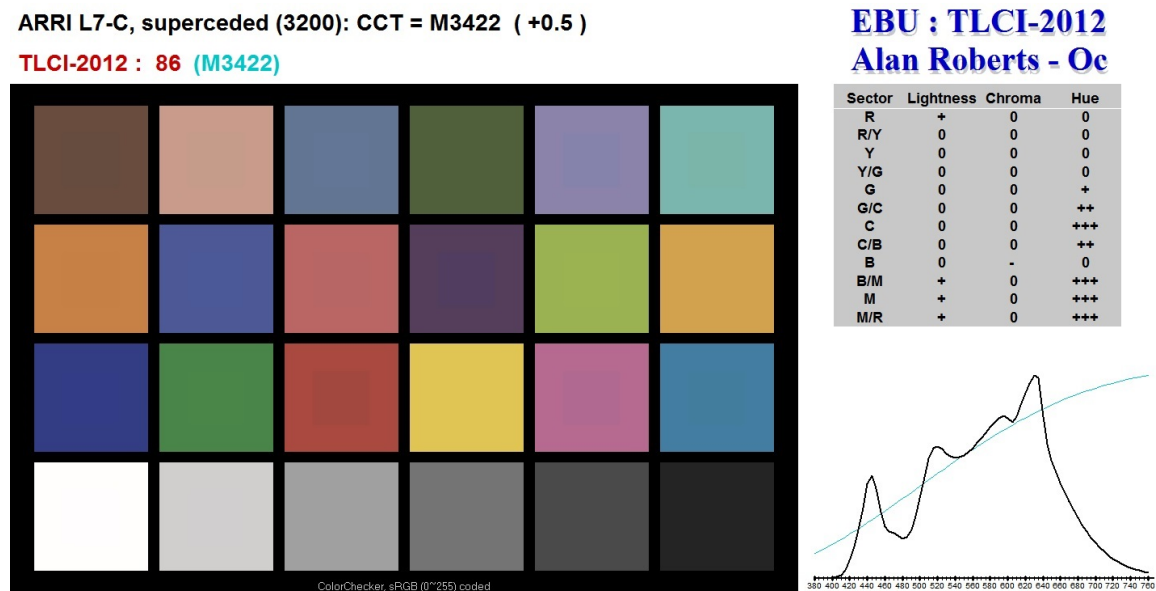


Abbildung 4.7: TLCI-Ergebnisprotokoll eines Arri L7-C LED Fresnelscheinwerfers¹⁵

Oben links ist der Name der Leuchte angegeben, die gemessene korrelierte Farbtemperatur (CCT) und die Abweichung vom Plank'schen Kurvenzug (??) mit einer Gewichtung von 0.0054 (Empfehlung EBU). Ist der Abweichungswert kleiner als -1 wird die Zahl in magenta dargestellt (magentastichtiges weiß), ist sie größer als +1, in grün (grünstichiges weiß). Im Beispiel ist die Zahl daher schwarz. Eine Zeile darunter steht der gemessene TLCI-Wert. Der Arri L7-C ist mit $Q_a = 86$ in die beste Farbwiedergabekategorie einzuordnen (Tabelle 4.2).

Oben rechts ist eine Tabelle mit Korrekturwerten für den Coloristen angegeben. Für 12 verschiedene Farbtöne wird jeweils ein Verbesserungsvorschlag für die Helligkeit, die Sättigung und die Farbtonabweichung angegeben. Da es nicht möglich ist, die Abweichung der Werte mit exakten Zahlen zu definieren, werden mit „+“, „0“ und „-“ die verschiedenen Korrekturrichtungen aufgezeigt. Eine „0“ zeigt an, dass der Fehler zu klein ist, um ihn zu korrigieren. Die Anzahl der „+“ und „-“ wiederum ist ein Hinweis darauf, wie viel Aufwand der Colorist für die Anpassung benötigt. Der Arri L7-C hat beispielsweise Bedarf es vorallem im Bereich des Cyan, Blau/Magenta, Magenta und Magenta/Rot in der Farbtonabweichung einer Aufbesserung. Auch im Green/Cyan- und Cyan/Blau-Bereich sollte der Farbton angepasst werden. Die restlichen Verbes-

¹⁵<https://tech.ebu.ch/tlci-2012>

serungsvorschläge bei Helligkeit und Sättigung sollte der Colorist zügig bewältigen können.

Links unten ist eine Farbtafel mit den 24 Farben des TLCI sichtbar. Im großen Farbfeld ist die Farbe zusehen, wie das Licht des Arri L7-C diese Farbe wiedergibt. In der Mitte jeder Farbtafel ist ein kleineres Viereck, in dem die Referenzfarbe gezeigt wird. Je deutlicher also das Referenzviereck in dem Farbfeld zu sehen ist, desto schlechter ist die Farbwiedergabe der Testleuchte. Im Beispiel ist im roten Farbfeld zu erkennen, dass der Arri L7-C diese Farbe nicht so gut wiedergibt wie andere Farben.

Rechts unten ist auf dem TLCI-Ergebnisprotokoll das Referenzspektrum von 380nm bis 740nm Wellenlänge abgebildet (schwarz) und dazu wird das getestete Spektrum geplottet (cyan). In dieser Ansicht kann man gut erkennen, inwieweit das Licht des Arri L7-C das Referenzspektrum abdeckt ¹⁶.

Der TLCI sieht die Farben wie eine Kamera und zieht sogar zwei Hauttöne mit in Betracht. Daher eignet sich dieser Farbwiedergabewert sehr gut für die Messung der Auswirkung eines Red Tail.

4.4 IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition (TM-30-15)

Auch der TM-30 wurde 2015 von der „Illuminating Engineering Society“ (IES) ausgearbeitet um eine Alternative zum CRI zu finden. Wie beim CRI werden ebenso bei der Messung des TM-30 Farbunterschiede zwischen einer Testleuchte und Referenzwerten der selben korrelierten Farbtemperatur aufgezeigt. Der TM-30 differenziert ähnlich, ob es sich bei der Testleuchte um einen Plank’schen Strahler oder einem Tageslicht handelt. Zwischen einer CCT von 4500K und 5500K wird die Referenz proportional überblendet, um so zu verhindern, dass es bei 5000K einen „Sprung“ gibt. Bei dem CRI konnte es nämlich passieren, dass eine Leuchte 2 unterschiedliche Referenzen bekam, je nach dem ob diese knapp über oder unter 5000K bei der Messung lag. Die 99 Referenzfarben (Color Evaluation Sample) wurden aus einem Pool von 105.000 Farbtönen realer Objekte statistisch ermittelt (Abbildung 4.8). Damit alle Farbtöne gleichmäßig abgedeckt werden, wurde der CAM02-UCS-Farbraum, der für seine Gleichmäßigkeit der Farbaufteilung bekannt ist, in Würfel eingeteilt. Von jedem dieser Würfel wurde dann eine der Referenzfarben bestimmt, die so gewählt ist, dass die unterschiedliche Wahrnehmung der verschiedenen Wellenlänge minimal ist (Kapitel 3.1). Die große Anzahl der Referenzfarben verhindert, dass Leuchtenhersteller mit gezielten Peaks im Spektrum gute TM-30 Werte erreichen ¹⁷.

¹⁶(Roberts 2015: 15)

¹⁷U.S. Department of Energy (2015)



Abbildung 4.8: Alle 99 Referenzfarben des TM-30¹⁸

Im Gegensatz zum CRI spielen beim TM-30 zwei Werte eine große Rolle: R_f und R_g . Der R_f -Wert bildet analog zum R_a -Wert des CRI ein Mittel aus den neunundneunzig Farbunterschieden denen einen Wert von 0 - 100 zugeordnet wird. Auch der R_f -Wert zeigt nicht an, ob die Leuchte übersättigte Farben hat oder einen Farbshift⁽¹⁹⁾. Dazu wird der R_g -Wert gemessen. Dieser kann zwischen 60 und 140 variieren und zeigt so, ob die Farben übersättigt ($R_g > 100$), untersättigt ($R_g < 100$)

¹⁸<https://agustos.com/wp-content/uploads/2017/10/TM30-color-samples-image.png>

¹⁹(Royer & Houser 2015: 10)

sind oder mit dem Wert $R_g = 100$ genau die Farben der Referenzleuchte (bei selbiger Farbtemperatur) treffen. Mit dem R_f - und R_g -Wert wird ein X,Y-Koordinatensystem aufgespannt (Abbildung 4.9). Aus diesem Diagramm sind Farbwiedergabeeigenschaften einer Leuchte sehr gut ablesbar. Durch den zusätzlichen R_g -Wert gibt es nicht mehr nur Leuchten mit „guter“ (hoher (hoher R_f)) oder „schlechter“ (niedriger R_f) Farbwiedergabe. Zum Beispiel verliert eine Leuchte mit $R_f = 82$ und $R_g = 127$ gegenüber einer mit $R_f = 90$ und $R_g = 98$ nicht unweigerlich. Es kommt im direkten Vergleich viel mehr auf den Anwendungsfall an, in der die Leuchte gebraucht wird. Im sterilen Krankenhaus ist eine natürlich Farbwiedergabe wichtig, dort wäre die zweite Leuchte der Favorit, wohingegen für Superläden, in denen das Obst durch Übersättigung der Farben besser zur Geltung kommt, wäre die erste Lampe attraktiver. Daher ist der TM-30 viel flexibler zu deuten als der CRI, wo es immer nur um den höchsten R_a -Wert geht. Eine Möglichkeit könnte es sein, das X,Y-Koordinatensystem in verschiedene Bereiche(z.B. Fenster) einzuteilen, um so anwendungsspezifische Entscheidungen treffen zu können ⁽²⁰⁾.

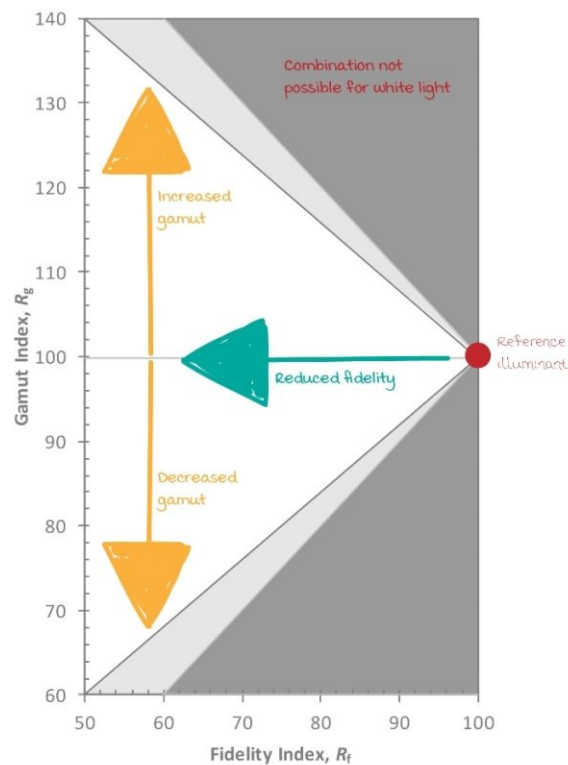


Abbildung 4.9: Koordinatensystem aus R_f und R_g : Die hellgraue Zone steht für TM-30-Werte die nicht auf der Plank'schen Kurve liegen und die dunkelgraue Zone steht für alle Werte, die nicht mehr als „weiß“ angesehen werden.
21

²⁰(Royer 2016: 4)

In einer anderen Darstellung des R_g -Wert ist zu sehen, dass der Farbraum in 16 verschiedene „binnings“ eingeteilt wurde. Jedes dieser „binnings“ steht übergreifend für die in diesem Bereich liegende Farbtöne. In dieser Darstellung wird mit Pfeilen aufgezeigt, welche Anteile im Farbraum fehlen, welche übersättigt sind und welche den Farbton nicht treffen im Verhältnis zur Referenzfarbwiedergabe (Abbildung 4.10).

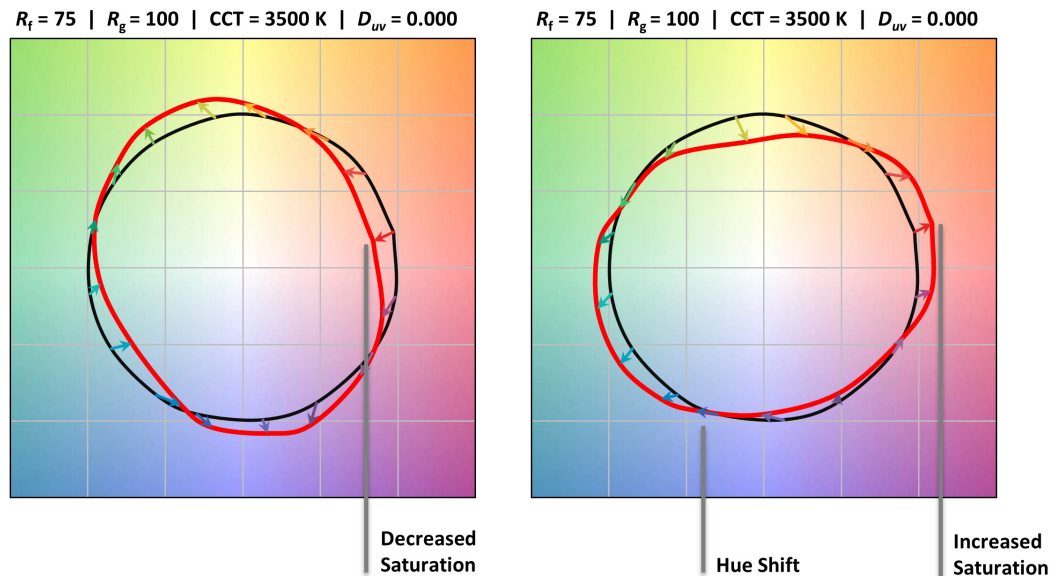


Abbildung 4.10: Wie sich die Farben der Testleuchte verhalten ist in der Vektorgraphik des R_g -Wertes anschaulich dargestellt. Der schwarze Kreis stellt die Referenzleuchte dar, der rote die getestete. ²²

Bei der Messung einer Demo warmweiß LED gibt es viel an Messergebnissen zu protokollieren (Abbildung 4.11): Links oben wird gemessene R_f - und R_g -Wert angezeigt. Darunter ist die Vektorgraphik des R_g -Wertes dargestellt und darunter werden die R_f -Werte der 16 Farbraum-„binnings“ in einem Säulendiagramm präsentiert. In der Mitte ist der TM-30-Wert in seiner Koordinaten Darstellung aufzufinden und darunter werden die farblichen Abweichungen (in Prozenten) in einem Säulendiagramm dargestellt. Rechts oben wird analog zum TLCI das Spektrum der Leuchte im Verhältnis zum Referenzspektrum gezeigt und die gemessene korrelierte Farbtemperatur angegeben. Darunter gibt es eine Tabelle wo die farblichen Abweichung der einzelnen „binnings“ als Zahlenwert angegeben werden. Schließlich findet man unter allem bisher genannten eine Säulendiagramm mit allen 99 Farben des TM-30. Das Ergebnis einer Messung ist mit diesen Daten nicht mehr schnell ersichtlich, wie beim CRI-Wert, hilft aber eine deutlich aussagekräftigere Entscheidung über eine Leuchte treffen zu können.

²¹<https://i.pinimg.com/originals/18/98/de/1898de3bdd8436fb5a1945d72a4c6772.jpg>

²²U.S. Department of Energy (2015)

4 Lichttechnische Parameter

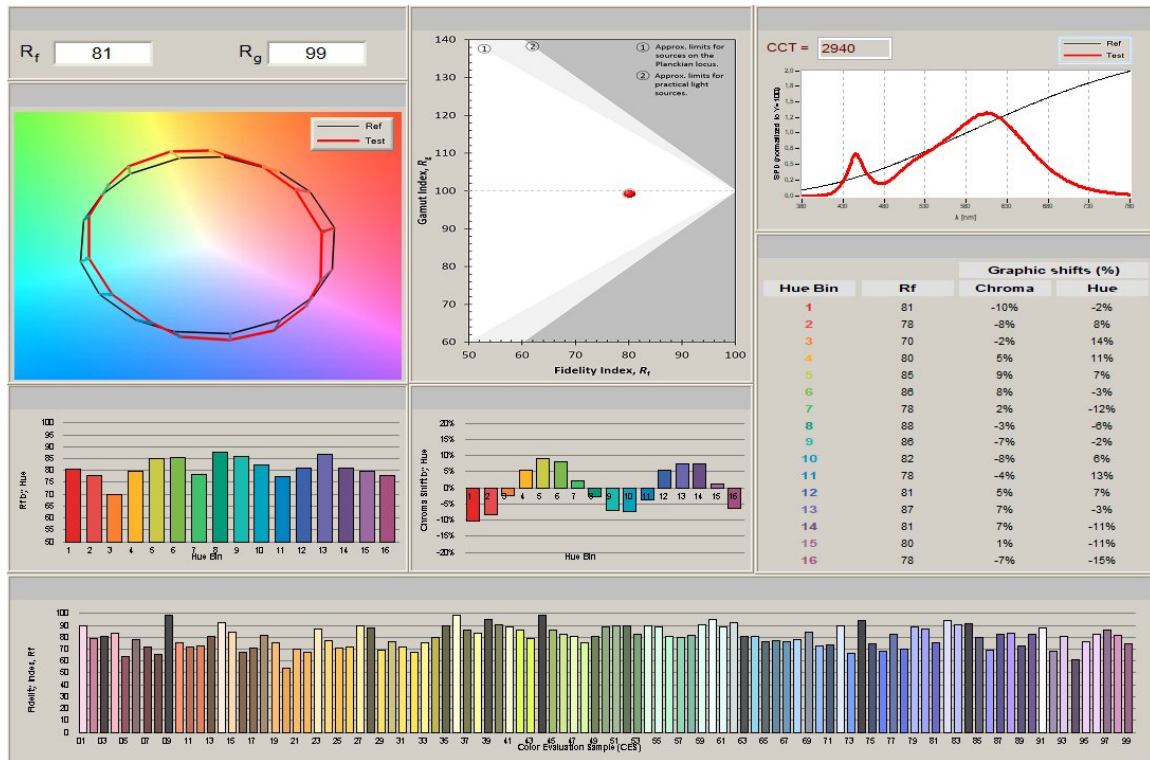


Abbildung 4.11: Wie sich die Farben der Testleuchte verhalten ist in der Vektorgraphik des R_g -Wertes anschaulich dargestellt. Der schwarze Kreis stellt die Referenzleuchte dar, der rote die getestete. ²³

Der TM-30

5 Leuchtmittel

5.1 Glühlampe

5.2 Halogenglühlampe

5.3 Entladungslampen

5.4 LEDs

6 Vormessungen

6.1 Ziel

6.2 Aufbau

6.3 Fazit aus der Vormessung

7 Hauptmessung

7.1 Messaufbau

8 Messergebnisse

8.1 Unterkapitel mit Mathematik, Bildern und Querverweisen

9 Umfrage

9.1 Unterkapitel mit Mathematik, Bildern und Querverweisen

10 Umfrageergebnisse

10.1 Unterkapitel mit Mathematik, Bildern und Querverweisen

11 Auswertung aller Ergebnisse

11.1 Unterkapitel mit Mathematik, Bildern und Querverweisen

12 Fazit

12.1 Unterkapitel mit Mathematik, Bildern und Querverweisen

Abbildungsverzeichnis

3.1	Die $V(\lambda)$ -Kurve zeigt, wie das Auge die verschiedenen Wellenlänge beim photopischen Sehen gewichtet. Die weiße Kurve ($V'(\lambda)$) beschreibt, wie sich das Farbsehen beim Nachtsehen verschiebt. ¹	8
3.2	Darstellung der „Zonentheorie“ von v. Kries ²	9
3.3	Die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau der additiven Farbmischung ergeben zusammen weiß (unbunt). ³	10
3.4	Die drei Grundfarben Cyan, Magenta und Gelb der subtraktiven Farbmischung ergeben zusammen schwarz (unbunt). ⁴	11
3.5	Beim RGB-Würfel werden alle Primärvalenzen R,G, B als gleich lange Vektoren angenommen. ⁵	12
3.6	Darstellung der CIE-XYZ Farbtafel eines 22° Normalbeobachter. Diese Bezeichnung entstammt aus den Tests von Wright und Guild. ⁶ . . .	14
3.7	Zoomansicht des XYZ-Farbraumes mit den „Geraden ähnlichster Farbtemperatur“ ⁷	15
4.1	Alle Referenzfarben des Farbwiedergabeindex: R_1 Altrosa, R_2 Senfgelb, R_3 Gelbgrün, R_4 Hellgrün, R_5 Türkisblau, R_6 Himmelblau, R_7 Asterviolett, R_8 Fliederviolett, R_9 Rot gesättigt, R_{10} Gelb gesättigt, R_{11} Grün gesättigt, R_{12} Blau gesättigt und R_{13} Rosa (Hautfarbe), R_{14} Blattgrün ⁸	17
4.2	Messung einer warmweißen LED-Leuchte (Ausschnitt aus dem Demofile des Programmes „LiVal“ von der Firma JETI): Links ist das Lichtspektrum der Leuchte dargestellt, rechts die gemessenen CRI-Werte ⁹	18
4.3	Alle Referenzfarben des CQS mit voller Sättigung ¹⁰	19
4.4	Ausschnitt aus dem Programm „LiVal“ von der Firma JETI: Demospektrum einer warmweißen LED (2942K) mit $Q_f = 81$	20
4.5	Ausschnitt aus dem Programm „LiVal“ von der Firma JETI: Die fünfzehn Referenzfarben(blau) im CIELAB-Farbraum im Vergleich zu den gemessenen Werten (rot)	21
4.6	Blockschaltbild einer TLCI-Wertbestimmung ¹¹	22
4.7	TLCI-Ergebnisprotokoll eines Arri L7-C LED Fresnelscheinwerfers ¹² .	24
4.8	Alle 99 Referenzfarben des TM-30 ¹³	26

4.9	Koordinatensystem aus R_f und R_g : Die hellgraue Zone steht für TM-30-Werte die nicht auf der Plank'schen Kurve liegen und die dunkelgraue Zone steht für alle Werte, die nicht mehr als „weiß“ angesehen werden. ¹⁴	27
4.10	Wie sich die Farben der Testleuchte verhalten ist in der Vektorgraphik des R_g -Wertes anschaulich dargestellt. Der schwarze Kreis stellt die Referenzleuchte dar, der rote die getestete. ¹⁵	28
4.11	Wie sich die Farben der Testleuchte verhalten ist in der Vektorgraphik des R_g -Wertes anschaulich dargestellt. Der schwarze Kreis stellt die Referenzleuchte dar, der rote die getestete. ¹⁶	29

Tabellenverzeichnis

4.1	R_a eingeteilt in verschiedene Stufen ¹⁷	17
4.2	Q_a eingeteilt in verschiedene Stufen ¹⁸	23

Literaturverzeichnis

- Bladowski, Beate & Maus, Daniel: „*Farbwahrnehmung*“ <http://irtel.uni-mannheim.de/lehre/seminararbeiten/w96/Farbe/seminar.htm#Wieviele>, 15.07.2010, letzter Zugriff 28.06.2018
- Royer, Micheal & Houser Kevin: „*Understanding and Applying TM-30-15*“ https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/09/f26/tm30-intro-webinar_9-15-15.pdf, 15.09.2015, letzter Zugriff 26.06.2018
- U.S. Department of Energy: „*Evaluating Color Rendition Using IES TM-30-15*“ https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/04/f30/tm-30_fact-sheet.pdf, Oktober 2015, letzter Zugriff 25.06.2018
- Commission Internationale de l’Eclairage: „*Technical Report 177:2007 : Color Rendering of White LED Light Sources*“ <https://de.scribd.com/document/125319182/CIE-177-2007>, 2007, letzter Zugriff 20.06.2018
- Davis, Wendy L. & Ohno, Yoshihiro: „*Development of a Color Quality Scale*“ <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.568.8399&rep=rep1&type=pdf>, 08.02.2006, letzter Zugriff 20.06.2018
- DocCheck Flexikon: „*Skotopisches Sehen*“ http://flexikon.doccheck.com/de/Skotopisches_Sehen, 24.01.2014, letzter Zugriff 18.06.2018
- DocCheck Flexikon: „*Photopisches Sehen*“ http://flexikon.doccheck.com/de/Photopisches_Sehen, 10.05.2016, letzter Zugriff 18.06.2018
- Production Partner: „*Farbwiedergabe: TM-30-15, CRI und Co.*“ <https://www.production-partner.de/basics/farbwiedergabe-tm-30-15-cri-und-co/>, 22.02.2018, letzter Zugriff 20.06.2018
- Gigahertz-Optik: „*Grundlagen der Lichtmesstechnik*“ <https://www.gigahertz-optik.de/de-de/grundlagen-lichtmesstechnik/>, letzter Zugriff 20.06.2018
- Royer, Michael P.: „*IES TM-30-15 Is Approved—Now What?*“, *LEUKOS* vol. 12 (1-2, 3-5), 2016
- Dooley, Wesley L. & Streicher, Ronald D.: „*M–S Stereo: A Powerful Technique for Working in Stereo*“, *Journ. Audio Engineering Society* vol. 30 (10), 1982

Literaturverzeichnis

- Roberts, Alan: *TELEVISION LIGHTING CONSISTENCY INDEX (TLCI-2012)*, Version 2.015e, 18.04.2015
- Hentschel, Hans-Jürgen: *Licht und Beleuchtung Theorie und Praxis der Lichttechnik*, 4. Aufl., Hüthig 1994
- Spehr, Georg (Hrsg.): *Funktionale Klänge*, transcript 2009
- Greule, Roland (Autor): *Licht und Beleuchtung im Medienbereich*, Hanser 2015
- Khanh, Tran Quoc (Autor) & Bodrogi, Peter (Autor) & Vinh, Trinh Quang (Autor): *Color Quality of Semiconductor and Conventional Light Sources*, Wiley-VCH 2017
- Sowodniok, Ulrike: „Funktionaler Stimmklang – Ein Prozess mit Nachhaltigkeit“, in: Spehr, Georg (Hrsg.): *Funktionale Klänge*, transcript 2009
- Stephenson, Uwe: „Comparison of the Mirror Image Source Method and the Sound Particle Simulation Method“, *Applied Acoustics* vol. 29, 1990

Ich versichere, die vorliegende Arbeit selbstständig ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt zu haben. Die aus anderen Werken wörtlich entnommenen Stellen oder dem Sinn nach entlehnten Passagen sind durch Quellenangaben eindeutig kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Matthias Held