

<p style="text-align: center;">T e c h n i s c h e R i c h t l i n i e der öffentlich-rechtlichen Rundfunkanstalten in der Bundesrepublik Deutschland</p>	<p style="text-align: center;">Richtlinie Nr. 8/1.1</p>
<p style="text-align: center;">Bearbeiter dieses Heftes: Fernsehbetriebsleiter-Konferenz Herausgeber: Institut für Rundfunktechnik</p>	<p>1. Auflage</p>
	<p>37 Seiten</p>
	<p>Datum: März 2018</p>
<p style="text-align: center;">Beschreibung und Messung fernsehtechnischer Systeme (Fortführung von Pflichtenheft Nr. 8/1.1: Richtlinien für die Messung der Pflichtenheftsbedingungen an Videogeräten)</p> <p style="text-align: center;">Kapitel 7: Messverfahren und Analysen zur LED-Technik im Studio</p>	

Schutzrechte - Hinweis:

Es kann nicht gewährleistet werden, dass alle in dieser Richtlinie enthaltenen Forderungen, Vorschriften, Richtlinien, Spezifikationen und Normen frei von Schutzrechten Dritter sind.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Zitierfreiheit des Urheberrechtsgesetzes ist ohne vorherige schriftliche Zustimmung des IRT nicht zulässig.

Inhaltsverzeichnis

Inhalt

7.1.	Einleitung.....	3
7.2.	Grundlagen.....	3
7.2.1.	SI-Einheiten.....	3
7.2.2.	Farblehre.....	5
7.2.2.1.	Arten der Entstehung von Farbe.....	5
7.2.2.2.	Farbmischung.....	5
7.2.3.	CIE-Normfarbtafeln.....	6
7.2.4.	Farbtemperatur.....	8
7.2.4.1.	Normlichtarten.....	9
7.2.5.	Farbräume.....	10
7.2.6.	Unterschiedliche Funktionsprinzipien von LED-Lichtquellen.....	11
7.3.	Einsatz in der Produktionstechnik.....	13
7.3.1.	Lichttechnische Beurteilung von LED-Leuchten.....	13
7.3.2.	Vorteile von LED-Scheinwerfern.....	13
7.3.3.	Nachteile von LEDs.....	14
7.4.	Sicherheitsaspekte.....	18
7.5.	Messtechnik.....	20
7.5.1.	Klassifizierung.....	20
7.5.2.	Messaufbau.....	20
7.5.3.	Messparameter.....	22
7.5.3.1.	Farbwiedergabeindex.....	23
7.5.3.1.1.	Colour Rendering Index CIE 13.3.....	23
7.5.3.1.2.	TM30-15 Messmethode.....	24
7.5.3.1.3.	TLCI.....	26
7.5.3.1.4.	Beispiele für Messergebnisse der verschiedenen Messverfahren ..	27
7.5.3.2.	Messung der Modulationsfrequenz der Lichtquelle.....	28
7.5.3.3.	Beurteilung im realen Umfeld.....	28
7.5.3.4.	Messtechnik zur Blaulichtgefährdung.....	29
7.5.4.	EMV.....	29
7.6.	Normen und Richtlinien.....	30
7.7.	Literaturverzeichnis.....	30
7.8.	Anhang.....	31
7.8.1.	Ableitung des TLCI.....	31
7.8.1.1.	Einführung.....	31
7.8.1.2.	Software Installation.....	31
7.8.1.3.	Mögliche Arten von Reports.....	31
7.8.1.4.	EBU R137 report.....	32
7.8.1.5.	Cartwheel, Colourists Advice.....	35
7.8.1.6.	Farbflächen als Datei.....	37

7.1. Einleitung

Die anhaltenden Entwicklungen bei den Leuchtmitteln verursachen einen Wandel der Lichttechnik für Film- und Fernsehaufnahmen. Ein Meilenstein war die Halogenmetall-Dampflampe, welche Tageslichtaufnahmen im Studio ermöglichte. Verbunden damit war aber leider auch eine hohe Leistungsaufnahme und Wärmebelastung. Die Reduzierung der Leistungsaufnahme und Wärmebelastung durch den Einsatz von Leuchtstofflampen erwies sich wegen des inhomogenen Lichtspektrums in Verbindung mit Videokameras als problematisch. Mit der Entwicklung von neuen LED-Leuchtkörpern mit größerer Lichtausbeute besteht nun auch die Möglichkeit, diese für Fernsehproduktionen zu nutzen.

Im Nachfolgenden werden die Vor- und Nachteile von LED-Leuchtmitteln erläutert und die Grundlagen sowie Anforderungen an ihren Einsatz beschrieben. In separaten Kapiteln werden Sicherheitsaspekte und die notwendige Messtechnik behandelt.

7.2. Grundlagen

7.2.1. SI-Einheiten

Lichtstrom

Der Lichtstrom beschreibt die gesamte Lichtmenge, die von einer Lichtquelle abgegeben wird. Durch die Einbeziehung der spektralen Empfindlichkeit des Auges $V(\lambda)$ ergibt sich die Größe Lumen (lm).

Formelzeichen: Φ_v

SI-Einheit: Lumen [lm]

Lichtquelle	Lichtstrom
Glühlampe 60 W	600 lm
Glühlampe 100 W	1500 lm
Leuchtstoffröhre 40 W	2300 lm
Quecksilberdampflampe 100 W	4500 lm

Tabelle 1: Beispiele für Lichtströme

Lichtstärke

Der Lichtstrom Φ wird von einer realen Lichtquelle immer räumlich ungleichmäßig verteilt. Die Lichtstärke bezeichnet den Teil des Lichtstroms, der in eine bestimmte Richtung abgestrahlt wird. Die Lichtstärke ist unabhängig vom Abstand zur Leuchtquelle, sie hängt nur vom betrachteten Raumwinkel ab.

Formelzeichen: I

SI-Einheit: Candela [cd]

Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke ist ein Maß für die Helligkeit an einem bestimmten Ort. Sie gibt an, wie viel Licht tatsächlich an einem Ort eintrifft. Berechnet wird die Beleuchtungsstärke aus dem Lichtstrom, der auf eine definierte Fläche trifft.

Formelzeichen: E_v

SI-Einheit: Lux [lx]

Lichtverhältnis	Beleuchtungsstärke
Mittagssonnenlicht im Sommer	100.000 Lux
Bedeckter Himmel im Sommer	10.000 Lux
Regenwetter mit dunklen Gewitterwolken	1000 Lux
Treppenhausbeleuchtung	100 Lux
Straßenbeleuchtung	10 Lux
Mitternacht bei Vollmond	0,2 Lux
Mondloser Sternenhimmel bei Nacht	0,0005 Lux

Tabelle 2: Beispiele für Beleuchtungsstärken

Leuchtdichte

Die Leuchtdichte ist das fotometrische Maß für Helligkeit. Sie gibt an, welche Lichtstärke I von einer bestimmten Oberfläche A aus in eine bestimmte Raumrichtung abgestrahlt wird. Eine Lichtquelle erscheint also umso heller, je kleiner ihre Fläche im Vergleich zur Lichtstärke I ist. Die Leuchtdichte ist das, was Menschen als Helligkeit wahrnehmen.

Formelzeichen: L

SI-Einheit: Candela pro Quadratmeter [cd/m²]
Nit [1 nt = 1 cd/m²]

Lichtquelle	Leuchtdichte
Sonne am Mittag	1.600.000.000 cd/m ²
100 W Glühlampe klar	10.000.000 cd/m ²
Blauer Himmel	10.000 cd/m ²
Kerzenflamme	5.000 cd/m ²
Nachthimmel	0,001 cd/m ²

Tabelle 3: Beispiel für Leuchtdichten herkömmlicher Lichtquellen

7.2.2. Farblehre

7.2.2.1. Arten der Entstehung von Farbe

Man unterscheidet drei unterschiedlichen Arten der Entstehung von Farbe: Selbstleuchtende Farben, Körperfarben und durchleuchtende Farben.

Bei selbstleuchtenden Farben entsteht der Farbeindruck durch eine Strahlungsquelle, bei welcher das Licht direkt oder durch Filter in das Auge gelangt.

Bei den Körperfarben kommt der Farbeindruck durch die Reflexion von Licht an der Oberfläche eines Körpers/Gegenstandes zustande. Die von beleuchteten Körpern zurückgestrahlte Lichtmenge ist proportional zur Intensität der Beleuchtung; man nennt den Proportionalitätsfaktor Reflektanz. Die Reflektanz variiert mit der Wellenlänge, so dass verschiedene Bereiche des Spektrums unterschiedlich stark reflektiert werden.

Der Farbeindruck, der von einem nicht selbstleuchtenden Objekt ausgeht, ist also einerseits von der betreffenden Lichtquelle und andererseits von der Reflexionseigenschaft des Körpers abhängig.

Die dritte Art der Farbe, die Durchsichtfarbe, entsteht durch Filterung, bei der ein Teil des Spektrums entfernt bzw. in dessen Intensität verringert wird.

7.2.2.2. Farbmischung

Die subtraktive Farbmischung

Bei der subtraktiven Farbmischung werden eine oder mehrere Spektralfarben aus dem weißen Licht herausgefiltert bzw. absorbiert, so dass ein Rest des Spektrallichts übrig bleibt bzw. von einem Körper reflektiert wird, der einen neuen Farbeindruck hervorruft. Die Farben Cyan, Gelb und Magenta sind die Primärfarben der subtraktiven Farbmischung. Werden von weißem Licht alle spektralen Anteile herausgefiltert bzw. absorbiert, so entsteht der Farbeindruck „Schwarz“.

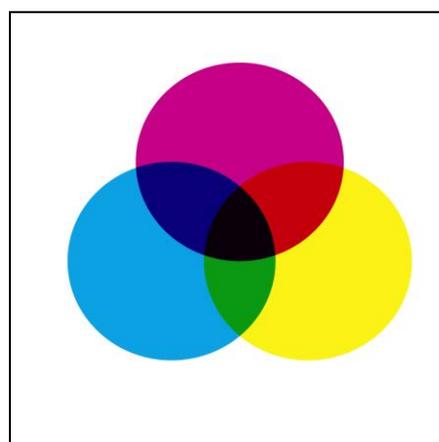


Bild 7.2. 1: Subtraktive Farbmischung

Die additive Farbmischung

Im Gegensatz zur subtraktiven Farbmischung werden bei der additiven Farbmischung zwei oder mehrere Spektralfarben zu einer neuen Farbe gemischt. Es haben sich die Farben Rot, Grün und Blau als günstigste Primärfarben erwiesen. Mit diesen lassen sich fast alle in der Natur vorkommenden Farben einschließlich Weiß mischen.

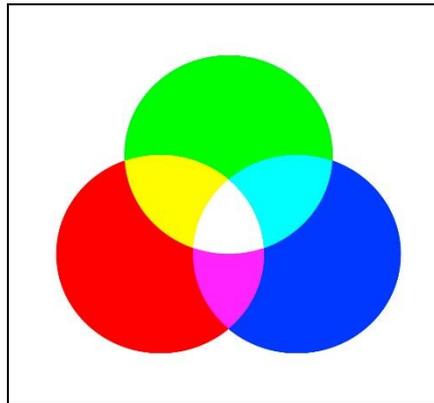


Bild 7.2. 2: Additive Farbmischung

Bei der Erzeugung von Licht mit LED-Technik kommt die additive Farbmischung zum Einsatz.

7.2.3.CIE-Normfarbtafeln

Um Farben objektiv beschreiben zu können, wurden verschiedenen Modelle entwickelt. Eines davon arbeitet mit drei Grundfarben, sogenannten Primärvalenzen. Werden mit drei virtuellen Primärvalenzen XYZ die Achsen eines Koordinatensystems beschrieben, ergibt sich durch Normierung auf $X_n = Y_n = Z_n$ der im nachfolgenden dargestellte Würfel.

Innerhalb eines durch die Primärvalenzen X_n , Y_n und Z_n aufgespannten Würfels liegen alle durch additive Farbmischung theoretisch erzeugbaren Farben. Alle sichtbaren Farben liegen innerhalb des „tütenförmigen“ Raumbereichs mit „schuhsohlenförmiger“ Umrandung.

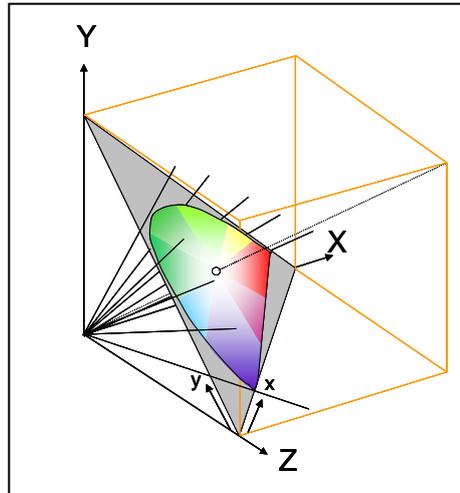


Bild 7.2. 3: Darstellung aller sichtbaren Farben mit den virtuellen Primärvalenzen X,Y und Z

Um die im dreidimensionalen Raum gemessenen XYZ Farborte in einem zweidimensionalen Koordinatensystem darzustellen, werden die Normfarbwerte xyz verwendet:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

Da die Summe $x+y+z = 1$ ergeben muss, genügen zur Angabe des Farbortes die Normfarbwertanteile x und y . Um zu erreichen, dass gleiche geometrische Entfernungen empfindungsgemäß gleichen Farbabständen entsprechen, werden die Normfarbwerte nach folgender Formel in u' v' umgerechnet.

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

Damit ergeben sich folgende Diagramme:

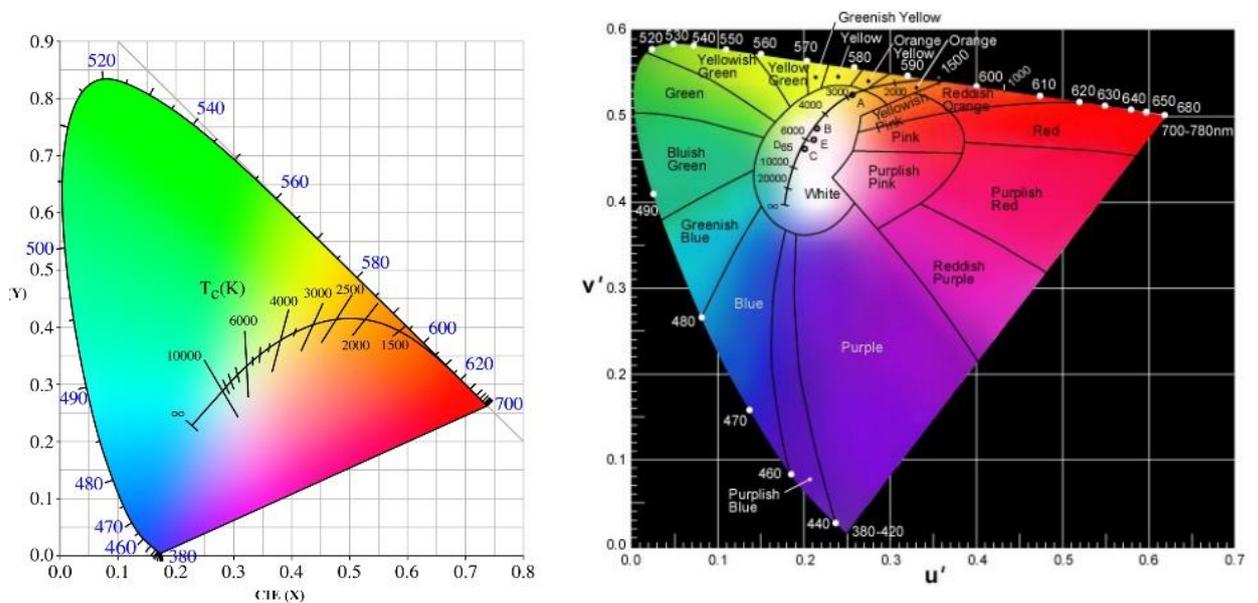


Bild 7.2. 4: zweidimensionale xy-/ u'v'-Darstellung der sichtbaren Farben

7.2.4. Farbtemperatur

Bestimmte Arten von Lichtquellen senden Lichtstrahlen aufgrund ihrer eigenen Temperatur aus, die sogenannten thermischen Strahler. Zum Beispiel: die Flamme einer Kerze (ca. 1400°C) oder der Glühfaden einer Glühlampe (2500°C bis 3000°C) aber auch die Sonne (5500°C-6000°C an der Oberfläche).

Um einen solchen Strahler physikalisch zu beschreiben wurde ein Modell eines idealisierten Strahlers entwickelt, der angenähert auch realisiert werden kann. Diese idealisierte Lichtquelle, der „Planksche Strahler“, besteht aus einem Hohlraum dessen Wände eine bestimmte Temperatur T (angegeben in K) besitzen und ein kleines Loch durch das die Strahlung nach außen dringen kann.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Farborte eines Plankschen Strahlers in der Normfarbtafel in Abhängigkeit von der Temperatur. Sie liegen auf der so genannten Plankschen Kurve, die bei niedrigen Temperaturen am langwelligen Ende des Spektralfarbenzuges entspringt über entsättigtes Gelb zum Weißpunkt verläuft und weiter auf das blaue Ende des Spektralfarbenzugs zuläuft bis sie für extrem hohe Temperaturen bei einem ungesättigtem Blau endet.

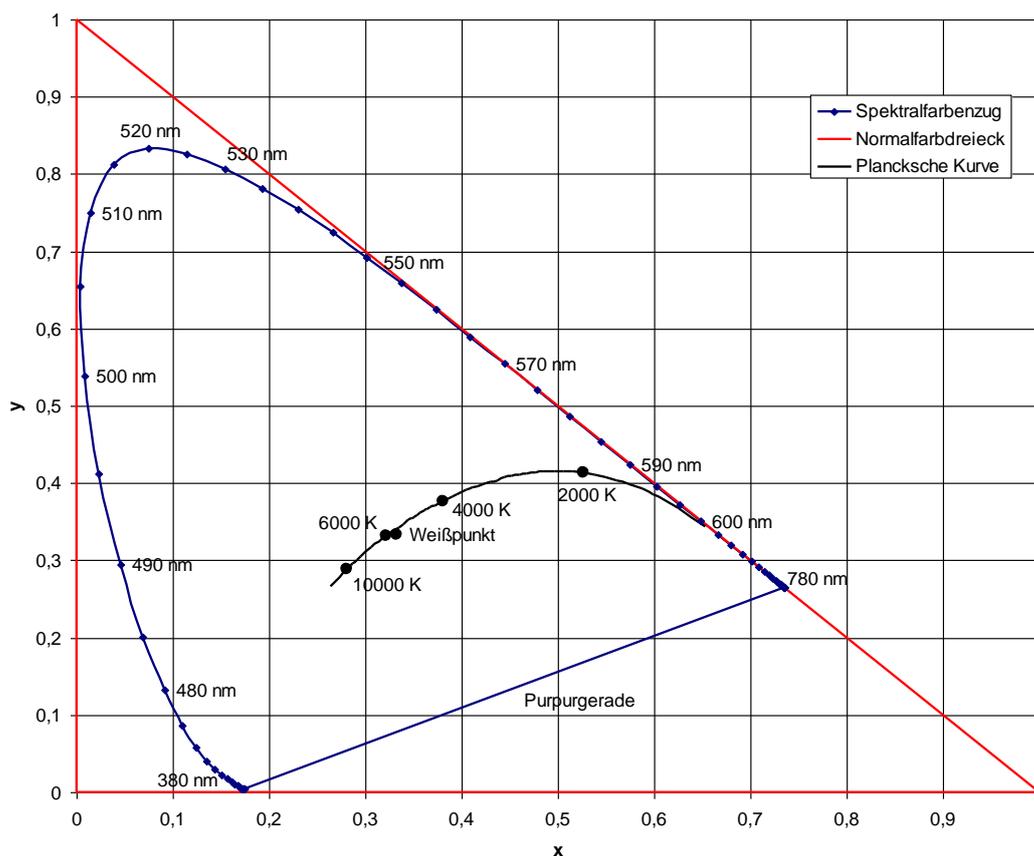


Bild 7.2. 5: Kurve des Planckschen Strahlers im xy-Diagramm

Lichtquelle	Farbtemperatur
Kerze	1500 K
Glühbirne 100 W	2800 K
Halogenlampe	3200 K
Leuchtstoffröhre (kaltweiß)	4000 K
Mittagssonne	5500 - 5800 K
Blitzlichtaufnahme	6000 K
Bedeckter Himmel	6500 - 7500 K

Tabelle 4: Beispiel für Farbtemperaturen verschiedener Lichtquellen.

Streng genommen ist die Farbtemperatur von Temperaturstrahlern abgeleitet und dient bei Lichtquellen mit nicht kontinuierlichem Lichtspektrum wie z.B. Leuchtstofflampen oder LED-Lichtquellen nur als Bezug.

7.2.4.1. Normlichtarten

Eine Normlichtart ist eine Lichtart mit genau definierter relativer spektraler Strahlungsverteilung. So wurden unter anderem die folgenden Normlichtarten von der CIE genormt:

Lichtart	T	x	y	u'	v'
A	2856 K	0,4476	0,4074	0,2560	0,5243
B	4875 K	0,3484	0,3516	0,2137	0,4852
C	6774 K	0,3101	0,3162	0,2009	0,4609
D55	5500 K	0,3320	0,3480	0,2039	0,4810
D65	6504 K	0,3127	0,3290	0,1978	0,4683
D75	7500 K	0,2990	0,3150	0,1935	0,4586
D93	9300 K	0,2850	0,2930	0,1917	0,4435
E (Weiß)	----	0,3333	0,3333	0,2105	0,4737

Tabelle 5: Normlichtarten

Für die Lichtart des Tageslichts wurde die Normlichtart D65 ermittelt. Diese Tageslichtkurve wurde durch einen komplizierten Mittelungsprozess aus vielen Messungen des Tageslichtspektrums zu unterschiedlichen Tageszeiten, Witterungsverhältnissen und an verschiedenen Orten gewonnen.

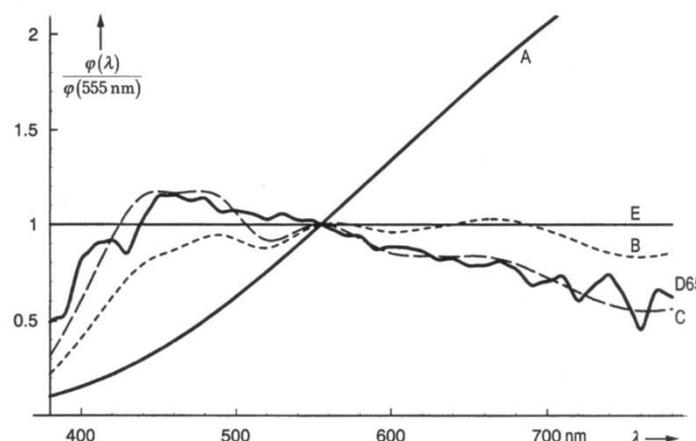


Bild 7.2. 6: Spektrale Strahlungsverteilung von Normlichtarten

7.2.5. Farbräume

Als Farbraum bezeichnet man einen fiktiven Körper, der durch mindestens drei Parameter (z.B. R, G, B) der Farbmetrik beschrieben wird.

Der RGB-Farbraum des Farbfernsehensystems wurde ursprünglich durch die Eigenschaften der Phosphore des Wiedergabegerätes (z.B. EBU-Phosphor) bestimmt.

Die heute verwendeten Farbräume können größer sein als der ursprüngliche RGB-Farbraum.

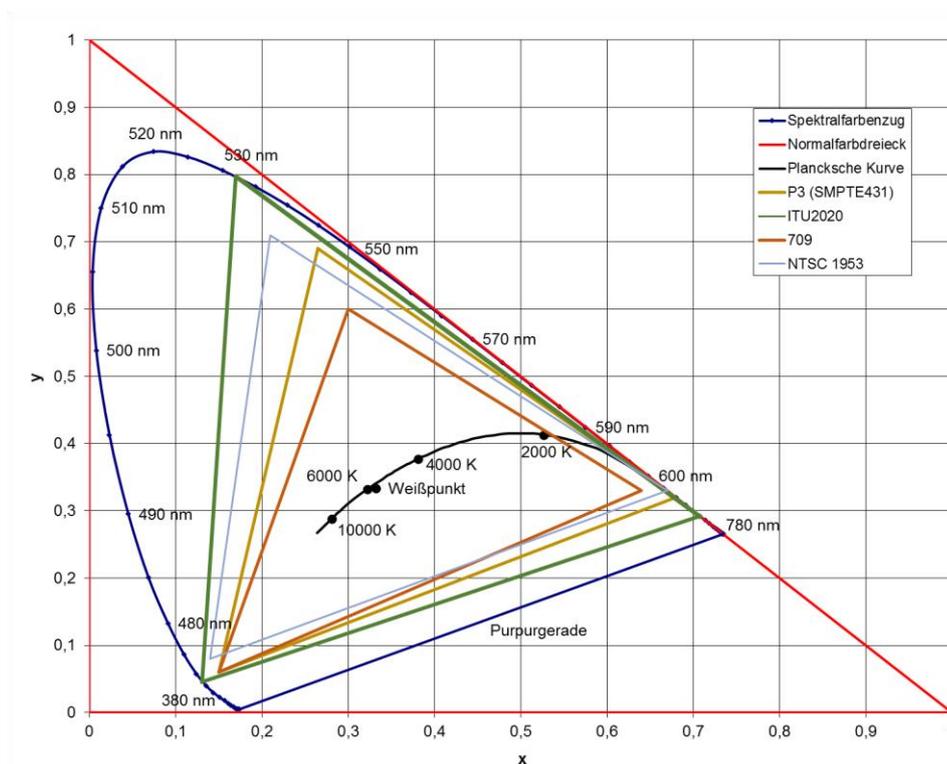


Bild 7.2. 7: Primärfarborborte der Farbräume ITU-R BT.709, ITU-R BT.2020 und SMPTE RP 431 Annex C.1 (P3-Farbraum)

Um eine natürliche Farbwiedergabe zu gewährleisten, muss die Szenenbeleuchtung aus Lichtquellen bestehen, die innerhalb des gewählten Farbraumes liegen. Bei Lichtquellen, die Spektralanteile außerhalb des Farbraumes haben, ist eine Fehlfarbendarstellung zu erwarten.

7.2.6. Unterschiedliche Funktionsprinzipien von LED-Lichtquellen

Weißes Licht kann mit LEDs auf verschiedene Arten erzeugt werden. Die gängigste Methode ist die Kombination einer blauen LED mit einem Leuchtstoff, dem sogenannten Phosphor (phosphorkonvertierte LED). Dabei werden durch das blaue LED-Licht diese Leuchtstoffe zur Emission von gelbem Licht angeregt. Das dabei entstehende Mischprodukt ergibt in der Summe weißes Licht. Durch die geeignete Zusammensetzung der Emissionsfarben der Leuchtstoffe und der Restemission der blauen LED können sehr viele unterschiedliche Arten von weißem Licht hergestellt werden.

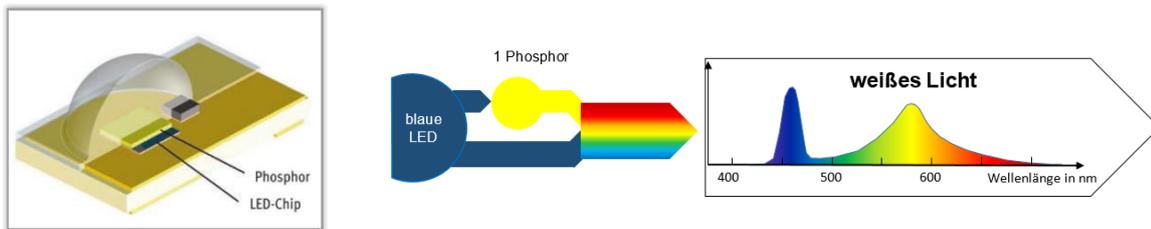


Bild 7.2. 8: typischer Aufbau einer weißen phosphorkonvertierten LED mit einem Phosphor

Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung von weißem Licht ist die Kombination von UV-LEDs mit Leuchtstoffen, wobei keine Überlagerung der Restemission stattfindet. Hierbei sind drei Leuchtstoffe erforderlich, um verschiedene Weißfarben zu erzeugen.

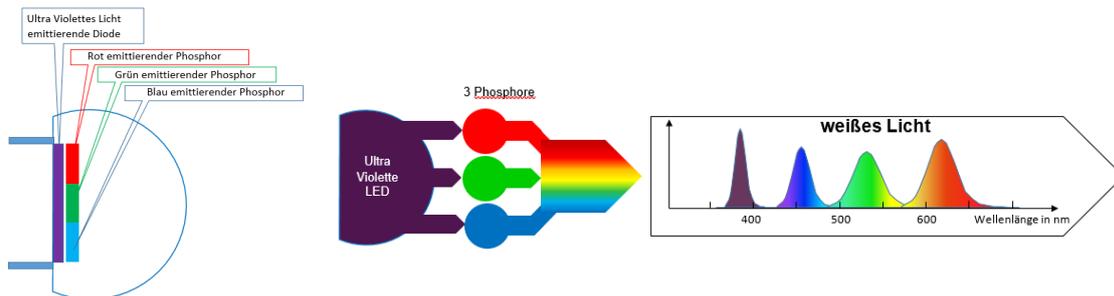


Bild 7.2. 9: typischer Aufbau einer weißen phosphorkonvertierten LED mit drei Phosphore

Weitere Wege zur Erzeugung von weißem Licht, sind die Kombinationen verschiedenfarbiger LEDs, oder einer LED mit Leuchtstoffen und farbigen LEDs.

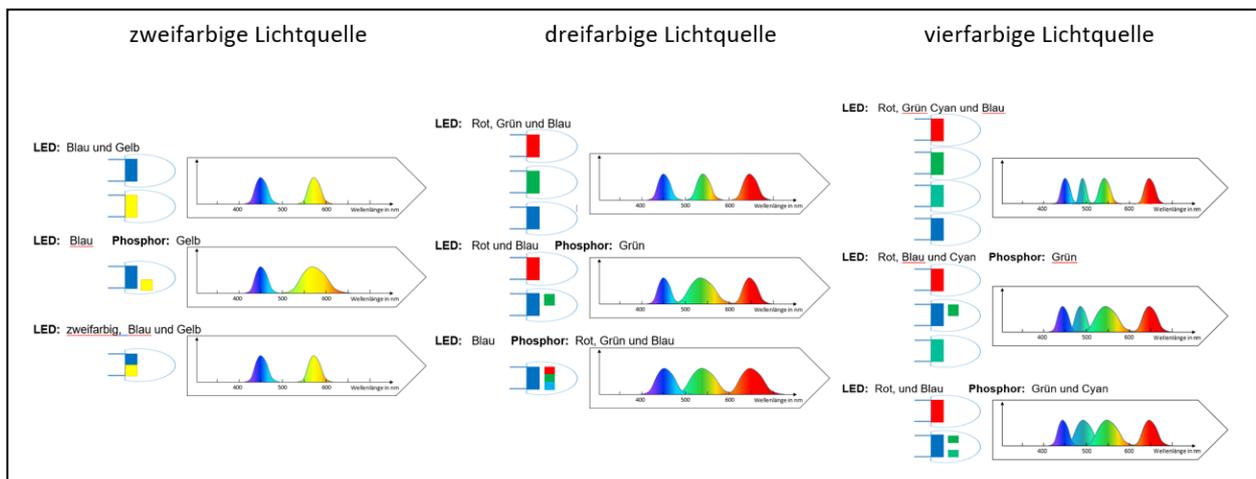


Bild 7.2. 10: Beispiele zur Erzeugung von weißem Licht

Um einen gleichmäßigen Frequenzgang zu erhalten wird das optische Spektrum mit speziellem Filterglas oder durch Ergänzung mit weiteren farbigen LEDs entsprechend abgestimmt.

Remote Phosphor

Die Remote Phosphor-Technik basiert auf austauschbaren Phosphorscheiben und ermöglicht eine Effizienzsteigerung von bis zu 30 Prozent gegenüber der herkömmlichen LED-Technik für Weißlicht. Durch die Abtrennung der Phosphorschicht, die für die Bildung von weißem Licht notwendig ist, lassen sich die Varianz im Weißlichtbereich und die Temperaturabhängigkeit im Gegensatz zu LEDs mit direkt appliziertem Phosphor verringern bzw. vermeiden. Austauschbare Phosphorscheiben - Remote Phosphor - ermöglichen eine Änderung der Farbtemperatur und des Farbspektrums.

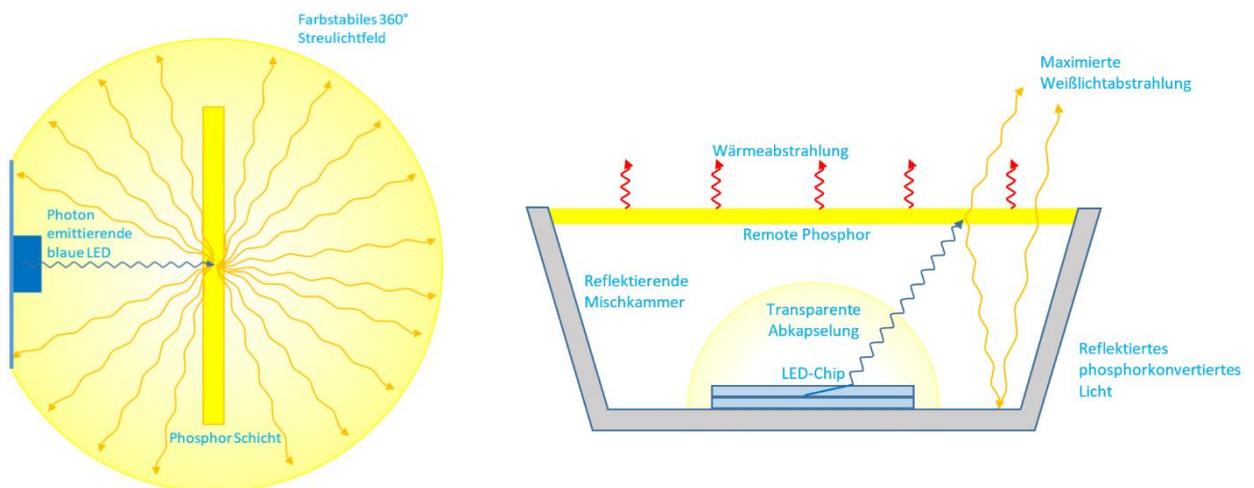


Bild 7.2. 11: Beispiel eines Remotephosphor Leuchtmittels

Zur Erhöhung der Lichtleistung bzw. zur Abstimmung der Farbtemperatur werden verschieden blau strahlende LED-Chips eingesetzt. Die Vorsatzscheibe und die Mischkammer erzeugen einen homogenen Lichtaustritt und verhindern sichtbare, einzelne und teils blendende Lichtpunkte. Es sind auch andere wie z.B. kuppel- und domförmige Vorsätze erhältlich.

Da die blau strahlenden LED-Chips Licht abgeben die das menschliche Auge schädigen können muss durch geeignete Maßnahmen (Sicherheitsschalter) der direkte Blick in dieses Licht bei abgenommener Phosphorscheibe verhindert werden.

7.3. Einsatz in der Produktionstechnik

Die LED-Technik wird in der Produktion zunehmend eingesetzt und ersetzt mehr und mehr herkömmliche Lichtquellen. Bisher wurden in erster Linie LEDs als Ersatz im Dekorations- und Medienbereich eingesetzt. Immer mehr Hersteller bieten auch Scheinwerfer für den Studioeinsatz und als Effektlicht an. Für die Anwendung als Hintergrundeffekte gibt es Beispiele wie LED-Wände, die auch bewegte Bilder darstellen können.

7.3.1. Lichttechnische Beurteilung von LED-Leuchten

Bei der Auswahl des geeigneten Scheinwerfers sind folgende Kriterien zu prüfen:

- Ist das Beleuchtungsstärkemaximum mittig angeordnet und nimmt das Licht zu den Rändern des Lichtaustrittes gleichmäßig ab?
- Sind Mehrfachschatten verursacht durch einzelne LED-Element sichtbar?
- Welche Wirkung haben die Scheinwerfer Tore und wie sehen die Übergänge aus?
- Ist eine hinreichend stabile Farbtemperatur gewährleistet oder gibt es Korrekturmöglichkeiten (mechanisch oder elektronisch) und wie wirksam sind sie?
- Wie werden Lichtfarben erzeugt und in welcher Qualität?
- Kann der Lichtkegel fokussiert werden?

7.3.2. Vorteile von LED-Scheinwerfern

Ein großer Vorteil von LED-Scheinwerfern ist die größere Funktionalität in der Beeinflussung von lichttechnischen Parametern.

So ist an erster Stelle die Regelbarkeit der Helligkeit bei gleichbleibender Farbtemperatur zu erwähnen. Ein anderes Leistungsmerkmal ist je nach Scheinwerfertyp die Einstellbarkeit der Lichtfarben und somit auch der Farbtemperatur.

LED-Scheinwerfer sind wesentlich energieeffizienter. Durch den besseren Wirkungsgrad reduziert sich die Wärmeentwicklung und damit ist auch ggf. eine geringere klimatechnische Anforderung in den Studios ausreichend. Durch die geringere Wärmeentwicklung können die Steuerung bzw. die Vorschaltgeräte in den Scheinwerfer integriert werden. Die LED-Technik ermöglicht für den mobilen Einsatz Akkulosungen mit einer verbesserten Betriebsdauer.

Lampentyp	Typische Leistungsaufnahme in Watt	Lichtausbeute in Lumen pro Watt
Glühlampe	40-60	etwa 12
Halogenlampe	25-50	15-20
Kompaktleuchtstofflampe	5-15	40-65
Halogenmetaldampflampe	20-400 (Haushalt)	50-117
Weißer LED	3-100	20-200
Natriumdampflampe	35-1000	100-200

Tabelle 6: Lichtausbeute ausgewählter Leuchtmittel

Durch die Verwendung von stoßunempfindlichen Materialien sind LED-Leuchtmittel sehr robust. Im Vergleich zum konventionellen Studioliicht ergeben sich betriebswirtschaftliche Vorteile durch:

- höhere Lebensdauer
- geringeren Wartungsaufwand
- geringerer Leistungsbedarf
- geringere Wärmeentwicklung
- Zeitersparnis bei der farblichen Ausleuchtung
- Vorteile bei der Lichtgestaltung durch RGB Einzelansteuerung je Lichtpunkt (Laufschriften, Grafiken, bewegte Farbverläufe)

7.3.3. Nachteile von LEDs

Konstruktiv bedingt kann bei höherer Leistung ein aktiver Lüfter bzw. eine entsprechend größere Gehäuseabmessung erforderlich werden.

Die bisherigen Erfahrungen haben gezeigt, dass die notwendigen Vorschaltgeräte meist der limitierende Faktor in der Lebensdauer von Systemen mit LED-Leuchtmitteln sind. Natürlich ist auch das Leuchtmittel LED einem Alterungsprozess unterworfen, die jedoch durch Regeltechnik ausgeglichen werden kann.

Da das von LED-Leuchtmitteln abgegebene Licht im Vergleich zu herkömmlichen Lichtquellen kein kontinuierliches Lichtspektrum sondern ein Linienspektrum aufweist, werden die von einer Kamera aufgenommenen Farben von Objekten abweichend zum herkömmlichen Licht aufgenommen. Aus diesem Grund muss ein entsprechender Mehraufwand für Farbmatching berücksichtigt werden. In Kombination mit Kunstlicht ist auf die Kompatibilität der LED-Leuchtmittel zu achten.

Speziell phosphorkonvertierte LEDs haben einen relativ hohen Spektralanteil bei blauem Licht der zu Gefährdung der Augen führen kann (Blue-Hazard). Weiterführenden Informationen siehe auch DIN EN 62471 (VDE 0837-471) und Richtlinie 2006/25/EG.

Zur Dimmung von LED-Leuchtmitteln werden verschiedene Verfahren verwendet. Die gebräuchlichste Methode ist derzeit die Pulsbreitenmodulation (PWM). Bei dieser Technik können Interferenzen zwischen Kamera (Shutter/Belichtungszeit) und der Modulationsfrequenz der Pulsbreitensteuerung auftreten die durch Störmuster sichtbar sind.

Werden sehr hohe Lichtmengen benötigt stößt man zurzeit mit LED-Scheinwerfern noch an Grenzen. Die Lichtleistung von Scheinwerfern ist abhängig von der Anzahl der Einzelleuchtmittel und bewegt sich im Bereich von bis zu 300W mit einer Lichtausbeute von bis zu 130 lm/W (rechnerisch wären theoretisch 683 lm/W erreichbar).

Die Kombination von Leuchtmittel (LED) und Steuergerät im Produktionsbereich kann elektromagnetische Störungen verursachen.

OLED als Lichtquelle ist derzeit noch nicht für Strobeleuchtungs zwecke einsetzbar.

Aufgrund des diskontinuierlichen Spektrums des LED-Lichtes, im Gegensatz zum kontinuierlich ansteigenden Spektrum des Halogenlichtes, können Farbabweichungen auftreten. Ein Körper in beliebiger Farbe wird nur dann mit der richtigen Farbe sichtbar, wenn das beleuchtende Licht auch die Wellenlänge der Farbe des Körpers enthält.

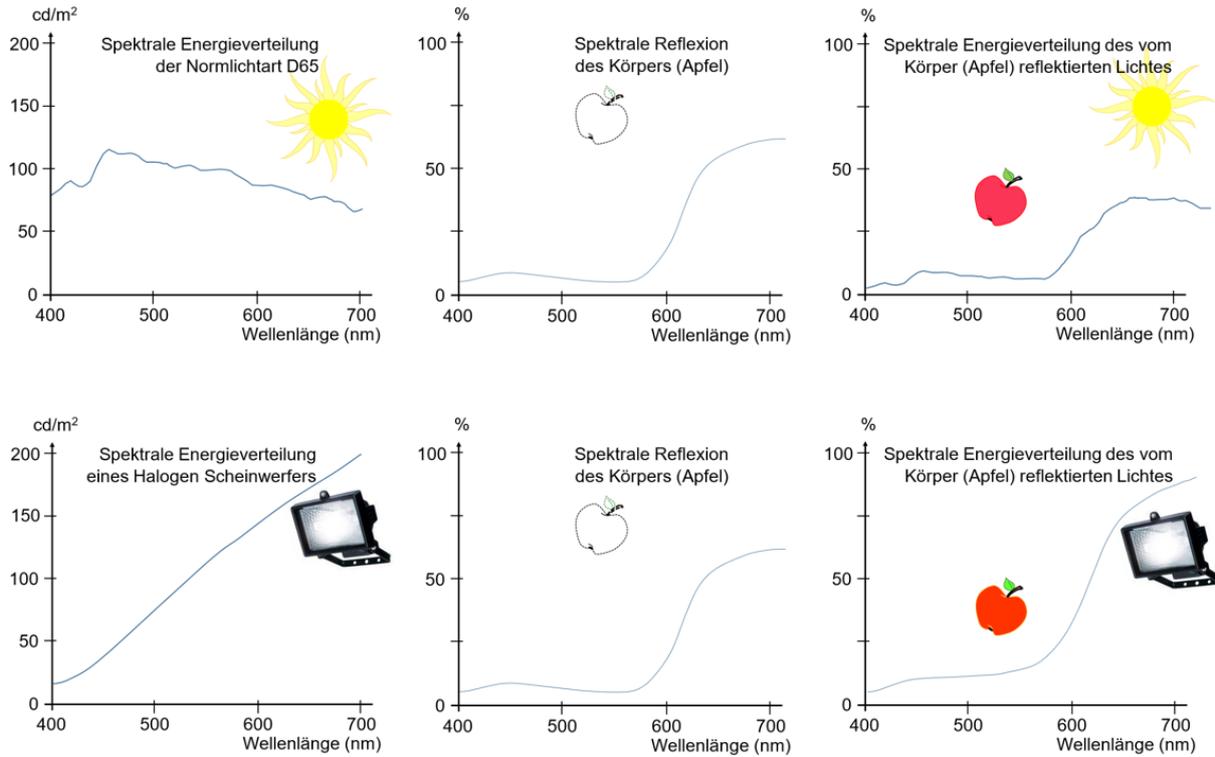


Bild 7.3. 1: Entstehung der Körperfarbe in Abhängigkeit des Lichtes

Die spektrale Empfindlichkeit der Kamera unterscheidet sich von der Augenempfindlichkeitskurve. Dadurch wird die Kamera den Körper in anderer Farbe sehen als der menschliche Sehsinn.

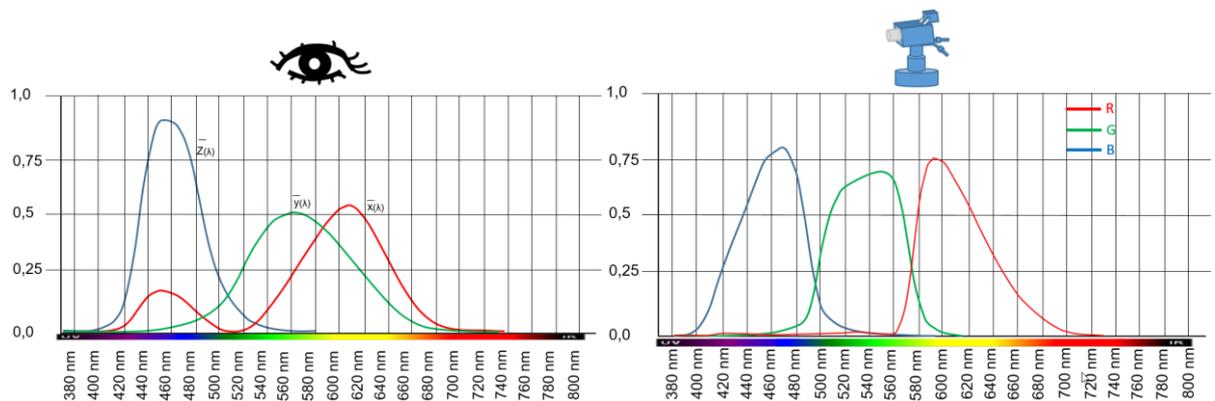


Bild 7.3. 2: Spektrale Empfindlichkeit des Auges im Vergleich zum Kamerasensor

Die Farbwiedergabe der Kamera hängt von der jeweiligen spektralen Zusammensetzung des Lichts ab das die Szene beleuchtet. Lichtquellen, die ein Spektrum ähnlich dem planckschen Strahler abgeben, sowie Lichtquellen mit tageslichtähnlichem Spektrum, sind für heutige Kamerasysteme unkritisch, da die in den Kameras vorhandenen Korrektursysteme auf diese Lichtarten optimiert und abgeglichen sind.

Beim Einsatz von Lichtquellen mit diskontinuierlichem Spektrum wie beispielsweise Leuchtstofflampen, Gasentladungslampen oder LED Leuchten ist mit größeren Einflüssen auf die Farbwiedergabe und Farbtemperatur zu rechnen. Diese können teilweise durch optische, elektronische oder mathematische (look up table) Korrekturen der Kamera behoben werden. Kamera-Presets sind so zum Beispiel häufig für Leuchtstofflampen vorhanden und funktionieren gut.

Die heute üblichen Kamerasysteme arbeiten mit einer RGB Abtastung, dadurch ist die spektrale Bandbreite von den eingesetzten Primärfarbfiltren des Sensors abhängig. Bei diskontinuierlichem Spektrum ist es deshalb möglich, dass Lichtanteile außerhalb des Farbfilters liegen und somit keine oder eine geringe Anregung des jeweiligen Sensors erzeugen. Falschfarben sind somit die Folge.

Das folgende Bild 7.3. 2: Spektrale Empfindlichkeit des Auges im Vergleich zum Kamerasensor zeigt die große Diskrepanz zwischen der Augenempfindlichkeitskurve gegenüber der spektralen Empfindlichkeit von elektronischen Sensoren. Zwischen CCD und CMOS Sensor unterscheiden sich die Empfindlichkeiten noch einmal.

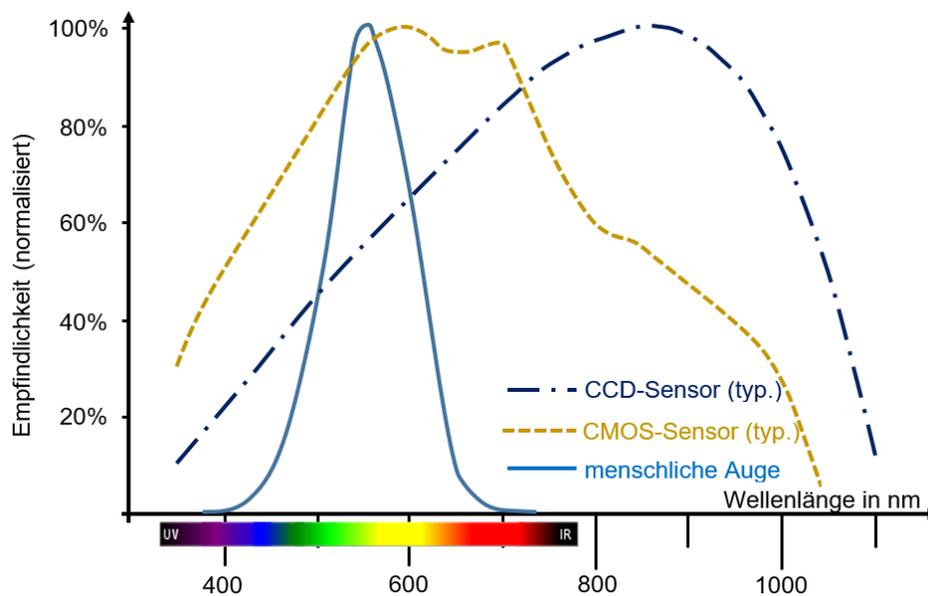


Bild 7.3. 3: Lichtempfindlichkeit in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Nachbildung der spektralen Empfindlichkeit des Auges erfolgt in der Regel durch optische Sperrfilter oberhalb 700nm und unterhalb von 420nm, elektronische und mathematische (look up table) Linearisierung.

Insbesondere CCD Systeme reagieren aufgrund ihrer stark ins Infrarot verschobenen Empfindlichkeit und damit einhergehenden Korrektur des Blauanteils besonders ungünstig auf diskontinuierliche Spektren. Bei Lichtquellen mit hohem Blauanteil wie phosphorkonvertierten LEDs kann die deutlich geringere Empfindlichkeit für blaues Licht je nach Kameramodell besonders schnell zu Farbverfälschungen führen. Neuere CMOS Sensoren weisen bei 550nm, eine ähnlich hohe Empfindlichkeit wie der Peak der Augenempfindlichkeitskurve auf. Auf den erhöhten Blauanteil von LED Licht mit phosphorkonvertierten blauen LEDs ist dieser Sensortyp weniger empfindlich, da die notwendige Korrektur zum Sehsinn geringer ausfällt.

Farbkorrekturprobleme:

Durch die fehlenden Spektralanteile der LED-Lichtquelle können sich in Verbindung mit den speziellen Kamera-Eigenschaften Farbkorrekturprobleme ergeben. In bestimmten Fällen ist eine Farbkorrektur nicht möglich.

LED-Wände

LED-Wände können als Lichtquelle oder als bildgebende Einheit betrachtet werden. Für das so erzeugte LED-Licht gelten die gleichen Regeln wie für einzelne LED-Lichtquellen. Werden die LED-Wände als bildgebende Elemente betrieben, ersetzen diese größere Displays und Projektionswände, die insbesondere auch in Tageslichtumgebung eingesetzt werden. Jedes Pixel wird durch eine RGB-LED realisiert. Der Rasterabstand dieser LEDs beeinflusst die Interferenzen/Aliaße mit dem Abtastraster der Kamera. Das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem besagt, dass ein Signal mit einer Frequenz größer $2 \times F_{\max}$ abgetastet werden muss, um Interferenzen zu vermeiden. Um diese Interferenzen zu minimieren, kann das Raster der LED-Wand zerstreut werden oder es sollten LED-Wände mit geeignetem Pixelabstand eingesetzt werden. Alternativ kann der Aliaseffekt durch Einbau eines zusätzlichen Tiefpassfilters in das Filterrad der Kamera stark gemindert werden.

Hinterleuchteter Rundhorizont im FS-Studio mit LED und Projektionsfolie

Bei dieser Hintergrundbeleuchtung werden Multicolor-LEDs mit den Grundfarben Rot, Grün, Blau und ggf. Weiß hinter einer Projektionsfolie platziert und beleuchten diese. Bei dieser Art der Rückprojektion ergeben sich folgende Vorteile im Vergleich zur herkömmlichen Ausleuchtung mit Flächenleuchten:

- geringerer Abstand zur Projektionsfolie, dadurch mehr Spielfläche im Studio
- höhere Lebensdauer
- geringere Leistungsaufnahme und Wärmelast
- Vorteile bei der Lichtgestaltung durch RGB Einzelansteuerung je Lichtpunkt (Laufschriften, Grafiken, bewegte Farbverläufe)
- hohe Farbsättigung und Farborttreue

Um eine gleichmäßige Ausleuchtung und verzerrungsfreie Darstellung der Inhalte auf der Projektionsfläche zu erzielen ist ein gleichmäßiger Abstand der LEDs zur Projektionsfolie notwendig. Dies ist bei einer bogenförmigen Anordnung nicht automatisch gegeben.

Ein Abgleich auf gleichmäßige Ausleuchtung kann z.B. mithilfe einer Kamera manuell oder mit einer entsprechenden Software auch automatisch erfolgen. Speziell beim Austausch von LED-Modulen ist die durch die Alterung bedingte Leuchtstärken- und Farbveränderung zu beachten und ggf. anzupassen.

Im praktischen Einsatz ist zu beachten, dass der visuelle Eindruck im Studio oft nicht dem Kamerabild entspricht. Die Lichteinstellungen sollten daher immer über das Kamerabild mit Referenzmonitoren vorgenommen, bzw. geprüft werden.

Horizont mit LED-Monitorwand

Neben den oben erwähnten hinterleuchteten Rundhorizonten gibt es mittlerweile selbstleuchtende LED-Wände mit einem Pixelraster von kleiner 1 mm. Damit können neben Hintergrundfarben und -verläufen auch multimediale Inhalte wiedergegeben werden. Wie bei Abgleich des hinterleuchteten Rundhorizonts sollten in diesem Fall die Farbtemperatureinstellung immer über das Kamerabild mit Referenzmonitoren vorgenommen, bzw. geprüft werden. Dabei ist zu Beachten, dass abhängig von Aufnahmewinkel Farbverschiebungen auftreten können.

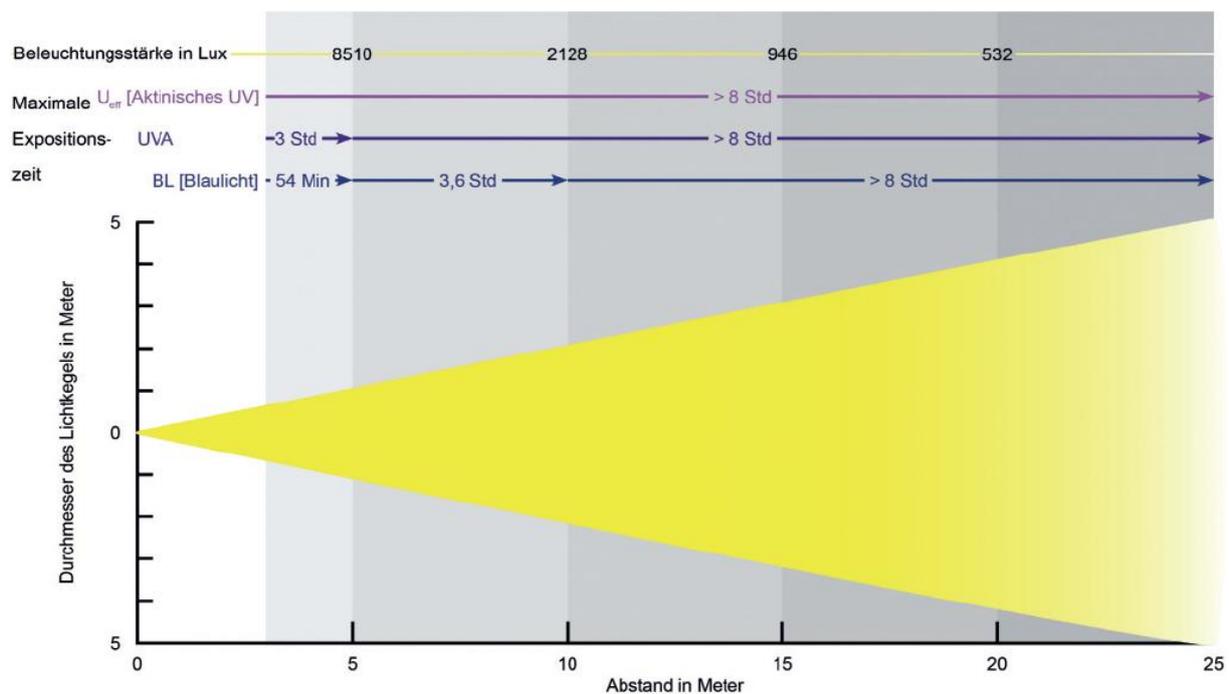
Wegen des Pixelrasters der LED-Monitorwand und des Abtastrasters der Kamera entstehen Interferenzen die durch entsprechende Kameraposition zusammen mit Brennweite und entsprechendem Blendenwert minimiert werden können.

7.4. Sicherheitsaspekte

Das Bundesministerium für Arbeit und Soziales hat die Technischen Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu inkohärenter optischer Strahlung (TROS IOS) am 30.12.2013 bekannt gemacht.

Die TROS IOS (ehemals DGUV 5006) verpflichten den Arbeitgeber, in der Gefährdungsbeurteilung die Exposition seiner Beschäftigten gegenüber künstlicher optischer Strahlung zu ermitteln, zu bewerten und gegebenenfalls geeignete Schutzmaßnahmen zu ergreifen, z.B. "gelbe" Sonnenbrillen mit HEV (high-energy visible light) Schutz.

Hersteller bzw. der Inverkehrbringende von LED-Scheinwerfern für den Studiobetrieb oder Reportageleuchten hat diese nach EN 62471 zu klassifizieren und zu kennzeichnen. Insbesondere für die Risikogruppe 2 und 3 sind Gefährungsdiagramme der Betriebsanleitung beizufügen.



Bildquelle: VBG

Bild 7.4. 1: Beispiel eines Gefährungsdiagramms

In diesem Zusammenhang ist der Begriff „Blue Light Eye Hazard“ zu nennen. Die Blue Hazard-Gefährdung ist eine fotochemische Schädigung der Netzhaut (Retina) durch hochenergetisches blaues sichtbares Licht (maximum bei 440nm), wie sie typischerweise bei weißen phosphorkonvertierten LEDs auftritt. Bei einer dominanten Wellenlänge des Lichtes unterhalb 500 nm ist der Lidschlußreflex des Auges extrem reduziert.

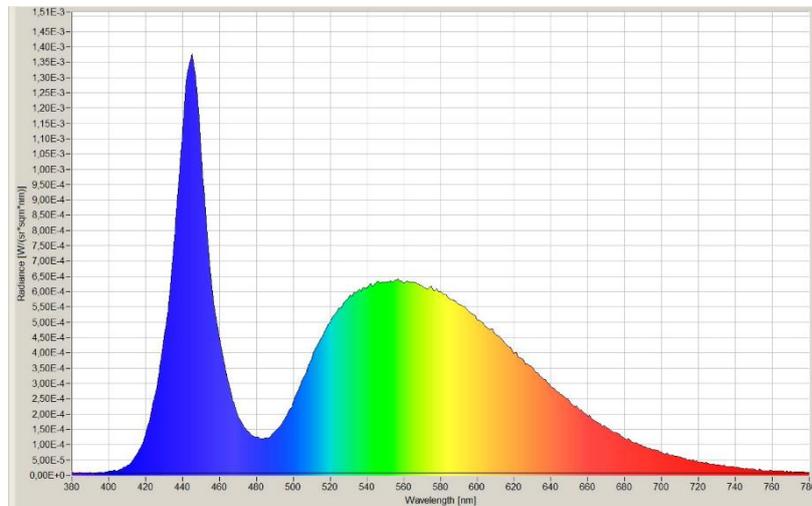


Bild 7.4. 2: Spektrum einer phosphor-convertierten LED

Dieser Effekt kann im Prinzip z.B auch bei RGB-LEDs auftreten, wenn blaues Effektlcht erzeugt wird.

Einige Rundfunkanstalten verwenden aus Vorsorgegründen keine LED-Floorlights bei Sendungen mit Kindern.

7.5. Messtechnik

7.5.1. Klassifizierung

Für die Messung und Analyse von LED-Leuchtmitteln ist ein Fotospektrometer gemäß nachfolgender Einteilung zu verwenden. Die Klasseneinteilung von Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichtemessgeräten ist in DIN 5032 Teil 7 angegeben. Die Messung der lichttechnischen Größen von inkohärent strahlenden Halbleiterlichtquellen wird in der DIN 5032-9:2015-1 beschrieben.

Die Messgeräte werden in folgende Klassen eingeteilt:

- Klasse A für Präzisionsmessungen
- Klasse B für Betriebsmessungen
- Klasse C für orientierende Messungen

Der Messfeldwinkel des Leuchtdichtemessgerätes soll zwischen 1° und 10° sein. Die Beleuchtungsstärke wird diffus gemessen und erfasst einen Raumwinkel bis zu 180° . Je nach Anwendungsfall ist der Messwinkel entsprechend zu wählen.

7.5.2. Messaufbau

Die Messung kann entweder reflektiv mit einem Reflexionsnormal oder direkt in die Lichtquelle mit einem auf den Diffusor kalibrierten Messgerät durchgeführt werden. Bei den Messungen sind Fremdlichteinwirkungen zu vermeiden.



Bild 7.5. 1: Beispiel für Reflexionsnormal mit Bariumsulfat oder gesintertem PTFE (Polytetrafluorethylen)

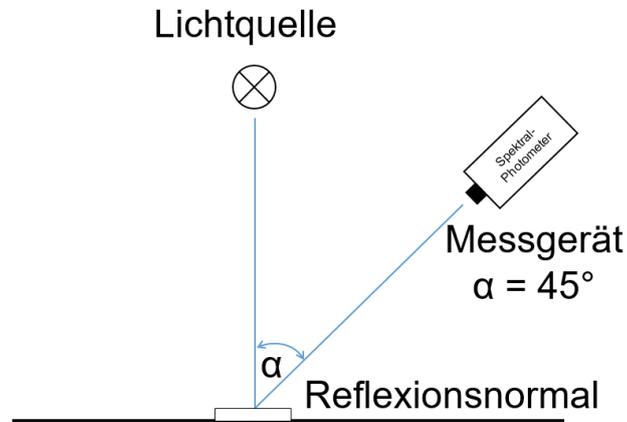


Bild 7.5. 2: Messaufbau für die reflektive Messung

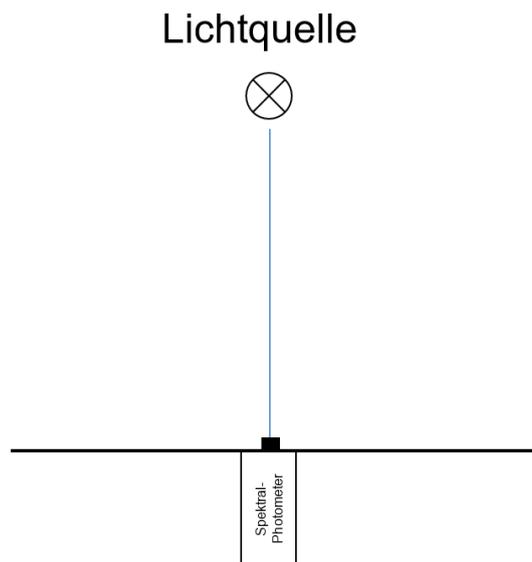


Bild 7.5. 3: Messaufbau für die direkte Messung

Es ist zu berücksichtigen, dass der Abstand des Messgerätes zur Lichtquelle so gewählt wird, dass das Messfeld vollständig abgedeckt wird und der Messbereich des Messgerätes eingehalten wird.

7.5.3. Messparameter

Bei Lichtquellen mit diskontinuierlichen Lichtspektren ist es notwendig spektrale Messungen durchzuführen. Für die orientierenden Messungen sollte die spektrale Bandbreite des Sensors höchstens 10 nm betragen, für die Auswertung mit der TLCI-Software (siehe nachfolgend) ist eine spektrale Bandbreite kleiner 5 nm erforderlich. Messungen mit Tristimulus-Messgeräten bzw. mit Messgeräten, die eine zu geringe spektrale Auflösung aufweisen, führen bei diskontinuierlichen Lichtspektren zu falschen Ergebnissen.

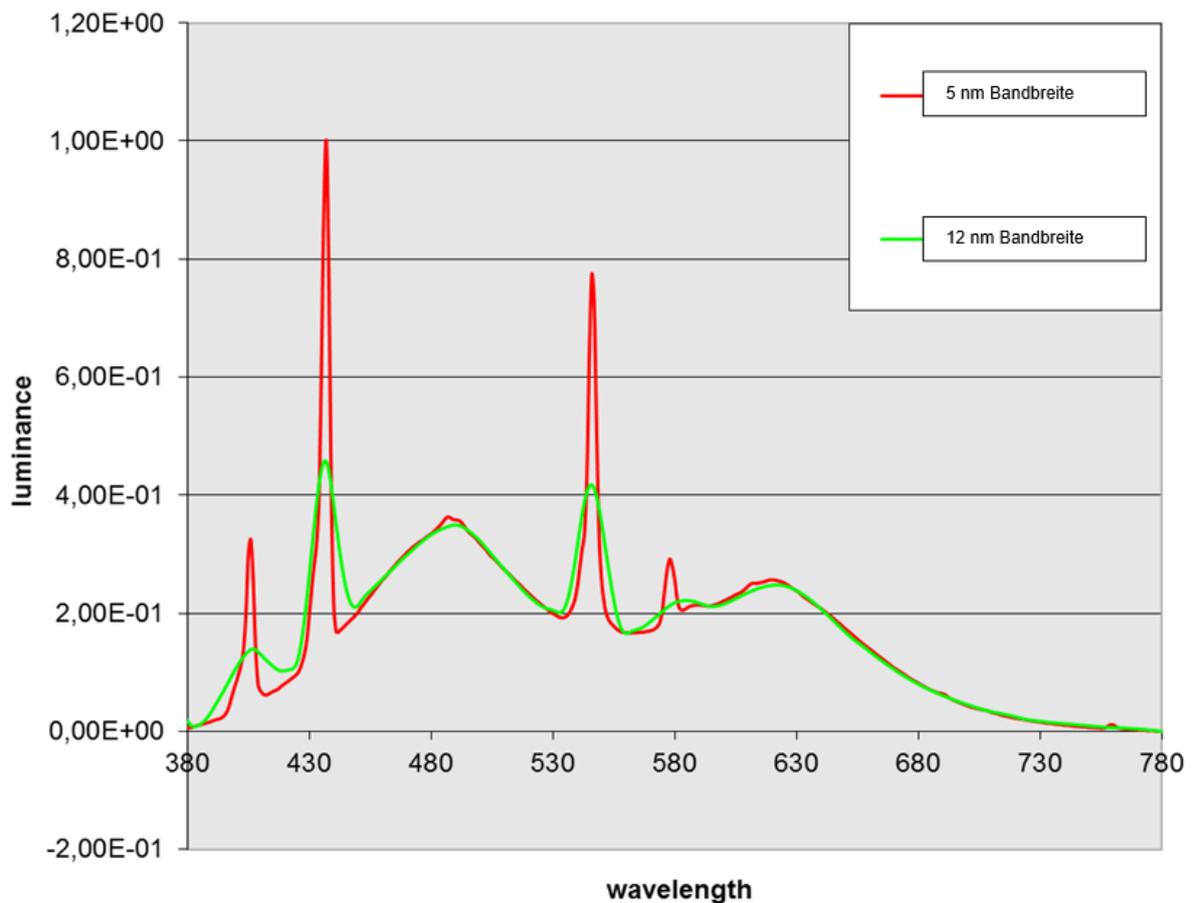


Bild 7.5. 4: Wiedergabe des optischen Spektrums abhängig von der Bandbreite des Sensors

Wie aus dem oben dargestellten Diagramm zu ersehen ist, werden die schmalbandigen Spitzen bei zu geringer spektraler Auflösung des Messgerätes nicht mit ausreichender Genauigkeit erfasst. Aus diesem Grund werden die nachfolgend aus diesem Spektrum errechneten Werte (z.B. TLCI) ebenfalls fehlerhaft sein.

Um das Verhalten bei Dimmung zu erfassen, sollten Messung bei verschiedenen Helligkeitswerten vorgenommen werden.

Messungen müssen unter normalen Betriebsbedingungen des Scheinwerfers erfolgen (Temperatur, Einlaufverhalten).

Die nachfolgende Tabelle zeigt detaillierte Anforderungen an Messgeräte für Präzisionsmessungen die von Betriebsmessgeräten nicht erfüllt werden müssen:

Messparameter	
Wellenlängenbereich	380nm bis 780nm
Spektrale Bandbreite	≤ 5nm
Wellenlängengenauigkeit	≤ ±1nm
Messbereich Beleuchtungsstärke	1 – 100000 Lux
Wiederholgenauigkeit	± 1%
Leuchtdichtegenauigkeit	± 2%
Leuchtdichteempfindlichkeit	≤1 cd/m ²
Farbtemperaturbereich	2500 bis 10000

Tabelle 7: Anforderung für Präzisionsmessgeräte

7.5.3.1. Farbwiedergabeindex

7.5.3.1.1. Colour Rendering Index CIE 13.3

Der allgemeine Farbwiedergabeindex R_a (Colour Rendering Index, CRI) ist eine Kennzahl einer photometrischen Größe, mit der die Qualität der Farbwiedergabe von Lichtquellen gleicher korrelierter Farbtemperatur beschrieben wird. Das „a“ im Formelzeichen steht für den allgemeinen Farbwiedergabeindex, der nur die Werte der ersten acht Testfarben nach DIN 6169 einbezieht. Die Berechnung des Farbwiedergabeindex wird in der CIE 13.3 beschrieben. Neben dem erwähnten R_a bzw. CRI, mit acht Referenzfarben wurde mit Einführung der LED-Technik die Anzahl der Referenzfarben erweitert. So spricht man von einem erweiterter Farbwiedergabeindex R_e mit 14, bzw. 15 Referenzfarben (Farbe #15 Asian flash).



Bild 7.5. 5: Referenzfarben nach DIN 6169

Eine Referenz-Lichtquelle besitzt einen $R_a=100$ und beschreibt damit den maximal zu erreichenden Wert. Bei Werten des Farbwiedergabeindex über 90 kann von einer sehr guten Farbreproduktion ausgegangen werden.

7.5.3.1.2. TM30-15 Messmethode

Die Messmethode TM30-15 wurde von der IES (Illuminating Engineering Society of North America) veröffentlicht. Dabei kommen 99 Referenzfarben (CES = Color Evaluation Samples) zum Einsatz. Diese sind über den gesamten Farbraum verteilt.



Bild 7.5. 6: Referenzfarben TM 30-15

Nach Messung mit dem Lichtspektrometer vergleicht dieses die ermittelten Farborte mittels Rechenverfahren mit den Referenzfarborten und bildet daraus den sogenannten Fidelity-Index R_f (Wertebereich 0 – 100).

Darüber hinaus wird zur Analyse der Farbsättigung, sowie ggf. Farbtonverschiebung, ein kreisförmiger Farbraum aus 16 Farborten festgelegt. Der daraus resultierende Kreis gilt als Referenzfläche. Abweichungen von dieser Fläche lassen Rückschlüsse hinsichtlich Farbsättigung zu und werden als Gamut-Index R_g angegeben. Werte über 100 sind möglich wenn die Testlichtquelle eine höhere Sättigung als die Referenz aufweist.

Um die Bewertung einer Lichtquelle mit einem Blick zu ermöglichen, hat sich das IES-Gremium dafür entschieden, den Fidelity-Index R_f und den Gamut-Index R_g in einem Koordinatensystem darzustellen. Im Idealfall erreichen die Indices R_f und R_g die Werte 100.

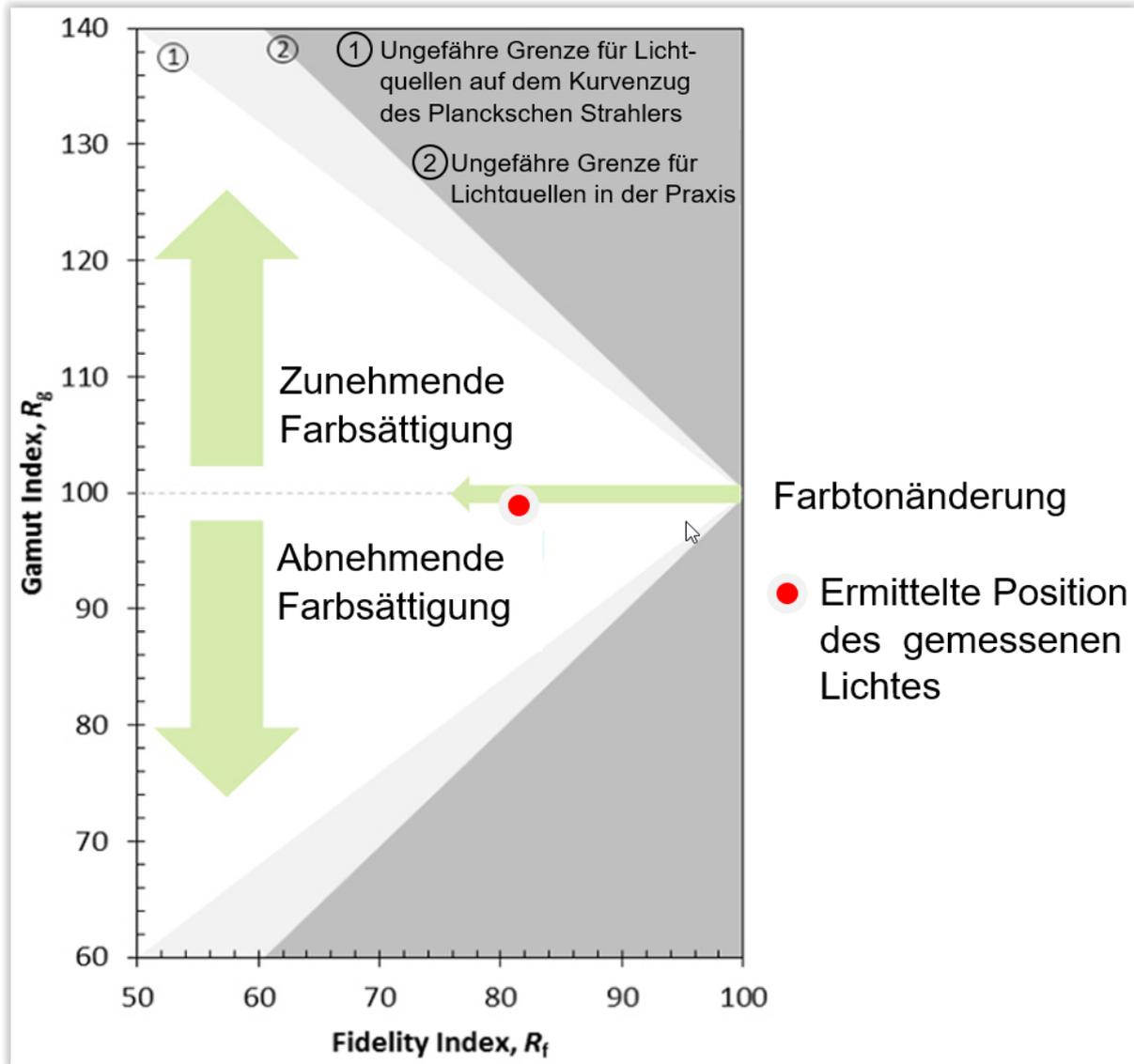


Bild 7.5. 7: R_f / R_g - Diagramm für verschiedenen Lichtquellen

Im TM 30-15 wird noch ein Gamut-Area-Index (GAI) errechnet. Die Referenz für den GAI ist das Tageslicht (D65). Bei Werten des Gamut-Area-Index über 90 kann von einer sehr guten Farbproduktion ausgegangen werden.

7.5.3.1.3. TLCI

In der EBU Tech 3355 wurde der **TLCI** (Television Lighting Consistency Index) spezifiziert. Eine Software vergleicht dabei das gemessene Spektrum einer Lichtquelle gegenüber einer mathematischen Referenz, errechnet daraus den TLCI-Wert und stellt dies grafisch und tabellarisch dar.

Statt das Verhalten der Lichtquelle wie beim Colour Rendering zu beurteilen, ahmt der TLCI ein System aus Kamera und Display nach. Der TLCI wird durch eine Software errechnet. Die einzige Hardware, die benötigt wird, ist ein Sensor zur Aufnahme des optischen Spektrums der Lichtquelle.

Um Farbabweichungen bei den Kamerabildern zu korrigieren, ist es hilfreich den TLCI zu kennen. Er gibt Hinweise zur Größe der Farbabweichung sowie Hilfestellung zu deren Korrektur (siehe 7.8.1).

Der berechnete TLCI-Wert wird numerisch in einem Wertebereich zwischen 0 und 100 angegeben und kann mit folgender Skala beurteilt werden:

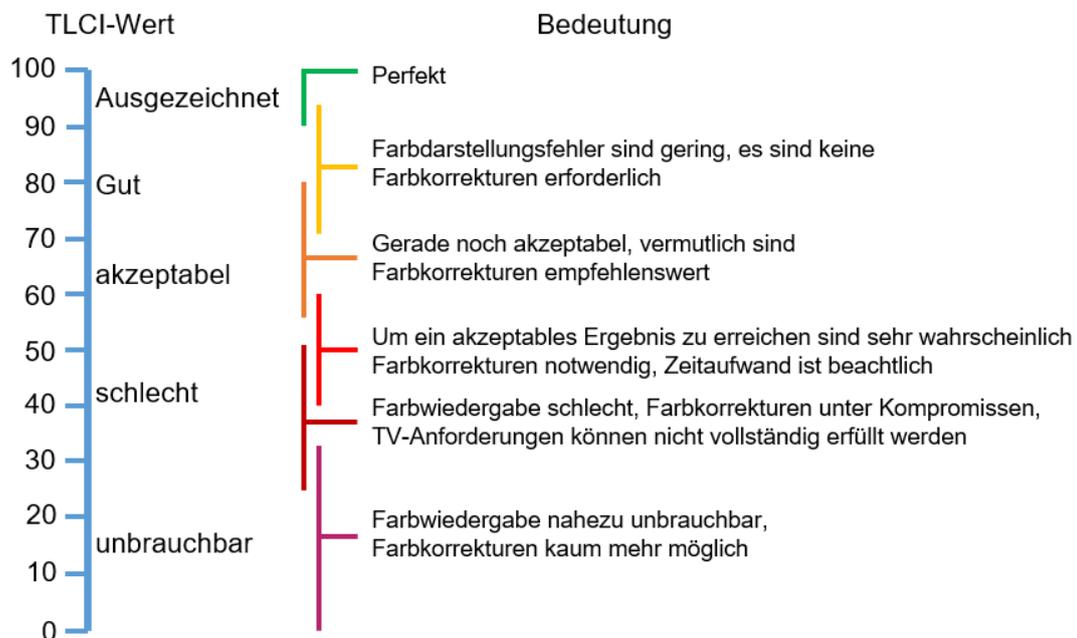
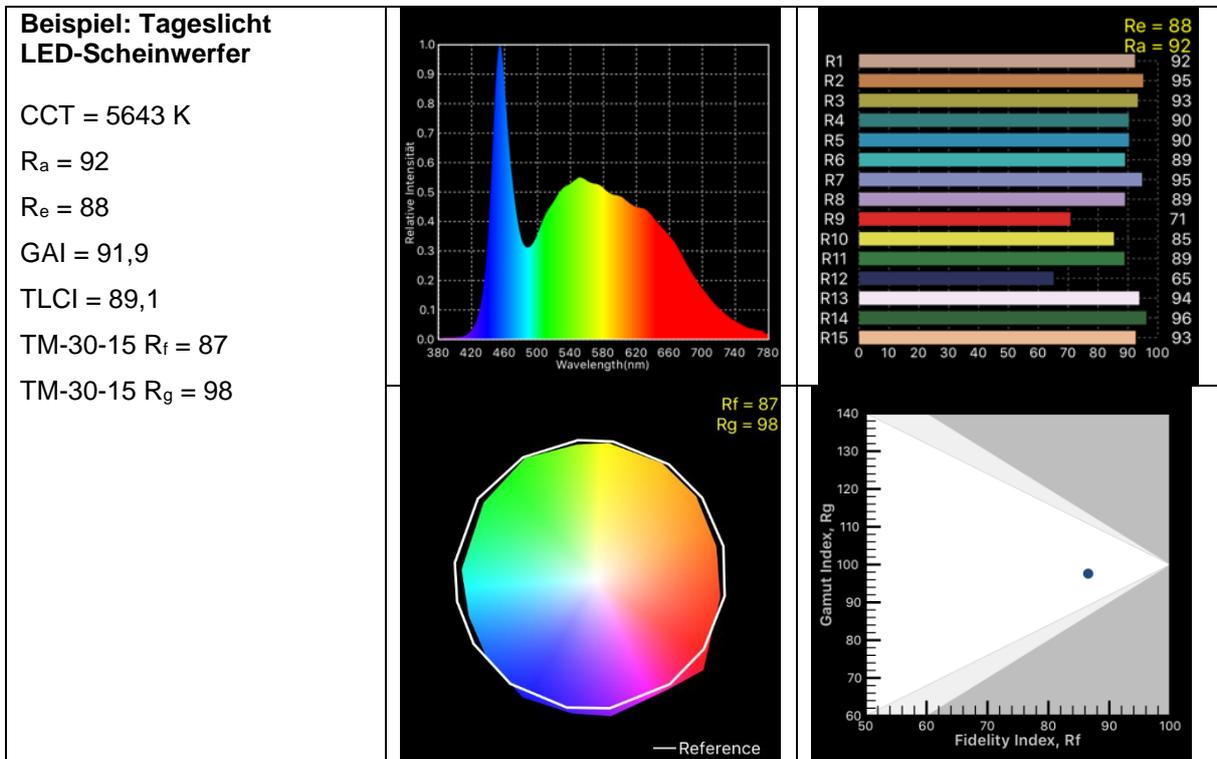
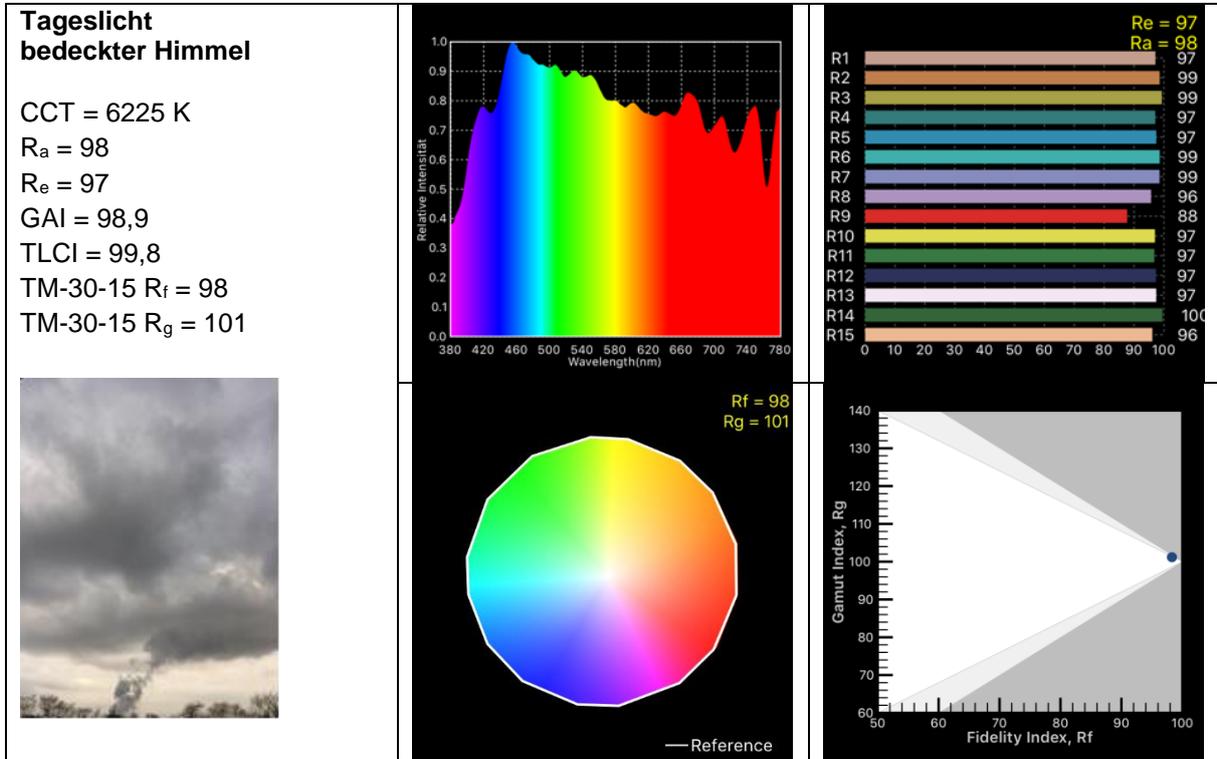


Bild 7.5. 8: Beurteilung des TLCI-Wertes

Gegenüber dem CRI und dem TM30-15 Verfahren ist der TLCI-Wert am aussagekräftigsten, um Licht im Broadcastumfeld beurteilen zu können. Erfahrungen haben gezeigt, dass ein TLCI-Wert über 85 zu empfehlen ist.

7.5.3.1.4. Beispiele für Messergebnisse der verschiedenen Messverfahren



Beispiel: schlechter LED-Scheinwerfer

CCT = 5236 K

$R_a = 32$

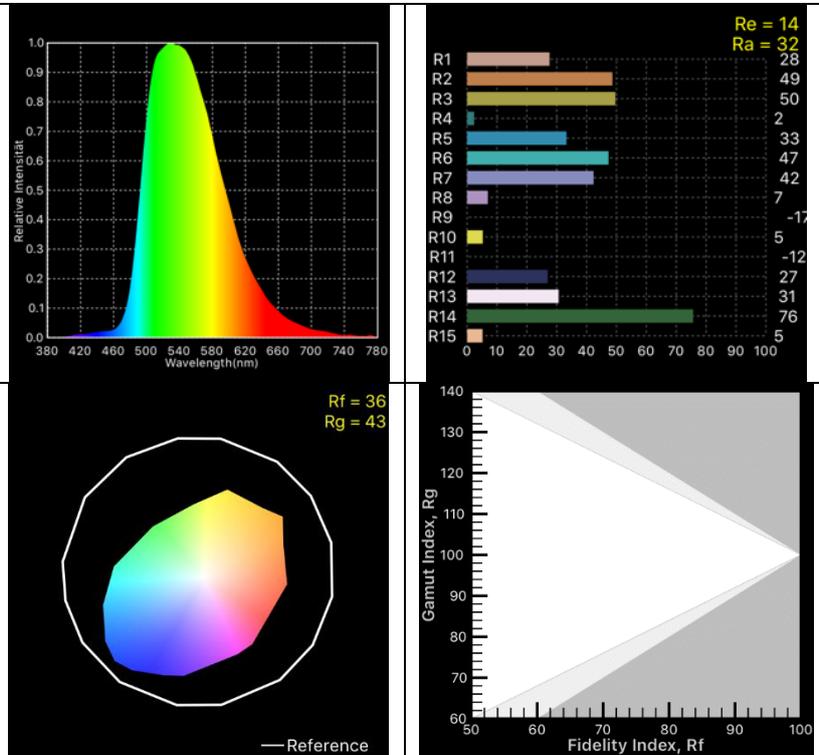
$R_e = 14$

GAI = 7,7

TLCI = 15,1

TM-30-15 $R_f = 36$

TM-30-15 $R_g = 43$



7.5.3.2. Messung der Modulationsfrequenz der Lichtquelle

Auf Grund der Helligkeitsregelung von LED-Lichtquellen mit Pulsbreitenmodulation flackert das abgegebene Licht mit Frequenzen bis zu mehreren kHz. Dadurch kann es zu Interferenzartefakten mit der Abtastfrequenz in der Kamera und zu Ungenauigkeiten bei Messungen kommen. Die Frequenz kann mit einem Fototransistor und einem Oszilloskop ermittelt werden. Werden entsprechende Artefakte am Ausgangssignal der Kamera festgestellt, kann dies durch Ändern der Pulsbreitenmodulationsfrequenz der LED oder der variablen Shuttereinstellung an der Kamera reduziert bzw. beseitigt werden.

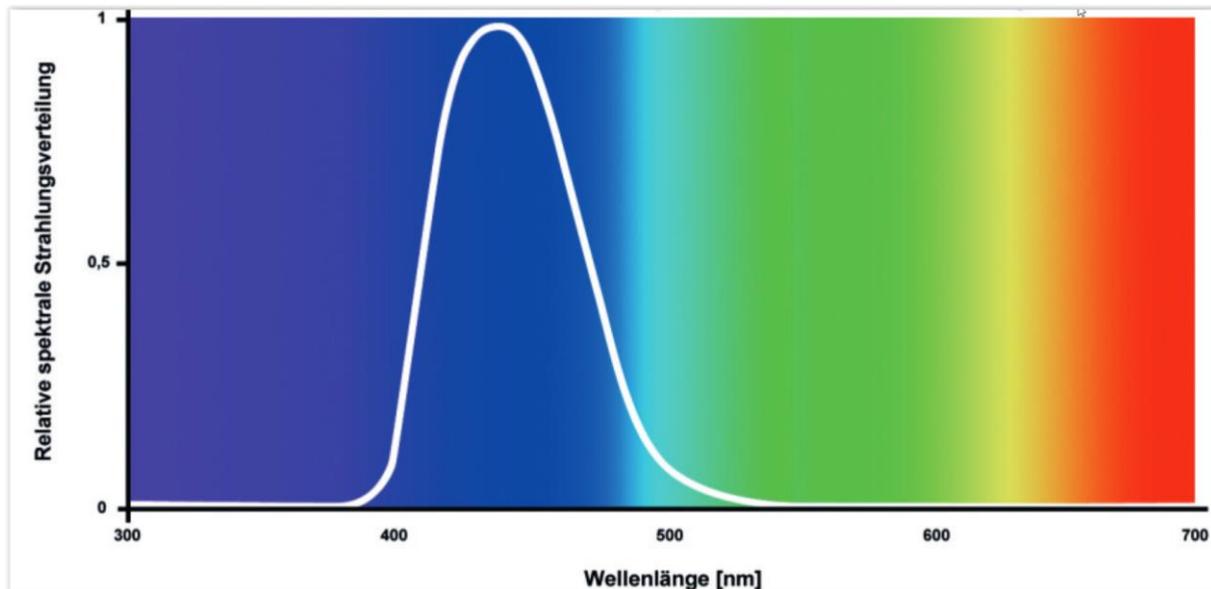
7.5.3.3. Beurteilung im realen Umfeld

Für die abschließende Beurteilung des Gesamtsystems empfiehlt sich das zu testende Leuchtmittel im realen Umfeld und mit den verwendeten Produktionsmitteln einschließlich der Bildwiedergabegeräte zu überprüfen. Geeignete Testbilder hierfür sind ein Graukeil und ein N-10Farbtestbild mit Hautfarben.

Die Kamera ist zuvor mit einer Referenzlichtquelle abzugleichen.

7.5.3.4. Messtechnik zur Blaulichtgefährdung

Um eine Beurteilung der Blaulichtgefährdung durchführen zu können, muss das Gerät das Wirkspektrum der Blaulichtgefährdung und den in der DIN EN 62471 spezifizierten Messwinkel berücksichtigen.



**Bild 7.5. 9: Beurteilung Wirkungsspektrum der Blaulichtgefährdung ($B(\lambda)$),
(Quelle: HAW Hamburg)**

Der aktuelle Stand zum Thema Blaulichtgefährdung ist den Arbeitsschutzvorschriften und Unterlagen der zuständigen Unfallversicherungsträger zu entnehmen.

7.5.4.EMV

Die Grenzwerte nach DIN EN 55103 „EMV- Produktfamilienorm für Audio-, Video- und audiovisuelle Einrichtungen sowie für Studio-Lichtsteuereinrichtungen für professionellen Einsatz“ Teil 1 und 2 sind einzuhalten.

DIN EN 55 103-1 : Grenzwerte und Verfahren für die Störaussendung

DIN EN 55 103-2 : Anforderungen an die Störfestigkeit

Das Einhalten der EMV-Grenzwerte ist erst gegeben, wenn im gesamten Bereich der EMV-Prüfung die in den Absätzen 1.2 und 2.2 (Übertragungstechnische Parameter) dieser Technischen Richtlinie angegebenen Messwerte erfüllt werden.

Die Geräte müssen mit einer CE-Kennzeichnung gemäß EU-Verordnung versehen sein und mit einer Konformitätserklärung ausgeliefert werden.

7.6. Normen und Richtlinien

EBU Tech 3355	Method for the Assessment of the colorimetric properties of Luminaires
EBU Tech 3335	Methods of measuring the imaging performance of television cameras for the purposes of characterisation and setting
EBU R 137	TV Lighting Consistency Index 2012 & TV Luminaire Matching Factor 2013
DIN EN 55103	EMV- Produktfamilienorm für Audio-, Video- und audiovisuelle Einrichtungen sowie für Studio-Lichtstueereinrichtungen für professionellen Einsatz
DIN EN 62471	Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen
IES TM30-15	IES Method for Evaluating light source color rendition
CIE 13.3	Method of measuring and specifying color rendering properties of light sources

7.7. Literaturverzeichnis

Diplomarbeit Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt
Untersuchungen zu Prüfverfahren für Flachdisplays im Broadcasteinsatz
Jochen Reitz; Betreuer: Prof. Dr. Peter Möhringer

Photobiologische Sicherheit von Licht emittierenden Dioden (LED)
L. Udovičić, F. Mainusch, M. Janßen, D. Nowack, G. Ott

Licht und Gesundheit - Blue Light Hazard. <http://www.mdsupport.org/library/hazard.html#blue>

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin <http://www.baua.de>

Link zum Unfallversicherungsträger:

<http://www.dguv.de/de/index.jsp> suche DGUV Information 215-314

<http://www.auva.at> ->Report 55B

->Report 53

<http://www.sozialversicherung.at>

<http://www.sozialversicherung.at/portal27/portal/auvaportal/content/contentWindow?viewmode=content&action=2&contentid=10007.758313>

http://www.vbg.de/DE/3_Praevention_und_Arbeitshilfen/1_Branchen/10_Buehnen_und_Studios/Buehnen_und_Studios_node.html

7.8. Anhang

7.8.1. Ableitung des TLCI

7.8.1.1. Einführung

Der britische Ingenieur Alan Roberts hat in Zusammenarbeit mit der EBU ein Verfahren entwickelt, um die **Farbtreue von Lichtequipment** zu beurteilen. Hierfür wurde der sogenannte **TLCI-Wert** (Television Lighting Consistency Index) eingeführt und in der EBU Tech 3355¹ spezifiziert.

Die Software vergleicht eine Lichtquelle gegenüber einer mathematischen Referenz und stellt diese Differenz grafisch und tabellarisch dar.

Statt das Verhalten der Lichtquelle direkt zu beurteilen, so wie es beim Colour Rendering Index gemacht wird, ahmt TLCI ein System aus Kamera und Display nach. Dabei verwendet der TLCI nur spezielle, das Farbverhalten beeinflussende, Eigenschaften von Kamera und Display. TLCI wurde dabei in einer Software und nicht in realer Fernseh-Hardware umgesetzt. Die einzige Hardware, die benötigt wird, ist ein Spektroradiometer um die spektrale Strahlungsverteilung der zu testenden Lichtquelle zu testen sowie einen Computer auf dem das Software-Analyseprogramm zur Durchführung der Berechnungen laufen kann.

Die Leistungsfähigkeit einer LED-Leuchte zu kennen, hilft zu verstehen, was in der Postproduktion getan werden kann, um Farbabweichungen zu korrigieren. Der TLCI-Index gibt hierzu Hinweise zur Größe der Farbabweichung sowie Hilfestellung zu deren Korrektur.

7.8.1.2. Software Installation

Der jeweils aktuelle Software-Stand kann unter <https://tech.ebu.ch/tlci-2012> heruntergeladen werden.

7.8.1.3. Mögliche Arten von Reports

Es gibt verschiedene Arten von Reports, die von der Software ausgegeben werden können.

Im Folgenden ist jeweils ein Screenshot² der verschiedenen Reports abgebildet. Je nach Anwendungsfall, sollte der geeignete Report ausgewählt werden:

¹ <https://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3355.pdf>, Stand Oktober 2014

² Die Screenshot basieren alle auf derselben txt- bzw. lum-Datei.

7.8.1.4. EBU R137 report

Dies ist der Standard-Report mit folgenden Informationen:

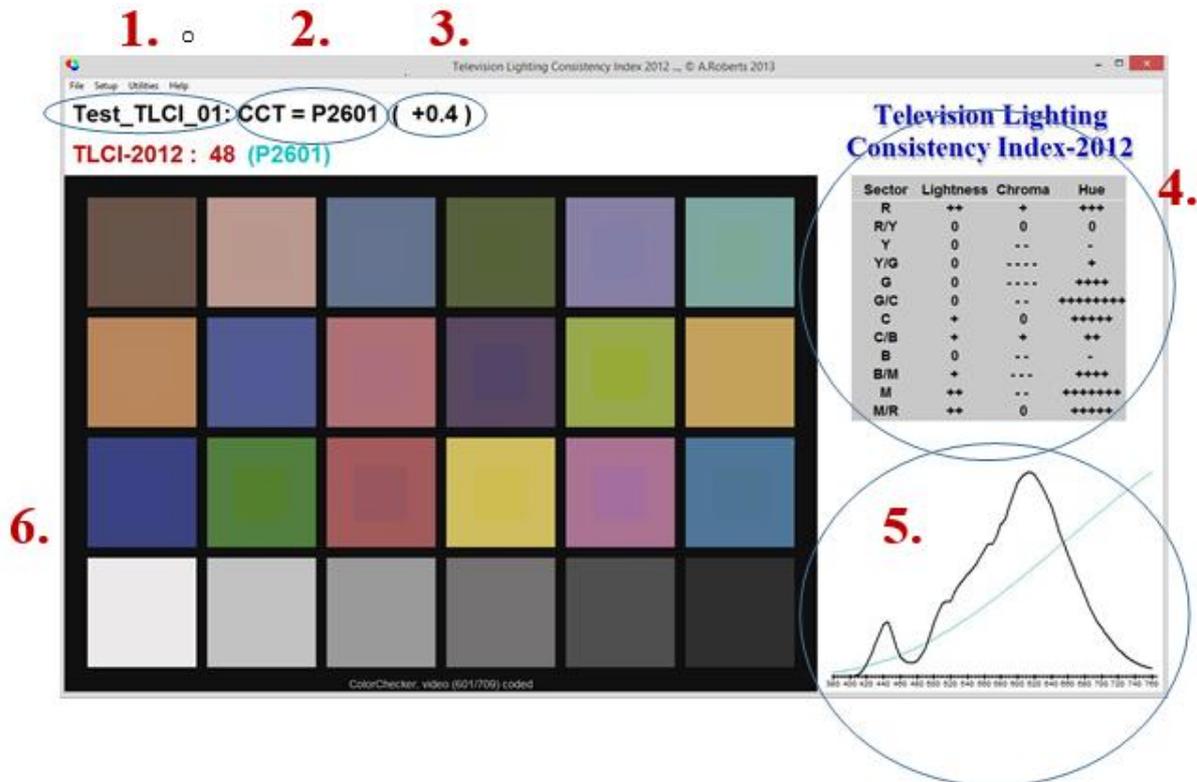
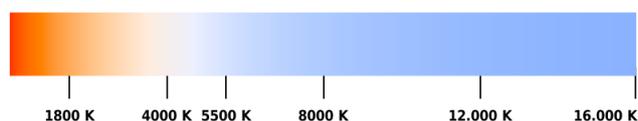


Abbildung 1: Ausgabe eines EBU R137 Reports

- **(1.)** Dateiname
darunter der TLCI-Wert (Qa-Wert)³ -> roter Wert
- **(2.)** Berechneter CCT-Wert (Correlated Colour Temperature⁴)
darunter der Korrelierte Farbtemperatur⁵ -> cyan Wert
Die korrelierte Farbtemperatur zeigt auf Farborte, die nicht exakt auf dem Kurvenzug liegen.
 - P für "Planckian"⁶ -> kleiner 3400 K
 - D für "Daylight" -> über 5000 K
 - M für Werte zwischen 3400 K und 5000 K (Mischlicht -> lineare Interpolation zwischen Planckian and Daylight)



- **(3.)** Δuv: Abweichung vom Farbort⁷
Abstand der Farbe des Testlichtes zum zugehörigen CCT, gemessen in Vielfachen von 0,0054 (in CIE1964 uv units)

³ Siehe EBU Tech 3355, Kapitel 1.5.1, Formel [60]

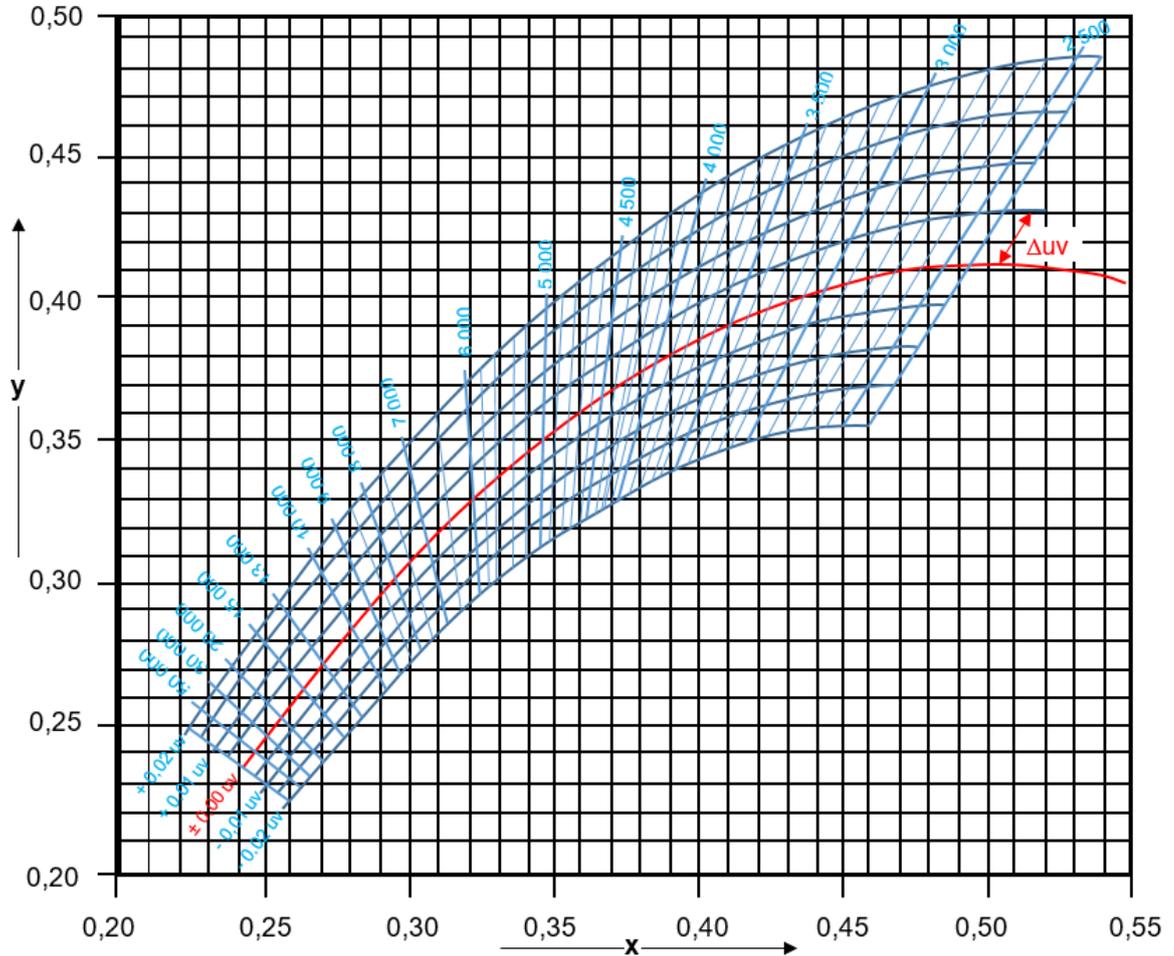
⁴ Siehe EBU Tech 3355, Kapitel 1.1.1 und TLCI-2012 (Engineering).pdf, Kapitel 7

⁵ Siehe TLCI-2012 (Engineering).pdf, Kapitel 2.2.2.2

⁶ Siehe EBU Tech 3355, Kapitel 1.1.2

⁷ Siehe EBU Tech 3355, Kapitel 2

- Ein Beispiel: Eine Lichtquelle mit einer Farbdifferenz zum Kurvenzug von 0,01 in Richtung Grün (Δuv) nahe einer Farbtemperatur von 7000K wird als korrelierte Farbtemperatur von 7000K + 0,01 angegeben.



- **(4.)** Tabelle mit Hinweisen für die Farbkorrektur. Sie teilt den Farbkreis in 12 Teile und gibt an um wieviel und in welche Richtung eine Farbe korrigiert werden sollte. „+“ bedeutet erhöhen, „-“, bedeutet reduzieren. Für „Hue“ bedeutet „+“ eine Rotation gegen den Uhrzeigersinn (d.h. Rot in Richtung Gelb, Grün in Richtung Cyan usw.) und „-“, eine Rotation im Uhrzeigersinn (d.h. Rot in Richtung Magenta, Grün in Richtung Gelb u.s.w.)⁸



- **(5.)** Spektralwerte für
 - die Referenz (Kurvenzug in cyan)
 - wird automatisch gewählt
 - das gestestete Licht (Kurvenzug in schwarz)

⁸ Siehe EBU Tech 3355, Kapitel 2

- (6.) Darstellung einer ColorChecker® Testtafel.
 - Innen: getestetes Licht
 - Außen: Referenz

TLCI-2012 report + metadata file

A	B
1	TLCI/TLMF metadata report
2	
3	Report file Test_TLCI_01.txt.lum.xls
4	Report screen image Test_TLCI_01.txt.lum.bmp
5	Date Fri.17 Oct 2014,08:23:26
6	Author
7	Spectroradiometer
8	Spectroradiometer calibration
9	Test file Test_TLCI_01.txt.lum
10	Test file date Do.16 Okt 2014,
11	Test file CCT P2601 (+0.4)
12	Luminaire manufacturer (enter the makers name here)
13	Luminaire model (and the model number/reference here)
14	Luminaire type (e.g. tungsten, LED, flu, spot, panel, etc)
15	Luminaire details (e.g. version number, batch number and date, anything unusual)
16	Luminaire power supply voltage (if different from makers' spec.)
17	Luminaire CCT setting (if there is a CCT control)
18	Luminaire level setting (if there is a dimmer control)
19	Luminaire angle (if not between 40 and 50 degrees)
20	Luminaire distance (if not between 0.5 and 1.0m)
21	
22	Test colour Q value
23	Dark skin 91.11
24	Light skin 90.94
25	Blue sky 85.48
26	Foliage 78.08
27	Blue flower 61.49
28	Bluish green 28.56
29	Orange 98.45
30	Purplish blue 91.29
31	Moderate red 49.96
32	Purple 32.04
33	Yellow green 59.50
34	Orange yellow 91.35
35	Blue 91.47
36	Green 41.42
37	Red 31.64
38	Yellow 85.09
39	Magenta 28.80
40	Cyan 86.51
41	White 90.01% 99.96
42	Neutral 8 59.1% 99.98
43	Neutral 6.5 36.2% 99.98
44	Neutral 5 19.77% 99.99
45	Neutral 3.5 9% 100.00
46	Black 3.13% 100.00
47	
48	Result Qa value 48.136

7.8.1.5. Cartwheel, Colourists Advice

Bei der Auswahl dieses Reports erscheint eine Anzeige, die für Mitarbeiter der Farbkorrektur hilfreich ist.

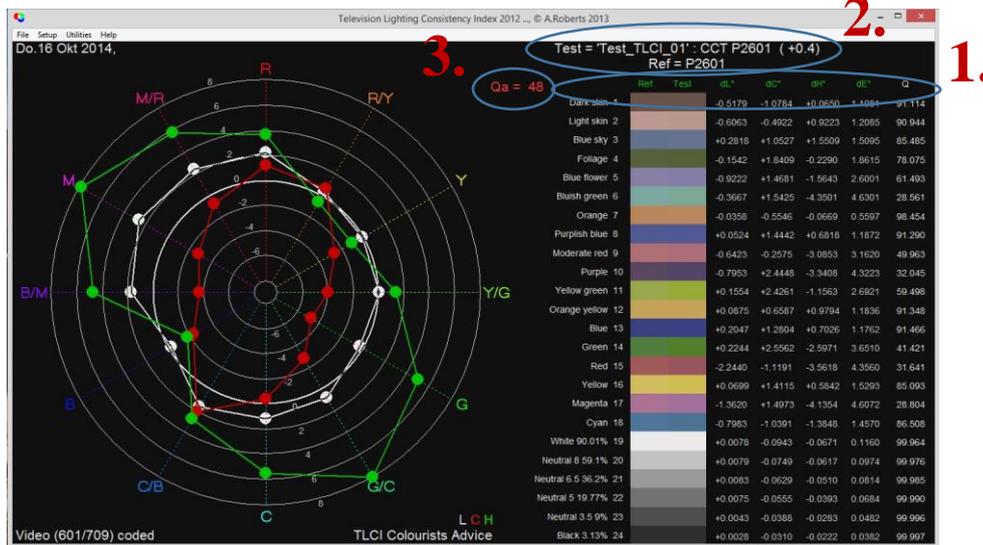


Abbildung 2: Ausgabe der Ergebnisse als Cartwheel

Im rechten Teil des Reports (**1.**) sind folgende Werte tabellarisch aufgelistet (von links nach rechts):

- Die Namensbezeichnung der Farbe, z.B. Magenta
- Die Nummer des Farbfeldes, z.B. 17
- Das Farbfeld der Referenz
- Das Farbfeld des Testobjekts (ggf. kann am Farbübergang zwischen Referenz und Testobjekt ein Unterschied erkannt werden)
- Helligkeitsdifferenz (Luminanz, dL^*)
- Buntheitsdifferenz (Chrominanz, dC^*)
- Farbtondifferenz/Bunttondifferenz (Hue, dH^*)
 - Die Farbtondifferenz ist positiv, wenn der Anstieg des Farbtonwinkels h_{uv} ist, und negativ, wenn der Farbtonwinkel h_{uv} abnimmt⁹.
- Farbabstand (Averaging Power, dE^*)
 - Bewertung von dE^{10} :

ΔE	Bewertung
0,0 ... 0,5	kein bis fast kein Unterschied
0,5 ... 1,0	Unterschied kann für das geübte Auge bemerkbar sein
1,0 ... 2,0	unmerklicher Farbunterschied
2,0 ... 4,0	wahrgenommener Farbunterschied
4,0 ... 5,0	wesentlicher Farbunterschied, der selten toleriert wird
oberhalb 5,0	die Differenz wird als andere Farbe bewertet
- Q-Wert (Q)
 - Der Q-Wert für die einzelnen Farben berechnet sich aus dE mit der Formel aus Kapitel 3.4.2 der Software-Anleitung für den Engineering-Mode (TLCI-2012 (Engineering).pdf)
 - Der Q_a -Wert entspricht dem TLCI-Index

Über der Tabelle stehen (**2.**):

- Dateiname
- Berechneter CCT-Wert (Correlated Colour Temperature)
- Δuv : kürzester Abstand zur Farbtemperaturkurve des Plankschen Strahlers, bzw. zur Tageslichtkurve

⁹ <https://de.wikipedia.org/wiki/CIELUV-Farbrausystem>, Stand Februar 2018

¹⁰ https://de.wikipedia.org/wiki/Delta_E, Stand Januar 2018

7.8.1.7. Farbflächen als Datei

Bei der Auswahl dieses Reports werden automatisch zwei Bitmap-Dateien gespeichert:

- Eine Datei des Testobjekts. Sie erhält die Endung „*.test.bmp“
- Eine Datei der Referenz. Sie erhält die Endung „*.ref.bmp“

Als Speicherort wird automatisch der Speicherort der txt-Datei gewählt. Der Name, unter dem die beiden Bilder gespeichert werden, ist bis auf die o.g. Endung identisch mit dem Namen der Txt-Datei.

Diese beiden Bitmap-Dateien können jetzt z.B. in einer anderen Software weiterverwendet werden. Die Auflösung der Bilder entspricht der des Programmdisplays.

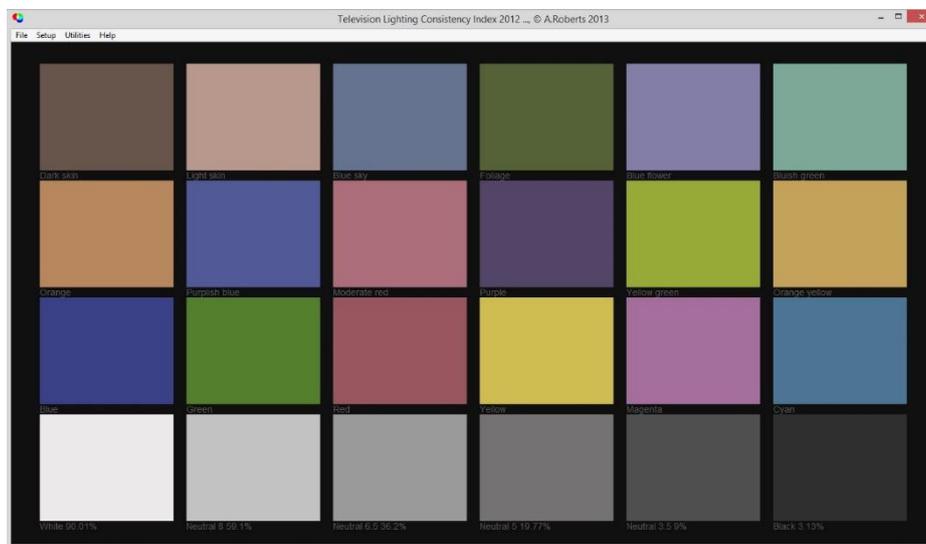


Abbildung 3: Ausgabe der Color-Patches als Datei