

**„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

Hamburg, 27. 08. 2018

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	6
2 Danksagung	7
3 Grundlagen und Kenngrößen der Lichttechnik	9
3.1 Lichtstrom Φ	9
3.2 Lichtausbeute η	10
3.3 Beleuchtungsstärke E	10
3.4 Lichtstärke I	11
3.5 Leuchtdichte L	13
3.6 Stoffkennzahlen	14
4 Farben des Lichts	15
4.1 Farben mit dem Auge sehen	15
4.2 Theorien der Farbwahrnehmung	17
4.3 Additive Farbmischung	18
4.4 Subtraktive Farbmischung	21
4.5 Hauttöne	22
5 Farträume	24
5.1 RGB Farbraum	24
5.2 CIE-XYZ Farbraum	26
5.3 CIE-unity chromity scale-Farbtafel (CIE-UCS)	31
6 Farbtemperatur	33
7 Farbwiedergabewerte	35
7.1 CIE: Color Rendering Index (CRI)	35
7.2 NIST: Color Quality Scale (CQS)	38
7.3 EBU: Television Lighting Consistency Index (TLCI)	41
7.4 IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition (TM-30-15)	46
8 Leuchtmittel	51
8.1 Glühlampe	51
8.2 Halogenglühlampe	52
8.3 Entladungslampen	53
8.3.1 Niederdruckentladungslampen	53
8.3.2 Hochdruckentladungslampen	54

Inhaltsverzeichnis

8.4 LEDs	56
9 Messgeräte für Farbmessung	59
9.1 Spektrometer	59
10 Grundlagen Videotechnik	62
10.1 Grundeinstellung einer Kamera	62
10.1.1 Vorverstärkung	62
10.1.2 Blende	62
10.1.3 Schärfentiefe	63
10.1.4 Kniefunktion	64
10.1.5 γ -Kennlinie	64
10.1.6 Linear Matrix	65
10.1.7 Weißabgleich	66
10.2 Farbbildwandlertechnik einer Kamera	68
10.3 RGB-Signal	70
10.4 Komponenten-Signal	70
10.5 Videotechnische Messgeräte	72
10.5.1 Waveformmonitor	72
10.5.2 Vektorskop	73
11 Messungen	76
11.1 Grundüberlegungen	76
11.1.1 Rottöne des „Red Tail“	76
11.1.2 Scheinwerfer	77
11.1.3 Referenzlicht	78
11.2 Messaufbau	79
11.3 Vormessung	79
11.3.1 Durchführung der Vormessung	79
11.3.2 Analyse der Vormessung	81
11.3.3 Fazit aus der Vormessung	84
11.4 Hauptmessung	84
11.4.1 Durchführung der Hauptmessung	85
11.4.2 Analyse der Hauptmessung	86
11.4.3 Fazit aus der Hauptmessung	89
12 Aufnahme der Bilder	90
12.1 Auswahl der Kamera und der Probanden	90
12.2 Anpassung der Scheinwerfer	91
12.3 Erstellung der Bilder	92
13 Umfrage	93
13.1 Umfrage nach Rec. ITU-R BT.500-11	93

Inhaltsverzeichnis

13.2 Aufbau und Durchführung der Umfrage	94
13.3 Umfrageergebnisse	95
14 Fazit	100
15 Ausblick	101
Abbildungsverzeichnis	102
Tabellenverzeichnis	106
16 Anhang	107
16.1 Materialliste	107
Literaturverzeichnis	109

Abstract

This Bachelor Thesis is about the impact by an additional deep red spectral component on a cool light spectrum LED-lighting fixture. The assumption of mo2 design GmbH, which claims that skin-colour will look more natural with such a „red tail“, will be tested. To check on this, the Thesis starts with relevant lighting parameters, different light sources and color spaces, followed by a describtion of the measurement part. There will be an LED-lighting fixture pointed to the same targed as an fresnel spotlight equipped with an deep red color filter. First the LED-lighting fixture is adjusted to it's best cool light and measured. Second the light of the fresnel spotlight is turned on and it's deep redlight is mixed to the LED-lighting fixture. This mixture of light is adjusted to it's best cool white and measured. The lighting parameters of this two measurements will be compared with a focus on the TLCI. Additionally there will be pictures of different skin colours taken with a broadcast camera. The pictures will be illuminated with and wihtout a „red tail“. A survey will be held to determine if the impact of an additional deep red spectral component, which is appreciable in measurements, is visual for the human eye too.

Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Auswirkung eines zusätzlichen tiefroten Spektralanteils 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 des Unternehmens mo2 design GmbH angenommen wird.

Um dies zu untersuchen wird auf wichtige und zum Verständnis dieser Arbeit relevante Kenngrößen der Lichttechnik eingegangen und verschiedene Leuchtmittel sowie lichttechnische Parameter werden erläutert. Darauffolgend werden die zur Untersuchung der Theorie durchgeföhrten Messungen beschrieben. Bei diesen wird ein LED-Scheinwerfer und ein rot-gefilterter Stufenlinsenscheinwerfer, 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. Die gemessenen lichttechnischen Parameter mit besonderem Fokus auf dem TLCI werden dann bei der Auswertung miteinander verglichen.

Zusätzlich werden Bilder mit einer Studiokamera erstellt, auf denen Probanden verschiedener Hauttöne mit und ohne „Red Tail“ beleuchtet werden. Diese Bilder werden dann im Rahmen einer abschließenden Umfrage bewertet. Auf diese Weise wird beobachtet, ob die messtechnischen Ergebnisse auch für das menschliche Auge erkennbar sind.

1 Einleitung

LED Scheinwerfer lösen immer mehr die konventionellen Lampen im TV- und Veranstaltungsbereich ab. Jedoch werden für Personenbeleuchtung im TV-Bereich selten LED-Scheinwerfer genutzt. Ein Grund dafür ist, dass diese Scheinwerfer meist entweder einen großen Output generieren und keine hohe Farbwiedergabequalität erreichen oder dass eine hohe Lichtqualität auf Kosten des Outputs erzielt wird. Scheinwerferhersteller bringen immer bessere LED-Scheinwerfer auf den Markt, sodass diese Diskrepanz zwischen Qualität und Quantität in ein paar Jahren ausgemerzt sein wird. Es soll untersucht werden, ob der „Red-Tail“ ein richtiger Schritt in diese Richtung sein kann, indem er wichtige spektrale Anteile für Hauttöne im Spektrum eines Scheinwerfers ergänzt. Wichtig ist dabei auch, den Bogen zur Studiokamera zu spannen, da das Licht von einer Kamera deutlich anders bewertet wird, als vom Spektrometer. Unter anderem sollen folgende Fragen in dieser Arbeit aufgearbeitet werden:

- Wie reagieren die Farbwiedergabewerte der Scheinwerfer auf den „Red Tail“ ?
- Was macht der „Red Tail“ mit den Hauttönen in der Kamera?

2 Danksagung

Ich bedanke mich bei:

Manfred „Ollie“ Olmar dafür, dass ich als Werkstudent in seiner Firma mo2 design GmbH meine Bachelorarbeit schreiben durfte

Dipl. Ing. Matthias Allhoff, für die engagierte Begleitung und Unterstützung und die Organisation der Scheinwerfer

Prof. Dr. Roland Greule, für die Betreuung der Bachelorarbeit

Dipl. Ing. Matthias Wilkens, für seine hervorragende videotechnische Betreuung

B. Sc. Fabian Oving, für die Bereitstellung von Räumlichkeiten und Equipment des Lichtlabors der HAW-Hamburg und messtechnische Unterstützung

Tobias Hann, für die interessanten Gespräche über Lichttechnik

Dipl. Ing. Nathalie Mai, für die Bereitsellung von Equipment des Videolabors der HAW-Hamburg

die Probanden, die sich stundenlang für die Erstellung der Umfragebilder Zeit genommen haben

die Umfrageteilnehmer, die sich Zeit genommen haben, die Bilder zu bewerten

2 Danksagung

Ich bedanke mich bei folgenden Firmen:

bei Lightpower, für die gesponserten Rosco-Filterfolien

bei Ayrton für die kostenlose Leihgabe und Lieferung des Ayrton Ghilbi

Clay Paky für die kostenlose Leihgabe und Lieferung des Clay Paky K-Eye K20

ETC für die kostenlose Leihgabe und Lieferung des ETC Source Four LED Series 2 Lustr

GLP für die kostenlose Leihgabe und Lieferung des GLP Impression X4L

Martin für die kostenlose Leihgabe und Lieferung des Martin Mac Encore Wash CLD

PRG für die kostenlose Leihgabe des Arri Sun 5

Robe für die kostenlose Leihgabe und Lieferung des Robe Robin DL7F Wash

BLOW UP Videoproduktion Hamburg für die kostenlose Leihgabe der Sony HDC-2500 und dem Kameraequipment

3 Grundlagen und Kenngrößen der Lichttechnik

3.1 Lichtstrom Φ

Der Lichtstrom Φ steht für die Lichtleistung einer Lichtquelle und wird in der Einheit Lumen (lm) angegeben (Abbildung 3.1). Φ lehnt sich an der Helligkeitsempfindung des Auges an, der $V(\lambda)$ -Kurve (Kapitel 4.1). Daher sind Aussagen über die Strahlungsleistung in der Beleuchtungstechnik nur von peripherer Bedeutung¹.



Abbildung 3.1: Der Lichtstrom gibt an, wie viel sichtbares Licht eine Lichtquelle abstrahlt².

Folgende Zahlen sind typische Lichtstromwerte (Tabelle 3.1) :

Lichtstrom			
Glühlampe	230 V / 40 W	415 lm	
Halogenglühlampe Niedervolt	12 V / 50 W	1.200 lm	
Halogenglühlampe Hochvolt	230 V / 77 W	1.320 lm	
Leuchtstofflampe	230 V / 36 W	3350 lm	
Natriumdampf-Niederdrucklampe	230 V / 90 W	13.500 lm	
Natriumdampf-Hochdrucklampe	230 V / 100 W	10.700 lm	
Halogenmetalldampflampe	230 V / 100 W	10.600 lm	
LED	1 W	50...> 150 lm	

Tabelle 3.1: Verschiedene Beispiele für Φ ³

¹ (Ris 2015: 23)

² https://www.sbz-online.de/Cache/GENTNER/10024/GV-SVG-EXPORT-20140303-1028_NTc4MTAwWg.JPG [Stand: 12.08.2018]

³ (Ris 2015: 24)

3.2 Lichtausbeute η

Der Lichtstrom kann ins Verhältnis zur Strahlungsleistung gesetzt werden und so die Lichtausbeute η in $\frac{lm}{W}$ berechnet werden⁴. Mit dem η -Wert kann aufgezeigt werden, wie effizient ein Leuchtmittel seine Strahlungsleistung in Lichteistung umsetzt. Der Maximalwert von η liegt bei $\eta_{max} = 683 \frac{lm}{W}$, dass nur durch eine monochromatisch grüne (555 nm) Lichtquelle erzeugt werden kann, weil dieses Licht am hellsten für das menschliche Auge ist⁵ (Kapitel 4.1). Beispielhafte Lichtausbeutewerte werden bei den verschiedenen Leuchtmitteln genannt (Kapitel 8).

3.3 Beleuchtungsstärke E

Die Beleuchtungsstärke E gibt an, wie groß ein Lichtstrom Φ im Verhältnis zu seiner Lichtauftrittsfläche A ist und wird in Lux (lx) angegeben⁶ (Gleichung 3.1).

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (3.1)$$

Diese Formel gilt nur, solange die Fläche vom Lichtstrom senkrecht bestrahlt wird. Die Beleuchtungsstärke dient in der Innenraumbeleuchtung als ausschlaggebende Lichtkenngröße zur Einschätzung der Helligkeit. Dabei macht der E-Wert kaum eine Aussage über die mit dem Auge wahrgenommene Helligkeit⁷. Eine doppelte so große Beleuchtungsstärke entspricht keineswegs einer ebenso großen wahrgenommenen Helligkeitsänderung.



Abbildung 3.2: Die Beleuchtungsstärke gibt an, wie viel Lichtstrom auf eine bestimmte Fläche trifft⁸.

⁴ (Greule 2014: 35)

⁵ (Greule 2014: 36)

⁶ (Ris 2015: 28)

⁷ (Ris 2015: 29)

⁸ https://www.sbz-online.de/Cache/GENTNER/10024/GV-SVG-EXPORT-20140303-1028_NTc4MTAwWg.JPG [Stand: 12.08.2018]

Folgende Zahlen sind typisch für die Beleuchtungsstärke (Tabelle 3.2):

Beleuchtungsstärke	
wolkenloser Sommertag	100.000 lx
trüber Sommertag	20.000 lx
wolkenloser Wintertag	400 lx
Bürobeleuchtung	500 lx
Vollmondnacht	0,3 lx
Sternennacht	0,01 lx

Tabelle 3.2: Verschiedene Beispiele für E⁹

Die Beleuchtungsstärke spielt in der Lichtplanung eine sehr große Rolle. Mit ihr werden auch Gleichmäßigkeiten und Ungleichmäßigkeiten in der Beleuchtung bestimmt, die zum Beispiel für ausgeleuchtete Sportveranstaltung entscheidend sind.

Für die Hauptmessung ist die Beleuchtungsstärke von großer Bedeutung, da bei gleicher Helligkeit die Farbwiedergabewerte vergleichbar sind (Kapitel 11.4). Außerdem kann durch die Beleuchtungsstärke die Einstellung der Kamerablende ermittelt werden (Kapitel 10.1.2).

3.4 Lichtstärke I

Die Lichtstärke I zeigt auf, wie stark Licht in eine bestimmte Richtung abgestrahlt wird und wird in Candela (cd) angegeben. I wird aus dem Verhältnis von Lichtstrom Φ zu dem bestrahlten Raumwinkel Ω errechnet¹⁰ (Gleichung 3.2).

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad (3.2)$$

Der Raumwinkel Ω beschreibt die Beziehung zwischen einem Flächenausschnitts der Oberfläche einer dreidimensionalen Kugel zu dem Quadrat des Kugelradius und wird mit der Einheit Steradian (sr) verwendet¹¹ (Gleichung 3.3).

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (3.3)$$

Auf diese Weise kann die Verteilung des Lichtstroms Φ im Raum berechnet werden (Abbildung 3.3). Die Lichtstärke einer Kerze beträgt etwa 1 cd, unter der Annahme, dass sie ihr Licht in alle Richtungen gleichmäßig ausstrahlt.

⁹ (Ris 2015: 29)

¹⁰ (Ris 2015: 27)

¹¹ (Ris 2015: 26)



Abbildung 3.3: Die Lichtstärke gibt an, wie viel Lichtstrom auf eine bestimmte Richtung im Raum verteilt ist¹².

Typische Größen der Lichtstärke sind (Tabelle 3.3):

Lichtstärke		
Halogenglühlampe, 50W, HRI	1.250.000 cd	
Leonardo De Sisti 1kW Halogenglühlampe	115.250 cd	
Sonnenlicht	$2 \cdot 10^{27}$ cd	

Tabelle 3.3: Verschiedene Beispiele für I¹³

Mit sogenannten Lichtstärkeverteilungskurven (LVK) ist es möglich, die Abstrahlcharakteristik einer Leuchte zu bestimmen und mit diesen Daten beispielsweise 3D-Renderings einer Beleuchtungssituation zu simulieren. Dies ist jedoch für diese Arbeit nicht weiter relevant.

¹² https://www.sbz-online.de/Cache/GENTNER/10024/GV-SVG-EXPORT-20140303-1034_NTc4MTA2Wg.JPG [Stand: 13.08.2018]

¹³ (Greule 2014: 36)

3.5 Leuchtdichte L

Die Leuchtdichte L bewertet, wie hell eine beleuchtete oder selbstleuchtende Fläche von dem menschlichen Auge wahrgenommen wird und wird in $\frac{\text{candela}}{\text{m}^2}$ ($\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$) angegeben¹⁴ (Gleichung 3.4).

$$L = \frac{I}{A} \quad (3.4)$$

Damit besteht mit der Leuchtdichte im Gegensatz zu den anderen Kenngrößen eine Verbindung zur tatsächlichen Wahrnehmung der Helligkeit. Zusätzlich ist die Leuchtdichte unabhängig von der Entfernung immer gleich hell (Abbildung 3.4).

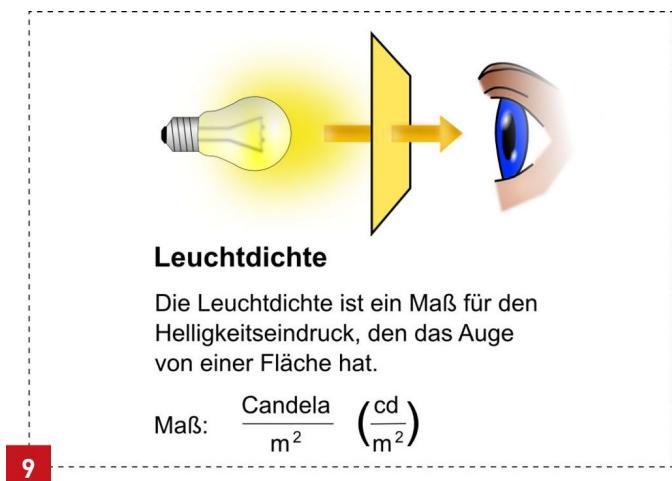


Abbildung 3.4: Die Leuchtdichte hat einen Bezug auf die menschliche Helligkeitswahrnehmung¹⁵.

Folgende Werte sind für die Leuchtdichte typisch (Tabelle 3.4):

Leuchtdichte	
Fensteröffnung mittags, leichte Bewölkung	5.000...50.000 $\frac{\text{candela}}{\text{m}^2}$
Fensteröffnung mittags, bedeckter Himmel	1.000...3.000 $\frac{\text{candela}}{\text{m}^2}$
Sonnenscheibe mittags	$1,6 \dots 10^9 \frac{\text{candela}}{\text{m}^2}$
Vollmondscheibe	2.500 $\frac{\text{candela}}{\text{m}^2}$
Halogenglühlampe nackt	$20 \dots 30 \cdot 10^6 \frac{\text{candela}}{\text{m}^2}$
Leuchtstofflampe	5.000...15.000 $\frac{\text{candela}}{\text{m}^2}$

Tabelle 3.4: Verschiedene Beispiele für L¹⁶

¹⁴ (Ris 2015: 34)

¹⁵ https://www.sbz-online.de/Cache/GENTNER/10024/GV-SVG-EXPORT-20140303-1034_NTc4MTA2Wg.JPG [Stand: 13.08.2018]

¹⁶ (Ris 2015: 35)

3.6 Stoffkennzahlen

Wenn Licht auf ein Objekt trifft, wird es dort stets reflektiert, absorbiert und transmittiert. Um dieses Verhalten zu beschreiben nutzt man die Stoffkennzahlen. Nach dem Gesetz von der Erhaltung der Energie ergeben der Absorptionsgrad α , der Reflexionsgrad ρ und der Transmissionsgrad τ in Summe stets 1 und damit auch die Verhältnisse aus dem eintreffenden Lichtstrom Φ_0 (Kapitel 3.1) zu dem absorbierten Φ_a , dem reflektierten Φ_r respektive dem transmittierten Φ_d (Gleichung 3.5)¹⁷.

$$\alpha + \rho + \tau = \frac{\Phi_a}{\Phi_0} + \frac{\Phi_r}{\Phi_0} + \frac{\Phi_d}{\Phi_0} = 1 \quad (3.5)$$

Die Reflexion und Transmission von Licht kann in verschiedenen Abstufungen vorkommen (Abbildung 3.5).

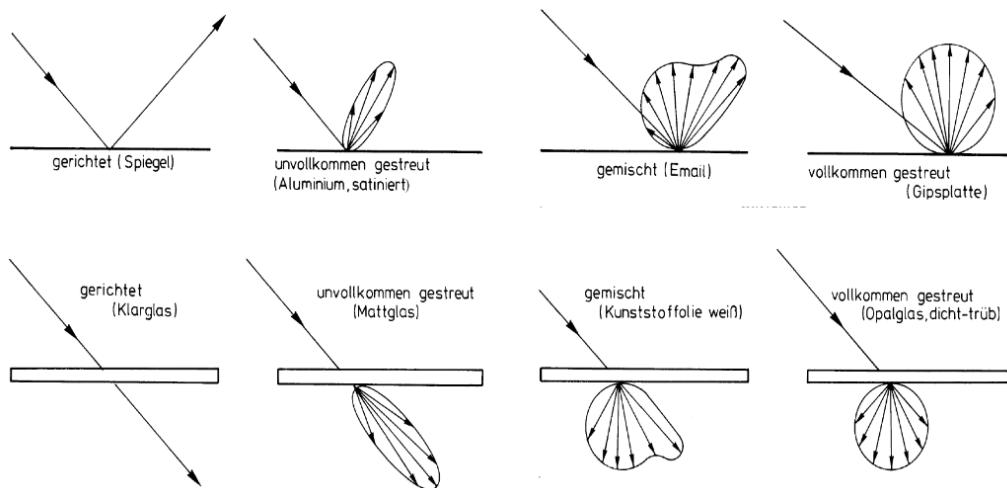


Abbildung 3.5: Darstellung verschiedener Reflexion- (oben) und Transmissionsarten (unten) ¹⁸

¹⁷ (Hentschel 1993: 38)

¹⁸ https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQRXKy02dzW7jXXbs_PqxZDRF2vKnJT-8qKf5w5mRAVG6SDatTk [Stand: 13.08.2018]

4 Farben des Lichts

In diesem Kapitel wird auf die Wahrnehmung der Lichtfarben eingegangen. Zuerst wird erklärt, wie das Auge Farben sieht. Danach werden verschiedene Methoden der Farblichtmischung erläutert. Schließlich wird noch der Zusammenhang zwischen menschlichen Hauttönen und Licht ansatzweise beschrieben.

4.1 Farben mit dem Auge sehen

Es gibt zwei verschiedene Fälle, in denen der Mensch die Gesichtsempfindung Farbe verspürt: Zum einen leuchtet ein Objekt von selbst, sodass dessen Licht ins Auge gelangt. Aus dem sichtbaren Spektralbereich des Lichtspektrums erzeugt dann die Netzhaut im Zusammenspiel mit dem Gehirn einen Farbreiz $\phi(\lambda)$. In diesem Fall nennt man das Objekt einen Selbstleuchter. Zum anderen wird das Objekt von einer Lichtquelle beleuchtet und das reflektierte Lichtspektrum wahrgenommen. Der Gegenstand absorbiert und transmittiert bestimmte spektrale Anteile des Lichts und reflektiert den für den Farbton verantwortlichen Rest (Kapitel 3). 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. Sie sind für das photopische Sehen (Tagessehen) ab einer Leuchtdichte von $3 \frac{cd}{m^2}$ zuständig³.

Das menschliche Auge kann Wellenlängen von 380 nm bis 780 nm wahrnehmen. Jedoch ist das Auge nicht für alle Farben gleich empfindlich. Grüne Gegenstände (bspw. 555 nm) wirken immer heller als blaue (bspw. 485 nm) oder rote (bspw. 680 nm). Dieser Sachverhalt wurde mit der $V(\lambda)$ -Kurve aufgezeigt (Abbildung 4.1).

¹ (Hentschel 1993: 103)

² DocCheck Flexikon (2014)

³ DocCheck Flexikon (2014)

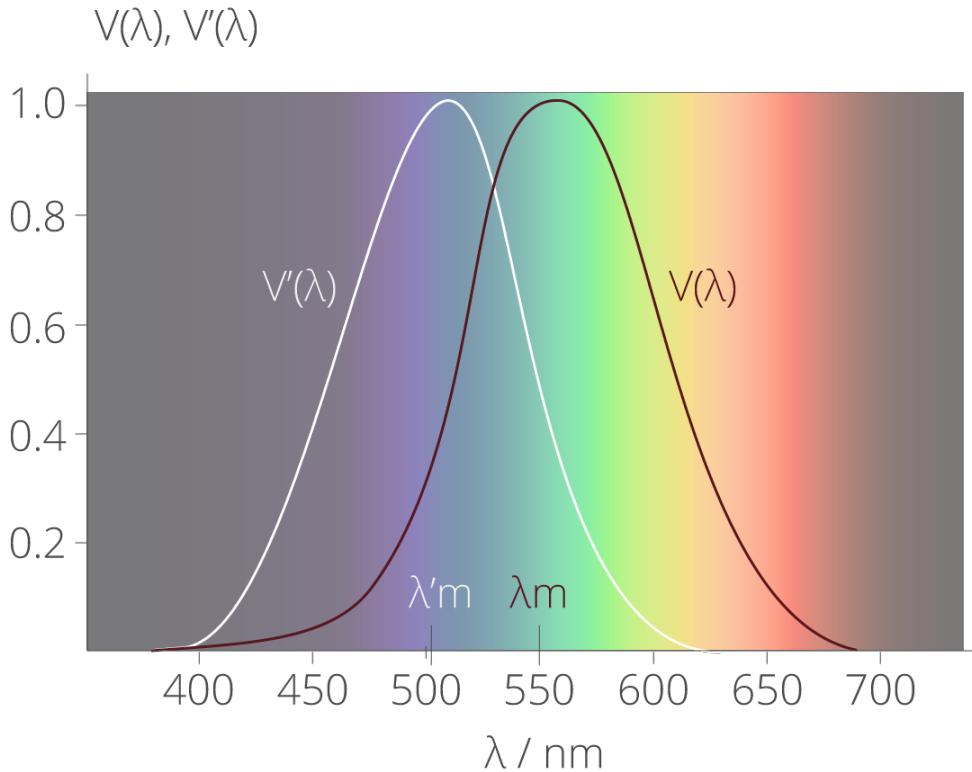


Abbildung 4.1: Die $V(\lambda)$ -Kurve zeigt, wie das Auge die verschiedenen Wellenlänge beim photopischen Sehen gewichtet. Die weiße Kurve ($V'(\lambda)$) beschreibt, wie sich das Farbsehen beim Nachtsehen verschiebt⁴.

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 von ca. 20 Millionen unterschiedlichen Farben gesprochen werden, die ein Mensch wahrnehmen kann⁵.

⁴ <https://www.gigahertz-optik.de/assets/Uploads/Abb.-II.13-neu-v03.png> [Stand: 25.06.2018]

⁵ Bladowski & Maus (2010)

4.2 Theorien der Farbwahrnehmung

Um all diese Farben unterscheiden zu können, gibt es nach Thomas Young und Hermann von 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. Die RGB-Zapfen nehmen tatsächlich ganze Bereiche des Spektrums wahr und daher kann man diese eher als Short-, Middle- und Long-Zapfen betiteln⁶ (Abbildung 4.2).

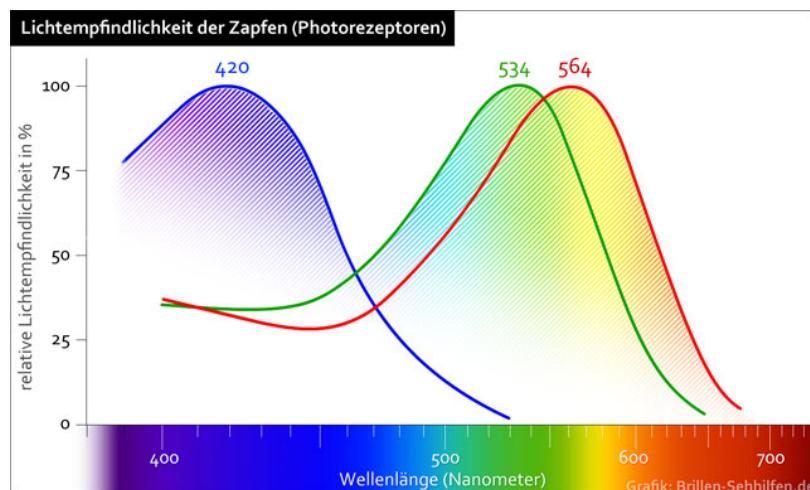


Abbildung 4.2: Die Kurven zeigen die Empfindlichkeiten der S-Zapfen (blau), der M-Zapfen (grün) und der L-Zapfen (rot) und ihre Maxima. Auffällig ist, dass sich die Bereiche der M- und L-Zapfen größtenteils überlappen und die Zapfen für den (tief)roten Spektralbereich kaum empfindlich sind⁷.

Auf diese Weise lassen sich aber nicht alle Phänomene der Farbwahrnehmung erklären. Ewald Hering hat 1878 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 Theorien korrekt ist, hat 1905 Johannes 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 ausgewertet⁸ (Abbildung 4.3).

⁶ (Greule 2014: 62-63)

⁷ <https://www.brillen-sehhilfen.de/auge/images/farbensehen-wellenlaengen-zapfen-1.jpg> [Stand: 25.06.2018]

⁸ (Hentschel 1993: 104)

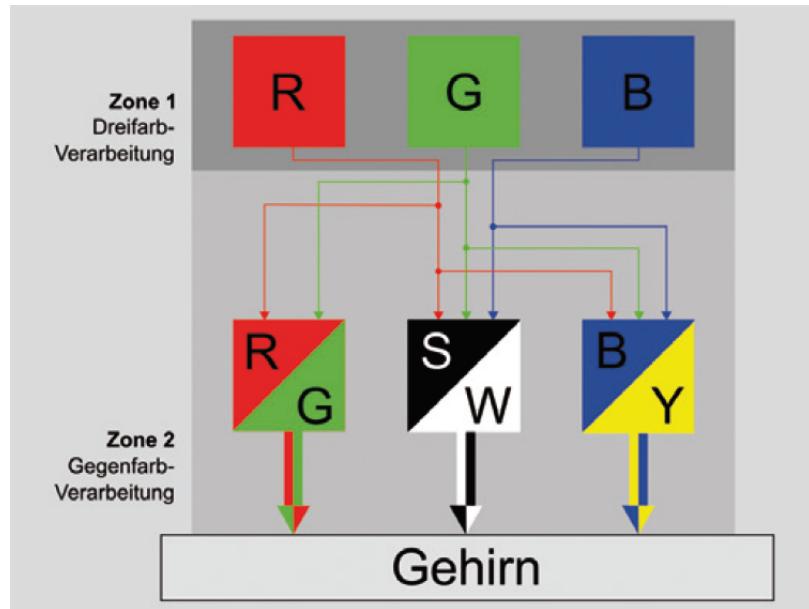


Abbildung 4.3: Darstellung der „Zonentheorie“ von v. Kries⁹

4.3 Additive Farbmischung

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. Eine andere Möglichkeit ist, dass das Licht verschiedener Wellenlängen auf unterschiedliche Teile der Netzhaut trifft, die so dicht aneinander sind, dass das Auge daraus eine Farbe mischt (örtliche Nähe) oder derselbe Punkt auf der Netzhaut von zwei verschiedenen Spektralanteilen mit einer Wechselfrequenz von $f \geq 25\text{Hz}$ getroffen wird (zeitliche Nähe). Noch eine andere Art der additiven Farbmischung entsteht, wenn das Licht verschiedener Wellenlängen auf unterschiedliche Teile der Netzhaut trifft, die so dicht aneinander sind, dass das Auge daraus eine Farbe mischt. Grundsätzlich werden bei jeder Art der additiven Farbmischung die Strahlungsleistungen der Spektralanteile $\Phi_{e\lambda,i}(\lambda)$ zusammenaddiert¹⁰ (Gleichung 4.1).

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \Phi_{e\lambda,1}(\lambda) + \Phi_{e\lambda,2}(\lambda) + \Phi_{e\lambda,3}(\lambda) \quad (4.1)$$

⁹ (Greule 2014: 153)

¹⁰ (Greule 2014: 83)

1853 hat Grassmann zur additiven Farbmischung vier allgemein gültige Regeln aufgestellt:

- Die erste Regel besagt, dass „*jeder Farbeindruck der genannten Art sich in drei mathematisch bestimmbare Momente zerlegt: den Farbenton, die Intensität der Farbe und die Intensität des beigemischten Weiß.*“ (Graßmann 1853: 70)
- Die zweite Regel besagt, „*daß, wenn man von den beiden zu vermischenden Lichtern das eine stetig ändert (während das andere unverändert bleibt), auch der Eindruck der Mischung sich stetig ändert.*“ (Graßmann 1853: 72)
- Die dritte Regel besagt, „*daß zwei Farben, deren jede constanten Farbenton, constante Farbenintensität und constante Intensität des beigemischten Weiß hat, auch constante Farbenmischung geben, gleich viel aus welchen homogenen Farben jene zusammengesetzt seyen.*“ (Graßmann 1853: 78)
- Die vierte Regel besagt, „*daß die gesamte Lichtintensität der Mischung die Summe sey aus den Intensitäten der gemischten Licher.*“ (Graßmann 1853: 82)

Die erste Regel besagt, dass die additive Farbmischung beispielsweise über Farbton, Sättigung und Helligkeit (Weißheit) definiert werden kann. Drei Angaben eines Farbeindrucks reichen also aus, eine Farbe eindeutig zu beschreiben¹¹. Dies kann auch über die RGB-Werte (Kapitel 5.1) oder Primärvalenzen geschehen (Kapitel 5.2). In der Abbildung 4.4 ist dargestellt, wie aus den RGB-Grundfarben die additiven Mischfarben entstehen.

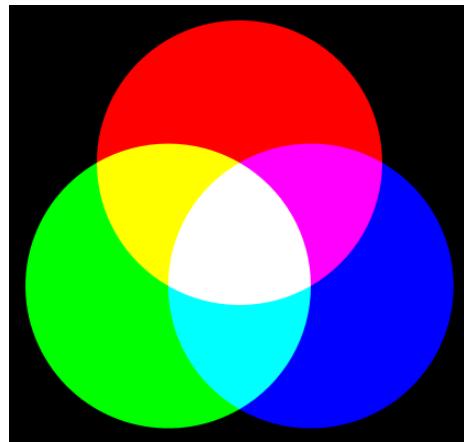


Abbildung 4.4: Die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau der additiven Farbmischung ergeben zusammen weiß (unbunt)¹².

¹¹ (Hentschel 1993: 105)

¹² <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e0/Synthese%2B.svg/420px-Synthese%2B.svg.png> [Stand: 26.06.2018]

4 Farben des Lichts

Die zweite Regel zeigt auf, dass bei der additiven Farbmischung die Farben stets ineinander übergehen. Das bedeutet, dass beispielsweise auch Purpur für das menschliche Auge ohne Sprung ins Rot übergeht, obwohl es diesen Farbwechsel physikalisch nicht gibt¹³.

Die dritte Regel beschreibt beispielweise das Verhalten einer Tomate unter gemischtem und ungemischtem magentafarbenem Licht. Wird die Tomate von einem magentanafarbenem 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 dieselbe Lichtfarbe wie von dem reinen magentanafarbenem Licht erzeugt, so erscheint die Tomate unter diesem Licht trotzdem rot, da die Rot-Anteile im Spektrum vorhanden sind. Man kann jedoch mit dem bloßen Auge diese beiden (metameren) Farben nicht unterscheiden, da der Mensch die spektrale Zusammensetzung von Licht nicht wahrnimmt.

Schließlich geht es in der vierten Regel darum, dass sich bei der additiven Farbmischung die Intensitäten der einzelnen Farben summieren. Diese gilt aber nur für farbige Punktquellen und nicht für größere Flächen¹⁴.

In der Hauptmessung wird das Verhalten der additiven Farbmischung genutzt, um das Licht eines tiefrot-gefilterten Stufenlinsenscheinwerfers mit dem der LED-Scheinwerfer zu mischen. Da so entstehende Licht gemischt kann nahezu als ein Licht aus einer Lichtquelle angesehen werden (Kapitel 11.4).

¹³ (Mungenast 2009: 5)

¹⁴ (Mungenast 2009: 5)

4.4 Subtraktive Farbmischung

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 werden¹⁵ (Gleichung 4.2).

$$T(\lambda) = T_1(\lambda) \cdot T_2(\lambda) \cdot T_3(\lambda) \quad (4.2)$$

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 4.5).

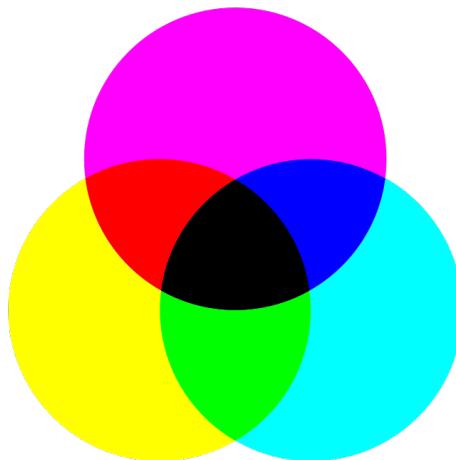


Abbildung 4.5: Die drei Grundfarben Cyan, Magenta und Gelb der subtraktiven Farbmischung ergeben zusammen schwarz (unbunt)¹⁶.

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

Auf dieselbe Weise verhalten sich Farbfilterfolien in Bezug auf das Scheinwerferlicht. Eine Rosco 789 „Blood Red“ auf einen Stufenlinsenscheinwerfer absorbiert alle spektrale Anteile des Lichts, bis auf sehr tiefe Rottöne (ab 650 nm). Das gemessene Spektrum eines Stufenlinsenscheinwerfers mit dieser Farbfilterfolie befindet sich im Anhang.

¹⁵ (Greule 2014: 84)

¹⁶ https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/64/CMY_ideal_version_rotated.svg/649px-CMY_ideal_version_rotated.svg.png [Stand: 26.06.2018]

4.5 Hauttöne

Von allen Farben nehmen die menschlichen Hauttöne eine besondere Rolle in dieser Arbeit ein, da die Auswirkung eines „Red Tail“ bei der Personenbeleuchtung beobachtet werden soll. 2018 haben Herr Dr.-Ing. Trinh Quang Vinh und Herr Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh einen Artikel in der „Licht“ über Licht und Hauttöne veröffentlicht. Sie haben unter anderem die spektralen Strahldichtefaktoren der Hauttöne von 15 Probanden untersucht. Dazu wurden die Hauttöne unter der Beleuchtung einer Halogenglühlampe mit kontinuierlichem Spektrum mit einem Strahldichtemessgerät gemessen¹⁷ (Abbildung 4.6).

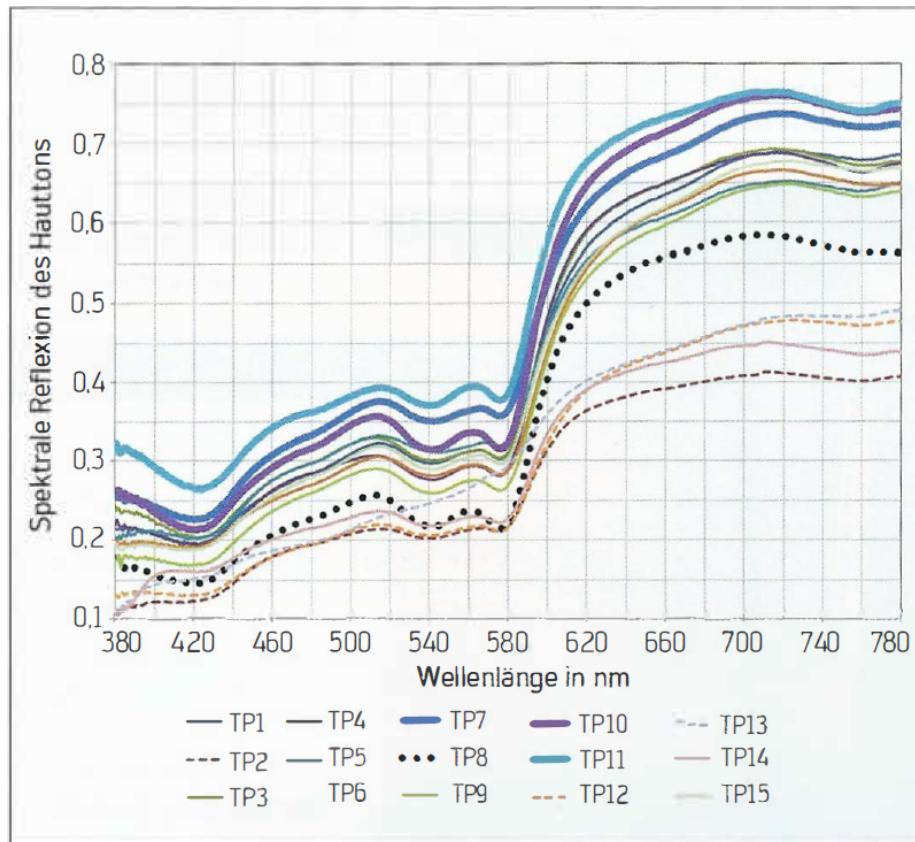


Abbildung 4.6: Spektrale Strahldichtefaktoren der 15 Hauttöne gemessen von Vinh und Khanh.¹⁸

Aus diesem Graph lassen sich ein paar Schlussfolgerungen ableiten:

¹⁷ (Vinh & Khanh 2018: 71)

¹⁸ (Vinh & Khanh 2018: 71)

4 Farben des Lichts

Zum einen reflektieren Hauttöne am meisten den roten Spektralanteil des Lichts. Dies ist ein Hinweis darauf, dass ein zusätzlicher tiefroter Spektralanteil im Licht Hauttöne natürlicher aussehen lassen könnte. Zum anderen ist auch deutlich zu erkennen, dass Hauttöne alle Farben des Spektrums reflektieren und daher nicht nur Rot, sondern das gesamte Spektrum für die Personenbeleuchtung wichtig ist. Außerdem ist durch die unterschiedlichen Kurvenhöhen zu erkennen, dass bestimmte Hauttypen eine bestimmte Beleuchtung bevorzugen. Leider ist in dem veröffentlichten Artikel nicht angegeben, welche Hauttöne die verschiedenen Testpersonen hatten.

5 Farbräume

In diesem Kapitel wird auf die Grundlagen der Farben und Farbräume eingegangen. Zuerst wird der RGB-Farbraum beschrieben und danach der daraus entstandene CIE-XYZ Farbraum. Schließlich wird noch der USC-Farbräum erklärt, der wiederum aus dem CIE-XYZ entsprungen ist. In der Farbmehrheit gibt es noch mehr Farbräume, die aber für diese Arbeit nicht relevant sind.

5.1 RGB Farbraum

Durch die Festlegung verschiedener Farbräume hat die Internationale Beleuchtungskommission CIE („Commission Internationale de l’Eclairage“) 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 Farbraumdarstellung in die nächste wechseln kann und die spektrale Empfindlichkeitskurve mittransformiert 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 Farbkoordinaten r , g und b , die sich aus den Primärvalenzen errechnen, in diesem Farbraum orten¹ (Gleichung 5.1).

$$r = \frac{R}{R + G + B}, \quad g = \frac{G}{R + G + B}, \quad b = \frac{B}{R + G + B} \quad (5.1)$$

Der RGB-Farbraum ist so konstruiert, dass jede Kombination aus den drei Farbkoordinaten 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 5.2).

$$b = 1 - r - g \quad (5.2)$$

Der RGB-Farbraum kann auch dreidimensional als Würfel aufgespannt werden. Dort ist die Farbe schwarz der Ursprung und weiß die Kombination aus allen drei Farbvektoren (Abbildung 5.1).

¹ (Hentschel 1993: 106)

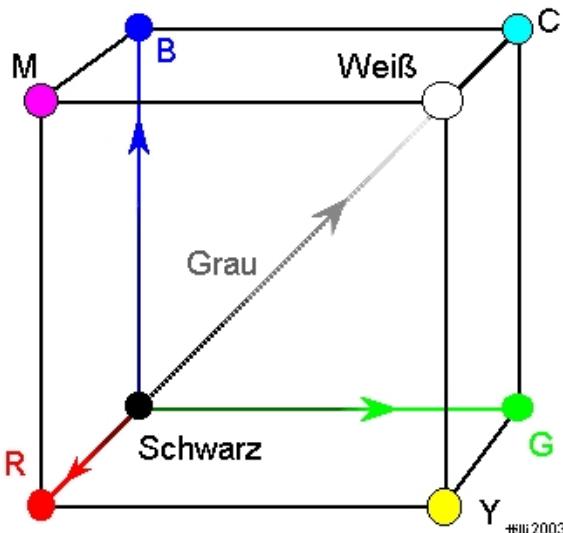


Abbildung 5.1: Beim RGB-Würfel werden alle Primärvalenzen R, G, B als gleich lange Vektoren angenommen².

Der RGB-Farbraum kann nicht alle Farben des sichtbaren Spektrums abbilden. W. D. Wright und J. Guild haben dazu Tests mit einem Monochromator gemacht. Ein Proband, der Farbflächen von 2° Gesichtsfeldgröße sieht, sollte mit den Wellenlängen 700 nm (Rot), 546 nm (Grün) und 435 nm (Blau) die gesehene Farbe nachmischen (Abbildung 5.2). Bei einer Referenzfarbe von zum Beispiel 500 nm (Blau-Grün) gab es keine Möglichkeit, diese Farbe mit den drei RGB-Farben zu mischen. Es musste sogar auf der Referenzfarbseite Rot dazugemischt werden, damit man auf das Blau-Grün abgleichen konnte. Dies würde einen negativen Rot-Anteil im RGB-Farbraum bedeuten, den es so nicht geben kann. Daher hat die CIE 1931 ein virtuelles Primärvalenzsystem erarbeitet, dass alle sichtbaren Farben darstellen kann³.

² <http://www.hilli1.de/hillifarbe/Endlichfarbe/03122wf.jpg> [Stand: 28.06.2018]
³ (Greule 2014:77)

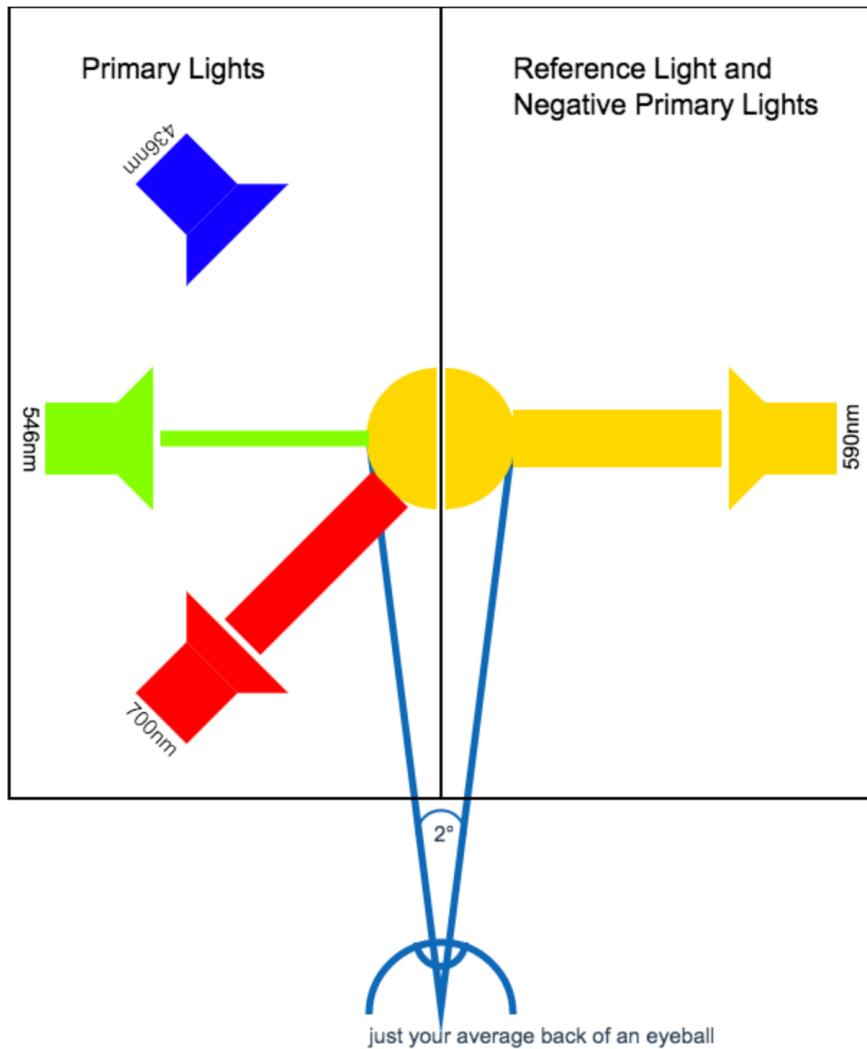


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung des Farbzuzuordnungsexperiments von Wright und Guild⁴.

5.2 CIE-XYZ Farbraum

Im CIE-XYZ Farbraum gibt es die Primärvalenzen X, Y und Z, die aus einer linearen Transformation des RGB-Farbraum entstanden sind⁵ (Gleichungen 5.3 - 5.5).

⁴ https://cdn-images-1.medium.com/max/1600/0*75FcZwPv1Wu17_kc.png
[Stand: 28.06.2018]

⁵ (Greule 2014: 76-77)

$$X = R_x \cdot R + G_x \cdot G + B_x \cdot B \quad (5.3)$$

$$Y = R_y \cdot R + G_y \cdot G + B_y \cdot B \quad (5.4)$$

$$Z = R_z \cdot R + G_z \cdot G + B_z \cdot B \quad (5.5)$$

Der Y-Wert entspricht dabei der Farbfunktion y_λ , die der $V(\lambda)$ -Kurve (Abbildung 4.1) gleicht, und steht daher für die Helligkeit der Farbe. Dies ist eine Erweiterung zum RGB-Farbraum, in dem die Helligkeit nicht direkt miteinbezogen wurde. Der X-Wert zeigt den Rot-Grün-Anteil an und am Z-Wert lässt sich der Blau-Gelb-Anteil einer Farbe bestimmen⁶ (Abbildung 5.3).

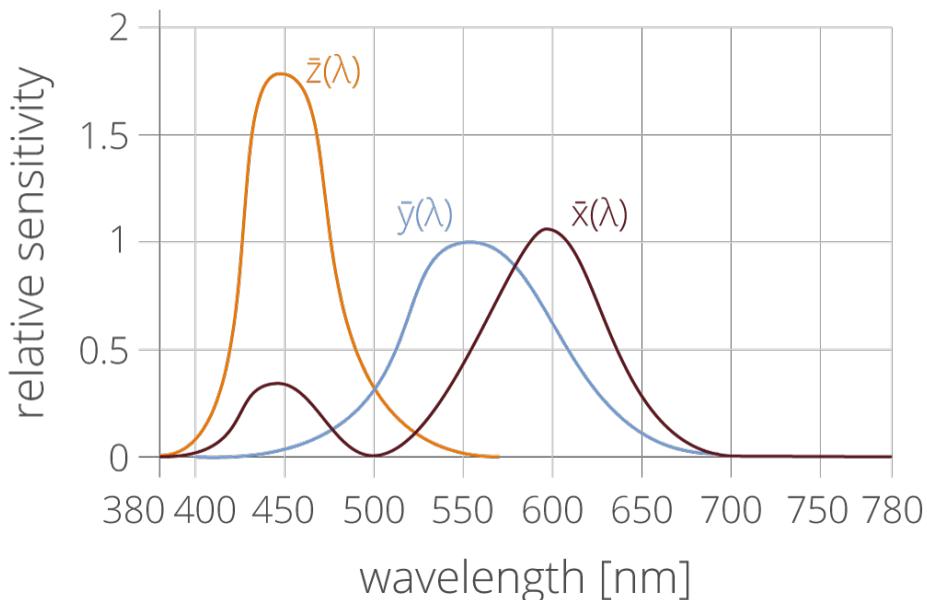


Abbildung 5.3: XYZ-Spektralwertfunktionen⁷

Aus diesen Primärvarlenzen lassen sie dich Farbanteile x, y und z ausrechnen, die auf der Farbtafel des CIE-XYZ Farbraums dargestellt werden (Gleichung 5.6).

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}, \quad z = 1 - x - y \quad (5.6)$$

Auch hier reichen zwei Normfarbwertanteile aus, um den Farbort (x,y) zu bestimmen. x steht für den Farbton und y für die Sättigung. 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 möglich⁸.

⁶ (Mueller 2014: 72)

⁷ <https://www.gigahertz-optik.de/assets/Uploads/Abb.-II.21-neu.png> [Stand: 29.06.2018]

⁸ (Greule 2014: 79)

5 Farbräume

Über die Grenzen des mit x und y aufgespannten Farbraums erstrecken sich von 380 nm Blau zu Grün und Gelb zu 780 nm rot alle sichtbaren Farben des Spektrums. Die beiden Enden des Farbraumes sind auf der gegenüberliegenden Seite über die theoretische Purpur-Grade verbunden. Die Farben auf dieser Geraden werden vom menschlichen Auge als Magenta interpretiert, gehören aber nicht mehr zum sichtbaren Wellenlängenbereich dazu⁹. Der Unbuntpunkt liegt bei $x = y = 0,33$ (Abbildung 5.4).

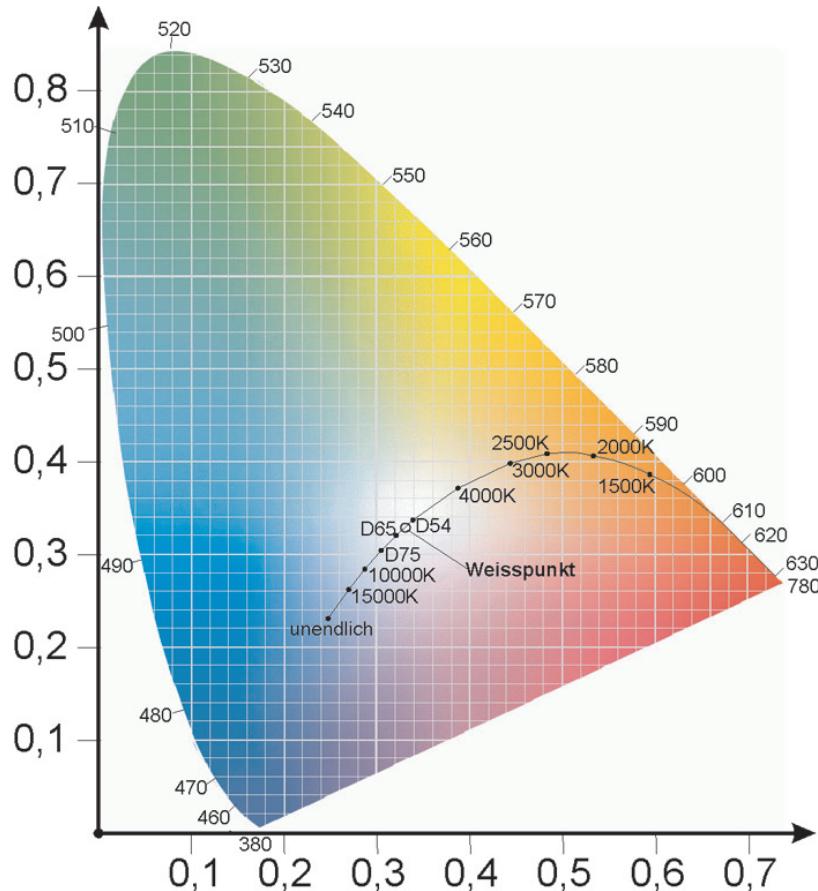


Abbildung 5.4: Darstellung der CIE-XYZ Farbtafel eines 2° Normalbeobachter¹⁰.

Im XYZ-Farbdia gramm ist der Plank'sche Kurvenverlauf eingezeichnet. Wenn ein Farbort auf diese Kurve trifft wird ihm die jeweilige Farbtemperatur zugeschrieben (Kapitel 6). Landet der Farbort in der Nähe dieser Kurve wird der Farbe eine sogenannte korrelierte Farbtemperatur (correlated color temperature) zugesprochen. Es wurden damit die „Geraden ähnlicher Farbtemperatur“ bestimmt, die anzeigen welche korrelierten Farbtemperaturen vom Farbort getroffen wird (Abbildung 5.5).

⁹ (Mueller 2014: 73)

¹⁰ <https://www.production-partner.de/wp-content/uploads/2018/02/Farbdreieck.jpg>
[Stand: 30.06.2018]

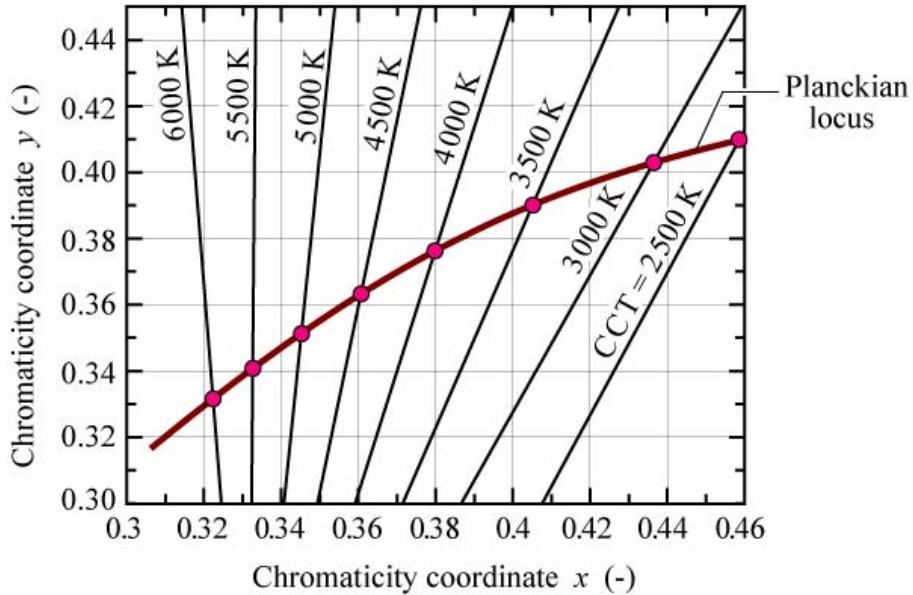


Abbildung 5.5: Detailansicht des XYZ-Farbraumes mit den „Geraden ähnlicher Farbtemperatur“¹¹.

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

Wenn man zwei Farben im XYZ-Farbraum vergleichen will, ist Vorsicht geboten, da die Farben auf der Farbtafel nicht mit gleich großem Abstand dargestellt werden. Dies ist daran zu erkennen, dass die Farbabstände im roten (620 nm - 770 nm) und blauen (380 nm - 470 nm) Bereich sehr nahe beieinander liegen, wohingegen sich der grüne Bereich (500 nm - 570 nm) sich über einen großen Anteil des hufeisenförmigen Rand erstreckt. Farbkontraste verhalten sich also nicht wie mit dem Auge wahrgenommenen Farben. Mit diesem Phänomen hat sich MacAdam beschäftigt und so sind 1940 die „MacAdam Ellipsen“ entstanden (Abbildung 5.6).

¹¹ <http://www.light.fi/blog/wp-content/uploads/2016/04/xyChromaticity-diagram.png>
[Stand 01.07.2018]

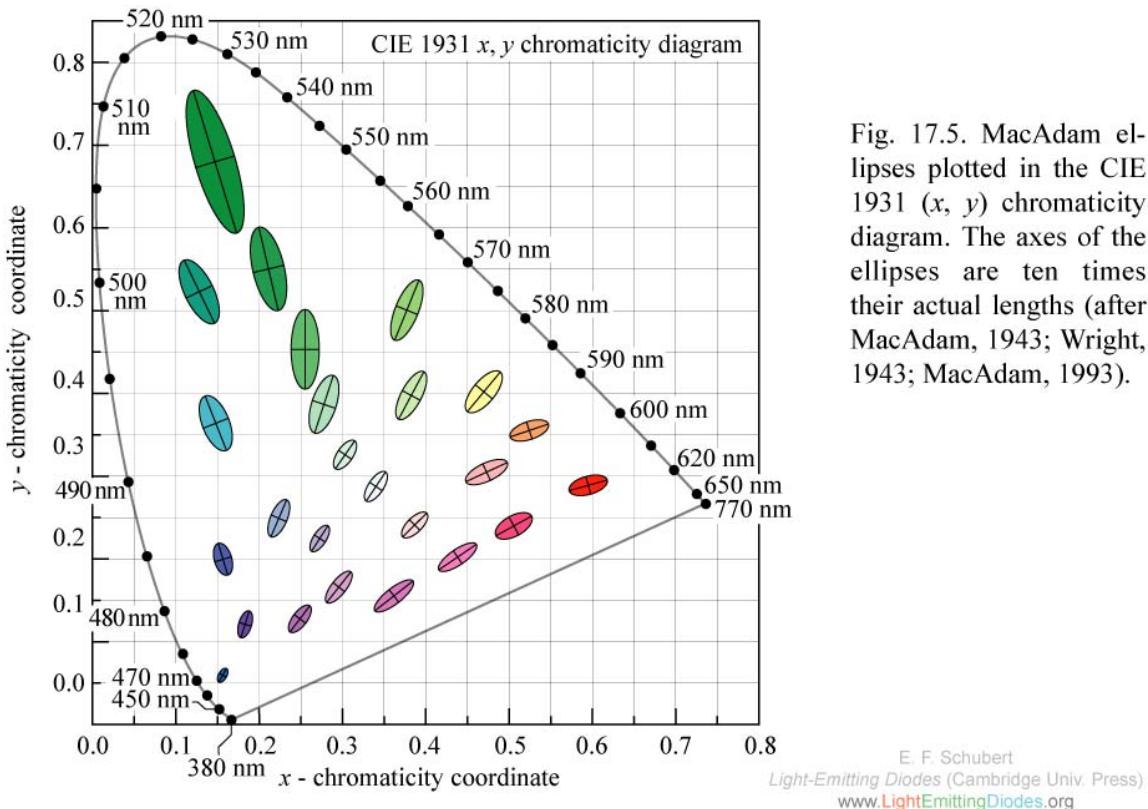


Abbildung 5.6: Abbildung der MacAdam Ellipsen im XYZ-Farbraum¹²

Die MacAdam Ellipsen zeigen die Bereich an, in dem ein Normalbeobachter zwei unterschiedliche Farborte dem selben Farbton zuordnen würde. Hätte der Farbraum annähernd gleiche Farbabstände, dann wären die Ellipsen kreisförmig.

Es wird also deutlich, dass der XYZ-Farbraum ein paar Schwächen aufweist. Das liegt daran, dass die X-, Y- und Z-Primärvalenzen nur auf der additiven Farbmischung beruhen. Die subtraktive Farbmischung, die ihr Weiß aus 100% Cyan, Magenta und Gelb mischt, ist in dieser Farbraumdarstellung nicht darstellbar (Farben mit voller Sättigung liegen auf dem Kurvenrand). Außerdem hat MacAdam gezeigt, dass die Farbabstände nicht mit der realen Farbwahrnehmung zusammenhängt. So eignet sich der CIE-XYZ-Farbraum nur zur eindeutigen Bestimmung eines Farbreizes¹³.

¹² <https://ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap17/F17-05%20MacAdam%20ellipses.jpg> [Stand: 01.07.2018]

¹³ (Greule 2014: 79-80)

Fig. 17.5. MacAdam ellipses plotted in the CIE 1931 (x, y) chromaticity diagram. The axes of the ellipses are ten times their actual lengths (after MacAdam, 1943; Wright, 1943; MacAdam, 1993).

5.3 CIE-unity chromity scale-Farbtafel (CIE-UCS)

Damit die Farbabstände aus der Farbtafel besser mit der tatsächlichen Farbwahrnehmung übereinstimmt, hat die CIE 1976 die UCS-Farbtafel definiert. Für diese Farbtafel werden die x- und y-Normfarbwertanteile so transformiert, dass die Farbabstände vereinheitlicht sind (Gleichung 5.7).

$$u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \quad (5.7)$$

Es wurden also die Farbbereiche aneinander angeglichen und die Farbtafel hat sich gedreht. Dadurch ähneln die Farbabstände den real empfunden Abständen schon deutlich besser als im XYZ-Farbraum. Durch die Transformation sind auch die MacAdam Ellipsen deutlich kreisförmiger geworden (Abbildung 5.7).

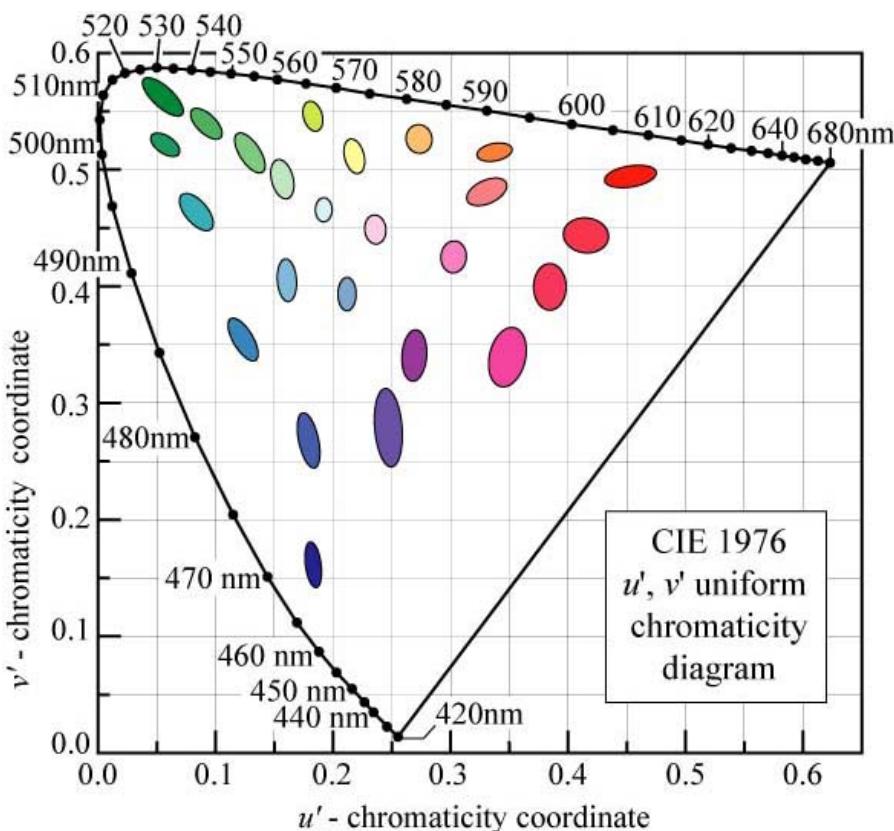


Abbildung 5.7: Abbildung der MacAdam Ellipsen auf der UCS-Farbtafel ¹⁴

¹⁴ https://www.fktg.org/sites/default/files/sauter_bild_02.jpg [Stand: 01.07.2018]

Durch die CIE-UCS Farbtafel ist auch der $\Delta u'v'$ entstanden. Dieser Wert ist wie beim TCI (Kapitel 7.3) ein Maß dafür, wie weit ein u'_i, v'_i - Farbort mit korrelierter Farbtemperatur x von dem Plank'schen Kurvenzug bei Farbtemperatur x (u'_0, v'_0) entfernt ist¹⁵ (Abbildung 5.8).

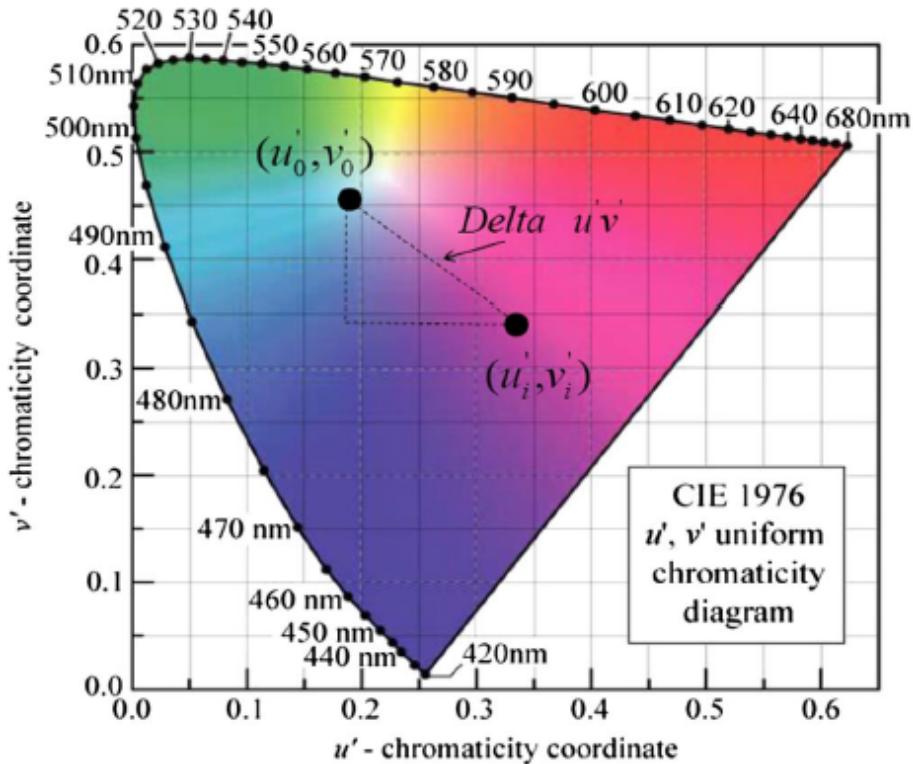


Abbildung 5.8: Darstellung des $\Delta u'v'$ auf der UCS-Farbtafel

Anhand des Wertes ist erkennbar, ob das gemischte Weiß grünstichtig mit $\Delta u'v' < 0$ oder magentastichtig mit $\Delta u'v' > 0$ ist (Gleichung 5.8).

$$\Delta u'v' = \sqrt{(du')^2 + (dv')^2} = \sqrt{(u'_i - u'_0)^2 + (v'_i - v'_0)^2} \quad (5.8)$$

Dieser Wert wird zur Einschätzung der Weißlichtqualität in Kombination mit einem Farbwiedergabewert zur Rate gezogen und ist daher auch bei den „Red Tail“-Messung von größerer Bedeutung. Eine Abweichung von $\Delta u'v' < \pm 0.005$ ist für ein gutes weiß akzeptabel¹⁶.

Auf der UCS-Farbtafel lassen sich nur Farben gleicher Helligkeit miteinander vergleichen. Um Farben verschiedener Helligkeiten vergleichen zu können hat die CIE noch weitere dreidimensionale Farbräume bestimmt, die für die Red-Tail-Untersuchungen, aber keine größere Rolle spielen.

¹⁵ (Jiajie & Yung & Pecht 2014: 566)

¹⁶ Ohno (2005)

6 Farbtemperatur

Mit der Farbtemperatur lässt sich die Qualität des Lichts bestimmen. Entstanden ist der Begriff durch die Untersuchen von William Thomson (Lord Kelvin). Er hat herausgefunden, dass es eine Verbindung zwischen der Temperatur eines schwarzen Strahlers (Plank'scher Strahler) und dessen Lichtfarbe gibt¹. Daher wird die Farbtemperatur einer Lampe stets in Kelvin (K) angegeben. Bei den Untersuchen wird ein schwarzer Körper mit einem Hohlraum erhitzt. Dadurch wird aus diesem Hohlraum Licht abgestrahlt. Ändert sich die Temperatur des schwarzen Körpers, so ändert sich auch das Spektrum des abgestrahlten Lichts (Abbildung 6.1).

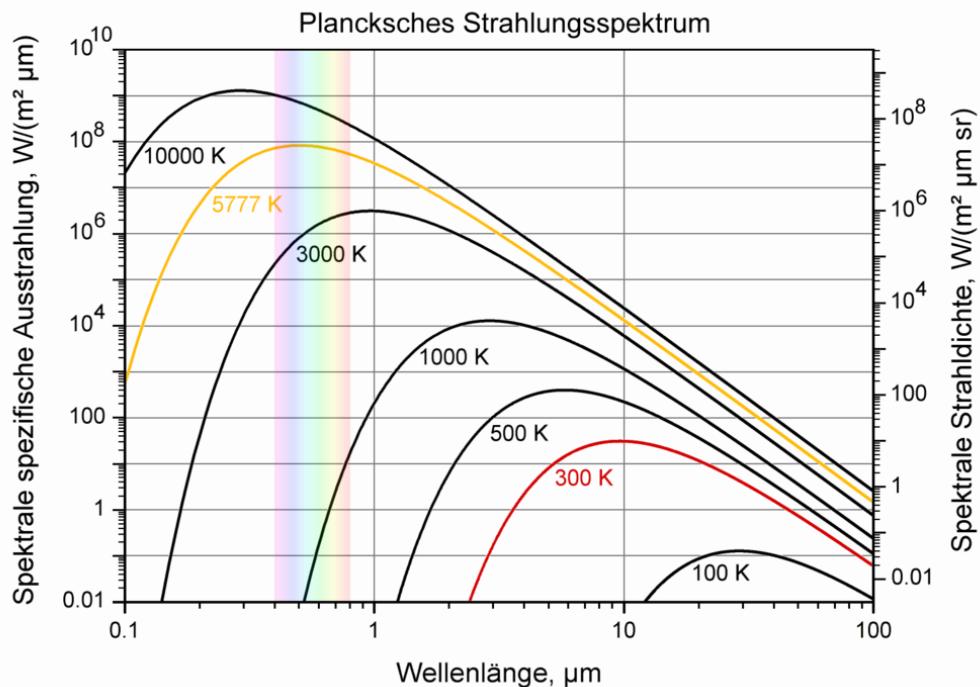


Abbildung 6.1: Spektrale Kurven verschiedener Farbtemperaturen des schwarzen Strahlers. (Der bunteingefärbte Bereich stellt das sichtbare Lichtspektrum dar.)²

¹ (Mueller 2014:89)

² https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/0e/BlackbodySpectrum_loglog_150dpi_de.png/640px-BlackbodySpectrum_loglog_150dpi_de.png [Stand: 10.07.2018]

6 Farbtemperatur

Die abgestrahlte Lichtfarbe des schwarzen Strahlers ist anfänglich rötlich, wechselt bei steigenden Temperatur des Körpers ins Weiße und wird danach immer bläulicher. Daher spricht man bei einer hohen Farbtemperatur von einer kalten Lichtfarbe und bei niedriger Farbtemperatur von einer warmen (Abbildung 6.2). Wenn das Licht einer Lampe von der spektralen Beschaffenheit mit dem Licht des schwarzen Strahlers übereinstimmt, wird die Lichtfarbe der Temperatur des schwarzen Körpers zugeordnet³.

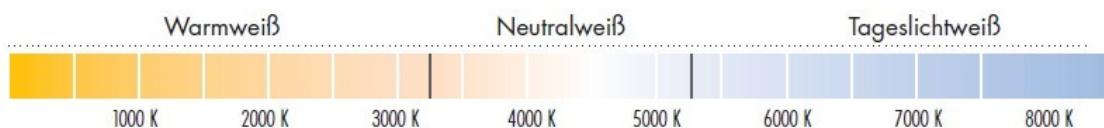


Abbildung 6.2: Spektrale Kurven verschiedener Farbtemperaturen des schwarzen Strahlers. (Der bunteingefärbte Bereich stellt das sichtbare Lichtspektrum dar.)⁴

Typische Farbtemperaturen sind:

Farbtemperatur		
Kerzenlicht	1850 K	
Glühlampe 40W	2650 K	
Normlicht A	2855,4 K	
Halogenglühlampe	3200 K	
Normlicht D65, Fernsehweißbild (Europa)	6504 K	
Tageslicht bei bedecktem Himmel	6700 K - 7000 K	
blauer Himmel ohne direkte Sonne	12.000 K - 30.000 K	

Tabelle 6.1: Verschiedene Beispiele für die Farbtemperatur⁵

Falls das Spektrum einer Lampe sehr von dem des schwarzen Strahlers abweicht, kann eigentlich keine vernünftige Aussage über die Farbtemperatur der Lampe gemacht werden. Damit man trotzdem Gasentladungslampen und LED's eine Farbtemperatur zuordnen kann, wird dem Spektrum eine korrelierte Farbtemperatur zugeordnet. Diese „Correlated Color Temperatur“ (CCT) macht eine Aussage darüber, welche Farbtemperatur der Leuchte am ähnlichsten ist⁶ (Kapitel 5.2).

³ (Mueller 2014: 89)

⁴ <http://www.ledmarkt24.de/bilder/content/led-farbtemperatur-warmweiss-neutral.jpg> [Stand: 08.07.2018]

⁵ (Greule 2014: 29)

⁶ (Mueller 2014: 91)

7 Farbwiedergabewerte

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.

7.1 CIE: Color Rendering Index (CRI)

Da der Farbort allein keine eindeutige Aussage über die Zusammensetzung des Spektrums zulässt, wurde 1965 von der Internationalen Beleuchtungskommission ein Testverfahren entwickelt, mit dem die Farbwiedergabe (Color Rendering Index) einer Leuchte bestimmt werden kann. Dafür werden acht Referenzfarben festgelegt. Bei einer CRI-Messung wird also überprüft, 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 (R_1-R_8) werden mit Werten von 0 bis 100 gewichtet, wobei ein Wert von 100 aussagt, dass die Farbe bestmöglich wiedergegeben wird. Bei der Berechnung des CRI werden zuerst einzelne Indexwerte R_i der Farben i aus den Farbdifferenzen ΔE_i berechnet (Gleichung 7.1)¹.

$$R_i = 100 - 4,6 \cdot \Delta E_i \quad (7.1)$$

Die Farbdifferenzen ΔE_i werden mit 4,6 skaliert, damit die CIE Normlichtart F4 einen daraus berechneten R_a -Wert von 51 bekommt. Die Normlichtart F4 ist mit ihrem Spektrum repräsentativ für eine damalige Standartleuchtstofflampe. Weil mit dem CRI häufig Aussagen über Leuchtstofflampen gemacht werden, wird die Normlichtart F4 als Referenz in die Mitte der Farbwiedergabeskala geschoben².

Damit der CRI berechnet werden kann, werden diese acht Werte schließlich arithmetisch gemittelt und es ergibt sich der Gesamtwert R_a , welcher repräsentativ für die Farbwiedergabe der Leuchte steht (Gleichung 7.2)³.

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (7.2)$$

In der DIN 6169 werden zur besseren Beurteilung der Farbwiedergabe die R_a -Werte in verschiedene Stufen unterteilt (Tabelle 7.1).

¹ Davis & Ohno (2006)

² Houser & Mossman & Smen & Whitehead (2015)

³ Production Partner (2018)

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 7.1: R_a eingeteilt in verschiedene Stufen⁴

Ein hoher R_a -Wert beschreibt aber nur bedingt die Farbwiedergabe einer Leuchte, da beispielsweise keine Angabe über die Sättigung der Farben gemacht wird, weil die acht Referenzfarben nur Pastelltöne sind, da der CRI damals für Glühlampen entwickelt wurde. Gesättigte Farben fließen nicht in die Bewertung mit ein. Das wirkt sich auch auf die Vergleichbarkeit von Leuchten aus. Zwei Scheinwerfer mit demselben R_a -Wert von 90 können sehr unterschiedliche Spektren haben und damit sehr unterschiedlich Farben darstellen, trotz gleichem Farbwiedergabeindex. Außerdem kann nur schwer eine Aussage darüber gemacht werden, ob sich eine Leuchte mit einem guten CRI für Personenbeleuchtung eignet, weil Rottöne und Hauttöne in diesem Bewertungsverfahren fehlen.

Ein weiteres Problem des CRI ist, dass es passieren kann, dass eine Leuchte zwei unterschiedliche CRI-Werte bekommt, je nachdem ob diese knapp über oder unter 5000 K bei der Messung lag.

Auch die Deutung von negativen Differenzfarbwerten gestaltet sich schwierig. Wie soll eine Lampe mit einem negativen Farbwert behandelt werden?

Weiterhin können Leuchtstofflampen den CRI ausnutzen, indem durch gezielte schmalbandige Peaks im Spektrum die Referenzfarben getroffen werden. Auf diese Weise kann zwar ein hoher CRI-Wert erreicht werden, aber kein breitbandiges und ausgewölbtes Lichtspektrum entstehen. 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. 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. 7.1).

⁴ (Hentschel 1993: 111)

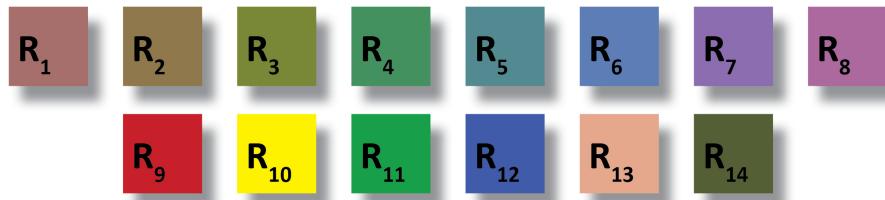


Abbildung 7.1: Alle Referenzfarben des Farbwiedergabeindexes: R_1 Altrosa, R_2 Senfgelb, R_3 Gelbgrün, R_4 Hellgrün, R_5 Türkisblau, R_6 Himmelblau, R_7 Asterviolett, R_8 Fliederviolett, R_9 Rot gesättigt, R_{10} Gelb gesättigt, R_{11} Grün gesättigt, R_{12} Blau gesättigt und R_{13} Rosa (Hautfarbe), R_{14} Blattgrün⁵

Aus dem Demofile der JETI „LiVal“-Software kann bei einer warmweißen LED ein CRI von 82 bestimmt werden (Abbildung 7.2). Der R_e -Wert ist naturgemäß schlechter als der R_a -Wert. Mit 77 ist dieser noch akzeptabel, da der R_9 -Wert (gesättigtes Rot) nur 15 Punkte erbringt. Diese Leuchte entspricht „sehr hohen Anforderungen“ (Tabelle 7.1) und ist damit nach Definition sehr gut in der Farbwiedergabe. Solche einzelne schlechte Referenzwerte werden durch die arithmetische Mittlung der Referenzfarbwerte begünstigt. Sie 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 erkennbar⁶.

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 besser⁸.

Aus diesen Gründen und der Erkenntnis der CIE, „dass die CRI-Methode generell nicht anwendbar ist, um eine Anzahl von Lichtquellen gemäß ihrer Farbwiedergabe einzurichten, wenn weiße LEDs darunter sind“ (Commission Internationale de l’Eclairage 2007: VI), wird sich diese Arbeit hauptsächlich auf andere Farbwiedergabewerte konzentrieren. Der CRI wird aber mit aufgeführt, weil dieser in der Scheinwerfer- und Fernsehbranche (noch) einen hohen Stellenwert inne hat.

⁵ https://www.elementalled.com/wp/wp-content/uploads/2015/08/CRI_chart.jpg
[Stand: 03.07.2018]

⁶ Davis & Ohno (2006)

⁸ Production Partner (2018)

7 Farbwiedergabewerte

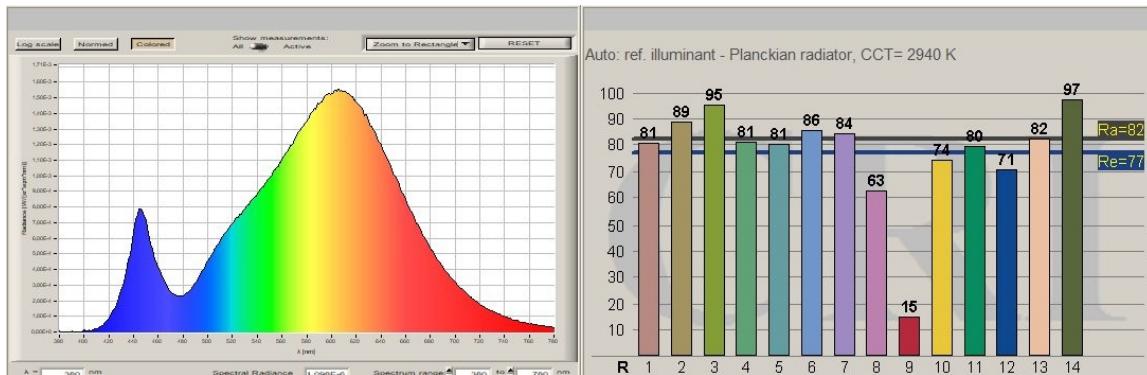


Abbildung 7.2: Messung einer warmweißen LED-Leuchte (Ausschnitt aus dem Demofile des Programmes „LiVal“ der Firma JETI): Links ist das Lichtspektrum der Leuchte dargestellt, rechts die gemessenen CRI-Werte⁷

7.2 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 sowie ihn zu ersetzen. So gibt es fünfzehn vollständig satureierte Referenzfarben, die auch auf LED-Leuchten anwendbar sind. Über Skaleneffekte soll der CQS auch indirekt eine Aussage über die Farbwiedergabe von Pastelltönen ermöglichen (Abb. 7.3).



Abbildung 7.3: Alle Referenzfarben des CQS mit voller Sättigung⁹

Der CQS wertet eine Übersättigung der Farbe nicht, nur eine Abweichung von Farbton oder Helligkeit wird bestraft. Dies steht im Gegensatz zum CRI, bei dem weniger Punkte für eine Farbe vergeben wird, 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 gewünscht sein und ist daher nicht pauschal negativ einzuordnen¹⁰.

⁹ <https://www.lemoledlight.com/wp-content/uploads/2016/04/LED-Lighting-CRI-5.jpg> [Stand: 13.07.2018]

¹⁰ (Davis & Ohno 2006: 3)

7 Farbwiedergabewerte

Durch die Art der Berechnung der CQS-Wertes ist an diesem deutlicher zu erkennen, ob ein Leuchtmittel eine eher gute oder eher schlechte Farbwiedergabe aufweist. Der CQS-Wert lässt sich mit Hilfe von drei Formeln berechnen. Dazu wird zuerst der Farbdifferenzwert ΔE_{rms} aus dem quadratischen Mittel (root-mean-square) der 15 Farbunterschiede ΔE_i berechnet¹¹:

$$\Delta E_{rms} = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} \Delta E_i^2} \quad (7.3)$$

Aus diesem Farbdifferenzwert wird ähnlich wie beim CRI (Gleichung 7.1) ein Farbwiedergabewert $Q_{f,rms}$ errechnet (Gleichung 7.4).

$$Q_{f,rms} = 100 - 3,0305 \cdot \Delta E_{rms} \quad (7.4)$$

Schließlich wird durch eine Skalierung auf Werte von 0 bis 100 aus diesem Farbwiedergabewert der CQS-Wert Q_f (Gleichung 7.5). Dadurch entfallen beim CQS negative Farbwerte, die beim CRI sehr schwierig zu interpretieren sind.

$$Q_f = 10 \ln(e^{\frac{Q_{f,rms}}{10}} + 1) \quad (7.5)$$

Der CQS wird mit seinen fünfzehn Referenzfarben im CIELAB-Farbraum eingezeichnet. Da die Abstände von Farborten in diesem Farbraum in etwa wahrgenommenen Farbunterschieden entsprechen, kann gut erkannt werden, wie stark sich die Farbwiedergabe einer Leuchte den Referenzwerten ähneln (Abbildung 7.4 und 7.5).

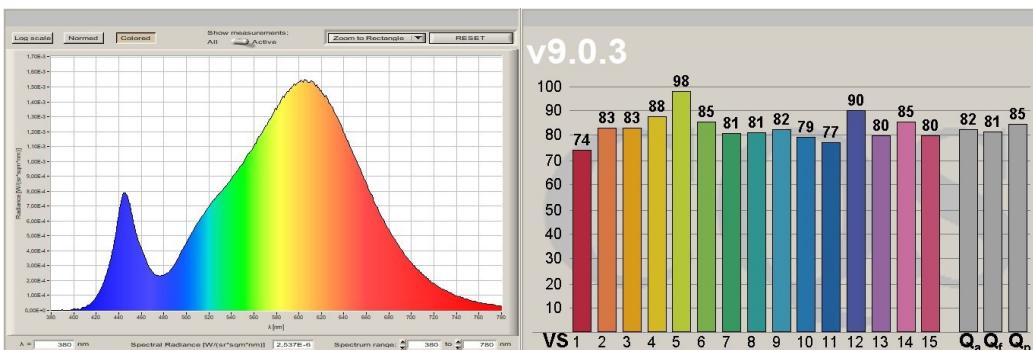


Abbildung 7.4: Ausschnitt aus dem Programm „LiVal“ der Firma JETI: Demo Spektrum einer warmweißen LED (2942K) mit $Q_f = 81$

¹¹ (Davis & Ohno 2006: 5)

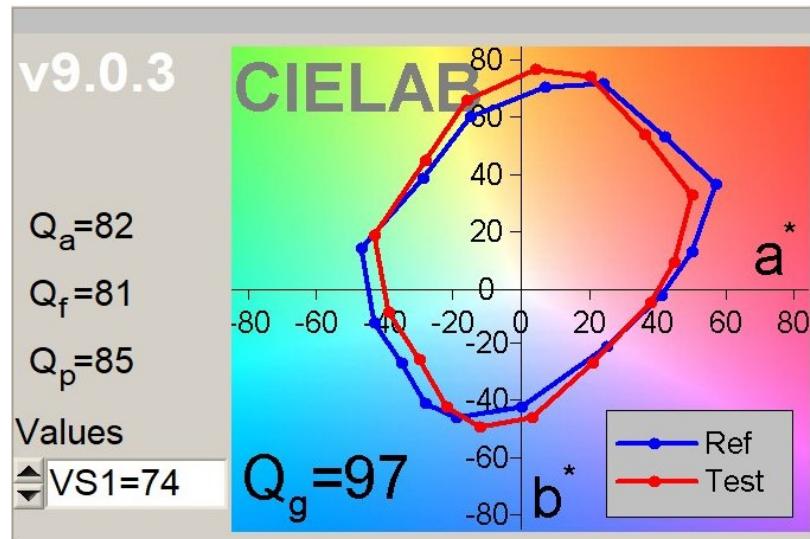


Abbildung 7.5: Ausschnitt aus dem Programm „LiVal“ von der Firma JETI: Die fünfzehn Referenzfarben(blau) im CIELAB-Farbraum im Vergleich zu den gemessenen Werten (rot)

Auf die in den Abbildung 7.4 und 7.5 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 gehen und nicht relevant für diese Thesis sind¹².

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.

¹² (Khanh & Bodrogi & Vinh 2007: 60-62)

7.3 EBU: Television Lighting Consistency Index (TLCI)

Die European Broadcast Union (EBU) hat 2012 einen neuen lichttechnischen Parameter bestimmt, der auf den Film- und Fernsehbereich zugeschnitten ist, den Television Lighting Consistency Index, um einen Zusammenhang zwischen Farbwiedergabewert und Kamera zu schaffen. Wie eine Messung des TLCI vonstattengeht, ist in diesem Blockschaltbild der EBU verdeutlicht (7.6):

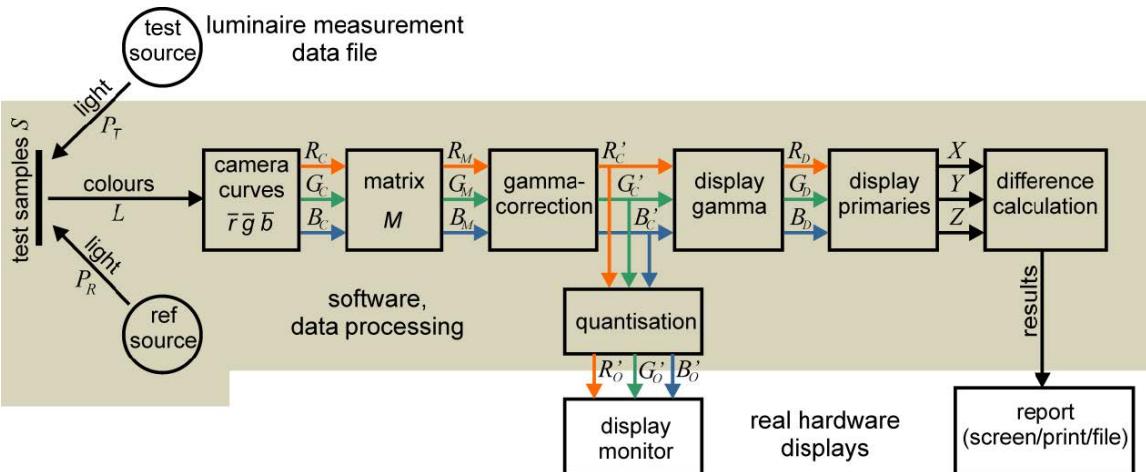


Abbildung 7.6: Blockschaltbild einer TLCI-Wertbestimmung¹³

Zur Ermittlung des TLCI wird eine Testtafel mit 24 Farben von einer „Standartkamera“ gefilmt. Die von der Kamera gefilmten Farben werden dann in einem Datenfile gespeichert. Diese Daten werden analysiert, um die Farbtemperatur zu bestimmen und so die Referenzdaten zu erstellen. Anschließend wird diese Tafel von der zu testenden Leuchte bestrahlt und ebenfalls gefilmt. Auf einem an die Kamera angeschlossenen „Standarbildschirm“ werden die TLCI-Messergebnisse angezeigt. Die Kamera gewichtet die reflektierten Farben mit ihren \bar{r} -, \bar{g} - und \bar{b} -Kamerakurven und die Farbtemperatur wird bestimmt¹⁴ (Gleichung 7.6).

$$R_C = \sum_{\lambda=380}^{760} R_\lambda \cdot P_\lambda \cdot \bar{r}_\lambda \quad G_C = \sum_{\lambda=380}^{760} R_\lambda \cdot P_\lambda \cdot \bar{g}_\lambda \quad B_C = \sum_{\lambda=380}^{760} R_\lambda \cdot P_\lambda \cdot \bar{b}_\lambda \quad (7.6)$$

Dabei entspricht λ der Wellenlänge, R_λ der Reflektion der Testfarbe und P_λ der spektralen Verteilung des Lichts der Test beziehungsweise Referenzleuchte.

¹³ (Roberts 2015: 15)

¹⁴ (Roberts 2015: 16)

7 Farbwiedergabewerte

Die so entstandenen R_C , G_C und B_C -Werte werden dann im zweiten Schritt auf Weiß abgeglichen (Kapitel 10.1.7). Diese Weißabgleichswerte R_{Cb} , G_{Cb} und B_{Cb} werden mit einer linearen Matrix M bewertet, um die Werte des RGB-Signals zu erhalten¹⁵ (Gleichung 7.6).

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,182 & -0,209 & 0,027 \\ 0,107 & 0,890 & 0,003 \\ 0,004 & -0,134 & 1,094 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{Cb} \\ G_{Cb} \\ B_{Cb} \end{bmatrix} \quad (7.7)$$

Die RGB-Werte werden in einer zweiten Matrix verrechnet, damit die Sättigungswerte der Farben übereinstimmen (Empfehlung der EBU: 90 % Sättigung). Im nächsten Schritt werden die eben berechneten R_M -, G_M - und B_M -Werte der einzelnen Farben von der Gammakurve der Kamera vorverzerrt (Kapitel 10.1.5). Beim Bildschirm angekommen werden die R'G'B'-Werte der Farben mit der Gammakurve des Bildschirms wieder entzerrt (Empfehlung der EBU: $\gamma = 2,4$). Für die 24 Farben der Testtafel werden dann im vorletzten Schritt mit der XYZ()-Matrix die Farbkoordinaten X, Y und Z für den Bildschirm aus den Gamma entzerrten Werten R_d , G_d und B_d errechnet¹⁶ (Gleichung 7.7).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} XYZ(0,0) & XYZ(0,1) & XYZ(0,2) \\ XYZ(1,0) & XYZ(1,1) & XYZ(1,2) \\ XYZ(2,0) & XYZ(2,1) & XYZ(2,2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_d \\ G_d \\ B_d \end{bmatrix} \quad (7.8)$$

Die einzelnen Farbabstände ΔE_i von den Referenzfarben zu den gemessenen Farben werden mit der CIEDE2000 Farbabstandsformel errechnet¹⁷ (Gleichung 7.10).

$$\sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2} \quad (7.9)$$

Die Berechnung der Farbabstände ist äußerst komplex. Die Gewichtungsfaktoren k machen eine Aussage über die Wahrnehmungsumgebung der Farben. Die Kompensationsfaktoren S beschreiben den Einfluss der visuellen Wahrnehmung auf die Helligkeit L (Lightness), die Farbe C (chroma) und den Farbwinkel H (hue). Diese k und S Parameter sorgen dafür, dass die errechneten Farbabstände auch wirklichen den wahrgenommenen Farbabständen entsprechen. Zusätzlich wird noch ein Farbdrehungsterm R_T mit eingerechnet, damit der blaue Bereich des Spektrums besser abgedeckt ist¹⁸.

¹⁵ (Roberts 2015: 16)

¹⁵ (Roberts 2015: 21)

¹⁶ (Roberts 2015: 17)

¹⁷ (Sharma & Wu & Dalal 2004: 3)

¹⁸ Yang & Ming & Yu (2012)

7 Farbwiedergabewerte

Aus den ausgerechneten Farbabständen wird danach ein Farbwiedergabezwischenwert ΔE_a^* ermittelt (Gleichung 7.10).

$$\Delta E_a^* = \left(\sum_{i=1}^{18} (\Delta E_i^*)^4 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (7.10)$$

Schließlich wird der Zwischenwert noch angepasst, damit keine negativen Werte entstehen können (Gleichung 7.11).

$$Q_a = \frac{100}{1 + \left(\frac{\Delta E_a^*}{k}\right)^p} \quad (7.11)$$

Der TLCI wird mit dem Wert Q_a von 0 bis 100 angegeben. Über die Parameter k und p wird der TLCI noch feiner adjustiert. Für optimale Werte ist $k = 3, 16$, damit eine Standart Tageslichtleuchtstoffröhre dabei den TLCI-Wert 50 erreicht. Mit $p = 4$ ist für ein balanciertes Verhältnis zwischen hohen und niedrigen TLCI-Werten gesorgt¹⁹. Die TLCI Werte von 0 bis 100 sind für Coloristen in der Nachbearbeitung des Video-materials wie folgt zu deuten (Tabelle 7.2):

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

Tabelle 7.2: Q_a eingeteilt in verschiedene Stufen²⁰

Anhand der Tabelle ist eine Art Kostenvergleich möglich, in dem die Farbwiedergabequalität einer Leuchte gegen den Nachbearbeitungsaufwand von Coloristen gegengerechnet werden kann. Der TLCI gibt sogar eine Empfehlung ab, an welchen Paramtern Coloristen Verbesserungen vornehmen sollten (Abbildung 7.7).

¹⁹ (Roberts 2015: 22)

²⁰ Production Partner (2018)

7 Farbwiedergabewerte

Die Messung des TLCI-Werts ergibt ein Ergebnisprotokoll bestehend aus drei Abschnitten: eine Farbtafel mit den 24 Farbfeldern, eine Empfehlung für Coloristen zur nachträglichen Bildbearbeitung und ein Vergleich von Referenz- und Testspektrum (Abbildung 7.7):

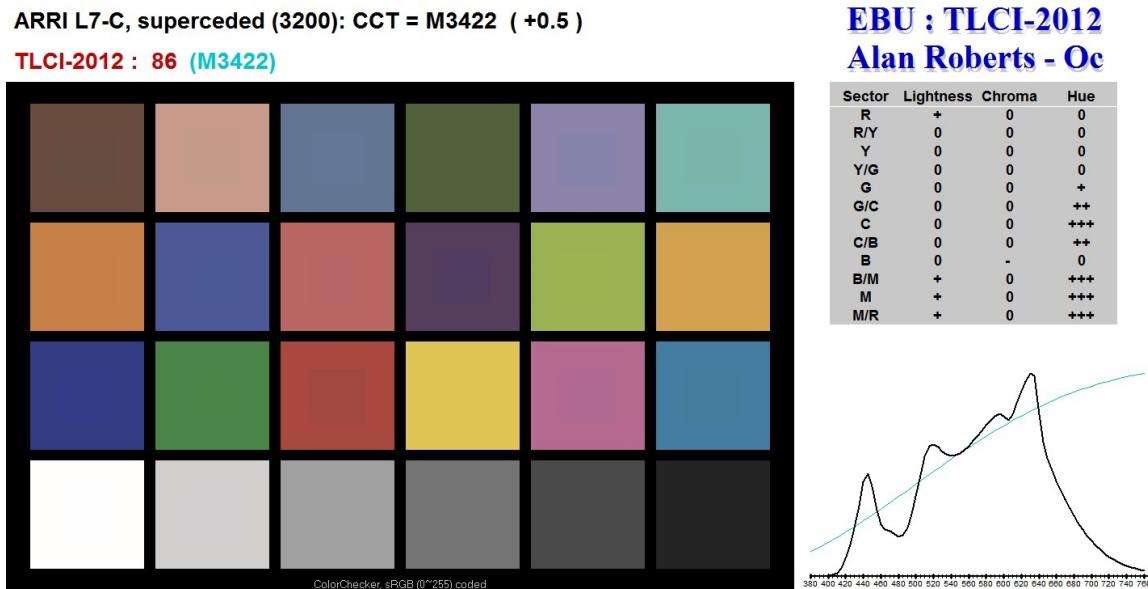


Abbildung 7.7: TLCI-Ergebnisprotokoll eines Arri L7-C LED Fresnelscheinwerfers²¹

Der Abbildung 4.7 kann links oben der Name der Leuchte, die gemessene korrelierte Farbtemperatur und die Abweichung vom Plank'schen Kurvenzug (Kapitel6) mit einer Gewichtung von 0.0054 (Empfehlung EBU) entnommen werden. Ist der Abweichungswert kleiner als -1 wird die Zahl in Magenta dargestellt (magentastichiges Weiß), ist sie größer als +1, in grün (grünstichiges Weiß). Da die Leuchte keine farbliche Abweichung aufweist, ist die in der Abbildung zu sehende Zahl schwarz. Eine Zeile darunter steht der gemessene TLCI-Wert. Der Arri L7-C ist mit $Q_a = 86$ in die beste Farbwiedergabekategorie einzustufen (Tabelle 7.2).

Die Tabelle rechts oben zeigt Korrekturvorschläge für eine weitere Bildbearbeitung. In diesem Beispiel wurden für 12 Farbtöne Verbesserungen für die Helligkeit, die Sättigung und/oder die Farbtonabweichung ermittelt. 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 so minimal ist, dass eine Korrektur nicht notwendig ist. Die Anzahl der „+“ und „-“ wiederum ist ein Hinweis darauf, wie viel Aufwand der Colorist für die Anpassung benötigt. Bei dem in diesem Beispiel vermessenen Arri L7-C Bedarf es vor allem im Bereich der Farbtöne Cyan, Blau/Magenta, Magenta und Magenta/Rot

²¹ <https://tech.ebu.ch/tlci-2012> [Stand: 12.07.2018]

7 Farbwiedergabewerte

einer Aufbesserung. Auch im Grün/Cyan- und Cyan/Blau-Bereich sollte der Farbton angepasst werden. Die empfohlenen Verbesserungen der Helligkeit und Sättigung einiger Farbtöne sind nach der Tabelle beziehungsweise dem gemessenen Ergebnis weniger umfangreich.

Eine Farbtafel mit 24 farbigen Rechtecken ist in der Abbildung 4.7 unten links sichtbar. Dabei beinhaltet jedes rechteckige Farbfeld mittig ein weiteres, kleines Rechteck, welches die Referenzfarbe anzeigt. Das große, äußere Farbfeld zeigt dabei die Farbe, die in diesem Fall der Arri L7-C wiedergibt. Je deutlicher das Referenzviereck in dem Farbfeld zu sehen ist, desto schlechter ist die Farbwiedergabe der Testleuchte. Im gezeigten Beispiel ist vor allem im roten Farbfeld ein deutlicher Unterschied zu erkennen aus dem sich schließen lässt, dass der Arri L7-C diese Farbe weniger gut wiedergibt wie andere Farben.

Rechts unten ist auf dem TLCI-Ergebnisprotokoll das Referenzspektrum mit dem Wellenlängenbereich von 380 nm bis 740 nm abgebildet (schwarz) und dazu wird das geteste Spektrum geplottet (cyan). In dieser Ansicht kann man gut erkennen, inwie weit das Licht des Arri L7-C das Referenzspektrum abdeckt²².

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der TLCI die Farben für eine Kamera bewertet und zieht sogar zwei Hauttöne mit in Betracht. Daher eignet sich dieser Farbwiedergabewert sehr gut für die Messung der Auswirkung eines Red Tail.

²² (Roberts 2015: 15)

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

Der TM-30 wurde 2015 von der „Illuminating Engineering Society“ (IES) ausgearbeitet, um eine Alternative zum CRI zu finden. Bei der Messung des TM-30 werden Farbunterschiede zwischen einer Testleuchte und Referenzwerten derselben korrelierten Farbtemperatur aufgezeigt. Die 99 Referenzfarben (Color Evaluation Sample) wurden aus einem Pool von 105.000 Farbtönen realer Objekte statistisch ermittelt (Abbildung 7.8).



Abbildung 7.8: Alle 99 Referenzfarben des TM-30²³

²³ <https://agustos.com/wp-content/uploads/2017/10/TM30-color-samples-image.png>
[Stand:13.07.2018]

Damit alle Farbtöne des sichtbaren Spektrums gleichmäßig abgedeckt werden, wurde der CAM02-UCS-Farbraum, der für seine Gleichmäßigkeit der Farbaufteilung bekannt ist, in Würfel eingeteilt. In Diesem Farbraum wird über sechs verschiedene Farberscheinungsattribute definiert (Leuchtdichte Q, Helligkeit J, Buntheit C, Sättigung S, Farbigkeit M und Bunton H) wie ein Farnton in einer bestimmten Umgebung aussehen wird²⁴. Da viele optische Erscheinungen mathematisch in die Berechnung der Farberscheinung mit einfließen, wie zum Beispiel die Wirkung zweier Farben, die nebeneinander betrachtet werden oder wie sich Umgebungshelligkeiten auf den optischen Eindruck von Farben auswirken, wird diese sehr komplex. Für diese Arbeit ist nur relevant, dass sich der CAM02-UCS-Farbraum durch seine vielen Parameter sehr gut eignet, um Farbwerte unter einer bestimmten Umgebung einzuschätzen²⁵.

Von jedem dieser Farbraum-Würfel wurde dann eine der 99 Referenzfarben bestimmt, die so gewählt ist, dass die Wahrnehmung der verschiedenen Wellenlänge minimal ist (Kapitel 4.1). Die große Anzahl der Referenzfarben wurde bewusst so gewählt um so zu verhindern, dass Leuchtenhersteller mit gezielten Peaks im Spektrum gute TM-30 Werte erreichen ²⁶.

Der TM-30 differenziert ähnlich dem CRI, ob es sich bei der Testleuchte um einen Plank'schen Strahler oder einen Tageslichtscheinwerfer handelt. Um zu verhindern, dass eine Leuchte zwei unterschiedliche Referenzen erhält - abhängig davon, ob das Messergebnis knapp unter oder über 5000 K lag - wird bei der TM-30-Methode die Referenz zwischen den CCT's von 4500 K und 5500 K proportional überblendet.

Im Gegensatz zum CRI spielen beim TM-30 zwei Werte eine große Rolle: der „Referenz-Spektrums-Ähnlichkeits-Index“ (Fidelity-Index) R_f und der „Farbumfang“ R_g ²⁷. Der R_f -Wert bildet analog zum R_a -Wert des CRI einen Mittelwert aus den 99 Farbunterschieden, denen ein Wert zwischen 0 bis 100 zugeordnet wird. Der R_f -Wert zeigt jedoch ebenfalls nicht an, ob die Leuchte übersättigte Farben emittiert oder einen Farbshift²⁸. Aus diesem Grund wird der R_g -Wert gemessen. Dieser kann zwischen 60 und 140 variieren und zeigt, ob die Farben übersättigt ($R_g > 100$) beziehungsweise untersättigt ($R_g < 100$) sind oder mit dem Wert $R_g = 100$ genau die Farben der Referenzleuchte (bei selbiger Farbtemperatur) trifft.

Mit dem R_f - und R_g -Wert lässt sich ein X-Y-Koordinatensystem aufspannen (Abbildung 7.9), aus dem sich Farbwiedergabeeigenschaften der gemessenen Leuchte ablesen lassen. Durch den zusätzlichen R_g -Wert gibt es nicht mehr nur Leuchten mit „guter“ (hoher R_f)) oder „schlechter“ (niedriger R_f) Farbwiedergabe. So hat zum Beispiel eine Leuchte mit $R_f = 82$ und $R_g = 127$ gegenüber einer Leuchte mit $R_f = 90$ und $R_g = 98$ nicht zwangsläufig eine schlechtere Farbwiedergabe. Denn im direkten Vergleich ist der Anwendungsfall entscheidend, in der die Leuchte gebraucht wird. In einem sterilen Krankenhaus ist eine natürlich Farbwiedergabe wichtig, dort wäre

²⁴ (Luo& Li 2013: 26-28)

²⁵ (Luo& Li 2013: 19)

²⁶ U.S. Department of Energy (2015)

²⁷ Production Partner (2018)

²⁸ (Royer & Houser 2015: 10)

die zweite Leuchte der Favorit, wohingegen für Supermärkte, in denen in denen z.B. Obst und Gemüse durch Übersättigung der Farben besser zur Geltung kommt, die erste Lampe attraktiver wäre.

Daher ist der TM-30 viel flexibler zu deuten als der CRI, wo es immer nur um den höchsten R_a -Wert geht. Gleichzeitig ist es jedoch schwierig eine Aussage über die gemessenen TM-30-Werte zu treffen ohne einen Bezug zum geplanten Anwendungsbereich der gemessenen Leuchte zu haben. Hier könnte z.B. eine Einteilung des X-Y-Koordinatensystems in verschiedenen Bereiche mit spezifischen Anwendungsgebieten von Vorteil sein²⁹.

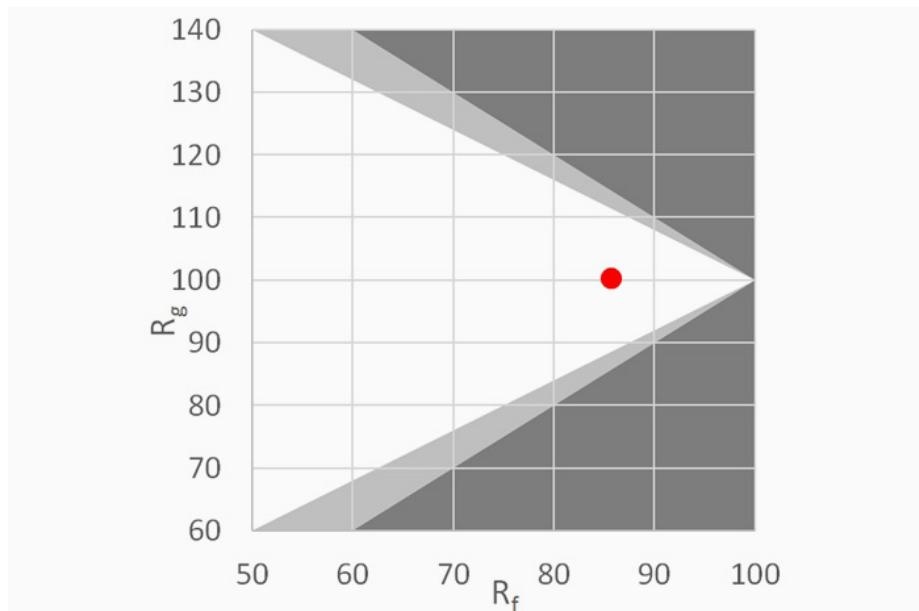


Abbildung 7.9: Koordinatensystem aus R_f und R_g mit eingezeichnetem TM-30 (rot): Die hellgraue Zone steht für TM-30-Werte die nicht auf der Plank'schen Kurve liegen, wohingegen die dunkelgraue Zone für alle Werte steht, die nicht mehr als „weiß“ angesehen werden³⁰.

In einer anderen Darstellung des R_g -Wert ist zu sehen, dass der Farbraum in 16 verschiedene Gruppen, sogenannte „binnings“ eingeteilt wurde. Jedes dieser „binnings“ steht übergreifend für die in diesem Bereich liegende Farbtöne. Anhand der Pfeile lässt sich ablesen, welche Anteile im Farbraum fehlen, welche übersättigt sind und welche den Farnton nicht treffen im Verhältnis zur Referenzfarbwiedergabe (Abbildung 7.10).

²⁹ (Royer 2016: 4)

³⁰ <http://www.highlight-web.de/uploads/pics/170303-gossen-5.jpg> [Stand:14.07.2018]

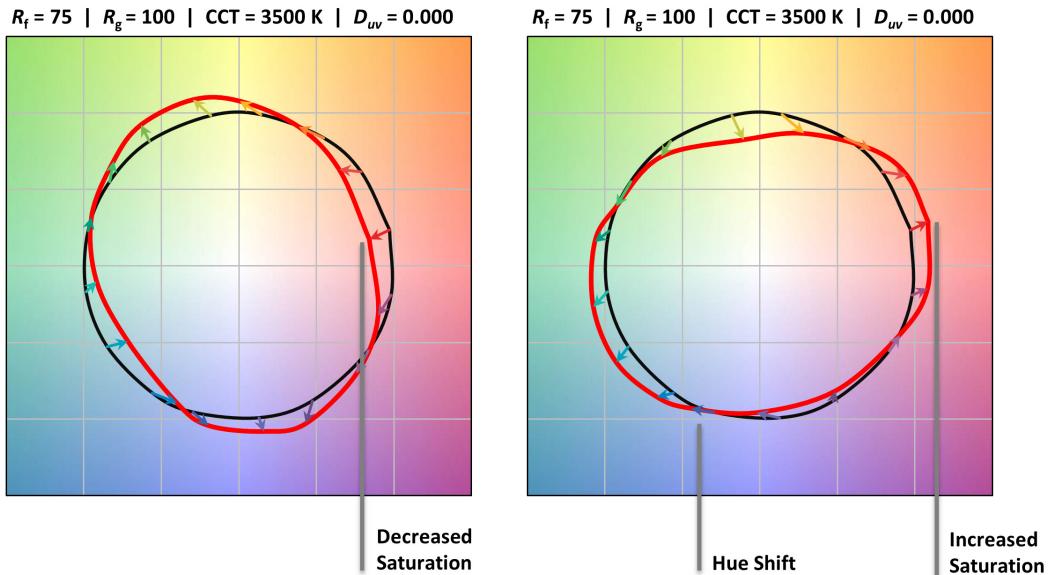


Abbildung 7.10: Wie sich die Farben der Testleuchte verhält, ist in der Vektorgraphik des R_g -Wertes anschaulich dargestellt. Der schwarze Kreis stellt die Referenzleuchte dar, der rote die getestete³¹.

Bei der Messung einer warmweißen Demo-LED wurden viele Messergebnisse protokolliert (Abbildung 7.11). Links oben wird gemessene R_f - und R_g -Wert angezeigt. Die darunterliegende Vektorgraphik stellt den R_g -Wert dar und darunter werden die R_f -Werte der 16 Farbraum-„binnings“ in einem Säulendiagramm präsentiert. Das oberste Bild in der mittlere Spalte zeigt den TM-30-Wert in seiner Koordinaten-Darstellung und darunter werden die farblichen Abweichungen (in Prozent) 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 befindet sich eine Tabelle, in der die farblichen Abweichung der einzelnen „binnings“ als Zahlenwert angegeben werden. Schließlich zeigt das unterste Säulendiagramm alle bei dieser Leuchte gemessenen 99 Referenzfarben des TM-30. Das Ergebnis der Messung ist mit diesen Daten nicht so schnell ersichtlich, wie beim CRI-Wert, hilft aber dabei eine deutlich aussagekräftigere Entscheidung über eine Leuchte treffen zu können.

³¹ U.S. Department of Energy (2015)

7 Farbwiedergabewerte

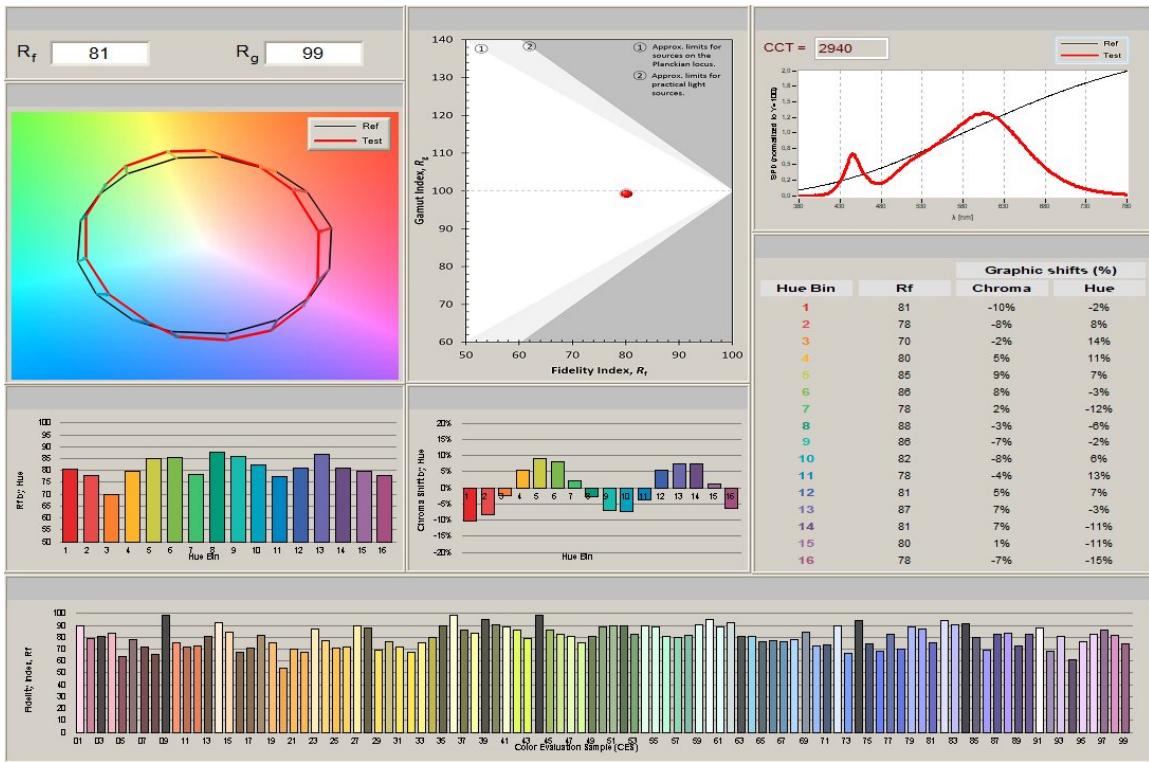


Abbildung 7.11: Ausschnitt aus dem Programm „LiVal“ von der Firma JETI: Messprotokoll des TM-30

Der TM-30 ist mit einer der neuesten Farbwiedergabewerte und zeigt mit seinen 99 Referenzwerten, dass die CIE viel aus der Zeit des CRI gelernt hat. Eine Lampe muss nun das gesamte Spektrum abdecken, um gute Werte zu erzielen. Es helfen keine gezielte Peaks mehr. Die Farben des TM-30 stellen Farben aus dem echten Leben dar, jedoch fehlen auch hier gesättigte Farben. Daher ist auch dieser Farbwiedergabewert nicht „perfekt“. Die Hauptmessung werden zeigen, inwiefern sich der „Red Tail“ im TM-30 wiederspiegelt und ob der Wert mit den gemessenen Tendenzen übereinstimmt.

8 Leuchtmittel

In diesem Kapitel werden verschiedene Leuchtmittel vorgestellt. Ein Augenmerk soll hier auf die LED-Leuchtmittel gelegt werden, da sich diese Thesisüberlegung hauptsächlich auf sie fokussiert.

8.1 Glühlampe

Die Glühlampe ist ein Temperaturstrahler. Sie besteht aus einem gasgefülltem Kolben, in dem ein Wolframwendel durch Stromzufuhr erhitzt wird und zu leuchten beginnt. Der erhitzte Glühwendel erzeugt eine Farbtemperatur von ca. 3200 K¹. Der Großanteil des Lichtspektrums einer Glühlampe liegt im nicht sichtbaren Infrarot-Bereich und wird damit in Wärme umgesetzt (Abbildung 8.1). Es werden also nur ca. 5% bis 15% der Leistung in Licht umgewandelt².

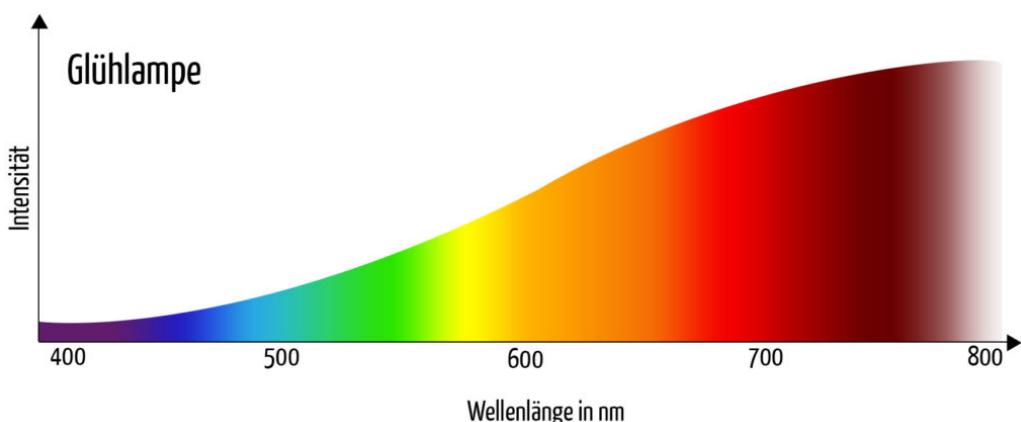


Abbildung 8.1: Spektrum einer Glühlampe³

Weil die Lichtausbeute η von 10 $\frac{\text{lumen}}{\text{Watt}}$ bis 15 $\frac{\text{lumen}}{\text{Watt}}$ zu gering ist, wird die Glühlampe in der EU nicht mehr hergestellt⁴.

¹ (Mueller 2014: 137)

² (Ris 2015: 78)

³ <https://unterwasser-fotografieren.de/wp-content/uploads/2017/09/cri-halogen-1024x430.jpg> [Stand: 10.08.2018]

⁴ (Ris 2015: 78)

8.2 Halogenglühlampe

Auch die Halogenglühlampe ist ein Temperaturstrahler. Sie besteht auch Glaskolben und Wolframwendel, ist allerdings mit Jod oder einer Bromverbindung (Halogene) gefüllt⁵. Wenn nun der Wolframwendel erhitzt wird, spalten sich Wolframatome vom Wendel ab. Diese Atome werden vom Jod respektive Brom gebunden und es entsteht ein Wolframhalogenid in dem Glaskolben. Wenn dieses Wolframhalogenid wiederum auf den erhitzen Wendel trifft, spaltet es sich in die Einzelteile auf. Das Wolfram gelangt zurück in den Wendel und der gasförmige Anteil fügt sich wieder in den Bereich des Glaskolben ein. Auf diese Weise entsteht ein Kreislauf, der die Halogenglühlampe effizienter als eine Glühlampe macht⁶ (Abbildung 8.2).

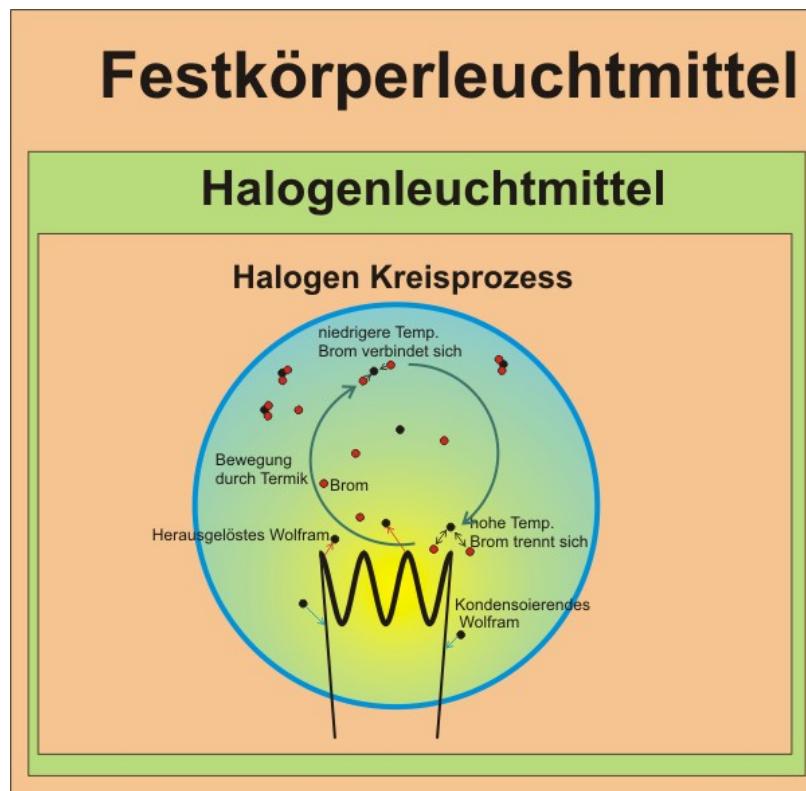


Abbildung 8.2: Darstellung des Halogen Kreisprozesses⁷

Die Lichtausbeute einer 50 W Halogenglühlampe beträgt bspw. $\eta = 18 \frac{\text{lumen}}{\text{Watt}}$ ⁸.

⁵ (Ris 2015: 82)

⁶ (Ris 2015: 83-84)

⁷ <https://www.haustechnikdialog.de/SHKwissen/Images/Leuchtmittelhalogenkreisprozess-Bernstaedt.jpg> [Stand: 10.08.2018]

⁸ (Greule 2014: 35)

8.3 Entladungslampen

Entladungslampen erzeugen Licht durch eine angelegte Spannung an einem ionisierten Gasgemisch in einem Glaskolben. Abhängig von dem Gasgemisch entsteht dabei eine spezifische Lichtfarbe⁹. Die Entladungslampen können grob in zwei Kategorien eingeteilt werden: die Niederdruck-Entladungslampen und die Hochdruck-Entladungslampen.

8.3.1 Niederdruckentladungslampen

Niederdruckentladungslampen haben einen Druck von ungefähr 10^{-6} bar. Ihr Gasgemisch besteht aus neutralen Atomen, geladenen Ionen und freien Elektronen. Dieses Gasgemisch befindet sich in einem Glasrohr. An den beiden Enden des Glasrohrs liegen Elektroden an. Wenn diese mit einer Spannung versorgt werden, ziehen sich die negativen Elektronen zu der positiven Elektrode. Die positiven Ionen verhalten sich umgekehrt und wandern zur negativen Elektrode. Dabei treffen die herumschwirrenden Elektronen und Ionen auf neutrale Gasatome. Die Elektronen der Gasatome werden von ihrer Bahn abgedrängt und dabei wird Energie in Form von Strahlung frei¹⁰ (Abbildung 8.3). Damit es während des Betriebs nicht zum Kurzschluss kommt, wird der Strom durch beispielsweise induktive Vorwiderstände gedrosselt.¹¹

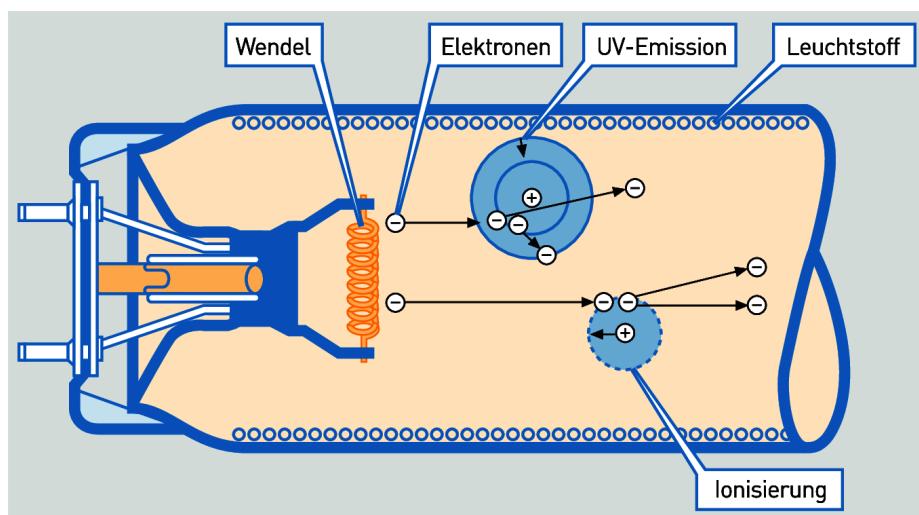


Abbildung 8.3: Aufbau einer Leuchtstoffröhre¹²

⁹ (Mueller 2014: 140)

¹⁰ (Ris 2015: 93)

¹¹ (Mueller 2014: 141)

¹² https://www.trilux.com/de/beleuchtungspraxis/fileadmin/user_upload/Abb_LL_Funktion.pdf.png [Stand: 11.08.2018]

Bei der Leuchtstoffröhre beispielsweise erzeugt das Quecksilbergasgemisch UV-Strahlung (253,7 nm), die nicht vom menschlichen Auge erkennbar ist. Erst wenn diese UV-Strahlung auf die Leuchtschicht am Röhrenrand trifft strahlt diese ein sichtbares Licht ab. Dabei wird nur ein Teil dieser UV-Strahlung in sichtbares Licht umgesetzt¹³. Das typische Spektrum einer Leuchtstoffröhre ist sehr schmalbandig (Abbildung 8.4).

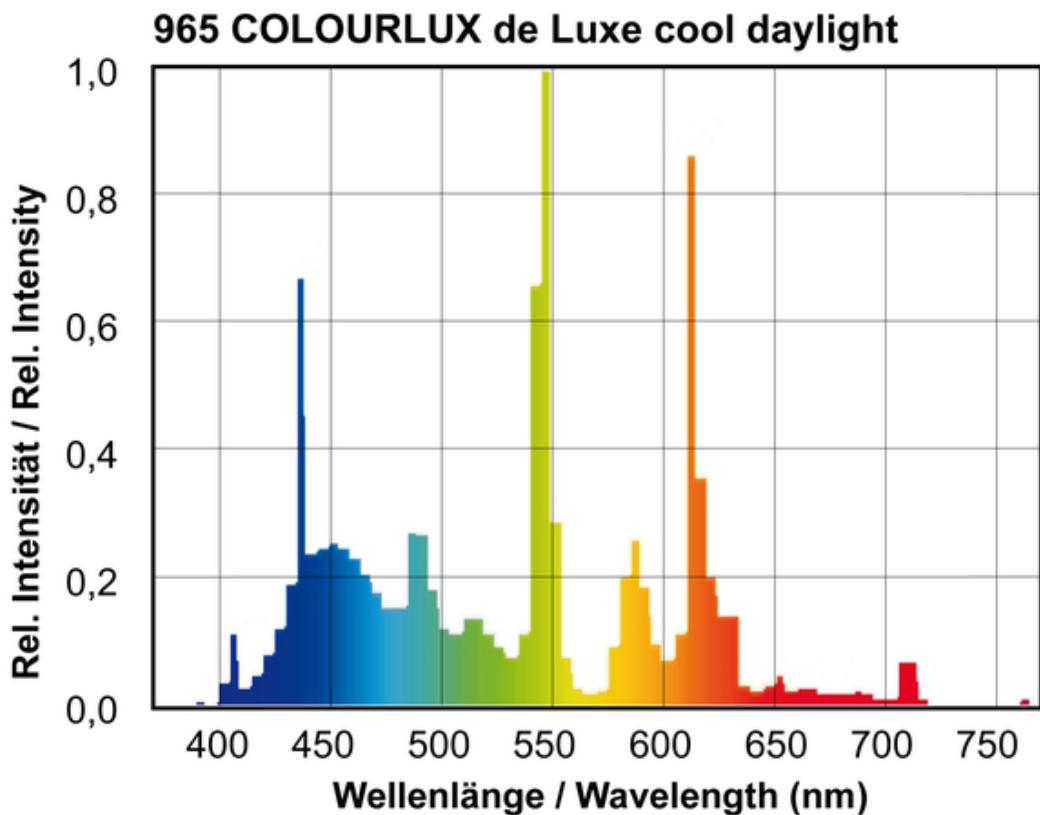


Abbildung 8.4: Spektrum einer Tageslichtleuchstofflampe¹⁴

Leuchtstofflampen erreichen eine Lichtausbeute η von bis zu 95 $\frac{\text{lumen}}{\text{Watt}}$ ¹⁵.

8.3.2 Hochdruckentladungslampen

Hochdruckentladungslampen dagegen nutzen einen Druck von 0,3 bar bis 10 bar. Sie sind von der Funktionsweise her ähnlich wie die Niederdruckentladungslampen, bestehen aber aus einem kleinem Glaskolben, da eine lange Glaskugel dem Druck nicht standhält (Abbildung 8.5).

¹³ (Ris 2015: 96)

¹⁴ <https://www.narva-bel.de/ressourcen/spektrum/popup/965%20COURLUX%20de%20Luxe%20cool%20daylight%20RGB.jpg.png> [Stand: 11.08.2018]

¹⁵ (Greule 2014: 35)

Wenn bei einer Halogen-Metalldampflampe (typische Hochdruckentladungslampe) beispielsweise eine Spannung an den Elektroden anliegt, entsteht zwischen den beiden Elektroden ein Lichtbogen. Dieser Lichtbogen regt dann das Gasgemisch der Lampe an. Von diesem Gasgemisch ist abhängig, welche Lichtfarbe die Lampe emittiert¹⁶. Hochdruckentladungslampen brauchen für den Zündvorgang ein Vorschaltgerät, um die hohe Initialspannung generieren zu können. Nach der Zündung braucht die Lampe ungefähr 3 min bis 5 min, bis sie ihren vollen Wirkungsgrad erreicht hat. Das Gasgemisch muss nach dem Ausschalten der Lampe erst wieder abkühlen und so dauert es bis zu 20 Minuten, bis die Lampe erneut genzündet werden kann¹⁷.

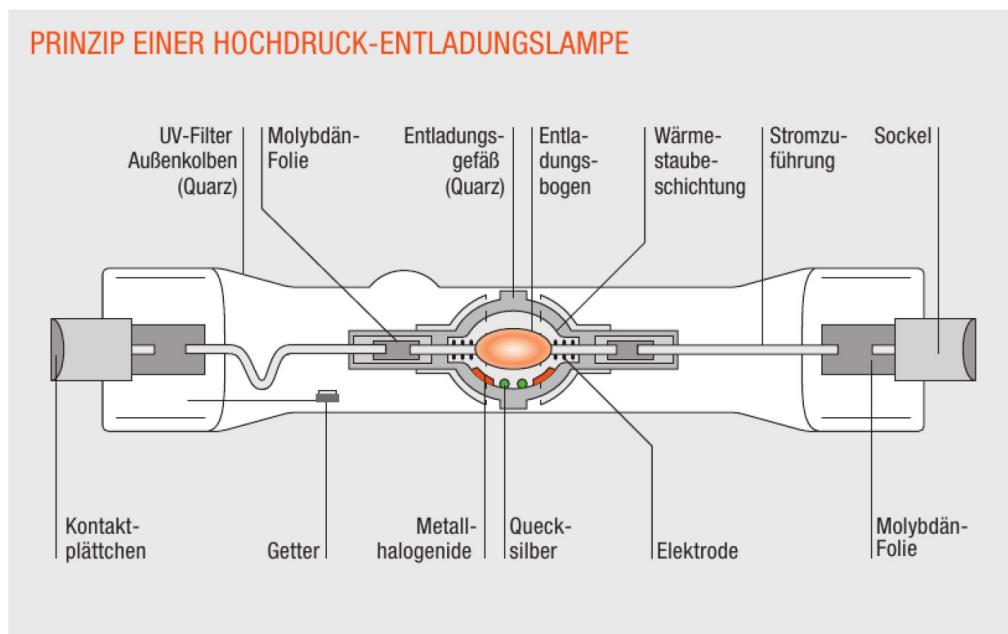


Abbildung 8.5: Aufbau einer Hochdruckentladungslampe¹⁸

Eine Halogenmetalldampflampe hat eine Lichtausbeute η von beispielsweise 85 $\frac{\text{lumen}}{\text{Watt}}$ ¹⁹. Das typische Spektrum einer Hochdruckentladungslampe (HMI) hat leichte Peaks (Abbildung 8.6).

Bei der Referenzlampe der Hauptmessung, dem Arri D5, handelt es sich um eine Tageslicht-HMI (Kapitel 11.2).

¹⁶ (Ris 2015: 129)

¹⁷ (Mueller 2014: 147)

¹⁸ <https://dammedia.ledvance.info/media/img/asset-296401/s,x,1440,y,0/334675.jpg>
[Stand: 11.08.2018]

¹⁹ (Greule 2014: 35)

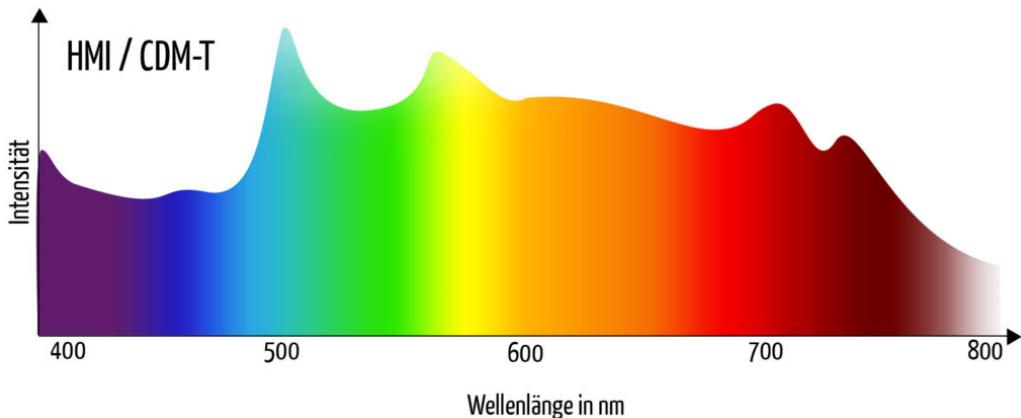


Abbildung 8.6: Spektrum einer Hochdruckentladungslampe²⁰

8.4 LEDs

Light-Emitting Diodes sind heutzutage die modernsten Leuchtmittel. Mit LEDs werden immer mehr konventionelle Leuchtmittel ersetzt, weil sie große Vorteile, wie ein niedrigen Stromverbrauch und ein sehr hohe Lichtausbeute, mit sich bringen. LEDs nutzen elektrische Spannung, um ihr Halbleitermaterial zum Leuchten zu bringen²¹. Da sich die Halbleiterbauelemente wie eine Diode verhalten, ist ein Strom, der in Durchlassrichtung fließt, nötig, damit die LED Licht abstrahlt. Rote und gelbe LED werden aus Aluminium-Indium-Galliumphosphid (AlInGaP) hergestellt und grüne und blaue LED aus Indium-Gallium-Nitrid (InGaN)²².

Das lichterzeugende Element der LED ist meistens in der Vertiefung eines Metallhalters angebracht. Das austretende Licht wird auch an den Rändern dieser Vertiefung reflektiert. Die Lötstelle des Metallhalters wird als elektrischer Anschluss der LED genutzt, während der Metallhalter selbst als Kathode fungiert. Mit einem Draht aus Gold wird die Oberseite des lichterzeugenden Elements verbunden und als Anode für den Stromfluss genutzt²³ (Abbildung 8.7). Die LED wird schließlich von einer Sekundäroptik ummantelt. Diese Optik sorgt dafür, dass das LED-Licht nicht mehr zur Seite austritt und gebündelt wird.

²⁰ <https://unterwasser-fotografieren.de/wp-content/uploads/2017/09/cri-hmi-blitz-1024x430.jpg> [Stand: 11.08.2018]

²¹ (Mueller 2014: 150)

²² (Ris 2015: 153)

²³ (Ris 2015: 154)

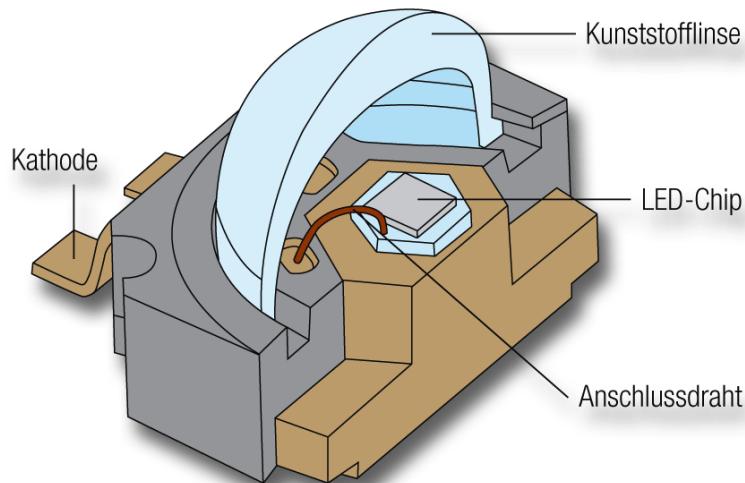


Abbildung 8.7: Aufbau einer LED²⁴

Je nachdem, welche der genannten Stoffe in der LED verwendet werden, leuchtet die LED in einer bestimmten Farbe monochromatisch. Um weißes Licht zu erzeugen, gibt es zwei Varianten²⁵:

- MultiLED: Bei dieser Methode werden drei LEDs mit der Farbe Rot, Grün und Blau in einem Gehäuse verbaut. Zusammen ergeben sie ein weißes Licht. Da das Spektrum des Lichts aber nicht nur aus diesen drei Farben besteht, werden beispielsweise Pastelltöne unter diesem Weiß nicht natürlich aussehen. Man verliert also deutlich an Qualität der Farbwiedergabe
- Phosphor Methode: Bei dieser Methode wird eine blaue LED von einer gelben Phosphorschicht ummantelt. Wenn die LED leuchtet, wird entweder das blaue Licht durchgelassen oder die Phosphorschicht angeregt und gelbes Licht erzeugt. Diese beiden Lichtfarben mischen sich und weißes Licht wird erzeugt (Abbildung 8.8). Dieses Licht hat eine deutlich höhere Qualität der Farbwiedergabe, hat aber eine Schwäche im roten Spektralbereich. Die Herstellung phosphorbeschichteter blauer LEDs hat sich in der Branche durchgesetzt.

²⁴ https://www.energy-innovation-austria.at/wp-content/uploads/2014/12/4_14_s3_lichtwissen17_LED_grafik2.png [Stand: 12.08.2018]

²⁵ (Mueller 2014: 151-152)

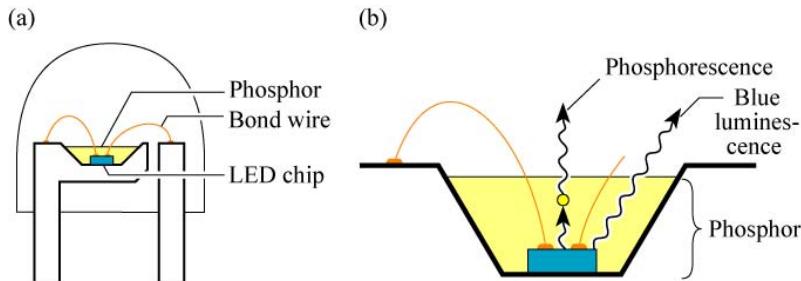


Fig. 21.7. (a) Structure of white LED consisting of a GaInN blue LED chip and a phosphor encapsulating the die. (b) Wavelength-converting phosphorescence and blue luminescence (after Nakamura and Fasol, 1997).

E. F. Schubert
Light-Emitting Diodes (Cambridge Univ. Press)
www.LightEmittingDiodes.org

Abbildung 8.8: Aufbau einer weißen LED²⁶

LEDs verlieren mit der Zeit durch die Hitze an Qualität. Scheinwerferhersteller versuchen durch komplexe Algorithmen für die LEDs diesen Qualitätsverlust zu kompensieren. Ebenso gibt es herstellungsbedingte Abweichungen bei LED's. Da die Vorgänge sehr kompliziert sind, werden die LED's nach der Herstellung in sogenannte Binnings eingeteilt. In einem Binnig sind jeweils die LED's mit den ähnlichsten Eigenschaften zusammengefasst, sodass beim Scheinwerferbau nur sich sehr ähnliche LED's verwendet werden²⁷.

Eine LED hat eine maximale Lichtausbeute η von $60 \frac{\text{lumen}}{\text{Watt}}$ ²⁸. Das typische Spektrum einer kaltweißen LED hat einen blauen Peak und einen breitbandigen Phosphoranteil. Es sieht wie folgt aus (Abbildung 8.9).

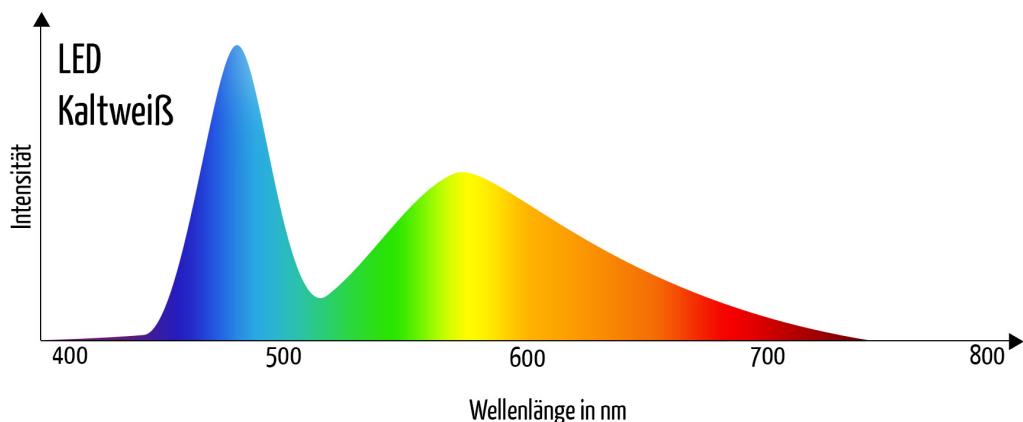


Abbildung 8.9: Spektrum einer kaltweißen LED²⁹

²⁶ <https://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap21/F21-07%20Nichia%20wh%20LED%20structu.jpg> [Stand: 12.08.2018]

²⁷ (Mueller 2014: 153)

²⁸ (Greule 2014: 35)

²⁹ <https://unterwasser-fotografieren.de/wp-content/uploads/2017/09/cri-led-kalt.jpg> [Stand: 13.08.2018]

9 Messgeräte für Farbmessung

Es gibt die verschiedene lichttechnische Messgeräte, die genutzt werden, um Beleuchtungsstärke, Farbtemperatur oder Farbigkeit des Lichts zu messen. Da in der Hauptmessung fast ausschließlich LED-Scheinwerfer gemessen werden, ist es wichtig, dass die Messgeräte in der Lage sind, mit diesen zum Teil schmalbandigen Spektren umzugehen. Dazu eignen sich am besten Spektrometer, die durch ihre filigrane Messweise einzelner Wellenlängen auch extremere Spektren auswerten können. Zusätzlich können sie aus dem gemessenen Spektrum viele lichttechnische Daten errechnen und sind damit die „Allesköninger“ unter den Messgeräten. In diesem Kapitel soll ihre Funktionsweise erörtert werden.

9.1 Spektrometer

Ein Spektrometer besteht üblicherweise aus einem Eingangsspalt, einem Streuelement (Prisma oder Gitter) und einem einzelnen Detektor oder Detektor-Array. Die für die Messungen verwendeten Spektrometer JETI specbos 1211 (Abbildungen 9.1) und UPRtek MK350S (Abbildungen 9.1) nutzen beide ein flat-field-Gitter mit einem Detektor-Array.

Das im Messgerät an kommende Licht gelangt durch den Spalt ins Messgerät und wird auf das Reflexionsgitter geleitet. Dort interferiert das Licht und wird in seine einzelnen Wellenlängen aufgesplittet (Gleichung 9.1).

$$\sin(\Theta_M) = \sin(\Theta_i) + m \frac{\lambda}{d} \quad (9.1)$$



Abbildung 9.1: Hauptmessgerät
Jeti Specbos 1211¹



Abbildung 9.2: Sekundärmessgerät
UPRtek MK350S²

¹ <https://www.opteema.com/media/specbos4000.jpg> [Stand: 08.08.2018]

² <https://www.opteema.com/media/specbos4000.jpg> [Stand: 08.08.2018]

Θ beschreibt jeweils den Ein- und Austrittswinkel des Lichts. λ steht für die Wellenlänge des Lichts, d für die Gitterkonstante und m für die Ordnungszahl der Interferenz. Durch die optischen Eigenschaften eines Reflexionsgitters werden die verschiedenen Wellenlängen in unterschiedliche Winkel aufgesplittet und so ist es möglich, dass das Spektrometer ein Spektrum sehr fein auflösen kann (Abbildung 9.3). Es wird nur das reflektierte Licht einer bestimmten Ordnungszahl m ($m \neq 0$) bei einer Messung genutzt. Die zusätzlich entstandenen Reflexionen anderer Ordnungszahlen sind zu vernachlässigen³.

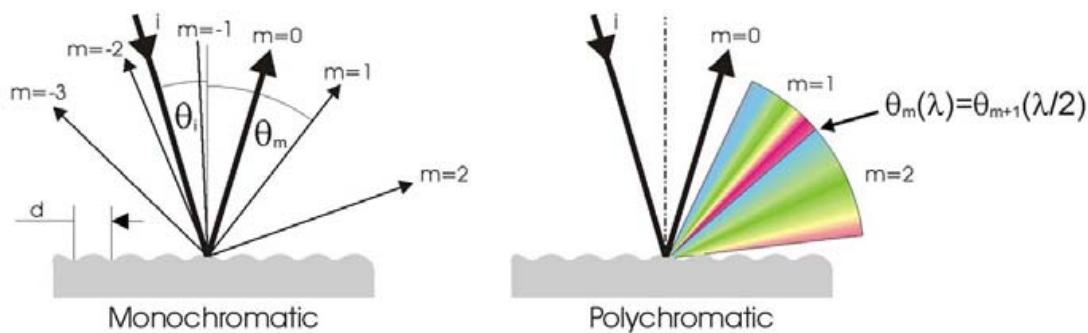


Abbildung 9.3: Abbildung der Interferenz am optischen Gitter⁴

Ein flat-field-Gitter hat den Vorteil, dass das interferierte Licht schon gebündelt wird, da dieses Gitter konkav gebaut ist und damit als Hohlspiegel dient⁵. So werden weniger optische Elemente gebraucht und Kosten gespart⁶.

Nachdem das Licht durch das optische Gitter reflektiert wurde, trifft es auf das Detektor-Array. Es werden normalerweise CCD-Sensoren, oder CMOS-Sensoren als Detektor-Array genutzt (irrelevante Detektor-Arrays werden an dieser Stelle außen vor gelassen):

- CMOS-Sensor (complementary metal-oxide-semiconductor): Dieser Sensor ist aus Fotodioden aufgebaut, die jeweils in Sperrichtung mit zum Beispiel drei Transistoren betrieben werden. Wenn Licht auf die Fotodioden trifft, wird die Sperrsichtkapazität durch den Photostrom entladen und der Spannungswert wird direkt auf dem Pixel ausgelesen⁷.

³ (JETI Technische Instrumente GmbH 2005: 6)

⁴ (JETI Technische Instrumente GmbH 2005: 6)

⁵ Wikipedia (2018)

⁶ (JETI Technische Instrumente GmbH 2005: 7)

⁷ (Schmidt 2000: 369)

9 Messgeräte für Farbmessung

- CCD-Sensor (charge-coupled device): Dieser Sensor besteht aus einer Anordnung von lichtempfindlichen Fotodioden, die auf einem Halbleiter aufgebaut sind. Die Fotodioden sind mit einer Spannung versorgt. Trifft nun das Licht auf die Fotodioden, lösen sich Elektronen, die in Potentialöpfen gesammelt werden. Diese Potentiale werden in den Speicherbereich verschoben, damit wieder neues Licht die Fotodioden anregen kann. Der Sensor wird ausgelesen, indem die Potentiale sequentiell in den Ausgabebereich verschoben und dort in Spannungen umgewandelt werden. Dabei werden nur die Spannungsunterschiede zwischen den davor ausgelesenen Werten verwendet, damit das Rauschen des Sensors gering gehalten wird. Für den ersten Spannungsunterschied wird ein Referenzwert festgelegt⁸.

Das Licht wird bei Spektrometern gemäß den Farbfunktionen $\phi(\lambda)$ des Auges gemessen (Kapitel 4.2). Diese werden dann in die X,Y und Z Primärvalenzen des CIE-XYZ Farbraums umgerechnet (Kapitel 5.2). Im XYZ-Farbraum werden schließlich die Farbkoordinaten des gemessenen Lichts bestimmt⁹. Auch die Farbwiedergabewerte werden aus dem gemessenen Spektrum berechnet (Kapitel 7.1).

Der JETI specbos 1211 wird in der Hauptmessung als Primärmessgerät genutzt und mit dem UPRtek 350S sollen diese Werte zur Messsicherheit überprüft werden. Folgende Tabelle soll einige Unterschiede der Messgeräte aufzeigen:

Spektrometervergleich		
Spektrometer	JETI specbos 1211	UPRtek 350S
Variante	PC gebunden	handheld
Sensor	CCD array 2048 pixel	CMOS Linear Image Sensor
Streuelement	flat-field-Gitter	flat-field-Gitter
Spektraler Messbereich	350 nm - 1000 nm	380 nm - 780 nm
Beleuchtungsstärke	2 lux - 60.000 lux	1 lux - 100.000 lux
Farbgenaugigkeit	$\pm 0,002$ x,y	$\pm 0,0025$ x,y
Farbwiedergabe	$\pm 0,0005$ x,y	$\pm 0,0005$ x,y
Farbtemperatur	± 2 %	± 20 K

Tabelle 9.1: Vergleich zweier Spektrometer¹⁰

Alle Messwerte beziehen sich auf eine Messung der CIE-Normlichtart A mit 2.856 K, damit die Messgeräte vergleichbar sind. Der JETI specbos 1211 hat eine genauerer Farbeinschätzung des Lichtes und eine geringere Abweichung bei der Farbtemperatur (Tabelle 9.1).

⁸ (JETI Technische Instrumente GmbH 2005: 17)

⁹ (JETI Technische Instrumente GmbH 2005: 30)

¹⁰ jeti (2018) United Power Research Technology Corporation (2018)

10 Grundlagen Videotechnik

Da sich diese Arbeit auch mit der Lichtwirkung im Zusammenhang mit Kameras beschäftigt, sollen in diesem Kapitel die relevanten videotechnischen Grundlagen dargestellt werden.

10.1 Grundeinstellung einer Kamera

10.1.1 Vorverstärkung

Mit der „Gain up“-Funktion einer Kamera kann die Helligkeit des Bildes elektrisch nachreguliert werden. Falls die Beleuchtungsstärke beispielsweise zu gering ist, kann so über einen Regler in verschiedenen Stufen (meist in 1 dB oder 3 dB Schritten) das Bild vorverstärkt werden. Die Einheit Dezibel (dB) ist logarithmisch. Bei einer Verstärkung von +6 dB ist das Bild doppelt so hell. Durch eine elektrische Beeinflussung des Bildes erhöht sich jedoch auch stets das Bildrauschen im selben Maß. Eine Verstärkung von +3 dB erhöht ebenso das Bildrauschen um +3 dB. Daher sollte man das Videosignal nicht zu stark elektrisch vorverstärken¹.

Die Vorverstärkung wird während der Erstellung der Bilder in der Hauptmessung genutzt, um die Helligkeit der Scheinwerfer an die Kamera anzugeleichen.

10.1.2 Blende

Die Blende ist die mechanische Öffnung im Objektiv, mit dem die Lichtmenge, die auf den Bildwandler (Kapitel 10.2) trifft, reguliert werden kann. Sie wird über den Blendenring an der Kamera eingestellt. Je höher die Blende gewählt wird, desto weniger Licht lässt die mechanische Öffnung passieren. Typische Zahlenangaben für eine Blende ist die Blendenreihe, in der die Zahlen immer in Abhängigkeit von $\sqrt{2}$ ansteigen:

$$f/1,4 \ f/2 \ f/2,8 \ f/4 \ f/5,6 \ f/8 \ f/11 \ f/16$$

Dabei werden die Blendenzahlen immer reziprok zur Brennweite f angegeben². Die Brennweite ist die Entfernung zwischen der Linse zu ihrem Brennpunkt³. Je größer die Blende der Kamera eingestellt ist, desto mehr Licht wird benötigt, um durch die kleinere werdende Öffnung genug Helligkeit für den Bildwandler zu bekommen (Abbildung 10.1). Pro Blendenstufe halbiert bzw. verdoppelt man die Beleuchtungsstärke⁴.

¹ (Schmidt 2000: 406-407)

² (Schmidt 2000: 387)

³ Roskothen (2017)

⁴ (Schmidt 2000: 388)

Die Kamera „Sony HDC 2500“, die in der Hauptmessung eingesetzt wird, ist eine Kamera, die bei der Blende f/11 eine Beleuchtungsstärke von 2000 lux benötigt, damit das Bild ohne Vorverstärkung das volle Videosignal nutzt (Kapitel 12.1). Das bedeutet, dass, wenn bei der Hauptmessung alle Scheinwerfer auf 500 lux Beleuchtungsstärke angepasst werden, diese Kamera nach der Blendenreihe mit einer Blende f/4 arbeitet. Die Blende wird bei der Hauptmessung tatsächlich auf f/3,7 eingestellt, damit eine halbe Blende Spielraum bleibt, um die Helligkeit des Bildes über die Vorverstärkung zu beeinflussen (Kapitel 10.1.1). Das hat den Grund, dass die Scheinwerfer beim Anpassen an die Kamera auch ihre Beleuchtungsstärke ändern. Um diese Veränderung wieder auszugleichen ist es praktikabler über die Vorverstärkung die Helligkeit anzupassen, als zu versuchen, mit sehr kleinen Blendenzahlen den richtigen Wert zu treffen (Kapitel ??).



Abbildung 10.1: Darstellung verschiedener Blendzahlen⁵

10.1.3 Schärfentiefe

Bei gleichbleibender Brennweite ist die Schärfentiefe des Bildes abhängig von der Blende. Diese Größe sagt aus, wie viele Anteile des Bildes im Hintergrund und Vordergrund verschwimmen im Verhältnis zum scharfgestellten Bereich der Kamera. Eine kleine Blendenöffnung (zum Beispiel f/11) führt dazu, dass das Bild größtenteils scharf dargestellt wird. Es gibt kaum Bildanteile, die verschwimmen und somit kann von einer großen Schärfentiefe gesprochen werden. Umgekehrt führt eine offene Blende zu einem kleineren Teil, der im Bild scharf dargestellt wird und somit zu einer geringeren Schärfentiefe⁶ (Abbildung 10.2).

Da bei der Erstellung der Bilder nur Personen auf derselben Ebene dargestellt werden, liegt bei Blende 4 der Kamera die Schärfe auf den fotografierten Probanden. Der Rest des Bildes erscheint unscharf.

⁵ <https://rogerhirt.ch/wp-content/uploads/2017/12/blende-1280x280-1024x224.png>
[Stand: 04.08.2018]

⁶ (Schmidt 2000: 389)

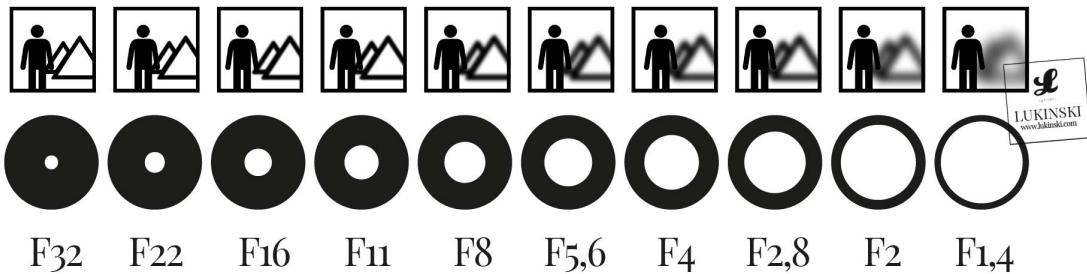


Abbildung 10.2: Darstellung der Schärfentiefe im Bezug zur Blende⁷

10.1.4 Kniefunktion

Mit der Kniefunktion lässt sich verhindern, dass Bilder, deren Helligkeit zu groß ist, Details in den übersteuerten Bereichen verlieren, da diese Pegelwerte (Kapitel 10.1.5) normalerweise von der Kamera hart abgeschnitten werden. Durch das Aktivieren der Kniefunktion wird die Dynamik des Bildes erhöht und es können sogar Belichtungen, die eine Blendenstufe zu hoch sind, im Bild zugelassen werden.⁸. Die Kniefunktion wird in der Kamera während der Erstellung der Bilder dann genutzt, wenn nach dem Angleichen der Scheinwerfer auf die Kamera die Belichtung des Bildes zu hoch ist (Kapitel ??).

10.1.5 γ -Kennlinie

Die γ -Kennlinie beschreibt den Zusammenhang zwischen Lichtstrom und Videopegel. Der Videopegel beschreibt von 0 bis 100% die Stärke des Videosignals. Diese γ -Kennlinie ist darauf zurückzuführen, dass die alten Fernseher mit Kathodenstrahlröhre die Videosignalpegel nur als verzerrte Leuchtdichtewerte ausgegeben haben. Die im Studio aufgenommenen Lichtverhältnisse wurden über die Kamera vorentzerrt, um diesem Umstand entgegen zu wirken. (Abbildung 10.3). Aus diesen historischen Gründen ist die γ -Vorentzerrung des Videosignals geblieben. Ein Fernseher hat typischerweise einen γ -Wert von 2,2 und die Kamera folglich den Kehrwert von ca. $\gamma = 0,45$.⁹.

Alle Kamerasignale bei der Erstellung der Bilder für die Umfrage sind auch γ -vorentzerrt. Außerdem ist die TLCI-Messung mit einer Kamera auch mit γ behaftet (Kapitel 7.3).

⁷ <https://lukinski.de/wp-content/uploads/2015/04/fotografie-models-grundtechnik-blende-kamera-schaubild.jpg> [Stand: 04.08.2018]

⁸ (Schmidt 2000: 389)

⁹ (Schmidt 2000: 408-409)

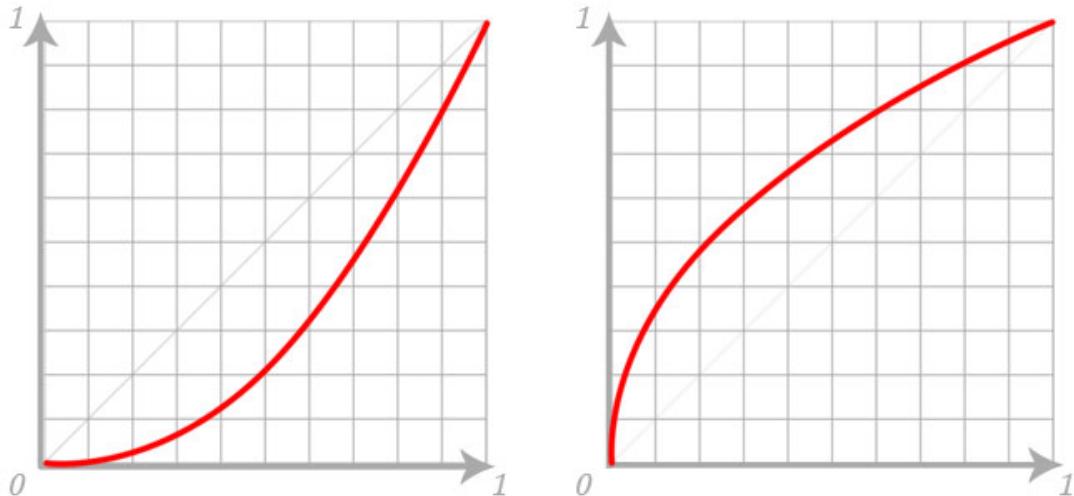


Abbildung 10.3: Darstellung der γ -Vorentzerrungskurve und inversen Rückkorrekturkurve¹⁰

10.1.6 Linear Matrix

Die Matrix einer Kamera ist für eine Korrektur der Farbwiedergabe nötig. Denn die Spektralwertkurven eines Bildwandlers können keine negativen Spektralanteile aufzeichnen (Kapitel 10.2). Die Bildschirme nutzen aber die Primärvalenzen der EBU, die wiederum mit negativen Werten arbeiten. Die lineare Matrix macht es nun möglich, dass die Spektralwertanteile von dem Bildwandler auf die Bildschirmebene transformiert werden.¹¹.

Die Notwendigkeit der Transformation zeigt, dass die Kamera Lichtspektren anders bewertet als das menschliche Auge (Abbildung 10.4). Das spielt eine große Rolle für das weitere Vorgehen bei der Erstellung der Bilder während der Hauptmessung, denn diese Darstellung beweist, dass die Messwerte der Spektrometer nicht direkt auf die Kamera übertragbar sind (Kapitel ??). Der Jeti specbos 1211 bewertet das Lichtspektrum wie das menschlichen Augen (siehe Bildschirmkurve der EBU) mit den Spektralwertkurven. Diese werden dann in die CIE-XYZ-Primärvalenzen transformiert und daraus die Farbwiedergabewerte errechnet (Kapitel 5.2). Die Kamera hingegen nimmt durch die Filtereigenschaften des Farbbildwandlers (Abbildung 10.8) und der Farbmischkurve des CCD-Sensors das Licht deutlich anders wahr.

¹⁰ <http://www.linearworkflow.de/images/posts/monitorgamma2.jpg> [Stand: 05.08.2018]
¹¹ (Schmidt 2000: 412-413)

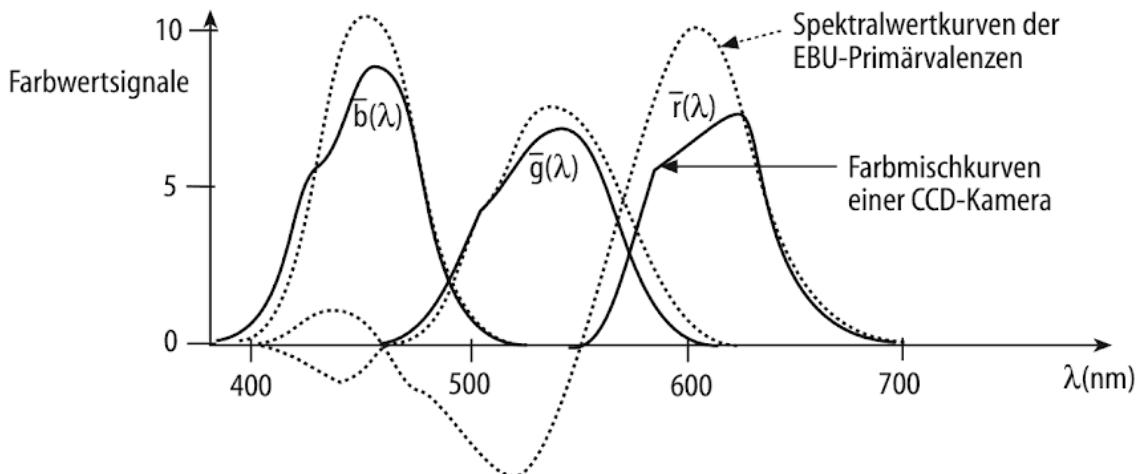


Abbildung 10.4: Linear Matrix der Kamera¹²

10.1.7 Weißabgleich

Ein Weißabgleich einer Kamera meint den Vorgang eines „*Unbuntabgleiches in Bildweiß*“ (Schmidt 2000: 414). Unter verschiedenen Beleuchtungssituationen wirkt ein weißes Blatt Papier in der Kamera farbstichig und nicht unbunt. Das liegt daran, dass die Kamera erst auf die neue Lichtsituation eingestellt werden muss. Das Auge dagegen kann sich meist unbemerkt auf verschiedene Beleuchtungssituationen adaptieren und so wirkt das Blatt Papier für den Menschen stets weiß. Die Kamera muss also auf Tages- bzw. Kunstlicht geeicht werden, damit in der Kamera weiß auch als solches erkennbar wird und keinen Farbstich hat. Ziel ist es, bei einem Weißabgleich dass eine weiße Fläche, die unter den gewählten Beleuchtungsumständen gefilmt wird, in der Kamera die Signalpegel der RGB-Kanäle zu 100% ausschlagen lässt (Abbildung 10.5). Um die Signalpegel messen zu können, wird das Kamerasignal mit einem Waveformmonitor oder Vektorskop beurteilt (siehe Kapitel 10.5.1 und 10.5.2). Der Vorgang kann in vier Schritte eingeteilt werden¹³:

1. Die weiße Fläche wird auf mind. 80% der Bildschirmgröße kadriert, um sicherzustellen, dass wirklich nur die weiße Fläche vom Waveformmonitor erfasst wird.
2. Die Farbtemperatur der Kamera wird über Konversionsfilter im Filterrad nach der Beleuchtungssituation eingestellt. So wird verhindert, dass die Kamera beim Weißabgleich zu stark elektronisch verstärkt wird¹⁴.

¹² (Schmidt 2000: 412)

¹³ (Heinen 2012: 206)

¹⁴ (Schmidt 2000: 415)

3. Man wählt den Speicherplatz auf der Kamera für den Weißabgleich aus (A oder B). Meist ist es möglich, mehrere Weißabgleichdaten zu speichern, um beispielsweise schnell mit der Kamera zwischen Kunst- und Tageslichtsituationen wechseln zu können.
4. Der Weißabgleichsknopf der Kamera wird betätigt und dabei werden die R- und B-Kanäle auf denselben Pegel des G-Kanal verstärkt, so dass alle drei Kanäle den gleichen Signalpegel aufweisen.

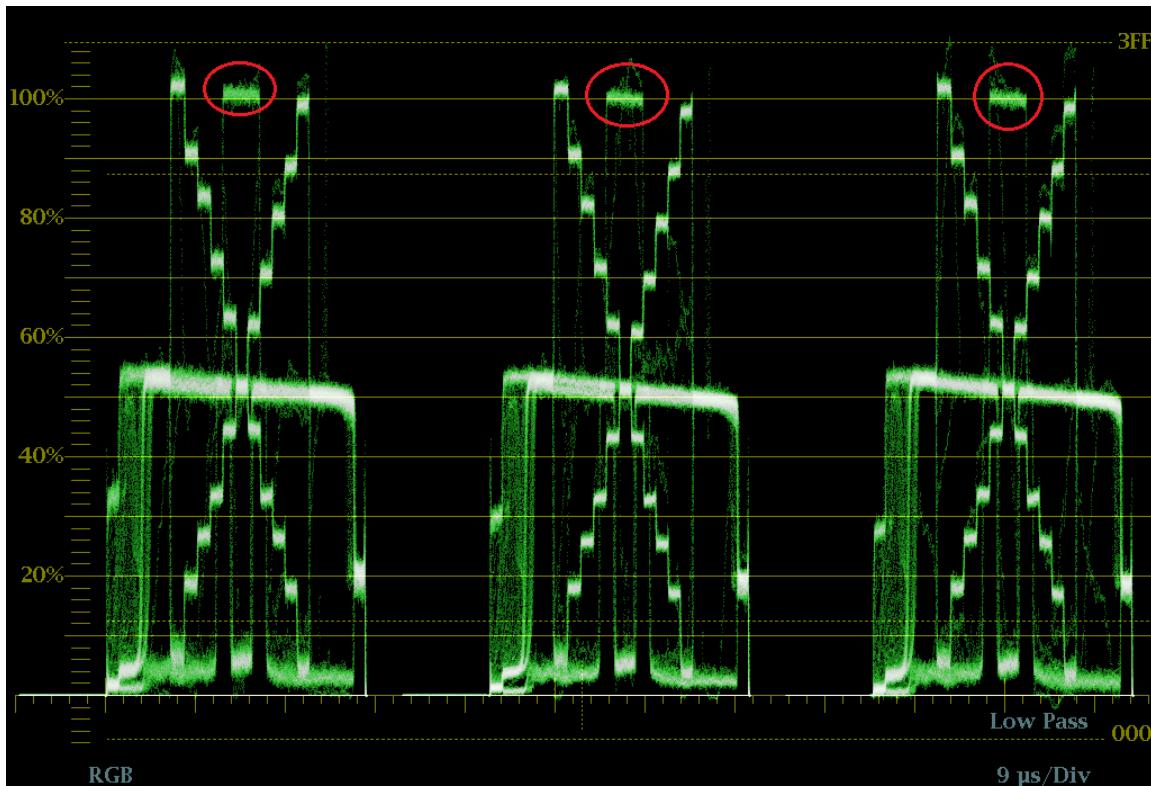


Abbildung 10.5: Waveformmonitor Screenshot vom Weißabgleich des Arri D5 mit einer Grautreppe

Die drei Abschnitte stehen von links nach rechts für die Rot-, Grün- und Blausignalanteile. Die „Treppenstufen“ zeigen die Grautreppe des Bildes. Für den Weißabgleich ist entscheidend, dass alle drei Signalpegel auf 100% eingestellt sind (mit rot gekennzeichnet), damit weiß in der Kamera auch weiß aussieht.

Für die Hauptmessung ist zu beachten, dass man auf diese Weise zwar jedem Scheinwerfer einen gleichen Weißwert in der Kamera geben kann. Jedoch beeinflusst diese Anpassung nicht die Farben der Scheinwerfer. Diese sind weiterhin vom Lichtspektrum der Scheinwerfer abhängig.

10.2 Farbbildwandlertechnik einer Kamera

Es gibt verschiedene Arten von Farbbildwandlern, die in einer Kamera verbaut sind. Die gängigsten Methoden sind die 1- und 3-Wandlertechnik.

Die Sensoren von „Single Sensor“-Kameras arbeiten mit aufgedampften Bayer Pattern, um ein Farbbild zu erzeugen (Abbildung 10.6). Herr Dr. Bryce E. Bayer hat sich dabei an der V- Λ -Kurve des Auges orientiert und daher teilen die Bayer Pattern das Bild in 50% grüne, 25% rote und 25% blaue Pixel auf¹⁵. Die fehlenden Farbannteile des Bildes werden über die Nachbarpixel interpoliert und diese gesammelten Farbinformationen dann an den Bildwandler weitergegeben.

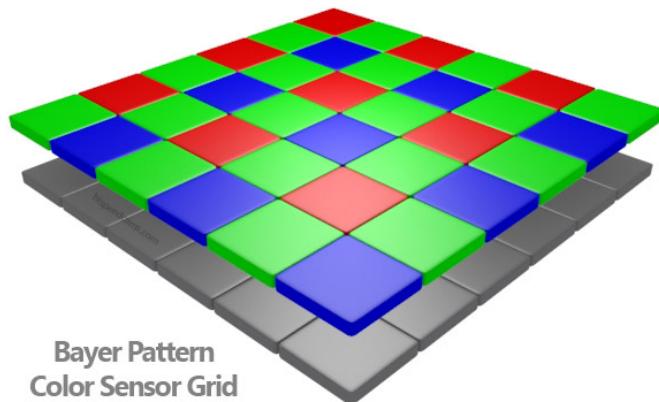


Abbildung 10.6: Bayer Pattern auf einem Kamerachip¹⁶

Der Nachteil an dieser Methode ist, dass auf diese Weise die Farbauflösung der Bilder verringert wird. Daher ist eine „Single Sensor“-Kamera nicht geeignet, wenn das entstehende Filmmaterial auf ihre Farbigkeit überprüft werden soll.

Bei der 3-Wandler-Technik hingegen wird das in der Kamera ankommende Licht über Filter auf einem Strahlenteiler-Prisma in die Farbwertanteile Rot, Grün und Blau aufgespalten und auf den jeweiligen Farbbildwandler durchgelassen¹⁷ (Abbildung 10.7).

¹⁵ ITWissen.info (2017)

¹⁶ <http://www.hispeedcams.com/wp-content/uploads/2015/06/BayerPattern.jpg> [Stand: 06.08.2018]

¹⁷ (Schmidt 2000: 378)

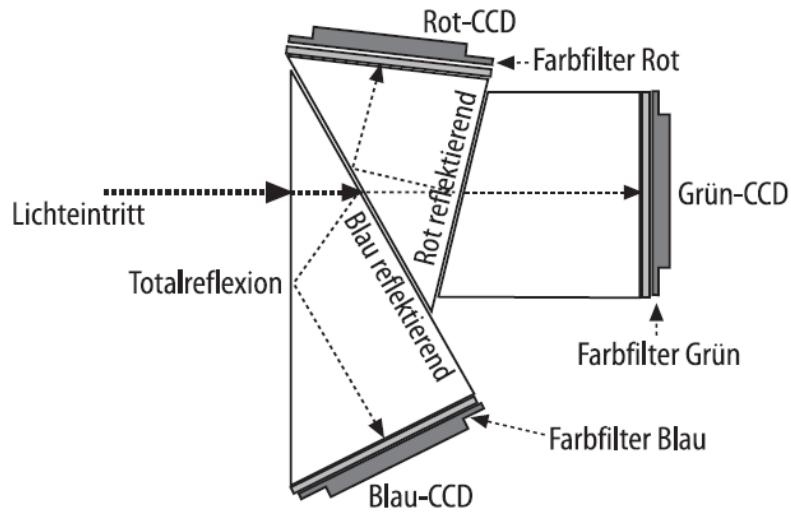


Abbildung 10.7: Schematischer Aufbau eines Farbbildwandlers¹⁸

Da die Filter zur Farbauf trennung nicht ideal sind und vor allen Dingen blaues Licht auf die nicht dafür vorgesehenen Wandler trifft, gibt es einen weiteren Farbkorrekturfilter vor jedem Wandler¹⁹. Der Vorteil dieser Variante besteht darin, dass das Bild keine Farbauf lösung verliert. Die spektralen Eigenschaften eines Strahlenteilers zeigen, dass Kameras mit 3-Wandler-Technik das Licht schon „vorfiltern“ (Abbildung 10.8). Danach wird es noch über die Farbmischkurven des Sensors weiter gewichtet (Abbildung 10.4).

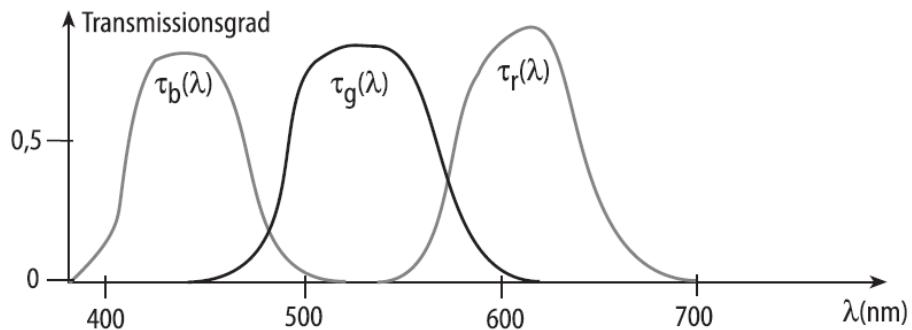


Abbildung 10.8: Transmission eines Strahlteilers²⁰

¹⁸ (Schmidt 2000: 378)

¹⁹ (Schmidt 2000: 379)

²⁰ (Schmidt 2000: 379)

10.3 RGB-Signal

Das unkomprimierte Kamerasignal, dass aus einer Studiokamera kommt, wird RGB-Signal genannt. Es besteht aus den drei Farbwertsignalen R, G und B. Zu diesen Signalen ist anzumerken, dass es sich um elektrische Signale mit γ -Vorverzerrung handelt²¹. Für diese drei Farbwertsignale sind folglich drei Übertragungskanäle nötig. 100% Signalpegel entspricht einer Übertragungsspannung von 0,7 V. Damit das transportierte Bild synchron bleibt, wird entweder auf einer separaten Leitung oder auch auf allen drei Leitungen mit einem Signalpegel von -0,3 V das Synchronsignal mitgeführt. Das RGB-Signal führt keine Qualitätsverluste mit sich, hat aber einen hohen Bandbreitenbedarf und wird daher nur auf kurzen Strecke im Studio genutzt²².

10.4 Komponenten-Signal

Als das Farbfernsehen erfunden wurde, gab es zwei Anforderungen an das Farbfernsehsignal, damit der Übergang vom Schwarz/Weiß-Fernsehen funktioniert:

1. Das Farbfernsehsignal soll s/w kompatibel sein. Daher wird das Farbfernsehsignal so gestaltet, dass man mit einem Schwarz/Weiß-Fernseher auch ohne Farbe fernsehen kann.
2. Das Farbfernsehsignal soll keine zusätzliche Bandbreite kosten, damit der Fernsehzuschauer zu Hause auch über die s/w-Leitung Farbfernsehen empfangen kann

Um diesen beiden Anforderungen gerecht zu werden, wird das RGB-Signal dementsprechend angepasst. Um die erste Anforderung zu erfüllen, wird aus dem RGB-Signal ein Leuchtdichtesignal errechnet:

$$Y = 0,299 \cdot R + 0,587 \cdot G + 0,114 \cdot B \quad (10.1)$$

$$Y = 0,2126 \cdot R + 0,7152 \cdot G + 0,0722 \cdot B \quad (10.2)$$

Die erste Gleichung 10.1 ist für das SD-Signal, die zweite Gleichung für das HD-Signal. Auch hier spricht man wieder von elektrischen Signalen die γ -vorentzerrt sind. Damit bei einer Bandbreitenreduktion nur die Farbanteile und keine Helligkeiten reduziert werden, wird neben dem Y-Signal auch ein (R-Y)- und (B-Y)- Singal übertragen. Den Farbanteilen wird also das Leuchtdichtesignal abgezogen. Dadurch wird die Helligkeit von den Farbanteilen des Signals getrennt. Es werden absichtlich R und B gewählt, da G-Y nur geringe Pegel ergibt, weil Y hauptsächlich durch den Grünanteil bestimmt ist. Geringe Videopegel sind zu vermeiden, da diese für eine höhere Fehlerquote beim Auslesen des Signals sorgen.

²¹ (Schmidt 2000: 82)

²² (Schmidt 2000: 83)

Die Pegel dieser Farbdifferenzsignale können den maximalen Wert von 0,7 V bei Vollaussteuerung überschreiten und müssen daher angepasst werden, damit kein erhöhter Bandbreitenbedarf aufkommt²³ (Gleichung 10.3).

$$C_R = 0,713(R - Y) \quad (10.3)$$

$$C_B = 0,564(B - Y) \quad (10.4)$$

Diese Gleichungen gelten für SD-Signale. Für HD-Signale sind folgende Gleichungen anzuwenden:

$$C_R = 0,6350(R - Y) \quad (10.5)$$

$$C_B = 0,5389(B - Y) \quad (10.6)$$

Damit sind die zwei Anforderungen erfüllt. Das $YC_R C_B$ -Signal ist wichtig für die Messung mit dem Vektorskop in den Hauptmessungen (Kapitel). Das Signal an sich muss noch weiter angepasst werden, damit es irgendwann ein sendefähiges Fernsehsignal wird. Diese Entwicklung ist in dieser Arbeit aber nicht von Belang.

²³ (Schmidt 2000: 84)

10.5 Videotechnische Messgeräte

In der Hauptmessung werden zwei videotechnische Messgeräte genutzt, um den Weißabgleich der Scheinwerfer zu überprüfen und die Farbverschiebung in der Kamera aufzuzeigen.

10.5.1 Waveformmonitor

Ein Waveformmonitor ist ein Oszilloskop für die Videomessung. Oszilloskope basieren auf der Braunschen Röhre mit einem Elektronenstrahl. Dieser wiederum regt einen Bildpunkt auf dem Bildschirm des Gerätes an²⁴. Die Messspannung ist für die Ausrichtung des Strahls zuständig und der Elektronenstrahl kann dadurch in horizontaler (x-Achse) wie vertikaler (y-Achse) Ausrichtung beeinflusst werden. Dazu werden zwei Spannungen genutzt (Abbildung 10.9).

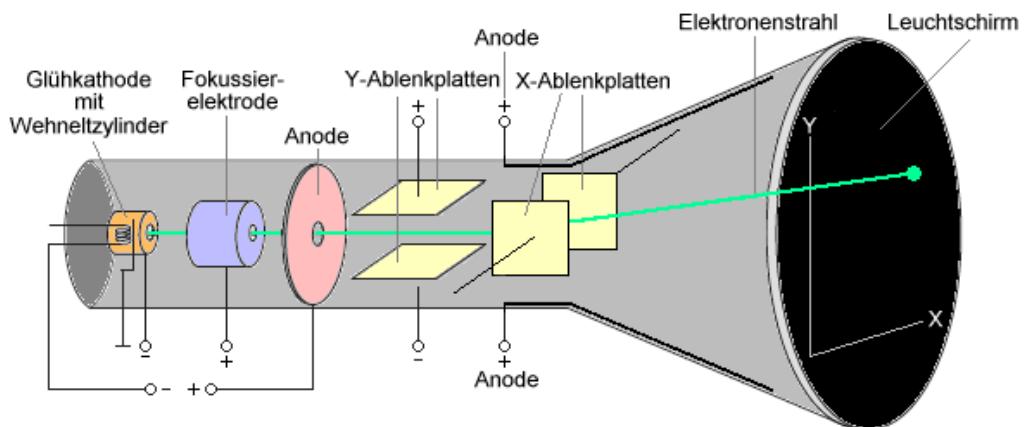


Abbildung 10.9: Funktionsweise eines Oszilloskops²⁵

Das Messgerät misst eine Zeile des Bildes, die am Gerät ausgewählt werden kann. Bei Messungen wird normalerweise nur die y-Achse genutzt und die horizontale Richtung wird nach einer festgelegten Zeit durchlaufen²⁶. Auf dem Bildschirm des Messgerätes wird der Pegel von 0-100 angezeigt, so wie der negative Bereich für den Synchronisationburst bei -0,3V. Bei periodischen Signalen wird die Messung speziell getriggert, so dass die Pegelwerte derselben Messzeit und Phasenlänge stets übereinander liegen. Durch bestimmte Filter kann nur das Luminanzsignal, oder Chrominanzsignal oder beide zusammen dargestellt werden²⁷.

²⁴ (Schmidt 2000: 109)

²⁵ <http://www.hobby-bastelecke.de/bilder/messen/oszilloskop.gif> [Stand: 07.08.2018]

²⁶ (Schmidt 2000: 110)

²⁷ (Schmidt 2000: 111)

Bei einem Weißabgleich werden Waveformmonitore genutzt um zu überprüfen, dass unter einer bestimmten Beleuchtung alle Pegel gleich ausgesteuert sind (Abbildung 10.10).

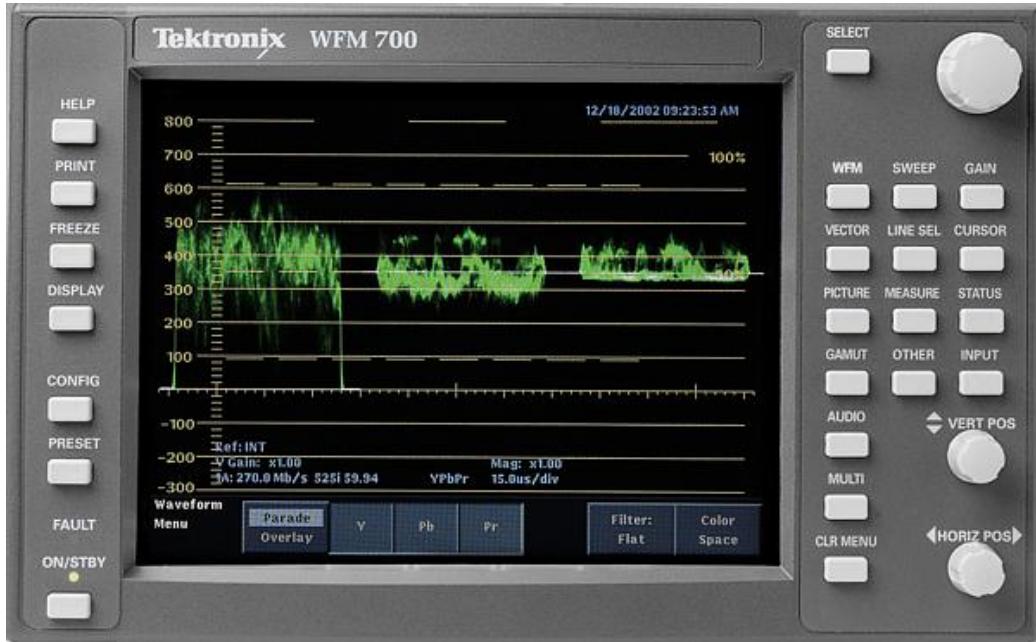


Abbildung 10.10: Frontansicht eines Waveformmonitors der Firma Tektronix²⁸

Die Pegel werden von 0 mV bis 700 mV angezeigt. Die negativen Pegel (-300 mV) werden für die Synchronisation des Videosignals genutzt. Das Bild wird dabei in drei Blöcke für das Rot-, Grün- und Blausignal aufgeteilt (von l. nach r.). Der WFM wird auch während der Hauptmessung zu Überprüfung des Videosignals genutzt.

10.5.2 Vektorskop

Der Farbton ist mit einem WFM-Monitor nicht gut erkennbar, da der Phasenwinkel der Farbanteilsignale des RGB-Signals im hochfrequenten Bereich schwer auslesbar ist. An dieser Stelle kommt das Vektorskop ins Spiel. Dieses Gerät wird auch mit einem Elektronenstrahl in zwei verschiedene Achsen betrieben. Im Gegensatz zum Waveformmonitor orientiert sich das Vektorskop horizontal an der U- und vertikal an der V-Komponente des FBAS-Signals. Die U- und V-Werte stammen aus dem Farbdifferenzsignalen des Komponentensignals mit einer anderen Pegelreduzierung (Gleichung 10.7).

²⁸ https://www.tek.com/sites/default/files/media/image/A000_1387-L.jpg [Stand: 07.08.2018]

$$U = 0,493(B - Y) \quad (10.7)$$

$$V = 0,877(R - Y) \quad (10.8)$$

Diese Anpassung wird dadurch verursacht, dass die Farbdifferenzsignale im FBAS-Signal in modulierter Form überlagert werden und daher im Pegel reduziert werden müssen²⁹. Das FBAS-Signal ist eine abgewandelte Form des Komponentensignals und für diese Arbeit unrelevant.

Der Bildschirm eines Vektorskops ist mit sechs Toleranzflächen ausgestattet und zeigt über den ganzen Bildschirm alle Farben an. In der Mitte der Anzeige liegt der Unbuntpunkt. Der Elektrodenstrahl fährt über den Bildschirm und zeigt die Farben der Bildzeile an. Dafür wird das Vektorskop mit einem Farbbalkentestbild kalibriert. Das Farbbalkentestbild besteht aus allen sieben möglichen Kombinationen der RGB-Farbanteile (Abbildung 10.11).

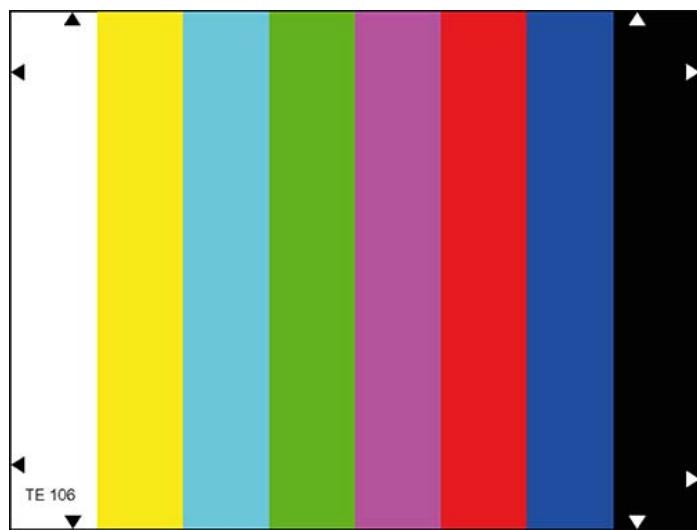


Abbildung 10.11: „TE106“ Color Bar Test Chart der Firma Image Engineering³⁰

Abhängig davon, ob das Testbild mit vollausgesteuerten RGB-Farbanteilen (100/100) oder mit 75% Pegelsignal erstellt wurde (75/100), wird der Synchronisationburst vom 0-Punkt aus mit einem Winkel von 135° mit der entsprechenden Länge dargestellt. So wird dann entweder die Makierung „100“ oder „75“ getroffen (Abbildung 10.12).

²⁹ (Schmidt 2000: 84)

³⁰ <https://www.image-engineering.de/content/products/charts/te106/images/TE106.jpg> [Stand: 07.08.2018]

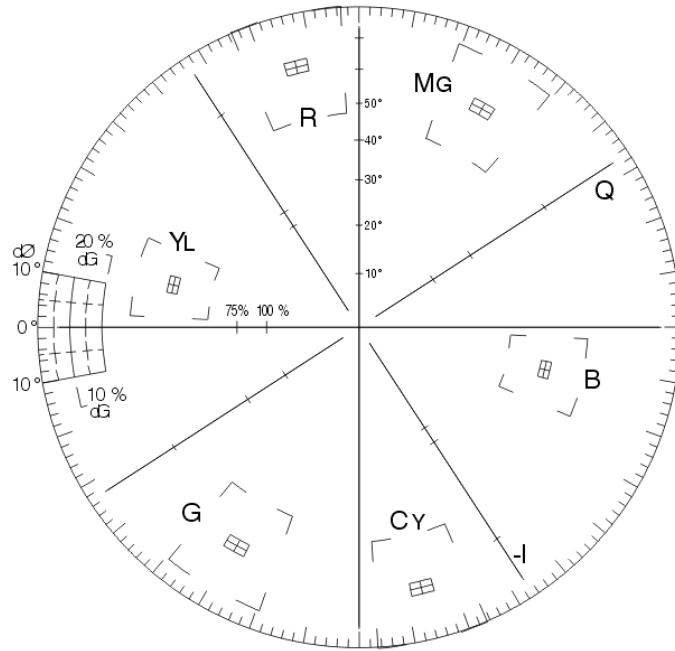


Abbildung 10.12: Darstellung der Vektorskopeinteilung mit der Q- und I-Achse³¹

Danach werden alle Farben des Vektorskops einmal im Toleranzfeld getroffen. Eine Winkelabweichung steht im diesen Zusammenhang für einen Farbtonfehler. Mit bis zu 3% Winkelabweichung kann der richtige Farbton noch getroffen werden. Eine Amplitudenabweichung des Signals ist ein Sättigungsfehler und wird durch die Toleranzfelder mit bis zu 5% Abweichung anerkannt³².

Die Vektorskopbilder aus der Vormessung zeigen zum Beispiel, wie sich die verschiedenen Beleuchtungssituationen auf die Farben der Kamera auswirken (Kapitel ??).

³¹ https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7b/Vectorscope_graticule.png

[Stand: 08.08.2018]

³² (Schmidt 2000: 114)

11 Messungen

Das Ziel der Messung ist es, das Licht eines 1kW Stufenlinsenscheinwerfers, der mit einem tiefroten Filter gefiltert wird, mit dem Licht verschiedener LED-Scheinwerfer additiv zu mischen und auf diese Weise dem Spektrum des Testscheinwerfers einen „Red Tail“ anzuhängen. Dabei wird die Messung in eine Vor- und Hauptmessung eingeteilt. Bei der Vormessung soll untersucht werden, wie stark ein „Red Tail“ zu einem Scheinwerferlichtspektrum additiv gemischt werden sollte und wo die Grenzen der Auswirkung des zusätzlichen tiefroten Spektralanteils liegen. Außerdem sollen die Referenzleuchten vermessen werden.

In der Hauptmessung werden die Auswirkungen des „Red Tail“ durch den Vergleich der Lichtspektren der Scheinwerfer mit und ohne zusätzlichen tiefroten Spektralanteil untersucht.

11.1 Grundüberlegungen

Bevor mit der Untersuchung des zusätzlichen tiefroten Spektralanteils begonnen werden konnte, sollte durch Grundüberlegung über die Farbfilter und Scheinwerfer die Messung eingegrenzt werden.

11.1.1 Rottöne des „Red Tail“

Die Wahl der Rotfilter fällt auf ein Rosco 027 „Medium Red“, ein Rosco 787 „Marius Red“ und ein Rosco 789 „Blood Red“. Bei diesen Rottönen hat man bewusst darauf geachtet, dass sich diese am Rand des Spektrums befinden. Denn Ziel des „Red Tail“ ist es, dem Spektrum einen tiefroten Anteil anzuhängen, der nicht schon im gelb-orangenen Spektralbereich beginnt und ab dort den gesamten Spektralbereich erhöht (Abbildung 11.1).

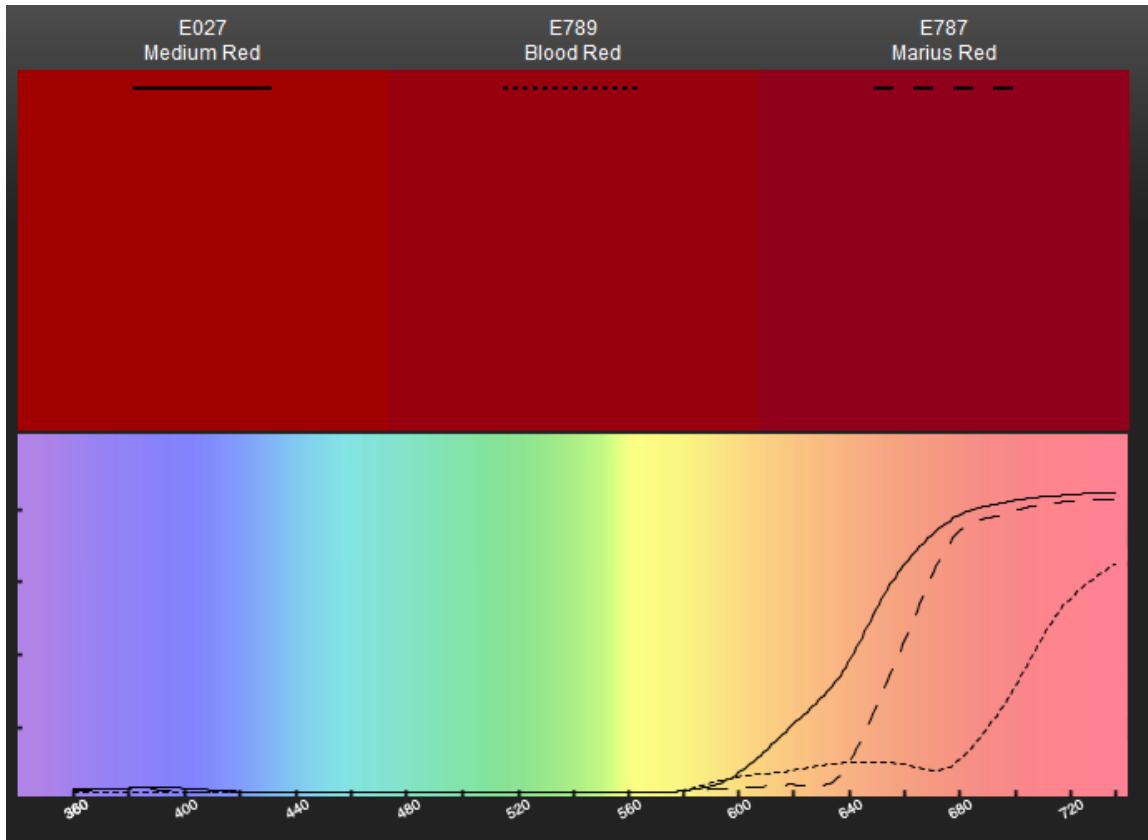


Abbildung 11.1: Vergleich von Lichtspektren mit den drei roten Filterfolien¹

11.1.2 Scheinwerfer

Für die Hauptmessungen werden vier Scheinwerfer mit Multichip-LED Engine und zwei Scheinwerfer mit reinweißer LED-Engine ausgewählt. Bei den Multichip- Scheinwerfern ist der Clay Paky K-Eye K20 mit sechs verschiedenfarbigen LEDs dabei und als Alternative der Robe Robin DL7F Wash mit sieben verschiedenfarbigen LEDs und der weltweit verbreitete ETC Source Four LED Series 2 Lustr, ebenfalls mit sieben verschiedenfarbigen LEDs. Dazu kommt ein weiterer „Standartscheinwerfer“ aus dem TV-Bereich: der GLP Impression X4 in der „L“ - Variante. Dieser verfügt über eine rote, grüne und blaue, wie eine weiße LED in seinen LED-Arrays. Weiterhin gibt es noch den Martin MAC Encore CLD Wash, speziell für die Personenbeleuchtung ausgelegt mit einer reinweißen LED-Engine und den Ayrton Ghibli, ebenfalls mit einer reinweißen LED-Engine als Beispiel für einen LED-Effektscheinwerfer. Mit diesen Scheinwerfern soll die Auswirkung eines „Red Tail“ überprüft werden.

¹ emea.rosco.com/de/node/1706 [Stand: 01.07.2018]

11.1.3 Referenzlicht

Es stehen zwei Tageslicht-HMI als Referenzlicht zur Verfügung: Der Arri Sun 5 und der Arri True Blue D5.

Der Arri Sun 5 ist mit einem neuen Leuchtmittel ausgestattet worden, damit man die LED-Scheinwerfer an dieses Spektrum anpassen kann. Dieser Scheinwerfer wird in der Vormessung getestet und soll durch Abstand und Zoom auf eine Beleuchtungsstärke von 500 lux gebracht werden. Bei in meinen Testreihen größtmöglichen Abstand von 10 m ist das nur über den maximalen Zoom des Scheinwerfers möglich. Dies hat zur Folge, dass das Leuchtmittel selbst über den Reflektor des Scheinwerfers gespiegelt und „rückprojiziert“ wird, so dass dadurch ein dunkler Bereich in der Mitte des Lichtkegels entsteht. Da man das Referenzspektrum nicht verfälschen möchte, wird bei dem Referenzlicht auf jegliche Art von Filtern verzichtet. Unter diesen Umständen kann der Arri Sun 5 nicht als Referenzlampe genutzt werden.

Daher wird in der Hauptmessung ein Arri True Blue D5 genutzt, der innerhalb von 10m, mit dem Zoom auf 500 lux angepasst, ein gutes Referenzlicht liefert, welches allerdings ca. 600 K wärmer ist als der Arri Sun 5. (Abbildung 11.2). So kommt es, dass die Vormessungen auf 6000 K, die Hauptmessung jedoch auf 5395 K eingemessen sind (Kapitel 11.3). Da nur die Tendenzen der Vormessung eine Rolle spielen und die Vormessung keine direkte Einwirkung auf die Hauptmessung hat, ist dieser Unterschied zu vernachlässigen.

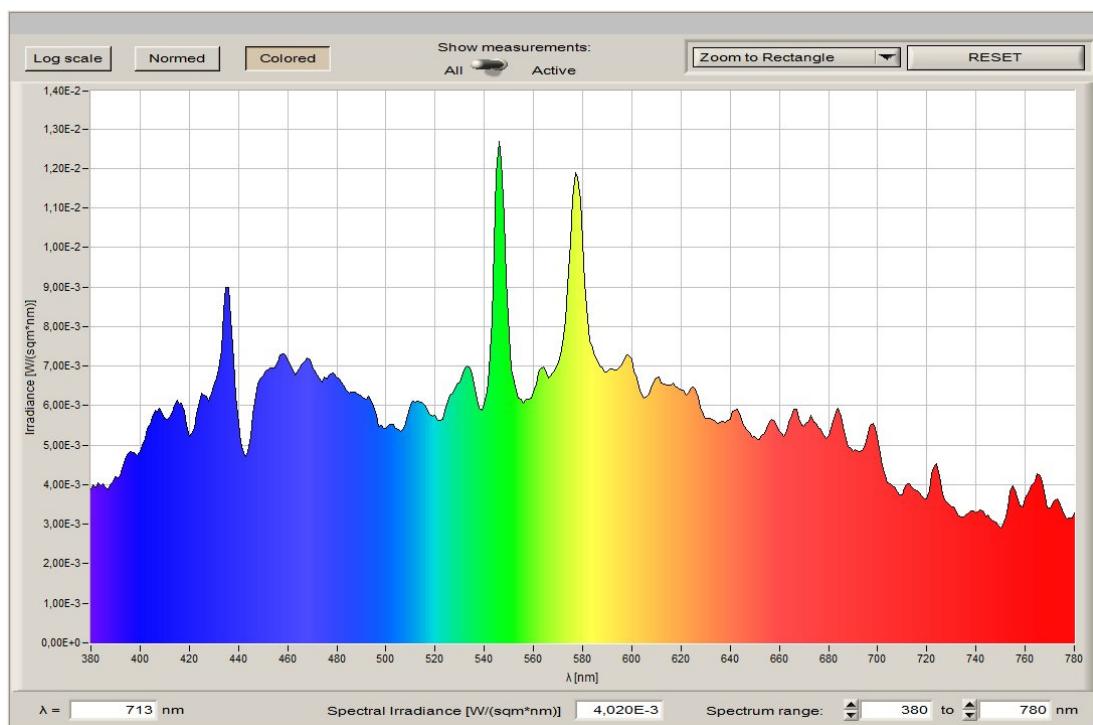


Abbildung 11.2: Spektrum des Referenzscheinwerfers ARRI D5)

11.2 Messaufbau

Für die Messungen wird der Scheinwerfer direkt neben dem folierten Stufenlinsenscheinwerfer platziert, um den Fehler durch den verschiedenen Winkel der Scheinwerfer so gering wie möglich zu halten (Abbildung 11.3). Der JETI Specbos 1211, mit dem Standart Diffusor bestückt, wird als primäres Messgerät genutzt. Es wird aus 7m Entfernung direkt gemessen, damit man vergleichbare Helligkeiten erreicht (500lux). Wichtig ist dabei, dass das Messgerät auf der selben Höhe wie der Scheinwerfer angeordnet ist, damit wirklich die Mitte des Lichtkegels den Messkopf trifft. Angesteuert werden die Scheinwerfer mit einer MA Lighting „GrandMA 2 light“ Lichtsteuerkonsole. Das Lichtpult ermöglicht eine sehr feine Anpassung der Farbkanäle der Scheinwerfer.

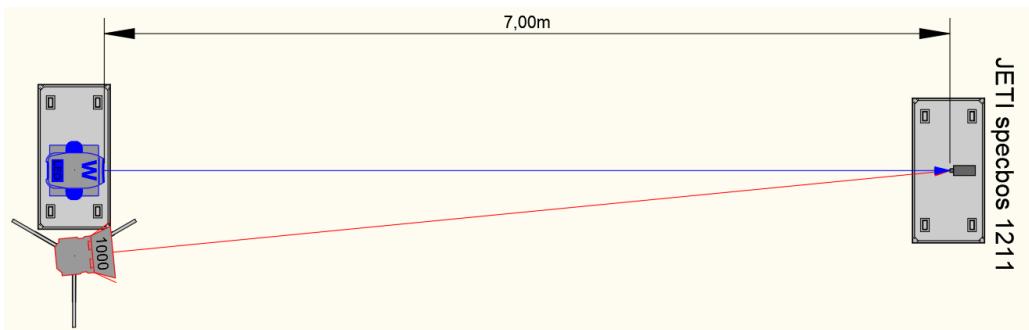


Abbildung 11.3: Skizzierung des Messaufbaus. Die Stufenlinse mit Filterfolie (rot) wird zusammen mit den Scheinwerfern (blau) auf den JETI specbos 1211 ausgerichtet.

11.3 Vormessung

Bei den Vormessungen wird beobachtet, wie stark dir „Red Tail“ ausgeprägt sein muss und welche Filter sich für einen zusätzlichen tiefroten Spektralanteil eignen. Als Beispiel wird der Clay Paky K-Eye K20 representativ für Multichip LED-Scheinwerfer für Personenlicht genommen und der Martin MAC Encore Wash CLD als Gegenstück für reinweiße LED-Engine Scheinwerfer.

11.3.1 Durchführung der Vormessung

Für die Vormessung wurde noch der Arri Sun 5 als Referenzlicht genommen (6000 K).

Die Scheinwerfer werden wie in der Beschreibung des Messaufbaus aufgestellt (Abbildung 11.4). Zuerst wird mit dem Scheinwerfer auf den JETI specbos 1211 gezielt. Dazu wird der Zoom auf den kleinsten Wert eingestellt und der Scheinwerfer ausgerichtet. Danach wird der Scheinwerfer wieder auf seinen Standart Zoomwert zurückgesetzt und alle Farben und seine Helligkeit werden auf 100% eingestellt. Der

11 Messungen

Scheinwerfer wird jetzt Schritt für Schritt an das Referenzlicht des Arri Sun 5 angeglichen, sodass die Farbtemperatur, Helligkeit und $\Delta u'v'$ den Werten des Arri Sun 5 möglichst ähneln (für eine genaue Beschreibung dieses Vorgangs siehe Kapitel ??). Wenn der Scheinwerfer angeglichen ist, wird dann in 10% Schritten das rotgefilterte Licht des Stufenlinsenscheinwerfers hinzugemischt. Die Farben des Scheinwerfers werden bei jedem Schritt erneut auf die gleiche Farbtemperatur und gleichem Abstand zum Plank'schen Kurvenzug gedreht, damit die Werte vergleichbar bleiben.

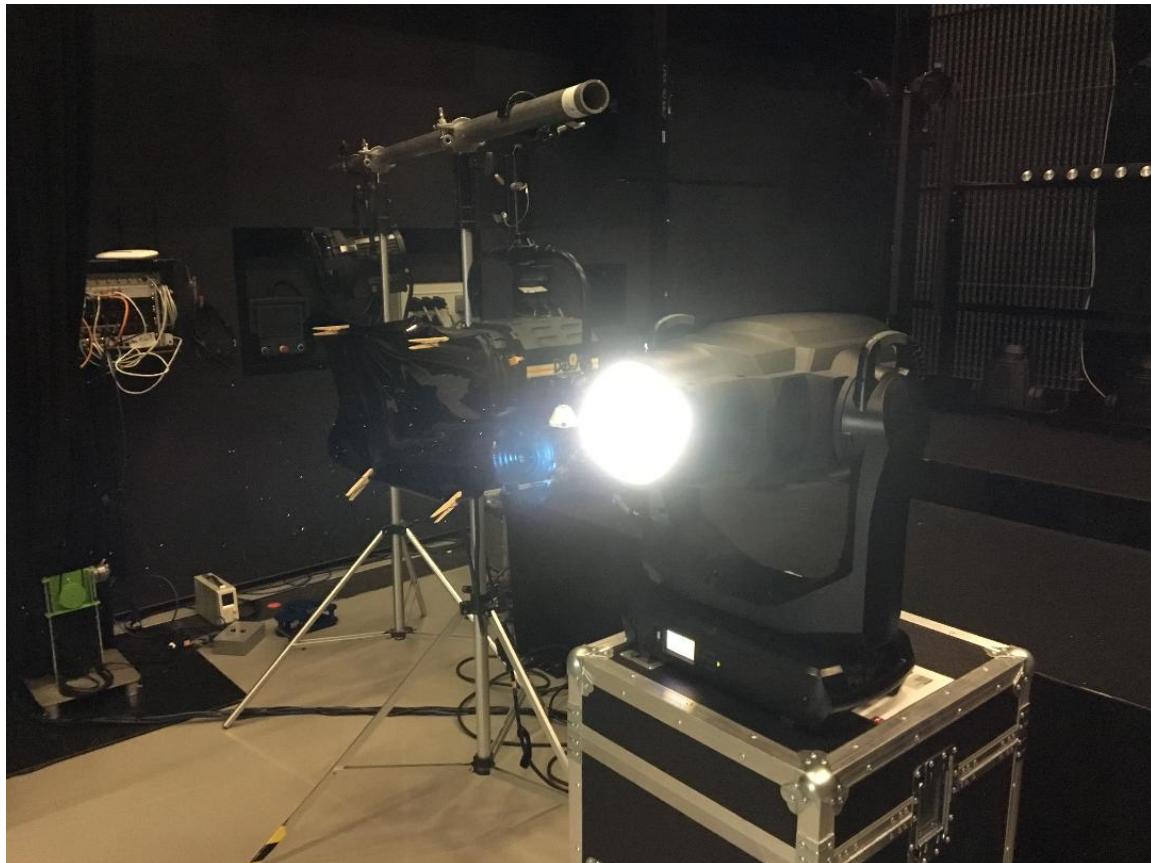


Abbildung 11.4: Aufbau des „Red Tail“ mit dem MAC Encore Wash CLD

11.3.2 Analyse der Vormessung

Die Auswirkungen des „Red Tail“ wird vor allen Dingen in den TLCI-Werten sichtbar. Zusätzlich sind auch leichte Tendenzen bei den CQS-Werten und den TM-30-Werten bemerkbar. Wenn man dem K-Eye K20 ein zusätzliches Rosco 027 „Medium Red“ dazumischt, dann ist der „Red Tail“ ab 20% gesättigt (Abbildung 11.5).

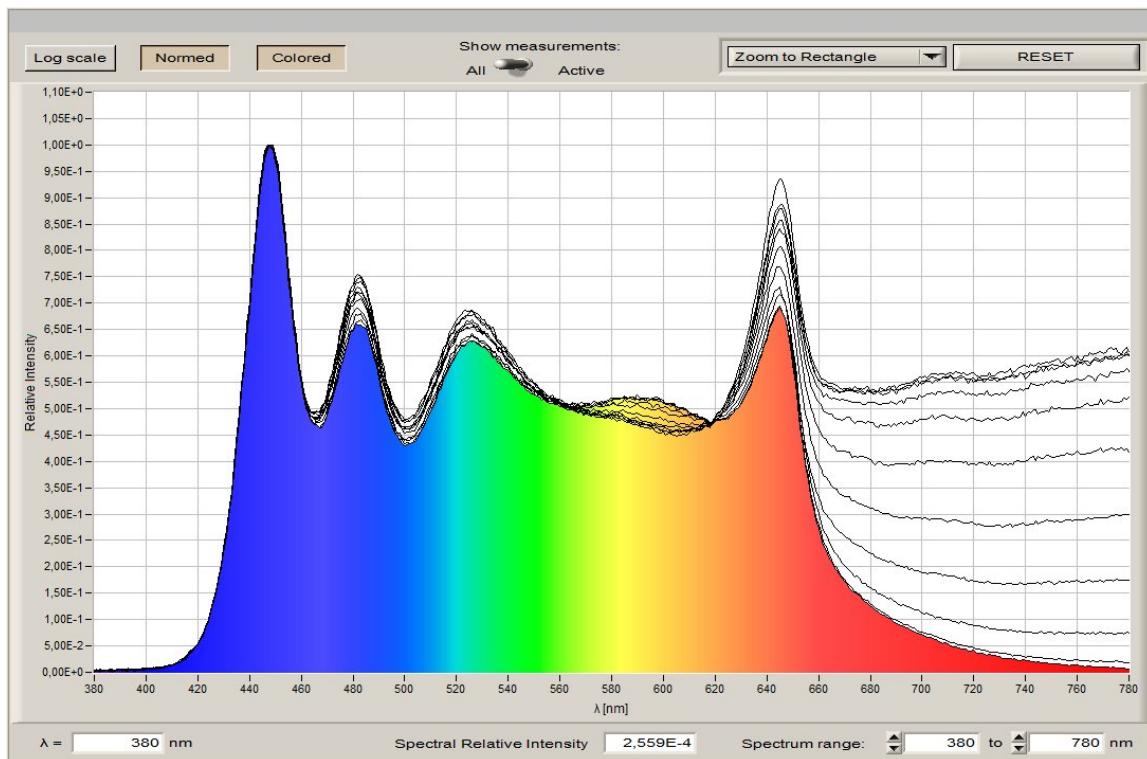


Abbildung 11.5: Alle 10 Spektren der Vormessung des K-Eye K20 mit einem zusätzlichen Rosco 027 „Medium Red“ (das farbige Spektrum wurde ohne zusätzlichen tiefroten Spektralanteil gemessen.)

11 Messungen

Mit 50% zusätzlichem Rot sind die Farbwiedergabewerte so niedrig, dass der „Red Tail“ eine Verschlechterung der Lichtqualität des Scheinwerfers darstellt. Dies ist eine Folge aus dem Angleichen des Scheinwerferspektrums mit einem größeren „Red Tail“. Das zusätzliche Rot muss jedes Mal mit den Farben des Scheinwerfers ausgeglichen werden, um dasselbe 6000 k Weiß zu erhalten. Abhängig von diesem neuen Mischverhältnis mit dem „Red Tail“ ergibt sich entweder ein Spektrum, dass durch das Rot und die ausgleichenden Farben bereichert wurde, oder das Spektrum wurde durch die stetig größer werdenden Peaks und Einbuchtungen verzogen (Abbildung 11.6).

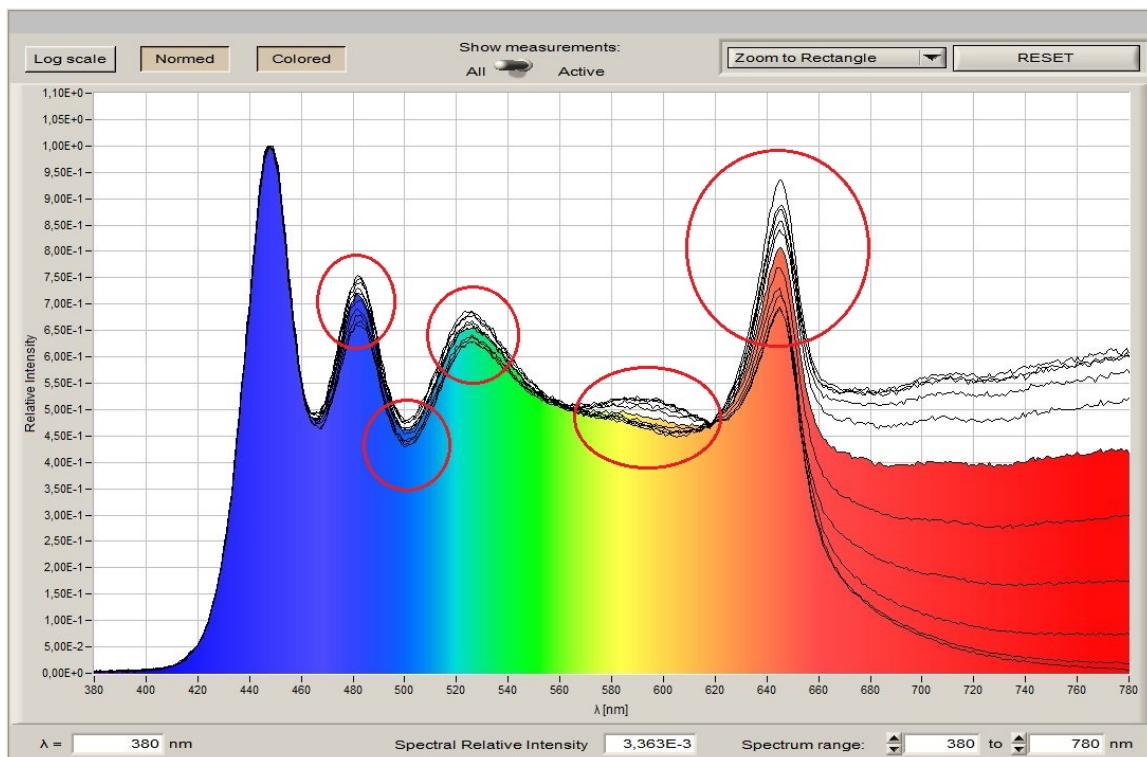


Abbildung 11.6: Das Lichtspektrum des K-Eye K20 wird mit 50% „Red Tail“ (farbig) schlechter. Die Roten Kreise weisen auf die entstehenden Peaks (Blau / Rot / Limette) und Täler (Amber / Cyan) hin.

11 Messungen

Mit dem Rosco 787 „Marius Red“ sind analog zum 027 Filter dieselben Tendenzen erkennbar, außer dass die Sättigung des „Red Tail“ erst bei 30% erreicht ist. Der Rosco 789 „Blood Red“ Filter hingegen zeigt ein anderes Bild. Ab 30% tritt auch hier die Sättigung des „Red Tail“ ein. Eine weitere Erhöhung des zuätzlichen Rotes ändert aber weder die Farbwiedergabewerte, noch machen sie eine größere Anpassung der Farben des K-Eye K20 nötig. Dieses Verhalten ist damit zu erklären, dass der Transmissionsgrad des Rosco 789 „Blood Red“ Filters $Y = 1,2\%$ beträgt, also nur 1,2% des Lichts der Stufenlinsen durchlässt. Dieser selbstgebaute „Red Tail“ ist mit der Leistungsklasse eines 1 kW-Leuchtmittels zu dunkel, um über den Sättigungspunkt hinauszukommen (Abbildung 11.7).

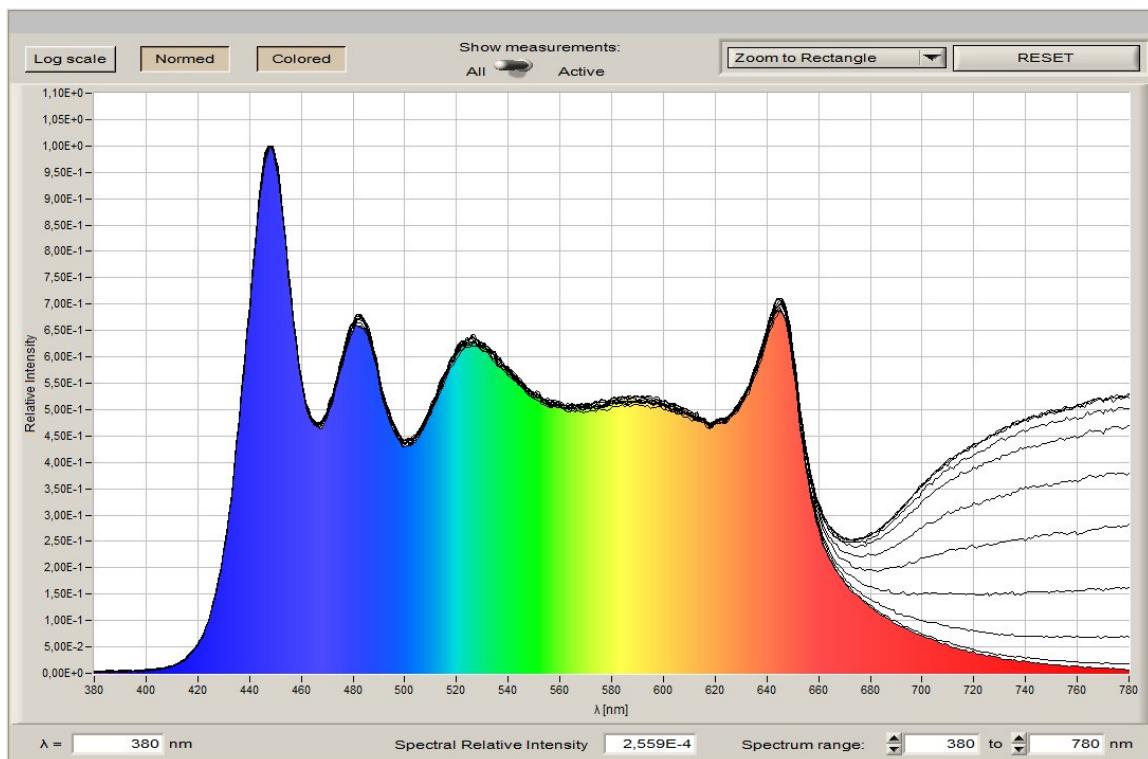


Abbildung 11.7: Alle 10 Spektren der Vormessung des K-Eye K20 mit einem zusätzlichen Rosco 789 „Blood Red“ (das farbige Spektrum wurde ohne zusätzlichen tiefroten Spektralanteil gemessen.)

Für den Mac Encore CLD Wash kann man mit dem Rosco 027 „Medium Red“ eine ähnliche Tendenz wie bei dem K-Eye K20 feststellen (Abbildung 11.8). Ab 40% kann man von einer Sättigung des „Red Tail“ reden. Der Rosco 787 „Marius Red“ Filter liefert erst bei 70% eine Sättigung und zeigt so, dass schon dieser Rotton zu dunkel ist, um die Sättigungswert zu überschreiten. Weil der Rosco 789 „Blood Red“ Filter noch dunkler als der 787 Filter ist und dieselben Tendenzen wie alle zusätzlichen Rottöne liefert, wird dieser Rotton nicht in den Hauptmessungen verwendet.

11.3.3 Fazit aus der Vormessung

Die Tendenzen zeigen, dass der „Red Tail“ vorwiegend den TLCI verbessert und den Scheinwerfern ein besseres kaltweißes Spektrum ermöglicht. In der Hauptmessung wird sich zeigen, wie sich der zusätzliche tiefrote Anteil auf andere Scheinwerfer auswirkt.

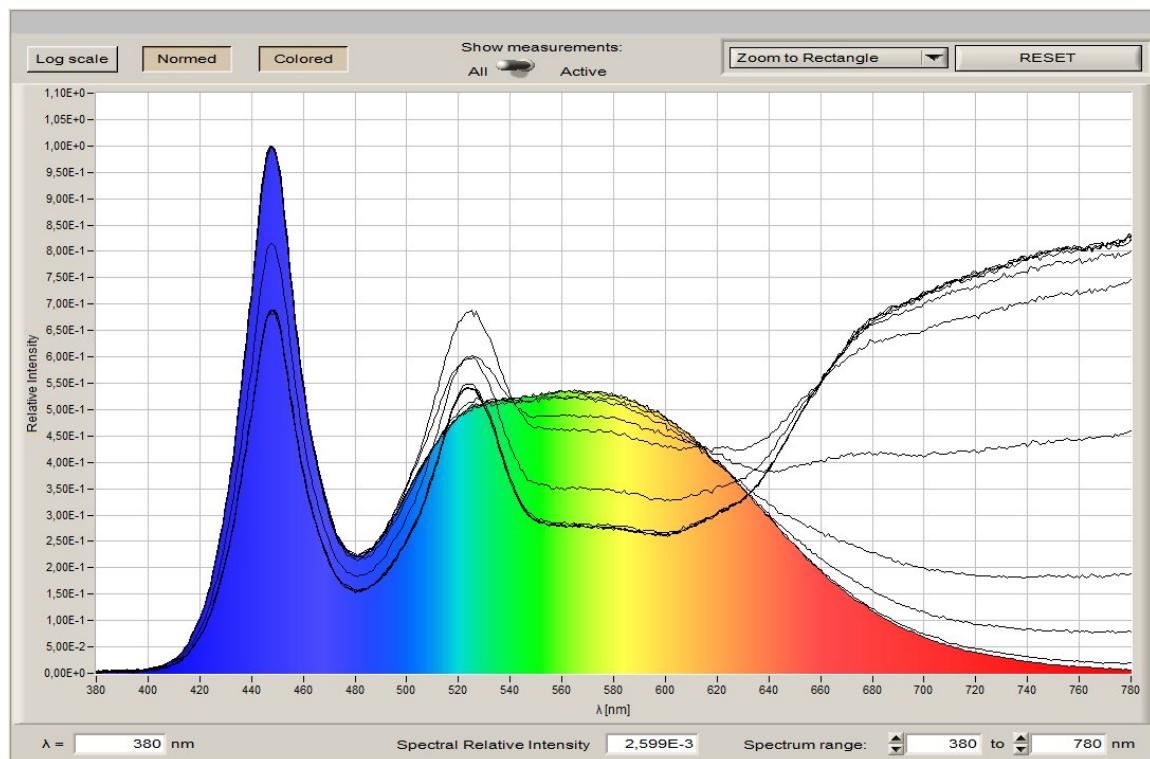


Abbildung 11.8: Alle 10 Spektren der Vormessung des MAC Encore Wash CLD mit einem zusätzlichen Rosco 027 „Medium Red“ (das farbige Spektrum wurde ohne zusätzlichen tiefroten Spektralanteil gemessen)

11.4 Hauptmessung

Bei der Hauptmessung wird der Arri D5 als Referenzlicht genutzt. Mit diesem Scheinwerfer wird auch das Referenzbild der Umfrage beleuchtet und darf daher keine „Abbildungsfehler“ mit sich führen (Kapitel 11.1.3).

Die Hauptmessung fokussiert sich auf den Vergleich der Lichtspektren mit und ohne zusätzlichem „Red Tail“.

11.4.1 Durchführung der Hauptmessung

Für die Hauptmessung wird mit dem JETI specbos 1211 mit Hilfe eines Standarddilfusor gemessen und mit dem UPTek MK350S gegenkontrolliert, um die gemessenen Werte zu bestätigen. Jeder Scheinwerfer wird also über die GrandMA 2 light auf eine Farbtemperatur von 5395K des Referenzlichts eingestellt, mit einem möglichst geringen Abstand zur Plank'schen Kurve ($\Delta u'v' = \pm 0,0001$) und einem sehr ähnlichen Farbort, um die Messungen vergleichen zu können. Wenn dem Scheinwerfer ein „Red Tail“ hinzugemischt wird, wird der Scheinwerfer erneut auf die Referenz angeglichen. Damit soviel spektrale Energie wie möglich dem Spektrum erhalten bleibt, wird jeder Scheinwerfer mit allen Farben auf 100% als Startwert eingestellt. Bei den LED Multichip-Scheinwerfern wird dann zunächst das Blau/Rot-Verhältnis so angepasst, dass die Zielfarbtemperatur in etwa erreicht wird. Dann wird über das Grün- (bzw. Limette-) Verhältnis zu Rot (bzw. Amber) und Blau die Nähe des Farborts zur Plank'schen Kurven bestimmt. Auf diese Weise wird der $\Delta u'v'$ -Wert verringert und auf den Referenzwert eingestellt. Oft ist es nach der $\Delta u'v'$ -Anpassung erneut nötig, die Farbtemperatur zu korrigieren und danach wieder den $\Delta u'v'$. Auch die Helligkeit wird über den Abstand der Lampe und Zoom so angepasst, dass alle Lampen eine Helligkeit von ca. 500 lux aufweisen. Da beim Zoomen die Helligkeit meistens nicht stabil bleibt, muss der Scheinwerfer auch nachdem Zoomen angepasst werden. Aus demselben Grund wird der Dimmer der Lampen konstant auf 100% gehalten und die Abstände angepasst, damit die Scheinwerfer vergleichbar bleiben. Der K-Eye K20 wurde beispielsweise nur im Rot (98,5%) und im Limette (94%) angepasst und konnte in seinen restlichen Farben Gelb, Blau, Amber und Kongo Blau die maximalen Werten behalten (100%). Dadurch bleibt fast die ganze Spektrale Energie bei einer CCT von ca. 5395 erhalten.

Scheinwerfer mit reinweißer LED-Enginge werden über die CTC (bzw. CTO)-Funktion auf die Farbtemperatur eingestellt und dann über Rot, Grün und Blau-Werte angepasst.

Bei dem K-Eye K20 wurden beispielsweise die Farben durch Hinzugabe des tiefroten Spektralanteils wie folgend geändert (Tabelle 11.1):

K-Eye K20 Anpassung							
Farbe	Rot	Grün	Blau	Amber	Cyan	Limette	„Red Tail“
5400 k best	74,5	100	78	100	100	92,5	0
027 „Medium Red“	89	99	57,7	83	100	100	25

Tabelle 11.1: Farbwerte in Prozentangaben (Der tiefrote Spektralanteil wird mit dem Dimmerwert des Stufenlinsenscheinwerfers angegeben.)

Spannenderweise steht dem K-Eye K20 nach der Anpassung an den „Red Tail“ mehr Rot und Limette zu Verfügung als ohne. Bei einem zusätzlichen tiefroten Spektralanteil könnte man erwarten, dass als Ausgleich der Rotwert des K-Eye K20 gesenkt

werden müsste. Jedoch mussten stattdessen bei meinen Testreihen die Helligkeiten des K-Eye K20 von Blau und Amber um ca. 20% gemindert werden, damit die korrigierte Farbtemperatur von 5395 K bestehen bleiben konnte.

11.4.2 Analyse der Hauptmessung

Die Tendenzen in den Versuchsergebnissen zeigen, dass das Weißlicht bei den Scheinwerfern Ghibli, MAC Encore, Lustr und K-Eye K20 durch den „Red Tail“ verbessert wurden. Wie in den bereits Vormessungen zu sehen war, zeigt sich dies in allen Farbwiedergabewerten, vor allen Dingen im TLCI. Der MAC Encore CLD Wash konnte mit einem Rosco 027 „Medium Red“ im TLCI sogar um 16 Punkte verbessert werden. Diese Scheinwerfer zeigen, dass der zusätzliche „Red Tail“ eine Verbesserung des Spektrums darstellt, unabhängig davon, welches zusätzliche Rot genutzt wird.

Dieses Ergebnis lässt sich durch zwei Auswirkungen des „Red Tail“ erklären: Es wird auf der einen Seite der tiefrote Bereich der Lichtspektren der Scheinwerfer aufgefüllt und zum anderen werden zum Ausgleich des zusätzlichen tiefroten Anteils wieder wertvolle Anteile in der Mitte des Lichtspektrums dazugemischt.

Spannend ist, dass beim Clay Paky K-Eye K20 nur der TLCI verbessert werden konnte. Dies hängt damit zusammen, dass dem K-Eye K20 mit „Red Tail“ deutlich weniger Amber zur Verfügung steht und der 645 nm Rot-Peak in die Höhe schießt. Das Lichtspektrum wird also unausgeglichen und bekommt dadurch schlechtere Farbwiedergabewerte (Abbildung 11.9).

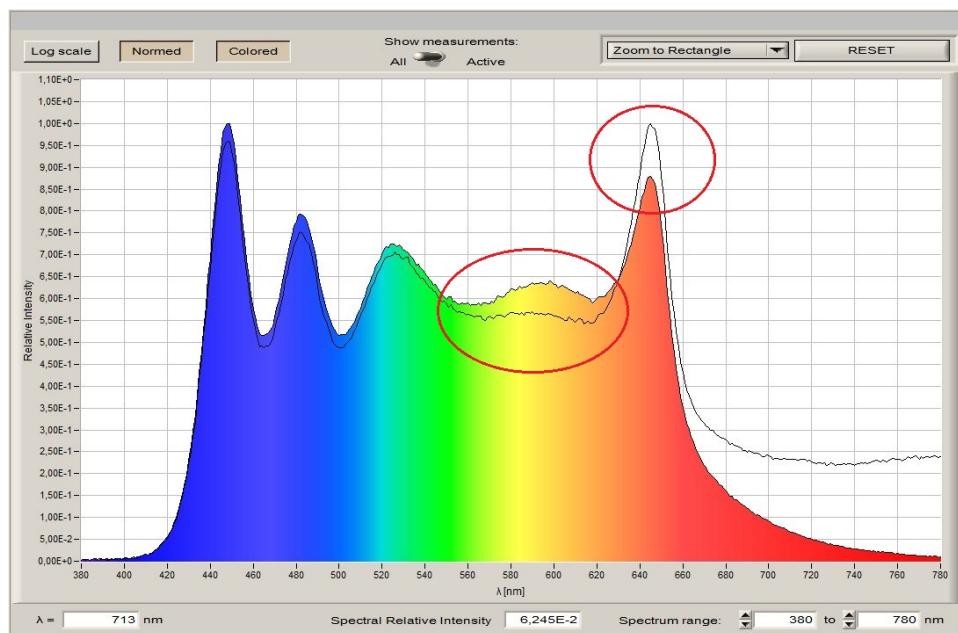


Abbildung 11.9: Vergleich des K-Eye K20 Spektrums bei 5395 K (bunt) mit dem Spektrum eines zusätzlichen Rosco 027 „Medium Red“. Entstandene Unterschiede sind besonders hervorgehoben.

11 Messungen

Das Lichtspektrum des Impression X4L konnte nicht durch ein zusätzliches Rot verbessert werden. Dies liegt daran, dass das Lichtspektrum des X4Ls hauptsächlich aus schmalbandigen Peaks besteht, die das Spektrum nicht ausfüllen (Abbildung 11.10). Zusätzlich kann man mit der blauen LED das Spektrum nicht weiter ausfüllen, da der Peak der weißen LED exakt mit dem der blauen LED übereinstimmt. Auch ein Angleichen des Spektrums mit einem „Red Tail“ verbessert dieses extreme Lichtspektrum nicht, sondern vergrößert das spektrale Tief im 595 nm Wellenlängenbereich sogar. Ein aufgefülltes Spektrum kann also mit einem „Red Tail“ bereichert werden, während man bei einem schmalbandigen Spektrum für eine Auffüllung der Randbereiche nicht belohnt wird.

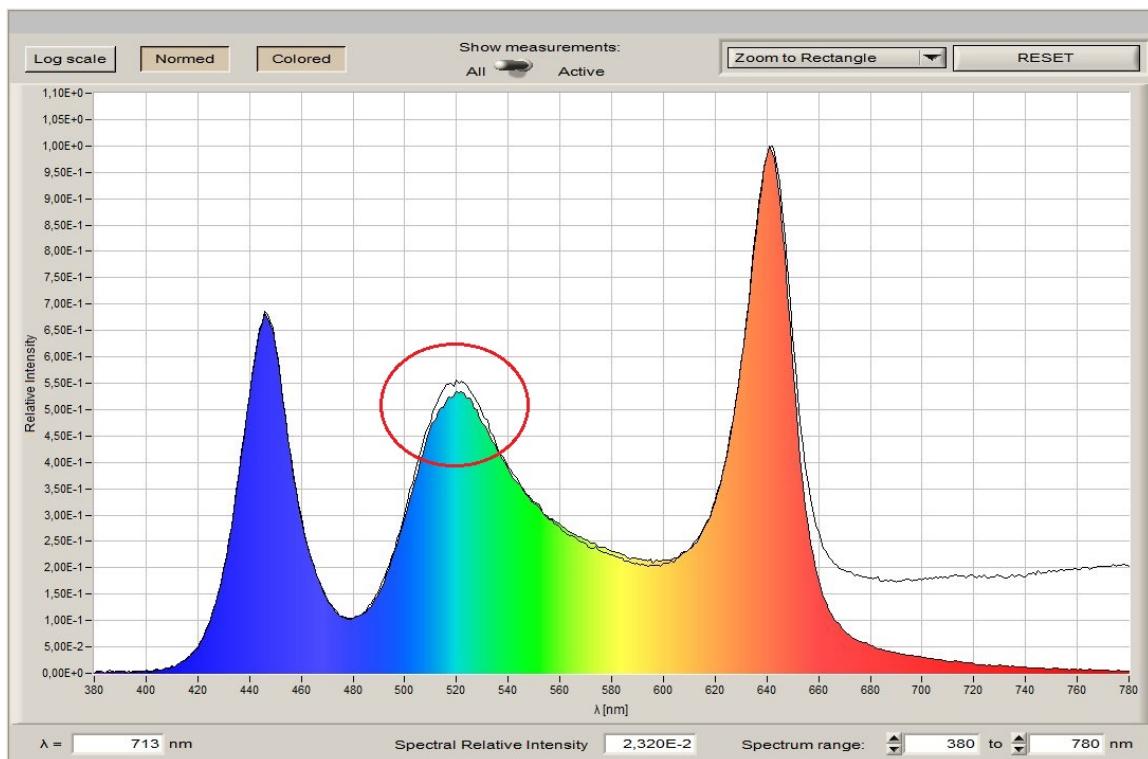


Abbildung 11.10: Vergleich des Impression X4L Spektrums bei 5395 K (bunt) mit dem Spektrum eines zusätzlichen Rosco 027 „Medium Red“. Täler und Peaks sind besonders hervorgehoben.

11 Messungen

Bei dem Robin DL7F Wash haben wir im High-CRI Modus auch keine Verbesserung mit einem „Red Tail“ erzielen können. Das Lichtspektrum des Robin DL7F ist durch viele Peaks und Täler gekennzeichnet, außer im Bereich von 510 nm-550 nm Wellenlänge, wo das Spektrum sehr breitbandig ist (Abbildung 11.11). Durch Angleichungen an den „Red Tail“ wird die Farbe Limette vermindert, das Tal im gelben Spektralbereich noch tiefer und der rote Peak wird erhöht. Das Spektrum wird also noch mehr in seine Extreme verzerrt und dadurch entstehen noch schlechtere Farbwiedergabewerte.

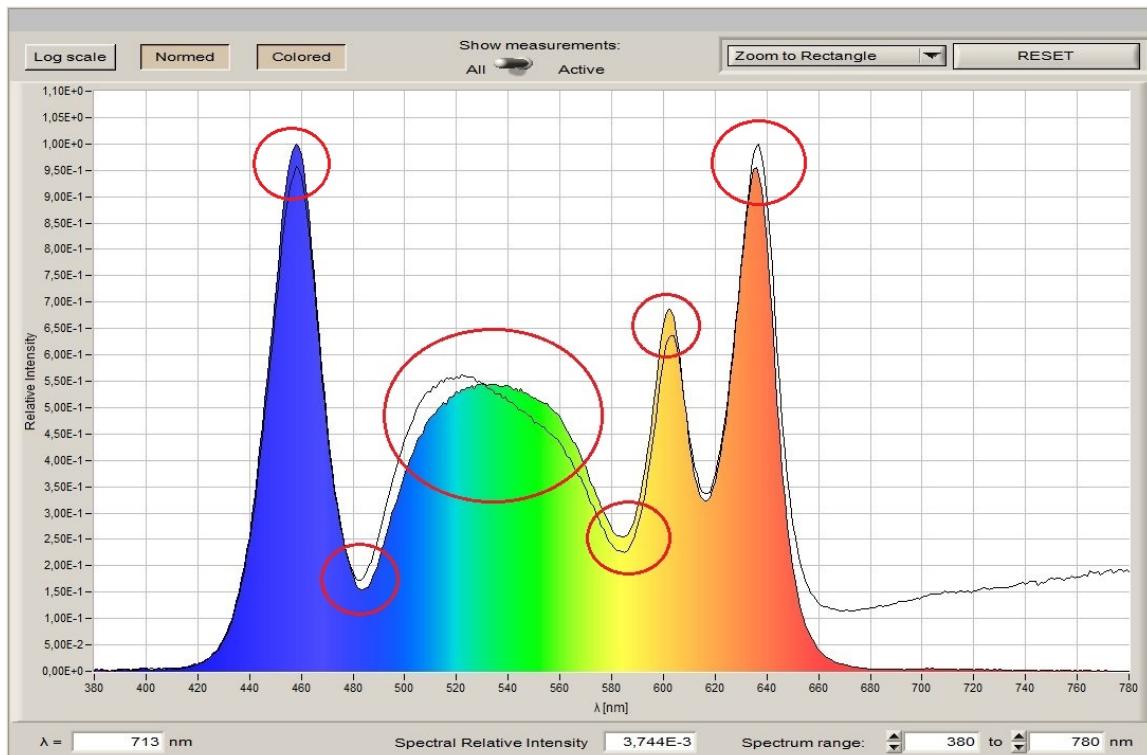


Abbildung 11.11: Vergleich des DL7F Spektrums bei 5395 K (bunt) mit dem Spektrum eines zusätzlichen Rosco 027 „Medium Red“. Täler und Peaks sind besonders hervorgehoben.

Die Farbwiedergabewerte haben unterschiedlich stark auf den „Red Tail“ reagiert. Der TLCI zeigt dabei stets den größten Ausschlag mit bis zu 16 Punkten, CQS und TM-30 erhöhen sich höchsten um 5 Punkte.

11.4.3 Fazit aus der Hauptmessung

Aus den Hauptmessungen lässt sich schließen, dass der „Red Tail“ tendenziell das Weißlicht der Scheinwerfer verbessert. Am deutlichsten ist dies stets im TLCI zu erkennen, es macht sich aber ebenso im CQS, wie im TM-30 bemerkbar. Die Verbesserung ist einmal durch den zusätzlichen tiefroten Anteil im Lichtspektrum zu erklären und damit, dass das Spektrum mit diesem neu angepasst wird. Bei Scheinwerfern mit schmalbandigen Spektren führt der „Red Tail“ dazu, dass die Spektren noch extremer werden (größere Peaks, größere Täler) und so können die Farbwiedergabewerte nicht verbessert werden. Ein zu großer „Red Tail“ ist nicht zu empfehlen, da dies die Farbwiedergabewerte des Scheinwerfers wieder verschlechtern würde (Kapitel 11.3.3). Daher sollte für jeden Scheinwerfer ein „Red Tail“ individuell ausbalanciert werden.

12 Aufnahme der Bilder

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die Bilder für die Umfrage erstellt wurden. Dazu wird erst auf die Wahl der abzubildenden Hauttöne und der Kamera eingegangen. Danach wird die Erstellung der Bilder erklärt.

12.1 Auswahl der Kamera und der Probanden

Die Probanden werden nach möglichst unterschiedlichen Hauttönen ausgewählt. Leider sind am Aufnahmetag nicht alle Probanden erschienen und daher ist die Bandbreite der Hauttöne nicht so groß wie erhofft, aber dennoch aussagekräftig genug, um die Auswirkung des Red Tail beurteilen zu können. Denn nach Khan (Kapitel 4.5) ist jeder Hauttyp stark im roten Spektralbereich vertreten. Die Probanden haben einen normalen, einen südländischen, einen braun-gebrannten und einen nordischen Hauttyp (Abbildung 12.1).



Abbildung 12.1: Bild der 4 Probanden mit dem Arri D5 Referenzlicht beleuchtet

Die Kamerawahl trifft auf eine Sony HDC-4300 UHD mit einem Canon HJ14x4.3B Weitwinkelobjektiv. Diese Kamera nutzt drei Bildwandler und keinen Bayer-Sensor. Da die Bilder auf ihre Farbigkeit verglichen werden sollen, wird sich bewusst für eine Kamera mit drei Bildwandlern entschieden (Kapitel 10.2).

12.2 Anpassung der Scheinwerfer

Der nächste Schritt ist, auch über eine Kamera zu prüfen, welche Auswirkung der „Red Tail“ auf das Lichtspektrum der Scheinwerfer hat. Dazu sollen Probanden verschiedener Hauttöne mit und ohne „Red Tail“ beleuchtet werden und dabei mit einer Kamera abgefilmt werden. Die so entstandenen Bilder werden dann in einer Umfrage miteinander verglichen.

Da eine Kamera das Spektrum eines Scheinwerfer deutlich anders bewertet als der JETI specbos 1211 (Kapitel 10.2), gibt es drei Möglichkeiten fortzufahren:

1. Weißabgleich durch die Scheinwerfer: Man gleicht die Kamera auf das Referenzweiß des Arris ab und stellt alle Farben der Scheinwerfer so ein, dass Scheinwerferlicht in der Kamera weiß erscheinen.
2. Weißabgleich durch die Kamera: Man gleicht für jedes Bild die Kamera neu auf den Scheinwerfer an.
3. kein Weißabgleich: Man gleicht die Kamera auf das Referenzweiß des Arris ab und verwendet danach die Farbwerte der Scheinwerfer, so wie sie mit dem JETI specbos 1211 eingestellt worden sind.

Variante 1 macht die Messwerten des JETI specbos 1211 unbrauchbar, da das auf die Kamera angepassten Lichtspektrum der Scheinwerfer dann nicht mehr dieselbe Farbtemperatur, denselben Abstand zu Plank'schen Kurve oder einem ähnlichen Farbort hat. Variante 2 erhält diese Werte, aber es kann nicht mehr wissenschaftlich beschrieben werden, welche Veränderung die Kamera durch den Weißabgleich am Lichtspektrum vornimmt. So kann nicht mehr unterschieden werden, ob die Kamera nun aus dem Licht das natürlichere Weiß gemacht hat, oder dies tatsächlich eine Auswirkung des „Red Tail“ ist. Variante 3 ist abzulehnen, weil die vermeintlich gleichen Lichtverhältnisse durch den JETI specbos 1211 gemessen durch die Kamera nicht als ähnliches Weiß gesehen werden. Die Lichtspektren der Scheinwerfer sind sehr unterschiedlich und werden daher auch von der Kamera so wahrgenommen.

Der Vollständigkeit halber werden alle 3 Varianten aufgezeichnet (siehe Anhang). Für die Umfrage hat man sich für die erste Variante entschieden, da ein typischer Weißabgleich im TV-Bereich genauso abläuft. Zuerst wird ein Scheinwerfer als Referenzlicht bestimmt und alle anderen Scheinwerfer werden mit der Kamera auf dieses Weiß korrigiert.

Zu Demonstrationszwecken wird mit dem Mac Encore Wash CLD und dem K-Eye K20 eine Farbtafel beleuchtet und mit der Videokamera aufgezeichnet. Über ein Vektorskop ist deutlich sichtbar, was die verschiedenen Varianten für Auswirkungen auf die Farben in der Kamera haben.

12.3 Erstellung der Bilder

Bei der Erstellung der Bilder werden die Probanden auf der selben Augenhöhe nebeneinander gestellt. In der Mitte steht eine Graustufenkarte für den Weißabgleich. Nachdem die Scheinwerfer und die Kamera angepasst sind, wie in Kapitel ?? beschrieben, werden die Probanden für 10 Sekunden gefilmt (Abbildung 12.2). Dabei wird am Anfang der Aufzeichnung ein Tablet mit den aktuellen Einstellungen der Scheinwerfer und Kamera gezeigt, damit später die Daten eindeutig zugeordnet werden können.

Nach den Aufzeichnungen mit den Probanden wird nochmal die Graustufenkarte für jede Einstellung einzeln aufgezeichnet, damit man auf dem Waveformmonitor das Weiß der Scheinwerfer messen kann. Durch diesen Ablauf sind Messungenauigkeiten bei der Aufzeichnung des Waveformmonitors möglich.

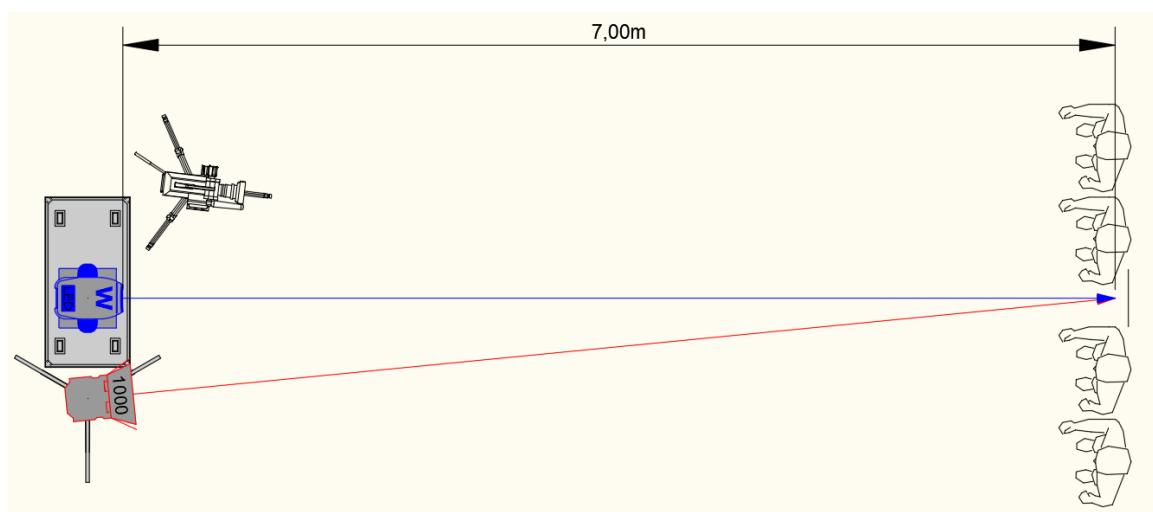


Abbildung 12.2: Skizzierung des Messaufbaus. Die Stufenlinse mit Filterfolie (rot) wird zusammen mit den Scheinwerfern (blau) auf die Grautreppe (hinter den Personen eingezeichnet). Darauf wird die Kamera dann weiß abgeglichen

13 Umfrage

In diesem Kapitel wird die Durchführung der Umfrage und deren Messergebnisse erklärt.

13.1 Umfrage nach Rec. ITU-R BT.500-11

In der „Recommendation ITU-R BT.500-11: Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures“ werden verschiedene Vorgehensweisen beschrieben, wie man die Qualität von Fernsehbildern durch Umfragen einschätzen kann. Je nachdem welches Bildmaterial man zur Verfügung hat und welche Aussage man untersuchen möchte, empfiehlt die ITU-R eine andere Methode. Da der Arri D5 zwar die Referenzleuchte für den Weißabgleich ist, aber die Scheinwerfer nicht mit diesem verglichen werden sollen, wird entschieden, nach der „Ratio-scaling method“ vorzugehen¹, eine Methode ohne Referenz. Diese findet man wiederum in dem „Report ITU-R BT.1082“ von 1990 und funktioniert wie folgt:

Den Probanden werden in zufälliger Reihenfolge Bilder gezeigt. Jedes Bild soll nach dessen Qualität beurteilt werden. Dabei wird den Probanden aber keine Skala zur Bewertung vorgegeben. Der Proband entscheidet selbst, wie er seine Skala wählt. Dazu vergibt er dem ersten Bild einen ersten Eindruck in einer Zahl ausgedrückt. Je nachdem ob ihm das darauffolgende Bild besser oder schlechter gefällt, wählt er die Zahl für das zweite Bild größer, kleiner (oder gleich) der ersten Zahl. Bei der Skalierung sind dem Probanden keine Grenzen gesetzt. Wenn er ein Bild dreimal so gut wie das erste findet, kann er dem Bild den dreifachen Wert des ersten Bildes geben. Falls Bild Nummer drei zwischen der Qualität von Bild eins und zwei liegt, darf der Proband auch mit Brüchen oder Nachkommastellen einen Wert zwischen der Zahl eins und zwei finden. Der Vorteil dieser Methode ist, dass die Probanden nicht an eine vorgegebene Skala gebunden sind und mit dieser nur bestimmen, wie gut Bilder sind, sondern mit dieser freien Skala auch festlegen können, um wie viel ein Bild besser oder schlechter ist².

¹ (ITU-R 2002: 10)

² (ITU-R 1990: 385)

13 Umfrage

Um die Bewertung der Bilder verschiedener Probanden nun miteinander vergleichen zu können, müssen die vergebenen Zahlen x auf die beste Bewertung R_1 des Probanden normiert werden³ (Gleichung 13.1).

$$X_{norm} = x \cdot \frac{100}{R_1} \quad (13.1)$$

Da die Probanden nur Tendenzen mit ihren Zahlen aufzeigen, sind die einzelnen Werte X_{norm} der Bilder in der Auswertung der Umfrage nicht eins zu eins vergleichbar, sondern nur mit ihrer Tendenz zu den anderen Bildern zu betrachten.

13.2 Aufbau und Durchführung der Umfrage

Die Umfrage wird in einem abgedunkelt Raum durchgeführt, damit keine Lichtirration für die Probanden durch fremdes Licht entstehen können. Der farbechte „Klasse 1“ Monitor wird mit dem Jeti Specbos 1211 auf $100 \frac{cd}{m^2}$ Leuchtdichte eingemessen und auf den Farbort der Normlichtart D65 angeglichen. Das Umgebungslicht wird mit einem Arri L7-C simuliert und auf eine ähnliche Farbtemperatur eingestellt, damit sich die Probanden auf den kalten Bildschirm adaptieren.

Dem Proband wird das Verfahren aus Kapitel 13.1 erklärt. Dann werden ihm alle Bilder zwei mal in einer zufälligen Reihenfolge gezeigt, wie von dem „Report ITU-R BT.1082“ empfohlen⁴. Der Teilnehmer soll das einzelne Bild auf seine Natürlichkeit untersuchen und mit einer Zahl bewerten. Für jedes der 38 Bilder hat der Proband 10 Sekunden Zeit. Er kann den Ablauf jederzeit stoppen, um sich seine Zahl zu notieren, darf aber die Bilder nicht vor oder zurückschalten, da sonst der Proband irritiert werden könnte. Die ITU hält 15 Teilnehmer an der Umfrage für ausreichend⁵. Das liegt daran, dass es nicht darum geht, ein Ergebnis bezüglich einer bestimmten Bevölkerungsgruppe zu generieren. Ziel der Umfrage ist es lediglich festzustellen, welche Auswirkung der „Red Tail“ auf die optische Natürlichkeit des Bildes hat, ohne speziellen Bezug zu den Probanden. So reichen deutlich weniger Teilnehmer aus als bei teilnehmerspezifischen Umfragen. Um die Statistik zu festigen haben 20 Probanden an der Umfrage teilgenommen. Eine Durchführung der Umfrage dauerte ca. 15 Minuten.

³ (ITU-R 1990: 387)

⁴ (ITU-R 1990: 368)

⁵ (ITU-R 1990: 368)

13.3 Umfrageergebnisse

Die Probanden waren im Durchschnitt 25 Jahre alt. Es haben dreizehn Männer und sieben Frauen an der Umfrage teilgenommen. Die meisten der Probanden haben eine mittlere bis gute Lichtvorkenntnis. Aus den vergebenen Werten für die Bilder lassen sich die Tendenzen erkennen, dass die Probanden die gezeigten Hauttöne, mit einem „Red Tail“ beleuchtet, als natürlicher einschätzen. Dieses Verhalten zeigen die Kurven des Source Four LED Series 2 Lustr, des MAC Encore Wash CLD und des K-Eye K20 (Abbildung)

Dies liegt zum einen daran, dass der zusätzliche tiefrote Anteil das Lichtspektrum auffüllt, wo es für die Hauttöne wichtig ist (Kapitel 4.5). Zum anderen hilft die Anpassung an den „Red Tail“ das Lichtspektrum etwas aufzufüllen und das Peak-Tal-Verhältnis des Scheinwerfers anzupassen. Daher werden die Bilder mit einem „Red Tail“ nicht rotstichiger, sondern sie wirken durch die Anpassung eher so, wie man es in der Natur erwarten würde.

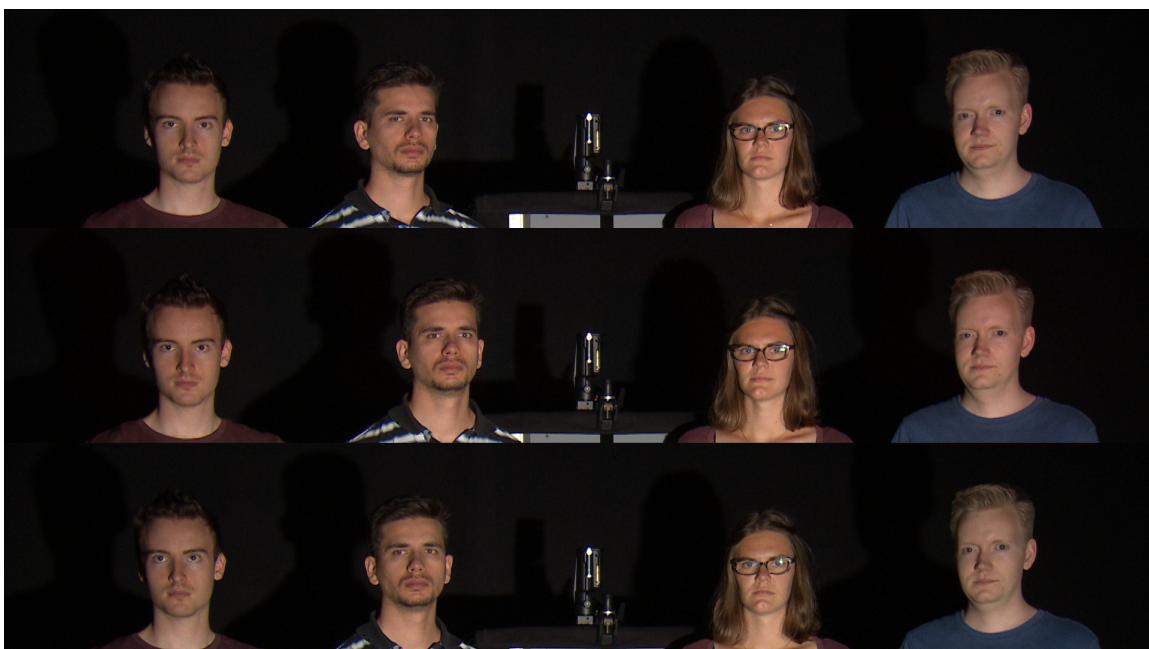


Abbildung 13.1: Alle drei Bilder wurden mit dem Source Four LED Series 2 Lustr beleuchtet. Das untere Bild ist ohne „Red Tail“. Dem mittleren wurde ein Rosco 027 „Medium Red“ dazugemischt. Das obere Bild ist mit einem zusätzlichen Rosco 787 „Marius Red“ erstellt worden. Die ausgedruckten Bilder sind nicht farbecht.

13 Umfrage

Das extreme Spektrum des Impression X4L sticht aus der Bilderreihe hervor und wirkt auf den Bildern rotstichig (Abbildung 13.2).



Abbildung 13.2: Aufgezeichnetes Bild der Probanden beleuchtet mit dem Impression X4L ohne zusätzlichen tiefroten Spektralanteil.

Bei der Umfrage ist dieses Lichtspektrum (mit oder ohne „Red Tail“) mit Abstand am besten bewertet worden (Abbildung 13.3). Das lässt sich darauf zurückführen, dass die Probanden ans Glühlicht gewöhnt sind. Blau- oder grünstichige Bilder von Menschen wirken krank und unnatürlich. Dagegen wirken rotstichige Bilder nicht falsch, da Menschen unter Glühlicht auch rötlicher aussehen. Außerdem wird die menschliche Haut röter, wenn man in der Sonne liegt. Auch beim Fernsehen sind wir gewohnt, dass Hauttöne rötlicher wirken, da auf dem Bildschirm die Rotanteile verstärkt sind. Man ist es also durchaus gewohnt, dass Hauttöne rötlich erscheinen. Dadurch werden die Bilder des Impression X4L auch als natürlich empfunden.

13 Umfrage

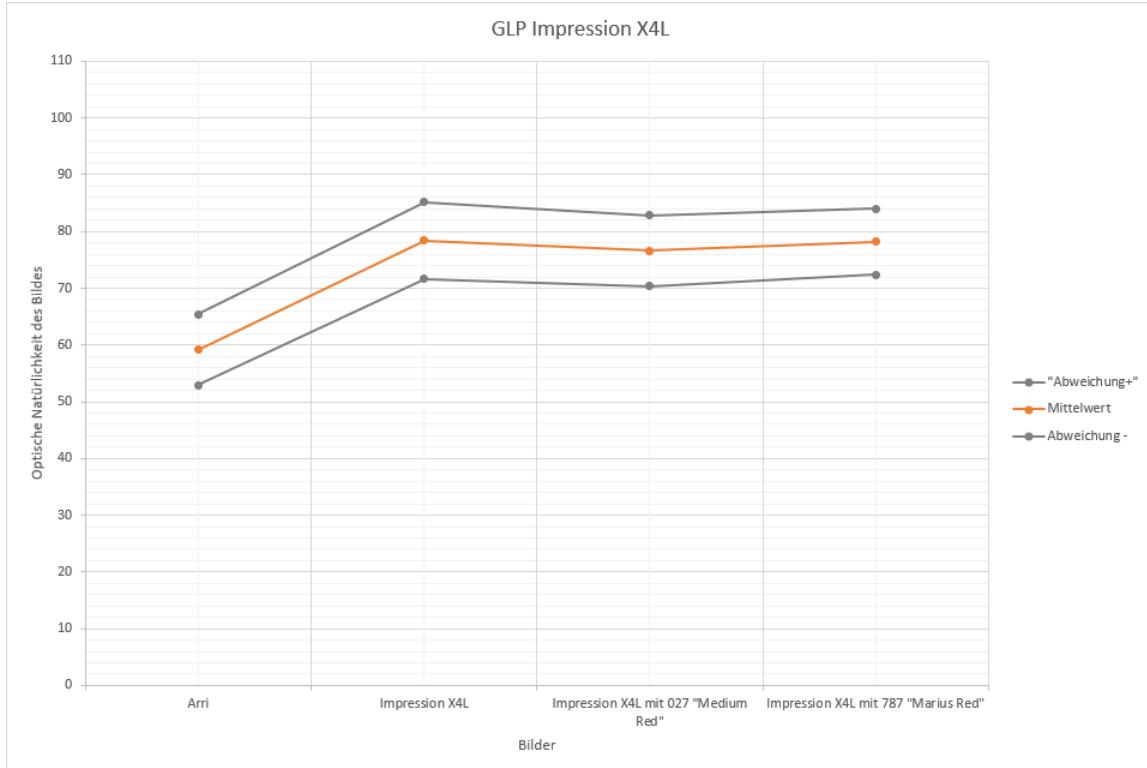


Abbildung 13.3: Aufgezeichnetes Bild der Probanden beleuchtet mit dem Impression X4L ohne zusätzlichen tiefroten Spektralanteil.

Beim Robin DL7F Wash ist beim dritten Bild mit dem Rosco 787 „Marius Red“ ein falsches Bild in der Umfrage gelandet. Es ist deutlich sichtbar, dass die Kamera die Probanden durch die Kniefunktion zu hell darstellt (Kapitel 10.1.4). Dadurch sehen die Hauttöne unnatürlich (fleckig) aus. Daher ist dieser Wert für die Umfrage ungültig. Dennoch haben die Probanden dieses Bild auch durchgehend schlecht bewertet und somit zeigt sich, dass das Verfahren des „Report ITU-R BT.1082“ funktioniert (Abbildung 13.4).



Abbildung 13.4: Aufgezeichnetes Bild der Probanden beleuchtet mit dem DL7F Wash. Dieses Bild wurde durch falsche Kameraeinstellungen zu hell.

13 Umfrage

Wenn man dem Ghibli ein Rosco 027 „Medium Red“ dazumischt und die Werte wieder auf den Ghilbi anpasst, zeigt die Hauptmessung eine Verbesserung der Werte. Dagegen wirken die abgebildeten Probanden bei den Umfrageteilnehmern matt und krank und es ist keine Verbesserung sichtbar (Abbildung 13.5). Dies liegt am Lichtspektrum des Ghibli, der mit seiner reinweißen LED-Engine Probleme hat, das Lichtspektrum auszufüllen. Dem Ghibli wäre deutlich besser geholfen, wenn man das Loch im Spektrum von 470 nm bis 510 nm Wellenlänge und den Rotbereich des Spektrums aufbessern würde. Nur einen tiefroten Anteil zu ergänzen reicht nicht aus, und das macht sich auch optisch bemerkbar.

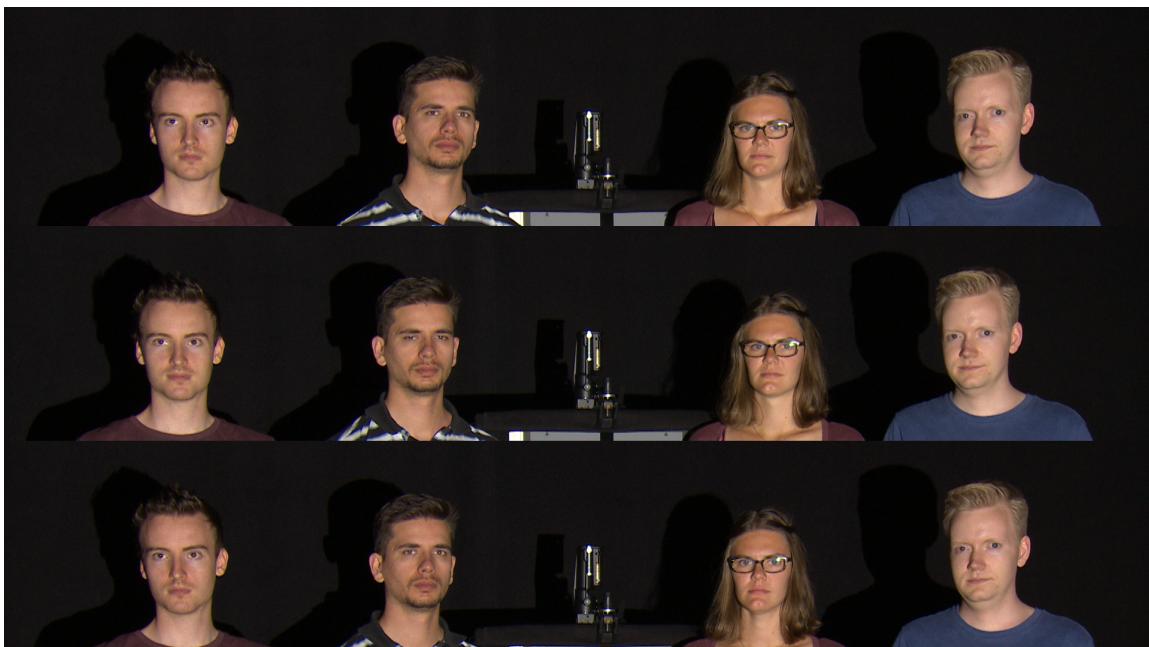


Abbildung 13.5: Alle drei Bilder wurden mit dem Ghibli beleuchtet. Das untere Bild ist ohne „Red Tail“. Dem mittleren wurde ein Rosco 027 „Medium Red“ dazugemischt. Das obere Bild ist mit einem zusätzlichen Rosco 787 „Marius Red“ erstellt worden. Die ausgedruckten Bilder sind nicht farbecht.

13 Umfrage

Vielen Probanden ist es schwer gefallen die Bilder einzuschätzen, da sich der rechte nordische Hauttyp deutlich von den anderen Hauttypen unterscheidet. Daher ist es zu einem Konflikt in der Entscheidung gekommen, wie das Bild zu beurteilen sei, wenn der helle Hautton auf dem Bild natürlich wirkte, nicht aber die anderen Hauttypen. Anderen Probanden wiederum hat dieser Unterschied geholfen, die Bilder besser einschätzen zu können.

Da die vorgeschlagene Länge einer Umfrage in dem „Report ITU-R BT.1082“ eine halbe Stunde nicht überschreiten sollte, hat man sich für den Vergleich aller Hauttypen gleichzeitig entschieden (Eine deutlich längere Umfrage mit Einzelbildern sollte den Probanden nicht zugemutet werden.)

14 Fazit

Sowohl im messtechnischen als auch im optischen Vergleich konnte mit dem „Red Tail“ das Lichtspektrum tendenziell verbessert werden. Dieses Verbesserung zeigt sich vor allen Dingen beim TLCI (plus bis zu 16 Punkten). Ein zusätzlicher tiefroter Anteil verbessert das Lichtspektrum des Scheinwerfer, wie in Kapitel 11.4.3 dargestellt, auf der einen Seite durch den zusätzlichen Rotanteil und auf der anderen Seite durch die Anpassung an den „Red Tail“. Spektren, die sehr durch Peaks geprägt und / oder schmalbandig sind, können durch einen zusätzlichen tiefroten Spektralanteil nicht verbessert werden, da die Anpassung das Spektrum der Scheinwerfer noch extremer werden lässt (s. Daten von Impression X4L und DL7F Wash). Auch optisch stellt der „Red Tail“ dort keine Verbesserung dar. Der Ghibli kann zwar messtechnisch verbessert werden, dies konnte aber nicht in der Umfrage festgestellt werden, weil sein Spektrum sich nicht besonders gut dafür eignet, Personen zu beleuchten. Ein TLCI von 50 zeigt dem Coloristen in der Nachbearbeitung, dass die „Aufbereitung sehr zeitaufwendig“ sein wird (Kapitel 7.3). Daher konnte der Ghibli optisch nicht überzeugen.

Der zusätzliche tiefrote Spektralanteil bei einem LED-Scheinwerfer muss also immer im Zusammenhang mit dem Spektrum des Scheinwerfers, der filmenden Kamera und den zu beleuchtenden Hauttönen gesehen werden. Die Tendenzen dieser Arbeit zeigen unter der Berücksichtigung der genannten Parameter, dass der „Red Tail“ das Lichtspektrum der Scheinwerfer messtechnisch verbessert und optisch Hauttöne natürlicher aussehen lässt.

15 Ausblick

Die Tendenzen der Messungen könnten durch weitere Untersuchungen vielleicht noch besser herausgearbeitet werden. Die Bilder sind beispielsweise alle mit einer Sony HDC-2500 mit einem Canon HJ14x4.3B Weitwinkelobjektiv aufgezeichnet worden. Die Wirkung der Bilder sollte daher mit anderen Objektiven und Kameras überprüft werden. Können diese Tendenzen unabhängig vom Kameramodell und Objektiv reproduziert werden?

Auch bei anderen Hauttypen und Scheinwerfern gilt es den „Red Tail“ zu untersuchen. Die erstellten Bilder zeigen, dass Hauttöne unterschiedlich auf das zusätzliche Rot reagieren. Kann man den tiefroten Spektralanteil auf bestimmte Hauttöne anpassen?

Ein ganz anderes Thema ist die Frage nach dem Weißabgleich. Die Umfrage wurde aus den Bildern gestaltet, auf denen die Scheinwerfer auf das Kameraweiß angeglichen wurden. Würde die Umfrage ähnliche Ergebnisse liefern, wenn bei den Bildern die Kamera an die Scheinwerfer angepasst wurde? Ein ausgiebiger Vergleich dieser beiden Methoden kann auch eine Empfehlung für zukünftige Messverfahren im Zusammenhang mit Scheinwerfern und Kamera geben.

Im Zusammenhang mit der Farbtemperatur steht offen, ob der „Red Tail“ für jede Farbtemperatur eine tendenzielle Verbesserung der lichttechnischen Parameter hervorruft. Ist im warmweißen Farbtemperaturbereich überhaupt ein tiefroter Spektralanteil nötig? Welche Farbtemperatur ist für den „Red Tail“ ideal?

Neben den hier aufgezeigten Messergebnissen birgt der „Red Tail“ noch viele spannende Fragen, die man erforschen könnte.

Abbildungsverzeichnis

3.1	Der Lichtstrom gibt an, wie viel sichtbares Licht eine Lichtquelle abstrahlt ¹	9
3.2	Die Beleuchtungsstärke gibt an, wie viel Lichtstrom auf eine bestimmte Fläche trifft ²	10
3.3	Die Lichtstärke gibt an, wie viel Lichtstrom auf eine bestimmte Richtung im Raum verteilt ist ³	12
3.4	Die Leuchtdichte hat einen Bezug auf die menschliche Helligkeitswahrnehmung ⁴	13
3.5	Darstellung verschiedener Reflexion- (oben) und Transmissionsarten (unten) ⁵	14
4.1	Die $V(\lambda)$ -Kurve zeigt, wie das Auge die verschiedenen Wellenlängen beim photopischen Sehen gewichtet. Die weiße Kurve ($V'(\lambda)$) beschreibt, wie sich das Farbsehen beim Nachtsehen verschiebt ⁶	16
4.2	Die Kurven zeigen die Empfindlichkeiten der S-Zapfen (blau), der M-Zapfen (grün) und der L-Zapfen (rot) und ihre Maxima. Auffällig ist, dass sich die Bereiche der M- und L-Zapfen größtenteils überlappen und die Zapfen für den (tief)roten Spektralbereich kaum empfindlich sind ⁷	17
4.3	Darstellung der „Zonentheorie“ von v. Kries ⁸	18
4.4	Die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau der additiven Farbmischung ergeben zusammen weiß (unbunt) ⁹	19
4.5	Die drei Grundfarben Cyan, Magenta und Gelb der subtraktiven Farbmischung ergeben zusammen schwarz (unbunt) ¹⁰	21
4.6	Spektrale Strahldichtefaktoren der 15 Hauttöne gemessen von Vinh und Khanh. ¹¹	22
5.1	Beim RGB-Würfel werden alle Primärvalenzen R, G, B als gleich lange Vektoren angenommen ¹²	25
5.2	Schematische Darstellung des Farbzuordnungsexperiments von Wright und Guild ¹³	26
5.3	XYZ-Spektralwertfunktionen ¹⁴	27
5.4	Darstellung der CIE-XYZ Farbtafel eines 2° Normalbeobachter ¹⁵	28
5.5	Detailansicht des XYZ-Farbraumes mit den „Geraden ähnlichster Farbtemperatur“ ¹⁶	29
5.6	Abbildung der MacAdam Ellipsen im XYZ-Farbraum ¹⁷	30
5.7	Abbildung der MacAdam Ellipsen auf der UCS-Farbtafel ¹⁸	31
5.8	Darstellung des $\Delta u'v'$ auf der UCS-Farbtafel	32

Abbildungsverzeichnis

6.1 Spektrale Kurven verschiedener Farbtemperaturen des schwarzen Strahlers. (Der bunteingefärbte Bereich stellt das sichtbare Lichtspektrum dar.) ¹⁹	33
6.2 Spektrale Kurven verschiedener Farbtemperaturen des schwarzen Strahlers. (Der bunteingefärbte Bereich stellt das sichtbare Lichtspektrum dar.) ²⁰	34
 7.1 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} Blattgrün ²¹	37
7.2 Messung einer warmweißen LED-Leuchte (Ausschnitt aus dem Demo- file des Programmes „LiVal“ der Firma JETI): Links ist das Lichtspektrum der Leuchte dargestellt, rechts die gemessenen CRI-Werte ²²	38
7.3 Alle Referenzfarben des CQS mit voller Sättigung ²³	38
7.4 Ausschnitt aus dem Programm „LiVal“ der Firma JETI: Demo Spektrum einer warmweißen LED (2942K) mit $Q_f = 81$	39
7.5 Ausschnitt aus dem Programm „LiVal“ von der Firma JETI: Die fünfzehn Referenzfarben(blau) im CIELAB-Farbraum im Vergleich zu den gemessenen Werten (rot)	40
7.6 Blockschaltbild einer TLCI-Wertbestimmung ²⁴	41
7.7 TLCI-Ergebnisprotokoll eines Arri L7-C LED Fresnelscheinwerfers ²⁵	44
7.8 Alle 99 Referenzfarben des TM-30 ²⁶	46
7.9 Koordinatensystem aus R_f und R_g mit eingezeichnetem TM-30 (rot): Die hellgraue Zone steht für TM-30-Werte die nicht auf der Plank'schen Kurve liegen, wohingegen die dunkelgraue Zone für alle Werte steht, die nicht mehr als „weiß“ angesehen werden ²⁷	48
7.10 Wie sich die Farben der Testleuchte verhält, ist in der Vektorgraphik des R_g -Wertes anschaulich dargestellt. Der schwarze Kreis stellt die Referenzleuchte dar, der rote die getestete ²⁸	49
7.11 Ausschnitt aus dem Programm „LiVal“ von der Firma JETI: Messprotokoll des TM-30	50
 8.1 Spektrum einer Glühlampe ²⁹	51
8.2 Darstellung des Halogen Kreisprozesses ³⁰	52
8.3 Aufbau einer Leuchtstoffröhre ³¹	53
8.4 Spektrum einer Tageslichtleuchstofflampe ³²	54
8.5 Aufbau einer Hochdruckentladungslampe ³³	55
8.6 Spektrum einer Hochdruckentladungslampe ³⁴	56
8.7 Aufbau einer LED ³⁵	57
8.8 Aufbau einer weißen LED ³⁶	58

Abbildungsverzeichnis

8.9	Spektrum einer kaltweißen LED ³⁷	58
9.1	Hauptmessgerät	59
9.2	Sekundärmessgerät	59
9.3	Abbildung der Interferenz am optischen Gitter ³⁸	60
10.1	Darstellung verschiedener Blendzahlen ³⁹	63
10.2	Darstellung der Schärfentiefe im Bezug zur Blende ⁴⁰	64
10.3	Darstellung der γ -Vorentzerrungskurve und inversen Rückkorreukurve ⁴¹	65
10.4	Linear Matrix der Kamera ⁴²	66
10.5	Waveformmonitor Screenshot vom Weißabgleich des Arri D5 mit einer Grautreppe	67
10.6	Bayer Pattern auf einem Kamerachip ⁴³	68
10.7	Schematischer Aufbau eines Farbbildwandlers ⁴⁴	69
10.8	Transmission eines Strahlteilers ⁴⁵	69
10.9	Funktionsweise eines Oszilloskops ⁴⁶	72
10.10	Frontansicht eines Waveformmonitors der Firma Tektronix ⁴⁷	73
10.11	„TE106“ Color Bar Test Chart der Firma Image Engineering ⁴⁸	74
10.12	Darstellung der Vektorskopeinteilung mit der Q- und I-Achse ⁴⁹	75
11.1	Vergleich von Lichtspektren mit den drei roten Filterfolien ⁵⁰	77
11.2	Spektrum des Referenzscheinwerfers ARRI D5)	78
11.3	Skizzierung des Messaufbaus. Die Stufenlinse mit Filterfolie (rot) wird zusammen mit den Scheinwerfern (blau) auf den JETI specbos 1211 ausgerichtet.	79
11.4	Aufbau des „Red Tail“ mit dem MAC Encore Wash CLD	80
11.5	Alle 10 Spektren der Vormessung des K-Eye K20 mit einem zusätzlichen Rosco 027 „Medium Red“ (das farbige Spektrum wurde ohne zusätzlichen tiefroten Spektralanteil gemessen.)	81
11.6	Das Lichtspektrum des K-Eye K20 wird mit 50% „Red Tail“ (farbig) schlechter. Die Roten Kreise weisen auf die entstehenden Peaks (Blau / Rot / Limette) und Täler (Amber / Cyan) hin.	82
11.7	Alle 10 Spektren der Vormessung des K-Eye K20 mit einem zusätzlichen Rosco 789 „Blood Red“ (das farbige Spektrum wurde ohne zusätzlichen tiefroten Spektralanteil gemessen.)	83
11.8	Alle 10 Spektren der Vormessung des MAC Encore Wash CLD mit einem zusätzlichen Rosco 027 „Medium Red“ (das farbige Spektrum wurde ohne zusätzlichen tiefroten Spektralanteil gemessen)	84
11.9	Vergleich des K-Eye K20 Spektrums bei 5395 K (bunt) mit dem Spektrum eines zusätzlichen Rosco 027 „Medium Red“. Entstandene Unterschiede sind besonders hervorgehoben.	86

Abbildungsverzeichnis

11.10 Vergleich des Impression X4L Spektrums bei 5395 K (bunt) mit dem Spektrum eines zusätzlichen Rosco 027 „Medium Red“. Täler und Peaks sind besonders hervorgehoben.	87
11.11 Vergleich des DL7F Spektrums bei 5395 K (bunt) mit dem Spektrum eines zusätzlichen Rosco 027 „Medium Red“. Täler und Peaks sind besonders hervorgehoben.	88
12.1 Bild der 4 Probanden mit dem Arri D5 Referenzlicht beleuchtet	90
12.2 Skizzierung des Messaufbaus. Die Stufenlinse mit Filterfolie (rot) wird zusammen mit den Scheinwerfern (blau) auf die Grautreppe ntafel ausgerichtet (hinter den Personen eingezeichnet). Darauf wird die Kamera dann weiß abgeglichen	92
13.1 Alle drei Bilder wurden mit dem Source Four LED Series 2 Lustr beleuchtet. Das untere Bild ist ohne „Red Tail“. Dem mittleren wurde ein Rosco 027 „Medium Red“ dazugemischt. Das obere Bild ist mit einem zusätzlichen Rosco 787 „Marius Red“ erstellt worden. Die ausgedruckten Bilder sind nicht farbecht.	95
13.2 Aufgezeichnetes Bild der Probanden beleuchtet mit dem Impression X4L ohne zusätzlichen tiefroten Spektralanteil.	96
13.3 Aufgezeichnetes Bild der Probanden beleuchtet mit dem Impression X4L ohne zusätzlichen tiefroten Spektralanteil.	97
13.4 Aufgezeichnetes Bild der Probanden beleuchtet mit dem DL7F Wash. Dieses Bild wurde durch falsche Kameraeinstellungen zu hell.	97
13.5 Alle drei Bilder wurden mit dem Ghibli beleuchtet. Das untere Bild ist ohne „Red Tail“. Dem mittleren wurde ein Rosco 027 „Medium Red“ dazugemischt. Das obere Bild ist mit einem zusätzlichen Rosco 787 „Marius Red“ erstellt worden. Die ausgedruckten Bilder sind nicht farbecht.	98

Tabellenverzeichnis

3.1	Verschiedene Beispiele für Φ^{51}	9
3.2	Verschiedene Beispiele für E^{52}	11
3.3	Verschiedene Beispiele für I^{53}	12
3.4	Verschiedene Beispiele für L^{54}	13
6.1	Verschiedene Beispiele für die Farbtemperatur ⁵⁵	34
7.1	R_a eingeteilt in verschiedene Stufen ⁵⁶	36
7.2	Q_a eingeteilt in verschiedene Stufen ⁵⁷	43
9.1	Vergleich zweier Spektrometer ⁵⁸	61
11.1	Farbwerte in Prozentangaben (Der tiefrote Spektralanteil wird mit dem Dimmerwert des Stufenlinsenscheinwerfers angegeben.)	85

16 Anhang

16.1 Materialliste

- Arri True Blue D5 mit Vorschaltgerät
- Arri Sun 5 mit Vorschaltgerät
- Clay Paky K-Eye K20
- ETC Source Four LED Series 2 Lustr
- GLP Impression X4L
- Leonardo De Sisti 1kW Stufenlinsenscheinwerfer
- Martin MAC Encore Wash CLD
- Robe Robin DL7F Wash
- MA Lighting GrandMA 2 light
- JETI specbos 1211
- UPRtek MK350S
- Sony RCP-1500
- Sony HDC-2500 mit
- Canon HJ14x4.3B Weitwinkelobjektiv
- Sony HDCU 2500 CCU
- Sony PVM-2541
- Tektronix WFM5250
- Tektronik WFM700
- Blackmagic UltraStudio Mini Monitor
- Grautreppentesttafel
- Farbtesttafel

- Rosco 027 „Medium Red“
- Rosco 787 „Marius Red“
- Rosco 789 „Blood Red“

Literaturverzeichnis

Roskothen, Peter: „Lichtausbeute von Lampen“ <https://www.trilux.com/de/beleuchtungspraxis/leuchtmittel/leuchtmittel-eigenschaften/lichtausbeute/>, 2018, letzter Zugriff 05.08.2018

Roskothen, Peter: „Brennweite“ <https://www.fotowissen.eu/brennweite/>, 12.11.2017, letzter Zugriff 10.08.2018

jeti: „specbos 1211“ <http://www.jeti.com/cms/index.php/instruments-55/radiometer/specbos/specbos-1211>, 2018, letzter Zugriff 15.08.2018

Wikipedia: „Optisches Gitter“ https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Optisches_Gitter&oldid=176654289, 18.04.2018, letzter Zugriff 15.08.2018

ITWissen.info: „BAyer-Filter“ <https://www.itwissen.info/Bayer-Filter-bayer-filter.html>, 09.05.2017, letzter Zugriff 10.08.2018

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

Literaturverzeichnis

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

Mungenast, Philipp: „Der Graßmannsche Farbraum“, https://www.uni-koblenz.de/~cg/ss09/Proseminar_Farbmanagement/Der%20Grassmannsche%20Farbraum.pdf, 08.06.2009, letzter Zugriff 20.07.2018

Luo, Ming Ronnier & Li, Changjun: „CIECAM02 and Its Recent Developments“, *Advanced Color Image Processing and Analysis*, Springer Science & Business Media, 2013

Graßmann, Hermann Günther: „Zur Theorie der Farbenmischung“, 2018 *Annalen der Physik und Chemie* vol. 165, 1853

United Power Research Technology Corporation: „Advanced MK350S Specification“, 2018

JETI Technische Instrumente GmbH: „Basics of Spectral Measurement“, 05.2005

Vinh, Trinh Quang & Kahnh, Tran Quoc: „Gutes Licht macht schön“, *Licht* vol. 3, 03.2018

Ohno, Yoshi: „Spectral design considerations for white LED color rendering“, *Optical Engineering* vol. 44 (11), November 2005

Sharma, Gaurav & Wu, Wencheng & Dalal, Edul N.: „The CIEDE2000 Color-Difference Formula: Implementation Notes, Supplementary Test Data, and Mathematical Observations“, *COLOR research and application* vol. 30, Number 1, Februar 2005

Yang, Yang & Ming, Jun & Yu, Nenghai: „Color Image Quality Assessment Based on CIEDE2000“, *Advances in Multimedia* vol. 2012, Article ID 273723, 2012

Houser, Kevin & Mossman, Michele & Smet, Kevin & Whitehead, Lorne: „Tutorial: Color Rendering and Its Applications in Lighting“, *LEUKOS* vol. 12:7-26, 2016

Fan, Jiajie & Yung, Winco & Pecht, Michael: „Prognostics of Chromaticity State for Phosphor-Converted White Light Emitting Diodes Using an Unscented Kalman Filter Approach“, *Device and Materials Reliability* vol. 14, 01.03.2014

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

- Ris, Hans Rudolf: *Beleuchtungstechnik für Praktiker*, 5. Aufl., VDE Verlag
- Heinen, Gerd: *AV-Medientechnik*, 1. Aufl., Europa-Lehrmittel 2012
- Roberts, Alan: *TELEVISION LIGHTING CONSISTENCY INDEX (TLCI-2012)*, Version 2.015e, 18.04.2015
- Schmidt, Ulrich: *Professionelle Videotechnik - Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studiotechnik in SD, HD, DI, 3D*, 6. Aufl., Springer Vieweg 2013
- Mueller, Jens: *Handbuch der Lichttechnik - Know-How für Film, Fernsehen, Theater, Veranstaltungen und Events*, 5. Aufl., PPVMedien 2014
- 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 Nachhalligkeit“, 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
- ITU Radiocommunication Assembly: *RECOMMENDATION ITU-R BT.500-11: Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures*, 1974-1978-1982-1986-1990-1992-1994-1995-1998-1998-2000-2002
- ITU Radiocommunication Assembly: *Report ITU-R BT.1082: Studies Toward The Unification Of Picture Assessment Methodology*, 1986-1990

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