

**„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

<b>1 Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2 Grundlagen und Kenngrößen der Lichttechnik</b>	<b>6</b>
2.1 Stoffkennzahlen . . . . .	6
2.2 Lichtstrom $\Phi$ . . . . .	7
2.3 Beleuchtungsstärke E . . . . .	8
2.4 Lichtstärke I . . . . .	9
2.5 Leuchtdichte L . . . . .	11
<b>3 Leuchtmittel</b>	<b>13</b>
3.1 Glühlampe . . . . .	13
3.2 Halogenglühlampe . . . . .	13
3.3 Entladungslampen . . . . .	14
3.4 LEDs . . . . .	15
3.5 Farbtemperatur . . . . .	16
<b>4 Farben</b>	<b>17</b>
4.1 Farben mit dem Auge sehen . . . . .	17
4.2 Theorien der Farbwahrnehmung . . . . .	18
4.3 Farbmischung . . . . .	20
4.4 Hauttöne . . . . .	23
<b>5 Farträume</b>	<b>25</b>
5.1 RGB Farbraum . . . . .	25
5.2 CIE-XYZ Farbraum . . . . .	28
5.3 CIE-unity chromity scale-Farbtafel (CIE-UCS) . . . . .	31
<b>6 Lichttechnische Parameter</b>	<b>34</b>
6.1 CIE: Color Rendering Index (CRI) . . . . .	34
6.2 NIST: Color Quality Scale (CQS) . . . . .	37
6.3 EBU: Television Lighting Consistency Index (TLCI) . . . . .	40
6.4 IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition (TM-30-15)	44
<b>7 Messgeräte für Farbmessung</b>	<b>49</b>
7.1 Spektrometer . . . . .	49

# Inhaltsverzeichnis

<b>8 Grundlagen Videotechnik</b>	<b>52</b>
8.1 Grundeinstellung einer Kamera . . . . .	52
8.2 Farbbildwandlertechnik einer Kamera . . . . .	52
8.3 Weißabgleich . . . . .	53
8.4 RGB-Signal . . . . .	53
8.5 Komponenten-Signal . . . . .	54
<b>9 Videotechnische Messgeräte</b>	<b>56</b>
9.1 Waveformmonitor . . . . .	56
9.2 Vektorskop . . . . .	56
<b>10 Vormessungen</b>	<b>58</b>
10.1 Aufbau und Messungen . . . . .	58
10.2 Fazit aus der Vormessung . . . . .	58
10.3 Referenzlicht . . . . .	59
<b>11 Hauptmessung</b>	<b>61</b>
11.1 Messaufbau und Messungen . . . . .	61
<b>12 Messergebnisse</b>	<b>63</b>
12.1 Analyse der Farbwiedergabewerte . . . . .	63
12.2 Fazit aus den Hauptmessungen . . . . .	64
<b>13 Umfrage</b>	<b>65</b>
13.1 Anpassung der Scheinwerfer . . . . .	65
13.2 Auswahl der Kamera und der Probanden . . . . .	66
13.3 Erstellung der Bilder . . . . .	66
13.4 Umfrage nach Rec. ITU-R BT.500-11 . . . . .	67
13.5 Aufbau und Durchführung der Umfrage . . . . .	67
<b>14 Umfrageergebnisse</b>	<b>69</b>
<b>15 Fazit</b>	<b>71</b>
<b>16 Ausblick</b>	<b>72</b>
16.1 Unterkapitel mit Mathematik, Bildern und Querverweisen . . . . .	72
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>73</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>75</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>76</b>

## **Abstract**

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

The thesis should be printed single-sided (simplex). The binding correction (loss at the left page edge due to binding) might be adjusted, according to the type of binding. This template incorporates a binding correction as BCOR=1mm (suitable for adhesive binding) in the L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X document header.

**This is the english version of the opening abstract** (don't forget to set L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X's language setting back to ngerman after the english text).

## **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 der mo2 design GmbH angenommen wird.

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

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

# **1 Einleitung**

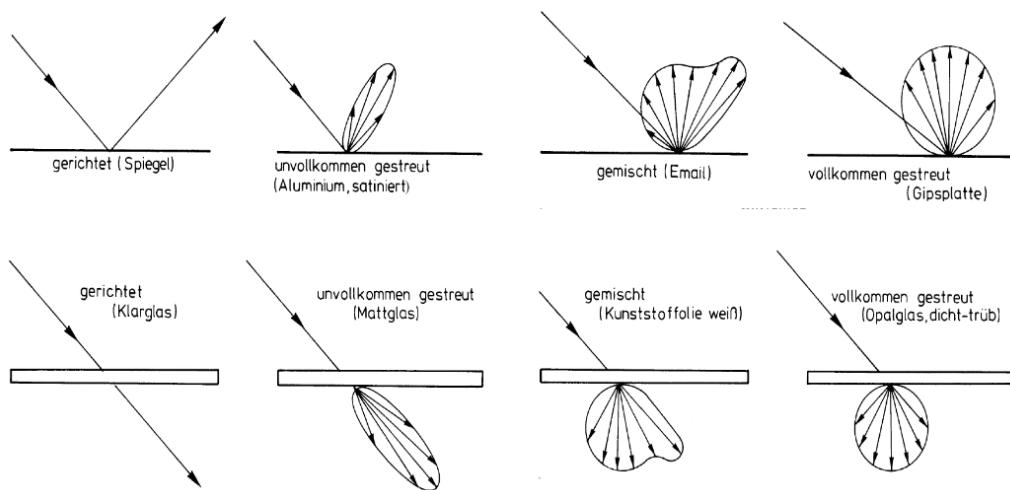
# 2 Grundlagen und Kenngrößen der Lichttechnik

## 2.1 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  $\alpha$ , der Reflexionsgrad  $\rho$  und der Transmissionsgrad  $\tau$  in Summe stets 1 und damit auch die Verhältnisse aus dem eintreffenden Lichtstrom  $\Phi_0$  (Kapitel 2.2) zu dem absorbierten  $\Phi_a$ , dem reflektierten  $\Phi_r$  respektive dem transmittierten  $\Phi_d$  (Gleichung 2.1)<sup>1</sup>.

$$\alpha + \rho + \tau = \frac{\Phi_a}{\Phi_0} + \frac{\Phi_r}{\Phi_0} + \frac{\Phi_d}{\Phi_0} = 1 \quad (2.1)$$

Die Reflexion und Transmission von Licht kann in verschiedenen Abstufungen vorkommen (Abbildung 2.1).



**Abbildung 2.1:** Darstellung verschiedener Reflexion- (oben) und Transmissionsarten (unten)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Hentschel 1993: 38)

<sup>2</sup>[https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQRXKy02dzW7jXXbs\\_PqxZDRF2vKnJT-8qKf5w5mRAVG6SDatTk](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQRXKy02dzW7jXXbs_PqxZDRF2vKnJT-8qKf5w5mRAVG6SDatTk)

## 2.2 Lichtstrom $\Phi$

Der Lichtstrom  $\Phi$  steht für die Lichtleistung einer Lichtquelle und wird in der Einheit Lumen (lm) angegeben (Abbildung 2.2).  $\Phi$  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 Bedeutung<sup>3</sup>. Man kann aber den Lichtstrom ins Verhältnis zur Strahlungsleistung setzen und so die Lichtausbeute  $K$  in  $\frac{lm}{W}$  berechnen. Mit dem  $K$  Wert kann man aufzeigen wie effizient ein Leuchtmittel seine Strahlungsleistung in Lichtleistung umsetzt. Der Maximalwert von  $K$  liegt bei  $K_{max} = 683 \frac{lm}{W}$ , dass nur durch eine monochromatisch grüne (555 nm) Lichtquelle erzeugt werden kann, weil dieses Licht am hellsten für das menschliche Auge ist<sup>4</sup> (Kapitel 4.1).



**Abbildung 2.2:** Der Lichtstrom gibt an, wie viel sichtbares Licht eine Lichtquelle abstrahlt.<sup>5</sup>

Folgende Zahlen sind für Lichtstromwerte typisch:

<sup>3</sup>(Ris 2015: 23)

<sup>4</sup>(Ris 2015: 24)

<sup>5</sup>[https://www.sbz-online.de/Cache/GENTNER/10024/GV-SVG-EXPORT-20140303-1028\\_NTc4MTAwWg.JPG](https://www.sbz-online.de/Cache/GENTNER/10024/GV-SVG-EXPORT-20140303-1028_NTc4MTAwWg.JPG)

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 2.1:** Verschiedene Beispiele für  $\Phi^6$

## 2.3 Beleuchtungsstärke E

Die Beleuchtungsstärke E gibt an, wie groß ein Lichtstrom  $\Phi$  im Verhältnis zu seiner Lichtauftreffsfläche A ist und wird in Lux (lx) angegeben<sup>7</sup> (Gleichung 2.2).

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (2.2)$$

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 Helligkeit<sup>8</sup>. Eine doppelte so große Beleuchtungsstärke entspricht keineswegs einer ebenso großen wahrgenommenen Helligkeitsänderung.

<sup>6</sup>(Ris 2015: 24)

<sup>7</sup>(Ris 2015: 28)

<sup>8</sup>(Ris 2015: 29)



**Abbildung 2.3:** Die Beleuchtungsstärke gibt an, wie viel Lichtstrom auf eine bestimmte Fläche trifft.<sup>9</sup>

Folgende Zahlen sind typisch für die Beleuchtungsstärke:

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 2.2:** Verschiedene Beispiele für E<sup>10</sup>

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.

## 2.4 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  $\Phi$  zu dem bestrahlten Raumwinkel /Omega errechnet<sup>11</sup> (Gleichung 2.3).

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad (2.3)$$

<sup>9</sup>[https://www.sbz-online.de/Cache/GENTNER/10024/GV-SVG-EXPORT-20140303-1028\\_NTc4MTAwWg.JPG](https://www.sbz-online.de/Cache/GENTNER/10024/GV-SVG-EXPORT-20140303-1028_NTc4MTAwWg.JPG)

<sup>10</sup>(Ris 2015: 29)

<sup>11</sup>(Ris 2015: 27)

## 2 Grundlagen und Kenngrößen der Lichttechnik

Der Raumwinkel  $\Omega$  beschreibt die Beziehung zwischen eines Flächenausschnitts der Oberfläche einer dreidimensionalen Kugel zu dem Quadrat des Kugelradius und wird mit der Einheit Steradian (sr) verwendet<sup>12</sup> (Gleichung 2.4).

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (2.4)$$

Auf diese Weise kann die Verteilung des Lichtstroms  $\Phi$  im Raum berechnet werden (Abbildung 2.4).



**Abbildung 2.4:** Die Lichtstärke gibt an, wie viel Lichtstrom auf eine bestimmte Richtung im Raum verteilt ist.<sup>13</sup>

Typische Größen der Lichstärke sind:

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

**Tabelle 2.3:** Verschiedene Beispiele für I<sup>14</sup>

<sup>12</sup>(Ris 2015: 26)

<sup>13</sup>[https://www.sbz-online.de/Cache/GENTNER/10024/GV-SVG-EXPORT-20140303-1034\\_NTc4MTA2Wg.JPG](https://www.sbz-online.de/Cache/GENTNER/10024/GV-SVG-EXPORT-20140303-1034_NTc4MTA2Wg.JPG)

<sup>14</sup>(Greule 2014: 36)

Die Lichtstärke einer Kerze beträgt etwa 1 cd, wenn man davon ausgeht, dass sie in alle Richtungen gleichmäßig Licht ausstrahlt.

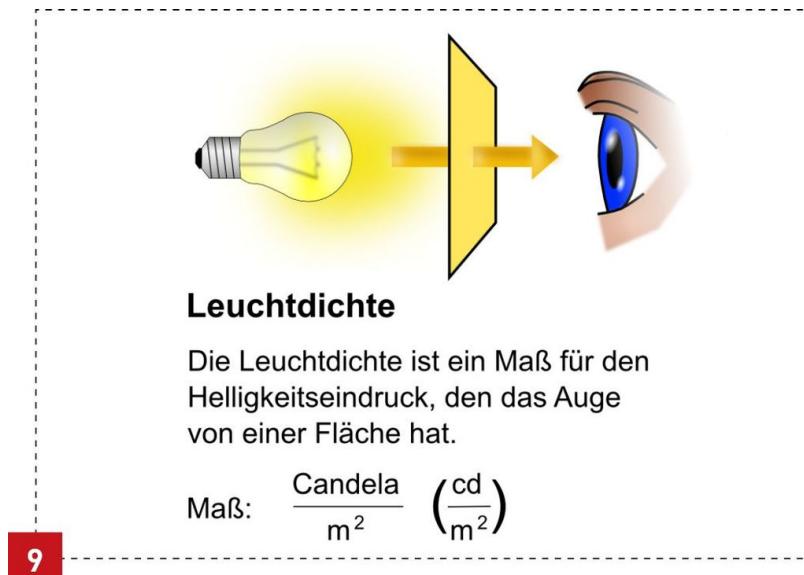
Mit sogenannten Lichtstärkeverteilungskurven (LVK) ist es möglich die Abstrahlcharakteristik einer Leuchte zu bestimmen und mit diesen Daten beispielsweise 3D-Renderings einer Beleuchtungssituation zu simulieren. Dies ist jedoch für diese Arbeit nicht weiter interessant.

## 2.5 Leuchtdichte L

Die Leuchtdichte L bewertet, wie hell eine beleuchtete oder selbstleuchtende Fläche von dem menschlichen Auge wahrgenommen wird und wird in  $\frac{\text{candela}}{\text{m}^2}$  ( $\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ ) angegeben<sup>15</sup>(Gleichung 2.5).

$$L = \frac{I}{A} \quad (2.5)$$

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 2.5).



**Abbildung 2.5:** Die Leuchtdichte hat einen Bezug auf die menschliche Helligkeitswahrnehmung.<sup>16</sup>

Folgende Werte sind für die Leuchtdichte typisch:

<sup>15</sup>(Ris 2015:34)

<sup>16</sup>[https://www.sbz-online.de/Cache/GENTNER/10024/GV-SVG-EXPORT-20140303-1034\\_NTc4MTA2Wg.JPG](https://www.sbz-online.de/Cache/GENTNER/10024/GV-SVG-EXPORT-20140303-1034_NTc4MTA2Wg.JPG)

<sup>17</sup>(Ris 2015:35)

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 $\frac{\text{candela}}{\text{m}^2}$
Weißes Papier bei 500 lx	130...150 $\frac{\text{candela}}{\text{m}^2}$
Umweltschutzpapier bei 500 lx	90...150 $\frac{\text{candela}}{\text{m}^2}$

**Tabelle 2.4:** Verschiedene Beispiele für L<sup>17</sup>

# 3 Leuchtmittel

In diesem Kapitel werden verschiedene Leuchtmittel vorgestellt. Ein Augenmerk soll hier auf die LED-Leuchtmittel gelegt werden, da diese einen Hauptbestandteil der Thesisüberlegung betrifft.

## 3.1 Glühlampe

Die Glühlampe ist ein Temperaturstrahler. Sie besteht aus einem gasgefülltem Kolben, in dem ein Wolframwendel durch Stromzufuhr erhitzt wird. Der erhitzte Glühwendel erzeugt eine Farbtemperatur von ca. 3200K<sup>1</sup>. Der Großanteil des Lichtspektrums einer Glühlampe liegt im Infrarot-Bereich und wird damit in Wärme umgesetzt. Es werden also nur ca. 5% bis 15% der Leistung in Licht umgewandelt<sup>2</sup>. Weil die Lichtausbeute 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 hergestellt<sup>3</sup>.

## 3.2 Halogenglühlampe

Auch die Halogenglühlampe ist ein Temperaturstrahler. Sie besteht auch Glaskolben und Woflramwendel, ist allerdings mit Jod oder einer Bromverbindung gefüllt<sup>4</sup>. 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 der Halogenglühlampe effizienter als eine Glühlampe macht<sup>5</sup>.

---

<sup>1</sup>(Mueller 2014: 137)

<sup>2</sup>(Ris 2015: 78)

<sup>3</sup>(Ris 2015: 78)

<sup>4</sup>(Ris 2015: 82)

<sup>5</sup>(Ris 2015: 83-84)

### 3.3 Entladungslampen

Entladungslampen erzeugen Licht durch eine angelegte Spannung an einem ionisierten Gasgemisch in einem Glaskolben. Abhängig von dem Gasgemisch entsteht dabei eine Lichtfarbe.<sup>6</sup>. Man kann die Entladungslampen grob in zwei Kategorien einteilen: die Niederdruck-Entladungslampen und die Hochdruck-Entladungslampen.

Niederdruckentladungslampen haben einen Druck von ca.  $10^{-6}$  bar. Ihr Gasgemisch besteht aus neutralen Atomen, geladenen Ionen und freien Elektronen. Dieses Gasgemisch befindet sich in einem Glasrohr<sup>7</sup>. 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 frei<sup>8</sup>.

Damit es während des Betriebs nicht zum Kurzschluss kommt, wird der Strom durch beispielsweise induktive Vorwiderstände gedrosselt.<sup>9</sup>

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 umgesetzt.<sup>10</sup>

Leuchtstofflampen erreichen eine Lichtausbeute von bis zu  $116 \frac{\text{lumen}}{\text{Watt}}$ . 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 Glasröhre dem Druck nicht standhält. Wenn bei einer Halogen-Metalldampflampe beispielsweise eine Spannung an den Elektroden anliegt entsteht zwischen den beiden Elektroden ein Lichtbogen. Dieser Lichtbogen regt dann das Gasgemisch der Lampe an und gibt dem Licht so eine Lichtfarbe<sup>11</sup>. Hochdruckentladungslampen brauchen für den Zündvorgang ein Vorschaltgerät, um die hohe Initialspannung generieren zu können. Nach der Zündung braucht die Lampe ca. 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 kann<sup>12</sup>. Eine Halogenmetalldampflampe hat eine Lichtausbeute von ungefähr  $70 \frac{\text{lumen}}{\text{Watt}}$ .

---

<sup>6</sup>(Mueller 2014: 140)

<sup>7</sup>(Ris 2015: 93)

<sup>8</sup>(Ris 2015: 93)

<sup>9</sup>(Mueller 2014: 141)

<sup>10</sup>(Ris 2015: 96)

<sup>11</sup>(Ris 2015: 129)

<sup>12</sup>(Mueller 2014: 147)

## 3.4 LEDs

Light-Emitting Diode 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 bringen.<sup>13</sup>. 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)<sup>14</sup>.

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 Katode fungiert. Mit einem Draht aus gold wird die Oberseite des lichterzeugendes Elements verbunden und als Anode für den Stromfluss genutzt<sup>15</sup>.

Die LED wird schließlich von einer Sekundäroptik ummantelt. Diese Optik sorgt dafür, dass das LED Licht nicht mehr zur Seite austritt und gebündelt wird.

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 Varianten<sup>16</sup>:

- 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. 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.

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

---

<sup>13</sup>(Mueller 2014: 150)

<sup>14</sup>(Ris 2015: 153)

<sup>15</sup>(Ris 2015: 154)

<sup>16</sup>(Mueller 2014: 151-152)

Binnings eingeteilt. In einem Binnig sind also jeweils die LED's mit den ähnlichsten Eigenschaften zusammengefasst, so dass beim Scheinwerferbau nur sich sehr ähnliche LED's verwendet werden<sup>17</sup>.

### 3.5 Farbtemperatur

Mit der Farbtemperatur lässt sich die Qualität des Lichts bestimmen. Entstanden ist der Begriff durch die Untersuchen von Lord Kelvin. Er hat herausgefunden, dass es eine Verbindung zwischen der Temperatur eines schwarzen Strahlers und dessen Lichtfarbe gibt<sup>18</sup>. 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.

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. Wenn das Licht einer Lampe von der spektralen Beschaffenheit mit dem Licht des schwarzen Strahlers übereinstimmt, wird die Lichtfarbe der Temperatur des Schwarzen Körpers zugeordnet<sup>19</sup>.

Typische Farbtemperaturen sind:

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 ist<sup>20</sup> (Kapitel 5.2).

---

<sup>17</sup>(Mueller 2014: 153)

<sup>18</sup>(Mueller 2014: 89)

<sup>19</sup>(Mueller 2014: 89)

<sup>20</sup>(Mueller 2014: 91)

# 4 Farben

## 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 2). Daher erscheint beispielsweise ein roter Apfel von blauem Licht beleuchtet unbunt, da kein roter Spektralanteil im blauen Licht vorhanden ist. In diesem zweiten Fall spricht man von Körperfarben<sup>1</sup>.

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  $3 \cdot 10^{-6} \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$  bis  $0,03 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$  verantwortlich<sup>2</sup>. 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  $3 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$  zuständig<sup>3</sup>.

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).

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 kann<sup>5</sup>.

---

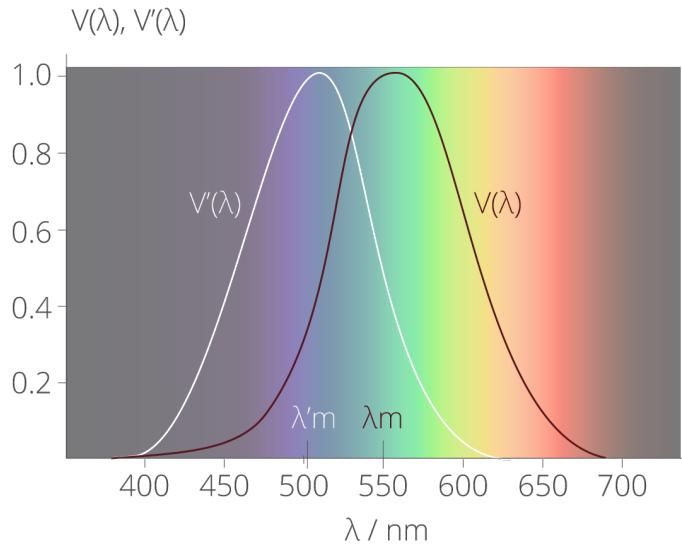
<sup>1</sup>(Hentschel 1993: 103)

<sup>2</sup>DocCheck Flexikon (2014)

<sup>3</sup>DocCheck Flexikon (2014)

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

<sup>5</sup>Bladowski & Maus (2010)



**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 verschiebt.<sup>4</sup>

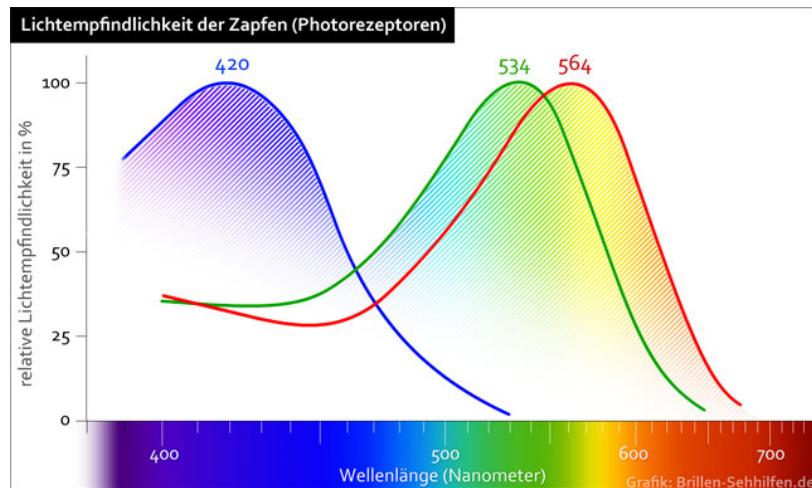
## 4.2 Theorien der Farbwahrnehmung

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 betiteln<sup>6</sup> (Abbildung 4.2).

---

<sup>6</sup>(Greule 2014: 62-63)

#### 4 Farben



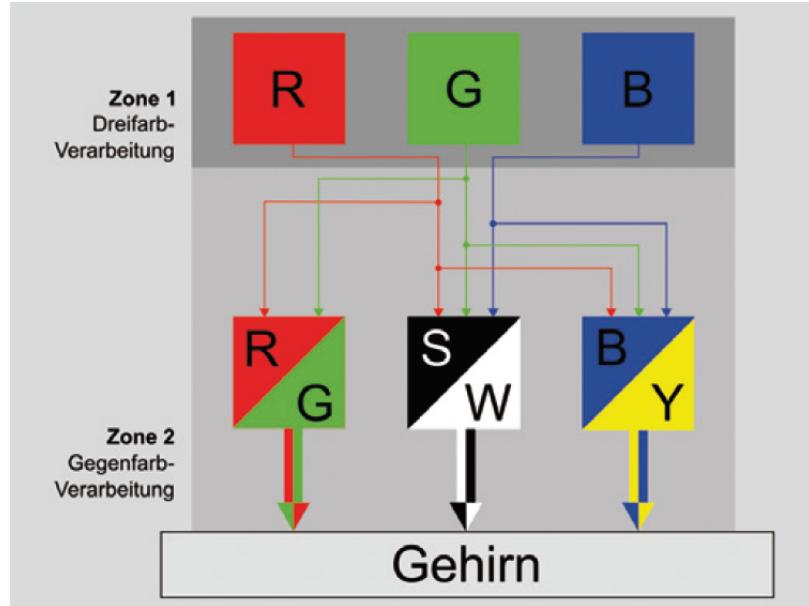
**Abbildung 4.2:** Die Kurven zeigen die Empfindlichkeiten der S-Zapfen (blau), der M-Zapfen (grün) und der L-Zapfen (rot) und ihre Maxima. Auffällig ist, dass sich die Bereiche der M- und L-Zapfen größtenteils überlappen und die Zapfen für den (tief)roten Spektralbereich kaum empfindlich sind.<sup>7</sup>

Auf diese Weise lassen sich aber nicht alle Phänomene der Farbwahrnehmung erklären. 1878 hat Ewald Hering eine andere Theorie entwickelt, wie Farben wahrgenommen werden und diese „Gegenfarbentheorie“ genannt. Die Theorie besagt, dass es immer zwei Farben gibt, die sich gegensätzlich verhalten: rot und grün, blau und gelb und der unbunte Gegensatz schwarz (dunkel) und weiß (hell).

Nach ein paar Jahren der Uneinigkeit, welche der genannten 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 Farbbegegensätzen ausgewertet<sup>8</sup> (Abbildung 4.3).

<sup>7</sup> <https://www.brillen-sehhilfen.de/auge/auge/farbensehen-wellenlaengen-zapfen-1.jpg>

<sup>8</sup> (Hentschel 1993: 104)



**Abbildung 4.3:** Darstellung der „Zonentheorie“ von v. Kries<sup>9</sup>

### 4.3 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. Oder das Licht verschiedener Wellenlängen trifft auf unterschiedliche Teile der Netzhaut, die so dicht aneinander sind, dass das Auge daraus eine Farbe mischt (örtliche Nähe). Oder derselbe Punkt auf der Netzhaut wird von zwei verschiedenen Spektralanteilen mit einer Wechselfrequenz von  $f \geq 25\text{Hz}$  getroffen (zeitliche Nähe). Oder das Licht verschiedener Wellenlängen trifft auf unterschiedliche Teile der Netzhaut, die so dicht aneinander sind, dass das Auge daraus eine Farbe mischt.

Grundsätzlich werden bei jeder Art der additiven Farbmischung die Strahlungsleistungen der Spektralanteile  $\Phi_{e\lambda,i}(\lambda)$  zusammenaddiert<sup>10</sup> (Gleichung 4.1).

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

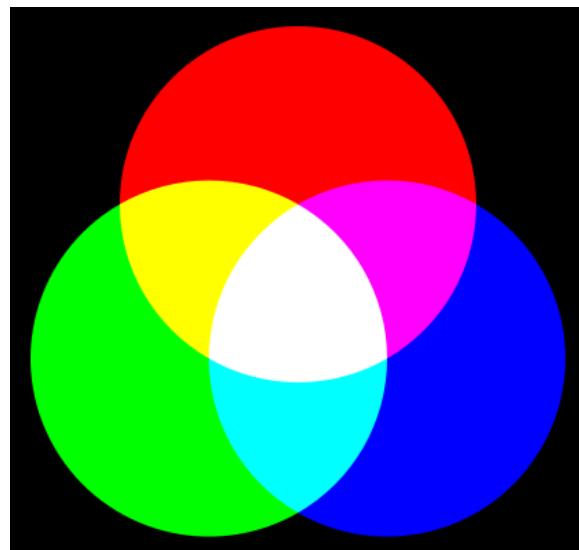
<sup>9</sup>(Greule 2014: 153)

<sup>10</sup>(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 begemischten 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 beschreiben<sup>11</sup>. Dies kann auch über die RGB-Werte (Kapitel 5.1) oder Primärvalezenzen 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).<sup>12</sup>

---

<sup>11</sup>(Hentschel 1993: 105)

## 4 Farben

Die zweite Regel zeigt auf, dass bei der additiven Farbmischung die Farben stets ineinander übergehen. Das bedeutet, dass auch Purpur für das menschliche Auge ohne Sprung ins Rot übergeht, obwohl es diesen Farbwechsel physikalisch nicht gibt<sup>13</sup>.

Die dritte Regel beschreibt beispielweise das Verhalten einer Tomate unter gemischttem und ungemischtem magentafarbenen Licht. Wird die Tomate von einem magentanen Licht bestrahlt, dessen Spektrum nur Anteile im Magentabereich hat, so wird die Tomate weitgehend unbunt erscheinen, weil diese alle spektralen Anteile des Lichts, außer den roten, absorbiert. Falls man aber rotes Licht mit blauem Licht mischt und so die selbe Lichtfarbe wie von dem reinen magentafarbigen Licht erzeugt, so erscheint die Tomate unter diesem Licht wiederum trotzdem rot, da die Rot-Anteile im Spektrum vorhanden sind. Man kann jedoch mit dem bloßen Auge diese beiden (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 Flächen<sup>14</sup>.

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 werden<sup>15</sup> (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).

---

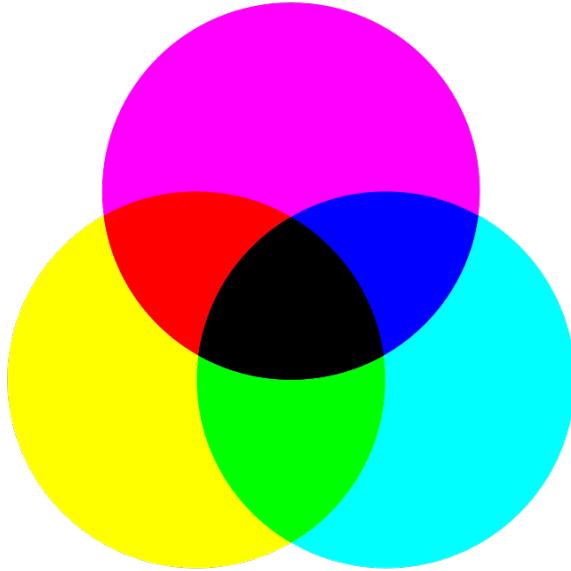
<sup>12</sup><https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e0/Synthese%2B.svg/420px-Synthese%2B.svg.png>

<sup>13</sup>(Mungenast 2009: 5)

<sup>14</sup>(Mungenast 2009: 5)

<sup>15</sup>(Greule 2014: 84)

#### *4 Farben*



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

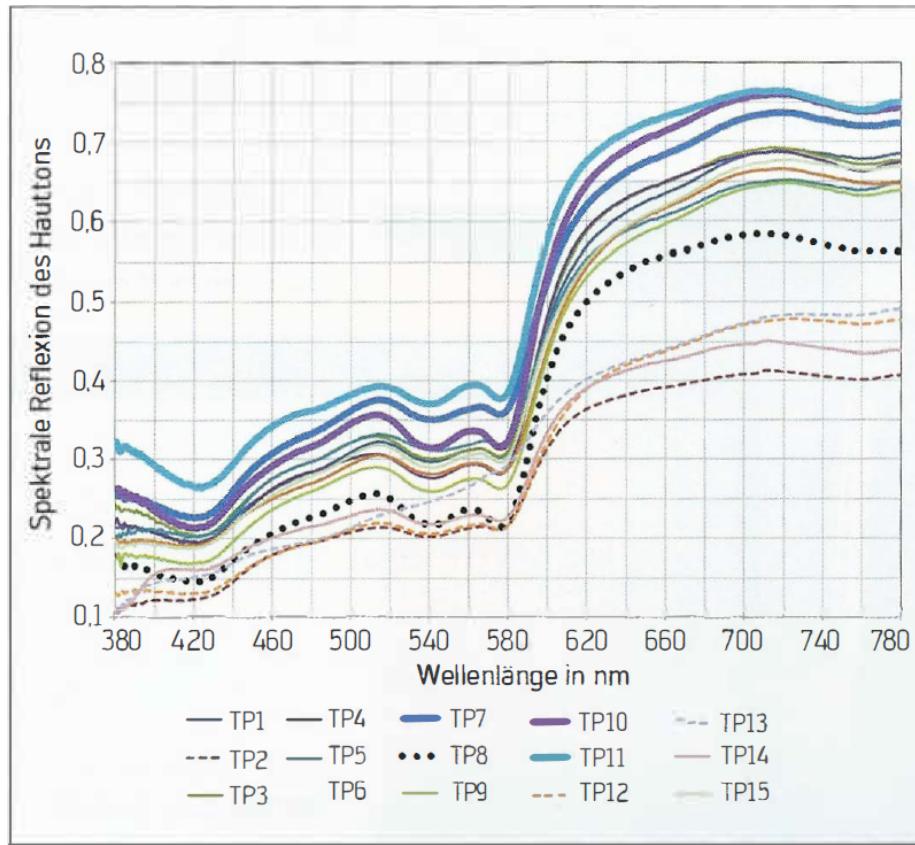
Wenn man alle drei Grundfarben der subtraktiven Farbmischung mischt entsteht schwarz, weil dann alle Anteile im Licht abgezogen wurden.

## 4.4 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 Strahldichthemessgerät gemessen<sup>17</sup> (Abbildung 4.6).

<sup>16</sup>[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/64/CMY\\_ideal\\_version\\_rotated.svg/649px-CMY\\_ideal\\_version\\_rotated.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/64/CMY_ideal_version_rotated.svg/649px-CMY_ideal_version_rotated.svg.png)

<sup>17</sup>(Vinh & Khanh 2018: 71)



**Abbildung 4.6:** Spektrale Strahldichtefaktoren der 15 Hauttöne gemessen von Vinh und Khanh.<sup>18</sup>

Aus diesem Graph lassen sich ein paar Schlussfolgerungen ableiten: 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.

<sup>18</sup>(Vinh & Khanh 2018: 71)

# 5 Farbräume

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

## 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 Wechselt und die spektrale Empfindlichkeitskurve mit transformiert wird. So wird sichergestellt, dass jede Farbe nach der natürlichen Wahrnehmung des Menschen gewertet wird. Angefangen hat all dies mit dem RGB-Farbraum. Dieser Farbraum wird mit den drei Grundfarben der additiven Farbmischung, den Primärvalenzen Rot, Grün und Blau aufgespannt. Die Farben ergeben jeweils die Ecken und in der Mitte entsteht so der Weißpunkt des Farbraumes. Eine Farbe lässt sich dann über die Farbkoordinaten  $r$ ,  $g$  und  $b$ , die sich aus den Primärvalenzen errechnen, in diesem Farbraum orten<sup>1</sup> (Gleichung 5.1).

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

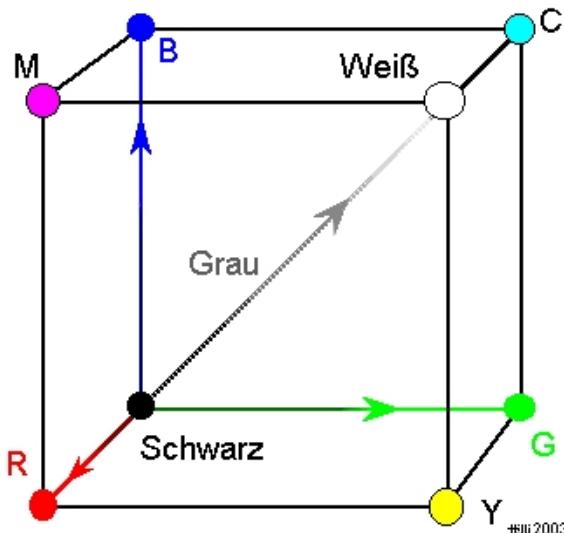
Der RGB-Farbraum ist so konstruiert, dass jede Kombination aus den drei Farbkoordinaten zusammen 1 ergibt. Es reichen also zwei Koordinaten aus, um den sogenannten Farbort bestimmen zu können, da sich die dritte Koordinate von selbst erschließt (Gleichung 5.2).

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

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).

---

<sup>1</sup>(Hentschel 1993: 106)

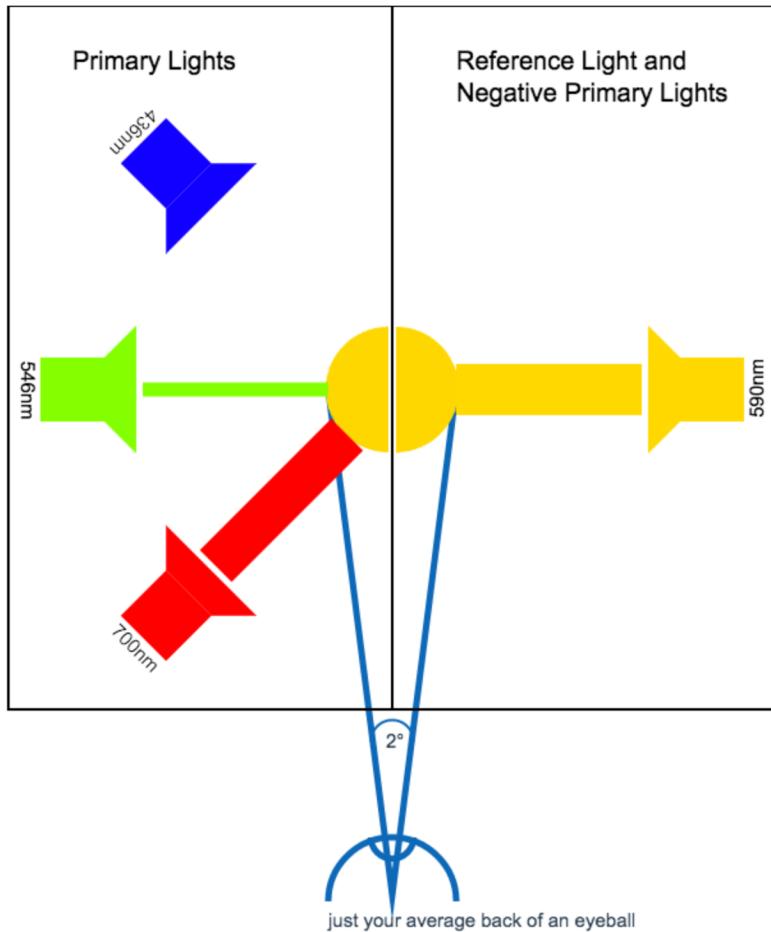


**Abbildung 5.1:** Beim RGB-Würfel werden alle Primärvalenzen R, G, B als gleich lange Vektoren angenommen.<sup>2</sup>

Der RGB-Farbraum kann nicht alle Farben des sichtbaren Spektrum abbilden. W. D. Wright und J. Guild haben dazu Tests mit einem Monochromator gemacht. Ein Proband, der Farbflächen von  $2^\circ$  Gesichtsfeldgröße sieht, sollte mit den Wellenlängen 700 nm (Rot), 546 nm (Grün) und 435 nm (Blau) die gesehene Farbe nachmischen (Abbildung 5.2).

---

<sup>2</sup><http://www.hilli1.de/hillifarbe/Endlichfarbe/03122wf.jpg>



**Abbildung 5.2:** Schematische Darstellung des Farbzuzuordnungsexperiments von Wright und Guild.<sup>3</sup>

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 ein negativen Rot-Anteil im RGB-Farbraum bedeuten, den es so nicht geben kann. Daher hat die CIE 1931 ein virtuelles Primärvalenzssystem erarbeitet, dass alle sichtbaren Farben darstellen kann<sup>4</sup>.

<sup>3</sup>[https://cdn-images-1.medium.com/max/1600/0\\*75FcZwPv1Wu17\\_kc.png](https://cdn-images-1.medium.com/max/1600/0*75FcZwPv1Wu17_kc.png)

<sup>4</sup>(Greule 2014: 77)

## 5.2 CIE-XYZ Farbraum

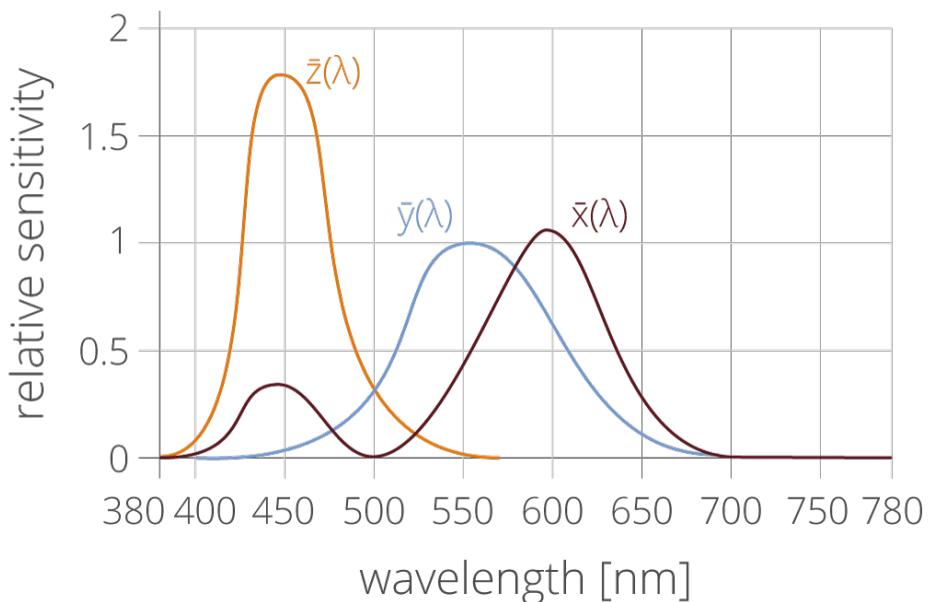
Im CIE-XYZ Farbraum gibt es die Primärvalenzen X, Y und Z, die aus einer linearen Transformation des RGB-Farbraum entstanden sind<sup>5</sup> (Gleichungen 5.3 - 3.7).

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

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

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

Der Y-Wert entspricht dabei der Farbfunktion  $y_\lambda$ , 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 mit einbezogen wurde. Der X-Wert zeigt den rot-grün-Anteil an und am Z-Wert lässt sich der Blau-Gelb-Anteil einer Farbe bestimmen<sup>6</sup> (Abbildung 5.3).



**Abbildung 5.3:** Die XYZ-Spektralwertfunktionen, angepasst aus den r.<sup>7</sup>

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).

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

<sup>5</sup>(Greule 2014: 76-77)

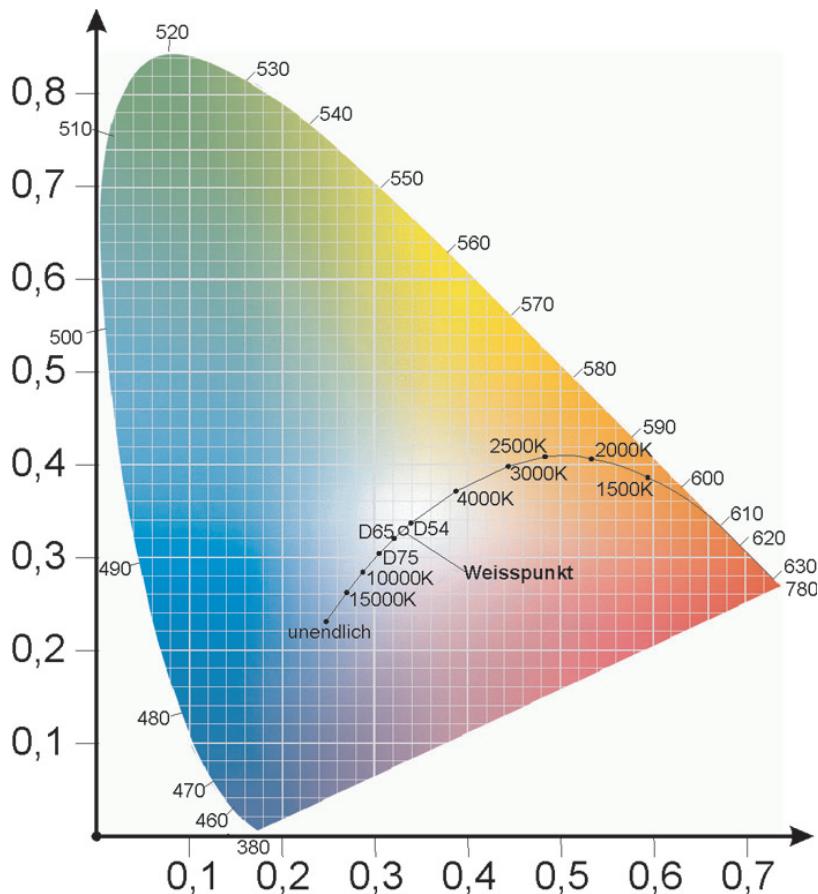
<sup>6</sup>(Mueller 2014: 72)

<sup>7</sup><https://www.gigahertz-optik.de/assets/Uploads/Abb.-II.21-neu.png>

## 5 Farbräume

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 möglich<sup>8</sup>.

Über die Grenzen des mit  $x$  und  $y$  aufgespannten Farbraums erstrecken sich von 380nm blau zu grün und gelb zu 780nm rot alle sichtbaren Farben des Spektrums. Die beiden Enden des Farbraumes sind auf der gegenüberliegenden Seite über die theoretische Purpur-Graden miteinander verbunden. Die Farben auf dieser Geraden werden vom menschlichen Auge magenta interpretiert, gehören aber nicht mehr zum sichtbaren Wellenlängenbereich dazu<sup>9</sup>. Der Unbuntpunkt liegt bei  $x = y = 0,33$  (Abbildung 5.4).



**Abbildung 5.4:** Darstellung der CIE-XYZ Farbtafel eines  $2^\circ$  Normalbeobachter.<sup>10</sup>

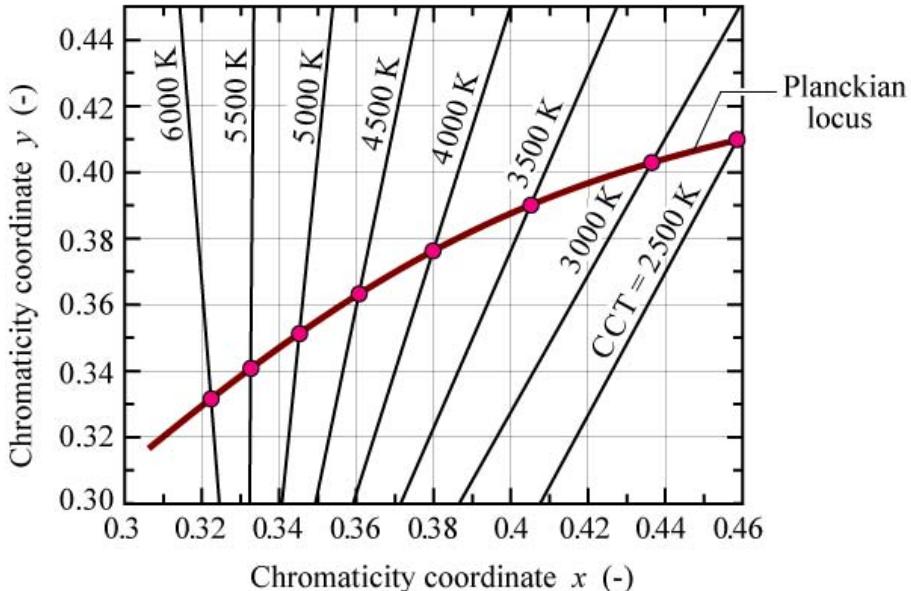
Im XYZ-Farbdiaagramm ist der Plank'sche Kurvenverlauf eingezeichnet. Wenn ein Farbort auf diese Kurve trifft wird ihm die jeweilige Farbtemperatur zugeschrieben.

<sup>8</sup>(Greule 2014: 79)

<sup>9</sup>(Mueller 2014: 73)

<sup>10</sup><https://www.production-partner.de/wp-content/uploads/2018/02/Farbdreieck.jpg>

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 werden (Abbildung 5.5)

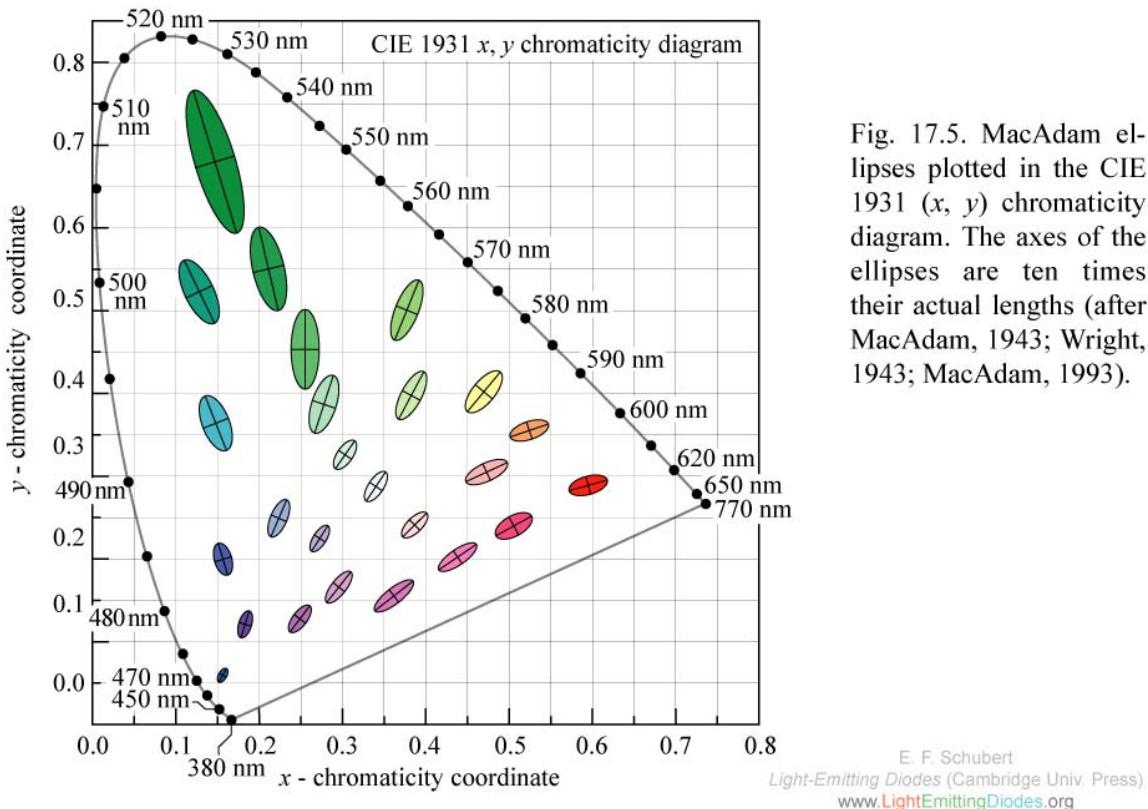


**Abbildung 5.5:** Detailansicht des XYZ-Farbraumes mit den „Geraden ähnlicher Farbtemperatur“<sup>11</sup>

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 vorsichtig geboten, da die Farben auf der Farbtafel nicht mit gleich großem Abstand dargestellt werden. Dies ist daran zu erkennen, dass die Farbabstände im roten (620nm - 770nm) und blauen (380nm - 470nm) Bereich sehr nahe beieinander liegen, wohingegen sich der grüne Bereich (500nm - 570nm) 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).

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



**Abbildung 5.6:** Abbildung der MacAdam Ellipsen im XYZ-Farbraum<sup>12</sup>

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 Farbreizes<sup>13</sup>.

### 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 Farbta-

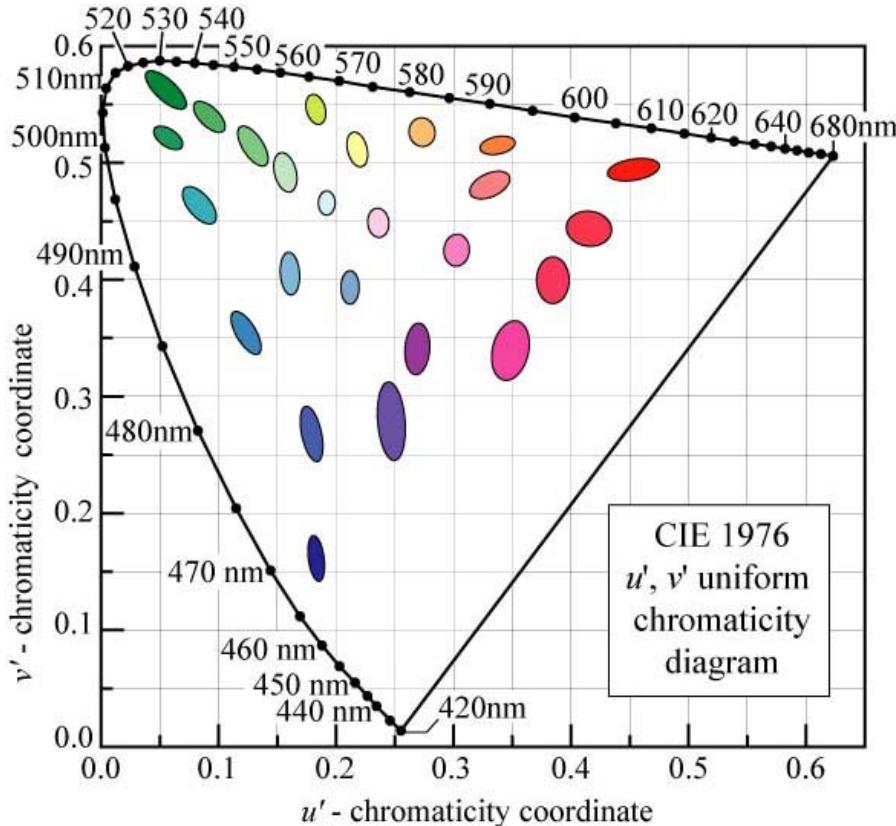
<sup>12</sup> <https://ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap17/F17-05%20MacAdam%20ellipses.jpg>

<sup>13</sup> (Greule 2014: 79-80)

fel 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).

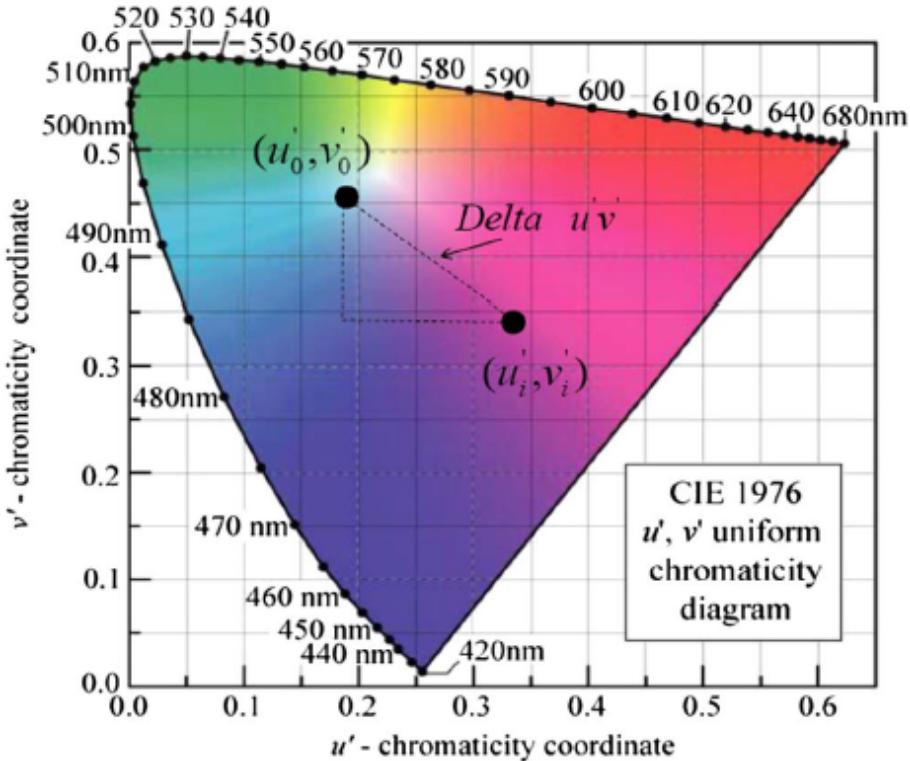


**Abbildung 5.7:** Abbildung der MacAdam Ellipsen auf der UCS-Farbtafel <sup>14</sup>

Durch die CIE-UCS Farbtafel ist auch der  $\Delta u'v'$  entstanden. Dieser Wert ist wie beim TLCI (Kapitel 6.3) 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 ist<sup>15</sup> (Abbildung 5.8).

<sup>14</sup>[https://www.fktg.org/sites/default/files/sauter\\_bild\\_02.jpg](https://www.fktg.org/sites/default/files/sauter_bild_02.jpg)

<sup>15</sup>(Jiajie & Yung & Pecht 2014: 566)



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

Anhand des Wertes ist erkennbar, ob das gemischte Weiß grünstichig mit  $\Delta u'v' < 0$  oder magentastichig 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 akzeptabel<sup>16</sup>.

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.

<sup>16</sup>Ohno (2005)

# 6 Lichttechnische Parameter

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

## 6.1 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  $\Delta E_i$  berechnet (Gleichung 6.1)<sup>1</sup>.

$$R_i = 100 - 4,6 \cdot \Delta E_i \quad (6.1)$$

Die Farbdifferenzen  $\Delta E_i$  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 Standarte-Lichtstofflampe. Weil mit dem CRI häufig Aussagen über Leuchtstofflampen gemacht werden, wird die Normlichtart F4 als Referenz in die Mitte der Farbwiedergabeskala geschoben.<sup>2</sup> 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 6.2)<sup>3</sup>.

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (6.2)$$

In der DIN 6169 werden zur besseren Beurteilung der Farbwiedergabe die  $R_a$ -Werte in verschiedene Stufen unterteilt (Tabelle 6.1).

<sup>1</sup>Davis & Ohno (2006)

<sup>2</sup>Houser & Mossman & Smen & Whitehead (2015)

<sup>3</sup>Production Partner (2018)

## 6 Lichttechnische Parameter

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

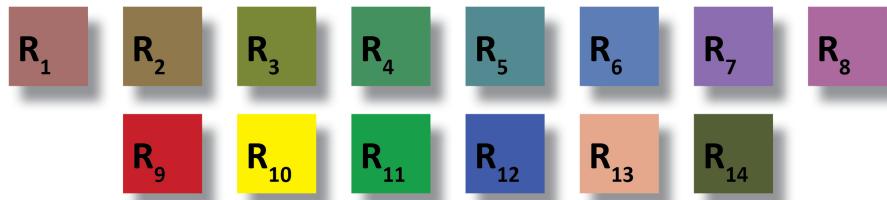
**Tabelle 6.1:**  $R_a$  eingeteilt in verschiedene Stufen<sup>4</sup>

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 Hauftöne in diesem Bewertungsverfahren fehlen.

Leuchtstofflampen nutzten den CRI aus, indem durch gezielte schmalbandige Peaks im Spektrum die Referenzfarben getroffen werden. Auf diese Weise kann zwar ein hoher CRI-Werte erreicht werden, aber kein breitbandiges und ausgefülltes Lichtspektrum entstehen. 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. 6.1).

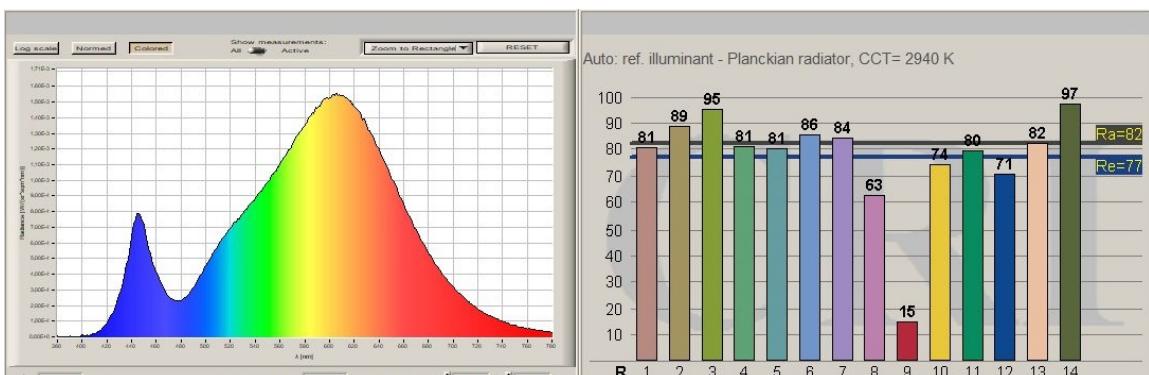
---

<sup>4</sup>(Hentschel 1993:111)



**Abbildung 6.1:** 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<sup>5</sup>

Aus dem Demofile der JETI „LiVal“-Software kann bei einer warmweißen LED ein CRI von 82 bestimmt werden (Abbildung 6.2). 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 6.1) 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 erkennbar<sup>6</sup>.



**Abbildung 6.2:** Messung einer warmweißen LED-Leuchte (Ausschnitt aus dem Demofile des Programmes „LiVal“ von der Firma JETI): Links ist das Lichtspektrum der Leuchte dargestellt, rechts die gemessenen CRI-Werte<sup>7</sup>

<sup>5</sup>[https://www.elementalled.com/wp/wp-content/uploads/2015/08/CRI\\_chart.jpg](https://www.elementalled.com/wp/wp-content/uploads/2015/08/CRI_chart.jpg)

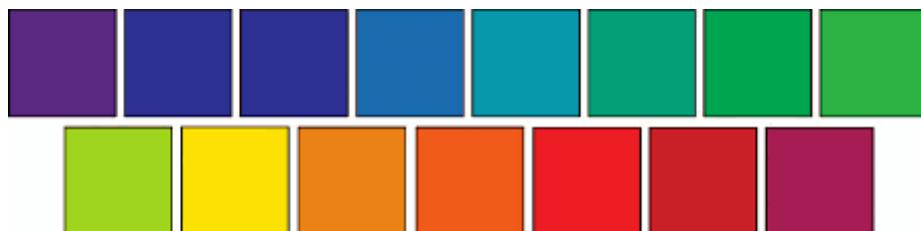
<sup>6</sup>Davis & Ohno (2006)

Der CRI kann daher eher als richtungsweisend betrachtet werden: Eine Leuchte mit guter Farbwiedergabe wird auch immer einen guten CRI-Wert haben. Zum Vergleich für Leuchten eignen sich andere Farbwiedergabewerte heutzutage besser<sup>8</sup>.

Aus diesen Gründen und der Erkenntnis der CIE, „dass die CRI-Methode generell nicht anwendbar ist, um eine Anzahl von Lichtquellen gemäß ihrer Farbwiedergabe einzuordnen, wenn weiße LEDs darunter sind“ (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.

## 6.2 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 saturende Referenzfarben, die auch auf LED-Leuchten anwendbar sind. Über Skaleneffekte soll der CQS auch indirekt eine Aussage über die Farbwiedergabe von Pastelltönen ermöglichen (Abb. 6.3).



**Abbildung 6.3:** Alle Referenzfarben des CQS mit voller Sättigung<sup>9</sup>

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 einzuordnen<sup>10</sup>.

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

<sup>8</sup>Production Partner (2018)

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

<sup>10</sup>(Davis & Ohno 2006:3)

## 6 Lichttechnische Parameter

Farbdifferenzwert  $\Delta E_{rms}$  aus dem quadratischen Mittel (root-mean-square) der 15 Farbunterschiede  $\Delta E_i$  berechnet<sup>11</sup>:

$$\Delta E_{rms} = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} \Delta E_i^2} \quad (6.3)$$

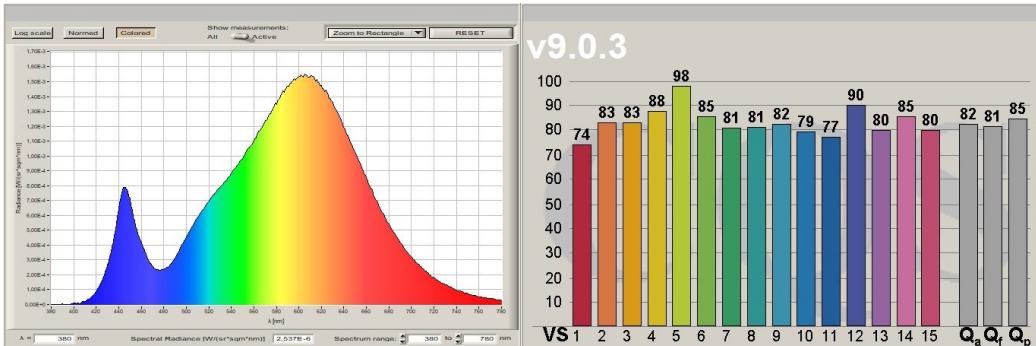
Aus diesem Farbdifferenzwert wird ähnlich wie beim CRI (Gleichung 6.1) ein Farbwiedergabewert  $Q_{f,rms}$  errechnet (Gleichung 6.4).

$$Q_{f,rms} = 100 - 3,0305 \cdot \Delta E_{rms} \quad (6.4)$$

Schließlich wird durch eine Skalierung auf Werte von 0 bis 100 aus diesem Farbwiedergabewert der CQS-Wert  $Q_f$  (Gleichung 6.5). Dadurch entfallen beim CQS negative Farbwerte, die beim CRI sehr schwierig zu interpretieren sind.

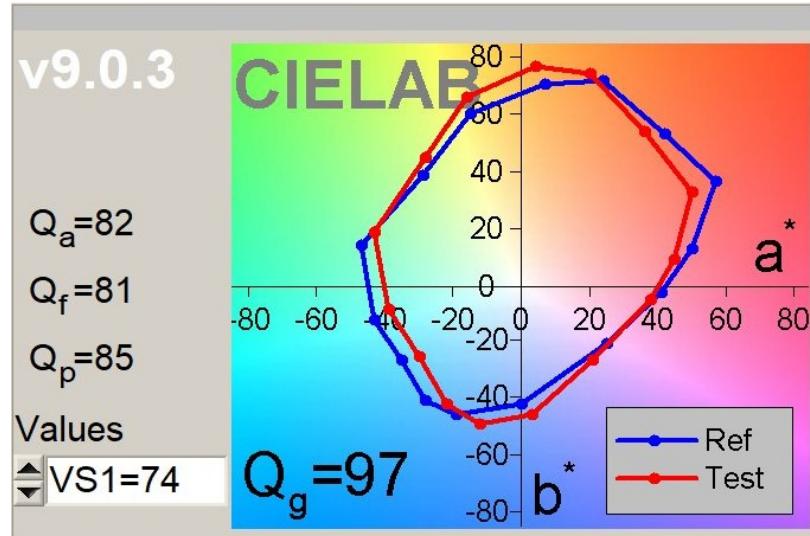
$$Q_f = 10 \ln(e^{\frac{Q_{f,rms}}{10}} + 1) \quad (6.5)$$

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 (Abb. 6.4 und 6.5).



**Abbildung 6.4:** Ausschnitt aus dem Programm „LiVal“ von der Firma JETI: Demo Spektrum einer warmweißen LED (2942K) mit  $Q_f = 81$

<sup>11</sup>(Davis & Ohno 2006: 5)



**Abbildung 6.5:** Ausschnitt aus dem Programm „LiVal“ von der Firma JETI: Die fünfzehn Referenzfarben(blau) im CIELAB-Farbraum im Vergleich zu den gemessenen Werten (rot)

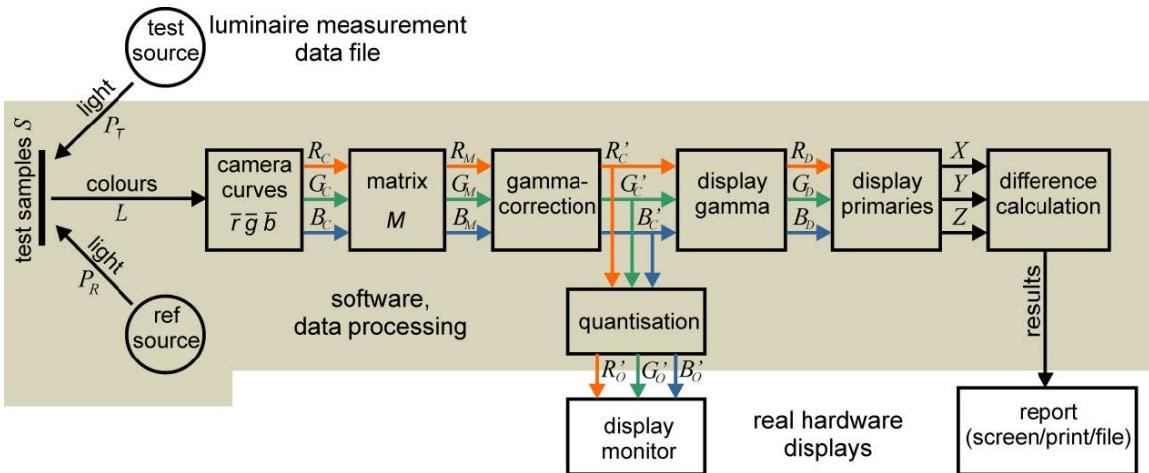
Auf die in den Abbildung 6.4 und 6.5 erwähnten Werte  $Q_a$  (optimierter CQS-Wert für kaum übersättigte Farben),  $Q_p$  (optimierter CQS-Wert für viele übersättigte Farben) und  $Q_g$  (optimierter CQS-Wert im Zusammenhang mit dem Gamut Area Index) wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen, weil sie über den Rahmen dieser Bachelorarbeit hinaus gehen und nicht relevant für diese Thesis sind<sup>12</sup>.

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.

<sup>12</sup>(Khanh & Bodrogi & Vinh 2007: 60-62)

## 6.3 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 vonstatten geht ist in diesem Blockschaltbild der EBU verdeutlicht (6.6):



**Abbildung 6.6:** Blockschaltbild einer TLCI-Wertbestimmung<sup>13</sup>

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 „Standartbildschirm“ 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 bestimmt<sup>14</sup> (Gleichung 6.6).

$$R_C = \sum_{\lambda=380}^{760} R_\lambda \cdot P_\lambda \cdot \bar{r}_\lambda \quad G_C = \sum_{\lambda=380}^{760} R_\lambda \cdot P_\lambda \cdot \bar{g}_\lambda \quad B_C = \sum_{\lambda=380}^{760} R_\lambda \cdot P_\lambda \cdot \bar{b}_\lambda \quad (6.6)$$

Dabei entspricht  $\lambda$  der Wellenlänge,  $R_\lambda$  der Reflektion der Testfarbe und  $P_\lambda$  der spektralen Verteilung des Lichts der Test bzw. Referenzleuchte.

<sup>13</sup>(Roberts 2015: 15)

<sup>14</sup>(Roberts 2015: 16)

## 6 Lichttechnische Parameter

Die so entstandenen  $R_C$ ,  $G_C$  und  $B_C$ -Werte werden dann im zweiten Schritt auf weiß abgeglichen (Kapitel 8.3). Diese Weißabgleichswerte  $R_{Cb}$ ,  $G_{Cb}$  und  $B_{Cb}$  werden mit einer linearen Matrix M bewertet, um die Werte des RGB-Signals zu erhalten<sup>15</sup> (Gleichung 6.6).

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,182 & -0,209 & 0,027 \\ 0,107 & 0,890 & 0,003 \\ 0,004 & -0,134 & 1,094 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{Cb} \\ G_{Cb} \\ B_{Cb} \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

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 ??). Beim Bildschirm angekommen werden die R'G'B'-Werte der Farben mit der Gammakurve des Bildschirm 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  $B_d$  errechnet<sup>16</sup> (Gleichung 6.7).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} XYZ(0,0) & XYZ(0,1) & XYZ(0,2) \\ XYZ(1,0) & XYZ(1,1) & XYZ(1,2) \\ XYZ(2,0) & XYZ(2,1) & XYZ(2,2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_d \\ G_d \\ B_d \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Die einzelnen Farbabstände  $\Delta E_i$  von den Referenzfarben zu den gemessenen Farben werden mit der CIEDE2000 Farbabstandsformel errechnet<sup>17</sup> (Gleichung 6.10).

$$\sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2} \quad (6.9)$$

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 ist<sup>18</sup>.

---

<sup>15</sup>(Roberts 2015: 16)

<sup>15</sup>(Roberts 2015: 21)

<sup>16</sup>(Roberts 2015: 17)

<sup>17</sup>(Sharma & Wu & Dalal 2004: 3)

<sup>18</sup>Yang & Ming & Yu (2012)

## 6 Lichttechnische Parameter

Aus den ausgerechneten Farbabständen wird danach ein Farbwiedergabezwischenwert  $\Delta E_a^*$  ermittelt (Gleichung 6.10).

$$\Delta E_a^* = \left( \sum_{i=1}^{18} (\Delta E_i^*)^4 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (6.10)$$

Schließlich wird der Zwischenwert noch angepasst, damit keine negativen Werte entstehen können (Gleichung 6.11).

$$Q_a = \frac{100}{1 + \left(\frac{\Delta E_a^*}{k}\right)^p} \quad (6.11)$$

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 gesorgt<sup>19</sup>. Die TLCI Werte von 0 bis 100 sind für Coloristen in der Nachbearbeitung des Video-materials wie folgt zu deuten (Tabelle 6.2):

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 6.2:**  $Q_a$  eingeteilt in verschiedene Stufen<sup>20</sup>

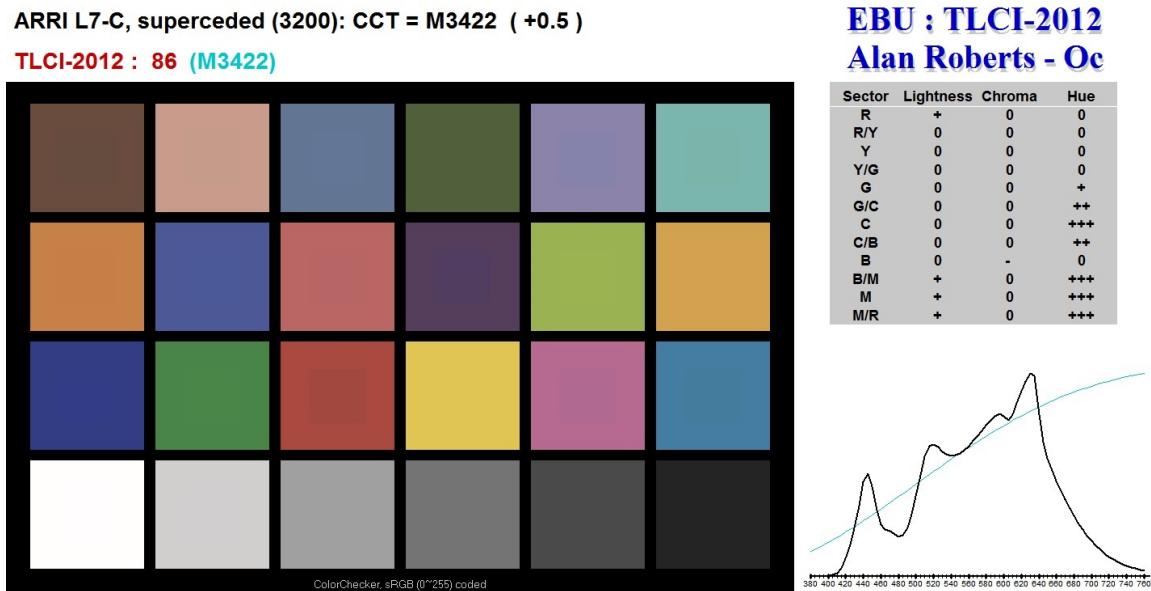
Anhand der Tabelle ist eine Art Kostenvergleich möglich, in dem die Farbwiedergabequalität einer Leuchte gegen den Nachbearbeitungsaufwand von Coloristen gegengerechnet werden kann. Der TLCI gibt sogar eine Empfehlung ab, an welchen Paramtern Coloristen Verbesserungen vornehmen sollten (Abbildung 6.7).

<sup>19</sup>(Roberts 2015: 22)

<sup>20</sup>Production Partner (2018)

## 6 Lichttechnische Parameter

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 6.7):



**Abbildung 6.7:** TLCI-Ergebnisprotokoll eines Arri L7-C LED Fresnelscheinwerfers<sup>21</sup>

Der Abbildung 4.7 kann links oben der Name der Leuchte, die gemessene korrelierte Farbtemperatur und die Abweichung vom Plank'schen Kurvenzug (Kapitel 3.5) mit einer Gewichtung von 0.0054 (Empfehlung EBU) entnommen werden. Ist der Abweichungswert kleiner als -1 wird die Zahl in magenta dargestellt (magenta-stichiges weiß), ist sie größer als +1, in grün (grün-stichiges 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 6.2).

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. Der Arri L7-C hat beispielsweise Bedarf es vor allem im Bereich des Cyan, Blau/Magenta, Magenta und Magenta/Rot in der Farbtonabweichung einer Aufbes-

<sup>21</sup><https://tech.ebu.ch/tlci-2012>

serung. Auch im Green/Cyan- und Cyan/Blau-Bereich sollte der Farbton angepasst werden. Die restlichen Verbesserungsvorschläge bei Helligkeit und Sättigung sollte der Colorist zügig bewältigen können.

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

Rechts unten ist auf dem TLCI-Ergebnisprotokoll das Referenzspektrum von 380nm bis 740nm Wellenlänge abgebildet (schwarz) und dazu wird das geteste Spektrum geplottet (cyan). In dieser Ansicht kann man gut erkennen, inwieweit das Licht des Arri L7-C das Referenzspektrum abdeckt <sup>22</sup>.

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

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

Auch der TM-30 wurde 2015 von der „Illuminating Engineering Society“ (IES) ausgearbeitet um eine Alternative zum CRI zu finden. Wie beim CRI werden ebenso bei der Messung des TM-30 Farbunterschiede zwischen einer Testleuchte und Referenzwerten der selben korrelierten Farbtemperatur aufgezeigt. Der TM-30 differenziert ähnlich, ob es sich bei der Testleuchte um einen Plank'schen Strahler oder einem Tageslicht handelt. Zwischen einer CCT von 4500K und 5500K wird die Referenz proportional überblendet, um so zu verhindern, dass es bei 5000K einen „Sprung“ gibt. Bei dem CRI konnte es nämlich passieren, dass eine Leuchte 2 unterschiedliche Referenzen bekam, je nach dem ob diese knapp über oder unter 5000K bei der Messung lag. Die 99 Referenzfarben (Color Evaluation Sample) wurden aus einem Pool von 105.000 Farbtönen realer Objekte statistisch ermittelt (Abbildung 6.8). Damit alle Farbtöne gleichmäßig abgedeckt werden, wurde der CAM02-UCS-Farbraum, der für seine Gleichmäßigkeit der Farbaufteilung bekannt ist, in Würfel eingeteilt. Von jedem dieser Würfel wurde dann eine der Referenzfarben bestimmt, die so gewählt ist, dass die unterschiedliche Wahrnehmung der verschiedener Wellenlänge minimal ist (Kapitel 4.1). Die große Anzahl der Referenzfarben verhindert, dass Leuchtenhersteller mit gezielten Peaks im Spektrum gute TM-30 Werte erreichen <sup>23</sup>.

---

<sup>22</sup>(Roberts 2015: 15)

<sup>23</sup>U.S. Department of Energy (2015)

## 6 Lichttechnische Parameter



**Abbildung 6.8:** Alle 99 Referenzfarben des TM-30<sup>24</sup>

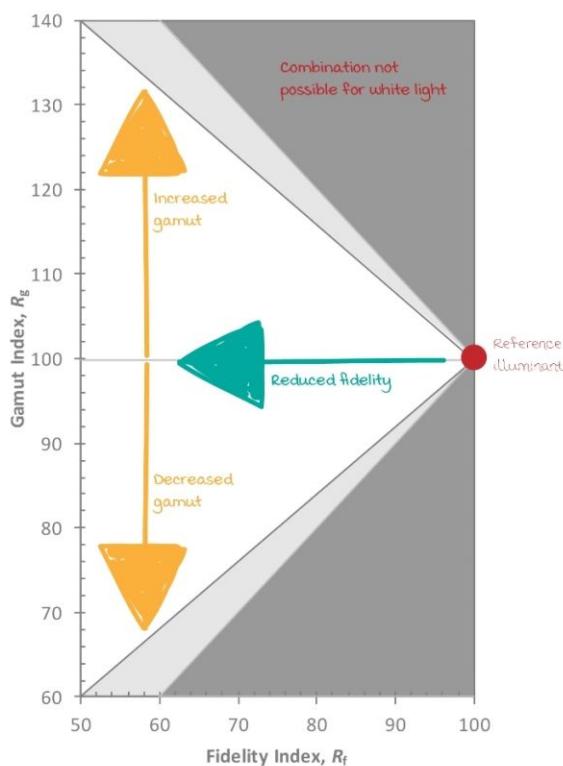
Im Gegensatz zum CRI spielen beim TM-30 zwei Werte eine große Rolle:  $R_f$  und  $R_g$ . Der  $R_f$ -Wert bildet analog zum  $R_a$ -Wert des CRI ein Mittel aus den neunundneunzig Farbunterschieden denen einen Wert von 0 - 100 zugeordnet wird. Auch der  $R_f$ -Wert zeigt nicht an, ob die Leuchte übersättigte Farben hat oder einen Farbschift<sup>25</sup>). Dazu wird der  $R_g$ -Wert gemessen. Dieser kann zwischen 60 und 140 variieren und zeigt so, ob die Farben übersättigt ( $R_g > 100$ ), untersättigt ( $R_g < 100$ )

<sup>24</sup><https://agustos.com/wp-content/uploads/2017/10/TM30-color-samples-image.png>

<sup>25</sup>(Royer & Houser 2015: 10)

## 6 Lichttechnische Parameter

sind oder mit dem Wert  $R_g = 100$  genau die Farben der Referenzleuchte (bei selbiger Farbtemperatur) treffen. Mit dem  $R_f$ - und  $R_g$ -Wert wird ein X,Y-Koordinatensystem aufgespannt (Abbildung 6.9). Aus diesem Diagramm sind Farbwiedergabeeigenschaften einer Leuchte sehr gut ablesbar. Durch den zusätzlichen  $R_g$ -Wert gibt es nicht mehr nur Leuchten mit „guter“ (hoher (hoher  $R_f$ )) oder „schlechter“ (niedriger  $R_f$ ) Farbwiedergabe. Zum Beispiel verliert eine Leuchte mit  $R_f = 82$  und  $R_g = 127$  gegenüber einer mit  $R_f = 90$  und  $R_g = 98$  nicht unweigerlich. Es kommt im direkten Vergleich viel mehr auf den Anwendungsfall an, in der die Leuchte gebraucht wird. Im sterilen Krankenhaus ist eine natürlich Farbwiedergabe wichtig, dort wäre die zweite Leuchte der Favorit, wohingegen für Superläden, in denen das Obst durch Übersättigung der Farben besser zur Geltung kommt, wäre die erste Lampe attraktiver. Daher ist der TM-30 viel flexibler zu deuten als der CRI, wo es immer nur um den höchsten  $R_a$ -Wert geht. Eine Möglichkeit könnte es sein, das X,Y-Koordinatensystem in verschiedene Bereiche(z.B. Fenster) einzuteilen, um so anwendungsspezifische Entscheidungen treffen zu können (26).



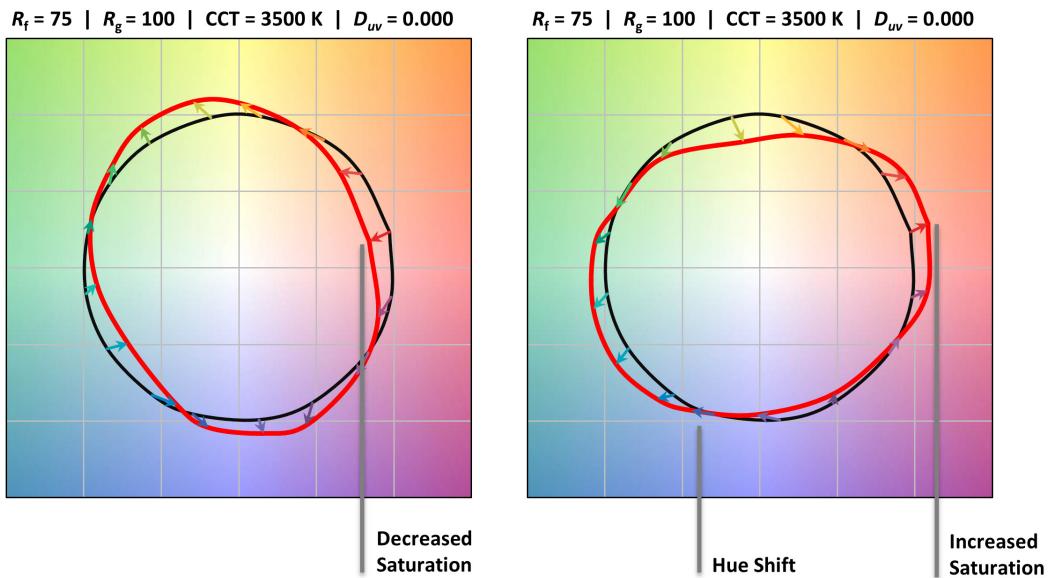
**Abbildung 6.9:** Koordinatensystem aus  $R_f$  und  $R_g$ : Die hellgraue Zone steht für TM-30-Werte die nicht auf der Plank'schen Kurve liegen und die dunkelgraue Zone steht für alle Werte, die nicht mehr als „weiß“ angesehen werden.

27

<sup>26</sup>(Royer 2016: 4)

## 6 Lichttechnische Parameter

In einer anderen Darstellung des  $R_g$ -Wert ist zu sehen, dass der Farbraum in 16 verschiedene „binnings“ eingeteilt wurde. Jedes dieser „binnings“ steht übergreifend für die in diesem Bereich liegende Farbtöne. In dieser Darstellung wird mit Pfeilen aufgezeigt, welche Anteile im Farbraum fehlen, welche übersättigt sind und welche den Farnton nicht treffen im Verhältnis zur Referenzfarbwiedergabe (Abbildung 6.10).



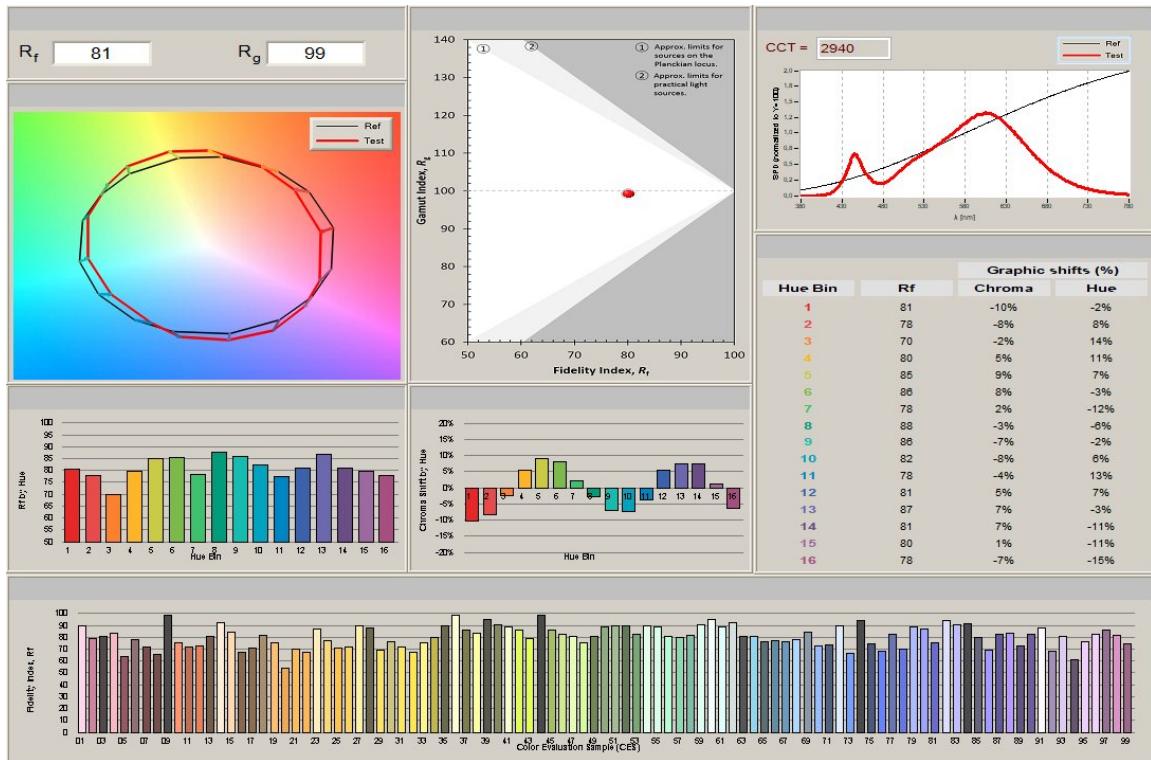
**Abbildung 6.10:** Wie sich die Farben der Testleuchte verhalten ist in der Vektorgraphik des  $R_g$ -Wertes anschaulich dargestellt. Der schwarze Kreis stellt die Referenzleuchte dar, der rote die getestete. <sup>28</sup>

Bei der Messung einer Demo warmweiß LED gibt es viel an Messergebnissen zu protokollieren (Abbildung 6.11): Links oben wird gemessene  $R_f$ - und  $R_g$ -Wert angezeigt. Darunter ist die Vektorgraphik des  $R_g$ -Wertes dargestellt und darunter werden die  $R_f$ -Werte der 16 Farbraum-„binnings“ in einem Säulendiagramm präsentiert. In der Mitte ist der TM-30-Wert in seiner Koordinaten Darstellung aufzufinden und darunter werden die farblichen Abweichungen (in Prozenten) in einem Säulendiagramm dargestellt. Rechts oben wird analog zum TLCI das Spektrum der Leuchte im Verhältnis zum Referenzspektrum gezeigt und die gemessene korrelierte Farbtemperatur angegeben. Darunter gibt es eine Tabelle wo die farblichen Abweichung der einzelnen „binnings“ als Zahlenwert angegeben werden. Schließlich findet man unter allem bisher genannten eine Säulendiagramm mit allen 99 Farben des TM-30. Das Ergebnis einer Messung ist mit diesen Daten nicht mehr schnell ersichtlich, wie beim CRI-Wert, hilft aber eine deutlich aussagekräftigere Entscheidung über eine Leuchte treffen zu können.

<sup>27</sup><https://i.pinimg.com/originals/18/98/de/1898de3bdd8436fb5a1945d72a4c6772.jpg>

<sup>28</sup>U.S. Department of Energy (2015)

## 6 Lichttechnische Parameter



**Abbildung 6.11:** Wie sich die Farben der Testleuchte verhalten ist in der Vektorgraphik des  $R_g$ -Wertes anschaulich dargestellt. Der schwarze Kreis stellt die Referenzleuchte dar, der rote die getestete.<sup>29</sup>

Der TM-30

<sup>29</sup>U.S. Department of Energy (2015)

# 7 Messgeräte für Farbmessung

Es gibt die verschiedensten lichttechnischen 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 diesem zum Teil schmalbandigen Spektren umzugehen. Dazu eignen sich am besten Spektrometer, die durch ihre sehr filigrane Messweise einzelner Wellenlänge auch extremere Spektren auswerten können. Zusätzlich können sie aus dem gemessene Spektrum viele lichttechnische Daten errechnen und sind damit die „Allesköninger“ unter den Messgeräten. In diesem Kapitel soll ihre Funktionsweise erörtert werden.

## 7.1 Spektrometer

Ein Spektrometer besteht üblicherweise aus einem Eingangsspalt, einem Streuelement (Prisma oder Gitter) und aus einem einzeln Detektor oder aus einem Detektor-Array. Die für die Messungen verwendeten Spektrometer 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 7.1).

$$\sin(\Theta_M) = \sin(\Theta_i) + m \frac{\lambda}{d} \quad (7.1)$$

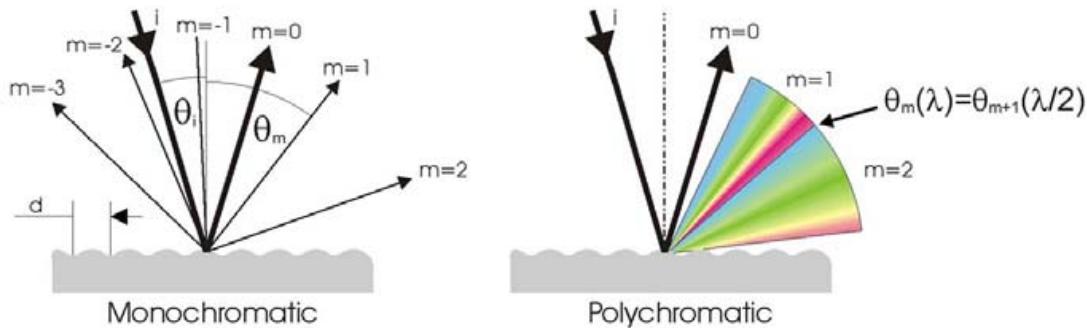
$\Theta$  beschreibt jeweils den Ein- und Austrittswinkel des Lichts.  $\lambda$  steht für die Wellenlänge des Lichts,  $d$  für die Gitterkonstante und  $m$  für die Ordnungszahl der Interferenz. Durch die optischen Eigenschaften eines Reflexionsgitters werden die verschiedenen Wellenlängen in unterschiedlichen Winkeln aufgesplittet und so ist es möglich, dass das Spektrometer ein Spektrum sehr fein auflösen kann (Abbildung 7.1). Es wird nur das reflektierte Licht einer bestimmten Ordnungszahl  $m$  ( $m \neq 0$ ) bei einer Messung genutzt. Die zusätzlich entstandenen Reflexionen anderen Ordnungszahlen sind zu ignorieren<sup>1</sup>.

Bei einem flat-field-Gitter liegt der Vorteil, dass das interfierte Licht schon gebündelt wird, da dieses Gitter konkav gebaut ist und damit als ein Hohlspiegel dient<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>(JETI Technische Instrumente GmbH 2005: 6)

<sup>2</sup>(JETI Technische Instrumente GmbH 2005: 6)

<sup>3</sup>Wikipedia (2018)



**Abbildung 7.1:** Abbildung der Interferenz am optischen Gitter<sup>2</sup>

So werden weniger optische Elemente gebraucht und kosten gespart<sup>4</sup>.

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:

- **CCD-Sensor (charge-coupled device):** Dieser Sensor ist 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 festgelegt<sup>5</sup>.
- **CMOS-Sensor (complementary metal-oxide-semiconductor):** Dieser Sensor ist aus Fotodioden aufgebaut, die jeweils in Sperrrichtung 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 ausgelesen<sup>6</sup>.

Es können auch nur eine Ansammlung von Fotodioden im Zusammenspiel mit einem analogen switch als Detektor-Array genutzt werden<sup>7</sup>. Dies hat jedoch für diese Arbeit keine Relevanz, da nur Messgeräte mit CMOS- bzw. CCD-Sensor genutzt werden.

<sup>4</sup>(JETI Technische Instrumente GmbH 2005: 7)

<sup>5</sup>(JETI Technische Instrumente GmbH 2005: 17)

<sup>6</sup>(Schmidt 2000: 369)

<sup>7</sup>(JETI Technische Instrumente GmbH 2005: 18)

## 7 Messgeräte für Farbmessung

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 bestimmt<sup>8</sup>. Auch die Farbwiedergabewerte errechnen wird aus dem gemessenen Spektrum berechnet (Kapitel 6.1).

Der JETI specbos 1211 wird in den 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
Farbgenauigkeit	$\pm 0,002$ x,y	$\pm 0,0025$ x,y
Farbwiedergabe	$\pm 0,0005$ x,y	$\pm 0,0005$ x,y
Farbtemperatur	$\pm 2$ %	$\pm 20$ K

**Tabelle 7.1:** Vergleich zweier Spektrometer<sup>9</sup>

Der JETI specbos 1211 hat eine genauerer Farbeinschätzung des Lichtes und eine geringere Abweichung bei der Farbtemperatur (Tabelle 7.1). Alle Messwerte beziehen sich auf eine Messung der CIE-Normlichtart A mit 2.856 K, damit Messgeräte vergleichbar sind.

<sup>8</sup>(JETI Technische Instrumente GmbH 2005: 30)

<sup>9</sup>jeti (2018) United Power Research Technology Corporation (2018)

# 8 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.

## 8.1 Grundeinstellung einer Kamera

es geht um die Parameter, die wir verwendet haben. 0dB Verstärkung, Blende, Gamma nach ITU-709, kein Knee, manueller Weißabgleich, Matrix nach ITU 709... Sowas dachte ich. Damit es eine Basis für die Aufnahmen gibt.

blende, schärfentiefe, vorverstärkung

## 8.2 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. Herr Dr. Bryce E. Bayer hat sich dabei an der V- $\Lambda$ -Kurve des Auges orientiert und daher teilen die Bayer Pattern das Bild in 50% grüne, 25% rote und 25% blaue Pixel auf<sup>1</sup>. Die fehlenden Farbanteile des Bildes werden über die Nachbarpixel interpoliert und diese gesammelten Farbinformationen dann an den Bildwandler weitergegeben (s. Abbildung).

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 an kommende Licht über Filter auf einem Strahlenteiler Prisma in die Farbwertanteile Rot, Grün und Blau aufgespalten und auf den jeweiligen Farbbildwandler durchgelassen<sup>2</sup> (s. Abbildung). Da die Filter zur Farbauf trennung nicht ideal sind und vor allendingen blaues Licht auf die nicht dafür vorgesehenen Wandler trifft, gibt es einen weiteren Farbkorrekturfilter vor jedem Wandler<sup>3</sup>. Der Vorteil dieser Variante besteht darin, dass Bild keine

---

<sup>1</sup>[ITWissen.info \(2017\)](#)

<sup>2</sup>[\(Schmidt 2000: 378\)](#)

<sup>3</sup>[\(Schmidt 2000: 379\)](#)

Farbauflösung verliert. Die spektralen Eigenschaften eines Strahlenteilers zeigen, dass eine Kamera das Licht deutlich anders wahrnimmt, als das Auge (Abbildung).

## 8.3 Weißabgleich

Ein Weißabgleich einer Kamera meint den Vorgang eines „*Unbuntabgleich 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 adaptiert sich meist unbemerkt auf verschiedene Beleuchtungssituationen 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 erkannt wird und keinen Farbstich hat. Ziel ist es bei einem Weißabgleich dass, wenn eine weiße Fläche unter den gewählten Beleuchtungsumständen gefilmt wird, in der Kamera die Signalpegel der RGB-Kanäle zu 100% ausschlagen. Um die Signalpegel messen zu können, wird das Kamerasignal mit einem Waveformmonitor oder Vektorskop beurteilt (siehe Kapitel 9.1 und 9.2). Der Vorgang kann in 4 Schritte eingeteilt werden<sup>4</sup>:

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 wird<sup>5</sup>.
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 den selben Pegel des G-Kanal verstärkt, sodass alle drei Kanäle den gleichen Signalpegel aufweisen.

## 8.4 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

---

<sup>4</sup>([Heinen 2012: 206](#))

<sup>5</sup>([Schmidt 2000: 415](#))

Signale ist anzumerken, dass es sich um elektrische Signale mit  $\gamma$ -Vorverzerrung handelt<sup>6</sup>. 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 Strecken im Studio genutzt<sup>7</sup>.

## 8.5 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 muss s/w kompatibel sein. Daher soll Farbfernsehsignal so gestaltet, dass man mit einem Schwarz/Weiß-Fernseher auch fernsehen ohne Farbe 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 werden zu können, wird das RGB-Signal dementsprechend angepasst. Um die erste Anforderung zu erfüllen, wird aus dem RGB-Signal ein Leuchtdichtesignal errechnet:

$$Y = 0,299 \cdot R + 0,587 \cdot G + 0,114 \cdot B \quad (8.1)$$

$$Y = 0,2126 \cdot R + 0,7152 \cdot G + 0,0722 \cdot B \quad (8.2)$$

Die erste Gleichung 8.1 ist für das SD-Signal, die zweite Gleichung für das HD-Signal. Auch hier spricht man wieder von elektrischen Signalen die  $\gamma$ -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)-Signal übertragen. Den Farbanteilen wird also das Leuchtdichtesignal abgezogen. Dadurch wie die Helligkeit von den Farbanteilen des Signals getrennt. Es werden absichtlich R und B gewählt, da G-Y nur geringe Pegel ergibt, da Y hauptsächlich durch den Grünanteil bestimmt ist.

Die Pegel dieser Farbdifferenzsignale können den maximalen Wert von 0,7 V bei Vollaststeuerung überschreiten und müssen daher angepasst werden<sup>8</sup> (Gleichung 8.3).

---

<sup>6</sup>(Schmidt 2000: 82)

<sup>7</sup>(Schmidt 2000: 83)

<sup>8</sup>(Schmidt 2000: 84)

$$C_R = 0,713(R - Y) \quad (8.3)$$

$$C_B = 0,564(B - Y) \quad (8.4)$$

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

$$C_R = 0,6350(R - Y) \quad (8.5)$$

$$C_B = 0,5389(B - Y) \quad (8.6)$$

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 abr nicht mehr von Belang.

# 9 Videotechnische Messgeräte

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

## 9.1 Waveformmonitor

Ein Waveformmonitor ist ein Oszilloskop für die Videomessung. Oszilloskope basieren auf der Braunschen Röhre mit einem Elektronenstrahl. Dieser wiederum regt einen Bildpunkt auf der Bildschirm des Gerätes an<sup>1</sup>. 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) 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 festgelegten Zeit durchlaufen<sup>2</sup>. Auf dem Bildschirm des Messgerätes wird der Pegel von 0-100 angezeigt, so wie der negative Bereich für den Synchronisationbrust bei -0,3V. Bei periodischen Signalen wird die Messung speziell getriggert, sodass die Pegelwerte der selben Messzeit und Phasenlänge stets übereinander liegen. Durch bestimmte Filter kann nur das Luminanzsignal, Chrominanzsignal oder beide dargestellt werden<sup>3</sup>.

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

## 9.2 Vektorskop

Der Farbton ist mit einem WFM-Monitor nicht gut erkennbar, da der Phasenwinkel der Farbanteilsignale des RGB-Signals im hochfrequenten Bereich schwer auslesbar sind. 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

---

<sup>1</sup>(Schmidt 2000: 109)

<sup>2</sup>(Schmidt 2000: 110)

<sup>3</sup>(Schmidt 2000: 111)

9.1).

$$U = 0,493(B - Y) \quad (9.1)$$

$$V = 0,877(R - Y) \quad (9.2)$$

Diese Anpassung wird dadurch verursacht, dass die Farbdifferenzsignale im FBAS-Signal in modulierter Form überlagert werden und daher im Pegel reduziert werden müssen<sup>4</sup>. Das FBAS-Signal ist eine abgewandelte Form des Komponentensignals und für diese Arbeit unrelevant.

Der Bildschirm eines Vektorkops 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). 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)

Danach werden alle Farben des Vektorkops 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 anerkannt<sup>5</sup>.

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

---

<sup>4</sup>(Schmidt 2000: 84)

<sup>5</sup>(Schmidt 2000: 114)

# 10 Vormessungen

Das Ziel der Hauptmessung ist, das Licht eines 1kW Stufenlinsenscheinwerfers, der mit einem Rosco 027 „Medium Red“ , Rosco 787 „Marius Red“ oder Rosco 789 „Blood Red“ gefiltert wird, mit dem Licht verschiedener LED-Scheinwerfer additiv zu mischen und dem Spektrum des Testscheinwerfers einen „Red Tail“ anzuhängen. Dafür wird in den Vormessungen beobachtet wie stark dieser „Red Tail“ ausgeprägt sein muss und welche Filter sich für einen „Red Tail“ 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. Bei den 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.

## 10.1 Aufbau und Messungen

Für die Messung wird der Scheinwerfer direkt neben dem folierten Stufenlinsenscheinwerfer plaziert, um den Messfehler durch unterschiedliche Winkel der Scheinwerfer so gering wie möglich zu halten. 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).

Den Scheinwerfern wird dann in 10% Schritten das rotgefilterte Licht des Stufenlinsenschwerfers 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.

## 10.2 Fazit aus der Vormessung

Die Auswirkungen des „Red Tail“ wird vorallendingen 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. Mit 50% zusätzlichem Rot sind die Farbwiedergabewerte so niedrig, dass der „Red Tail“ eine Verschlechterung 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 6000k-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.

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 zuätzliches Rotes ändert aber weder die Farbwiedergabewerte, noch machen sie eine größere Anpassung der Farben des K-Eye K20 nötig. Dieses Verhalten ist daher 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 selbst gebaute „Red Tail“ ist mit der Leistungsklasse eines 1kW-Leuchtmittel zu dunkel, um über den Sättigungspunkt hinauszukommen.

Für den Mac Encore CLD Wash kann man mit dem Rosco 027 „Medium Red“ eine ähnliche Tendenz wie bei dem K-Eye K20 feststellen. 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.

Die Tendenzen zeigen, dass der „Red Tail“ vorallendingen 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.

### 10.3 Referenzlicht

Als Referenzlicht ist der Arri Sun 5 mit einem frischen Leuchtmittel bestimmt worden, damit man die LED-Scheinwerfer an dieses Spektrum angeleichen kann. Dieser Scheinwerfer soll durch Abstand und Zoom auch auf eine Beleuchtungsstärke von 500lux gebracht werden. Bei einem größtmöglichen Abstand von 10m 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, dass dadurch ein dunkler Bereich in Mitten 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, allerdings ca. 600K wärmer als der Arri Sun 5 ist. So kommt es, dass die Vormessungen auf

## *10 Vormessungen*

6000K, die Hauptmessung jedoch auf 5400K eingemessen sind. Da nur die Tendenzen der Vormessung eine Rolle spielen und die Vormessung keine direkte Einwirkung auf die Hauptmessung hat, ist dieser Unterschied zu vernachlässigen.

# 11 Hauptmessung

Für Scheinwerfer im Veranstaltungsbereich werden mittlerweile verschiedene LED-Leuchtmittel verwendet. Am Anfang waren Scheinwerfer typisch, die mit einem RGB-Modul bestückt waren. Farben sind mit diesen Scheinwerfern gut darstellbar, ein gemischtes RGB-Weißlicht hingegen hat keine akzeptable Qualität. Scheinwerfer mit RGBW LEDs stellen eine Verbesserung der Weißlichtqualität dar, können aber damit immer noch das sichtbare Spektrum füllen. Daher gehen Scheinwerferhersteller dazu über Scheinwerfer mit noch mehr farbenen LEDs zu bauen (Multichip). So hat der Clay Paky K-Eye K20 beispielsweise 6 LEDs mit Rot, Grün, Blau, Lime, Amber und Cyan. Das daraus resultierende Spektrum hat eine hohe Farb- und Unbuntqualität. Andere Scheinwerfer setzen wiederum auf eine reinweiße LED-Engine mit nur weißen LEDs. Der Martin Mac Encore Wash CLD beispielsweise erreicht mit seiner LED-Engine die noch zusätzlich ein CMY-Mischung hat auch hohe Farb- und Unbuntqualitäten.

Für die Hauptmessungen werden vier Scheinwerfer mit Multichip-LED Engine und zwei Scheinwerfer mit reinweißer LED-Engine ausgewählt. Bei den Multichip-Scheinwerfer ist der zuvorgenannte Clay Paky K-Eye K20, mit 6 verschiedenen farbigen LEDs, dabei, als Alternative, der Robe Robin DL7F Wash, mit 7 verschiedenen farbigen LEDs, und der weltweit verbreitete ETC Source Four LED Series 2 Lustr, ebenfalls mit 7 verschiedenen farbigen LEDs. Dazu kommt eine 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 gab 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.

## 11.1 Messaufbau und Messungen

Der Messaufbau gleicht dem der in der Vormessung (Kapitel 10.1). Mit 7m Abstand werden die Scheinwerfer zum Messgerät aufgebaut und über Zoom- und Abstandsvariation auf ca. 500 lux Beleuchtungstärke eingestellt, nachdem sie auf das Arri D5-Referenzweiss abgeglichen worden sind. Es wird wiederum mit dem JETI specbos 1211 mit dem Standartdiffusor gemessen und mit dem UPRtek 350S gegenkontrolliert. Alle Scheinwerfer werden so nahe wie möglich an den 1kW Stufenlinsenscheinwerfer mit den roten Filterfolien herangestellt, um den Fehler der verschiedenen Winkel so

## *11 Hauptmessung*

gering wie möglich zu halten. Der zu messende Scheinwerfer ist dabei im rechten Winkel zum Messgerät angeordnet, der Stufenlinsenscheinwerfer leicht angewinkelt.

Jeder Scheinwerfer wird also 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 ähnlichem Farbort, um die Messungen vergleichbar zu machen. Wenn dem Scheinwerfer ein „Red Tail“ hinzugemischt wird, wird der Scheinwerfer erneut auf die Referenz angeglichen.

# 12 Messergebnisse

Die Tendenzen zeigen, dass der Ghibli, MAC Encore, Lustr und K-Eye K20 durch den Red Tail verbessert wurden. Wie in den Vormessungen zu sehen, zeigt sich dies in allen Farbwiedergabewerten, vorallendingen aber im TLCI. Der MAC Encore kann 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.

Die Erklärung liegt hier wie in der Vormessung an den beiden Vorteilen des „Red Tail“ : Es wird auf der einen Seite der tiefrote Bereich der Scheinwerfer aufgefüllt und zum anderen werden zum Ausgleich des zusätzlichen tiefroten Anteils wieder wertvolle Anteile in der Mitte des Spektrums dazugemischt. Spannend ist, das 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 645nm Rot-Peak in die Höhe schießt. Das Spektrum wird also unausgeglichener und dafür von den Farbwiedergabewerten bestraft.

Der Impression X4L konnte nicht durch ein zusätzliches rot verbessert werden. Dies liegt daran, dass das Spektrum, des X4Ls vorallendingen aus schmalbandigen Peaks besteht, die das Spektrum nicht ausfüllen. 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 Spektrum nicht, sondern vergrößert das spektrale Tief im 595nm Wellenlängebereich 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.

Bei dem Robe Robin DL7F haben wir im High-CRI Modus auch keine Verbesserung mit einem „Red Tail“ erzielen können. Das Spektrum des Robin DL7F ist durch viele Peaks und Täler gekennzeichnet, außer im Bereich von 510nm-550nm Wellenlänge, wo das Spektrum sehr breitbandig ist. Durch Angleichungen an den „Red Tail“ wird das Lime vermindert, das Tal im gelben Spektralbereich noch tiefer und der rot Peak wird erhöht. Das Spektrum wird also noch mehr in seine Extreme verzerrt und dass wird von den Farbwiedergabewerten bestraft.

## 12.1 Analyse der Farbwiedergabewerte

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. Dies verwundert bei einem TM-30, der mit seinen 99 Farben folglich keine tiefrote Referenz besitzt. Jedoch ist die Verbesserung des Rotanteils stehts im roten „binning“ zu erkennen(s. Kap. 6.4). Ebenso ist im CQS am 1. Referenzwert der dazugekommene

## 12.2 Fazit aus den Hauptmessungen

Aus den Hauptmessungen lässt sich schließen, dass der „Red Tail“ tendenziell die 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 Spektrum zu erklären und dadurch, 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 es die Farbwiedergabewerte des Scheinwerfers wieder verschlechtern würde (siehe Kap. 10.2). Daher sollte für jeden Scheinwerfer ein „Red Tail“ individuell ausbalanciert werden.

# 13 Umfrage

## 13.1 Anpassung der Scheinwerfer

Der nächste Schritt ist, auch über eine Kamera zu prüfen, welche Auswirkung der „Red Tail“ auf das Spektrum der Scheinwerfer hat. Dazu sollen Probanden verschiedener Hauftöne 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 (s. Kap ), gibt es drei Möglichkeiten fortzufahren:

1. Weißabgleich durch Scheinwerfer: Man gleicht die Kamera auf das Referenzweiß des Arris ab und dreht alle Farben der Scheinwerfer so hin, dass diese in der Kamera weiß erscheinen.
2. Weißabgleich durch 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 hingedreht worden sind.

Variante 1 macht den Bezug zu den Messwerten des JETI specbos 1211 kaputt, da die auf die Kamera angepassten Scheinwerfer dann nicht mehr die selbe Farbtemperatur, den selben Abstand zu Plank'schen Kurve oder einen ähnlichen Farbort haben. Variante 2 erhält diese Werte, aber es kann nicht mehr wissenschaftlich beschrieben werden, welche Veränderung die Kamera durch den Weißabgleich am Spektrum 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 Spektren der Scheinwerfer sind sehr unterschiedlich und werden daher auch von der Kamera so wahrgenommen.

Der Vollständigkeit halber werden alle 3 Varianten aufgezeichnet. 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 mit einer Farbtafel aufgezeichnet. Über ein Vektorskop ist deutlich sichtbar, was die verschiedenen Varianten für Auswirkungen auf die Farben in der Kamera haben. Dies ist jedoch für diese Arbeit irrelevant und wird an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt.

## 13.2 Auswahl der Kamera und der Probanden

Die Kamerawahl trifft auf eine Sony HDC-4300 UHD mit Weitwinkelobjektiv. Diese Kamera nutzt drei Bildwandler und keinen Bayer-Sensor. Bei einem Bayer-Sensor wird das Bild in 50% Grünanteil 25% Rotanteil und 25% Blauanteil aufgeteilt. Nur diese Farbanteile werden vom Sensor gespeichert, die restlichen 50% Grünanteile und 75% Rot- und Blauanteile des Bilders werden aus den Nachbarpixeln interpoliert. Die Folge daraus ist eine niedrigere Farbauflösung als mit 3 Bildwandlern<sup>1</sup>. Da die Bilder auf ihre Farbigkeit verglichen werden sollen, wird sich bewusst für eine Kamera mit drei Bildwandlern entschieden(siehe Kapitel 8.2).

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 (Kap.)ist jeder Hauttyp stark im roten Spektralbereich vertreten. Die Probanden haben einen nordischen, einen südländischen, einen normalen und einen braun-gebrannten Hauttyp.  
/

## 13.3 Erstellung der Bilder

Bei der Erstellung der Bilder werden die Probanden auf selber Augenhöhe nebeneinander gestellt. In der Mitte steht eine Graustufenkarte für den Weißabgleich. Nachdem die Scheinwerfer und Kamera angepasst sind, wie in Kapitel 13.1 beschrieben, werden die Probanden für 10 Sekunden gefilmt. 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.

---

<sup>1</sup>(Schmidt 2000: 380-381)

## 13.4 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 nach dem 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 soll, wird entschieden, nach der „Ratio-scaling method“ vorzugehen<sup>2</sup>, 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 befindet, 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 befindet, 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 ein 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 ist<sup>3</sup>. 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 werden<sup>4</sup> (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.

## 13.5 Aufbau und Durchführung der Umfrage

Die Umfrage wird in einem abgedunkelt Raum durchgeführt. Der 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

---

<sup>2</sup>(ITU-R 2002: 10)

<sup>3</sup>(ITU-R 1990: 385)

<sup>4</sup>(ITU-R 1990: 387)

## 13 Umfrage

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 13.4 erklärt und dann werden ihm alle Bilder zwei mal in einer zufälligen Reihenfolge gezeigt, wie von dem „Report ITU-R BT.1082“ empfohlen<sup>5</sup>. 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 die Tendenzen der Bilder kaputt gehen. Die ITU hält 15 Teilnehmer an der Umfrage für ausreichend<sup>6</sup>. Dies 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, als bei teilnehmerspezifischen Umfragen. Um die Statistik zu festigen haben 20 Probanden an der Umfrage teilgenommen. Eine Durchführung der Umfrage dauert ca. 15 Minuten.

---

<sup>5</sup>(ITU-R 1990: 368)

<sup>6</sup>(ITU-R 1990: 368)

# 14 Umfrageergebnisse

Die Tendenzen der Umfrage lassen erkennen, dass die Probanden die gezeigten Hauttöne, mit einem „Red Tail“ beleuchtet, als natürlicher befinden. Dieses Verhalten zeigen die Kurven des Source Four LED Series 2 Lustr, des MAC Encore Wash CLD und des K-Eye K20. Dies liegt zum einen daran, dass der zusätzliche tiefrote Anteil das Spektrum auffüllt, wo es für die Hauttöne wichtig ist. Zum anderen hilft die Anpassung an den „Red Tail“, dass Spektrum einwenig aufzufüllen und das Peak-Loch-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.

Das extreme Spektrum des Impression X4L sticht aus der Bilderreihe hervor und wirkt auf den Bildern rotstichig. Bei der Umfrage ist dieses Spektrum (mit oder ohne „Red Tail“) mit Abstand am besten bewertet worden. 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. Man ist es also durchaus gewohnt, dass Hauttöne rötlich erscheinen und dadurch werden die Bilder des Impression X4L auch als natürlich gesehen.

Beim Robin DL7F ist beim dritten Bild mit dem Rosco 787 „Marius Red“ ein kaputtes Bild in der Umfrage gelandet. Es ist deutlich sichtbar, dass die Kamera die Probanden zu hell darstellt und dadurch die Hauttöne sehr unnatürlich aussehen. 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. Wenn man dem Ghibli ein Rosco 027 „Medium Red“ dazumischt, und die Werte wieder auf den Ghilbi anpasst zeigen die Hauptmessung eine Verbesserung der Werte. Dagegen wirken die Probanden bei der Umfrage matt und krank und es ist keine Verbesserung sichtbar. Dies liegt am Spektrum des Ghibli, der mit seiner reinweißen LED-Engine Probleme hat, das Spektrum 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.

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 Hautty-

## *14 Umfrageergebnisse*

pen. 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. Ansonsten vervierfacht sich die Anzahl der 38 Bilder und damit erhöht sich die Länge der Umfrage auf eine Stunde.

# 15 Fazit

Sowohl im messtechnischen als auch im optischen Vergleich konnte mit dem „Red Tail“ das Licht tendenziell verbessert werden. Dieses Verhalten zeigt sich voralldingen beim TLCI um bis zu 16 Punkten. Ein zusätzlicher tiefroter Anteil verbessert den Scheinwerfer, wie in Kapitel 12.2 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 GLP und DL7F). 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 6.3). Daher konnte der Ghibli optisch nicht überzeugen.

Die Bilder sind alle mit einer Sony HDC-4300 UHD mit Weitwinkelobjektiv aufgezeichnet worden. Die Wirkung der Bilder sollte daher mit anderen Objektiven und Kameras überprüft werden. Auch bei anderen Hauttypen und Scheinwerfer gilt es den „Red Tail“ zu untersuchen. Der zusätzliche tiefrote Spektralanteil bei einem LED-Scheinwerfer muss also immer im Zusammenhang mit dem Spektrum des Scheinwerfers, der filmenden Kamera und der zu beleuchtenden Hauttöne gesehen werden. Die Tendenzen dieser Arbeit zeigen unter der Berücksichtigung der genannten Parameter, dass der „Red Tail“ den Scheinwerfer messtechnisch verbessert und optisch Hauttöne natürlicher aussehen lässt.

# **16 Ausblick**

- ausgiebiger Vergleich zwischen Weißabgleichen - red tail speziell auf Hautton angepasst

## **16.1 Unterkapitel mit Mathematik, Bildern und Querverweisen**

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Darstellung verschiedener Reflexion- (oben) und Transmissionsarten (unten) <sup>1</sup> . . . . .	6
2.2	Der Lichtstrom gibt an, wie viel sichtbares Licht eine Lichtquelle abstrahlt. <sup>2</sup> . . . . .	7
2.3	Die Beleuchtungsstärke gibt an, wie viel Lichtstrom auf eine bestimmte Fläche trifft. <sup>3</sup> . . . . .	9
2.4	Die Lichtstärke gibt an, wie viel Lichtstrom auf eine bestimmte Richtung im Raum verteilt ist. <sup>4</sup> . . . . .	10
2.5	Die Leuchtdichte hat einen Bezug auf die menschliche Helligkeitswahrnehmung. <sup>5</sup> . . . . .	11
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. <sup>6</sup> . . . . .	18
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. <sup>7</sup> . . . . .	19
4.3	Darstellung der „Zonentheorie“ von v. Kries <sup>8</sup> . . . . .	20
4.4	Die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau der additiven Farbmischung ergeben zusammen weiß (unbunt). <sup>9</sup> . . . . .	21
4.5	Die drei Grundfarben Cyan, Magenta und Gelb der subtraktiven Farbmischung ergeben zusammen schwarz (unbunt). <sup>10</sup> . . . . .	23
4.6	Spektrale Strahldichtefaktoren der 15 Hauttöne gemessen von Vinh und Khanh. <sup>11</sup> . . . . .	24
5.1	Beim RGB-Würfel werden alle Primärvalenzen R, G, B als gleich lange Vektoren angenommen. <sup>12</sup> . . . . .	26
5.2	Schematische Darstellung des Farbzuordnungsexperiments von Wright und Guild. <sup>13</sup> . . . . .	27
5.3	Die XYZ-Spektralwertfunktionen, angepasst aus den r. <sup>14</sup> . . . . .	28
5.4	Darstellung der CIE-XYZ Farbtafel eines 2° Normalbeobachter. <sup>15</sup> . . . . .	29
5.5	Detailansicht des XYZ-Farbraumes mit den „Geraden ähnlichster Farbtemperatur“ <sup>16</sup> . . . . .	30
5.6	Abbildung der MacAdam Ellipsen im XYZ-Farbraum <sup>17</sup> . . . . .	31

## Abbildungsverzeichnis

5.7	Abbildung der MacAdam Ellipsen auf der UCS-Farbtafel <sup>18</sup> . . . . .	32
5.8	Darstellung des $\Delta u'v'$ auf der UCS-Farbtafel . . . . .	33
6.1	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 <sup>19</sup> . . . . .	36
6.2	Messung einer warmweißen LED-Leuchte (Ausschnitt aus dem Demofile des Programmes „LiVal“ von der Firma JETI): Links ist das Lichtspektrum der Leuchte dargestellt, rechts die gemessenen CRI-Werte <sup>20</sup> . . . . .	36
6.3	Alle Referenzfarben des CQS mit voller Sättigung <sup>21</sup> . . . . .	37
6.4	Ausschnitt aus dem Programm „LiVal“ von der Firma JETI: Demo Spektrum einer warmweißen LED (2942K) mit $Q_f = 81$ . . . . .	38
6.5	Ausschnitt aus dem Programm „LiVal“ von der Firma JETI: Die fünfzehn Referenzfarben(blau) im CIELAB-Farbraum im Vergleich zu den gemessenen Werten (rot) . . . . .	39
6.6	Blockschaltbild einer TLCI-Wertbestimmung <sup>22</sup> . . . . .	40
6.7	TLCI-Ergebnisprotokoll eines Arri L7-C LED Fresnelscheinwerfers <sup>23</sup> .	43
6.8	Alle 99 Referenzfarben des TM-30 <sup>24</sup> . . . . .	45
6.9	Koordinatensystem aus $R_f$ und $R_g$ : Die hellgraue Zone steht für TM-30-Werte die nicht auf der Plank'schen Kurve liegen und die dunkelgraue Zone steht für alle Werte, die nicht mehr als „weiß“ angesehen werden. <sup>25</sup> . . . . .	46
6.10	Wie sich die Farben der Testleuchte verhalten ist in der Vektorgraphik des $R_g$ -Wertes anschaulich dargestellt. Der schwarze Kreis stellt die Referenzleuchte dar, der rote die getestete. <sup>26</sup> . . . . .	47
6.11	Wie sich die Farben der Testleuchte verhalten ist in der Vektorgraphik des $R_g$ -Wertes anschaulich dargestellt. Der schwarze Kreis stellt die Referenzleuchte dar, der rote die getestete. <sup>27</sup> . . . . .	48
7.1	Abbildung der Interferenz am optischen Gitter <sup>28</sup> . . . . .	50

# Tabellenverzeichnis

2.1	Verschiedene Beispiele für $\Phi^{29}$	8
2.2	Verschiedene Beispiele für $E^{30}$	9
2.3	Verschiedene Beispiele für $I^{31}$	10
2.4	Verschiedene Beispiele für $L^{32}$	12
6.1	$R_a$ eingeteilt in verschiedene Stufen <sup>33</sup>	35
6.2	$Q_a$ eingeteilt in verschiedene Stufen <sup>34</sup>	42
7.1	Vergleich zweier Spektrometer <sup>35</sup>	51

# Literaturverzeichnis

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](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](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](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://citeserx.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](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](http://flexikon.doccheck.com/de/Photopisches_Sehen), 10.05.2016, letzter Zugriff 18.06.2018

Production Partner: „Farbwiedergabe: TM-30-15, CRI und Co.“ <https://www.production-partner.de/basics/farbwiedergabe-tm-30-15-cri-und-co/>, 22.02.2018, letzter Zugriff 20.06.2018

## Literaturverzeichnis

- Gigahertz-Optik: „Grundlagen der Lichtmesstechnik“ <https://www.gigahertz-optik.de/de-de/grundlagen-lichtmesstechnik/>, 2012, letzter Zugriff 20.06.2018
- Mungenast, Philipp: „Der Graßmannsche Farbraum“, [https://www.uni-koblenz.de/~cg/ss09/Proseminar\\_Farbmanagement/Der%20Grassmannsche%20Farbraum.pdf](https://www.uni-koblenz.de/~cg/ss09/Proseminar_Farbmanagement/Der%20Grassmannsche%20Farbraum.pdf), 08.06.2009, letzter Zugriff 20.07.2018
- 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
- Ris, Hans Rudolf: *Beleuchtungstechnik für Praktiker*, 5. Aufl., VDE Verlag
- Heinen, Gerd: *AV-Medientechnik*, 1. Aufl., Europa-Lehrmittel 2012

## Literaturverzeichnis

- 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