

Analyse von LED Warm Dimming Produkten in der Lichtplanung: Farbmetrik und Dimmkurven im Vergleich zu Temperaturstrahlern

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

Mara Hein
2130309



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

Studienfach: Medientechnik

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Roland Greule
Zweitprüfer: M.A. Karl Schaper

Neustadt am Rübenberge, den 06.06.2016

Name: Mara Hein

Anschrift: Marschstraße 25a, 31535 Neustadt am Rübenberge

Email: marahein@gmx.de

Geburtsdatum: 21.03.1990

Matrikelnummer: 2130309

Studienfach: Medientechnik

Abgabedatum: 06.06.2016

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Roland Greule

Zweitprüfer: M.A. Karl Schaper

Abstrakt

Aufgrund ihres geringen Wirkungsgrades und den von der Europäischen Union verfassten Richtlinien für Anforderungen an die Nachhaltigkeit von relevanten Energieverbrauchern werden Temperaturstrahler vom Beleuchtungsmarkt ausgegliedert. Mit dem ab September 2018 beginnendem, sukzessivem Produktionsverbot von Halogenlampen und den bereits seit 2012 verbotenen Glühlampen zeichnet sich eine Ablösung der in der Beleuchtung immer noch weit verbreiteten Temperaturstrahler durch die moderne LED Technologie ab.

Eine charakteristische und dem Nutzer vertraute Eigenschaft der Temperaturstrahler ist die wärmer werdende Lichtfarbe beim Herunterdimmen. Dieser „Warm Dimming Effekt“ wurde bislang durch die LED-Technologie nicht abgebildet. Mit dem aktuellen Aufkommen entsprechender LED-Produktlösungen ist es für die Lichtplanung notwendig geworden, die farbmetrischen Besonderheiten dieser neuen Technologie zu eruieren.

In dieser Arbeit wird das wissenschaftliche Fundament für die Spezifizierung weißer Lichtquellen mit seinen wichtigsten farbmetrischen Grundlagen für diesen Effekt betrachtet.

Ziel ist es, durch eine repräsentative Vermessung und Auswertung herauszustellen, wie weit farbmetrische Eigenschaften und Dimmkurven der LED Warm Dimming Produkte an die der konventionellen Temperaturstrahler herankommen.

Der Umfang der untersuchten LED Warm Dimming Produkte gibt einen Überblick zu den auf dem Beleuchtungsmarkt erhältlichen Produkten. Die erarbeiteten Ergebnisse sollen dabei mit Herstellern und Kunden in der Lichtplanung kommunizierbar sein.

Abstract

Due to their low efficiency and to the EU guidelines for requirements regarding the sustainability of relevant energy consumers, thermal radiators are removed from the lighting market. The successive ban on producing halogen lamps beginning in September 2018 and the fact that light bulbs have already been prohibited since 2012 leads to a gradual replacement of thermal radiators, which are still widely used in lighting, by modern LED technology.

A particular characteristic of thermal radiators well-known to the user is the increasingly warm light when they are dimmed. Up to now, this warm dimming effect has not been reproduced by LED technology.

With the currently rising amount of LED warm dimming product solutions, the lighting design needs to determine colorimetric specifics about this new technology.

This thesis considers the scientific basis for specifying white light sources with their most important colorimetric foundations, especially for this effect.

The objective is to work out how colorimetric parameters and dimming graphs of LED warm dimming products approximate those of conventional thermal radiators. This is done using representative measurements and their evaluation.

The scope of the LED warm dimming products investigated here provides an overview of the products available on the lighting market. The results are meant to be communicable with manufacturers and customers from the lighting design sector.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
2. Wissenschaftliches Fundament und Methodik	7
2.1. Zwei Formen der Lichterzeugung	7
2.1.1. Temperaturstrahler	7
2.1.2. Elektrolumineszenz	8
2.2. Weißes Licht	9
2.2.1. CIE-Normlichtarten	10
2.2.2. LED-Weißlichtmodule in der Umsetzung	11
2.3. Farbmimetrik: vom Farbreiz zur Farbwahrnehmung	12
2.3.1. Farbreiz $\varphi_{\lambda}(\lambda)$	13
2.3.2. Farbvalenz im Auge	14
2.3.3. Farbvalenz im Spektrometer	15
2.3.3.1. 2°- und 10°-Normalbeobachter	15
2.3.4. Farbmaßzahlen	18
2.3.4.1. Farbtafeln und Farbräume	19
2.3.4.2. Planckscher Kurvenzug und ähnlichste Farbtemperatur	21
2.3.4.3. Farbartdifferenz	23
2.3.5. Farbwiedergabe	30
2.3.5.1. Definition des CIE-Farbwiedergabeindex 1974/1995	31
2.3.5.2. Kritik am CIE-Farbwiedergabeindex 1974/1995	32
2.3.5.3. Einblick in die aktuelle Forschung	34
2.4. Dimmkurven	35
2.4.1. Farbtemperaturverlauf beim Dimmen	35
2.4.2. Wahrgenommene Helligkeit L^*	35
2.5. Spektrometer	38
2.5.1. Auflösung von Spektrometern	38
2.5.1.1. FWHM-Einfluss auf verschiedene Spektren	39
2.5.1.2. Messwertevergleich Spektrometer	41
2.5.2. Verwendetes Spektrometer	42
3. Messtechnische Untersuchung	43
3.1. Messaufbau	44
3.2. Übersicht der untersuchten Produkte	45
3.3. Temperaturstrahler	46
3.3.1. Spektrale Strahlungsverteilung	46

3.3.2. Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen	49
3.3.3. Farbwiedergabeindizes Ra und R9	52
3.3.4. Farbartverlauf und SDCM	55
3.3.5. Wahrgenommene Helligkeit L*	59
3.3.6. Zusammenfassung: Ergebnisse der Temperaturstrahler	61
3.4. LED Warm Dimming Produkte: Retrofits	61
3.4.1. Spektrale Strahlungsverteilung	61
3.4.2. Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen	65
3.4.3. Farbwiedergabeindizes Ra und R9	68
3.4.4. Farbartverlauf und SDCM	70
3.4.5. Wahrgenommene Helligkeit L*	72
3.4.6. Zusammenfassung: Ergebnisse der LED Warm Dimming Retrofits	73
3.5. LED Warm Dimming Produkte: Leuchten	73
3.5.1. Spektrale Strahlungsverteilung	73
3.5.2. Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen	75
3.5.3. Farbwiedergabeindizes Ra und R9	77
3.5.4. Farbartverlauf und SDCM	80
3.5.5. Wahrgenommene Helligkeit L*	82
3.5.6. Zusammenfassung: Ergebnisse der LED Warm Dimming Leuchten	83
4. Fazit und Ausblick	84
Eigenständigkeitserklärung.....	86
Quellenverzeichnis	87
Abbildungsverzeichnis	90
Anhang	96

1. Einleitung

Temperaturstrahler werden von der Europäischen Union im Rahmen „der umweltgerechten Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte“¹ ihrem geringen Wirkungsgrad verschuldend vom Beleuchtungsmarkt ausgegliedert. Seit September 2012 ist die Produktion von Glühlampen verboten und ab September 2018 beginnt das schrittweise Verbot der Halogenlampe.² Aktuell wird noch ein großer Bestandteil der Beleuchtung in Gastronomie, Hotellerie und im Privatbereich mit diesen Leuchtmitteln bestückt. Ein auf lange Sicht notwendiger Wechsel zu LED-Produkten kündigt sich an. Parallel steigt in der Lichtplanung die Anfrage nach Projektrealisierungen, in denen ausschließlich LED Produkte eingesetzt werden.

Die Lichtqualität von Halogen- und Glühlampen führt in bestimmten Anwendungen immer wieder dazu, dass diese Leuchtmittel gegenüber der modernen LED-Technologie weiter Einzug in die Lichtplanung finden. Eine charakteristische und dem Nutzer vertraute Eigenschaft der Temperaturstrahler ist die wärmer werdende Lichtfarbe beim Herunterdimmen. Dieser Effekt wurde bislang durch die LED-Technologie nicht abgebildet. Mit dem aktuellen Aufkommen entsprechender LED-Produktlösungen werden diesem Effekt verschiedenste Bezeichnungen wie „Warm Dimming“ (LEDS C4, LEDengin, Reggiani), „Natural Toning“ (Sharp), „Sunset Dimming“ (Ledon), „DimtoWarm“ (Megaman) bzw. „dim-to-warm“ (Lumenetix), „GLOWdim“ (Osram), „Dim Tone“ (Philips) oder „WarmZero“ (ACDC) zugesprochen. Die in dieser Arbeit verwendete Bezeichnung für den Effekt lautet aufgrund ihrer neutralen Beschreibung „Warm Dimming“.

Lampen- und Leuchtenhersteller beschreiben die mit dem Warm Dimming Effekt einhergehende Veränderung der farbmtrischen Eigenschaften beim Dimmen mit den für Weißlicht-LED Produkten üblichen Parametern. Diese reichen hierfür jedoch nicht aus. Für die Lichtplanung ist es wichtig, anhand der farbmtrischen Eigenschaften adäquate Leuchten oder Lampen auszuwählen. Ziel dieser Arbeit ist es, herauszustellen, wie weit farbmtrische Eigenschaften und Dimmkurven der LED Warm Dimming Produkte an die der konventionellen Temperaturstrahler herankommen. Die Ergebnisse sollen farbmtrische Kenntnisse um diese neue Technologie, die die Temperaturstrahler ersetzen soll, ermöglichen und mit Herstellern und Kunden in der Lichtplanung kommunizierbar sein, jedoch keine visuell wahrgenommene Lichtqualität beurteilen.

Ein wissenschaftliches Fundament stellt die zur Spezifizierung weißer Lichtquellen wichtigsten farbmtrischen Grundlagen vor. Parallel dazu wird die Methodik zur Festlegung der zu betrachtenden Parameter und zu verwendenden Auswertungsverfahren erläutert. Dabei wird immer wieder der Bezug zur Kommunizierbarkeit der berechneten Ergebnisse hergestellt. Eine Orientierung an den Deutschen und Europäischen Normen ist dafür notwendig und wird differenziert betrachtet. Wo Ergänzungen nötig sind, werden Verfahren von weiteren international anerkannten Standards hinzugezogen.

Für den farbmtrischen Vergleich werden mit einem Spektrometer die spektralen Strahlungsverteilungen von konventionellen Glüh- und Halogenlampen und von einer großen Auswahl an LED Warm Dimming Produkten aufgenommen. Der Umfang der untersuchten LED Warm Dimming Produkte bildet die auf dem Beleuchtungsmarkt erhältlichen Produkte ab. Mit den von der Messgerätesoftware gelieferten Parametern erfolgt die weitere Zusammenstellung und Darstellung der farbmtrischen Eigenschaften in Grafiken. Zuerst werden die Ergebnisse der Temperaturstrahler vor- und ihnen anschließend die der LED Warm Dimming Produkte gegenübergestellt. Schließlich wird das erreichte Ziel formuliert und weitere Ausblicke auf fortführende Untersuchungen genannt.

¹ Europäische Kommission, 2012

² Licht.de; 2016; Ausstieg in vier Stufen

2. Wissenschaftliches Fundament und Methodik

2.1. Zwei Formen der Lichterzeugung

Für den farbmtrischen Vergleich von LED Warm Dimming Produkten und Temperaturstrahlern, den konventionellen Glüh- und Halogenlampen, sollen vorab die dabei unterschiedlichen Prozesse der Lichterzeugung betrachtet werden.

2.1.1. Temperaturstrahler

Ein idealer Temperaturstrahler ist ein Festkörper, der über den gesamten Wellenlängenbereich auftreffende Strahlung absorbiert und zugleich elektromagnetische Strahlung aussendet. Die spektrale Strahlungsverteilung dieser ausgesendeten Strahlung hängt direkt mit der Oberflächentemperatur des Temperaturstrahlers zusammen und ist kontinuierlich. Ein idealer Temperaturstrahler ist der sogenannte Plancksche Strahler, oder auch Schwarze Strahler genannt. Sein Absorptionsgrad entspricht 1, wohingegen reale Körper einen geringeren Wert aufweisen. Bei einer Oberflächentemperatur von etwa 800K ([K]=Kelvin, Einheit der absoluten Temperatur³) beginnt der Plancksche Strahler Licht im sichtbaren Wellenlängenbereich von 380nm bis 780nm auszusenden.⁴ Eine Oberflächentemperatur von 0K entspricht - 273°Celsius.⁵ 800K entsprechen demnach 527°Celsius.

Die spektrale Strahlungsverteilung des Planckschen Strahlers ist mit dem Planckschen Strahlungsgesetz kalkulierbar (siehe Abschnitt 2.3.4.2.) und zeigt in Abbildung 1 die spezifische Verschiebung des Maximums der Strahlungsverteilung hin zu den kurzen Wellenlängen. Die Lichtfarbe geht von einer warmen, rötlichen in eine blau-weiße Empfindung über.⁶ Weiter steigt die Höhe der spektralen Ausstrahlung mit zunehmender Temperatur.⁷

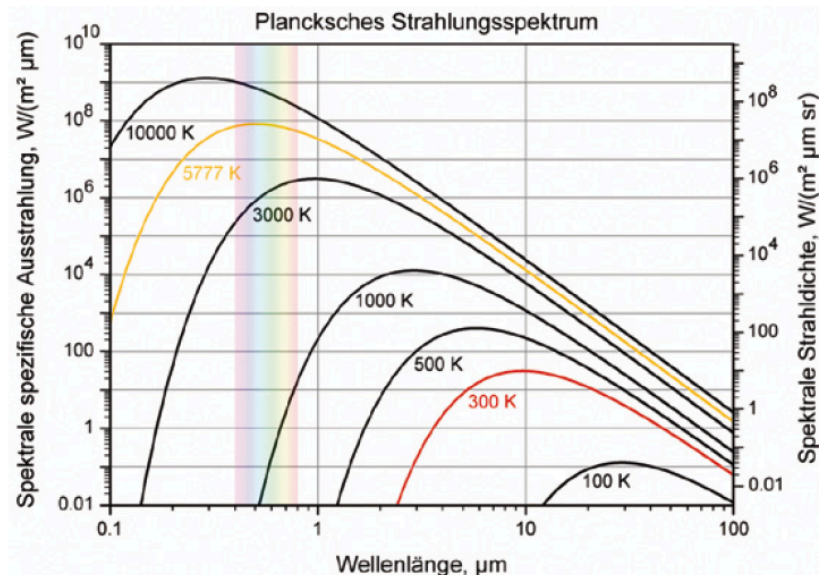


Abbildung 1: Plancksches Strahlungsspektrum, Verschiebung des Maximums der Strahlungsverteilung hin zu kurzen Wellenlängen und Zunahme der spektralen Ausstrahlung bei hohen Temperaturen Quelle: Greule, Roland; 2015: 107

³ Tipler, Paul A.; Mosca, Gene; 2015: 542

⁴ Ris, Hans Rudolf; 2015: 20

⁵ Greule, Roland; 2015: 29

⁶ Greule, Roland; 2015: 29

⁷ Greule, Roland; 2015: 107

Als häufig verwendete Referenzlichtquelle wird der Plancksche Strahler z.B. zur Bestimmung der ähnlichsten Farbtemperatur (Correlated Colour Temperature, CCT) einer Lichtquelle benutzt (Abschnitt 2.3.4.2.).

Bei der Glüh- und Halogenlampe beginnt durch Anlegen einer Spannung Strom durch den Glühdraht zu fließen. Dadurch erhitzt sich der Festkörper. Je nach Temperatur wird die zugeführte Energie in 5% bis 15% sichtbares Licht umgewandelt.⁸ Der Rest ist Infrarot- bzw. Wärmestrahlung. Dadurch erreicht die Glühlampe gerade mal eine Lichtausbeute von 14lm/W ([lm]=Lumen, Lichtstrom).⁹ Der geringe Wirkungsgrad ist der Grund des Glühlampenverbotes.¹⁰

Der Effekt des Warm Dimmings ergibt sich analog daraus, dass beim Herunterdimmen des Temperaturstrahlers seine Temperatur abnimmt und sich das Maximum seiner spektralen Strahlungsverteilung zu den langen Wellenlängen, also zu einer rötlichen Lichtfarbe, verschiebt. Von den LED Warm Dimming Produkten kann aufgrund der verschiedenen Lichterzeugung dieses Verhalten physikalisch nicht erwartet werden. Dennoch ist derselbe wahrgenommene Effekt des wärmer werdenden Lichtes nachzubilden.

2.1.2. Elektrolumineszenz

Auch bei den Halbleiterbauelementen LED (Light-Emitting Diode) wird eine Spannung an einen Festkörper angelegt. Mit den Eigenschaften einer Diode emittiert die LED bei anliegender elektrischer Gleichspannung und fließendem Strom in Vorwärts- bzw. Durchlassrichtung elektromagnetische Strahlung im sichtbaren Bereich. Der gegenüber dem Temperaturstrahler elektrische und nicht thermische Prozess führt zu einer Rekombination von positiven und negativen Ladungsträgern in der Sperrschicht des Halbleiters.¹¹ Diese frei werdende sichtbare Energie wird Elektrolumineszenz genannt. Das emittierte Licht weist ein schmalbandiges Spektrum auf. Dessen Lichtfarbe hängt vom Halbleitermaterial, welches die dominante Wellenlänge bestimmt, ab.¹²

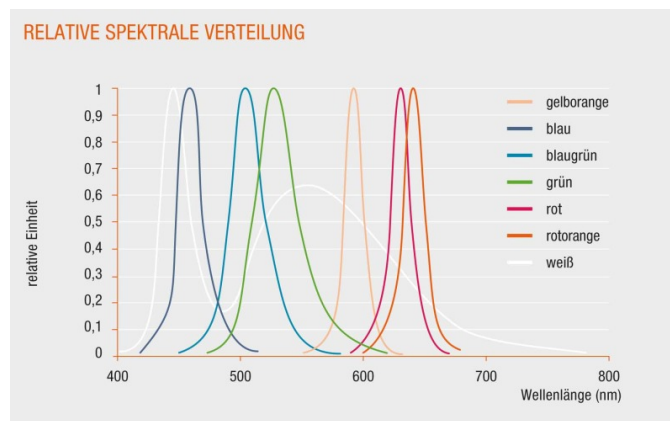


Abbildung 2: LED-Spektren, Quelle: Osram, 2016

An dieser Stelle der Lichterzeugung kann noch nicht von weißem Licht gesprochen werden. Die Definition von weißem Licht folgt im nächsten Abschnitt. Wie weißes Licht bei LEDs erzeugt wird, ist im Abschnitt 2.2.2. zu lesen.

⁸ Ris, Hans Rudolf; 2015: 79

⁹ Licht.de; 2016; Energie-Effizienzklassen

¹⁰ Licht.de; 2016; Das Ziel: Energie und Kosten sparen

¹¹ Trilux; 2016: 188

¹² Licht.de; Farben aus dem Halbleiter; 2016

Auch die LED-Lampe weist Verluste, die nicht zur Lichtgewinnung beitragen, auf. Da die Weißlicht-Erzeugung dabei mitwirkt, sind die Angaben dazu im Abschnitt 2.2.2. zu finden.

2.2. Weißes Licht

Für den im nächsten Abschnitt beschriebenen Prozess der Entstehung von weißem Licht bei LEDs und der Behandlung dynamischen Weißlichtes bei LED-Produkten, welches ohne entsprechende Reduzierung des Lichtstroms im Prinzip der Effekt des Warm Dimming ist, soll vorab weißes Licht näher beschrieben sein.

Die Sonne ist ein Temperaturstrahler und evolutionsbedingt das für uns natürlichste weiße Licht. So beschreibt auch Hecht in seinem, von vielen Universitäten verwendetem Standardwerk zur Optik, dass „der Begriff Weiß [...] von unserer Wahrnehmung des Tageslichtspektrums abzuhängen“ scheint.¹³

Physikalisch betrachtet besteht weißes Licht aus einem über alle Wellenlängen des sichtbaren Bereiches energiegleichem Spektrum.¹⁴ Dass weißes Licht sich aus allen Wellenlängenanteilen des sichtbaren Spektrums zusammensetzt, kann mittels eines Prismas, das die einzelnen Wellenlängen des einfallenden Lichtes unterschiedlich bricht und so in seine spektralen Anteile zerlegt, abgebildet werden. Das Auge kann die Lichtspektren nicht in seine spektralen Anteile auflösen.

Eine energiegleiche spektrale Strahlungsverteilung ist in realen Umgebungssituationen zudem nicht zu finden. Eine Annäherung, mit abfallenden Randbereichen, könnte der Plancksche Strahler um die 4500K darstellen. Tageslicht liegt mit höheren Farbtemperaturen vor (bedeckter Himmel: 6700-7000K, blauer Himmel ohne direkte Sonne 12000-30000K¹⁵) und weist auch kein energiegleiches Spektrum auf (siehe z.B. Normlichtart D65 Abschnitt 2.2.1.). Die Lichtfarbe von Tageslicht wird von blau-weiß (bei bedecktem Himmel) bis zu blauviolett-weiß (klaren bauen Himmel) empfunden.

Künstliches Licht, wie z.B. ein Feuer oder die konventionelle Glühlampe, sind uns ebenfalls vertraute Lichtquellen und ergänzen Licht dort, wo das Tageslicht nicht hingelangt oder zeitweise nicht vorhanden ist. Ihre ähnlichsten Farbtemperaturen liegen unterhalb von 3000K und erzeugt bei entsprechend geringerer Lichtintensität Tageslicht gegenüber eine wärmere und gemütliche Atmosphäre. Weitere künstliche Lichtquellen, wie z.B. Leuchtstoffröhren und LEDs, können sowohl niedrigere, als auch Tageslicht ähnliche Farbtemperaturen erreichen. Die zu diesen Lichtquellen zugehörigen Spektren setzen sich ganz unterschiedlich zusammen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass weißes Licht in realen Beobachtungsbedingungen seiner physikalischen Definition gemäß nicht auftritt. Als weißes Licht empfinden wir nicht nur eine bestimmte, sondern unterschiedliche Lichtquellen mit zudem ganz verschiedenen spektralen Zusammensetzungen.

In der Lichtplanung wird Weißlicht unterschiedlicher Lichtfarbe für allgemeine Beleuchtungszwecke in drei Kategorien unterteilt:

Tageslichtweiß	>5300K
Neutralweiß	3300K bis 5300K
Warmweiß	<3300K

16

¹³ Haagen-Schützenhofer, C.; Langer, S.; Hiller, R.; Klingeböck, A.; Rohringer, C.; Franz, G.; Parzer, V.; Ritt, P.; Steiner, C.; Stifter, D.; 2014: 2

¹⁴ Dörsam, E.; 2012

¹⁵ Greule, Roland; 2015: 29

¹⁶ DIN; DIN EN 12464-1; 2011: 17

2.2.1. CIE-Normlichtarten

Zur Heranführung an den Planckschen Strahler als farbmetrischer Vertreter der untersuchten Temperaturstrahler, also von Weißlichtquellen, und somit seiner Funktion als Referenz in der Auswertung soll seine Anwesenheit in den Grundlagen der Farbmetrik nachfolgend erwähnt sein.

Sollen mittels der Farbmetrik, welche die „Lehre von Maßbezeichnungen zwischen den Farben“¹⁷ ist, farbmetrische Eigenschaften der Lichtquellen beschrieben und kommuniziert werden, so sollte die Erstellung von vergleichbaren Ergebnissen erfolgen. Aus diesem Grund gibt die CIE (Commission internationale de l'éclairage) zwei Lichtarten zur Festlegung von Beleuchtungssituationen vor.¹⁸ Diese unabhängige, internationale Beleuchtungskommission knüpft weltweite Kooperationen und dient dem Austausch sämtlicher Informationen rund um Licht und Beleuchtung. Von der ISO (International Organization for Standardization) wird sie als Standardisierungsgremium anerkannt.¹⁹

Der Begriff Lichtart beschreibt eine festgelegte spektrale Strahlungsverteilung, die jedoch von einer künstlichen Lichtquelle nicht umsetzbar sein kann.²⁰ Die Normlichtart D65, mit der ähnlichsten Farbtemperatur (CCT, Abschnitt 2.3.4.2.) von 6500K soll Anwendungen mit „repräsentativem Tageslicht“²¹ dienen. Die Normlichtart A besitzt die spektrale Strahlungsverteilung des Planckschen Strahlers bei 2856K und ist für die Anwendung von „typisch häuslicher Beleuchtung mit Wolfram-Glühfaden“²² gedacht. Weitere Lichtarten werden in der CIE-Publikation CIE 15:2004 beschrieben, aber „haben nicht den Status von primären CIE-Normen“²³.

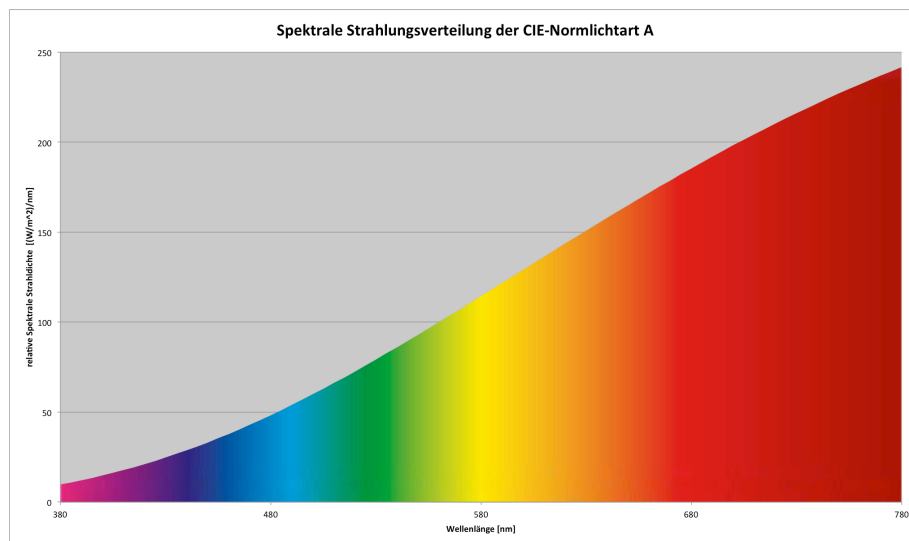


Abbildung 3: Spektrale Strahlungsverteilung der CIE-Normlichtarten A, Quelle: Hein, Mara

¹⁷ Greule, Roland; 2015: 74

¹⁸ DIN; DIN EN ISO 11664-2; 2011: 4

¹⁹ CIE; 2016

²⁰ DIN; DIN EN ISO 11664-2; 2011: 4

²¹ DIN; DIN EN ISO 11664-2; 2011: 4

²² DIN; DIN EN ISO 11664-2; 2011: 4

²³ DIN; DIN EN ISO 11664-2; 2011: 4

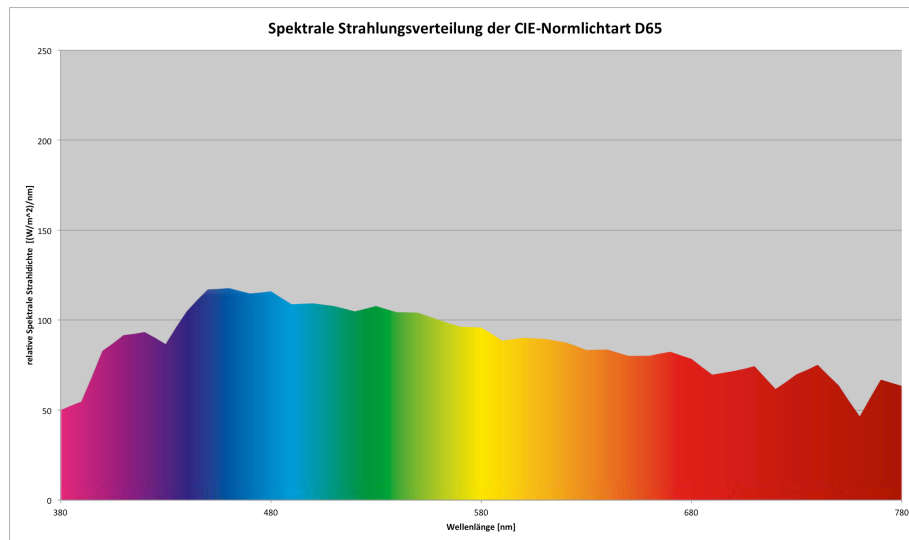


Abbildung 4: Spektrale Strahlungsverteilung der CIE-Normlichtart D65 Quelle: Hein, Mara

Die Betrachtung des Warm Dimming Effektes bewegt sich unterhalb von 3300K und somit im warmweißen Bereich. Die Bezugslichtart ist hier der Plancksche Strahler. Eine Bewertung jedoch allein der Normlichtart A nach, die sich auf eine festgelegte CCT von 2856K bezieht, wäre für die Untersuchung der farbmtrischen Eigenschaften bei sich verändernder Farbtemperatur während des Dimmverlaufes zu ungenau. Der Effekt des Warm Dimmings muss einbezogen werden und somit der Plancksche Kurvenzug (Abschnitt 2.3.4.2.) von 3300K bis 1600K als Bezug dienen.

2.2.2. LED-Weißlichtmodule in der Umsetzung

Das Spektrum von weißem Licht entsteht bei LEDs entweder durch die additive Mischung von RGB-LEDs, der Konversion von blauen LEDs mittels aufgetragenem, gelb emittierendem Lumineszenzfarbstoff²⁴ oder einer Kombination aus beidem: der Mischung von LEDs unterschiedlicher Wellenlänge mit teils aufgetragenem Lumineszenzfarbstoff.

LED-Module können auf unterschiedliche Arten der Implementierung ihrer Einzelbauteile, den LED-Chips, realisiert werden. Die drei wichtigsten Technologien lauten Durchsteckmontage (THT, Through Hole Technology), Oberflächenmontage (SMD, Surface Mounted Device) und Nacktchipmontage (CoB, Chip on Board). Erstere ist mittlerweile nicht mehr zeitgemäß, da sie nicht im Hochleistungsbereich vorhanden ist und bezogen auf den weiter optimierten Herstellungsprozess mit einer immer größer werdenden Bauteildichte auf der Leiterplatte nicht zutrifft.²⁵

Der Unterschied zwischen SMD und CoB besteht in der Montage der Halbleiterelemente. Beim CoB werden die ungeschützten, puren LED-Chips direkt mittels Kunstharz-Kleber auf die Leiterplatte montiert. Erst danach werden die Halbleiterelemente mit einer Epoxidharz-Linse eines bestimmten Ausstrahlwinkels versiegelt. SMDs wiederum sind LED-Chips mit Sekundäroptik und werden als LED-Package (auch LED-Einheit genannt, Abb. 6) aufgelötet. SMDs bilden den industriellen Standard und werden am häufigsten verbaut.²⁶ Dieses Verhältnis liegt auch bei den untersuchten LED Warm Dimming Produkten vor. Die Miniaturisierung der SMDs ist allerdings begrenzt und die Verbindungsstellen der Einheit und der Lötstelle mit der Leiterplatte bilden einen thermischen Widerstand. Beim Chip-on-Board kann durch gezielt gewählte Leiterplattenmaterialien eine gute Wärmeableitung erzielt

²⁴ Ris, Hans Rudolf; 2015: 156

²⁵ Ledon; Die Hohe Kunst der LED-Montage; 2016

²⁶ Trilux; 2016: 196

werden.²⁷ Mehrere eng nebeneinander platzierte LED-Chips können beim CoB unter einer Silikon-, Glas- oder Lumineszenzstoff-Silikon-Mischung untergebracht werden. Somit kann aus einer homogenen und kleinen Fläche viel Licht abgegeben werden.



Abbildungen 5, 6, 7: links: THT LED (z.B. 3,3mmx1,8mm), Quelle: TME, 2014 ; mitte: LED-Modul mit SMDs (Ø30mm), Quelle: LED-Store, 2016; rechts: Chip-on-Board Zenigata von Sharp (15mmx12mm), Quelle: Sharp, 2016

Bei LEDs entstehen während des Betriebes elektrische Verluste durch das Vorschaltgerät, thermische Verluste aufgrund von Umwandlungsverlusten im LED-Chip und optische Verluste durch die Primär- (Silikon- oder Glasbeschichtung mit ggf. Lumineszenzstoff zur Weißlichtkonvertierung) und Sekundäroptik (Reflektoren, TIR (Total Internal Reflection) – Linsen und sonstige Lichtformer). Im aktuellen LED Guide 2016 vom großen, marktführenden Hersteller Trilux wird für neue Module eine mögliche Umwandlung von 50% investierter elektrischer Energie in Licht angegeben.²⁸ Weiße LEDs besitzen laut Trilux in der Praxis eine Lichtausbeute von bis zu 200lm/W.²⁹

Eine Weißlicht-LED, die dimmbar ist, aber nur aus einer Lichtfarbe besteht, verändert ihre ähnlichste Farbtemperatur beim Dimmvorgang fast gar nicht. Bei dynamisch weißem Licht, d.h. bei Weißlicht mit veränderbarer ähnlichster Farbtemperatur, und auch beim Warm Dimming Effekt, der darüber hinaus noch mit einer entsprechenden Reduktion des Lichtstroms verbunden ist, müssen mindestens zwei LEDs verschiedener Lichtfarbe während der Anwendung mit variablen Anteilen gemischt werden. Der Entstehungsprozess des Warm Dimming Effektes, der beim Temperaturstrahler ein Nebenprodukt bzw. eine charakteristische Eigenschaft des Leuchtmittels ist, ist bei der LED-Technologie komplex.

Verwendete Technologien bei Warm Dimming LED Produkten werden im Abschnitt 3.2. genannt und in der Untersuchung der LED Warm Dimming Produkte (ab Abschnitt 3.5) vorgestellt.

2.3. Farbmetriek: vom Farbreiz zur Farbempfindung

(Licht- oder Körper-)Farben (Abschnitt 2.3.1.) unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung können beim Betrachter die gleiche Farbvalenz (Abschnitt 2.3.2.), d.h. die gleiche „Wirkung eines Farbreizes auf die Reizzentren im menschlichen Auge“ erzeugen.³⁰ Die Farbmetriek soll

²⁷ Ledon; Die Hohe Kunst der LED-Montage; 2016

²⁸ Trilux; 2016: 189

²⁹ Trilux; 2016: 22

³⁰ Lübke, Eva; 2013: 25

u.a. dazu da sein, bei gleichen Beobachtungsbedingungen eine Voraussage über die gleiche Farberscheinung unterschiedlicher Farbreize zu treffen.

Untersuchungen mit großen Probandenzahlen sind zeitaufwendig und somit praxisuntauglich. Zudem gibt es auch bei normalsichtigen Betrachtern Abweichungen in der Farbempfindung. Durch die Festlegung von Spektralwertfunktionen (Abschnitt 2.3.3.1.) soll eine zeitlich und örtlich unabhängige Berechnung von Farbwerten und den Vergleich jener ermöglichen.

Die folgende Grafik stellt den groben Ablauf der niederen zur höheren Farbmetrik dar und verweist auf die dazugehörigen Abschnitte. Die niedere Farbmetrik wird auch Farbvalenzmetrik genannt. Sie dient der Kalkulation von Maßzahlen, die die Farbempfindung basierend auf der physikalischen Verarbeitung der Sinneswahrnehmung beschreiben soll. Im Abschnitt 2.3.4. findet ein fließender Übergang zur höheren Farbmetrik, auch Farbempfindungsmetrik genannt, statt. Dort werden „Empfindungsunterschiede und Harmonien für Farben (Farbschwellen, Farbdifferenzen, Farbanordnungen und –systeme) untersucht und Beziehungen zu den physikalischen Reizen hergestellt“³¹.

Die Betrachtung dieser zur Farbmetrik gehörenden Schritte ist zur Vorbereitung auf die farbmetrische Analyse gedacht und stellt parallel die für die Auswertung wichtigen Parameter heraus.

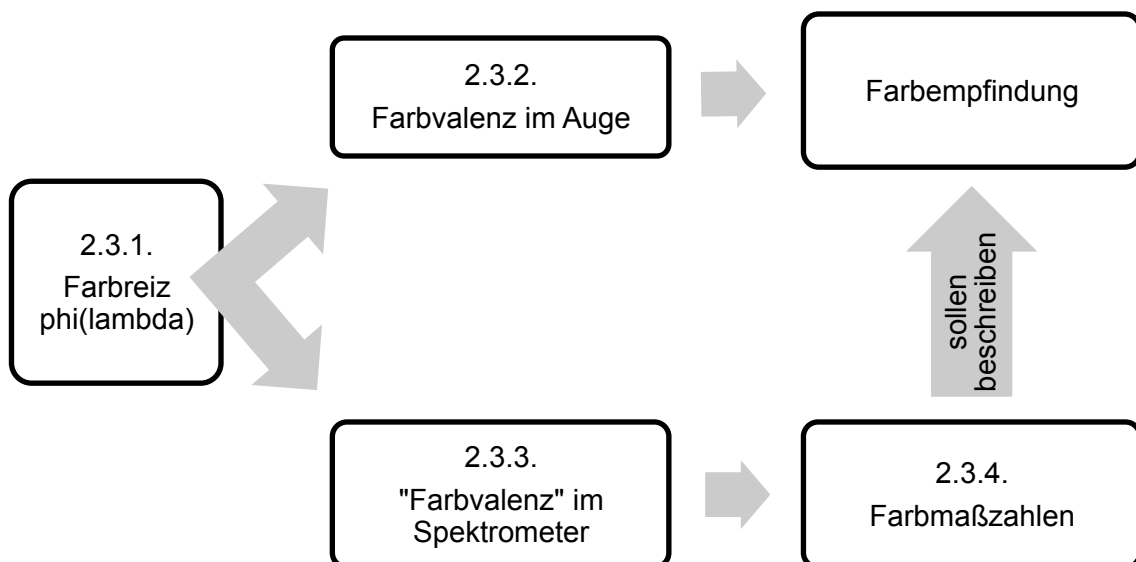


Abbildung 8: Flussdiagramm „vom Farbreiz zur Farbempfindung“ Quelle: Hein, Mara

2.3.1. Farbreiz $\varphi_\lambda(\lambda)$

Ein Farbreiz ist die Strahlung, die durch Wirkung auf die Reizzentren unserer Netzhaut eine Farberscheinung verursacht.³² Die zu dieser Strahlung zugehörige Farbreizfunktion $\varphi_\lambda(\lambda)$ kann sich auf zwei Arten zusammensetzen:

1. Bei selbstleuchtenden Lichtquellen (Primärstrahlern) entspricht die spektrale Strahlungsverteilung $S(\lambda)$ der Farbreizfunktion $\varphi_\lambda(\lambda)$.³³ Eine Lichtfarbe wird betrachtet.

³¹ Greule, Roland; 2015: 74

³² DIN; 5033-1; 2009: 4

³³ Greule, Roland; 2015: 72

2. Im Falle von reflektierenden oder transmittierenden Objekten entsteht die Farbreizfunktion aus der spektralen Strahlungsverteilung $S(\lambda)$ der Beleuchtung und den wellenlängenbezogenen Reflexionseigenschaften $\beta_i(\lambda)$ des Objektes.³⁴ Die Erscheinung einer Körperfarbe wird erzeugt. Sogenannte Sekundärstrahler erzeugen keine Strahlung und werden erst sichtbar, wenn Strahlung eines Primärstrahlers auf sie trifft.

Der erste Fall trifft auf die Messungen und die meisten Kalkulationen für diese Ausarbeitung zu. Mit dem Messgerät wurde direkt in das Leuchtmittel gemessen (s. 3.1.), die Augen betrachten das aus der Lichtquelle austretende Licht an. Das Verhalten der verschiedenen Lichtquellen wird also unabhängig von deren Einsatz in einer bestimmten farbigen Umgebung betrachtet.

Der zweite Fall trifft bei der Messung der Farbwiedergabe (siehe Abschnitt 2.3.5.) von farbigen Objekten unter bestimmten Lichtquellen zu. Dazu werden neben den Spektren der Testlicht- und Bezugslichtquelle die Farbreizfunktionen der betrachteten Sekundärstrahler unter diesen zwei Lichtquellen aufgenommen. Die Messung von Farbreizfunktionen bestimmter Objekte macht in Einzelfällen in der Lichtplanung Sinn (z.B. bei speziellen verplanten Stoffen). Für die gängige Praxis müssen allgemein definierte Testfarben bzw. definierte wellenlängenbezogene Reflexionseigenschaften $\beta_i(\lambda)$ dieser Testfarben eine allgemeine Aussage über die Farbwiedergabe (Ra oder R1 – R14, Abschnitt 2.3.5.) des Leuchtmittels ermöglichen.

Demnach wird in dieser Arbeit nur der erste Fall der Farbreizfunktion gemessen und die Farbwiedergabe für die definierten Testfarben kalkuliert.

2.3.2. Farbvalenz im Auge

Das menschliche Auge besitzt drei verschiedene Arten von Farbrezeptoren (Zapfen), die ihre Empfindlichkeitsmaxima einmal im kurzwelligen (S, short), mittleren (M) und langwelligen (L) Wellenlängenbereich besitzen. Diese Wellenlängenmaxima werden als Blauviolett, Grün und Gelb empfunden.³⁵

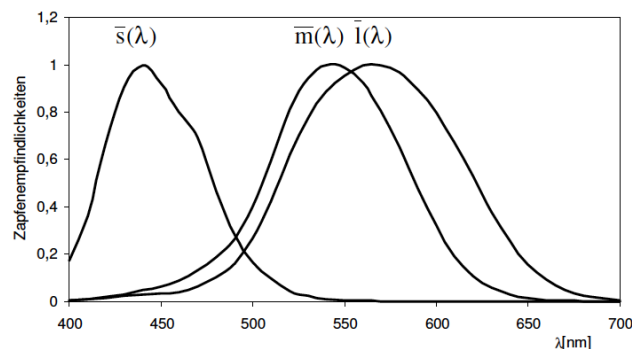


Abbildung 9: Relative spektrale Empfindlichkeit der Farbrezeptoren $\bar{s}(\lambda)$, $\bar{m}(\lambda)$, $\bar{l}(\lambda)$ Quelle: Lübke, Eva; 2013: 14

Der ins Auge gelangte Farbreiz wird durch diese drei Zapfenarten gewichtet. Die Farbvalenz ist die daraus resultierende Wirkung, die im weiteren Verarbeitungsprozess des Reizes zu einer bestimmten Farbempfindung führt.³⁶

Hinter diesem Verarbeitungsprozess steckt ein komplexer Vorgang, der hier aufgrund des zu großen Umfangs nicht behandelt werden soll. Als Analogie zur Farbmeterik genügt die Nennung

³⁴ Greule, Roland; 2015: 72

³⁵ Lübke, Eva; 2013: 13

³⁶ DIN; DIN 5033-1; 2009: 6

der Dreifarbentheorie nach Young und Helmholtz, die die Signalgewinnung mittels der drei Zapfen beschreibt.³⁷

Neben den Farbrezeptoren, die für das Tagsehen (photopisches Sehen) zuständig sind, besitzt das menschliche Auge lichtempfindliche Stäbchen, die bei geringen Helligkeiten (skotopisches Sehen, Nachtsehen) auch noch empfindlich sind.³⁸ Beim skotopischen Sehen werden Farben aufgrund der fehlenden Farbinformationen durch die Stäbchen schwächer bis ungesättigt wahrgenommen. Für die hier betrachteten Dimmsituationen spielen die Stäbchen jedoch keine Rolle. Sie wirken sich auf das Farbsehen erst bei solch niedrigen Helligkeitsleveln wie unter Sternenlicht aus.³⁹

2.3.3. Farbvalenz im Spektrometer

Im Spektrometer, einem Messgerät zur Aufzeichnung der nach Wellenlängen aufgelösten Strahlungsanteile (Abschnitt 2.5.), erzielt der Farbreiz so gesehen keine Wirkung. Allerdings ist das Spektrometer hier sinnbildlich mit dem Auge als vergleichbarer Empfänger gemeint. Die eigentliche Signalgewinnung der Farbvalenz findet in der Kalkulation der Messgerätesoftware mittels mathematischer Formeln statt.

Den Empfindlichkeitskurven des menschlichen Auges, die den Farbreiz bewerten, werden an dieser Stelle die von der CIE definierten Spektralwertfunktionen des Normalbeobachters gegenübergestellt.

2.3.3.1. 2°- und 10°-Normalbeobachter

1827 wurde vom Physiker Thomas Young festgehalten, dass sich durch entsprechende Mischung der Spektralfarben Rot, Grün und Blau alle Farbempfindungen erzeugen lassen.⁴⁰

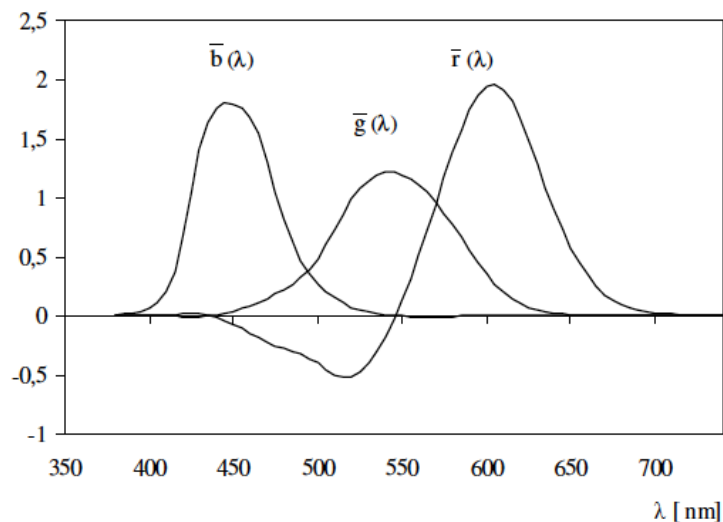


Abbildung 10: Spektralwertfunktionen der reellen Primärvalenzen \bar{B} (Blau), \bar{G} (Grün) und \bar{R} (Rot) zur Festlegung des 2°-Normalbeobachters Quelle: Lübbe, Eva; 2013: 23

Die erstellten Kurven des 2°-Normalbeobachters (Abb. 11) basieren auf Experimenten, bei denen die Testpersonen jeden einzelnen monochromatischen Anteil gleicher physikalischer

³⁷ Lübbe, Eva; 2013: 17

³⁸ Lübbe, Eva; 2013: 15

³⁹ Rea, Mark S.; 2013: 10

⁴⁰ Lübbe, Eva; 2013: 22

Leistung eines sogenannten äquienergetischen Spektrums mit einer roten, einer grünen und einer blauen Lichtquelle nachmischten.⁴¹ Dabei betrachteten Sie ein 2°-Beobachtungsfeld, welches in der Mitte geteilt die beiden zu vergleichenden Lichtfelder zeigte.

Zum Nachmischen war es jedoch bei einigen Wellenlängen nötig, seitens des Referenzreizes Mischlicht aufzuaddieren. Diese sich in den Spektralfunktionen negativ ergebenden Anteile sollten vermieden werden, woraufhin sie in die Normspektralwertfunktionen umgerechnet wurden.⁴²

Die von der CIE 1931 veröffentlichten Normspektralwertfunktionen des 2°-Normalbeobachters (Abb. 11) unterscheiden sich von den (Zapfen-)Empfindlichkeitskurven des menschlichen Auges (Abb. 10). Bei der Festlegung der Normspektralkurven wurde jedoch darauf geachtet, dass $\bar{y}(\lambda)$ der Hellempfindlichkeitsskurve $V(\lambda)$ des Tagessehen entspricht.⁴³ $V(\lambda)$ beschreibt die Helligkeitsempfindlichkeit des menschlichen Auges über dem sichtbaren Wellenlängenbereich. Das Maximum liegt bei 555nm. Die Gewichtung von radiometrischen Größen mit der $V(\lambda)$ -Kurve führt zu den photometrischen Größen.⁴⁴

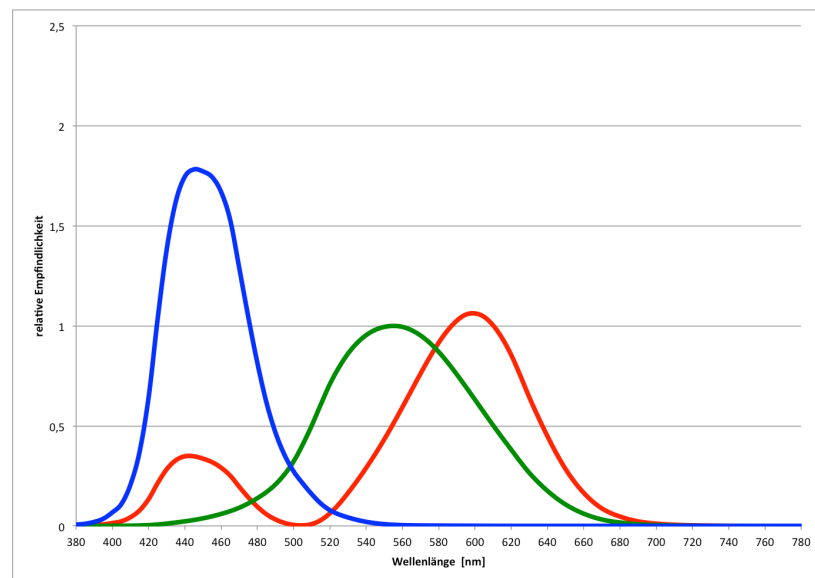


Abbildung 11: Spektralwertfunktionen $\bar{x}(\lambda)$ (Rot), $\bar{y}(\lambda)$ (Grün), $\bar{z}(\lambda)$ (Blau) des farbmimetrischen 2°-Beobachters
Quelle: Hein, Mara; 2016

⁴¹ Söllner, Stefan; 2009: 5

⁴² Söllner, Stefan; 2009: 6f

⁴³ DIN; DIN EN ISO 11664-1:2011-07; 2011: 8

⁴⁴ Instrument Systems GmbH; 2008: 5

In den meisten Anwendungsfällen werden größere Flächen betrachtet. 1964 wurde aufgrund dessen noch der 10°-Beobachter eingeführt.⁴⁵ Auswertungen, die auf diesen abweichenden Normspektralkurven (Abb. 12) basieren werden mit einem Index von 10 versehen.

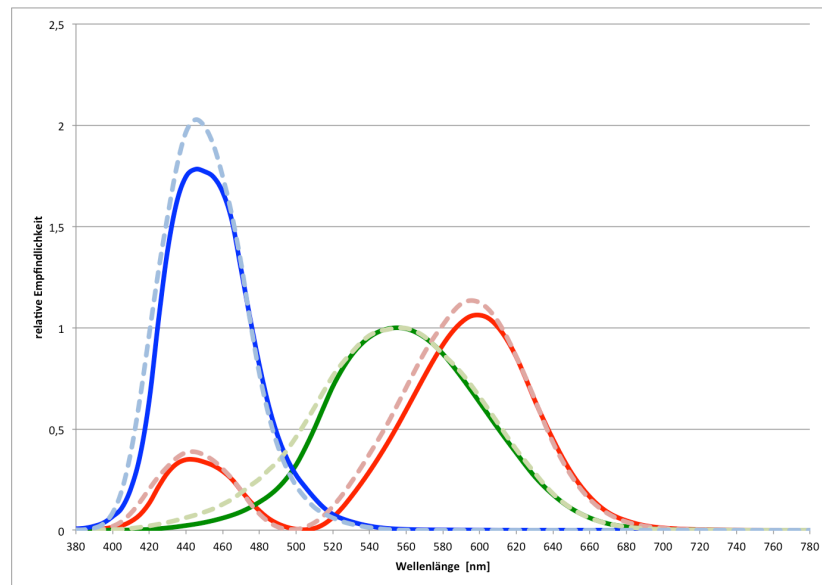


Abbildung 12: durchgezogene Linien: Spektralwertfunktionen $\bar{x}(\lambda)$ (Rot), $\bar{y}(\lambda)$ (Grün), $\bar{z}(\lambda)$ (Blau) des farbmetrischen 2°-Beobachters; gestrichelte Linien: Spektralwertfunktionen $\bar{x}_{10}(\lambda)$ (Rot), $\bar{y}_{10}(\lambda)$ (Grün), $\bar{z}_{10}(\lambda)$ (Blau) des farbmetrischen 10°-Beobachters Quelle: Hein, Mara; 2016

Die Auswertung für die in dieser Arbeit erfolgte Untersuchung von LED Warm Dimming Produkten und Temperaturstrahler sollte aus Sicht der Autorin nach dem 10°-Beobachter erfolgen, weil auch in der Lichtplanung meistens größere Flächen betrachtet werden. Dennoch wird im Nachfolgenden ausschließlich nach dem 2°-Beobachter ausgewertet. Gründe hierfür liegen in der fehlenden Stringenz bei der Ausführung der 10°-Beobachter-Auswertung in den Normen und in der noch marktüblichen Kommunikation basierend auf dem 2°-Beobachter.

Beispielsweise wird für die Berechnung der ähnlichsten Farbtemperatur (CCT= Correlated Colour Temperature, Abschnitt 2.3.4.2.) und für die Berechnung von $\Delta u'v'$ (Farbartdifferenz, Abschnitt 2.3.4.3.) seitens der Norm dennoch der 2°-Beobachter als Grundlage vorgeschrieben.^{46 47 48}

Nicht alle Spektrometer bieten eine 10°-Beobachter-Auswertung an und aufgrund der schon länger etablierten Methode von 1931 ist anzunehmen, dass der überwiegende Beleuchtungsmarkt ebenfalls farbmetrische Angaben auf dem 2°-Beobachter basierend angibt. Bei der dieser Arbeit zugrundeliegenden Recherche gab es keinen Fall, bei dem in einem Datenblatt die Farbwertanteile x und y (Abschnitt 2.3.4.1.) mit dem Index 10 versehen waren.

Eine Umrechnung von den Werten des 2°-Beobachters in Werte des 10°-Beobachters oder umgekehrt ist „wegen der physiologischen Voraussetzungen nicht möglich“.⁴⁹

Weiter soll an dieser Stelle kurz angemerkt sein, dass im Berechnungsverlauf des Farbwiedergabeindex (Abschnitt 2.3.5.1.) die CCT enthalten ist. Die dort ermittelte Referenzlichtquelle wird dann nach dem 2°-Beobachter bestimmt. Inwiefern es Sinn ergibt, unter diesem Einfluss 10°-Beobachter-Werte zu verrechnen, ist fraglich. Messgerätehersteller, wie z.B. JETI geben die CCT im 10°-Beobachter-Modus nach dem 2°-Betrachter an. Demnach fehlt dann auch der Index 10.

⁴⁵ Lübbe, Eva; 2013: 23

⁴⁶ CIE; 13.3; 1995: 4

⁴⁷ Smet, Kevin A.G.; Whitehead, Lorne; Schanda, Janos; Luo, Ronnier M.; 2015: 63

⁴⁸ DIN; DIN EN ISO 11664-5:2011; 2011: 6

⁴⁹ Dörsam, E.; 2012

Einblicke in die aktuelle Forschung zur Überarbeitung einiger farbmetrischer Formeln zeigen den Trend zur ganzheitlichen Anwendung des 10°-Beobachters und sind im Abschnitt 2.3.5.3. nachzulesen.

2.3.4. Farbmaßzahlen

Durch Integration über einen Spektralbereich von 360nm bis 830nm ergeben sich die Normfarbwerte X, Y und Z:

$$X = k \int_{\lambda} \varphi_{\lambda}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = k \int_{\lambda} \varphi_{\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = k \int_{\lambda} \varphi_{\lambda}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

$$\text{mit } k = \frac{100}{\sum_{\lambda} s(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta(\lambda)}$$

50

Durch die Normfarbwerte soll eine Farbvalenz vollständig beschrieben werden.

Aufgrund der Gleichsetzung von $\bar{y}(\lambda)$ und $V(\lambda)$ „ist der Farbwert Y der Leuchtdichte proportional“⁵¹ und wird auch Hellbezugswert genannt⁵².

$\varphi_{\lambda}(\lambda)$ ist die wie bereits im Abschnitt 2.3.1. erwähnte Farbreizfunktion. Die für diese Bachelor-Thesis erstellten Messungen liefern Spektren in einem Bereich von 380nm bis 750nm. Wenn man die Normspektralkurven (Abbildung 11 oder 12) betrachtet, dann ist zu sehen, dass oberhalb von ca. 700nm und bei 380nm die Kurven gegen Null gehen. Ein Weglassen der zwischen 750nm und 830nm und unter 380nm liegenden spektralen Strahlungsverteilung ist somit vertretbar.

Die Normalisierungskonstante k wirkt sich auf die spätere Bestimmung der Farbwertanteile nicht aus und ist in dieser Untersuchung zu vernachlässigen. Die Normalisierung des Spektrums erbringt in diesem Fall für die Auswertung keine zusätzlichen oder genaueren Informationen. Für Selbstleuchter schreibt die DIN ebenfalls fest, dass „k für gewöhnlich aus Gründen der Zweckmäßigkeit gewählt“⁵³ wird.

Probehalber wurden die Normfarbwerte aus den gemessenen Spektren nach dieser Berechnung einmal nachgerechnet und es wurde festgestellt, dass die vom Gigahertz Optik ausgegebenen Normfarbwerte dieser vorgestellten Berechnung entsprechen. Demnach werden die ausgegebenen Normfarbwerte und auch die im nächsten Abschnitt vorgestellten Farbwertanteile für die Auswertung aus den Tabellen der Messgerätesoftware bezogen.

⁵⁰ DIN; DIN EN ISO 11664-3:2013; 2013: 6

⁵¹ DIN; DIN EN ISO 11664-1:2011-07; 2011: 8

⁵² Lübbe, Eva; 2013: 38

⁵³ DIN; DIN EN ISO 11664-3:2013; 2013: 7

2.3.4.1. Farbtafeln und Farbräume

Farbtafeln bestehen aus zwei Dimensionen während Farbräume aus dreien aufgebaut sind. In der Farbtafel werden Farbarten, die in einer Ebene im Farbraum liegen, dargestellt. Eine Farbart beschreibt Farbvalenzen, die, abgesehen von ihrer Helligkeitsinformation, gleich sind.⁵⁴ Im Farbraum werden Farbvalenzen unter Berücksichtigung ihrer Helligkeitsinformation räumlich verortet.

In der Farbtafel werden Farbdifferenzen (Abschnitt 2.3.4.3.) und im Farbraum werden Farbdifferenzen (Abschnitt 2.3.5.1.) berechnet.

Die Farbwertanteile oder auch sogenannten Farbartkoordinaten x, y bestimmen die Lage in der x, y -Normfarbtafel der CIE von 1931. Sie berechnen sich aus den Normfarbwerten X, Y und Z . Mit dem Farbwertanteil z wird die dritte Dimension aufgespannt und zusammen mit x und y die Farbe im Farbraum angegeben.

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

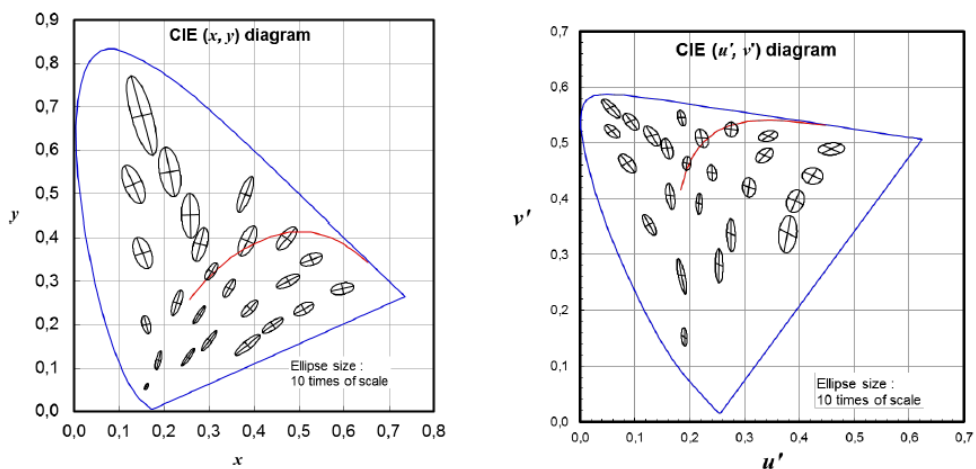
$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

$$z = 1 - x - y$$

55

Durch die Untersuchungen zu Farbabstandsschwellen von MacAdam wurde 1940 die empfindungsgemäße Ungleichabständigkeit des CIE 1931 Farbraums nachgewiesen.⁵⁶ Die Farbarten der Wahrnehmungsschwelle von Farbartabständen bilden Ellipsen, die je nach Lage in der Farbtafel unterschiedliche Radien und Ausrichtungen aufzeigen (Abb. 13). Gleichabständig müsste ein Farbraum oder eine Farbtafel dann sein, wenn die Wahrnehmungsschwelle eines Farbartabstandes, egal in welche Richtung des Diagramms, den gleichen Wegabstand hat (Farbdifferenz Abschnitt 2.3.4.3.).



Abbildungen 13, 14: MacAdam-Ellipsen (um den Faktor 10 vergrößert), links im CIE 1931 Diagramm (x, y), rechts im CIE 1976 Diagramm ($u'v'$) Quelle: CIE; CIE TN 001:2014: 2

⁵⁴ DIN; DIN 5033-1; 2009: 7

⁵⁵ DIN; DIN EN ISO 1664-3:2013; 2013: 11

⁵⁶ Greule, Roland; 2015: 80

Mit der 1960 zuerst vorgeschlagenen CIE-UCS-Farbtafel (Uniform Color Scale, uv-Farbtafel) und der 1967 überarbeiteten Version (u'v'-Farbtafel) wurde angestrebt, die Ellipsen möglichst gleich groß zu erzielen (Abb. 14).

$$u = u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$

$$v = \frac{2}{3}v' = \frac{6Y}{X + 15Y + 3Z} = \frac{6y}{-2x + 12y + 3}$$

$$w = 1 - u' - v'$$

57

Dreidimensionale Farben sollten auch in dreidimensionalen Farbräumen dargestellt werden. So wurde 1964 der für die Farbwiedergabe seit 1974 immer noch verwendete U*V*W*-Farbraum (Abschnitt 2.3.5.1.) erstellt.⁵⁸ Es folgten 1976 die Farbräume L*u*v* (CIELUV) und L*a*b* (CIELAB). L* (zuvor W*) ist die empfindungsgemäße Helligkeitsachse.⁵⁹ Beide Farbräume werden für Körperfarben verwendet.^{60 61} Der L*u*v*-Farbraum wird nicht wie so oft behauptet (zwei Beispiele unter den Fußnoten⁶² und⁶³) für Lichtfarben eingesetzt. Für Farbzeuge von selbstleuchtenden Bildschirmen findet der L*u*v*-Farbraum noch Anwendung, „wenn sie dazu verwendet werden, reflektierende oder transmittierende Objekte zu simulieren“.⁶⁴ Bei der Betrachtung von Selbstleuchtern, die zu Farbzeugen führen, die Licht als eine primäre Lichtquelle zu emittieren oder solches Licht gerichtet zu reflektieren“ scheinen, greift die Norm nicht. Allein die in ihr festgehaltene u'v'-Farbtafel und das definierten Korrelat der Sättigung können benutzt werden.

Die erfolgte Auswertung betrachtet demnach Farbarten und deren Differenzen in der u'v'-Farbtafel. Die Berechnung des Farbwiedergabeindex (Abschnitt 2.3.5.) erfolgt zwar mathematisch in einem Farbraum, aber der vom Spektrometer aufgenommene Farbreiz der Lichtfarbe wird mit Testfarben verrechnet und so quasi künstlich zu einem Farbreiz einer Körperfarbe. Für die Auswertung der wahrgenommenen Helligkeit L* (Abschnitt 2.4.2.) wird die Formel der empfindungsgemäßen Helligkeitsachse L* des L*u*v*-Farbraum verwendet. Da diese Formel die logarithmische Helligkeitsempfindung des Auges beschreiben soll und nur vom Hellbezugswert Y abhängt, kann sie auch losgelöst von diesem Farbraum betrachtet werden.

⁵⁷ Söllner, Stefan; 2009: 11

⁵⁸ Söllner, Stefan; 2009: 11

⁵⁹ Brückner, Stefan; 2014: 5

⁶⁰ DIN; DIN EN ISO 11664-5:2011, 2011: 5

⁶¹ DIN; DIN EN ISO 11664-4:2011, 2011: 5

⁶² cielab.de; 2016

⁶³ Wikipedia; CIELUV-Farbraumsystem; 2013

⁶⁴ DIN; DIN EN ISO 11664-5:2011; 2011: 5

2.3.4.2. Planckscher Kurvenzug und ähnlichste Farbtemperatur

Der Plancksche Kurvenzug (internat.: BBC, Black Body Curve) in der Farbtabelle besteht aus den verbundenen Koordinaten der Farbarten des Planckschen Strahlers bei unterschiedlichen Temperaturen (T, [K]). Auf mathematischem Wege bietet das Plancksche Strahlungsgesetz die Möglichkeit über die Berechnung der spektralen spezifischen Ausstrahlung (L) die Normfarbwerte und daraus folgend die Farbarte zu berechnen.

$$L(\lambda, T) = \frac{c_1 n^{-2} \lambda^{-5}}{\pi} \left[\exp\left(\frac{c_2}{n \lambda T}\right) - 1 \right]$$

$n = 1,00028 = \text{Standardwert für Luft (Temperatur, Luftdruck)}$

$$c_1 = 2\pi h c^2 = 3,741771 * 10^{-16} \text{ Wm}^2$$

$$c_2 = \frac{hc}{k} = 3,741771 * 10^{-16} = 1,4388 * 10^{-2} \text{ mK (entspr. internat. Temperaturskala IST-90)}$$

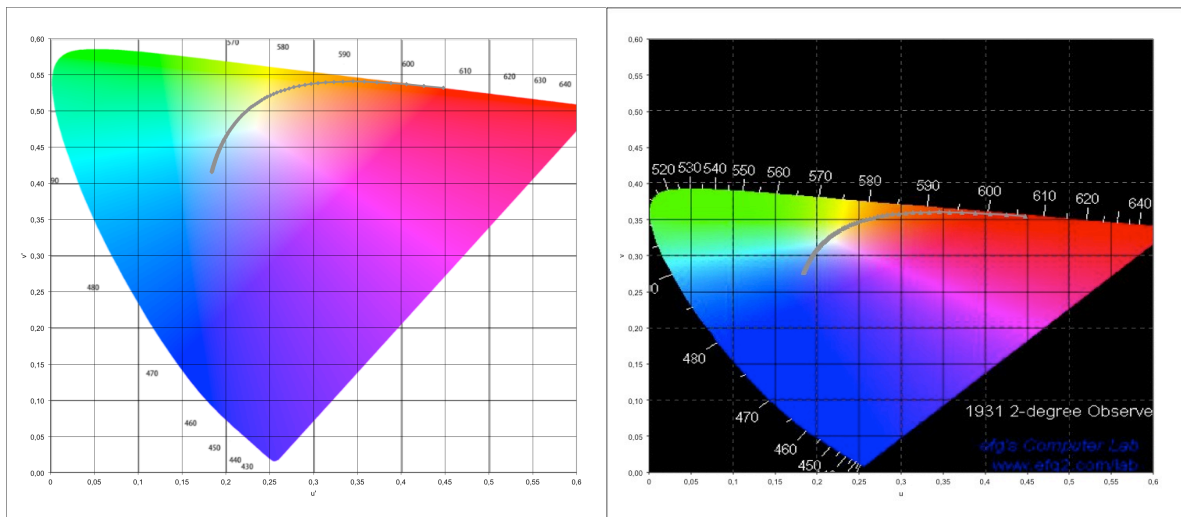
$h = \text{Plancksches Wirkungsquantum}$

$c = \text{Lichtgeschwindigkeit im Vakuum}$

$k = \text{Boltzmannkonstante}$

65

n kann zur Berechnung der CCT und somit zur Erstellung des Planckschen Kurvenzuges vernachlässigt werden.⁶⁶



Abbildungen 15, 16: Planckscher Kurvenzug von 1000K bis 20.000K in der u'v'-Farbtabelle (links) und in der u,v-Farbtabelle (rechts); Quellen: Darstellung in Excel von Mara Hein, Koordinaten BBC nach JETI und Noack, Hintergrundbilder der Diagramme Wikipedia, 2013; efg2.com, 2009

Laut DIN 5033-1 (Farbmessung – Teil 1: Grundbegriffe der Farbmessung) ist die ähnlichste Farbtemperatur (CCT, Correlated Colour Temperature) einer Testlichtquelle durch die nächstgelegene Farbarte (C(u,v), Chromaticity) auf dem Planckschen Kurvenzug mit der dazugehörigen Farbtemperatur zu beschreiben.⁶⁷ Leuchtenhersteller verwenden die CCT zur

⁶⁵ CIE; CIE 15:2004; 2004: 67

⁶⁶ Ohno, Yoshi, 2013; 48

⁶⁷ DIN; DIN 5033-1; 2009

Kommunikation des Farbstiches („tint“) der Beleuchtung (Warmweiß, Neutralweiß, Tageslichtweiß, Abschnitt 2.2.).⁶⁸

Der Farbunterschied (ΔC , Chromaticity Difference) der Testlichtquelle (u_k, v_k) sollte dabei bezogen auf den Planckschen Kurvenzug (u_r, v_r) in der u,v-Farbtabelle nicht über einem Wert von $5,4 \cdot 10^{-3}$ liegen.

$$\Delta C = \sqrt{(u_k - u_r)^2 + (v_k - v_r)^2}$$

69

In der DIN EN ISO 11664-2 (CIE-Normlichtarten) ist keine Formel zur Bestimmung der nächstgelegenen Farbart auf dem Planckschen Kurvenzug festgehalten. Es wird nur darauf hingewiesen, dass ein Computerprogramm diese ermitteln kann und die CIE-Veröffentlichung CIE 15:2004 eine Formel (nach Robertson) vorschlägt.⁷⁰ Somit kann auch die Berechnung in der Messgerätesoftware der Hersteller verschieden sein. Die aktuelle Jeti-Software (LiVal 6.2.0) beispielsweise verwendet laut Aussage des Geschäftsführers die Formel von Ohno (2011⁷¹).⁷² Die in dieser Arbeit verwendete Gigahertz Optik-Software (S-BTS256) verwendet die Berechnungsmethode nach Xingzhong (1987). In anderen Messgeräten von Gigahertz Optik, bzw. in der zugehörigen Software, wird auch die Methode von Ohno verwendet.⁷³ Der Verwendungsgrund der Berechnungsmethode nach Xingzhong liegt in der Funktion des BTS256-EF als Handgerät, das eine schnelle Ausgabe der farbmessischen Werte ermöglichen soll. Die Xingzhong-Methode wird in Kurzform nach Ohnos Methode im Abschnitt 2.3.4.3. vorgestellt.

In der CIE 15:2004-Veröffentlichung wird die ähnlichste Farbtemperatur als Temperatur ([K]) des Planckschen Strahlers, dessen Farbart der eines vorliegenden Farbreizes als CIE($u', 2/3v'$)-Koordinate am nächsten liegt, definiert.⁷⁴ Die CIE($u', 2/3v'$)-Koordinate entspricht der CIE-u,v-Farbtabelle von 1960. Wie im vorherigen Abschnitt vorgestellt, ist die u,v-Farbtabelle überholt. Ohno erklärt, dass die CCT historisch bedingt jedoch mit der CIE-u,v-Farbtabelle (1960) kalkuliert wird und ein Wechsel zur CIE- $u'v'$ -Farbtabelle (1976) nach der CIE 15:2004 Veröffentlichung zwar erforscht wurde, das CIE Komitee aber beschloss, die CIE-u,v-Farbtabelle als Basis der CCT-Berechnung beizubehalten. Für einen Vergleich der beiden Farbtabellen werden die Abbildungen 15 und 16 gegenübergestellt.

Ohno stellt weiter klar, dass die Farbart eine der kritischsten Parameter für Lichtquellen, die zur Grundbeleuchtung dienen, ist. Sie werden üblicherweise mit x,y- oder $u'v'$ -Koordinaten spezifiziert, aber sie vermitteln die Farb(art-)information nicht unmittelbar. Häufiger wird deshalb die ähnlichste Farbtemperatur dafür verwendet (Kategorien Warmweiß, Neutralweiß, Tageslichtweiß Abschnitt 2.2.). Sie beschreibt aber nur den Farbstich des Planckschen Kurvenzuges und müsste um die „zweite Dimension“, die Lage der Farbart in Bezug zum Planckschen Kurvenzug, beschrieben werden. Denn wenn eine Farbart zu weit vom Planckschen Kurvenzug abweicht, dann kann sie oberhalb der BBC zudem einen Gelb-Grünstich und unterhalb einen Magentastich erhalten. Die Lage der Farbart, beschrieben durch den Abstand zum Planckschen Kurvenzug, wird durch Duv (Farbartdifferenz, Abschnitt 2.3.4.2.) bemessen.⁷⁵

⁶⁸ Rea, Mark; 2013: 36

⁶⁹ CIE; 13.3; 1995: 5

⁷⁰ DIN; DIN EN ISO 11664-2:2011; 2011: 6

⁷¹ Ohno, Yoshi; 2011

⁷² telef. Gespräch mit Jeti Technische Instrumente GmbH vom 13.05.2016

⁷³ E-Mail von Gigahertz Optik vom 23.05.2016

⁷⁴ CIE, CIE 15:2004;2004: 27

⁷⁵ Ohno, Yoshi; 2013: 47

Der Rechenprozess zur Ermittlung der CCT ist relativ komplex und wird aufgrund der damit einhergehenden Berechnung der relevanten zweiten Dimension, Duv, im Abschnitt 2.3.4.2. (Farbartdifferenz) auf das Wesentliche verkürzt vorgestellt. Der gesamte Rechenprozess ist in Ohnos Fachartikel der LEUKOS (Fachzeitschrift der Illuminating Engineering Society of North America) mit dem Titel „Practical Use and Calculation of CCT and Duv“ nachzulesen. Ohnos Berechnung ist eine von vielen Möglichkeiten. Die Dreieck-Auflösung („triangular solution“⁷⁶) zur genauen Bestimmung des kürzesten Weges zum Planckschen Kurvenzug wird auch in der von Robertson (1968⁷⁷, in CIE 15:2004 empfohlen) verwendet. Mit dem Einzug Ohno's Formel in den international angewendeten ANSI-Standard (American National Standards Institute) C78-377-2015 zur Spezifizierung der Farbart bei Beleuchtung mit Festkörpern (z.B. LED-Technologie) erlangt seine Berechnung breite Anwendung und soll deshalb hier vorgestellt werden. Eine Berechnungsunsicherheit von gerade einmal 1K in einem Bereich von 1000K bis 20000 Kelvin wird damit möglich.

Abschließend soll in diesem Abschnitt noch erwähnt sein, dass aktuell daran geforscht wird, inwiefern Menschen weißes Licht mit Farbarten abseits des Planckschen Kurvenzuges präferieren.⁷⁸ Das Lighting Research Center (LRC) hat dafür eine Studie zur subjektiven Wahrnehmung von weißem Licht unterschiedlicher CCTs erstellt. Die Ergebnisse zeigen, dass Weißlicht bei ähnlichsten Farbtemperaturen unter 4000K ohne empfundenen Farbstich unterhalb des Planckschen Kurvenzuges verortet wurde.⁷⁹ Auch eine Studie von NIST (National Institute of Standards and Technology) zeigt, dass Objekte, die mit Weißlichtquellen unterschiedlicher Farbartdifferenz betrachtet wurden, bei einem Duv von -0,015 (unterhalb des Planckschen Kurvenzugs) am natürlichsten empfunden wurden.⁸⁰ Solche visuellen Experimente, wie auch schon am Beispiel der MacAdam-Ellipsen, können zeigen, dass die aktuelle Farbmeterik nicht umfassend die Farbwahrnehmung beschreibt.

2.3.4.3. Farbartdifferenz

Für die Farbartdifferenz gibt es verschiedene Anwendungen und entsprechend verschiedene Berechnungsmethoden. Es ist hier zwischen der generellen Berechnung eines geometrischen Abstandes zwischen zwei Farbarten im Koordinatensystem und der Ermittlung des Abstandes der Farbart einer Lichtquelle zur nächstgelegenen oder zur erzielenden Farbart des Planckschen Kurvenzuges zu differenzieren. Letzteres unterscheidet sich dadurch, ob die referenzierende Farbart auf dem Planckschen Kurvenzug bekannt (Binning-Standard, $\Delta u'v'$) oder unbekannt (Berechnung der CCT) ist. Beide Berechnungen sollen hier aufgezeigt werden und auf die Wahl des betrachteten Abstandes in der Auswertung hinarbeiten. Die Farbartdifferenz sollte nicht mit der Farbdifferenz, die beispielsweise bei der Berechnung der Farbwiedergabeindizes verwendet wird und sich auf einen Farbraum bezieht, verwechselt werden.⁸¹

Die Farbartdifferenz $\Delta u'v'$ beschreibt allgemein den im Koordinatensystem geometrischen Abstand zwischen zwei Farbarten.

$$\Delta(u', v') = \sqrt{(\Delta u')^2 + (\Delta v')^2} \quad 82$$

$$\Delta u' = u'_1 - u'_0, \Delta v' = v'_1 - v'_0$$

⁷⁶ Ohno, Yoshi; 2013: 55

⁷⁷ Ohno, Yoshi; 2011: 10

⁷⁸ LEDs Magazine; ANSI continues advancements on SSL chromaticity standard; 2016

⁷⁹ Rea, Mark; 2013: 40-41

⁸⁰ LEDs Magazine; ANSI continues advancements on SSL chromaticity standard; 2016

⁸¹ CIE; TN 001:2014; 2014: 1

⁸² DIN; DIN EN ISO 11664.5:2011; 2011: 7

Oftmals wird $\Delta u'v'$ auch Δuv genannt, weil diese Berechnung analog bereits in der vorangegangenen u,v-Farbtabelle verwendet wurde. Die sorgfältige Verwendung der richtigen Nomenklatur ist sehr entscheidend, da sie ansonsten in die Irre führen kann. Während der Ausarbeitung dieser Arbeit stellte sich trotz sorgfältiger Recherche und Auseinandersetzung für die Autorin relativ spät die klare Zugehörigkeit ihres vom Messgerät gelieferten „delta uv“-Wertes heraus.

Um die beiden verschiedenen Fälle (Farbart auf BBC bekannt oder nicht) zu unterscheiden wird zuerst die Berechnung der CCT (Farbart auf BBC unbekannt, Duv) in der u,v-Farbtabelle nach Ohno und anschließend die Berechnung der Farbartdifferenz (Farbart auf BBC bekannt, $\Delta u'v'$) in der u'v'-Farbtabelle zur Skalierung der Farbarttoleranzen im Binning-Standard dargestellt.

Berechnung von ähnlichster Farbtemperatur (CCT) und Duv (nach Ohno⁸³)

Wie in Abschnitt 2.3.4.2. erwähnt wird zur Berechnung der CCT die als überholt geltende⁸⁴ u,v-Farbtabelle verwendet.

Zunächst muss eine Tabelle an u,v-Koordinaten des Planckschen Kurvenzugs erstellt werden. Der Umfang der sogenannten Planckschen u,v,-Tabelle kann bezogen auf den betrachteten CCT-Bereich und auf die Auflösung, d.h. die Intervallwahl der Farbtemperaturen (in Abb. 17 T_i (K)) des Planckschen Strahlers, bestimmt werden. Das Spektrum jeder gewählten Farbtemperatur lässt sich durch das Plancksche Strahlungsgesetz (Abschnitt 2.3.4.2.) berechnen und daraus wiederum die Farbwertanteile x,y und weiter u,v. Ohno stellt eine 1% CT-Schritt Tabelle von 1000K bis 20000K vor. 1% meint hier den Farbtemperatur-Schritt um 1% Zunahme bezogen auf den CT-Wert der vorherigen Reihe.

T_i (K)	u_i	v_i	d_i (example)	i
1000.00	0.448011	0.354625	0.230361	1
1010.00	0.445681	0.354826	0.228073	2
1020.10	0.443353	0.355026	0.225787	3
1030.30	0.441028	0.355223	0.223504	4
:	:	:		
4404.38	0.218633	0.329547	0.002536	$m - 1$
4448.42	0.218016	0.329042	0.002328	m
4492.91	0.217407	0.328537	0.002377	$m + 1$
:	:	:		
19, 592.54	0.183990	0.277410	0.060959	300
19, 788.47	0.183939	0.277254	0.061115	301
19, 986.35	0.183888	0.277100	0.061270	302
20, 186.21	0.183838	0.276948	0.061423	303

Abbildung 17: Beispiel einer Planckschen u,v-Tabelle nach Ohno, Quelle: Ohno, Yoshi; 2013

Der Wert d_i in der Planckschen u,v-Tabelle nach Ohno (Abb. 17) steht für die Differenz der von den u,v-Koordinaten der betrachteten Testlichtquelle zu den u,v-Koordinaten des Planckschen Kurvenzugs. Anschließend muss die kleinste Differenz d_i in der Tabelle ermittelt werden (in Abb. 17 bei $i=m$). Aus den u,v-Koordinaten der Testlichtquelle und den in der Tabelle um die kleinste Differenz d_i benachbarten Farbtemperaturkoordinaten (in Abb. 17 $i= m-1$ und $i=m+1$) wird in der u,v-Farbtabelle ein Dreieck gebildet.

⁸³ Ohno, Yoshi; 2013: 51

⁸⁴ Ohno, Yoshi; 2013: 55

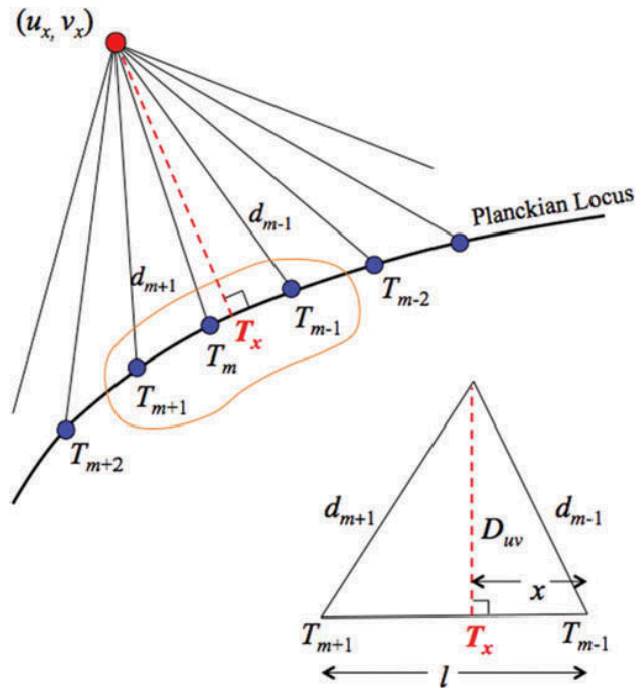


Abbildung 18: Prinzipien der Dreieck-Auflösung („triangulation“), Quelle: Ohno, Yoshi; 2013

T_x in der Abbildung 18 ist bezogen auf die Testlichtquelle (in Abb. 18 (u_x, v_x)) der nächstgelegene Punkt auf dem Planckschen Kurvenzug. Er ist der gesuchte CCT-Wert ([K]).

$$T_x = T_{m-1} + (T_{m+1} - T_{m-1}) * \frac{x}{l}$$

$$\text{mit } x = \frac{d_{m-1}^2 - d_{m+1}^2 + l^2}{2l}$$

$$\text{und } l = \sqrt{(u_{m+1} - u_{m-1})^2 + (v_{m+1} - v_{m-1})^2}$$

Nachdem T_x feststeht wird D_{uv} als die Länge zwischen Testlichtquelle (in Abb. 18 (u_x, v_x)) und dem T_x zugehörigen Punkt auf dem Planckschen Kurvenzug berechnet.

$$D_{uv} = (d_{m-1}^2 - x^2)^{1/2} * \text{sgn}(v_x - v_{T_x})$$

$$\text{mit } v_{T_x} = v_{m-1} + \{v_{m+1} + v_{m-1}\} * \frac{x}{l}$$

und $SIGN(z) = 1$ für $z \geq 0$ und $SIGN(z) = -1$ für $z < 0$

Die letzte Zeile der Formeldefinition für D_{uv} verdeutlicht die Lage der Farbart der Testlichtquelle oberhalb (+ D_{uv}) oder unterhalb (- D_{uv}) des Planckschen Kurvenzuges.

Bei der Dreieck-Auflösung können zu höheren ähnlichsten Farbtemperaturen hin Abweichungen entstehen. Eine ergänzende Methode, die parabolische Auflösung („parabolic solution“⁸⁵), wird bei $|D_{uv}| > 0,002$ angewendet und gleicht die Abweichung soweit aus, dass über den gesamten Bereich von 1000K bis 20000K eine Abweichung um 1K maximal auftreten kann. Die Dreieck-Auflösung visualisiert die Methode zur Bestimmung von CCT und D_{uv} gut

⁸⁵ Ohno, Yoshi; 2013: 52

und das soll an dieser Stelle genügen. Die gesamte Berechnung ist in der in Abschnitt 2.3.4.2. und der in den Fußnoten genannten Quelle zu entnehmen.

Berechnung der ähnlichsten Farbtemperatur nach Xingzhong⁸⁶

Auch Xingzhongs Berechnung der CCTs, die im verwendeten Messgerät BTS256-EF von Gigahertz Optik Verwendung findet, basiert auf der u,v-Farbtabelle und ermöglicht Berechnungen im Bereich von 1666K bis 25000K. Im Datenblatt des Messgerätes geben sie einen Bereich von 1700K bis 17000K an. Der höhere Bereich wird wahrscheinlich aufgrund größerer Berechnungsfehler eingeschränkt.

Die von Gigahertz Optik genannte Quelle zu Xingzhongs Methode lautet „Xingzhong, Q. 1987. „Formulas for Computing Correlated Color Temperature,“ 12:285-287“⁸⁷. Sie ist kostenpflichtig und konnte kurz vor Abschluss der Arbeit nicht mehr beschafft werden. Die Berechnung nach Xingzhong ist in der einzigen, weiteren gefundenen Quelle⁸⁸ so knapp genannt, dass der genaue Weg nicht nachvollziehbar ist und hier nicht angemessen vorgestellt werden kann. Aus diesem Grund wird von einer weiteren Betrachtung abgesehen.

Durch die Messungen mit dem BTS256-EF wurde ein „delta uv“- und CCT-Wert in der Tabelle ausgegeben.

Farbartdifferenz-Skalierung

MacAdam beschrieb 1942 durch die experimentelle Festlegung von Wahrnehmungsschwellen eines Farbtabstandes Ellipsen um Farbarten, die in der x,y-Farbtabelle verteilt liegen. Diese Ellipsengröße wird als eine SDCM (Standard Deviation of Colour Matching) definiert. Farbtabdifferenzen innerhalb einer Ellipse sollen demnach zu keiner wahrnehmbaren Abweichung führen.⁸⁹ Es wird dann auch von Farb(art)toleranzen oder Farbkonstanz gesprochen. Durch die unterschiedlichen Größen und Ausrichtungen der Ellipsen veranschaulichte er die empfindungsgemäße Ungleichabständigkeit der Farbtabelle. Aktuell empfiehlt die CIE die u'v'-Farbtabelle als die gleichabständige Farbtabelle für Lichtquellen.⁹⁰

Die Technische Notiz TN 001:2014 der CIE von 2014 zur Farbtabdifferenz-Spezifizierung für Lichtquellen zeigt, dass die MacAdam-Ellipsen in der u'v'-Farbtabelle nahe des Planckschen Kurvenzugs annähernd Kreise sind.⁹¹ In der Abbildung 19 sieht man die, zur Angabe von Farbtabtoleranzen bei linearen Leuchtstofflampen, definierten Soll-CCTs. Die zugehörigen MacAdam-Ellipsen werden hier mit der fünffachen Größe dargestellt. Das entspricht fünf SDCM (Standard Deviation of Colour Matching). Diese Ellipsen ließen sich den Untersuchungen nach mit Kreisen eines Radius von 0,0055 näherungsweise gleichsetzen. Demnach entspräche eine SDCM einem Kreis mit einem Durchmesser von 0,0011.⁹² Weiter wird vorgeschlagen, zusätzlich oder stattdessen zu den nach IEC 60081 (International Electrotechnical Commission, 1997) gesetzten Mittelpunkten von MacAdam-Ellipsen die Kreismitteln auch in 100K-Schritten auf dem Planckschen Kurvenzug setzen zu können. Da es keinen internationalen Standard für die Kalkulation von MacAdam-Ellipsen gibt, ermöglicht die

⁸⁶ Hernández-Andrés, Javier; Lee, Raymond L.; Romero, Javier; 1999

⁸⁷ E-Mail von Gigahertz Optik vom 23.05.2016

⁸⁸ Hernández-Andrés, Javier; Lee, Raymond L.; Romero, Javier; 1999

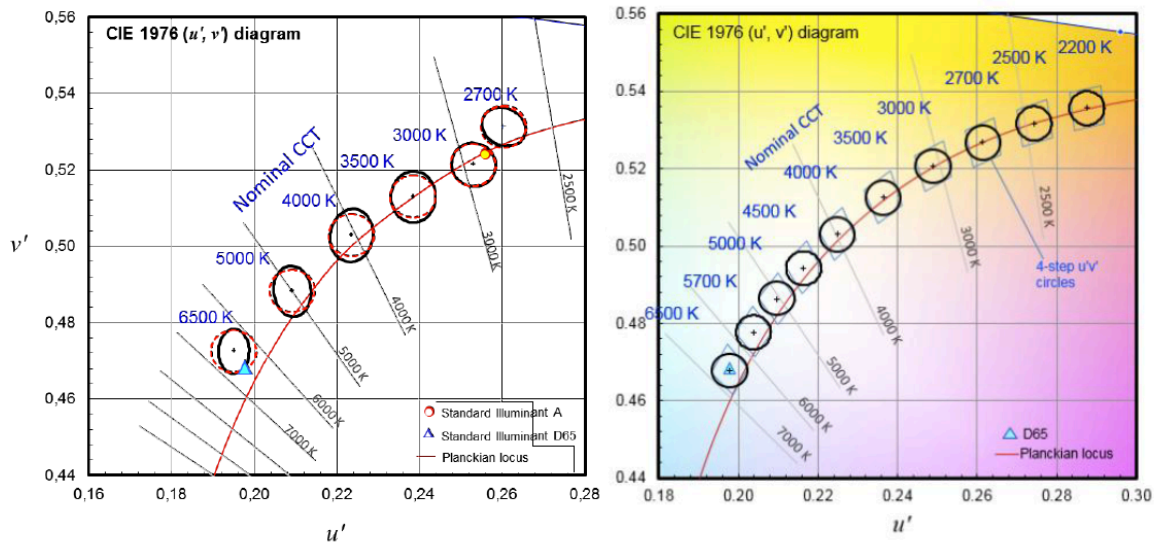
⁸⁹ Brückner, Stefan; 2014: 8

⁹⁰ CIE; TN 001:2014; 2014: 1

⁹¹ CIE; TN 001:2014; 2014: 3

⁹² CIE; TN 001:2014; 2014: 3

Annäherung durch Kreise neue Farbort-Soll-Werte, auch „flexible CCTs“⁹³ genannt, gegenüber den bisher definierten CCTs (z.B. 3000K, 3500K, 4000K).⁹⁴



Abbildungen 19, 20: links: fünffache MacAdam-Ellipsen für lineare Leuchtstofflampen nach IEC 60081 (IEC, 1997,) und sie annähernde Kreise mit einem Radius von 0,0055 in der $u'v'$ -Farbtafel Quelle: CIE TN 001:2014; rechts: im ANSI-Standard C78.377-2015 festgelegte vier-stufige $u'v'$ -Kreise (Radius 0,0044, 4 SDCM entsprechend) Quelle: Ohno, Yoshi; 2015

Bei Temperaturstrahlern verändert sich gemäß der Stromreduzierung beim Dimmen die Temperatur des Festkörpers und somit die Farbtemperatur des emittierten Lichtes. Die entstehenden Farbortverläufe (z.B. Abbildung 21) liegen dabei fast auf dem Planckschen Kurvenzug. LED Warm Dimming Produkte stellen diesen Effekt durch Mischung von unterschiedlichen Anteilen zweier oder mehrerer (Weißlicht-)LEDs nach. Dieser Farbortverlauf soll in der Auswertung dargestellt werden und Auskunft über die ggf. auftretenden, sichtbaren Abweichungen geben. In der $u'v'$ -Farbtafel ist dies aufgrund des vom Technischen Komitee der CIE herausgearbeiteten Zusammenhangs ($\Delta u'v' = 0,0011$ entspricht einer SDCM) möglich.

Die vorgestellte $u'v'$ -Kreis-Methode findet im Standard C78-377-2015 der ANSI (American National Standards Institute) zur Spezifizierung der Farbort bei Beleuchtung mit Festkörpern (z.B. LED-Technologie) Anwendung. Dadurch können weitere CCTs in den Standard aufgenommen werden. Im aktuellen ANSI-Standard von 2015 werden 2500K und 2200K als neue CCTs hinzugenommen (Abbildung 20).⁹⁵

In dem ANSI-Standard C78-377 werden die Bins definiert. Beim Prozess des Binnings werden die herstellungsbedingten Schwankungen von Lichtstrom, Farbtemperatur, Farbort und Vorwärtsspannung der einzelnen LEDs benannt und damit in Bins bzw. (Qualitäts-)Behälter eingeteilt⁹⁶. „Wie auch schon bei den Leuchtstoff- und Kompaktleuchtstofflampen wird der Standard dafür verwendet, zwischen Leuchtmittel-Herstellern und -Nutzern zu kommunizieren, wie Weißlicht-Beleuchtung kategorisiert, benannt und Toleranzen von Farb[art]-verschiebungen definiert sind.“⁹⁷ Für LEDs ist die Angabe der Farb(art)-konsistenz in SDCM seit September 2013 laut EU-Richtlinie „auf frei zugänglichen Internetseiten und in anderer den Herstellern zweckmäßig erscheinender Form öffentlich bereitzustellen“.⁹⁸

⁹³ CIE; TN 001:2014; 2014: 1

⁹⁴ CIE; TN 001:2014; 2014: 1

⁹⁵ LEDs Magazine; ANSI works to update the solid-state lighting standard for chromaticity; 2015

⁹⁶ Licht.de; Binning garantiert konstante Lichtqualität; 2016

⁹⁷ LEDs Magazine; ANSI works to update the solid-state lighting standard for chromaticity; 2015

⁹⁸ Europäische Kommission; 2012: 16

Bei dieser Anwendung der Farbartdifferenz ist eine Farbart auf dem Planckschen Kurvenzug und mit ihr eine bestimmte Farbtemperatur bereits gegeben und soll erreicht werden. Es wird dann betrachtet, wie weit die Ist-Farbart von der Soll-Farbart entfernt liegt. Bei der Berechnung der CCT hingegen muss die referenzierende Farbart auf dem Planckschen Kurvenzug erst ermittelt werden.

Methodik der Farbdifferenz-Skalierung in der Auswertung

Für die Auswertung soll, wie bereits erwähnt, der Zusammenhang der nach Kreisradien definierten $\Delta u'v'$ -Skalierung verwendet werden. Warum die $u'v'$ -Kreismethode mit 100K-Schritten (Soll-Farbart alle 100K: 2000K, 2100K, 2200K etc.) nicht generell auf die Auswertung anzuwenden ist, sei hier noch kurz erklärt:

Bei der Auswertung nach der $u'v'$ -Kreis-Methode in 100K-Schritten stellten sich bei der Berechnung von $\Delta u'v'$ über den Farbartverlauf beim Dimmen hinweg unzutreffende Ergebnisse heraus. Es treten inkonstante Abweichungen (Abb. 22) auf, obwohl beispielsweise die betrachtete Farbartverschiebung parallel und somit konstant zum Planckschen Kurvenzug erfolgt. Liegt die Farbart einer Testlichtquelle nahe des Planckschen Kurvenzugs, aber genau mittig des 100K-Schrittes, also beispielsweise bei 2350K, dann ist die errechnete Farbartdifferenz gegenüber einer Farbart bei 2300K deutlich größer.

Am Beispiel der Messung einer konventionellen Halogenlampe A60 (Birnenform mit einem Durchmesser von 60mm), die nahezu auf dem Planckschen Kurvenzug liegt (Abbildung 21), kann man die Unbeständigkeit der Ergebnisse der $u'v'$ -Kreis-Methode (Abbildung 22) erkennen.

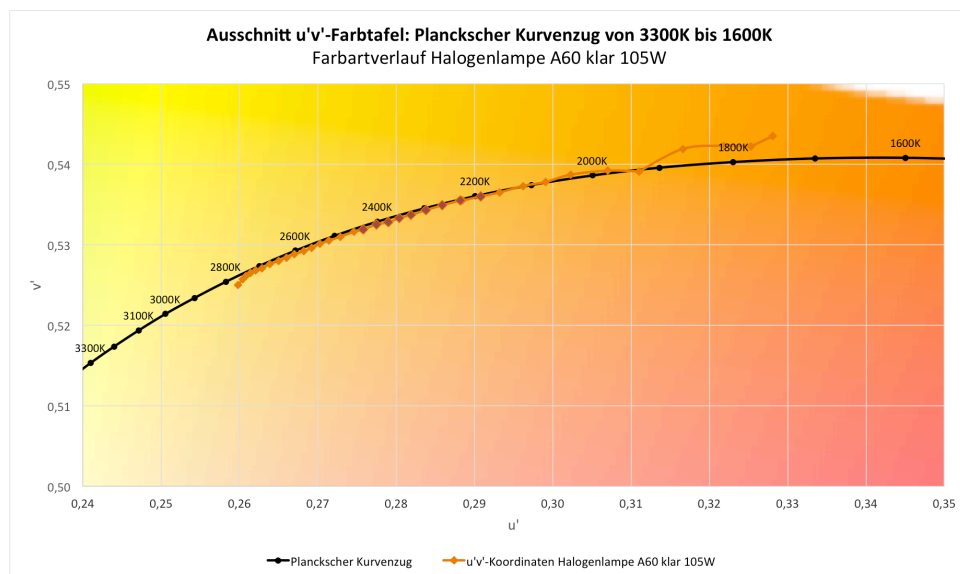


Abbildung 21: Farbortverlauf Halogenlampe A60 in der $u'v'$ -Farbtafel, die rote Markierung kennzeichnet den betrachteten Ausschnitt

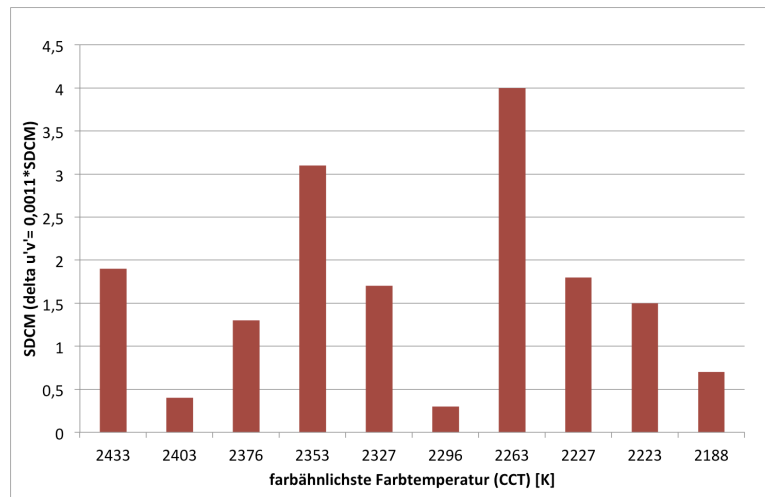


Abbildung 22: berechnete SDCM nach der u'v'-Kreismethode mit 100K-Schritten

Die Auflösung in 100K-Schritten ist für die Betrachtung der Farbartverläufe beim Dimmen zu gering. Es sollen in dieser Arbeit demnach drei Aspekte für die Auswertung vereint werden:

1. Zur Feststellung der Abweichungen der gemessenen Farbarten beim Dimmen muss immer jeweils der kürzeste Abstand zur BBC berechnet werden.
Hier sollen keine bestimmten Farbarten erzielt werden. Stattdessen wird betrachtet, wie weit die Farbartverläufe vom Planckschen Kurvenzug entfernt liegen. Duv bildet diese Betrachtung im Prinzip ab, aber findet in der den zweiten Aspekt betreffend falschen Farbarttafel statt.
2. Die aus dem positiv oder negativ vorliegendem Duv-Wert unmittelbar vermittelte Information über die Lage der Farbart ober- oder unterhalb der BBC soll in der Auswertung Verwendung finden.
3. Der vom Technischen Komitee in der u'v'-Farbtafel herausgestellte und im aktuellen ANSI-Standard übernommene Zusammenhang zwischen $\Delta u'v'$ und SDCM nahe der BBC soll zur Beschreibung der Abweichungen herangezogen werden.

Die in dieser Arbeit von der Messsoftware ausgegebenen „delta uv“-Werte basieren auf der u,v-Farbtafel und können somit nicht weiter herangezogen werden. Entgegen der zeitlich überwiegender Annahme der Autorin, dass mit „delta uv“ ein die Abweichung unmittelbar beschreibender Wert vorliegt, können in der Auswertung nun allein noch vereinzelt $\Delta u'v'$ -Werte als Annäherung berechnet werden. Exakte $\Delta u'v'$ -Werte würden die lotrechte Verbindung berücksichtigen. Diese übersteigt mit ihrem komplexeren Berechnungsumfang jedoch die restliche, zur Verfügung stehende Zeit.

Die Beschreibung von wahrgenommenen Farbartabweichungen basieren auf sämtlichen visuellen Untersuchungen mit Betrachtern und haben herausgestellt, dass eine größere Abweichung als vier SDCM von der Mehrheit der Bevölkerung wahrgenommen werden kann.⁹⁹ Maximal dürfen sechs SDCM vorliegen, weil ab diesem Wert Unterschiede zu nicht akzeptablen Abweichungen führen.¹⁰⁰ Die EU-Richtlinie schreibt demnach auch sechs SDCM als Maximalwert fest.¹⁰¹ Zwischen zwei und drei SDCM sollen die Unterschiede kaum sichtbar sein.

Aufgrund des größeren Bekanntheitsgrades und der von der EU vorgeschriebenen Angabe der SDCM wird, neben der delta u'v'-Angabe, die SDCM ebenfalls genannt. Weiter hat sich die Autorin überlegt, ebenfalls die SDCM mit einem Vorzeichen zur unmittelbaren Beschreibung

⁹⁹ LEDs Magazine; ANSI works to update the solid-state lighting standard for chromaticity; 2015

¹⁰⁰ LEDs Magazine; ANSI works to update the solid-state lighting standard for chromaticity; 2015

¹⁰¹ Europäische Kommission; 2012: 13

der Farbartlage ober- oder unterhalb der BBC zu versehen. Der Wert der SDCM bleibt damit unverändert und damit kommunizierbar.

2.3.5. Farbwiedergabe

Der sogenannte Farbwiedergabeindex (international: CRI, Colour Rendering Index) „ist ein Maß für die Farbwiedergabe-Eigenschaften, und zwar [...] für die Annäherung der Farbempfindung von Objekten im Beurteilungszustand an die Farbempfindung der gleichen Objekte im Bezugszustand [...].“¹⁰² Bezogen auf Lichtquellen stellt der CRI ein weltweit gängiges Maß zur Beschreibung der „Farbwiedergabe-Eigenschaften der beleuchtenden Lichtquellen“¹⁰³ dar und wird per Definition nachfolgend vorgestellt.

Neben photometrischen Parametern, wie z.B. der Beleuchtungsstärke, und farbmetrischen Parametern, wie z.B. der Farbtemperatur, gehört die Farbwiedergabe-Eigenschaft von Lichtquellen zu wichtigen Parametern in der Lichtplanung.

Die Akzeptanz eines verwendeten Leuchtmittels wird durch die Korrelation der Farbwahrnehmung von Objekten unter der Testlichtquelle und der Betrachtung unter der entsprechenden Referenzlichtquelle mit Tages- oder Plancklichtart geprägt.¹⁰⁴

Die CIE war sich kurz nach der ersten Veröffentlichung der Methode von 1965 bereits bewusst, dass dieser Index, z.B. bezüglich der Farbumstimmung des Auges (chromatische Adaption) zwischen Test- und Referenzlichtquelle, mathematisch noch nicht hinreichend berücksichtigt ist.¹⁰⁵ 1991 wurde von der CIE das Technische Komitee TC 1-33: Colour Rendering (Farbwiedergabe) gegründet. Dieses schlug Verbesserungen, wie z.B. die Verwendung des $L^*a^*b^*$ -Farbraums, vor, aber „scheitert an der Ablehnung der Industrie“.¹⁰⁶ Weitere Verbesserungsvorschläge, u.a. von Ohno und Davis mit der Color Quality Scale (CQS, Farbqualitätsskala)¹⁰⁷, vom Technischen Komitee TC 1-69 (Colour Rendition by White Light Sources, Farbwiedergabe von Weißlichtquellen) der CIE mit dem CRI2012¹⁰⁸, von Li, Luo und Li mit dem auf dem CIECAM02-Farberscheinungsmodell basierenden CRI-CIECAM02¹⁰⁹ und von der IES (Illuminating Engineering Society) mit der Methode TM30¹¹⁰, folgten. Zur genaueren Einschätzung der Farb(wiedergabe-)empfindung können diese diskutierten Alternativ- und Erweiterungsmethoden mit untersucht werden. Aufgrund eines zu großen Arbeitsumfangs und der in erster Linie verfolgten Kommunizierbarkeit der Auswertungsergebnisse, wurde in dieser Arbeit von ihrer Vorstellung und Verwendung abgesehen. Im Abschnitt 2.3.5.2. sollen dennoch die recherchierten Quellen genannt werden. Kritikpunkte an der aktuellen Methode der CIE (CIE 13.3-1995) werden im Abschnitt 2.3.5.2.vorgestellt.

Solange der Farbwiedergabeindex von 1995 die aktuelle Methode der CIE, in der Deutschen Norm (aktuell DIN 6169-2 Farbwiedergabe) enthalten ist und von der Beleuchtungsindustrie verwendet wird, sollte dieser trotz der im Abschnitt 2.3.5.2. erwähnten Kritik sämtlicher Forscher weiter aufgenommen werden. Es sei angemerkt, dass in der DIN 6169-2 die CIE-Methode der Farbwiedergabeberechnung von 1974 enthalten ist¹¹¹. Die genau genommen aktuellere Methode von 1995 unterscheidet sich nur in formalen Korrekturen, aber nicht in der

¹⁰² DIN; DIN 6169-1, 1976: 1

¹⁰³ DIN, DIN 6169-2, 1976: 1

¹⁰⁴ Bodrogi, P.; Brückner, Stefan; Khanh, Tran Quoc; 2012: 6

¹⁰⁵ CIE; CIE 13.3:1995; 1995: 2

¹⁰⁶ Brückner, Stefan; 2014: 26

¹⁰⁷ Davis, W.; Ohno, Y; 2010

¹⁰⁸ Brückner, Stefan; 2014: 26

¹⁰⁹ Li, Cheng; Luo, Ming Ronnier; Li, Changjun; 2012

¹¹⁰ IES; 2015

¹¹¹ DIN; DIN 6169-2; 1976: 2

Berechnungsmethode. Die anschließend vorgestellte Berechnung des Farbwiedergabeindex findet in der Auswertung dieser Arbeit Verwendung.

2.3.5.1. Definition des CIE-Farbwiedergabeindex 1974/1995

Der CIE-Farbwiedergabeindex wurde 1965 zum ersten Mal in der CIE Publikation Nr.13 veröffentlicht und 1974 mit kleinen Abänderungen in den Formeln verändert¹¹². 1995 werden nur editorische Veränderungen wie z.B. Tippfehler korrigiert. Die Berechnungsmethode bleibt dieselbe.¹¹³ Die entsprechende Publikation ist unter dem Kürzel CIE 13.3-1995 zu finden.

Das Verfahren beruht auf der Korrelation der Farbabstände von 14 Testfarben zwischen der betrachteten Testlichtquelle und einer Referenzbeleuchtung.

Zuerst wird die ähnlichste Farbtemperatur (CCT) der Testlichtquelle ermittelt (siehe dazu Abschnitt 2.2.4.2.).

Die Lichtart der Referenzlichtquelle wird bei Werten $<5000K$ und $\geq 5000K$ unterschieden. Liegt die CCT der Testlichtquelle unter $5000K$, wird als Referenzlichtquelle der Plancksche Strahler mit der berechneten CCT verwendet. Andernfalls wird die Strahlungsverteilung von Tageslicht mit entsprechender CCT benutzt.

Die spektrale Strahlungsverteilung $S(\lambda)$ der jeweiligen Lichtquelle (Referenzlichtquelle r, Testlichtquelle k) wird mit den spektralen Strahldichtefaktoren $\beta_i(\lambda)$ (Index i) der einzelnen Testfarben (siehe Abb. 23) gewichtet und die Normfarbwerte X, Y und Z ermittelt. Weiter werden die u- und v-Koordinaten der UCS-Farbtafel von 1960 berechnet.

Die 14 Testfarben nach DIN 6169

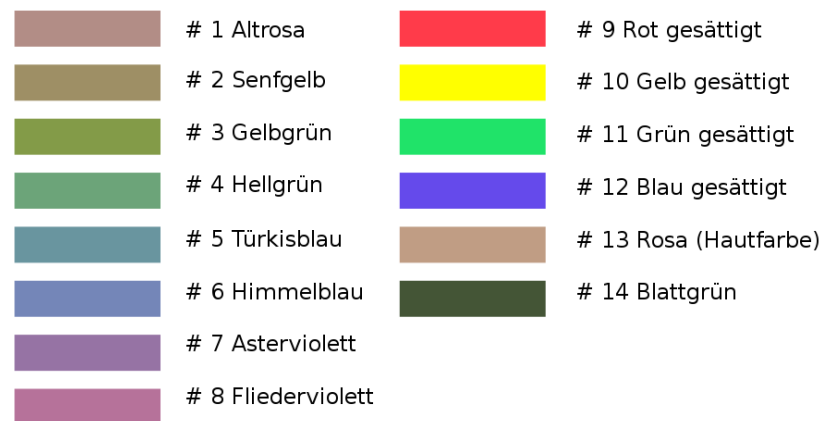


Abbildung 23: Die 14 Testfarben nach DIN 6169, Quelle: Wikipedia; 2016

Unter Berücksichtigung der Farbwandlung zwischen den beiden Lichtarten, werden die ermittelten Farbkoordinaten $(u_{k,i}, v_{k,i})$ der Testlichtquelle mit der von-Kries-Transformation umgerechnet. $u'_{k,i}$ und $v'_{k,i}$ sollten trotz des verwendeten Apostroph nicht mit den u'-v'-Koordinaten verwechselt werden.

$$u'_{k,i} = \frac{10,872 + 0,404 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - 4 \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}}{16,518 + 1,481 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}}$$

¹¹² Brückner, Stefan; 2014: 24

¹¹³ CIE; 13.3; 1995: II

$$v'_{k,i} = \frac{5,520}{16,518 + 1,481 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}}$$

Die Funktionen c und d müssen für die Referenzlichtquelle mit u_r, v_r (ergibt c_r, d_r), für die Testlichtquelle mit u_k, v_k (ergibt c_k, d_k) und für die Testfarben unter der Testlichtquelle mit $u_{k,i}, v_{k,i}$ (ergibt $c_{k,i}, d_{k,i}$) kalkuliert werden. Die Variablen u und v stellen hier entsprechend Platzhalter dar.

$$c = \frac{1}{v}(4 - u - 10v)$$

$$d = \frac{1}{v}(1,708v + 0,404 - 1,481u)$$

Anschließend werden daraus die Farbwerte des U*V*W*-Farbraums und nachfolgend die euklidischen Abstände für jede Testfarbe errechnet. Es ergeben sich 14 Farbabstände ΔE_i (auch Farbdifferenz genannt), wobei die ersten acht Testfarben mittels Mittelwertbildung den allgemeinen Farbwiedergabeindex Ra (international: QCRI, General Colour Rendering Index) ergeben. Die restlichen speziellen Indizes dienen einer umfassenderen Charakterisierung der Farbwiedergabegüte.

$$W_{r,i}^* = 25(Y_{r,i})^{1/3} - 17 \quad W_{k,i}^* = 25(Y_{k,i})^{1/3} - 17$$

$$U_{r,i}^* = 13W_{r,i}^*(u_{r,i} - u_r) \quad U_{k,i}^* = 13W_{k,i}^*(u'_{k,i} - u'_k)$$

$$V_{r,i}^* = 13W_{r,i}^*(v_{r,i} - v_r) \quad V_{k,i}^* = 13W_{r,i}^*(v'_{k,i} - v'_k)$$

$$\Delta E_i = \sqrt{(U_{r,i}^* - U_{k,i}^*)^2 + (V_{r,i}^* - V_{k,i}^*)^2 + (W_{r,i}^* - W_{k,i}^*)^2}$$

$$= \sqrt{(\Delta U_i^*)^2 + (\Delta V_i^*)^2 + (\Delta W_i^*)^2}$$

$$R_i = 100 - 4,6\Delta E_i \quad (\text{spezieller Farbwiedergabeindex})$$

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

Für die Betrachtung in der Auswertung wird der generell in Datenblättern von Lampen- und Leuchtenherstellern angegebene allgemeine Farbwiedergabeindex verwendet. Mit dem bisherigen Wissen um Spektren von Weißlicht LED Produkten wurde zusätzlich der R9 zur Betrachtung ausgewählt. Rote LEDs besitzen keine so hohe Lichtausbeute (Lumen/Watt) und werden deshalb nicht so häufig eingesetzt. Die Spektren weisen dadurch meist geringe Anteile in den als Rot empfundenen Wellenlängen auf.

Die Farbwiedergabeindizes Ra und R9 werden im Kapitel der Messtechnischen Untersuchung über den Dimmvorgang hinweg betrachtet und in einer Grafik entsprechend dargestellt.

2.3.5.2. Kritik am CIE-Farbwiederindex 1974/1995

Die Wissenschaftler Bodrogi, Brückner und Khanh veröffentlichten 2012 in der LiTG (Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V.)-Schrift „Farbwiedergabe von modernen Lichtquellen“ im Fachgebiet Farben eine Zusammenfassung der Kritikpunkte am CIE-Farbwiedergabeindex¹¹⁴, welche Bodrogi, Csuti, Horváth und Schanda 2004 in „Why does the CIE Colour Rendering Index fail for white RGB LED Light Sources“ ausführten. In Brückners Dissertation von 2014 mit

¹¹⁴ Bodrogi, P.; Brückner, Stefan; Khanh, Tran Quoc; 2012: 10-12

dem Titel „Farbdifferenz-Skalierung zur Farbqualitätsbeurteilung von Halbleiter-Lichtquellen“ werden ebenfalls Kritikpunkte basierend auf Erkenntnissen aus sämtlichen visuellen Experimenten anderer Forscher und weiterführende eigene Überlegungen gesammelt vorgestellt¹¹⁵. Eine kurze Zusammenfassung erster und letzter Quelle wird hier aufgeführt.

Auswahl der Testfarben

Die ersten acht Testfarben, welche im Ra berücksichtigt werden, sind ungesättigte Farben und wurden im Munsell-Farbsystem festgelegt. RGB LEDs und auch leuchtstoffkonvertierte LEDs weisen schmalbandige Spektren (Abschnitt 2.1.2.) auf und können bei der Beleuchtung von Objekten mit gesättigter Oberflächenfarbe ein von den Testfarben abweichendes Farbempfinden, das durch den Ra nicht beschrieben werden kann, hervorrufen. Weiter können sich für den R9-Wert (Rot gesättigt) negative Werte ergeben, dessen Deutung unklar ist.

Nach Brückner sind sich die meisten Forscher darin einig, dass eine Auswahl an Testfarben den gesamten Farbkreis abdecken sollte. Zu Zeiten der Veröffentlichung des CIE-Farbwiedergabeindex wurde eine größere Auswahl an Testfarben aufgrund des zu hohen Rechenaufwandes abgelehnt. Heutzutage sollte das kein Problem mehr darstellen.

Referenzlichtart

Die Referenzlichtart ändert sich beim Überschreiten des Schwellwertes von 5000K (siehe Abschnitt 2.3.5.1.). Dies kann zu Sprüngen im Ra-Wert führen.

Chromatische Adaption

Die von-Kries-Transformation zum Angleichen der Farbverschiebung von Test- zu Referenzlichtart (siehe Abschnitt 2.3.5.1.) bildet die chromatische Adaption ungenügend nach.

Farbraum und Farbabstandsformeln

Ein gleichabständiger Farbraum sollte zu einer Übereinstimmung von wahrgenommen und gemessenen Farbabständen zwischen Test- und Referenzfarben führen. Gleich wahrgenommene Farbabstände von Test- zur Referenzfarbe würden auf einer Kugelfläche mit der Referenzfarbe als Mittelpunkt liegen. Außerdem sollten diese Kugelflächen im gesamten Farbraum gleich groß sein.

Der in der aktuellen CIE-Methode verwendete $U^*V^*W^*$ -Farbraum ergibt jedoch Ellipsoide mit „unterschiedlichen Halbachsen je nach Referenzfarbe“¹¹⁶ und ist somit ein ungleichabständiger Farbraum.

Arithmetische Mittelwertbildung des R_a

Die einfache Mittelwertbildung des R_a kann extrem große Farbunterschiede in der Farbwiedergabe verdecken. Vereinzelt schlechte Werte spezieller Farbwiedergabeindizes wirken sich kaum auf den R_a aus. Lichtquellen können so einen hohen Indexwert erhalten, obwohl einzelne Farben schlecht wiedergegeben werden.

Fehlende semantische Interpretation der R_a - Werte

Der rein numerische Farbwiedergabeindex erschließt z.B. nicht, wieviel besser eine Lichtquelle mit einem $R_a = 90$ gegenüber einer Lichtquelle mit einem $R_a = 80$ ist.

¹¹⁵ Brückner, Stefan; 2014: 43-46

¹¹⁶ Bodrogi, P.; Brückner, Stefan; Khanh, Tran Quoc; 2012: 11

Farbqualität

Um eine Aussage über Farbqualität zu treffen reicht der Farbwiedergabeindex nicht aus, da weitere Eigenschaften wie Farbharmonie („Wirkt ein Ensemble von Farben unter dieser Lichtquelle genauso wie unter Sonnenlicht?“¹¹⁷) oder Farbpräferenz („Führt diese Lichtquelle zu einer Bevorzugung bestimmter Farben?“¹¹⁸) dazugehören. Einige dieser Eigenschaften zeigen in visuellen Experimenten eine geringe Korrelation mit dem allgemeinen Farbwiedergabeindex.

Schmalbandige Lichtquellen

Weißer Lichtquellen können durch das Mischen farblich unterschiedlicher LEDs hergestellt werden. Ihre Spektren können also durch unterschiedlichste Kombinationen an LEDs bewusst gestaltet werden. „Die gängige Praxis der Lichtquellenentwicklung“¹¹⁹ zeigt, dass die spektrale Strahlungsverteilung auf einen angestrebten Ra-Wert abzielt. Die aktuelle Farbwiedergabeindex-Methode ist also durch das gezielte Gestalten von Spektren manipulierbar.¹²⁰

2.3.5.3. Einblick in die aktuelle Forschung

Wie bereits im Abschnitt 2.3.5. genannt, gibt es einige Verbesserungsvorschläge für eine die Farb(wiedergabe-)empfindung besser beschreibende Farbmetrik. Aufgrund eines zu großen Arbeitsumfangs für die Bachelor-Thesis und der in erster Linie verfolgten Kommunizierbarkeit der Auswertungsergebnisse, wurde in dieser Arbeit von ihrer Vorstellung und Verwendung abgesehen. Eine Auswahl der recherchierten Quellen sollen dennoch kurz genannt werden:

CRI2012: Smet, K.A.G.; Schanda, J.; Whitehead, L.; Luo, R.M.: Toward a Replacement of the CIE Color Rendering Index for White Light Sources, 2015, LEUKOS (The Journal of the Illuminating Engineering Society (IES) of North America

Smet, K.A.G.; Schanda, J.; Whitehead, L.; Luo, R.M.: CRI 2012: A Proposal for updating the CIE colour rendering index, 2013, Lighting Research and Technology

CRI-CIECAM02-UCS: Li, Cheng; Luo, Ming Ronnier; Li, Changjun: Assessing Colour Rendering Properties of Daylight Sources Part II: A New Colour Rendering Index: CRI-CAM02UCS, 2012, Department of Colour Science, University of Leeds

TM30: IES Illuminating Engineering Society: IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition, 2015; IES

CQS: Davis, W., Ohno, Y.: Color Quality Scale, 2010, Optical Engineering Volume 49 (Issue 3)

¹¹⁷ Brückner, Stefan; 2014: 46

¹¹⁸ Brückner, Stefan; 2014: 46

¹¹⁹ Brückner, Stefan; 2014: 44

¹²⁰ Smet, Kevin A.G.; Whitehead, Lorne; Schanda, Janos; Luo, Ronnier M.; 2015: 61

2.4. Dimmkurven

Mit Dimmkurven sind in dieser Arbeit hauptsächlich Kurven zum Farbtemperaturverlauf beim Dimmen gemeint. Die Information über die zur niedrigsten Dimmstufe gehörende relative, gemessene Helligkeit der Lichtquelle ist darin mitenthalten. Helligkeit meint hier relative Werte in Prozent bezogen auf die gemessene Beleuchtungsstärke. Diese Helligkeit beschreibt nicht die empfundene Helligkeit, da ansonsten die Leuchtdichte hätte gemessen werden müssen. Die Beleuchtungsstärke E lässt sich bei lotrechter Bestrahlung mit dem Quotienten aus Lichtstrom ϕ [lm] und beleuchteter Fläche A [m^2] berechnen.

$$E = \frac{\phi}{A}$$

121

Der Lichtstrom steht für die Lichtleistung einer Lichtquelle. Diese Lichtleistung wird beim Dimmen verringert und somit kann die Beleuchtungsstärke, umgerechnet als relativer Wert für die Beschreibung einer vorliegenden Helligkeitsstufe beim Dimmen verwendet werden. 100% relative, gemessene Helligkeit entsprechen dann der maximal gemessenen Beleuchtungsstärke der untersuchten Lampe oder Leuchte. Die Relativierung ermöglicht auch den farbmatischen Vergleich von untersuchten Produkten, die unterschiedliche Lumenpakete besitzen.

Die relative, gemessene Helligkeit in % wurde für die Diagramme meistens als Y-Achsen-Beschriftung verwendet. Diese Skalierung ist nicht mit der Einstellung des Dimmers, der Dimmstufe, zu verwechseln. Da unterschiedliche Dimmer mit unterschiedlichen Charakteristika verwendet wurden (Abschnitt 2.4.3.), ermöglicht die Angabe der relativen Helligkeit einen Vergleich der erstellten Kurven zum Farbtemperaturverlauf beim Dimmen.

2.4.1. Farbtemperaturverlauf beim Dimmen

Der beim Runterdimmen entstehende Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur von höheren zu niedrigen hin beschreibt einen Teil des Warm Dimming Effektes. Die Information über den gegebenenfalls vorliegenden Farbstich im Vergleich zum Planckschen Strahler ist darin nicht enthalten. Dafür wird der Farbverlauf in der $u'v'$ -Farbtafel mit Farbartdifferenzen der vorliegenden Farbart zum Planckschen Kurvenzug betrachtet.

In den Diagrammen zeigen die einzelnen Messpunkte die Schritte der Dimmerstufen.

2.4.2. Wahrgenommene Helligkeit L^*

Bei den Messungen stellte sich heraus, dass einige Leuchtmittel, vorwiegend die auf LED basierenden, nicht ganz runterzudimmen waren. Die niedrigste gemessene Beleuchtungsstärke war dabei zumeist relativ gering gegenüber der bei 100% gemessener Helligkeit. Trotzdem erschien die Lampe oder die Leuchte noch sehr hell. Diese visuelle Auffälligkeit soll durch eine Maßzahl beschrieben werden, um dem Nutzer und Lichtplaner zu vermitteln, wie weit sich die Leuchte oder Lampe sichtbar herunterdimmen lässt.

Unser Auge strebt permanent ein mittleres Adaptionsniveau an, um die Empfindlichkeit der Netzhaut nicht zu reduzieren. Das bedeutet, die Adaption bezieht sich auf die mittlere Leuchtdichte im Gesichtsfeld. Deshalb ist keine Definition der wahrgenommenen Helligkeit als lichttechnische Größe möglich. Stattdessen beschreibt die Leuchtdichte das Maß für die

¹²¹ Ris, Hans Rudolf; 2015: 29

Helligkeitsempfindung. Es ist nur so, dass sich bei Änderung der Leuchtdichte, die Helligkeitsempfindung nicht proportional sondern logarithmisch zur Leuchtdichte ändert.¹²²

In den Farbsystemen L*u*v* und L*a*b* wird die empfundene Helligkeit durch eine die logarithmische Helligkeitsempfindung des Auges beschreibende Formel angegeben:

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16$$

„Dabei ist“

$$f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} \quad \text{wenn } \left(\frac{Y}{Y_n}\right) > \left(\frac{6}{29}\right)^3$$

$$f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \left(\frac{841}{108}\right)\left(\frac{Y}{Y_n}\right) + \frac{4}{29} \quad \text{wenn } \left(\frac{Y}{Y_n}\right) \leq \left(\frac{6}{29}\right)^3$$

123

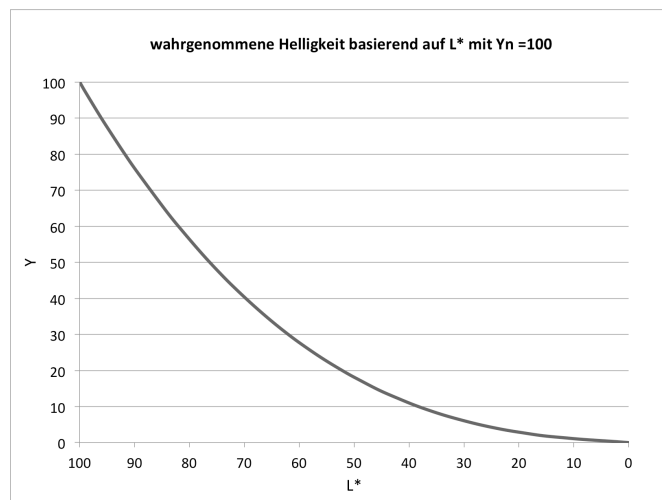


Abbildung 24: Wahrgenommene Helligkeit L* in Abhängigkeit vom Hellbezugswert Y, Y_n=100

Der Hellbezugswert Y (Abschnitt 2.3.4.) ist der Leuchtdichte proportional¹²⁴.

Y_n ist der Hellbezugswert „eines festgelegten weißen Farbreizes“.¹²⁵ Hierauf adaptiert das Auge.¹²⁶ Es bestehen jedoch Unklarheiten bezüglich der Wahl von Y_n. Nachdem diese Unklarheiten kurz beschrieben werden, wird die für die Auswertung eigens definierte Verwendung der Formel vorgestellt.

Die Y-Werte von Normlichtarten, also mögliche Y_n-Werte, sind meistens auf 1¹²⁷ oder 100¹²⁸ normiert. Die nachfolgend (Abschnitt 2.5.1.2.) verglichenen Messgeräte von Jeti und Gigahertz Optik liefern durch ihre Software unterschiedliche Größenordnungen der Y-Werte. Jeti setzte seine Y-Werte der vorliegenden Leuchtdichte bzw. Beleuchtungsstärke (im Beleuchtungsstärkemessmodus) gleich und Gigahertz Optik gibt das Y so aus, wie es sich

¹²² Greule, Roland; 2015: 56

¹²³ DIN; DIN EN ISO 11664-5:2011; 2011: 7

¹²⁴ DIN; DIN EN ISO 16644-1:2011; 2011: 8

¹²⁵ DIN; DIN EN ISO 11664-5:2011; 2011: 5

¹²⁶ Lübbe, Eva; 2013: 38

¹²⁷ Lindbloom, Bruce; 2016

¹²⁸ Lübbe, Eva; 2013: 28

nach der Berechnung durch die Norm (DIN EN ISO 11664-3, $k=1$) ergibt. Durch ein Beispiel soll das Problem der Anwendung der L^* -Formel beschrieben werden.

Beispiel: Bei der Messung der MR16 Halogenlampe Philips Brilliantline 35W ergab sich ungedimmt eine Beleuchtungsstärke von 32000lx und ein Y von 46,86 (Messaufbau Abschnitt 3.1.). Diese Werte stehen für den größten Beleuchtungsstärkewert und größten Y-Wert sämtlicher erstellter Messungen. Dieses „Maximal“-Beispiel soll zeigen, dass der Y-Wert von 46,86 noch nicht einmal halb so groß wie ein Y_n -Wert von 100 ist. Dabei ist die betrachtete Lichtquelle mit 32000lx schon enorm hell. Es ist fraglich, ob eine noch viel hellere Bezugslichtquelle realistisch ist. Wird L^* bei dieser fiktiven Betrachtungssituation so einmal berechnet, ergibt sich ein Wert von 75 (auf einer Skala von 0 bis 100). Beim Jeti würde der Y-Wert bei 32000 liegen. Ein Y_n von 100 wäre dann zu klein.

Je nachdem, worauf unser Auge adaptiert, nehmen wir die Helligkeit des Selbstleuchters anders wahr. Eine Eingrenzung der Betrachtungssituation ist zur Wahl eines angemessenen Y_n -Wertes in diesem Fall notwendig und soll als Annahme im Folgenden beschrieben werden.

Annahme

Schauen wir direkt in den Selbstleuchter bzw. die Lichtquelle, befinden wir uns nah genug davor und oder gibt es im Umfeld keine weitere Lichtquelle, dann adaptiert unser Auge auf eben dieses. Weiter macht es einen Unterschied, ob aktiv gedimmt wird oder das Auge sich an eine bestimmte Dimmstufe bereits adaptiert hat. Den Fall der aktiven Dimmung hätte man beispielsweise im Hotelzimmer, wenn der Gast sich am Bett die gewünschte Lichtstimmung einstellt. Zur einfacheren Festlegung eines Y_n -Wertes dürfte dann nur eine Leuchte angeschaltet sein und eben diese würde betrachtet werden. Der Fall einer statischen Dimmsituation findet sich im Restaurant, wenn das Fachpersonal des Restaurants die gewünschte, meist schon vorprogrammierte, Lichtszene fertig eingestellt hat. Die Augen des Gastes adaptieren dann auf die Lichtsituation. Dieser Fall wäre für eine Auswertung der empfundenen Helligkeit bei niedrigster Dimmstufe komplexer, aber nicht falsch. Die Auswertung soll auch nicht zu einer generellen Aussage über die empfundene Helligkeit bei unterster Dimmstufe führen. Dazu kommt, durch die Adaption des Auges, eine Komplexität, die den Umfang dieser Arbeit übersteigen würde, hinzu. Eine Abgrenzung ist daher notwendig. Aus der Sicht der Autorin sollte für die Betrachtung der untersten Dimmstufe in diesem Fall eine aktive Dimmung nach dem eben beschriebenen Hotelzimmer-Fall berücksichtigt werden. Dann würde in der Einzelbetrachtung der Produkte jeweils für Y_n der Y-Wert desselben Produktes bei 100% gemessener Helligkeit verwendet werden.

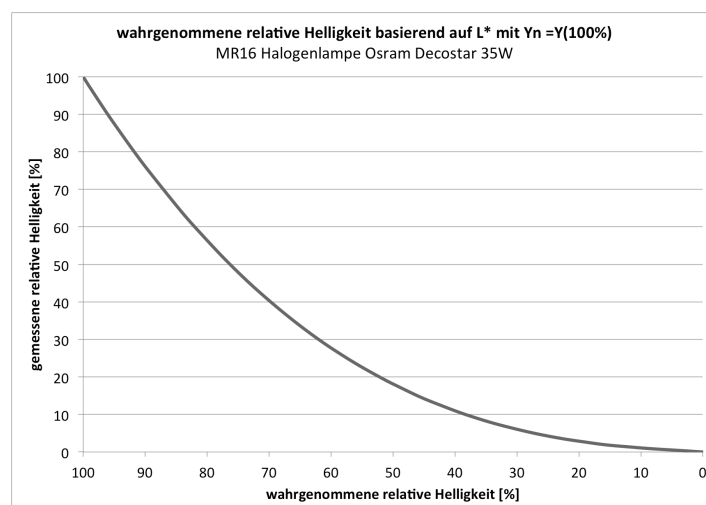


Abbildung 25: Diagrammbeispiel für die von der Autorin vorgeschlagene Verwendung der L^* -Formel: Y_n entspricht dem Hellbezugswert Y des betrachteten Produktes bei 100% gemessener Helligkeit

Aufgrund der logarithmischen Helligkeitswahrnehmung ist der unterste Dimmbereich unter 10% relativer, gemessener Helligkeit entscheidend. Darunter werden 40% bis 0% empfundene Helligkeit reguliert. Eine hohe Auflösung an Dimmstufen in diesem Bereich wäre für einen sanften Dimmverlauf wünschenswert.

Die sich bei den Temperaturstrahlern ergebenden L*-Werte werden für die Bewertung als Mindestwerte gegenüber den LED Warm Dimming Produkten festgelegt.

2.5. Spektrometer

Zur Aufnahme der spektralen Strahlungsverteilungen wurde ein Spektrometer verwendet. Hier soll kurz das Grundprinzip dieses Messgerätes genannt und weiter auf die von der Norm empfohlene Auflösung eingegangen werden. Letztendlich wird die Wahl des benutzten Spektrometers begründet.

Spektrometer, die der Aufteilung des eintreffenden Lichtes in seine spektralen Anteile und dessen Aufzeichnung dienen, bestehen in der klassischen Bauweise aus einem Eingangsspalt, einem beweglichen, streuenden Element, wie einem Prisma oder Gitter, einem Ausgangsspalt und einem Einzel-Detektor. Einzelne Wellenlängen oder kleinere Wellenlängenbereiche eines Spektrums werden dabei nacheinander gemessen. Die Nachteile dieser Bauweise bestehen aus dem nicht parallelen Messvorgang, den unhandlichen Gerätegrößen und der Anfälligkeit von beweglichen Bauteilen und wurden durch die Entwicklung von Array-Spektrometern abgelöst.¹²⁹

Array-Spektrometer besitzen nicht einen einzigen Detektor, sondern eine größere Anzahl. Sie werden auch als Liniendetektoren bezeichnet.¹³⁰ Durch den verwendeten Poly- statt Monochromator wird das Spektrum auf einmal in seine einzelnen Wellenlängen aufgeteilt und auf den Liniendetektor geleitet.¹³¹ Somit werden alle Wellenlängen gleichzeitig aufgezeichnet¹³² und das Polychromator-Gitter muss nicht mehr beweglich sein. Dadurch ergibt sich auch eine kompaktere Bauweise.

2.5.1. Auflösung von Spektrometern

In der DIN EN ISO 11664-3 (CIE-Farbwerte) wird für die Aufnahme spektraler Daten mit Messgeräten eine Bandbreite von 5nm oder geringer empfohlen, außer eine der angegebenen Korrekturfunktionen wird verwendet. Grund dafür ist die mit der Auflösung des Spektrometers verbundene und nachfolgend beschriebene Einflussnahme auf die Genauigkeit von Spektren und dadurch auf die anschließend berechneten Farbwerte.¹³³

Bei Angaben in nm zur Auflösung des Messgerätes werden in den Datenblättern verschiedener Hersteller unterschiedliche Begrifflichkeiten verwendet, z.B. optische Bandbreite, physikalische Auflösung oder Halbwertsbandbreite FWHM. Dabei ist zwischen der optischen oder spektralen und der digitalen oder pixelbezogenen Auflösung zu unterscheiden.¹³⁴ Eigenschaften, wie optische Bandbreite und FWHM (Full Width at Half Maximum, Halbwertsbandbreite) gehören in die erste Kategorie und die physikalische Auflösung zur zweiten. Die DIN bezieht sich vermutlich auf die optische bzw. spektrale Auflösung.

¹²⁹ JETI; 2005: 6

¹³⁰ JETI; 2005: 7

¹³¹ Harris, Daniel C.; 2014: 516

¹³² Harris, Daniel C.; 2014: 537

¹³³ DIN; DIN EN ISO 11664-3:2013; 2013: 10

¹³⁴ JETI; 2005: 10

Die optische Bandbreite wird durch den Wellenlängenabstand zweier im Spektrum unmittelbar nebeneinander auftretender Peaks gleicher Intensität beschrieben. Die Senkung zwischen den zu unterscheidenden Peaks muss auf die maximale Intensität bezogen mindestens 19% betragen. Dieses Kriterium wird auch Rayleigh-Kriterium genannt. Eine praktischere Methode stellt die gemessene Halbwertsbandbreite (FWHM) dar. Hierfür wird bei einer schmalbandigen Spektrallinie die Wellenlängenbreite bei halber Intensität angegeben.¹³⁵ Die Auflösungsangabe der zweiten Methode umfasst verglichen mit der ersten 4/5. Sie beschreibt die Ausweitung der Spektrallinie aufgrund von Beugung im optischen Verlauf.

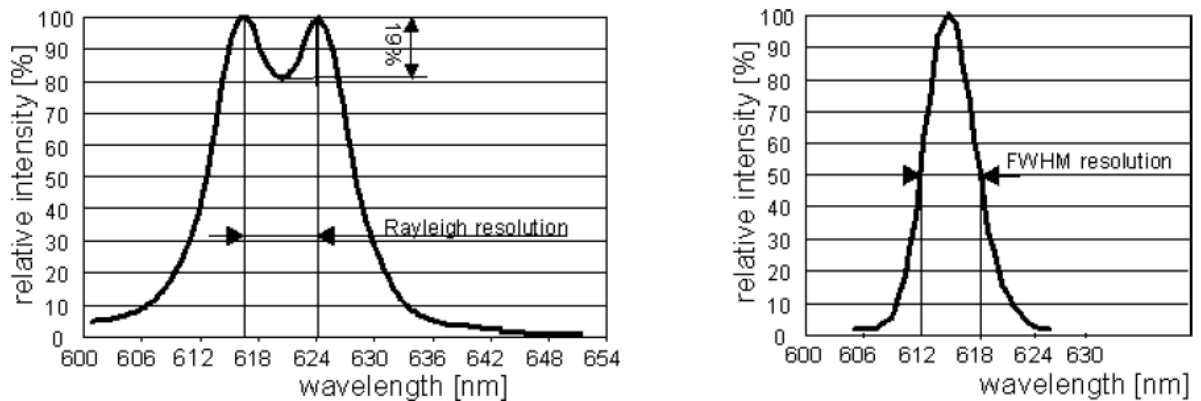


Abbildung 26, 27: Definition der optischen Bandbreite nach dem Rayleigh-Kriterium (links) und nach der gemessenen FWHM (rechts), Quelle: Jeti; 2015: 10

Separat davon zu betrachten ist die digitale Bandbreite. Sie beschreibt die spektrale Bandbreite, die von einem Pixel des Liniendetektors erfasst wird, und hängt von der Breite des Pixels (inkl. lichtempfindliche und lichtunempfindliche Fläche) und des aufzuzeichnenden Spektrums ab. JETI Spektrometer gibt es mit 2nm/px bis 10nm/px digitaler Auflösung.

Die digitale sollte der optischen Auflösung gegenüber um mindestens ein Dreifaches größer sein.¹³⁶

2.5.1.1. FWHM-Einfluss auf verschiedene Spektren

Wie im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, wird zur Berechnung der optischen Auflösung die Ausweitung der Intensität einer Spektrallinie auf benachbarte Wellenlängen betrachtet. In den untersuchten Warm Dimming LED-Spektren liegen keine schmalbandigen Peaks mit einer FWHM unter 10nm vor. Die schmalsten Peaks haben eine FWHM von ca. 20nm (siehe Abschnitt 3.4 und 3.5).

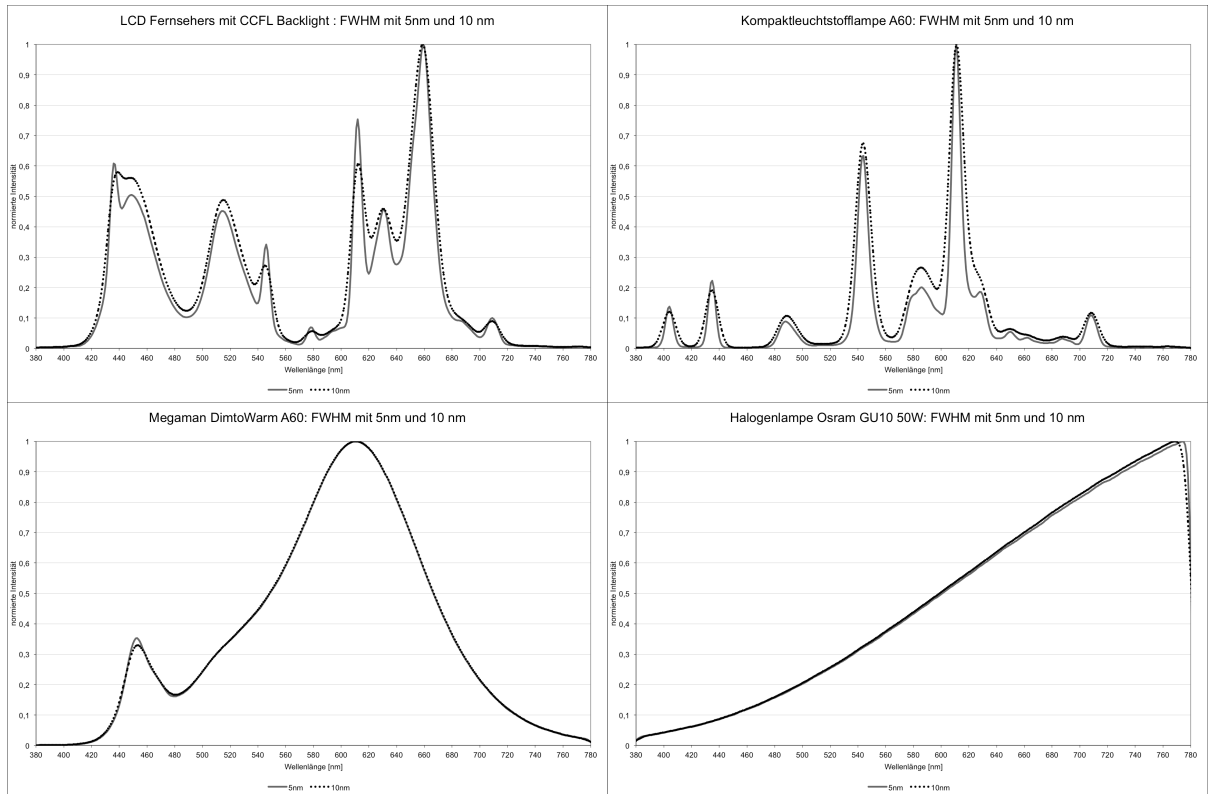
Die zwei Messgeräte der Hochschule haben eine optische Bandbreite von 5nm (JETI Specbos 1201) und 4,5nm (JETI Specbos 1211). Zu Zeiten der Erstellung der Messdaten für diese Bachelorthesis standen diese nicht zu Verfügung. Bei der Untersuchung von vollen Spektren der Temperaturstrahler und tendenziell volle Spektren anstrebende Warm Dimming LED Produkte wirkt sich eine optische Bandbreite von 10nm (verwendetes Messgerät BTS256-EF von Gigahertz Optik) vernachlässigend gering aus. Diese Feststellung zum Einfluss der FWHM auf die untersuchten Spektren soll mit Hilfe von Grafiken, die aus einer Kalkulationstabelle von Lew Backrack (Jeti) erstellt wurden, belegt werden.

Mittels einer Sigma-Funktion kann der Einfluss der FWHM auf das Spektrum dargestellt werden. Zwischen der FWHM und Sigma (σ), die Standardabweichung, besteht das Verhältnis

¹³⁵ JETI; 2005: 11

¹³⁶ JETI; 2005: 11

$FWHM = 2 * \sqrt{2 * \ln(2)} * \sigma^{137}$. Um den Unterschied zwischen 5nm und 10nm optischer Bandbreite aufzeigen zu können, war es nötig, Spektren, die mit mindestens 5nm optischer Auflösung aufgezeichnet wurden, zu verwenden. Mit dem Jeti Specbos 1211 wurden zwei der untersuchten Produkte (Temperaturstrahler und Warm Dimming LED Produkt) und ein peaklastiges Spektrum einer Kompaktleuchtstofflampe gemessen. Der Autor der Kalkulationstabelle¹³⁸ stellte zudem ein noch peaklastigeres Spektrum eines LCD Fernsehers mit CCFL(Cold Cathode Fluorescent Lamp)-Backlight zu Verfügung.

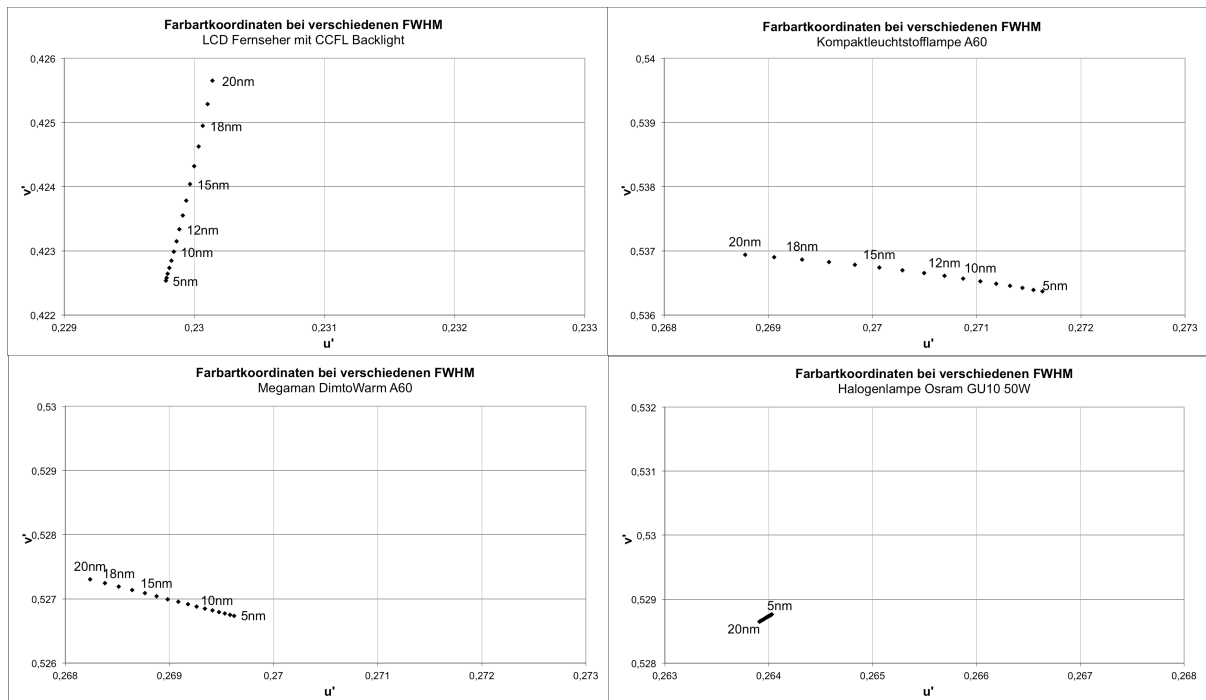


Abbildungen 28 bis 31: Einfluss der Halbwertsbreite (FWHM) bei 5nm und 10nm auf das spezifische Spektrum, von oben links nach unten rechts: LCD Fernseher mit CCFL Backlight, Kompaktleuchtstofflampe A60, Megaman DimtoWarm A60, Halogenlampe Osram GU10 50W Quelle: Grafiken in Excel Hein, Mara; 2016 ; Kalkulationstabelle Backrack, Lew; 2016

Die in den obigen Grafiken aufgezeigten Veränderungen des Spektrums nehmen nachfolgend Einfluss auf die zu ermittelnden Farbwerte X,Y und Z und somit auf u' und v' .

¹³⁷ Wolfram MathWorld; 2016

¹³⁸ Backrack, Lew; 2016



Abbildungen 32 bis 35: Einfluss der Halbwertsbreite (FWHM) von 5nm bis 20nm auf die Farbartkoordinaten u' und v' , von oben links nach unten rechts: LCD Fernseher mit CCFL Backlight, Kompaktleuchtstofflampe A60, Megaman DimtoWarm A60, Halogenlampe Osram GU10 50W, Quelle: Grafiken in Excel Hein, Mara; 2016 ; Kalkulationstabelle Backrack, Lew; 2016

Die Grafiken besitzen gleichgroße Ausschnitte aus der $u'v'$ -Farbtafel und stellen die Farbartkoordinaten der entsprechenden FWHM dar. In diesen Darstellungen wird beginnend bei 5nm über 10nm hinaus bis 20nm der Einfluss auf die Farbartkoordinaten berücksichtigt. Die Kästchengröße, die durch die Hilfslinien entstehen, haben eine Kantenlänge von 0,001. Das entspricht in etwa der Wahrnehmungsschwelle einer MacAdam-Ellipse nahe des Planckschen Kurvenzugs. Zwischen 5nm und 10nm gibt es bei keinem der Spektren eine Abweichung, die die Wahrnehmungsschwelle überschreitet. Allein bei 5nm zu 20nm kommt es bei der Kompaktleuchtstofflampe zu einer Abweichung um ungefähr 0,003. Diese Abweichung könnte gerade so wahrnehmbar sein.

Das Messgerät BTS256-EF von Gigahertz Optik ist bei den in dieser Arbeit untersuchten Spektren und der Bestimmung der Koordinaten in der $u'v'$ -Farbtafel hinsichtlich seiner optischen Bandbreite ebenso geeignet wie das Jeti Specbos 1201 und 1211.

2.5.1.2. Messwertevergleich Spektrometer

Inwiefern sich die Wahl des Spektrometers auf die Messergebnisse auswirkt, wird durch Vergleichsmessungen zwischen dem Messgerät der Hochschule (Jeti Specbos 1211) und dem verwendeten Messgerät (Gigahertz Optik BTS256-EF¹³⁹) festgehalten. Hierbei wurde einmal ein Spektrum einer Halogenlampe und ein dem Durchschnitt entsprechendes Spektrum eines Warm Dimming LED Produktes bei gleichem Abstand zur Lichtquelle vermessen.

Das mit 5nm optischer Bandbreite und einem Sensor mit 2048Px (für den spektralen Messbereich 380-780nm werden 1024Px verwendet) höher aufgelöste Spektrometer von Jeti führt bei den Farbtemperatur- und Farbverläufen beim Dimmen zu keinem maßgeblichen Einfluss. In den spektralen Strahlungsverteilungen sieht man den ebenfalls zu vernachlässigenden Einfluss der FWHM. Allein bei der gemessenen Halogenlampe sieht man im Spektrum einen Abfall der Strahlungsstärke zu den großen Wellenlängen hin. Eventuell hat

¹³⁹ Gigahertz Optik; BTS256-EF; 2016

sich hier der Abstand der beiden Messgeräte zur Lichtquelle minimal unterschieden. Die zugehörigen Grafiken finden sich im Anhang.

Der größte Unterschied besteht in der Messung der spektralen Strahlungsverteilung anschließenden Kalkulation von X, Y und Z. Das Jeti normiert Y auf die gemessene Beleuchtungsstärke. Gegenüber den Normfarbwerten des BTS256-EF entstehen dadurch Werte, die um den Faktor 700 bis 800 größer sind. Dieser Unterschied wirkt sich kaum oder gar nicht auf die Berechnung der Farbwertanteile aus, da die Differenz ein relativ konstanter Faktor ist und sich dieser in der Formel rauskürzt. Wird in Formeln wie für L^* (Abschnitt 2.4.2.) der absolute Wert Y benutzt, dann muss auf die Dimensionen der Normfarbwerte Rücksicht genommen werden und dementsprechend ein diesen Dimensionen entsprechender Wert Y für die Bezugslichtquelle verwendet werden.

2.5.2. Verwendetes Spektrometer

Für die erfolgten Messungen wurde das Spektrometer BTS256-EF von Gigahertz-Optik verwendet.

Gegenüber dem typischen Spektralbereich von 380nm bis 780nm des sichtbaren Bereiches elektromagnetischer Strahlung kann mit dem Messgerät das Spektrum im Bereich 380nm bis 750nm aufgezeichnet werden. Da die Normspektralkurven (Abschnitt 2.3.3.1.) ab ca. 720nm gegen Null gehen, wirkt sich die Begrenzung nicht auf die Berechnung der Farbmaßzahlen aus.

Die Pixelanzahl des verwendeten Chip-Array steckt im Produktnamen. Mit den 256 Pixeln ergibt sich bei einem möglichen Spektralbereich von 380nm bis 750nm zunächst eine digitale Auflösung von 1,45nm/Px. Da der Chip ein CMOS Diodenarray ist, befinden sich auf dem Pixel neben der lichtempfindlichen Fläche Transistoren zur Umwandlung in ein elektrisches Signal. Somit dürfte die digitale Auflösung geringer bzw. die Anzahl nm/Px etwas größer sein. Vermutlich ist die zuvor erwähnte Begrenzung des Spektralbereiches mit dem verhältnismäßig kleinen Chip zu begründen. Das Jeti Specbos 1201 hat beispielsweise 1024Px bei einem aufzuzeichnendem Spektrum von 380nm bis 780nm.

Ähnlichste Farbtemperaturen können von 1700K bis 17000K kalkuliert werden. Gelegentlich gehen die gemessenen Produkte jedoch unter 1700K, was zu Messfehlern führen kann. Wie in Abschnitt 2.3.4.3. erwähnt, ermöglicht die verwendete Formel nach Xingzhong nur eine Berechnung im Bereich 1666K bis 25000K. Die Mess- bzw. eher Kalkulationsunsicherheit liegt hier bei +/-50K, was im unteren CCT-Bereich zu stärkeren Abweichungen in der u,v-Farbtabelle führen kann.

Das BTS256-EF verwendet die in der Norm aufgezählte Korrekturfunktion nach Woolliams 2005. Messunsicherheiten der Farbwertanteile x und y liegen bei +/- 0,002 bei einer Normlichtart A und bei +/- 0,005 bei einer „typ. LED“. Letztere kann also zu wahrnehmbaren Abweichungen führen.

Beleuchtungsstärken von 1-199999lx können aufgenommen werden.

Das Messgerät müsste laut einem telefonischen Gespräch mit der Firma Gigahertz Optik aus dem folgenden Aufbau bestehen¹⁴⁰. Eine genauere Aussage zum Aufbau wird von der Firma nicht nach außen gegeben. Prinzipiell soll es ein Czerny-Turner-Aufbau (Abb. 37) sein.¹⁴¹ Der Chip-Array stellt mit seiner Pixelbreite im Vergleich zu früheren Spektrometern den Ausgangspalt dar.

¹⁴¹ Mail von Gigahertz Optik vom 23.05.2016

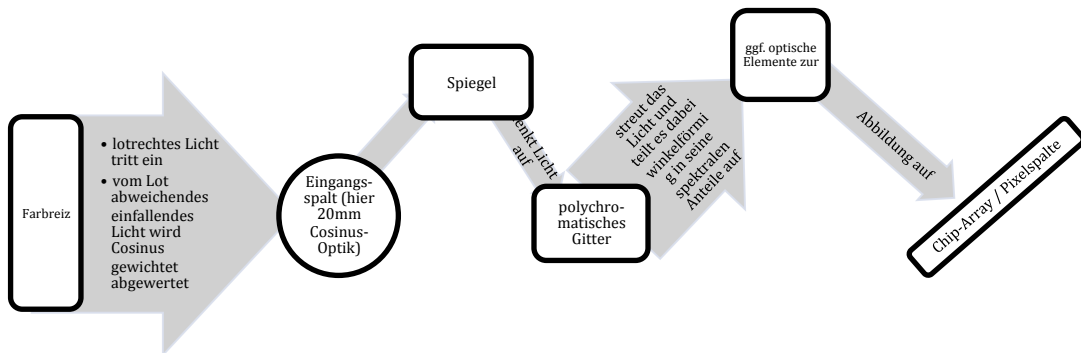
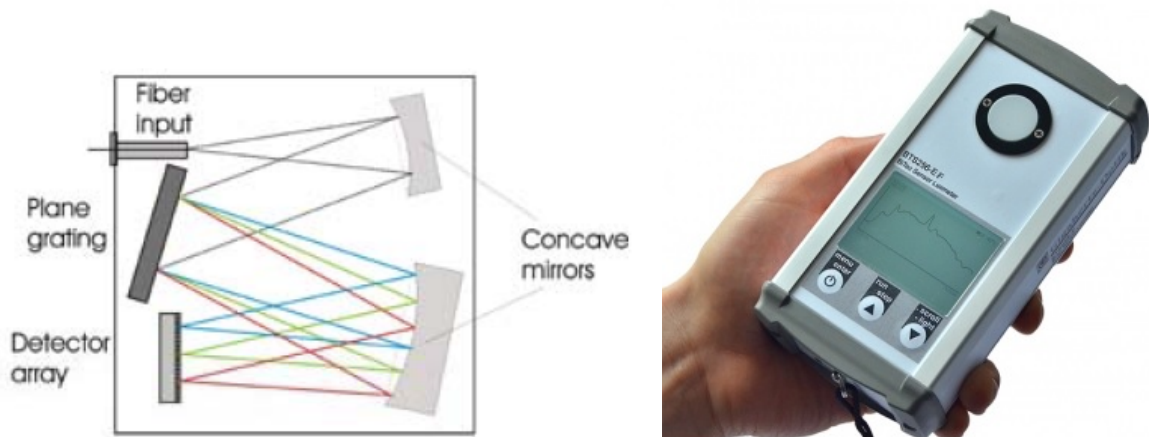


Abb. 36: Grober Aufbau des BTS256-EF, Quelle: Inhalt telef. Gespräch mit Gigahertz Optik 13.04.2016, Darstellung Hein, Mara



Abbildungen 37, 38: links: Czerny-Turner-Aufbau, Quelle: Jeti; 2005; rechts: Das BTS256-EF von Gigahertz Optik, Quelle: Gigahertz Optik; 2016

3. Messtechnische Untersuchung

In diesem Kapitel werden der Messaufbau, die untersuchten Produkte und die Ergebnisse anhand von Grafiken vorgestellt. Die untersuchten Produkte werden bei der Auswertung in drei Gruppen aufgeteilt. Zuerst werden die ermittelten farbmetrischen Eigenschaften und Dimmkurven der Temperaturstrahler beschrieben. Zu ihnen werden die LED Warm Dimming Produkte in den Vergleich gesetzt. Die LED Warm Dimming Produkte werden dann aufgeteilt in Retrofits und Leuchten. Ein Retrofit ist eine Lampe mit modernem Leuchtmittel und klassischer Fassung.¹⁴² Diese Lampen sollen einen einfachen Austausch verwendeter Glüh- und Halogenlampen ermöglichen. Bei den untersuchten acht Leuchten stellte sich heraus, dass

¹⁴² Ris, Hans Rudolf; 2015: 172

vier verschiedene Chip-Hersteller vertreten sind. Die Ergebnisse werden aufgrund der redundanten Verhalten zusammengefasst.

An jedem Ende eines Abschnittes gibt es eine Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse.

Alle Excel-Grafiken sind von der Autorin erstellt. Die verwendeten Hintergrundgrafiken sind im Abbildungsverzeichnis genannt.

3.1. Messaufbau

Zur Darstellung der Messsituation wird der im Prinzip immer gleich beibehaltene Messaufbau skizziert und die benannten Grundelemente vorgestellt.

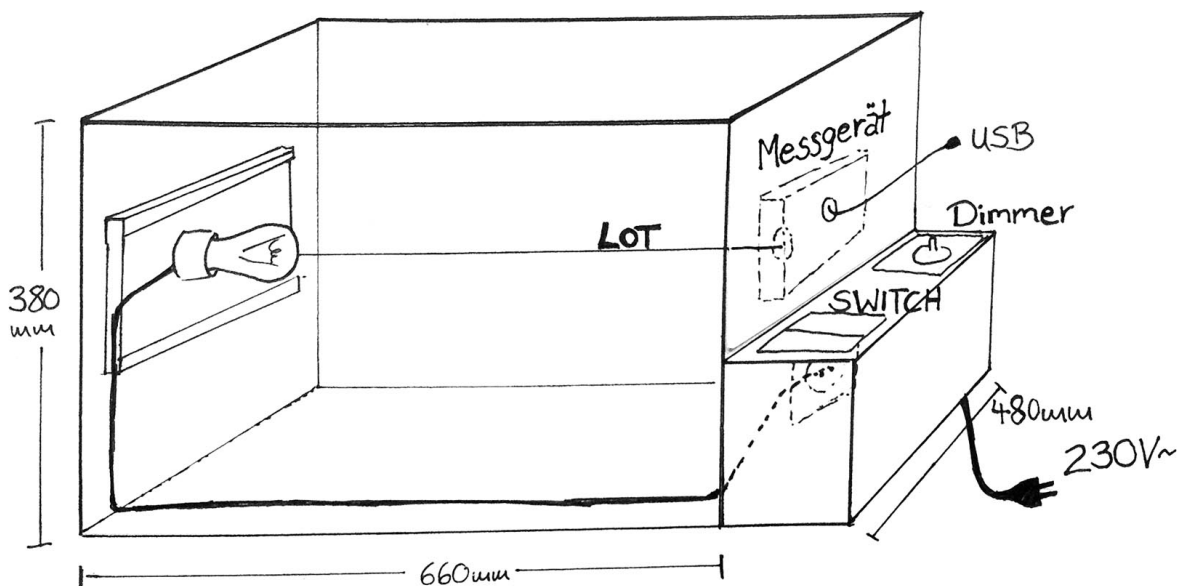


Abbildung 39: Skizze des prinzipiellen Messaufbaus mit der Black Box (Messkasten mit matter, schwarzer Oberfläche)

Die Messbox besitzt eine matte, schwarze Oberfläche. In der Skizze ist beispielhaft eine Halogen- oder Glühlampe eingezeichnet. Für die verschiedenen Fassungen der Lampen gibt es Bretter mit fest montierten Fassungen eines Typs. Bei Niedervolt Halogenlampen, also mit einem GU5.3-Sockel, ist auf dem Brett, das man in die Halterung schieben kann, neben der Fassung ein 12V Transformator. LED-Produkte benötigen immer einen Treiber, der die Wechselspannung in Gleichstrom umwandelt und entweder eine bestimmte konstante Spannung oder konstanten Strom ausgibt. Bei den Retrofits ist der Treiber im Lampengehäuse enthalten. Die LED Warm Dimming Leuchten wurden mit einem vom Hersteller empfohlenen Treiber zur Verfügung gestellt.

Für möglichst gleiche Messbedingungen sollte die Verwendung unterschiedlicher Dimmer weitestgehend vermieden werden. Die Retrofits und die Temperaturstrahler wurden ausschließlich mit dem Phasenanschnittsdimmer Busch&Jäger 6523 U LED-Dimmer gedimmt. Die technischen Daten und die möglichen Lastarten dieses Dimmers finden sich als Auszüge aus dem Datenblatt im Anhang 2. Busch&Jäger gehört zu den marktführenden Firmen, die stets in den Dimmer-Kompatibilitätslisten auftauchen.

Bei den LED Warm Dimming Leuchten wurde angestrebt, immer mit der eldoLED-Software FluxTool, den damit ansteuerbaren Konstantstrom-Treiber DUALdrive 560/A¹⁴³ und der

¹⁴³ Anhang 3

Toolbox¹⁴⁴, die die Schnittstelle zwischen Treiber und Computer ist, zu dimmen. eldoLED deckt mit dem DUALdrive sämtliche Konstantstrom betriebene LED-Leuchten ab, da der Konstantstrom zwischen 200mA bis 1050mA in 1mA Stufen festgelegt werden kann. Es wird eine Konstantstromregelung zur Dimmung verwendet. Manche Musterleuchten waren allerdings fest installiert, sodass ihr Treiber nicht abzubauen war oder die entsprechend mögliche Ansteuerung durch die Software nicht kompatibel war.

Der Switchschalter bietet die Möglichkeit, den Busch&Jäger-Dimmer der Steckdose in der Messbox vorzuschalten oder nicht. Bei der eldoLED Dimmung werden die 230V direkt auf die Steckdose gegeben und der Zwischen Leuchte und Steckdose platzierte Dimmer durch eine USB-Schnittstelle (durch die Toolbox) reguliert.

Die aufgenommenen Messwerte entsprechen den Dimmschritten. Beim Busch&Jäger Dimmer entsprachen diese den möglichen Einstellungsstufen. Bei eldoLED können mehr Dimmschritte erfolgen, aber aufgrund des relativ großen Messumfangs von im Durchschnitt meist 37 Messwerten je Produkt, wurde der Umfang von eldoLED daran angepasst. Bei den Messungen wurde immer heruntergedimmt.

Das Messgerät BTS256-EF von Gigahertz wurde mit der Messfläche immer lotrecht zur untersuchten Leuchte oder Lampe ausgerichtet.

3.2. Übersicht der untersuchten Produkte

Eine Auflistung der untersuchten Produkte soll einen Überblick über die untersuchten Lampen-Formen und Leuchtentypen und über vertretene Lampen- und Leuchtenhersteller geben. Außerdem wird sogleich die Gliederung der Untersuchungsabschnitte beschrieben und der Umfang der Untersuchung vermittelt.

Zur Vereinfachung wird bei den Temperaturstrahlern und LED Warm Dimming Retrofits bezüglich der Lampenformen in A60 bzw. A65 (Birnenform mit einem Durchmesser von 60mm bzw. 65mm) und in MR16 (MR=Multifaceted Reflector, 16= Durchmesser von 16/8 Zoll bzw. 51mm) unterteilt.

MR16-Lampen gibt es sowohl mit GU5.3-Stiftsockeln für den Niedervoltbetrieb (12V Wechselstrom) und GU10-Bajonettsockel für den Hochvoltbetrieb (230V Wechselstrom). Eine Unterscheidung in GU10 und GU5.3 ist für die farbmtrische Untersuchung nicht entscheidend. Häufiger tritt auch die Bezeichnung PAR16 (Parabolic Aluminized Reflector) auf. Bei den Temperaturstrahlern ergibt sich durch die verschiedenen Reflektorarten im Spektrum ein Unterschied. Bei den Retrofits jedoch werden die Lichtformer anders und zwar mit Kunststoffoptiken realisiert. Die Bezeichnung trifft hier dann nicht mehr sinngemäß zu. Es geht nachfolgend vielmehr um die kompakte Bauform. Auch wenn in den einzelnen Produktbezeichnungen der Hersteller beide Varianten noch Verwendung finden, wird hier zur Vereinfachung von MR16-Lampen gesprochen.

Bei den LED Warm Dimming Leuchten wird der verwendete Chip-Hersteller in den Leuchten zur Kategorisierung benutzt. Im Anhang 5 finden sich zu diesen vier verschiedenen Chip-Technologien Fotos.

¹⁴⁴ Anhang 3

Temperaturstrahler (alle mit Busch&Jäger gedimmt) (Fassung)

A60	Philips	Glühlampe klar A60 60W	(alle E27)
	Radium	Halogenlampe klar A60 105W	
MR16	GE	IR CC 45W	(GU5.3)
	Osram	Decostar 35W	(GU5.3)
		HALOPAR16 Value 50W	(GU10)
	Philips	Brilliantline 35W	(GU5.3)
		Master UV-Filter 35W	(GU5.3)

LED Warm Dimming Retrofits (alle mit Busch&Jäger gedimmt) (Fassung)

A60/A65	Megaman	A65 DimtoWarm 10W	(alle E27)
	Osram	Parathom Advanced A60 8,5W	
	Philips	Master LED A60 Dim Tone 8W	
	Ledon	LED Lampe A60 Sunset Dimming 10W	
MR16	Megaman	PAR16 DimtoWarm 10,5W	(GU10)
	Osram	Parathom Advanced PAR16 GLOWdim 5W	(GU10)
		Parathom Advanced MR16 GLOWdim 5W	(GU5.3)
	Philips	Master LEDspot PAR16 Dim Tone 4,5W	(GU10)
	Ledon	LED Lampe MR16 Sunset Dimming 7W	(GU10)

LED Warm Dimming Leuchten (Dimmer)

Sharp	Ledon	LED-Downlight MR16 Sunset Dimming 10W	(Busch&Jäger)
	Qu-Light	Bilbao 10W	(eldoLED)
	LEDS C4	Play Warm Dimming 13W	(eldoLED)
	Reggiani	Trybeca Rechteck Warm Dimming 13W	(eldoLED)
LEDengin	LEDengin	Luxitune Development Kit Gen3.0	(Lutron)
Cree	Zumtobel	Panos Infinity warmDimming 12W	(eldoLED)
Lumenetix	ACDC	Air Mini WarmZero 12,5W	(Musterdimmer) ¹⁴⁵
	WILA	Alphabet Spectra WarmDimm 20W	(Gira, 1-10V)

3.3. Temperaturstrahler

Bevor die LED Warm Dimming Produkte betrachtet werden, soll ihr zu vergleichendes Gegenüber, die Temperaturstrahler, anhand der gleichen zu untersuchenden Eigenschaften vorgestellt werden.

3.3.1. Spektrale Strahlungsverteilung

Die spektrale Strahlungsverteilung ist die Grundlage jeder weiterführenden Berechnung der farbmatischen Eigenschaften. Die Temperaturstrahler besitzen ein kontinuierliches Spektrum. Auch wenn die LED Warm Dimming Produkte ein anderes Spektrum besitzen, können sie, wie

¹⁴⁵ Anhang 9

bereits im Abschnitt 2.3. erwähnt, die gleiche Wirkung auf die Reizzentren des menschlichen Auges veranlassen. In diesem Abschnitt sollen einige Spektren von untersuchten Temperaturstrahlern vorgestellt und untereinander in den Vergleich gesetzt werden.

Die untersuchte Glühlampe und Halogenlampe in A60-Form (Durchmesser des Glaskolben: 60mm) besitzen nahezu gleiche spektrale Strahlungsverteilungen (Abb. 40). Zum direkten Vergleich wurden die Kurven bei 560nm auf 1 normiert und übereinandergelegt. Eine solche Normierung kann vorgenommen werden, da keine absoluten Werte der spektralen Strahlungsverteilung, sondern die Verteilung an sich bzw. in Relation betrachtet wird. Die Spektren von Normlichtarten sind genauso normiert. Die untersuchten Produkte besitzen aufgrund ihrer sehr unterschiedlichen Lichtströme zu verschiedene absolute spektrale Strahlungsdichten.

Die Kurve der Halogenlampe flacht zu den langen Wellenlängen hin gegenüber der Glühlampe etwas ab. Beide besitzen das Maximum ihrer spektralen Strahlungsverteilung bei der Grenze des Messbereiches der langen Wellenlängen. Die als Rot und Gelb empfundenen Wellenlängen dominieren das Spektrum.

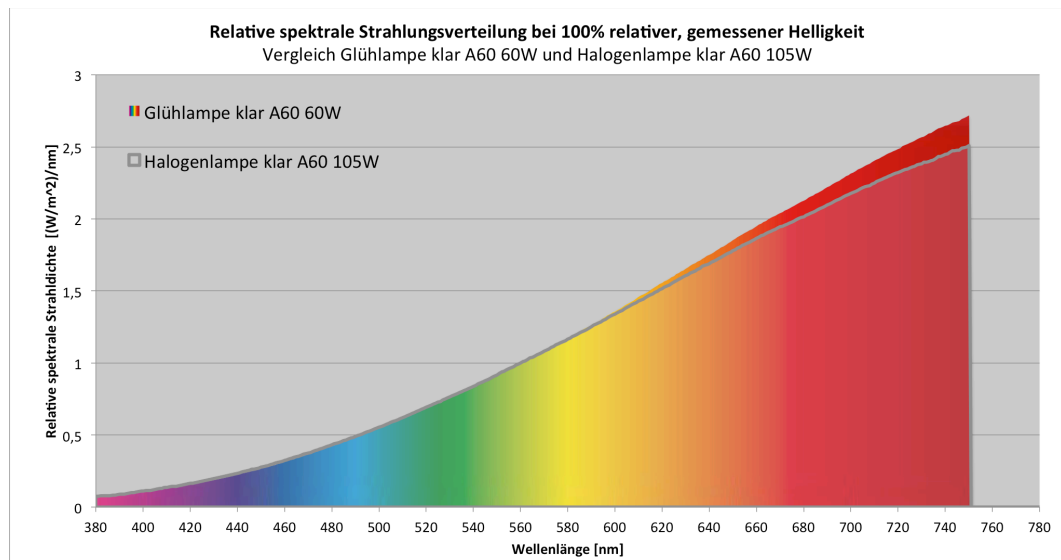


Abbildung 40: Relative spektrale Strahlungsverteilung bei 100% relativer, gemessener Helligkeit, Vergleich Glühlampe klar A60 60W und Halogenlampe klar A60 105W

Zur Überlagerung der spektralen Strahlungsverteilung beider Lampen bei unterster Dimmstufe wurde aufgrund der teils fehlenden Anteile oder vorliegenden Messungenauigkeiten nicht bei 560nm, sondern bei 700nm auf 2 normiert. Die relative spektrale Strahlungsverteilung bei unterster Dimmstufe zeigt bei beiden Lampen ein gleiches Verhalten (Abb. 41). Die als Rot empfundenen langen Wellenlängen dominieren weiterhin das Spektrum. Die als Gelb wahrgenommenen spektralen Anteile sind im Verhältnis dazu stärker reduziert. Blau und Grün empfundene Wellenlängenbereiche sind kaum oder gar nicht mehr vorhanden.

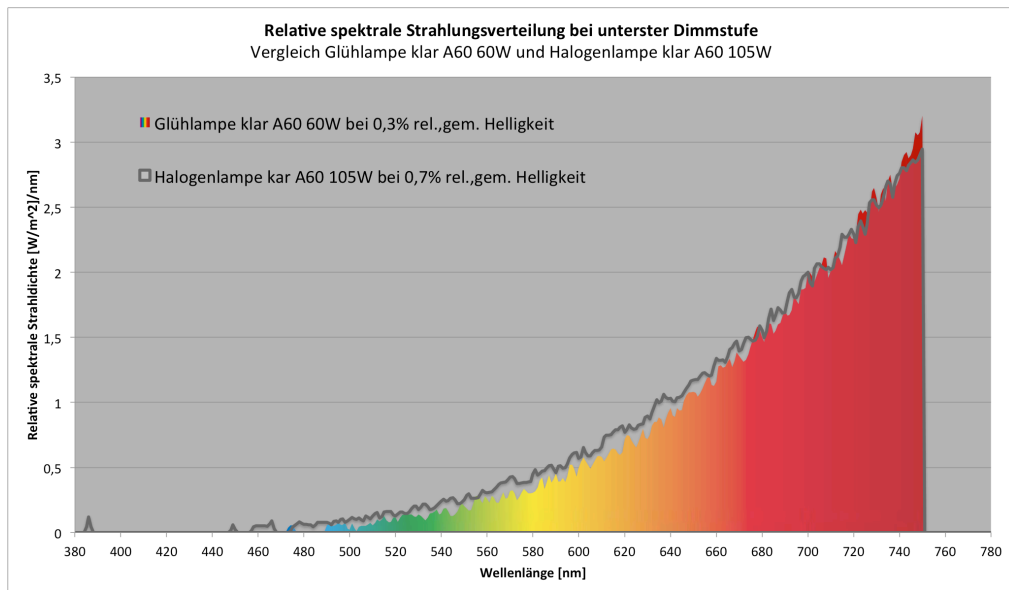


Abbildung 41: Relative spektrale Strahlungsverteilung bei unterster Dimmstufe, Vergleich Glühlampe klar A60 60W und Halogenlampe klar A60 105W

Auch die MR16 Halogenlampen zeigen relativ ähnliche Kurven. Als Zusammenfassung werden die relativen spektralen Strahlungsverteilungen der MR16 Halogenlampen bei 100% relativer, gemessener Helligkeit und bei unterster Dimmstufe in den folgenden zwei Grafiken (Abb. 42, 43) gemeinsam dargestellt.

Die Kurven wurden, wie in den letzten zwei Grafiken, normiert und nach kleiner werdenden relativen spektralen Strahlungsdichten sortiert und in grauer bis weißer Umrandung vor die Kurve mit der relativ größten Strahlungsdichte gelegt.

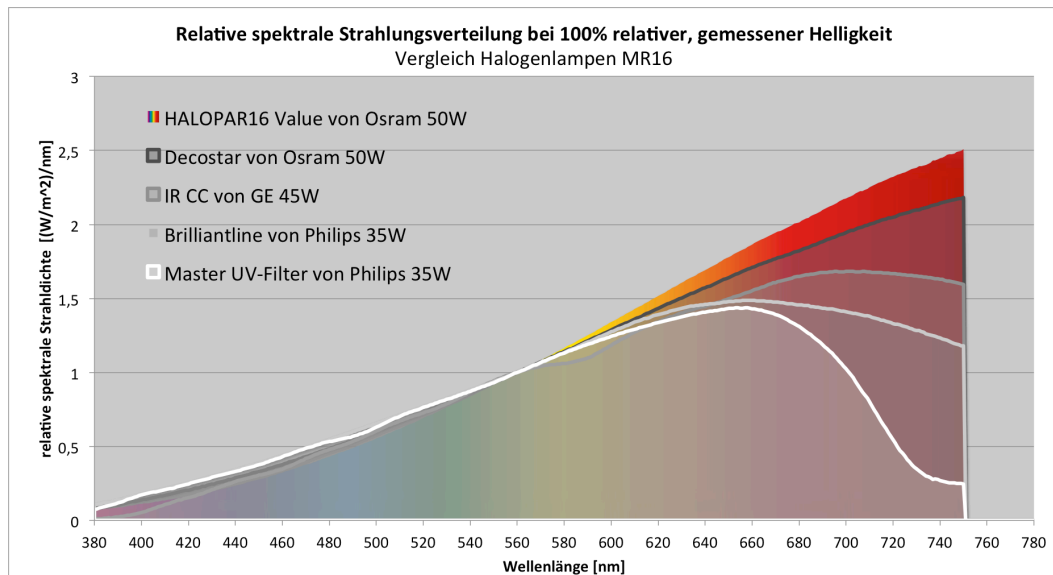


Abbildung 42: Relative spektrale Strahlungsverteilung MR16 Halogenlampen bei 100% relativer, gemessener Helligkeit

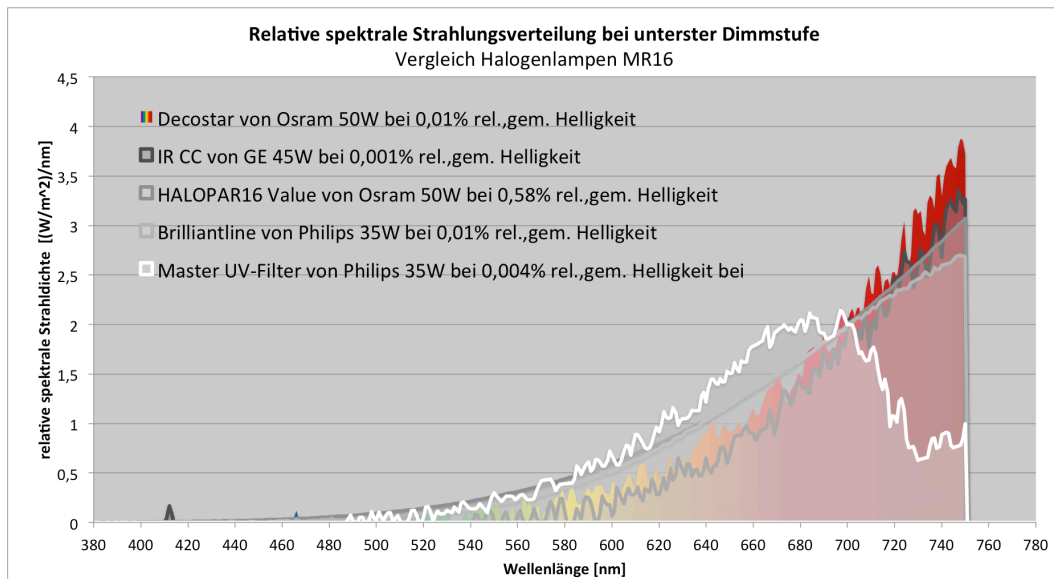


Abbildung 43: Relative spektrale Strahlungsverteilung MR16 Halogenlampen bei unterster Dimmstufe

MR16 Halogenlampen zeigen im Prinzip das gleiche Verhalten wie die Glühlampe und Halogenlampe in A60-Form. Unterschiede in den Wellenlängenbereichen oberhalb von 660nm können darin bestehen, dass Halogenlampen teilweise mit Kaltlichtspiegeln realisiert sind. Diese Spiegel bestehen aus „einer Folge von Interferenzschichten [...], die für Infrarot durchlässig sind“.¹⁴⁶ Dadurch werden „etwa zwei Drittel der Wärme nach hinten abgestrahlt“.¹⁴⁷ Eine Beleuchtung von temperaturempfindlichen Gegenständen wird durch die dann deutlich geringer nach vorne abstrahlende Wärme möglich. Der Kaltlicht-Reflektor bewirkt die abnehmende spektrale Strahlungsdichte ab ca. 660nm. Bei einem klassischen Aluminium-Reflektor, wie er bei der Decostar von Osram verwendet wird, bleibt die stets steigende Strahlungsdichte in Richtung Infrarotstrahlung im sichtbaren Spektrum erhalten.

Wenn in der Auswertung Bezug auf die spektrale Strahlungsverteilung von Temperaturstrahlern genommen wird, dann sollen damit die Spektren der Glüh- und Halogenlampe der A60-Form oder die Spektren vom HALOPAR16 Value oder vom Decostar von Osram mit ihren unoptimierten Reflektoren gemeint sein. Diese Spektren nehmen in ihrer spektralen Strahlungsdichte zu den langen Wellenlängen hin kontinuierlich zu.

3.3.2. Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen

Der Effekt des Warm Dimming wird vereinzelt von Herstellern mit ähnlichen Kurven, wie sie in diesem Abschnitt auftauchen beschrieben. Die folgenden Kurven stellen den Referenzfall für jegliche Verläufe der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen von LED Warm Dimming Produkten dar.

Die Glühlampe erreicht im ungedimmten Zustand eine Farbtemperatur von etwas über 2600K. Die untersuchte Halogenlampe in A60-Form beginnt zwischen 2700K und 2800K. Beide Lampen zeigen bis ca. 50% relative, gemessene Helligkeit nur eine Abnahme der Farbtemperatur um 100K bis 200K. Anschließend nimmt die Abnahme stets zu. Ab ca. 5% relativer, gemessener Helligkeit unterschreiten sie die 2000K und liegen bei niedrigster Dimmstufe bei um die 1700K.

¹⁴⁶ Ris, Hans Rudolf; 2015: 84

¹⁴⁷ Ris, Hans Rudolf; 2015: 84

Die Dimmschritte des Busch&Jäger-Dimmers sind relativ gleichmäßig. In den oberen, wie auch in den unteren Dimmbereichen ist ungefähr eine gleiche Anzahl an Abstufungen der gemessenen Helligkeit möglich. Die Lampen gehen auf unter 1% relative, gemessene Helligkeit herunterzudimmen.

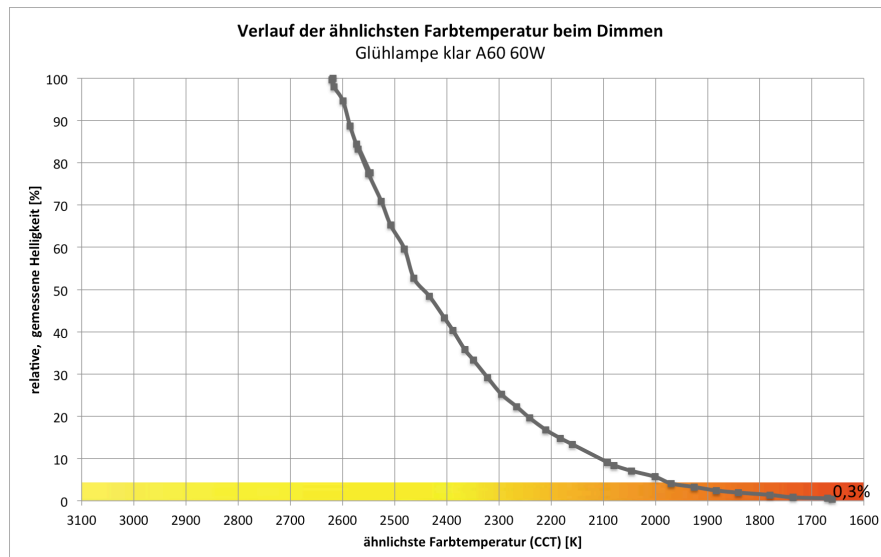


Abbildung 44: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen, Glühlampe klar A60 60W

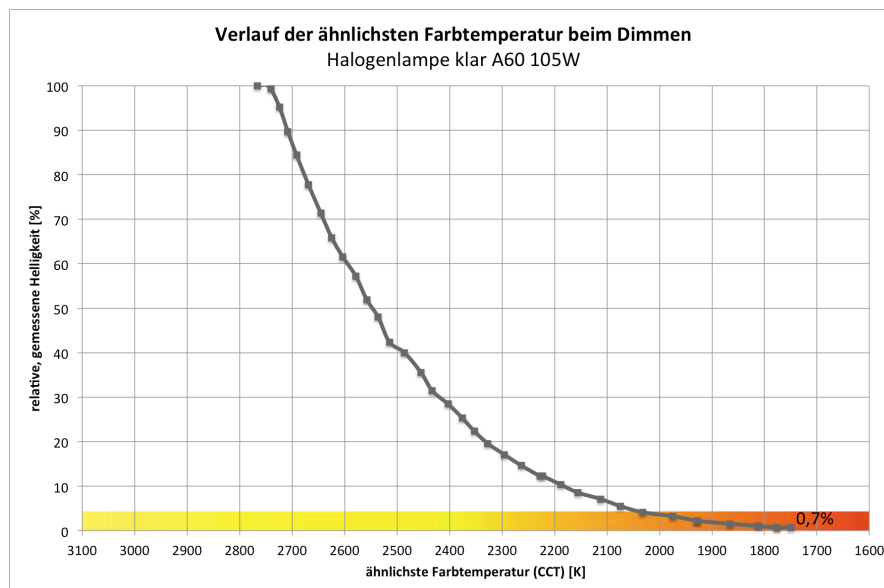


Abbildung 45: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen, Halogenlampe klar A60 105W

Die verschiedenen Halogenlampen in MR16-Form weisen ein ähnliches Verhalten der Kurven auf. In Abbildung 46 wurden die Kurven als direkter Vergleich einmal übereinander gelegt. Die Breite an Farbtemperaturen, die durchlaufen werden können, nehmen zu. Halogenlampen erreichen durch ihre höhere Betriebstemperatur entsprechend höhere Farbtemperaturen.¹⁴⁸ Die IRC-Technologie (Infra-Red-Coating), die von der Lampe IR CC von GE verwendet wird¹⁴⁹, wirkt durch die Verwendung eines halbdurchlässigen Spiegels Infrarotstrahlung zurück auf die Wendel und führt dadurch nochmals zu höheren Betriebstemperaturen.¹⁵⁰ Die ergänzenden MR16-Kurven unterstreichen die großen Farbtemperaturveränderungen im Dimmbereich unter 10% relative, gemessene Helligkeit.

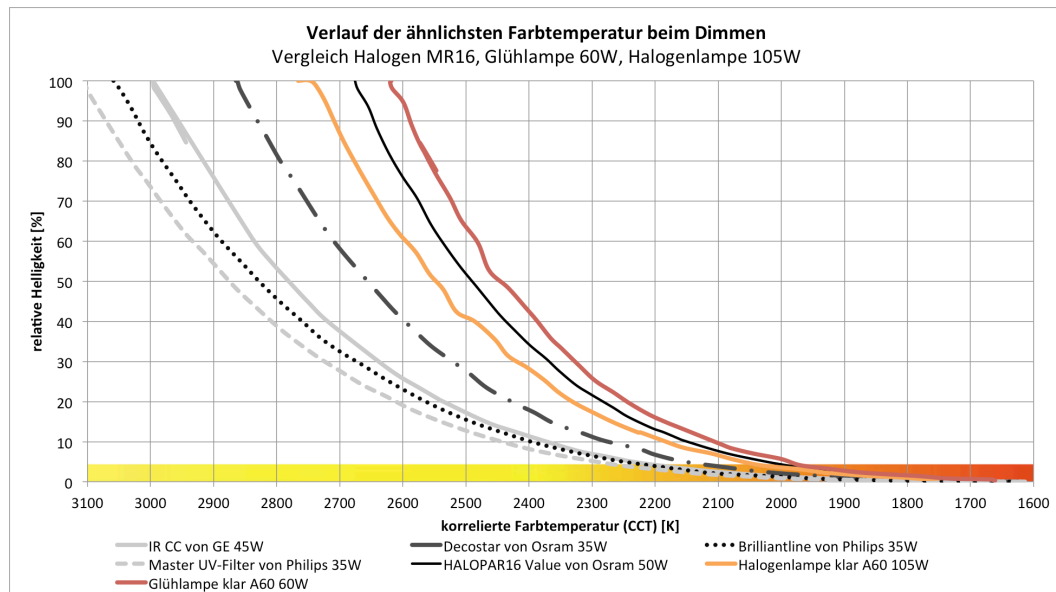


Abbildung 46: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen, Vergleich Halogen MR16, Glühlampe 60W, Halogenlampe 105W

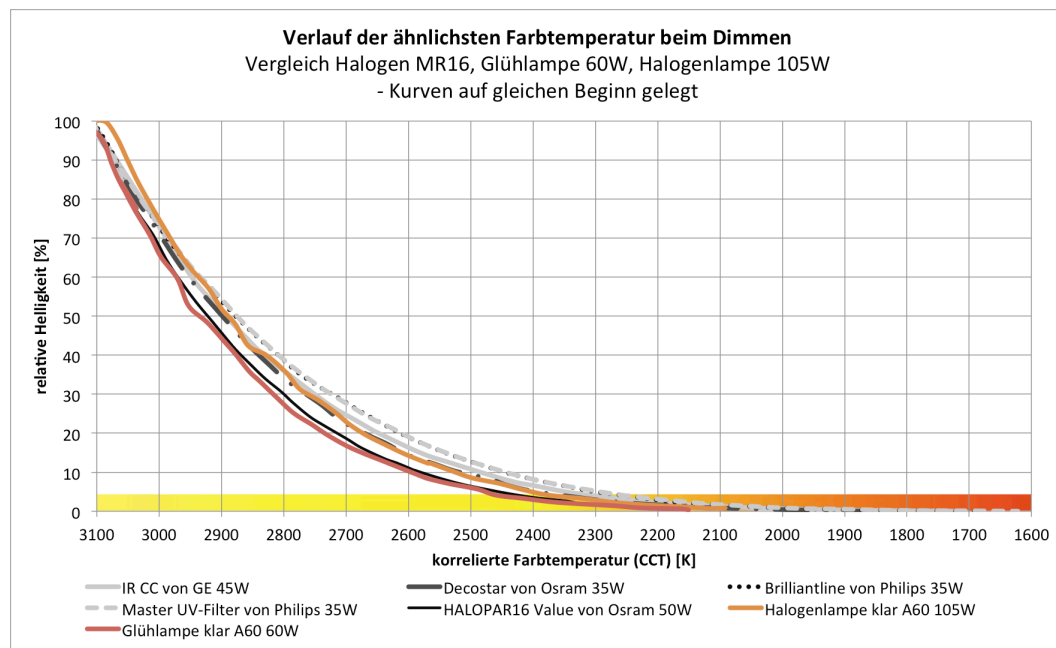


Abbildung 47: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen, Vergleich Halogen MR16, Glühlampe 60W, Halogenlampe 105W, Kurven auf gleichen Beginn gelegt

¹⁴⁸ Ris, Hans Rudolf; 2015: 82

¹⁴⁹ GE; 2010: 1

¹⁵⁰ Ris, Hans Rudolf; 2015: 85

Alle Temperaturstrahler weisen ein sehr ähnliches Verhalten auf. Bis zu 50% relative, gemessene Helligkeit findet nur eine relativ geringe Änderung der Farbtemperatur statt. Im Dimmbereich unter 10% ergeben sich große Farbtemperaturerhöhungen. Die Temperaturstrahler lassen sich alle mit dem Busch&Jäger-Dimmer bis unter 1% relative, gemessene Helligkeit herunterdimmen.

3.3.3. Farbwiedergabeindizes Ra und R9

Bei Berechnung der Farbwiedergabeindizes (Abschnitt 2.3.5.1.) wird die der CCT entsprechenden Referenzlichtart ausgewählt. Die betrachteten Temperaturstrahler besitzen ähnlichste Farbtemperaturen unter 5000K und haben somit den Planckschen Strahler als Referenzlichtart. Da jener Strahler ein idealer Temperaturstrahler ist, müssten sie ihm in ihrer Farbwiedergabe der Testfarben sehr ähneln. In diesem Abschnitt wird betrachtet, wie hoch der allgemeine Farbwiedergabeindex (arithmetische Mittelwertbildung der Farbwiedergabeindizes R1 bis R8) und der Farbwiedergabeindex R9 (Rot gesättigt) von den untersuchten Glüh- und Halogenlampen ist.

Im Idealfall liegen Ra und R9 annähernd bei 100. Für die Darstellung der Ra- und R9-Kurven wird nochmals die Grafik vom Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen genommen, um weiterhin den Bezug zur Dimmung und somit zum Farbtemperaturverlauf herzustellen.

Die Glühlampe erreicht sehr hohe Ra- und R9-Werte (Abb. 48). Die beiden dargestellten Farbwiedergabeindex-Verläufe liegen aufeinander. Die Halogenlampe erreicht für Ra ebenfalls annähernd 100, aber der R9-Wert liegt etwas drunter (Abb. 49). Da die Halogenlampe in der Kurve ihrer spektralen Strahlungsverteilung am Rand der sichtbaren langen Wellenlängen etwas unterhalb der Glühlampe liegt (Abb. 40), kann es sein, dass sie auch gegenüber dem Planckschen Strahler gleicher Farbtemperatur abweicht und sich damit die etwas geringeren Werte für R9 ergeben.

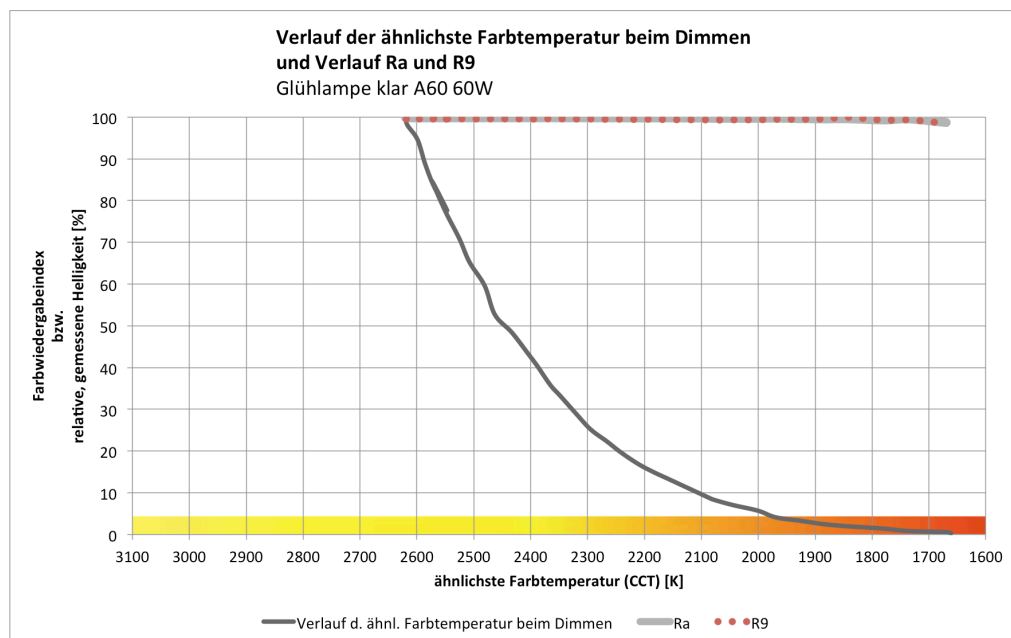


Abbildung 48: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, Glühlampe klar A60 60W

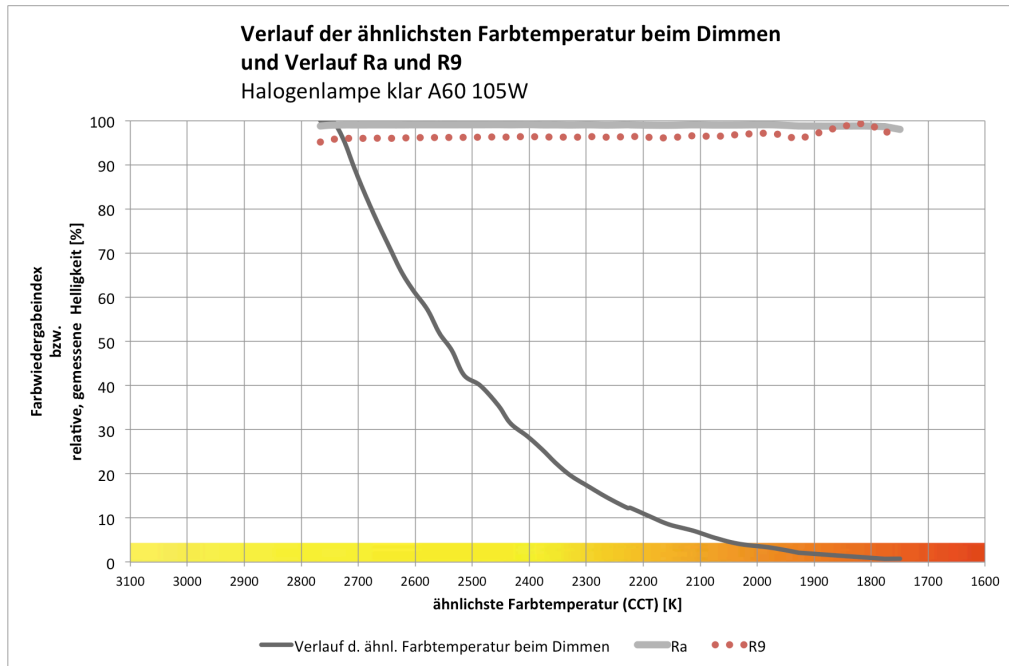


Abbildung 49: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, Halogenlampe klar A60 60W

Die MR16 Lampentypen, die im Abschnitt 3.3.1. über die spektrale Strahlungsverteilung der Temperaturstrahler kaum oder gar keinen Abfall der spektralen Strahlungsdichte über 660nm aufweisen, erlangen ebenfalls hohe R9-Werte.

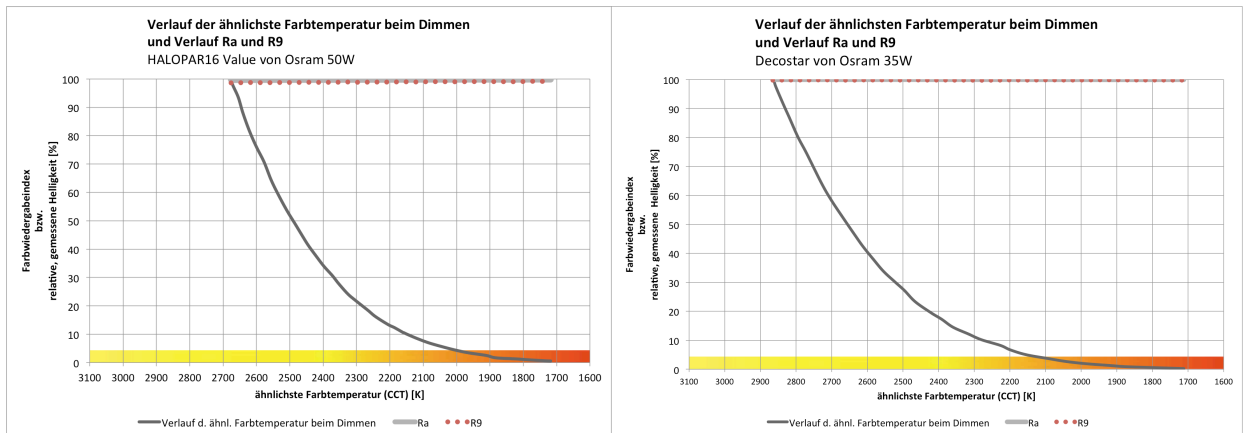


Abb. 50, 51: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, links: HALOPAR16 Value von Osram 50W rechts: Decostar von Osram 35W

Die in der Abbildung 42 dargestellten Kurven, die über 660nm in der spektralen Strahlungsdichte nicht mehr kontinuierlich steigen, weisen auch eine fallende Tendenz des R9-Wertes auf (Abb. 52 bis 54). Der sinkende R9-Index steht in einem direkten Verhältnis zur Abweichung von der kontinuierlichen Steigung. Der Ra-Index liegt weiterhin oberhalb von 95.

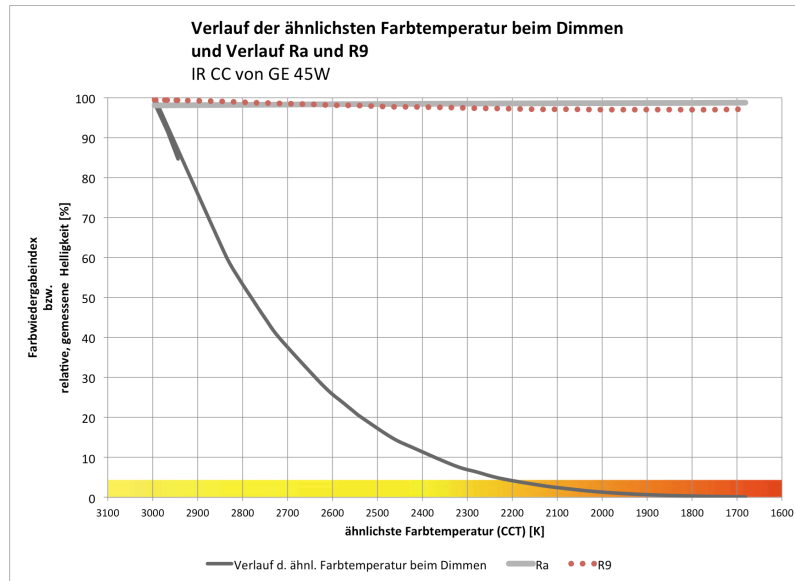


Abbildung 52: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, IR CC von GE 45W

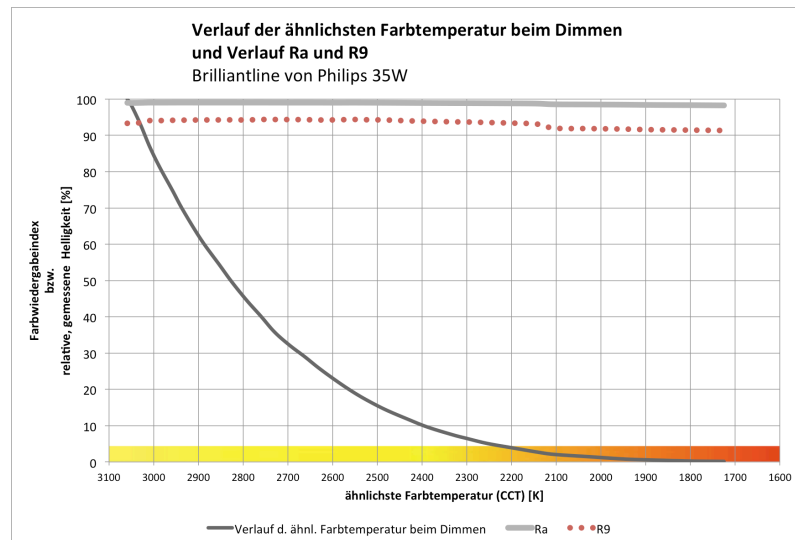


Abbildung 53: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, Brilliantline von Philips 35W

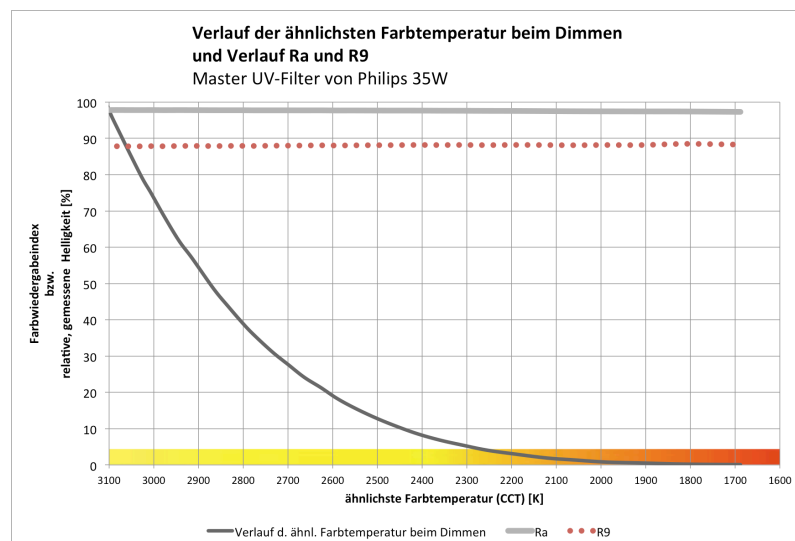


Abbildung 54: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, Master UV-Filter von Philips 35W

Weicht das Spektrum einer MR16-Halogenlampe beispielsweise aufgrund eines verwendeten Kaltspiegels von der ansonsten kontinuierlich steigenden spektralen Strahlungsdichte im Bereich der langen Wellenlängen ab, schlägt sich das unmittelbar in einem geringeren R9-Index nieder.

Alle untersuchten Temperaturstrahler besitzen einen hohen Ra-Index von >95 und R9-Werte >85. Die Verläufe von Ra und R9 sind über den gesamten Dimmvorgang hinweg relativ konstant.

3.3.4. Farbortverlauf und SDCM

Mit diesem Abschnitt geht die Betrachtung über in die von der CIE für Lichtquellen empfohlenen gleichabständigen $u'v'$ -Farbtafel.¹⁵¹ Hier soll betrachtet werden, inwiefern der Farbortverlauf der untersuchten Temperaturstrahler auf dem Planckschen Kurvenzug liegt. Wie auch in den vorherigen Abschnitten erwähnt, stellt der Plancksche Kurvenzug die Referenz für die ähnlichsten Farbtemperaturen unter 5000K dar. Zusätzlich wird die SDCM von einer immer individuell ausgewählten Farbort der Messreihe ermittelt. Damit soll gemäß der Farbortdifferenz-Skalierung nach dem ANSI Binning-Standard (Abschnitt 2.3.4.3.) eine Aussage über die wahrgenommene Abweichung zur BBC beschrieben werden. Der Grund der hier nur näherungsweise vorliegenden Berechnung des $\Delta u'v'$ ist in demselben Abschnitt erläutert.

Werden erneut zuerst die Glüh- und Halogenlampe in A60-Form betrachtet (Abb. 55, 56), zeigt sich, dass die Farborten der spektralen Strahlungsverteilungen annähernd auf dem Planckschen Kurvenzug verlaufen. Der Farbortverlauf der Glühlampe liegt gering über der BBC (Black Body Curve, Planckscher Kurvenzug) und der Farbortverlauf der Halogenlampe gering darunter. Die Abweichungen bei beiden Kurven unterhalb von 1900K müssen Messfehler sein, da die Temperaturstrahler im Durchschnitt ein gleichmäßiges und damit vorhersehbares Verhalten besitzen.

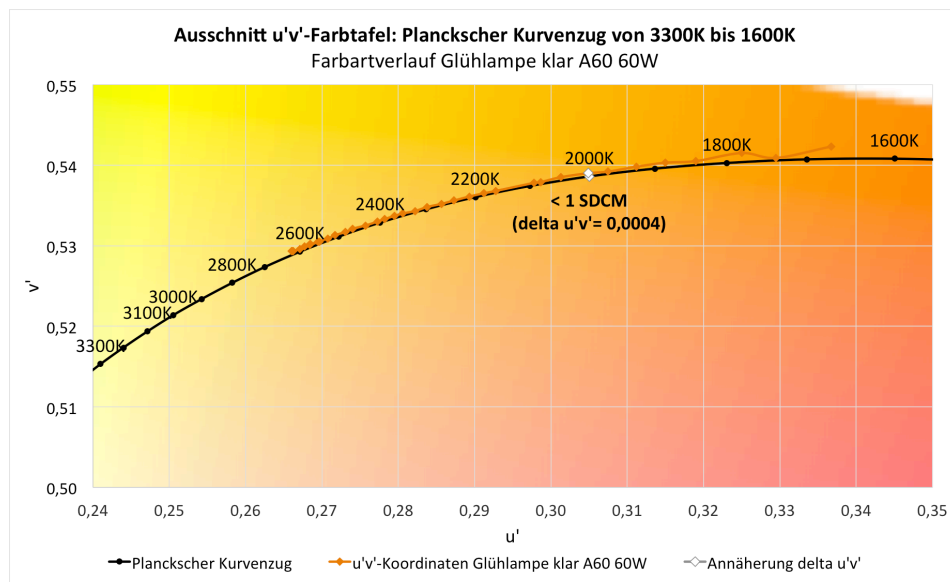


Abbildung 55: Ausschnitt $u'v'$ -Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Farbortverlauf Glühlampe klar A60 60W

¹⁵¹ CIE; TN 001:2014; 2014: 1

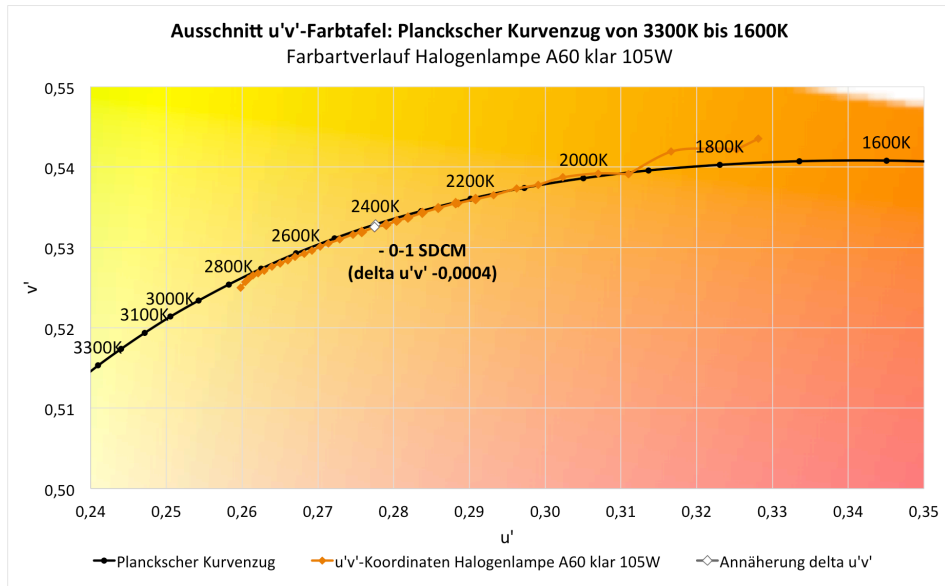


Abbildung 56: Ausschnitt u'v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Farbortverlauf Halogenlampe klar A60 105W

Die HALOPAR16 Value und Decostar von Osram sind den Spektren der Glüh- und Halogenlampe in A60-Form ähnlich und liegen ebenfalls sehr nah an der BBC (Abb. 57, 58). Die Decostar liegt sogar abschnittsweise direkt auf der BBC. Die Abweichung unterhalb von 1700K lässt sich auf die CCT-Formel, die nur in einem begrenzten CCT-Bereich von 1700K bis 17000K relativ zuverlässige Ergebnisse erzielt, zurückführen.

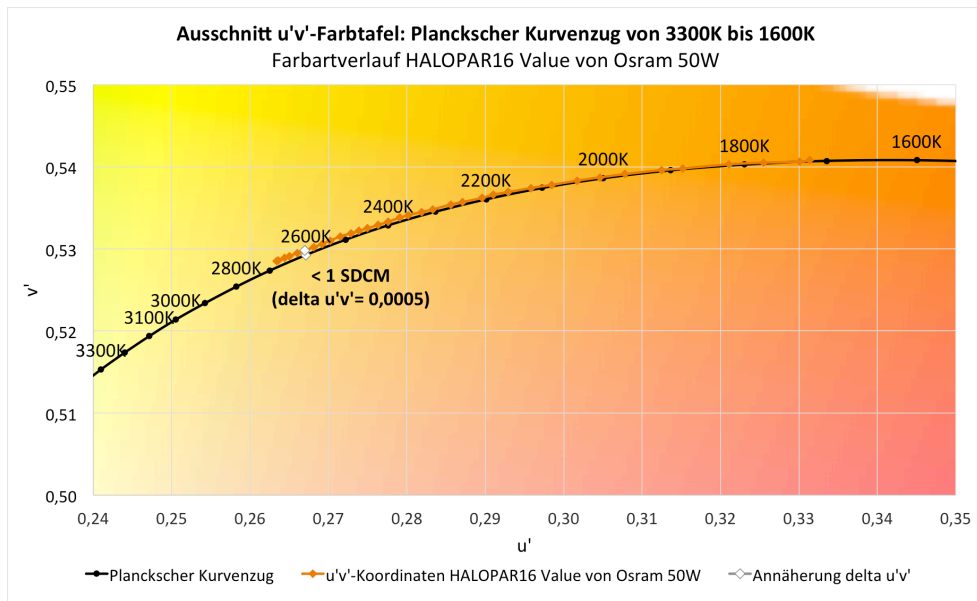


Abbildung 57: Ausschnitt u'v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Farbortverlauf HALOPAR16 Value von Osram 50W

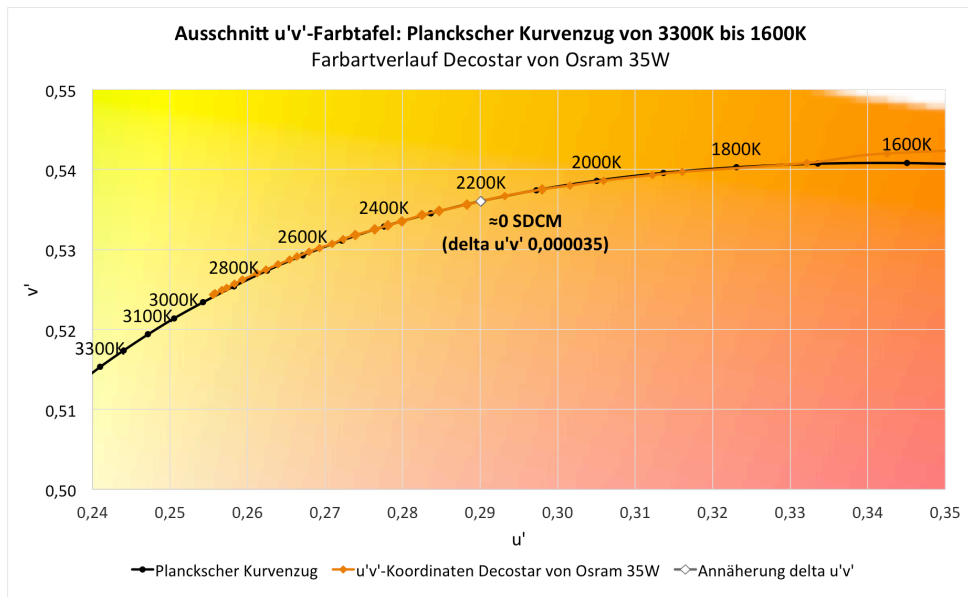


Abbildung 58: Ausschnitt u'v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Farbartverlauf Decostar von Osram 35W

Die Lampe IR CC von GE zeigt bei den höheren ähnlichsten Farbtemperaturen eine große Abweichung von etwa 4 SDCM zum Planckschen Kurvenzug (Abb. 59). Diese wahrnehmbare Abweichung lässt sich eventuell anhand der Ausbeulung der spektralen Strahlungsverteilung bei 560nm (Abb. 60) erklären. Bei 560nm liegt auch nahezu das Maximum der $\bar{y}(\lambda)$ – Normspektralkurve (Abb. 11). Für die Berechnung der Normfarbwerte X, Y und Z werden die Normspektralkurven jeweils mit der spektralen Strahlungsverteilung des Selbstleuchters gewichtet (Abschnitt 2.3.4.). Im Vergleich zum spektralen Strahlungsverlauf der Glühbirne führt die hier vorliegende Gewichtung der $\bar{y}(\lambda)$ – Normspektralkurve über die Integralrechnung zu einem größeren Normfarbwert Y. Dadurch ergeben sich andere Farbwertanteile x und y und damit andere u'v'-Farbartkoordinaten.

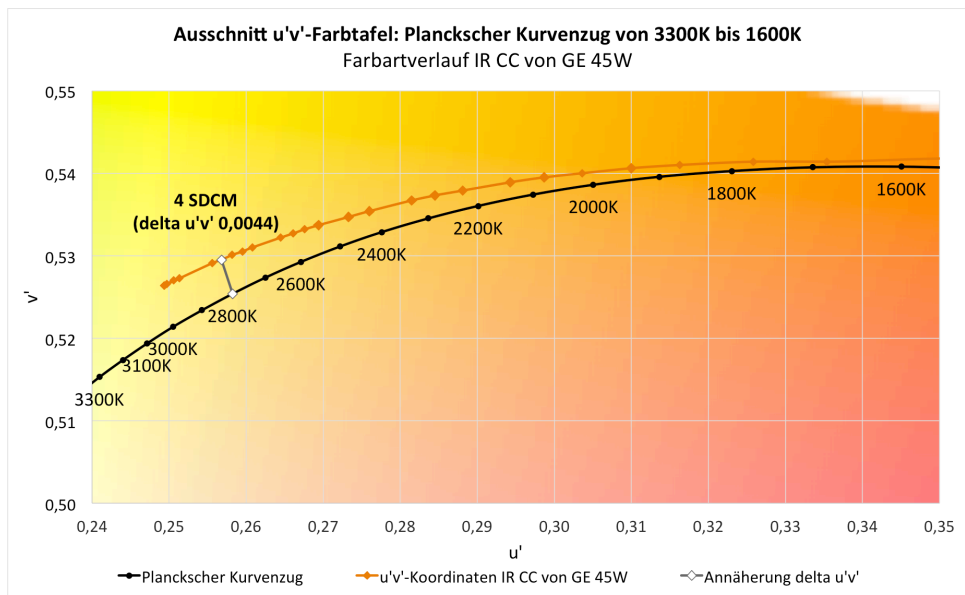


Abbildung 59: Ausschnitt u'v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Farbartverlauf IR CC von unbekanntem Hersteller 45W

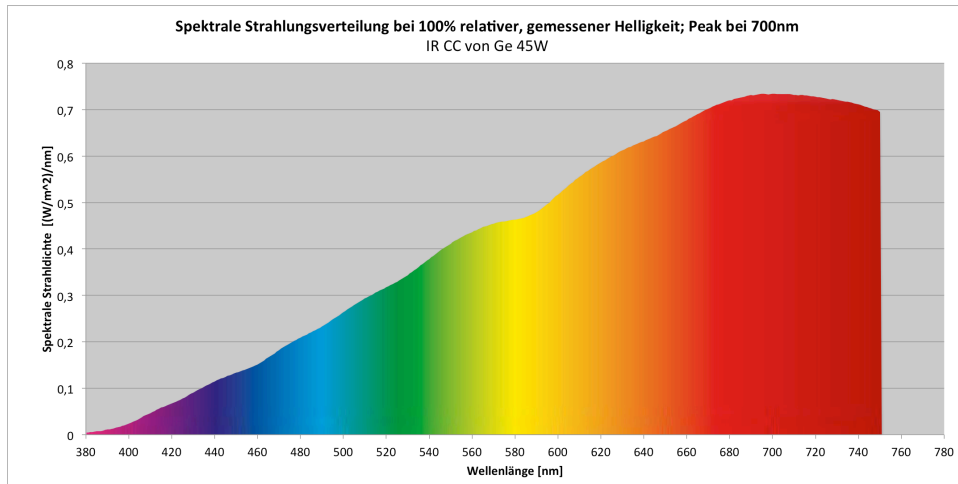


Abbildung 60: Spektrale Strahlungsverteilung bei 100% relativer, gemessener Helligkeit, IR CC von unbekanntem Hersteller 45W

Die Lampen Brilliantline und Master UV-Filter von Philips greifen wieder den Verlauf der BBC auf. Während die Brilliantline nahezu direkt auf der BBC liegt, hat die Master UV-Filter einen relativ konstanten Abstand zur BBC. Das könnte am fehlenden Anteil der langen Wellenlängen liegen (Abb. 42). Die $\bar{x}(\lambda)$ -Normspektralkurve wird dadurch schwächer gewichtet und erlangt gegenüber z.B. der Decostar von Osram einen geringeren X-Normfarbwert.

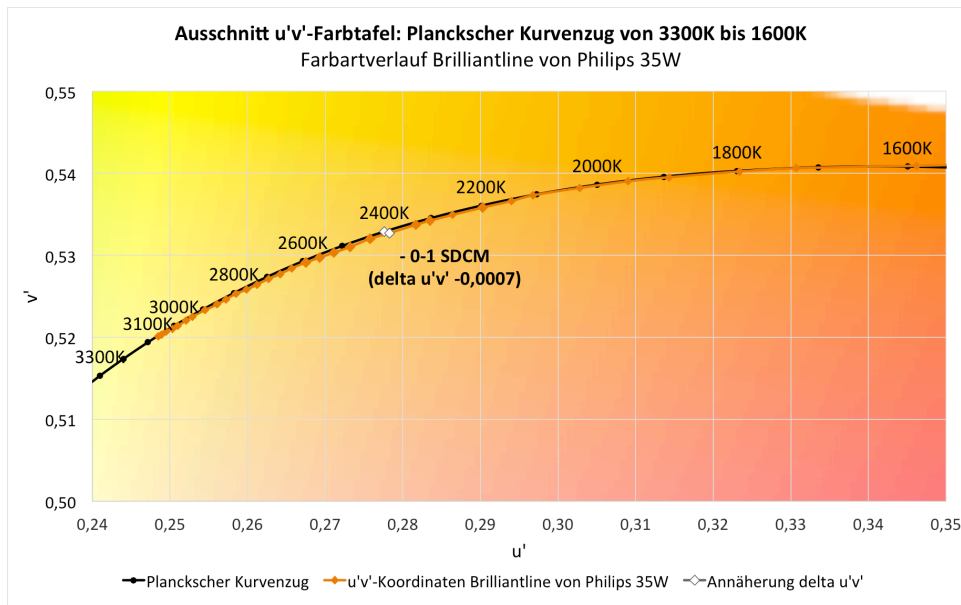


Abbildung 61: Ausschnitt $u'v'$ -Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Farbartverlauf Brilliantline von Philips 35W

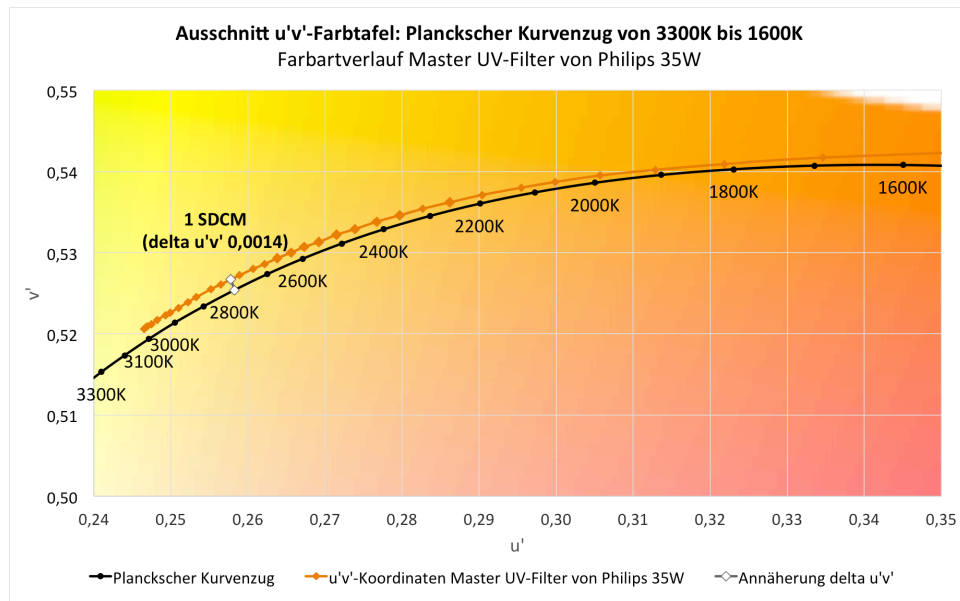


Abbildung 62: Ausschnitt u'v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Farbverlauf Master UV-Filter von Philips 35W

Durchschnittlich liegen die untersuchten Temperaturstrahler über den gesamten Dimmverlauf hinweg auf oder unmittelbar neben dem Planckschen Kurvenzug (entsprechend ≤ 1 SDCM). Diese Abstände führen zu nicht wahrnehmbaren Abweichungen. Größere Abweichungen lassen sich mit der spektralen Strahlungsverteilung erklären und lagen bei der Lampe IR CC bei einem Maximalwert von 4 SDCM in der Nähe der höheren ähnlichsten Farbtemperaturen. Diese Abweichung ist sichtbar, aber sie führt nicht wie bei 6 SDCM zu einer inakzeptabel wahrnehmbaren Abweichung.

3.3.5. Wahrgenommene Helligkeit L^*

Die ermittelte wahrgenommene Helligkeit bezieht sich in dieser Auswertung nur auf den in Abschnitt 2.4.2. beschriebenen Betrachtungsfall. Es wird die wahrgenommene Helligkeit bei niedrigster Dimmstufe betrachtet.

Die Glüh- und Halogenlampe lassen sich ebenfalls wie die MR16 Halogenlampen relativ weit herunterdimmen. Ihre wahrgenommene Helligkeit L^* ist entsprechend klein. Die Grafiken sollen durch ihre Maßstäbe ein Gefühl für die Relevanz des unteren Dimmbereiches bezogen auf die wahrgenommene Helligkeit geben. Die L^* -Kurven sind vom Verlauf jedoch immer dieselben. Die L^* -Werte der MR16 Halogenlampen werden aus diesem Grund ohne Grafiken genannt.

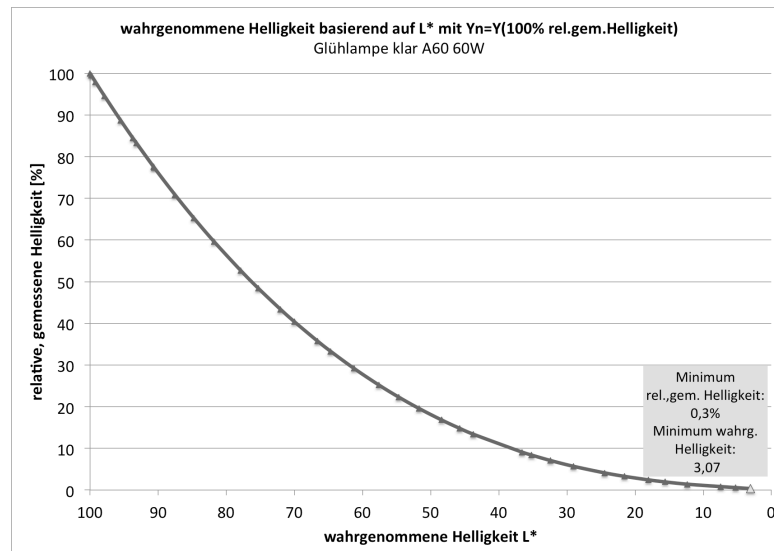


Abbildung 63: wahrgenommene Helligkeit basierend auf L* mit $Y_n=Y(100\% \text{ relative, gemessene Helligkeit})$, Glühlampe klar A60 60W

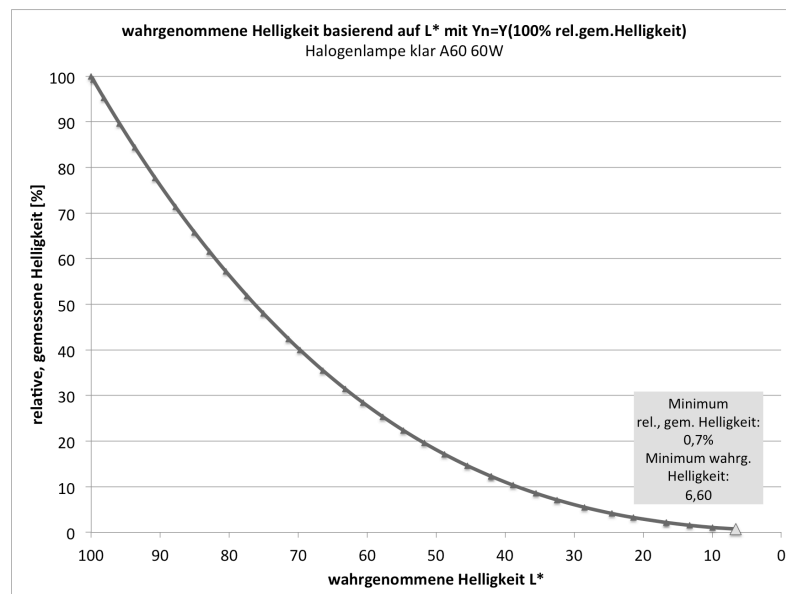


Abbildung 64: wahrgenommene Helligkeit basierend auf L* mit $Y_n=Y(100\% \text{ relative, gemessene Helligkeit})$, Halogenlampe klar A60 105W

- | | |
|-----------------------------------|---|
| HALOPAR16 Value von Osram 50W: | relative, gemessene Helligkeit = 0,58%, $L^* = 5,11$ |
| Decostar von Osram 35W: | relative, gemessene Helligkeit = 0,01%, $L^* = 0,09$ |
| IR CC von GE 45W: | relative, gemessene Helligkeit = 0,001%; $L^* = 0,01$ |
| Brilliantline von Philips 35W: | relative, gemessene Helligkeit = 0,014%, $L^* = 0,12$ |
| Master UV-Filter von Philips 35W: | relative, gemessene Helligkeit = 0,004%, $L^* = 0,04$ |

Die Temperaturstrahler sind mit dem Busch&Jäger Dimmer weit herunterdimmbare und erreichen somit wahrgenommene Helligkeiten von 0,01. Die Halogenlampe, die sich auf eine relative, gemessene Helligkeit von 0,7% herunterdimmen lässt, erreicht dabei jedoch einen L^* -Wert von 6,60. Es gibt für diesen Wert keine semantische Skalierung, aber da die LED Warm Dimming Produkte mit den Temperaturstrahlern verglichen werden, sollte demnach eine wahrgenommene Helligkeit von 6,60 als gut und unter 1 als sehr gut bewertet werden.

3.3.6. Zusammenfassung: Ergebnisse der Temperaturstrahler

Die untersuchten Temperaturstrahler besitzen in Annäherung die Eigenschaften des Planckschen Strahlers. Ihre Spektren entsprechen prinzipiell diesem Strahler solange keine Optimierungsprozesse, wie z.B. der Kaltspiegel, verwendet werden.

Durch die hohe Korrelation der Farbartverläufe mit dem Planckschen Kurvenzug in der u'v'-Farbtafel wird der Plancksche Strahler in seiner Funktion als Referenzlichtart und Referenz-Farbartverlauf für die nachfolgende Gegenüberstellung der LED Warm Dimming Produkte zu den Temperaturstrahlern herausgestellt.

3.4. LED Warm Dimming Produkte: Retrofits

Mit den Retrofits soll eine direkte Alternative zu den Glüh- und Halogenlampen geboten werden. Sie besitzen die gleichen Fassungen und sollen so in bestehende Leuchten eingesetzt werden können. Für die Dimmbarkeit ist jedoch ein passender Dimmer, der die niedrigeren Lastarten (z.B. Philips E27 A60 Dim Tone: 8W statt 60W) unterstützt, notwendig. Der hier verwendete Busch&Jäger Dimmer ist auf Retrofits abgestimmt und kann ebenso die Temperaturstrahler dimmen.

Der erste Teil der LED Warm Dimming Produkte wird durch die zu untersuchenden Eigenschaften betrachtet und mit den Ergebnissen der Temperaturstrahler aus dem Abschnitt 3.3. verglichen.

Wenn im Folgenden von Retrofits gesprochen wird, dann sind stets die LED Warm Dimming Retrofits gemeint.

3.4.1. Spektrale Strahlungsverteilung

Die meistens kontinuierlich steigenden spektralen Strahlungsverteilungen der Temperaturstrahler wurden vorbereitend für die Betrachtung der Spektren von LED Warm Dimming Retrofits in Abschnitt 3.3.1. bearbeitet. Hier werden analog zu den Untersuchungs-Abschnitten über die Temperaturstrahler ebenfalls zuerst die Lampen mit Birnenform (A60 oder ein anderer Durchmesser) und anschließend die MR16 Produkte dargestellt.

Drei von vier untersuchten Retrofits in A60 bzw. A65 zeigen ähnliche spektrale Strahlungsverteilungen. Wie bereits im Abschnitt über die Temperaturstrahler wurden die Spektren bei 560nm auf 1 normiert, damit sie in einer Abbildung verglichen werden können. Die Spektren der Megaman-, Osram- und Philips-Produkte besitzen ein Maximum bei ca. 610nm (Abb. 65). Oberhalb von 610nm fällt die Strahlungsdichte stark ab, sodass der als Rot wahrgenommene Wellenlängenbereich hier kaum spektrale Anteile besitzt. Unterhalb von 610nm sinkt die Strahlungsdichte ebenfalls, wobei im Bereich der $\bar{y}(\lambda)$ -Normspektralkurve (Abschnitt 2.3.3.1.) noch ungefähr die halbe Intensität der Strahlungsdichte vorliegt. Bei allen drei Spektren tritt noch ein Peak relativ geringer Intensität im als Blau wahrgenommenen Wellenlängenbereich (ca. bei 450nm) auf.

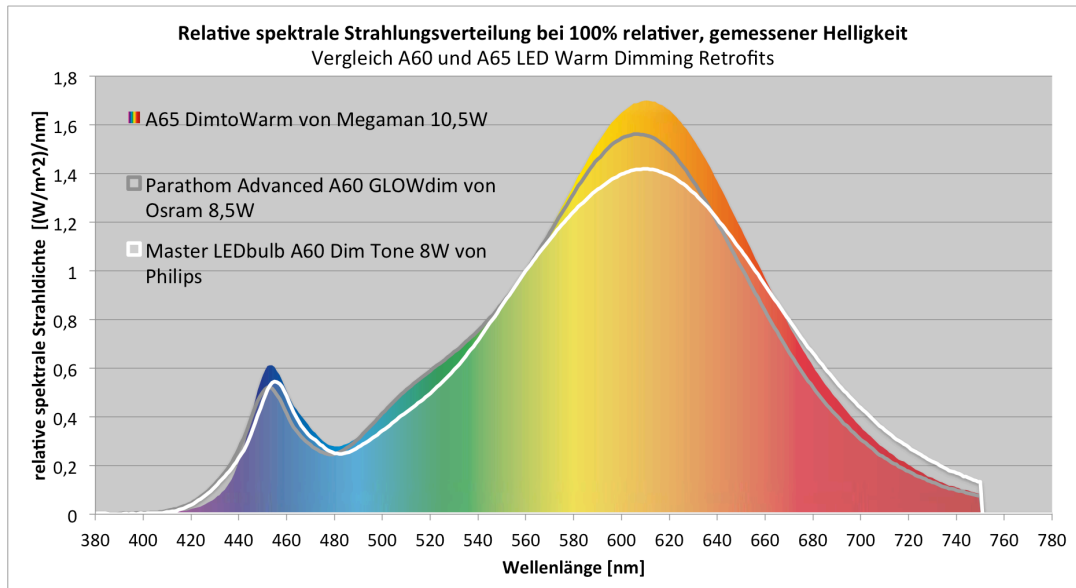


Abbildung 65: Relative spektrale Strahlungsverteilung bei 100% relativer, gemessener Helligkeit, Vergleich A60 und A65 LED Warm Dimming Retrofits

Bei unterster Dimmstufe führen die teils sehr geringen vorliegenden Beleuchtungsstärken dazu, dass der Detektor durch Dunkelstromrauschen kein so klares Bild der spektralen Strahlungsverteilung mehr liefert. Die Tendenzen lassen sich hier dennoch erkennen und genügen für die grobe Darstellung des veränderten Spektrums bei niedrigster Dimmstufe.

Das A65 Retrofit von Megaman und das A65 Retrofit von Osram korrelieren weiter. Beim A60 Retrofit von Philips liegt fast nur noch Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 550nm und 650nm vor. Die als Rot und Blau empfundenen Wellenlängen liegen kaum bis gar nicht mehr vor.

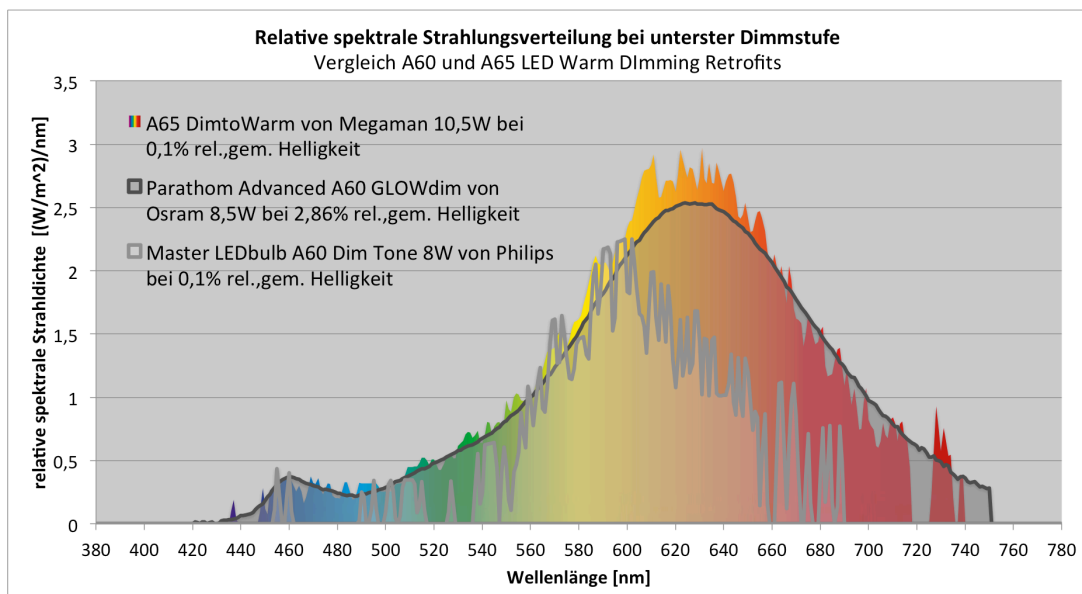


Abbildung 66: Relative spektrale Strahlungsverteilung bei unterster Dimmstufe, Vergleich A60 und A65 LED Warm Dimming Retrofits

Ledon bringt mit seinem A65 Retrofit eine andere spektrale Strahlungsverteilung in die Reihe der untersuchten Produkte ein (Abb. 67). Das Maximum liegt zwar ebenfalls nahe der 610nm (hier bei 620nm), aber der Verlauf entspricht mehr einem Peak mit einer Halbwertsbreite (Abschnitt 2.5.1.1.) von gerade einmal ca. 20nm. Oberhalb von 640nm laufen die spektralen Anteile bereits gegen Null. Die Wellenlängenbereiche der roten Farbempfindung sind kaum enthalten. Unterhalb der 620nm fällt die spektrale Strahlungsintensität auf ein Drittel ab. Die als Grün

bis Gelb wahrgenommenen Wellenlängen liegen in diesem Verhältnis vor und zeigen einen weiteren kleinen Peak bei 590nm. Anschließend gehen die Anteile ebenfalls gegen Null, wobei wie bei den Spektren zuvor ein relativ kleiner Peak bei 450nm vorliegt. Wird das Produkt gedimmt, sinkt der dominante Peak bei 620nm mehr auf das Niveau des Peaks bei 590nm. Die unterste Dimmstufe liegt noch bei 20,83% relativer, gemessener Helligkeit. Weshalb dieses Produkt nicht so weit herunterzudimmen war, wird im nächsten Abschnitt erläutert.

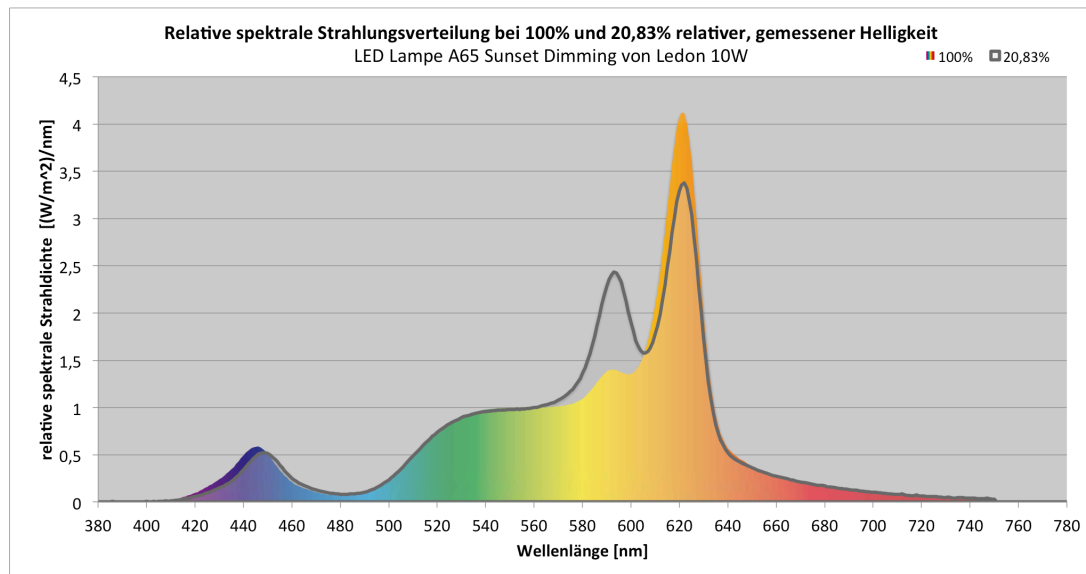


Abbildung 67: Relative spektrale Strahlungsverteilung bei 100% und 20,83% relativer, gemessener Helligkeit, LED Lampe A65 Sunset Dimming von Ledon 10W

Die Spektren der MR16 Retrofits sind denen der A60 und A65 Retrofits sehr ähnlich (Abb. 65). Im Durchschnitt sind als Abweichungen die relativ stärkeren Intensitäten des blauen Peaks bei 450nm und des Wellenlängenbereichs zwischen 500nm und 580nm zu nennen. Das MR16 Retrofit von Ledon hat im Vergleich zu den anderen MR16 Retrofits sein Maximum etwas weiter zu den langen Wellenlängen hin und damit auch etwas höhere spektrale Strahlungsverteilungen im Rot empfundenen Bereich.

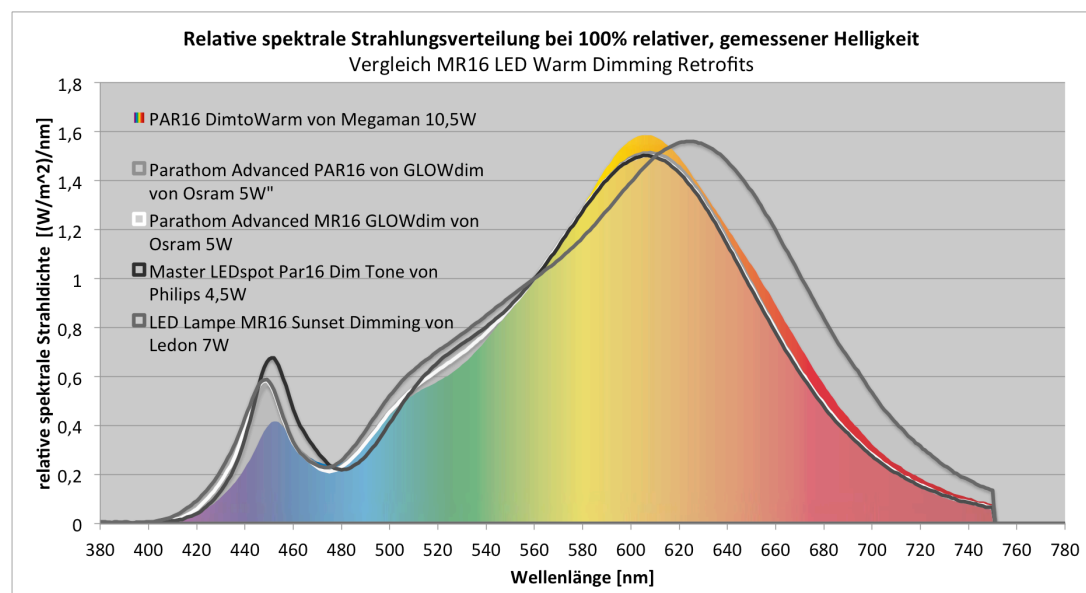


Abbildung 68: Relative spektrale Strahlungsverteilung bei 100% relativer, gemessener Helligkeit, Vergleich MR16 LED Warm Dimming Retrofits

Die Spektren bei unterster Dimmstufe korrelieren näherungsweise ebenfalls untereinander. Auch hier wird der Peak im als Blau empfundenen Wellenlängenbereich und Anteile im als

Grün-Gelb empfundenen Wellenlängenbereich reduziert. Die Maxima der spektralen Strahlungsverteilung verschieben sich etwas unterschiedlich, aber tendenziell zu den längeren Wellenlängen hin.

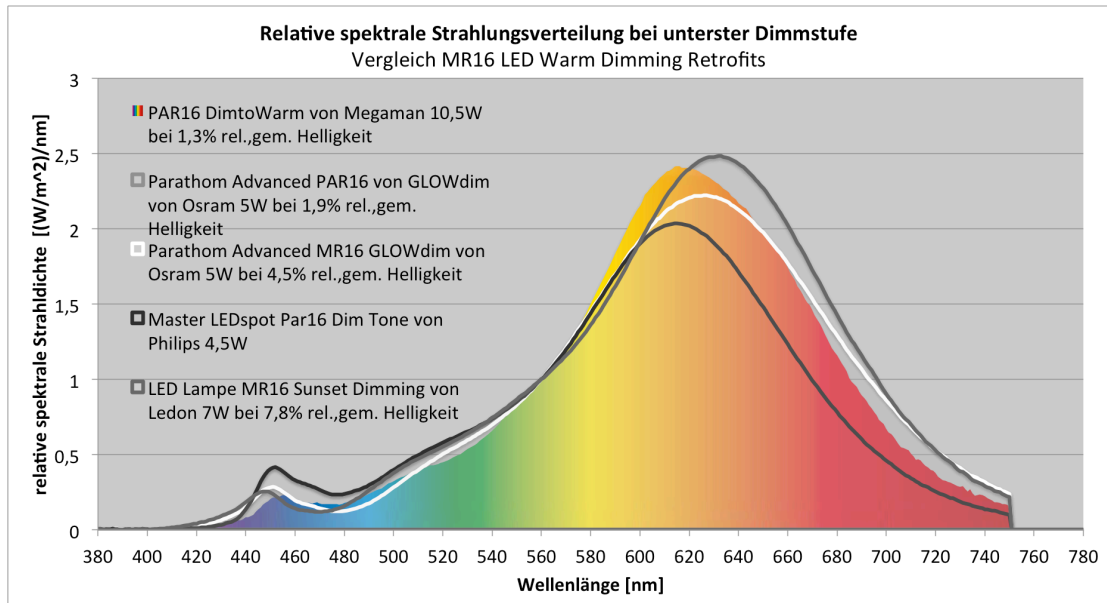


Abbildung 69: Relative spektrale Strahlungsverteilung bei unterster Dimmstufe, Vergleich MR16 LED Warm Dimming Retrofits

Die Spektren der LED Warm Dimming Retrofits besitzen keine kontinuierlich zu den langen Wellenlängen hin steigende spektrale Strahlungsverteilung (Abb. 70). Ihr Maximum liegt stattdessen bei um die 600nm bis 630nm (Abb. 68, 69). Danach fällt die Verteilungskurve ab, sodass die bei den Temperaturstrahlern am stärksten ausgeprägten Anteile des als Rot empfundenen Wellenlängenbereiches hier nur sehr niedrig ausgeprägt sind. Bereiche der als Grün bis Gelb empfundenen Wellenlängen besitzen etwa dieselben Anteile. Der Peak bei 450nm unterbricht die ansonsten zu den kurzen Wellenlängen hin bereits ab 480nm gegen Null verlaufende Verteilung. Er bleibt über den gesamten Dimmverlauf hinweg bestehen.

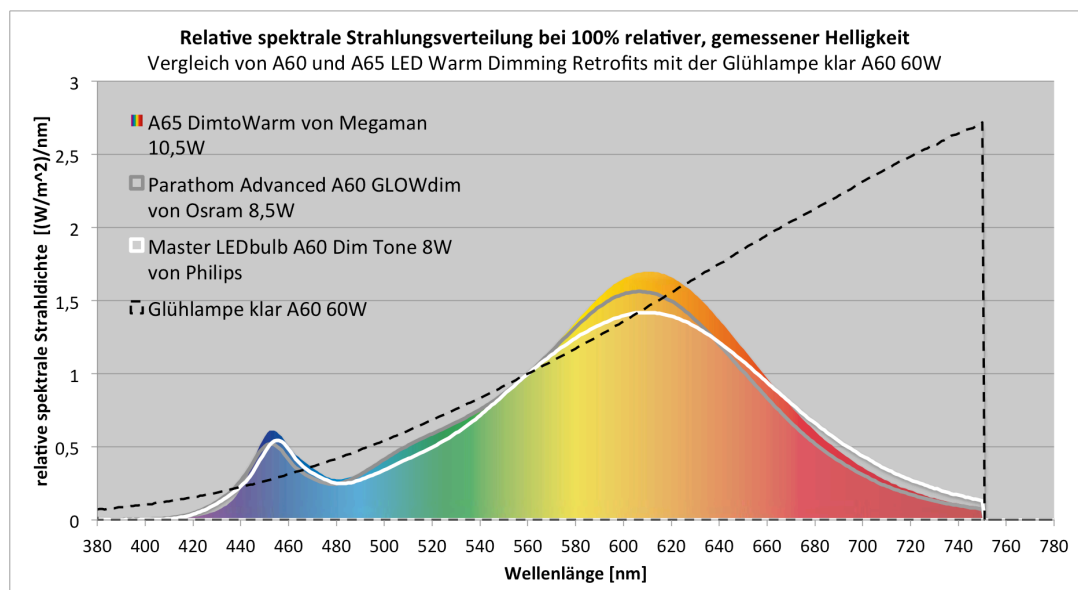


Abbildung 70: Relative spektrale Strahlungsverteilung bei 100% relativer, gemessener Helligkeit, Vergleich von A60 und A65 LED Warm Dimming Retrofits mit der Glühlampe klar A60 60W

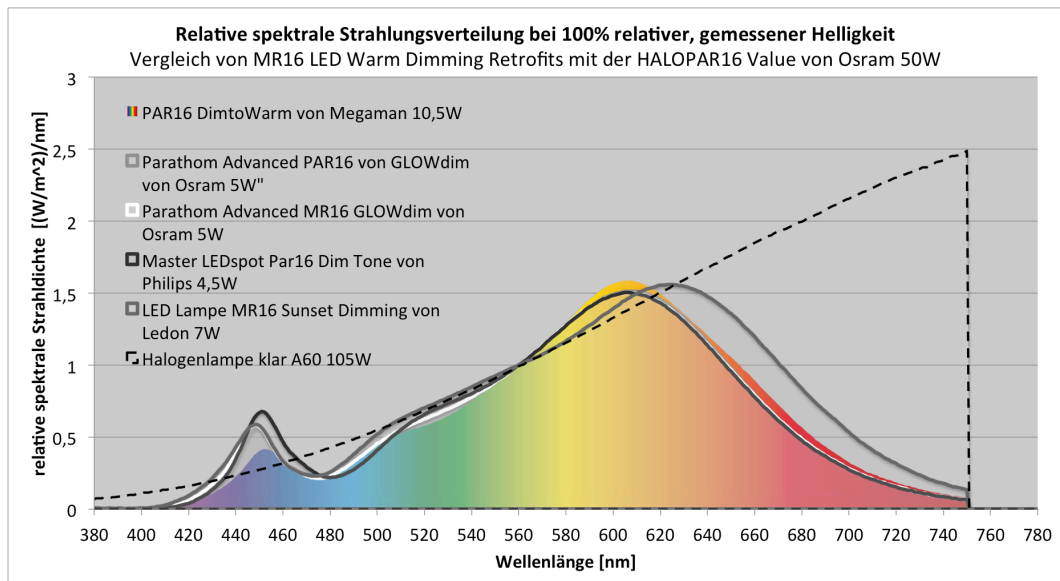


Abbildung 71: Relative spektrale Strahlungsverteilung bei 100% relativer, gemessener Helligkeit, Vergleich von MR16 LED Warm Dimming Retrofits mit der HALOPAR16 von Osram 50W

Die LED Warm Dimming Retrofits besitzen ein von den Temperaturstrahlern verschiedenes Spektrum. Die Auswirkungen der Spektren auf die farbmtrischen Eigenschaften werden in den folgenden Abschnitten genauer betrachtet.

3.4.2. Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen

Um den Effekt des Warm Dimming zu erklären, verwenden Hersteller gelegentlich die Darstellung der ähnlichsten Farbtemperaturverläufe beim Dimmen. Die im Abschnitt 3.3.2. vorgestellten Farbtemperaturverläufe der Temperaturstrahler finden sich exemplarisch in den nächsten Abbildungen als gepunktete Kurven wieder. Die relative, gemessene Helligkeit bei unterster Dimmstufe wird auch angegeben, um bereits zu sehen, wie weit sich die Produkte herunterdimmen lassen. Die Relevanz dieser Angabe wird im Abschnitt 3.4.4. über die wahrgenommene Helligkeit L^* genauer untersucht.

Zur Gegenüberstellung der A60 und A65 LED Warm Dimming Retrofits wurde der ähnlichste Farbtemperaturverlauf der Glüh- und Halogenlampe in A60-Form in die Abbildung 72 mit eingebunden. Je nachdem, mit welcher CCT (Correlated Colour Temperature) die Retrofits starten, korrelieren sie mehr mit der Glühlampe (Beginn bei 2618K) oder der Halogenlampe (Beginn bei 2766K). Bis 30% relative, gemessene Helligkeit deckt sich der Verlauf ihrer CCTs mit denen der Temperaturstrahler. Darunter weicht der Verlauf innerhalb weniger Dimmstufen deutlich ab. Die Dimmstufen entsprechen den aufgenommenen Messpunkten und sind den Dreiecksmarkierungen auf der Kurve zu entnehmen. Im Vergleich zum Temperaturstrahler sinkt die CCT der Retrofits unterhalb von 30% relativer, gemessener Helligkeit deutlich, aber ihre relative, gemessene Helligkeit nicht. Unterhalb von 15% relativer, gemessener Helligkeit verändern das Philips und das Osram Retrofit kaum noch ihre CCT, aber werden stetig heruntergedimmt. Mit anderen Worten verändert sich die Lichtfarbe der Retrofits in den letzten 15% relativer, gemessener Helligkeit nur geringfügig. Mit der letzten Dimmstufe ergibt sich abschließend doch noch ein relativ großer CCT-Sprung hin zu den wärmeren Farbtemperaturen. Diese Unstetigkeiten der ähnlichsten Farbtemperaturveränderungen müssten in visuellen Experimenten daraufhin geprüft werden, ob der Nutzer sie als unangenehm und ebenfalls unstetig empfindet.

Das A65 Retrofit von Megaman schließt im Vergleich zur Glühlampe am Besten ab und lässt sich zudem auch weit herunterdimmen.

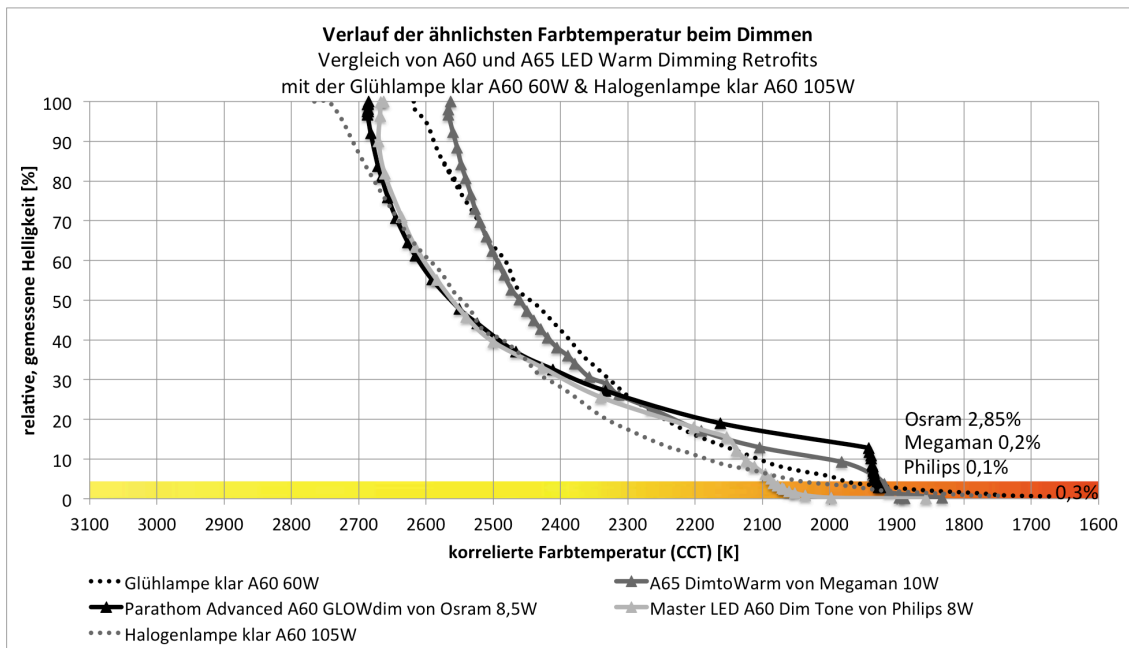


Abbildung 72: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen, Vergleich von A60 und A65 LED Warm Dimming Retrofits mit der Glühlampe klar A60 60W

Anhand des A65 Retrofits von Ledon wird deutlich, wie wichtig es ist, einen kompatiblen Dimmer zu verwenden. Zwei der drei untersuchten LED Warm Dimming Produkte von Ledon sind mit dem Busch&Jäger Dimmer regulierbar. Dort taucht der verwendete Dimmer in der Kompatibilitätsliste auf.¹⁵² Beim mittlerweile von der Homepage genommenen A65 Retrofit hätte ein anderer als der genannte Busch&Jäger Dimmer verwendet werden müssen. Die Abbildung 73 dient somit als Beispiel für einen nicht vorhandenen Warm Dimming Effekt. Die ähnlichste Farbtemperatur bleibt über den Dimmverlauf hinweg relativ konstant bei um die 2450K. Zusätzlich lässt sich das Retrofit auch nur bis 20% relative, gemessene Helligkeit herunterdimmen.

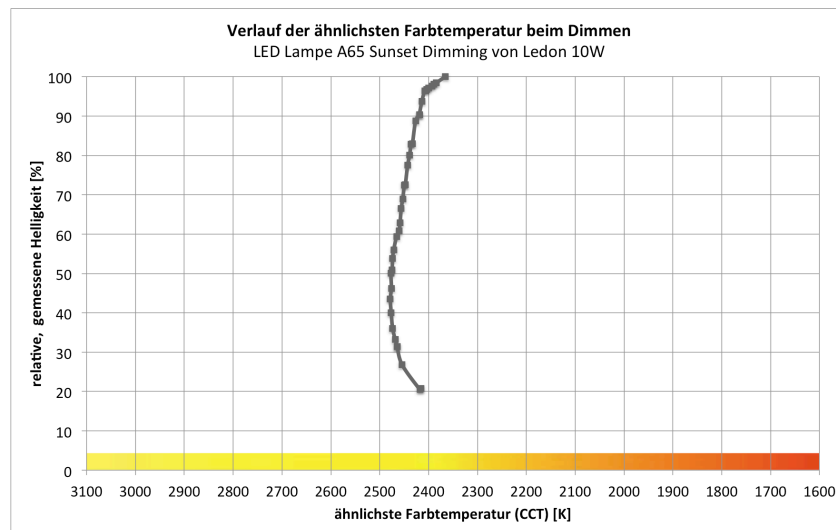


Abbildung 73: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen, LED Lampe A65 Sunset Dimming von Ledon 10W

Zur Gegenüberstellung der MR16 Retrofits mit einem Temperaturstrahlerergebnis wurde die Lampe Decostar von Osram ausgewählt. Es sei hier erwähnt, dass dies kein absoluter Vergleich sein soll. Die anderen CCT Verläufe der MR16 Temperaturstrahler, die im Abschnitt

3.3.2. vorgestellt wurden, zählen ebenso in die Auswertung hinein, aber wurden in der Grafik zur besseren Übersichtlichkeit weggelassen.

Bei der Untersuchung der MR16 Retrofits (Abb. 74) ist bei den Produkten von Osram und Philips ein gleichartiges Verhalten gegenüber der A60 und A65 Retrofitbetrachtung festzustellen. Unterhalb von 10% relativer, gemessener Helligkeit ändert sich die CCT nicht mehr. Eine große CCT Veränderung bei der untersten Dimmstufe liegt hier nicht vor.

Die MR16 Retrofits von Ledon und Megaman korrelieren nicht mit dem typischen Kurvenverlauf der Temperaturstrahler. Von 100% bis 20% relativer, gemessener Helligkeit findet die Veränderung ihrer ähnlichsten Farbtemperatur statt. In den restlichen 20% wird allein die Helligkeit heruntergeregelt. Gegenüber den Produkten von Osram und Philips sind ihre Verläufe etwas linearer.

Die beschrifteten relativen, gemessenen Helligkeiten bei unterster Dimmstufe wurden für eine klare Lesbarkeit der Daten auf wesentlich beschränkt. Dazu gehört die Angabe der MR16 Halogenlampe und die größte und kleinste Prozentangabe der relativen, gemessenen Helligkeit bei niedrigster Dimmstufe. 7,81% relative, gemessene Helligkeit können für Anwendungen, wie sie in der Betrachtungssituation zur Auswertung der wahrgenommenen Helligkeit L^* (Abschnitt 2.4.2.) vorliegen, nicht gering genug sein.

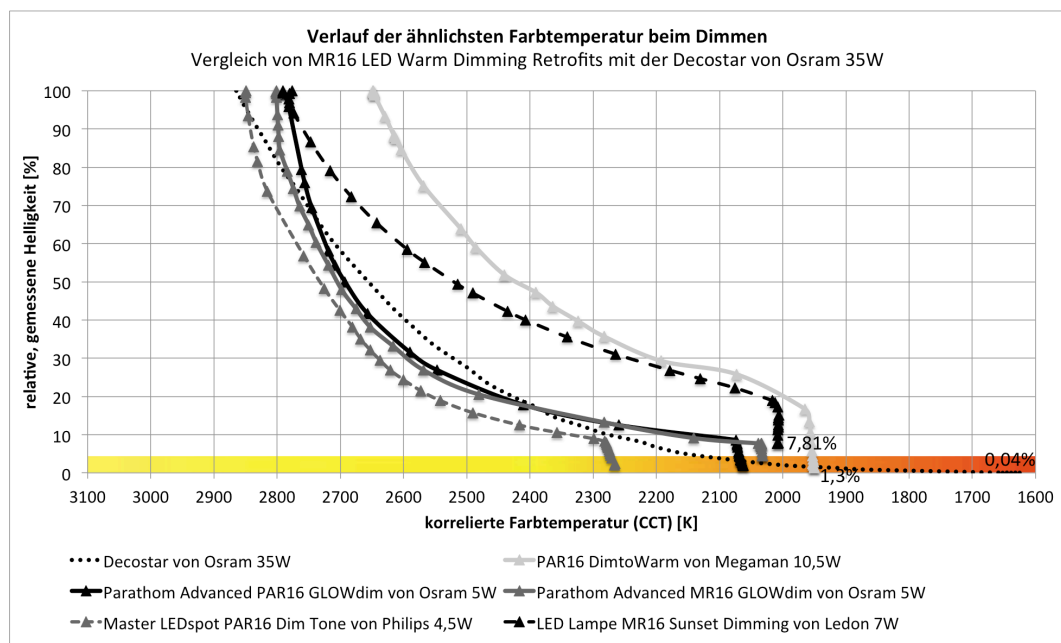


Abbildung 74: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen, Vergleich von MR16 LED Warm Dimming Retrofits mit der Decostar von Osram 35W

Die A60 und A65 Retrofits erreichen unterste ähnlichste Farbtemperaturen von 1900K. Die MR16 Retrofits gehen maximal bis 1950K, aber liegen eher bei 2050K. Keines der Retrofits kann so niedrige CCTs wie die Temperaturstrahler erzielen. Die minimale Farbtemperatur von 2266K des Parathom Advanced MR16 GLOWdim von Osram ist für einen Warm Dimming Effekt verglichen mit Temperaturstrahlern nicht gering genug. Am stärksten korrelieren die MR16 Retrofits von Osram mit dem Verhalten der MR16 Temperaturstrahler.

Den überwiegenden Retrofits ist gemein, dass innerhalb der untersten 10% oder 20% relative, gemessene Helligkeit keine Veränderung der CCT mehr erfolgt. Von einem tatsächlichen Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur kann dann nicht mehr gesprochen werden.

Einige Retrofits, und zwar das A65 Retrofit von Megaman und die MR16 Retrofits von Osram, korrelieren bis auf die untersten 10% relative, gemessene Helligkeit gut mit dem Verlauf der CCT der Temperaturstrahler.

3.4.3. Farbwiedergabeindizes Ra und R9

Der gegenüber den Temperaturstrahlern fehlende Anteil des als Rot wahrgenommenen Wellenlängenbereiches (Abb. 70, 71) lässt vermuten, dass der Farbwiedergabeindex R9 (Rot gesättigt) deutlich unter 100 liegen muss. Weiter soll betrachtet werden, wie stark sich die von den Spektren der Temperaturstrahler abweichende spektrale Strahlungsverteilung der Retrofits auf den allgemeinen Farbwiedergabeindex Ra auswirkt.

Zu Anfang wird der Verlauf von Ra und R9 des MR16 Retrofits von Ledon vorgestellt. Dieses Retrofit erzielt das beste Ergebnis für Ra und R9. Alle anderen Retrofits besitzen einen über den Dimmvorgang hinweg nahezu konstanten Ra zwischen 90 und 80. Die R9-Werte liegen sogar unter 30.

Der beim Ledon Produkt gegenüber den restlichen Retrofits in Relation hohe R9-Wert von 60 bis 50 könnte durch das geringfügig weiter zu den langen Wellenlängen hin liegende Maximum der spektralen Strahlungsverteilung entstehen (Abb. 71).

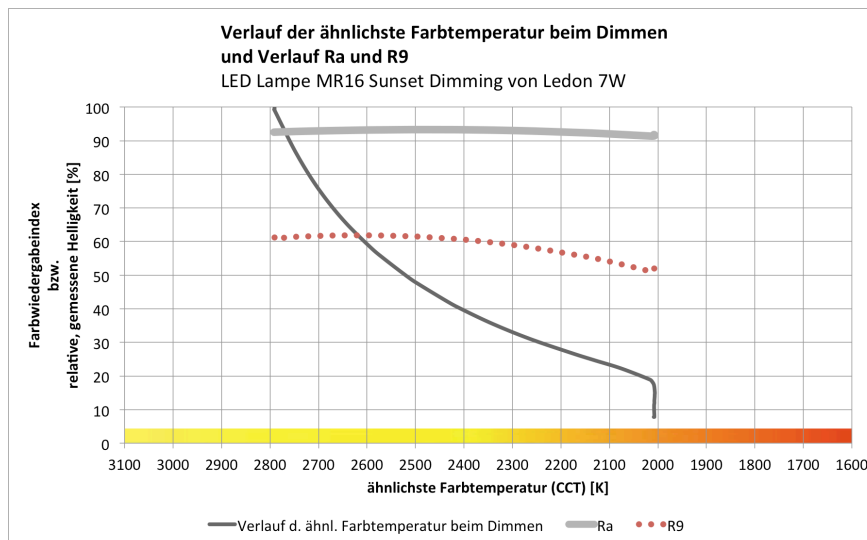


Abbildung 75: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, LED Lampe MR16 Sunset Dimming von Ledon 7W

Der Durchschnitt der restlichen untersuchten Retrofits zeigt ein Verhalten wie in Abbildung 76. Die im Prinzip redundanten Abbildungen der anderen Retrofits sind im Anhang 4 zu finden.

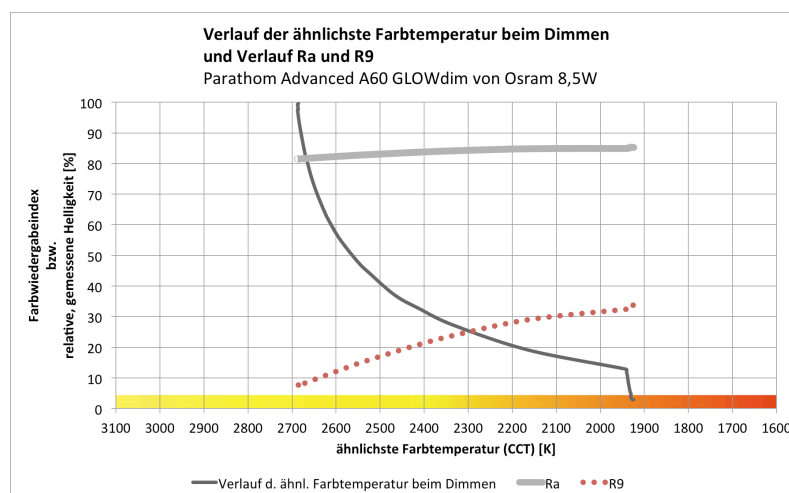


Abbildung 76: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, Parathome Advanced A60 GLOWdim von Osram 8,5W

Auffällig sind noch die nächsten zwei Abbildungen 77 und 78. Das MR16 Retrofit wurde wie im vorherigen Abschnitt dargestellt mit einem nicht kompatiblen Dimmer geregelt und so traten bestimmte CCTs beim Dimmverlauf ein zweites Mal auf. Aus diesem Grund erscheinen für den Ra und R9 ebenfalls für einige ähnlichste Farbtemperaturen zwei Werte. Zusammen mit dem A60 Retrofit von Philips soll hier ein möglicher negativer R9-Wert erwähnt sein. Im Abschnitt 2.3.5.2. wird diese Eigenschaft der aktuellen Berechnungsmethode für Farbwiedergabeindizes kritisiert. Der rein numerische Farbwiedergabeindex vermittelt keine semantische Interpretation und es ist generell unklar, ob ein negativer R9 schlechter ist als ein R9-Wert bei Null.¹⁵³ In jedem Fall sind beide Retrofits (bei Ledon nur bzgl. des nicht kompatiblen Dimmers) zur Wiedergabe der Testfarbe „Rot gesättigt“ ungeeignet.

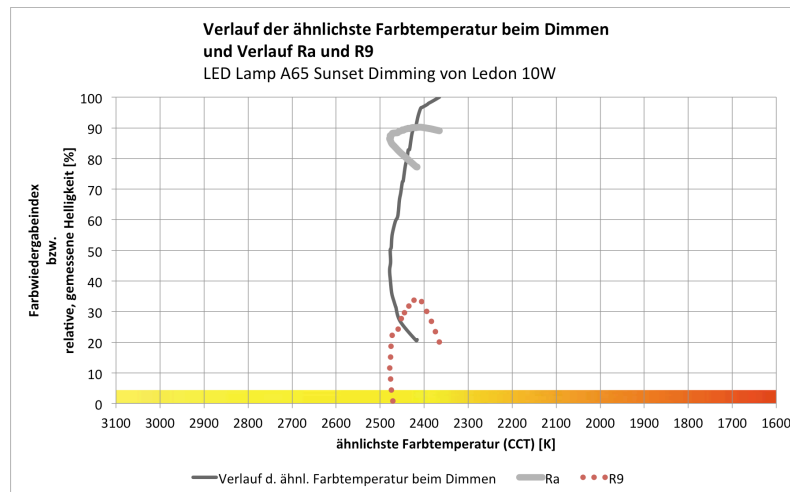


Abbildung 77: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, LED Lampe A60 Sunset Dimming von Ledon 10W

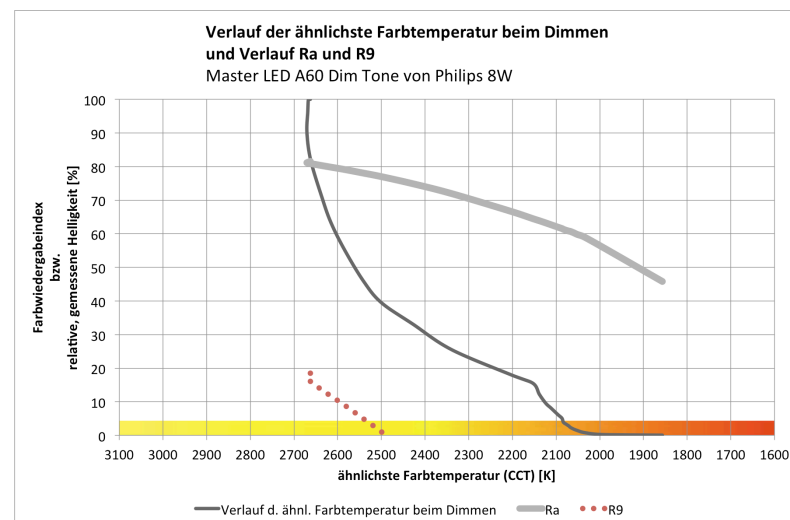


Abbildung 78: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, Master LED A60 Dim Tone von Philips 8W

Zusammenfassend lässt sich über den Ra sagen, dass er bei den untersuchten Retrofits bis auf die zuletzt abgebildeten zwei Ausnahmen einen über den gesamten Dimmverlauf konstanten Ra-Wert aufweist. Die Farbwiedergabe der Testfarben, die für den allgemeinen Farbwiedergabeindex Ra berücksichtigt werden, sollte verglichen mit dem Planckschen Strahler entsprechender CCT demnach beim Dimmen bei Werten zwischen 95 und 80 gleichmäßig gut bleiben. Eventuell verdeckt die arithmetische Mittelwertbildung nämlich Ausreißer in den Farbwiedergabeindizes R1 bis R8 (Kritik am CIE-Farbwiedergabeindex 1974/1995 Abschnitt 2.3.5.2.).

¹⁵³ Brückner, Stefan; 2014: 46

Der R9 beschreibt hier bis auf beim MR16 Retrofit von Ledon eine zu geringe Farbwiedergabe der Testfarbe „gesättigtes Rot“. Hier besteht eine große Differenz zwischen R9-Werten der Temperaturstrahler und der LED Warm Dimming Retrofits.

3.4.4. Farbverlauf und SDCM

Die womöglich gegenüber den Temperaturstrahlern beim Dimmen anders verlaufenden Farbarten der betrachteten LED Warm Dimming Retrofits werden hier vorgestellt. Die Ergebnisse werden in drei Abbildungen unterteilt. Die untersuchten Farbverläufe der A60 und A65 Retrofits und die MR16 Retrofits von Ledon und Philips verlaufen unterhalb der BBC. Zu Überschaubarkeit werden sie in zwei Abbildungen aufgeteilt (Abb. 79, 80). Die dritte Abbildung stellt die Farbverläufe der restlichen MR16 Retrofits, die oberhalb der BBC liegen oder während des Verlaufs diese überqueren (Abb. 81), dar. Entgegen den Temperaturstrahlern verlaufen die Farbarten aller Retrofits näherungsweise auf einer Geraden. Dadurch weichen sie zwangsläufig vom Planckschen Kurvenzug ab.

Die Farbarten der A60 und A65 Retrofits besitzen teilweise sichtbare Abweichungen (z.B. - 4-5 SDCM). Diese Abweichung ist abstrakt benannt ein Farblich ins Magenta (Abb. 15, Abschnitt 2.3.4.2.). Auffällig ist, dass entweder die Farbart bei 100% relativer, gemessener Helligkeit oder bei unterster Dimmstufe nahe der BBC liegt. Insgesamt liegen die Verläufe der Farbart unterhalb des Planckschen Kurvenzuges. Die A65 und A60 Retrofits von Megaman und Philips bilden bei der letzten bzw. vorletzten Dimmstufe eine Ausnahme. Nicht nur die CCT (Abb. 72), sondern auch die Farbart erfährt eine starke Veränderung. Mit ihrem deutlichen Sprung über die BBC weisen sie im Bereich der untersten Dimmstufen eine Unstetigkeit in ihrem Farbartenverhalten auf. Der Farbartenunterschied Skalierung nach müsste im direkten Vergleich zum Planckschen Strahler beim Philips A60 Retrofit eine Abweichung der Farbart des Weißlichtes merklich sichtbar sein. Bei Betrachtung von Temperaturstrahler und dem Retrofit nebeneinander könnte ein Farblich ins Gelb-Orange deutlich wahrnehmbar sein.

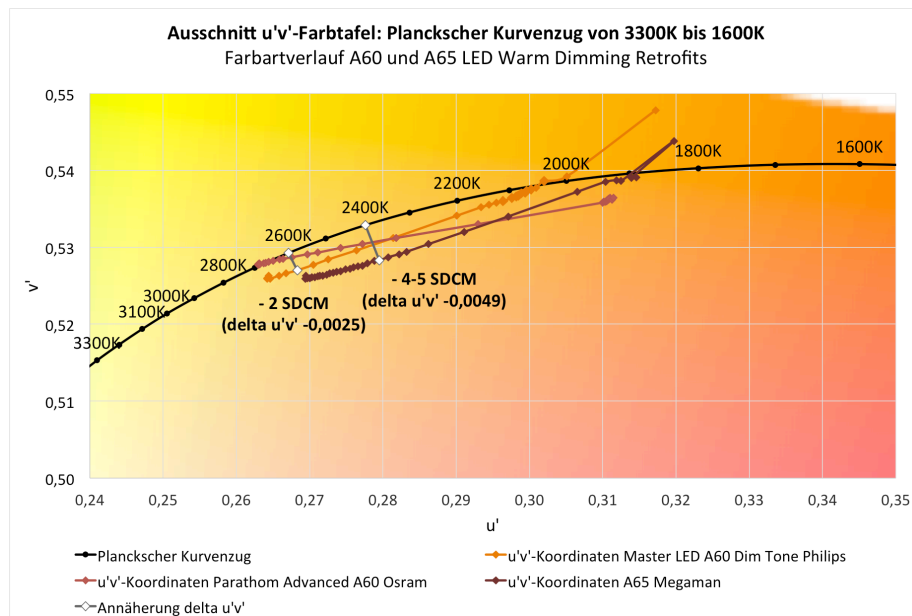


Abbildung 79: Ausschnitt u'v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Farbverlauf A60 und A65 LED Warm Dimming Retrofits

Die MR16 Retrofits von Ledon und Philips liegen bei Beginn und Ende des Farbartenverlaufs sehr nah am Planckschen Kurvenzug. Der gerade Verlauf führt in der Mitte zur größten Abweichung von der BBC. Das hier annähernd berechnete $\Delta u'v'$ (delta u'v') führt maximal zu -2 SDCM.

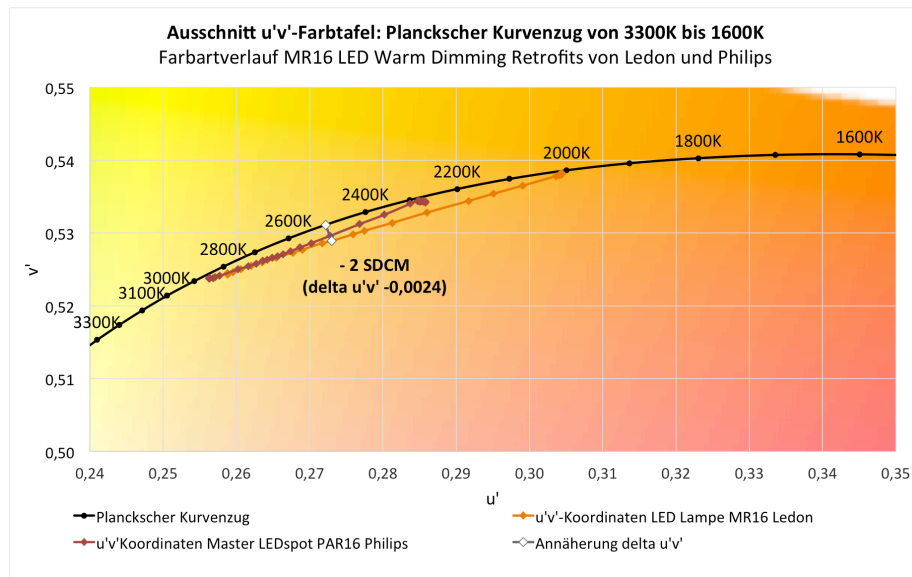


Abbildung 80: Ausschnitt u'-v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Farbortverlauf MR16 LED Warm Dimming Retrofits von Ledon und Philips

Megaman und Osram stellen nochmals andere Verlaufsmöglichkeiten der Farbarten beim Dimmen dar. Das MR16 Retrofit von Megaman liegt dabei über die Hälfte des Verlaufes sehr nah an der BBC. In diesem Bereich liegen jedoch die Messwerte und damit Dimmschritte ungleich verteilt. Wie schon beim Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur gezeigt (Abb 74), findet in den unteren Dimmstufen kaum noch eine Veränderung der Farbtemperatur statt. Der Farbortverlauf vom Megaman Produkt zeigt, dass bei unterster Dimmstufe bei gleichbleibender CCT keine Verschiebung weg von der BBC stattfindet und damit auch kein wahrnehmbarer Farblich entsteht. Dennoch wird der Verlauf nicht mit gleichmäßigen Dimmschritten ausgenutzt. Auch die Produkte von Osram besitzen keine gleichmäßigen Veränderungen der Farbarten wie sie bei den Temperaturstrahlern auftreten.

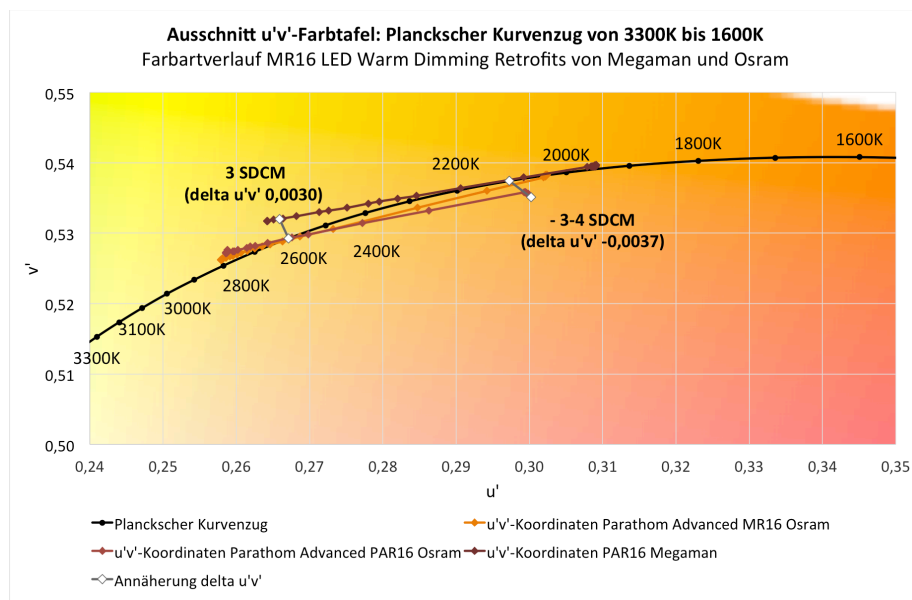


Abbildung 81: Ausschnitt u'-v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Farbortverlauf MR16 LED Warm Dimming Retrofits von Megaman und Osram

Die Verläufe der Farbarten beim Dimmen sind näherungsweise Geraden und korrelieren dadurch nicht mit den Verläufen der Temperaturstrahler. Verläufe wie der des MR16 (hier GU5.3) Retrofits von Osram zeigt eine gute Annäherung an die BBC trotz geradem Verlauf. Die Farbortdifferenzen des A60 Retrofits von Philips sind vereinzelt so groß (- 4 bis 5 SDCM), dass es im hier vorgenommenen Vergleich zum Planckschen Strahler (idealer

Temperaturstrahler) zu wahrgenommenen Abweichungen kommen müsste. Überwiegend liegen die Produkte unterhalb von 3 SDCM und sollten zu kaum bis keinen sichtbaren Abweichungen führen. Abweichungen treten sowohl in Richtung oberhalb und unterhalb der BBC auf.

3.4.5. Wahrgenommene Helligkeit L*

Wie bereits bei den Verläufen der ähnlichsten Farbtemperatur zu sehen war, lassen sich nicht alle Retrofits so weit wie die Temperaturstrahler herunterdimmen. Nur zwei Produkte können mit dem Busch&Jäger Dimmer unter 1% relative, gemessene Helligkeit reguliert werden. Bezogen auf die im Abschnitt 2.4.2. beschriebene Betrachtungssituation ergeben sich die folgenden L*-Werte. Die Ergebnisse sind nach steigender L*-Größe sortiert.

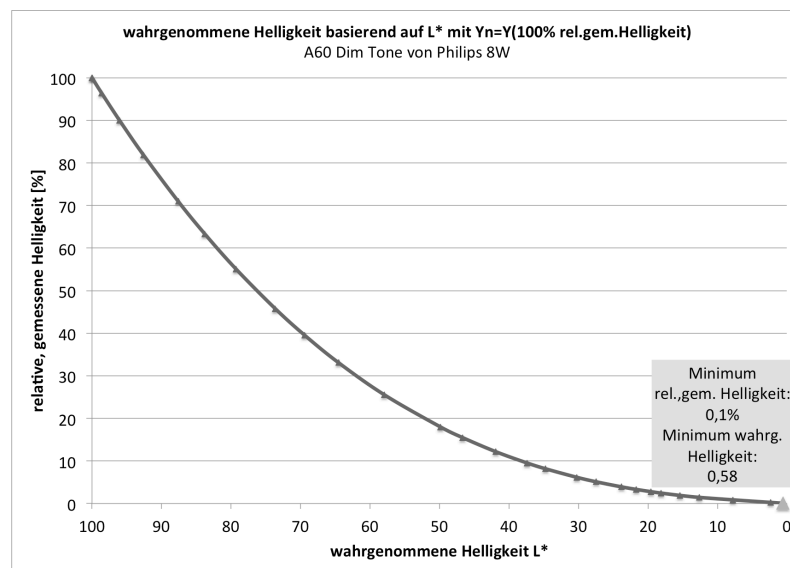


Abbildung 82: wahrgenommene Helligkeit basierend auf L* mit $Y_n = Y(100\% \text{ rel., gemessene Helligkeit})$, A60 Dim Tone von Philips 8W

A65 DimtoWarm von Megaman:	relative, gemessene Helligkeit = 0,2%,	L* = 1,73
PAR16 DimtoWarm von Megaman:	relative, gemessene Helligkeit = 1,3%,	L* = 11,53
Parath. Adv. PAR16 GLOWdim v.Osram:	relative, gemessene Helligkeit = 1,9%,	L* = 15,22
Master LEDspot PAR16 DimTone v.Philips:	relative, gemessene Helligkeit = 2,1%,	L* = 16,42
Parath. Adv. A60 GLOWdim von Osram:	relative, gemessene Helligkeit = 2,86%,	L* = 19,84
Parath. Adv. MR16 GLOWdim v.Osram:	relative, gemessene Helligkeit = 4,5%,	L* = 25,77
LED Lampe MR16 Suns. Dim. v.Ledon:	relative, gemessene Helligkeit = 7,76%,	L* = 33,85
A60 Sunset Dimming von Ledon:	relative, gemessene Helligkeit = 20,84%,	L* = 52,79

Bis auf das A60 Retrofit von Philips (Abb. 82) und das A65 Retrofit von Megaman erreicht keines der Retrofits L*-Werte unter 6,60. Die wahrgenommene Helligkeit fällt stattdessen viel größer aus. Das A60 Retrofit wurde wie bereits erwähnt nicht mit dem richtigen Dimmer reguliert und soll hier als Beispiel für die daraus folgende wahrgenommene Helligkeit bei der definierten Betrachtungssituation genannt sein. Bei unterster Dimmstufe, bei einem Fünftel der relativen, gemessenen Helligkeit, nimmt der Anwender noch die halbe wahrgenommene

Helligkeit in Bezug zur ungedimmten Situation wahr. Der nächst kleinere L*-Wert liegt bei 33,85 und ist mit einem Drittel der relativ wahrgenommenen Helligkeit immer noch sehr hoch. Selbst ein L* von 11,53 ist für die unterste Dimmstufe hier noch zu hoch.

3.4.6. Zusammenfassung: Ergebnisse der LED Warm Dimming Retrofits

Die Retrofits zeigen bezüglich der Farbartdifferenzen zum Planckschen Kurvenzug gute Ergebnisse. Ihre Abweichungen sollten überwiegend kaum sichtbar sein. Weitere gute Eigenschaften, die für eine Korrelation mit dem Planckschen Strahler sprechen sind der allgemeine Farbwiedergabeindex, der über 80 liegt und über den gesamten Dimmvorgang konstant ist, und die bis auf den untersten Bereich bei einigen Retrofits ähnlichen CCT-Verläufe.

Grundlegend für die farbmtrischen Eigenschaften ist das Spektrum des Selbstleuchters und dieses weicht von dem der Temperaturstrahler vor allem im äußeren sichtbaren Bereich der langen Wellenlängen ab. Daraus resultiert ein schlechter Farbwiedergabeindex für die Testfarbe „Rot gesättigt“. Weitere vom Temperaturstrahler abweichende Eigenschaften sind die nicht erreichten niedrigen CCTs unter 1800K, die unter 20% oder 10% relative, gemessene Helligkeit konstant bleibenden ähnlichsten Farbtemperaturen, die geraden Farbverläufe beim Dimmen und die zumeist über 1% relative, gemessene Helligkeit bei unterster Dimmstufe.

Der Warm Dimming Effekt bezogen auf die Ergebnisse der Temperaturstrahler bei den in dieser Arbeit untersuchten, farbmtrischen Eigenschaften und Dimmkurven wird teilweise abgebildet. Eine geringe Korrelation liegt in den unteren Dimmstufen und im R9-Wert vor.

3.5. LED Warm Dimming Produkte: Leuchten

Leuchtenhersteller wie z.B. die hier vertretenen Hersteller ACDC, WILA, Zumtobel, LEDS C4, Qu-Light, und Reggiani bieten Leuchten mit dem Warm Dimming Effekt an. Erneut taucht auch Ledon mit einem MR16 Modell in kleiner Downlightversion auf. Bei der Recherche nach der verbauten LED-Technologie stellte sich heraus, dass bei einigen Produkten ähnliche Chips verbaut sind. Zudem lässt sich durch die verwendete Anzahl an LED-Kanälen, d.h. wieviel verschiedenfarbige oder verschieden phosphorisierte LEDs miteinander gemischt werden, eine Reihenfolge für die Betrachtung der Chip-Hersteller festlegen.

Die Chip-on-Board-Technologie von Sharp, die bei Ledon, LEDS C4, Qu-Light und Reggiani verwendet wird, mischt mit zwei LED-Kanälen. Die Firma LEDengin, die in erster Linie Produzent von LED Emittern sind, bieten eine Warm Dimming Musterleuchte, bestehend aus dem LED-Chip, einer TIR-Linse (Total Internal Reflection), einem Dimmer (von Lutron) und einem Kühlkörper an. Sie mischen mit drei LED-Kanälen. Hier befinden sich mehrere LEDs unter einer Sekundäroptik. Zumtobel verwendet von Cree einen LED-Chip mit mehreren SMDs. Dort sind vier verschiedenfarbige LEDs verbaut. Die höchste Anzahl an gemischten Kanälen verwendet Lumenetix mit seinen Araya Modulen, die bei WILA und ACDC verbaut sind und mit fünf LED-Kanälen mischen. Fotos zu den verbauten Technologien finden sich im Anhang 5.

3.5.1. Spektrale Strahlungsverteilung

Die relativen spektralen Strahlungsverteilungen der LED Warm Dimming Leuchten mit gleichem LED-Chip Hersteller korrelieren untereinander sehr.¹⁵⁴ Aus diesem Grund werden hier die für die LED-Chip Hersteller typischen Spektren einander gegenübergestellt (Abb. 83). Die Normierung zur Gegenüberstellung erfolgt erneut auf 1 bei 560nm.

¹⁵⁴ Anhang 6

Stellvertretend für die Chip-Hersteller Sharp wurde das Downlight von Ledon und für Lumenetix die Alphabet Spectra von WILA ausgewählt. Für ein Halogenleuchtmittel wird die Decostar von Osram (Abschnitt 3.3.1.) benutzt.

Der Sharp Chip-on-Board besitzt ein den LED Warm Dimming Retrofits überwiegend gleichendes Spektrum. Die relativen spektralen Strahlungsverteilungen der LED-Chips mit SMD-Technologie weisen wiederum schmalbandige Peaks (ca. 20-30nm FWHM) im als Orange wahrgenommenen Wellenlängenbereich auf. LEDengin und Cree übersteigen ihre restlichen spektralen Anteile dabei um mindestens das Dreifache. Der Peak vom Lumenetix-Chip ist in Relation geringer ausgeprägt. Die Spektren der SMD-Technologie korrelieren gut, woraus sich ein direkter Zusammenhang der Spektren zu ihrer Chip-Technologie herleiten lässt.

Gegenüber der relativen spektralen Verteilung der MR16 Halogenlampe fehlen allen LED Warm Dimming Leuchten erneut Anteile im als Rot wahrgenommenen Wellenlängenbereich. Sharp deckt diesen Bereich noch ansatzweise ab. Wie auch bei den Retrofits tritt ein relativ kleiner Peak bei ca. 450nm auf.

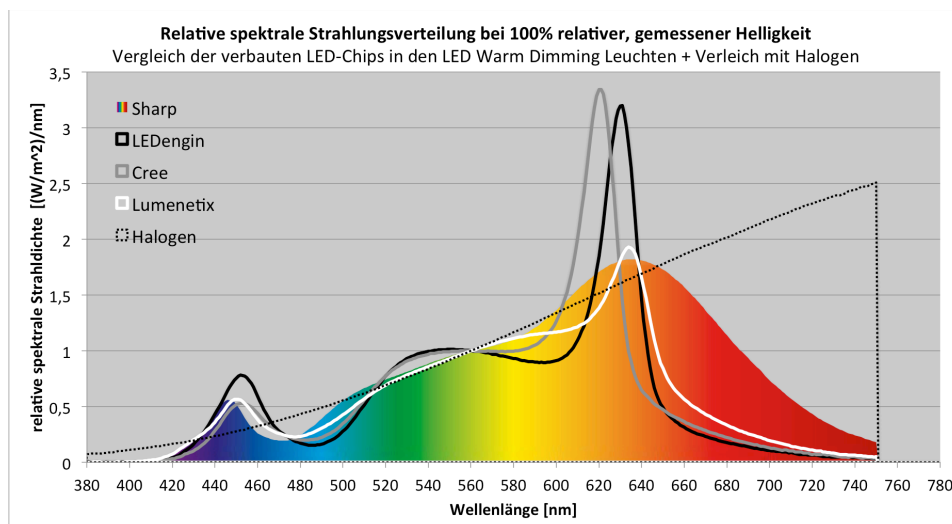


Abbildung 83: Relative spektrale Strahlungsverteilung bei 100% relativer, gemessener Helligkeit, Vergleich der verbauten LED-Chips in den LED Warm Dimming Leuchten + Vergleich mit Halogen

Bei unterster Dimmstufe (Abb. 84) bleiben die Peaks der LED-Chips mit SMD-Technologie im als Orange wahrgenommenen Wellenlängenbereich bestehen. Die restlichen Wellenlängenanteile sind in Relation nur noch schwach vertreten. Ab 600nm korrelieren die relative spektrale Strahlungsverteilung von LEDengin, Cree und Lumenetix mit der MR16 Halogenlampe kaum noch.

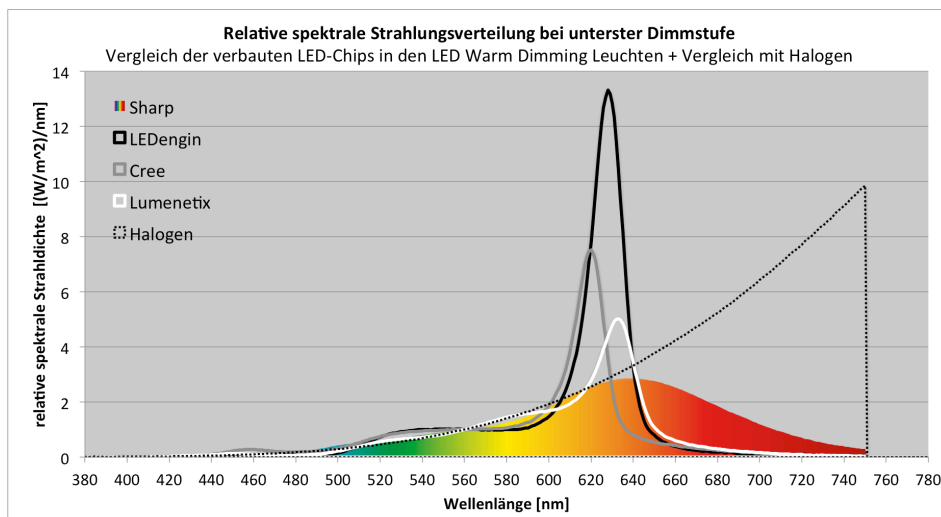


Abbildung 84: Relative spektrale Strahlungsverteilung bei 100% relativer, gemessener Helligkeit, Vergleich der verbauten LED-Chips in den LED Warm Dimming Leuchten + Vergleich mit Halogen

Alle LED Warm Dimming Spektren weichen in den äußeren Bereichen des sichtbaren Wellenlängenbereiches von der spektralen Verteilung der MR16 Halogenlampe ab. Am ehesten ähnelt ihr noch das Spektrum vom Sharp Chip-on-Board. Die relativen spektralen Strahlungsverteilungen der LED-Chips mit SMD-Technologie besitzen einen dominanten schmalbandigen Peak (ca. 20-30nm FWHM) im als Orange wahrgenommenen Wellenlängenbereich. Bei LEDengin und Cree übersteigt der Peak das restliche Spektrum um ein Vielfaches.

3.5.2. Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen

Wie im Abschnitt zuvor sollen hier die verschiedenen LED-Chips miteinander verglichen werden und die Ergebnisdarstellung der einzelnen Leuchten auf wesentliche, für die verbauten LED-Chips stellvertretende Auswertungen reduziert werden. Die Reduzierung der Ergebnisse lässt sich jedoch nicht so konsequent wie im vorherigen Abschnitt vornehmen. Einige Auffälligkeiten bei den CCT-Verläufen seien kurz genannt.

Die verbauten Chip-on-Board von Sharp in vier untersuchten Leuchten führen beim Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur zu gleichen Ergebnissen. Allein beim Downlight von Ledon führt der von der Dimmung mittels eldoLED-Software abweichend verwendete Busch&Jäger Dimmer zu anderen Ergebnissen.¹⁵⁵ Da der Busch&Jäger Dimmer für die Ledon Leuchten empfohlen war, wurde auch mit diesem gedimmt. Für Sharp wird demnach stellvertretend das Ergebnis der Trybeca von Reggiani verwendet. Die bei WILA und ACDC verbauten LED-Chips von Lumenetix besitzen unterschiedliche Dimmprofile. Lumenetix bietet ein Glühlampen- und ein MR16-Dimmprofil an.¹⁵⁶ WILA hat das Glühlampen-Dimmprofil verbaut. Da beide Dimmprofile zu unterschiedlichen CCT-Verläufen führen, werden für Lumenetix beide Leuchten in die Abbildung 85 einbezogen.

¹⁵⁵ Angang 7

¹⁵⁶ Lumenetix; 2015: 1

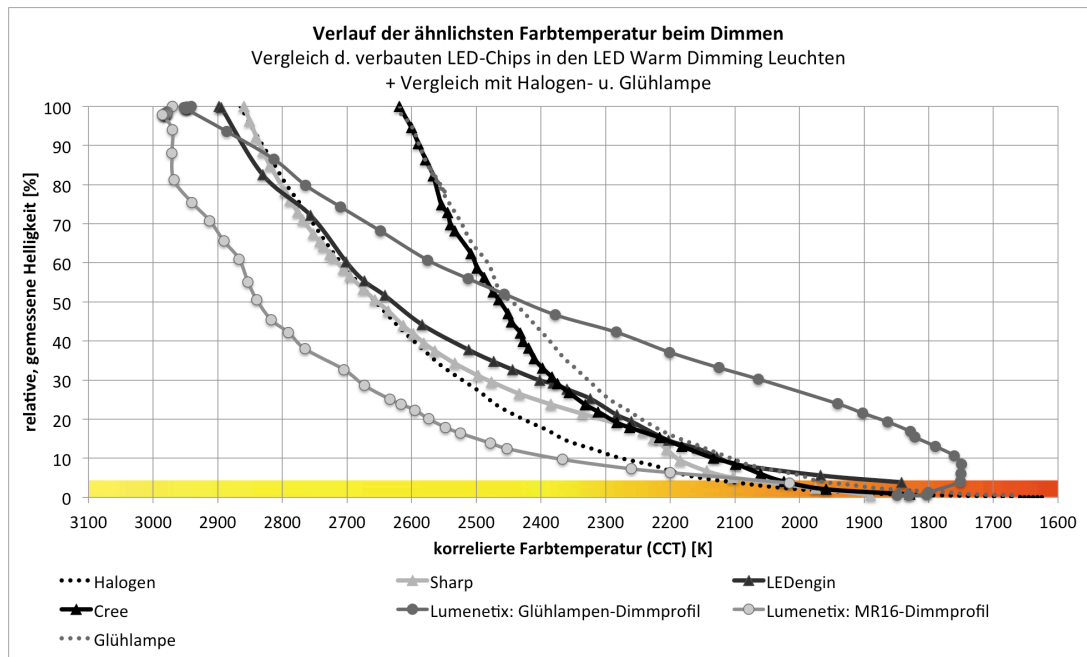


Abbildung 85: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen, Vergleich der verbauten LED-Chips in den LED Warm Dimming Leuchten + Vergleich mit Halogen- und Glühlampe

Das Glühlampen-Dimmprofil von Lumenetix korreliert nicht mit dem Verlauf der Temperaturstrahler. Der CCT-Verlauf ist zu linear. Sharp und LEDengin verlaufen unter 40% relativer, gemessener Helligkeit ebenfalls etwas zu linear. Cree's CCT-Verlauf gleicht dem der Glühlampe sehr. Das MR16-Dimmprofil von Lumenetix korreliert gut mit Verläufen der ähnlichsten Farbtemperatur von Halogenlampen mit höheren Farbtemperaturen (Abb. 46).

Gegenüber den Retrofits verlaufen die CCTs der Leuchten (vom WILA Ergebnis abgesehen) auch in den unteren Dimmstufen (unter 20%) weiter zu den niedrigeren ähnlichsten Farbtemperaturen. Im Durchschnitt werden auch hier keine unter 1800K liegenden CCTs erzielt.

3.5.3. Farbwiedergabeindizes Ra und R9

Aufgrund der korrelierenden Spektren und Farbtemperaturverläufe der LED Warm Dimming Leuchten mit Sharp Chip-on-Board ergeben sich ebenfalls gleiche Werte und Verläufe für Ra und R9.¹⁵⁷ Als Beispiel dienen erneut die Ergebnisse der Trybeca von Reggiani (Abb. 86). Diese stehen auch für die höchsten erzielten Werte von Ra und R9 innerhalb der untersuchten LED Warm Dimming Leuchten.

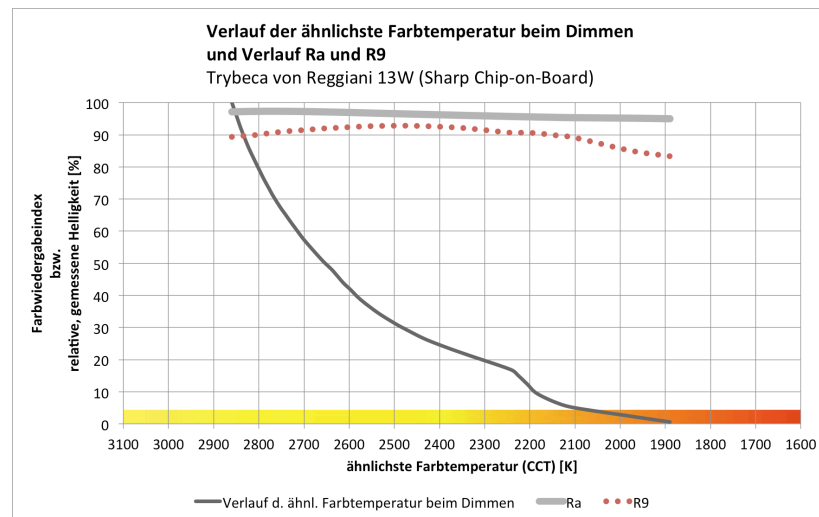


Abbildung 86: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, Trybeca von Reggiani 13W (Sharp Chip-on-Board)

An Sharp anknüpfend folgt LEDengin mit ebenfalls guten Werten (Abb. 87). Der den Ra hier übersteigende R9 weist auf eine Zunahme der Anteile eines LED-Kanals mit langen Wellenlängen hin.

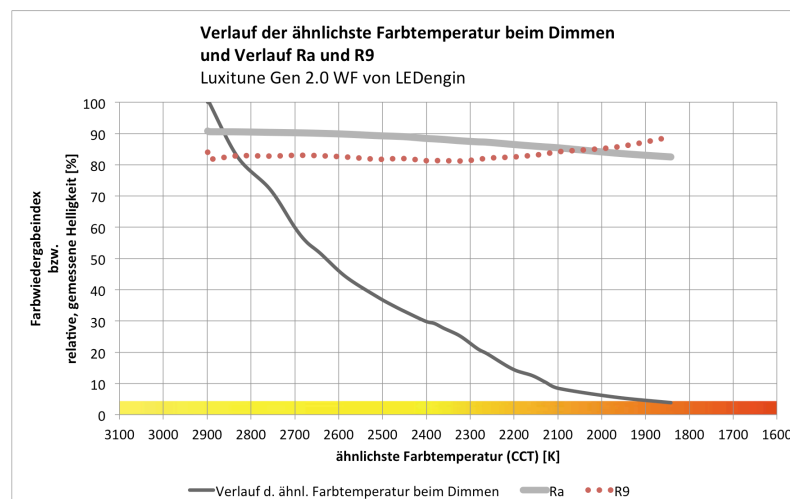


Abbildung 87: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, Luxitune Gen 2.0 WF von LEDengin

¹⁵⁷ Anhang 8

Cree erreicht niedrige R9-Werte, beginnend bei 40 und auf 10 abfallend (Abb. 88). Die Begründung hierfür findet sich im Spektrum, das nur geringe Anteile in den langen Wellenlängen aufweist (Abb. 83), um die Testfarbe „Rot gesättigt“ wiederzugeben.

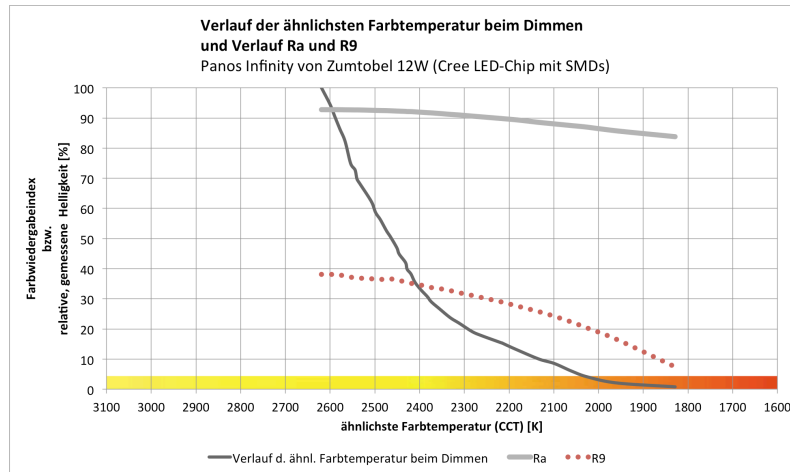


Abbildung 88: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, Panos Infinity von Zumtobel 12W (Cree LED-Chip mit SMDs)

Lumenetix liefert hohe Ra-Werte >90 und etwas inkonstant verlaufende R9-Werte im mäßiger hohen Bereich bei 80 bis 60 (Abb. 89, 90).

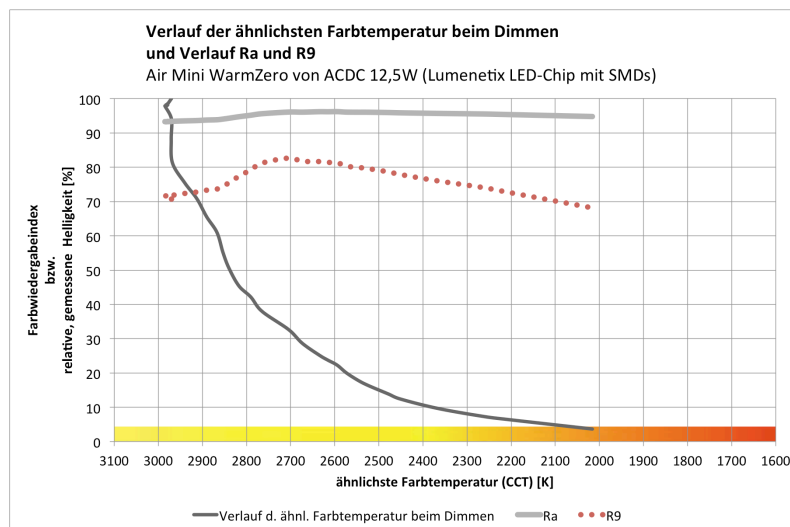


Abbildung 89: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, Air Mini WarmZero von ACDC 12,5W (Lumenetix LED-Chip mit SMDs)

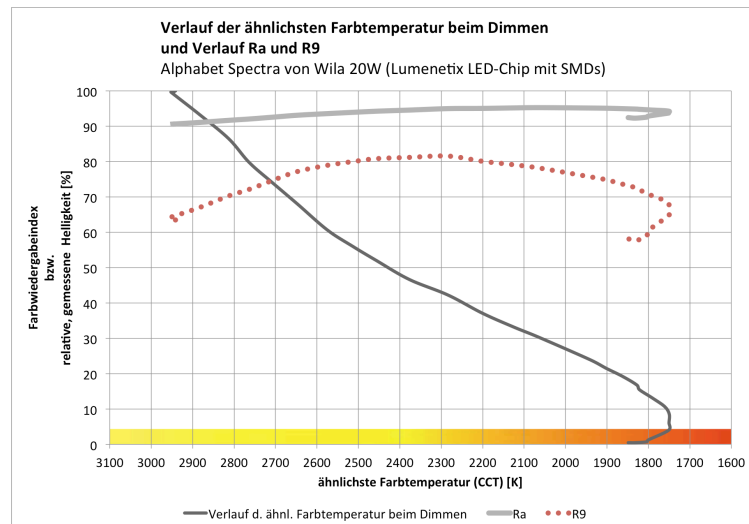


Abbildung 90: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, Alphabet Spectra von WILA 20W (Lumenetix LED-Chip mit SMDs)

Die Werte von Ra und die Werte und Verläufe von R9 sind gegenüber den Ergebnissen der Retrofits deutlich besser. Die Begründung für die teilweise konstanter verlaufenden und höheren R9-Werte lässt sich nicht mit den relativen spektralen Strahlungsverteilungen der Leuchten (Abb. 83, 84) erklären. Die Anteile im Bereich der langen Wellenlängen fehlen sowohl bei den Retrofits, als auch bei den Leuchten. Ein Vergleich der absoluten Werte der spektralen Strahlungsverteilung wäre zur weiteren Untersuchung interessant, macht aber nur dann Sinn, wenn näherungsweise gleiche Niveaus der Strahldichten vorliegen. Aufgrund der verschiedenen Lichtströme der Leuchten ist dieser Vergleich hier nicht möglich.

Verglichen mit dem Temperaturstrahler werden für Ra hohe und über den Dimmvorgang konstante Werte erreicht.

Die Farbwiedergabe der Testfarbe „gesättigtes Rot“ liegt bei einigen LED Warm Dimming Leuchten nur 10% bis 30% darunter. Da es keine semantische Skalierung der Farbwiedergabeindizes gibt, kann hier keine klare Bewertung vorgenommen werden. Der R9-Wert wird von Herstellern überwiegend auch nicht angegeben.

3.5.4. Farbartverlauf und SDCM

Die Ergebnisse der Farbartverläufe und vorliegenden Farbartdifferenzen wurden bezüglich der LED-Chip Hersteller zusammengefasst. Sharp zeigt die von den Retrofits bekannten Geraden (Abb. 91). Die restlichen Farbartverläufe der anderen LED-Chips bilden kurvenförmige Verläufe (Abb. 92 bis 94) und damit eine Annäherung an den (idealen) Temperaturstrahler.

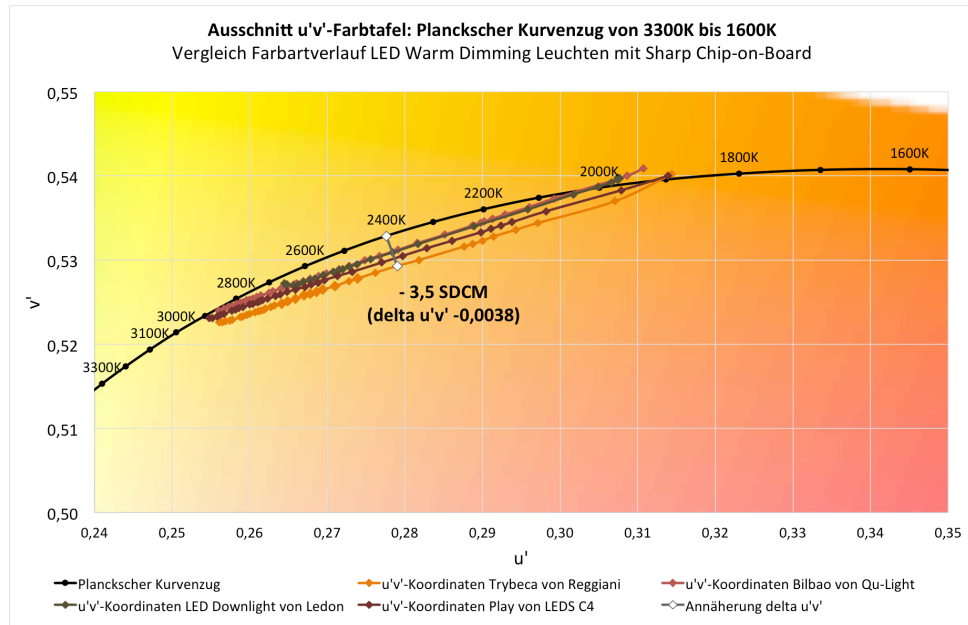


Abbildung 91: Ausschnitt u'-v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Vergleich Farbartverlauf LED Warm Dimming Leuchten mit Sharp Chip-on-Board

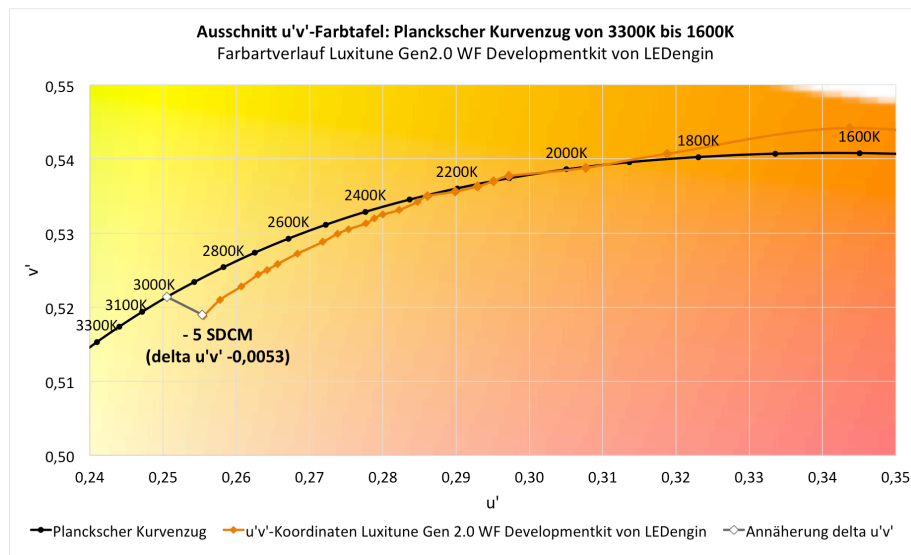


Abbildung 92: Ausschnitt u'-v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Farbartverlauf Luxitone Gen 2.0 WF Developmentkit von LEDengin

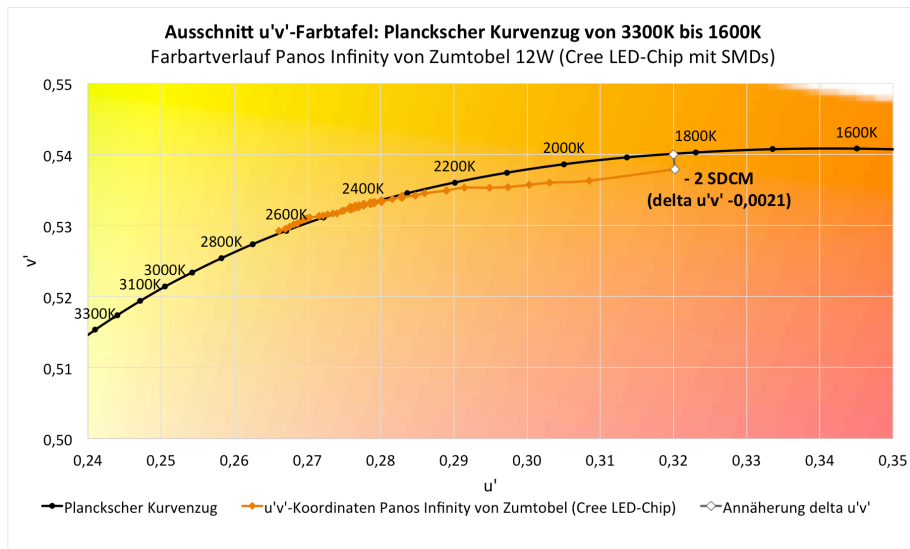


Abbildung 93: Ausschnitt u'v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Farbartverlauf Panos Infinity von Zumtobel 12W (Cree LED-Chip mit SMDs)

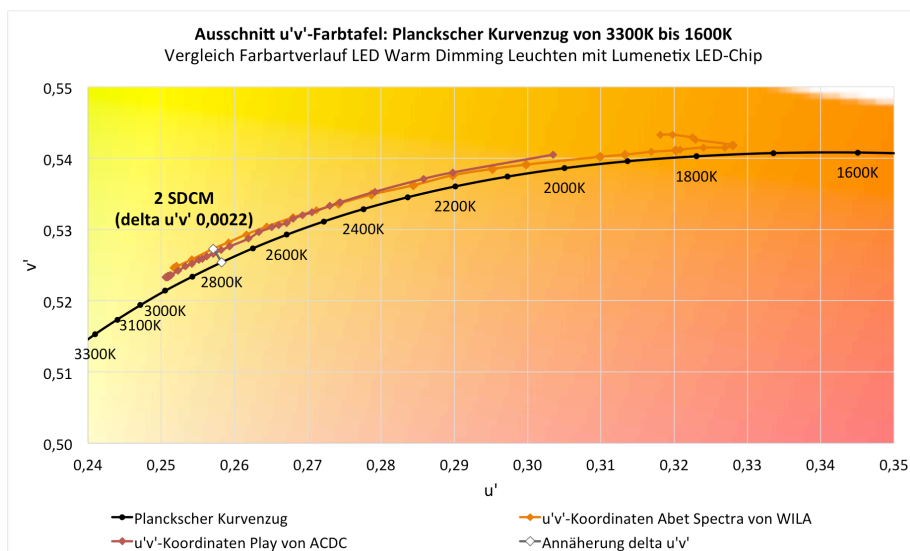


Abbildung 94: Ausschnitt u'v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Vergleich Farbartverlauf LED Warm Dimming Leuchten mit Lumenix LED-Chip

Die Farbartverläufe der LED Warm Dimming Leuchten ergeben nur bei Verwendung von allein zwei LED-Kanälen Geraden (Sharp, Abb. 91). Mit anderen Worten können bei unterschiedlicher Mischung von zwei LED-(Weißlicht-)Farben nur Farbarten auf einer geraden Verbindungslinie zwischen den Farbarten der benutzten LEDs entstehen. Bei den Retrofits findet diese Technologie Anwendung, weil der damit verbundene Programmierungs- und Elektronikteil noch nicht zu komplex wird und dadurch im Lampengehäuse integriert werden kann. Bei Leuchten besteht nicht zwangsläufig ein Platz- oder Komplexitätsproblem, weil z.B. der Treiber außerhalb des Leuchtengehäuses sitzen kann.

Bei drei verwendeten LED-Kanälen spannt sich ein Dreieck aus den Farbarten der zur Mischung verwendeten LEDs auf. Die darin liegenden Farbarten können dann durch gezielte Mischung der Spektren der LEDs erreicht werden. Damit werden kurvenförmige statt gerade Verläufe der Farbarten möglich. Bei noch mehr LED-Kanälen spannen sich in der Farbtafel Bereiche mit entsprechend vielen Eckpunkten auf.

Die Farbartdifferenzen zum Planckschen Kurvenzug besitzen durchschnittlich Abweichungen, die nicht oder kaum sichtbar sind (<4 SDCM). Mittels Verwendung von mehr als zwei LED-Kanälen entstehen bei den untersuchten Leuchten Verläufe auf oder nahe dem Planckschen

Kurvenzug mit konstanter Abweichung. Die Ergebnisse von Lumenetix korrelieren bezüglich der Kurve des Verlaufes am stärksten mit dem idealen Temperaturstrahler. Beispiele für den abschnittsweisen Verlauf auf der BBC bieten LEDengin mit dem eigenen LED-Chip und die Zumtobelleuchte mit dem LED-Chip von Cree. Eine Tendenz zur weiteren Annäherung an den Temperaturstrahler ist zu sehen.

3.5.5. Wahrgenommene Helligkeit L*

Die LED Warm Dimming Leuchten waren gegenüber den Retrofits weiter herunterzudimmen. Wie stark sich die Wahl des Dimmers auswirken kann, zeigt die in der Abbildung 95 gesetzte Markierung der von der Reggiani Leuchte Trybeca erreichten untersten Dimmstufe bei Nutzung des im Muster integrierten Dimmers und der Dimmung mittels eldoLED. Bezogen auf die im Abschnitt 2.4.2. beschriebene Betrachtungssituation ergeben sich die folgenden L*-Werte. Die Ergebnisse sind nach den Herstellern der verbauten LED-Chips sortiert.

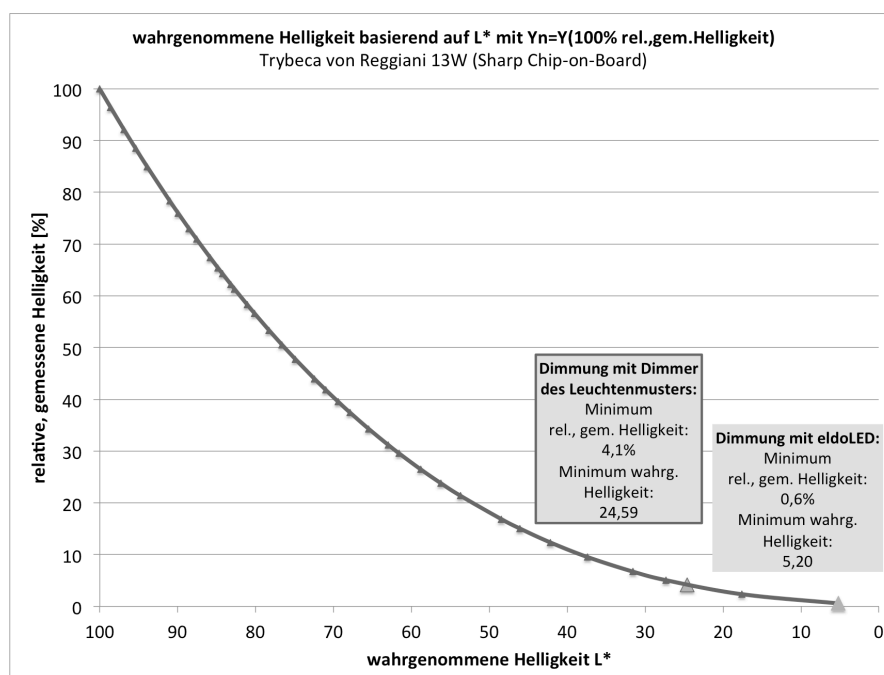


Abbildung 95: wahrgenommene Helligkeit basierend auf L* mit $Y_n = Y(100\% \text{ rel., gem. Helligkeit})$, Trybeca von Reggiani 13W (Sharp Chip-on-Board)

Sharp

- Trybeca Warm Dimming von Reggiani: siehe Abb. 95
- LED-Downlight Suns.Dimm. von Ledon: relative, gemessene Helligkeit = 4,09%, L* = 24,39
- Bilbao von Qu-Light: relative, gemessene Helligkeit = 0,5%, L* = 4,33
- Play Warm Dimming von LEDS C4: relative, gemessene Helligkeit = 0,8%, L* = 6,74

LEDengin

- Luxitune Gen2.0 Develop.kit v. LEDengin: relative, gemessene Helligkeit = 0,2%, L* = 2,15

Cree

Panos Infinity warmDimming v. Zumtobel: relative, gemessene Helligkeit = 0,8%, $L^* = 6,72$

Lumenetix

Alphabet Spectra von WILA: relative, gemessene Helligkeit = 0,46%, $L^* = 4,17$

Air Mini WarmZero von ACDC: relative, gemessene Helligkeit = 3,66%, $L^* = 22,77$

Vier von acht untersuchte Leuchten erreichen L^* -Werte entsprechend der Temperaturstrahler (im Abschnitt 3.3.5. vertretenes Maximum von 6,60). Zwei weitere Leuchten übersteigen den Wert von 6,60 gerade so. Werte bei der wahrgenommenen Helligkeit unter 1 wurden nicht erreicht. Im Vergleich zu den Temperaturstrahlern ergeben sich hier annähernd gute Ergebnisse für die untersten Dimmstufen und damit verbundenen wahrgenommenen Helligkeiten. Um den im Abschnitt 3.3.5. festgehaltenen Ergebnissen der Temperaturstrahler noch mehr zu gleichen, hätten L^* -Werte unter 1 erzielt werden müssen.

3.5.6. Zusammenfassung: Ergebnisse der LED Warm Dimming Leuchten

Die LED Warm Dimming Leuchten erreichen gegenüber den LED Warm Dimming Retrofits mit den Temperaturstrahlern eine höhere Übereinstimmung. In welchen der untersuchten, farbmetrischen Eigenschaften die Leuchten den Temperaturstrahlern gut ähneln und in welchen stets Differenzen bestehen, wird im Folgenden zusammengefasst.

Die CCT-Verläufe ähneln durchschnittlich denen der Temperaturstrahler. Die zuvor problematischen Bereiche unter 20% oder 10% relative, gemessene Helligkeit, die bei den Retrofits zu unveränderten ähnlichsten Farbtemperaturen führen, werden bei den Leuchten zur weiteren Verschiebung hin zu den warmen CCTs ausgenutzt. Niedrigere Dimmstufen, die tendenziell mehr denen der Temperaturstrahler entsprechen, werden erreicht. Der allgemeine Farbwiedergabeindex liegt ebenso wie bei den Retrofits über 80 und ist konstant.

Die R9-Werte liegen im Vergleich zu den Retrofit Ergebnissen mit Ausnahme des Ergebnisses der Zumtobelleuchte deutlich höher. Gegenüber den Temperaturstrahlern liegt ein Teil der Ergebnisse im guten Bereich bei 80 bis 95 und der andere Teil im Mittelfeld zwischen 80 und 60. Von einem Mittelfeld kann hier die Rede sein, da Werte unter 60 nicht empfehlenswert sind. Es gibt zwar keine semantische Skalierung des Farbwiedergabeindex, aber die kalkulierte Abweichung zum Temperaturstrahler ist dann groß und es werden beispielsweise auf den Beleuchtungsmarkt keine LED-Produkte zur allgemeinen Beleuchtung mit einem $R_a < 80$ gebracht. Der R9-Wert wird von Herstellern nur in Einzelfällen genannt.

Die maximalen Farbartdifferenzen liegen bei den LED Warm Dimming Leuchten so wie bei den Retrofits überwiegend im kaum sichtbaren Bereich (< 4 SDCM).

Hingegen der besseren CCT-Verläufe in den unteren Dimmstufen werden keine niedrigeren CCTs gegenüber den Retrofits erzielt. Somit wird diese Eigenschaft der Temperaturstrahler, sehr niedrige CCTs von bis zu 1600K zu erreichen, nicht nachgebildet.

Die kurvenförmigen Farbartverläufe führen verglichen mit den geraden Farbartverläufen der Retrofits bezüglich der maximal auftretenden Farbartdifferenzen im Durchschnitt zu keinen besseren Ergebnissen. Zur Nachbildung eines Farbartverlaufes entlang des Planckschen Kurvenzuges in einem Bereich von 3000K bis 2000K genügt unter Einbezug der Farbarttoleranzen, die mit SDCMs beschrieben werden, die Realisierung mit zwei LED-Kanälen. Eigentlich sollen jedoch im Vergleich zum Temperaturstrahler CCTs von bis zu 1600K erreicht werden. Hierfür wäre eine Umsetzung von mindestens drei LED-Kanälen und somit einem kurvenförmigen Farbartverlauf notwendig, um nicht zu hohe Farbartdifferenzen zu erhalten.

Das Spektrum der LED Warm Dimming Leuchten weicht noch mehr von den Temperaturstrahlern ab. Die spektralen Anteile der als Rot wahrgenommenen Wellenlängen sind noch geringer vorhanden. Die dem gegenüberstehenden besseren R9-Werte stehen scheinbar im Widerspruch dazu. Dieses Phänomen muss weiter untersucht werden.

4. Fazit und Ausblick

Mit dem anfangs vorgestellten, wissenschaftlichen Fundament wurde auf eine farbmetrische Analyse von LED Warm Dimming Produkten im Vergleich zu Temperaturstrahlern vorbereitet. Es werden dabei Parameter herausgestellt, die mit Lampen- und Leuchtenherstellern kommunizierbar sind und die in einer Zusammenstellung die, aufgrund des Warm Dimming Effektes veränderlichen, farbmetrischen Eigenschaften berücksichtigen.

Auf messtechnischer Ebene wurden die Spektren von Temperaturstrahlern und LED Warm Dimming Produkten aufgenommen und in einer farbmetrischen Auswertung einander gegenübergestellt. Dabei galten stets die Temperaturstrahler als Referenz, da sie innerhalb der nächsten Jahre durch LED Produkte abgelöst werden müssen. Der Umfang der untersuchten LED Warm Dimming Produkte bildet das aktuelle Angebot des Beleuchtungsmarktes ab. Mit den erreichten Ergebnissen des farbmetrischen Vergleichs wurden umfassende Kenntnisse über die farbmetrischen Eigenschaften und somit eine fundierte Einschätzung der neuen Technologie erlangt.

Bei der Auseinandersetzung mit der aktuell empfohlenen Farbmetrik wurde eine fehlende Stringenz des anwendungsbezogeneren und für sämtliche farbmetrische Eigenschaften grundlegenden 10° -Beobachters festgestellt. Der die meisten täglichen Betrachtungssituationen nicht abbildende 2° -Beobachter von 1931 stellt immer noch das konstant enthaltene Fundament zur Berechnung der Farbmaßzahlen und damit auch die Notwendigkeit einer Überarbeitung der Deutschen und Europäischen Normen dar. Die Verwendung von überholten Farbtafeln und -räumen belegt die benötigte Reform nochmals. Weiter sind einige wichtige Parameter, wie z.B. die ähnlichste Farbtemperatur, nicht in den Normen, auf die sich die Messgeräte- und Leuchtenhersteller zu einer einheitlichen Bestimmung und Vermittlung der vorliegenden Farbmetrik beziehen könnten, enthalten. Durch unterschiedlich verwendete Methoden der Hersteller wird ein klarer Vergleich der Ergebnisse schwierig.

Der Vergleich der hier untersuchten, farbmetrischen Eigenschaften von LED Warm Dimming Produkten zu denen der Temperaturstrahler zeigt im Schnitt eine mittelmäßige bis halbwegs hohe Annäherung, aber keine ganzheitliche Übereinstimmung.

Die Basis aller farbmetrischen Kalkulationen stellt die spektrale Strahlungsverteilung dar. Dort beginnend besteht eine große Differenz zwischen Temperaturstrahlern und den LED Warm Dimming Produkten. Dennoch erreichen die Leuchten z.B. einen hohen allgemeinen Farbwiedergabeindex und hohe bis mittelmäßige R9-Werte (Farbwiedergabe der Testfarbe „Rot gesättigt“). Erzielt ein LED Warm Dimming Produkt bei einer der untersuchten farbmetrischen Eigenschaften gute Ergebnisse, kann es bei der nächsten betrachteten Eigenschaft wiederum schlecht oder nur mittelmäßig abschneiden. Direkte Zusammenhänge zwischen den einzelnen Ergebnissen eines Produktes lassen sich nicht immer knüpfen. Mit dem Ergebnis einer Eigenschaft kann nicht sogleich auf die restlichen geschlossen werden. Aus diesem Grund ist die hier erfolgte Auswahl und grafische Auswertung der Eigenschaften sinnvoll, um einen genaueren Überblick zum Verhalten der vorliegenden LED Warm Dimming Produkte zu erhalten.

Beim Warm Dimming Effekt wird, grob beschrieben, die Veränderung der ähnlichsten Farbtemperatur mit dem Dimmvorgang verknüpft. Mit der Betrachtung eines dynamisch veränderbaren Weißlichtes bei LED Produkten wachsen die Anforderungen an die Produktbeschreibung mittels farbmetrischer Eigenschaften. Die Ermittlung der Verläufe von farbmetrischen Eigenschaften über den Dimmprozess hinweg ist notwendig. Eine visuelle Bemusterung der Produkte durch den Lichtplaner und dies am Besten in einer

projektbezogenen Umgebungssituation wird damit nicht ersetzt, sondern ist der nächste wichtige Schritt für eine bewusste Einplanung dieser noch relativ neuen Technologie.

Die Ergebnisse dieser Arbeit könnten mit visuellen Bemusterungen durch eine gewisse Probandenzahl, bestehend aus Fachleuten der Farbmeterik und Lichtplanung und aus fachfremden Personen, weitergeführt werden. Denn die visuell wahrnehmbare Lichtqualität ist nicht vollständig mit dem genormten farbmeterischen Ansatz abzubilden. Weiter könnten von Forschern vorgestellte Farbwahrnehmungsmodelle zur erneuten Auswertung der aufgenommenen spektralen Strahlungsverteilungen verwendet und mit den Ergebnissen aus den visuellen Experimenten abgeglichen werden. Für die Zukunft wäre eine Überarbeitung der aktuell empfohlenen farbmeterischen Methoden und eine umfassendere Beschreibung dieser komplexeren LED Produkte seitens der Lampen- und Leuchtenhersteller für die Lichtplanung wünschenswert.

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelor-Thesis mit dem Titel:

*Analyse von LED Warm Dimming Produkten in der Lichtplanung:
Farbmetrik und Dimmkurven im Vergleich zu Temperaturstrahlern*

selbständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen wie z. B. Internetseiten übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Mara Hein

Quellenverzeichnis

Backrack, Lew: Kalkulationstabelle Einfluss der FWHM auf Spektrum und Farbwertanteile, 2016, JETI Technische Messinstrumente GmbH

Bodrogi, P., Brückner, Stefan, Khanh, Tran Quoc: Farbwiedergabe für moderne Lichtquellen, 2012, LiTG-Schrift Fachgebiet Farben

Brückner, Stefan: Farbdifferenz-Skalierung zur Farbqualitätsbeurteilung von Halbleiter-Lichtquellen, 2014, TU Darmstadt, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Dissertation

Li, Cheng; Luo, Ming Ronnier; Li, Changjun: Assessing Colour Rendering Properties of Daylight Sources Part II: A New Colour Rendering Index: CRI-CAM02UCS, 2012, Department of Colour Science, University of Leeds

CIE Commission internationale de l'éclairage: CIE 13.3 Technical Report Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources, 1995, Paris

CIE Commission internationale de l'éclairage: CIE TN 001:2014 Technical Note Chromaticity Difference Specification for Light Sources, 2014, Paris

CIE Commission internationale de l'éclairage, 2016,
www.cie.co.at/index.php/LEFTMENU/About+us, letzter Aufruf 03.06.2016

Cielab.de, 2016, <http://www.cielab.de/cieluv.shtml>, letzter Aufruf 20.05.2016

Davis, W., Ohno, Y.: Color Quality Scale, 2010, Optical Engineering Volume 49 (Issue 3)

DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 5033-1 Farbmessung – Teil1: Grundbegriffe der Farbmessung, 2009, Beuth-Verlag

DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 6169-1 Farbwiedergabe: Allgemeine Begriffe, 1976, Beuth-Verlag

DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 6169-2 Farbwiedergabe: Farbwiedergabe-Eigenschaften von Lichtquellen in der Beleuchtungstechnik, 1976, Beuth-Verlag

DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 12464-1 Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen; Deutsche Fassung EN 12464-1:2011, 2011, Beuth-Verlag

DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Farbmessung – Teil 1: CIE farbmessungsmäßige Normalbeobachter (ISO 11664-1:2007); Deutsche Fassung EN ISO 11664-1:2011, Berichtigung zu DIN EN ISO 11664-1:2011-07, 2011, Beuth-Verlag

DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Farbmessung – Teil 3: CIE-Farbwerte (ISO 11664-3:2012); Deutsche Fassung EN ISO 11664-3:2013, 2013, Beuth-Verlag

DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Farbmessung – Teil 5: CIE 1976 L*u*v* Farbenraum und gleichabständige u',v'-Farbtafel (ISO 11664-5:2009); Deutsche Fassung EN ISO 11664-5:2011, 2011, Beuth-Verlag

Dörsam, E.: Farbwiedergabe in den Medien Vorlesung im WS 2012-13, 2012, TU-Darmstadt

Europäische Kommission, Verordnung (EU) Nr. 1194/2012 der Kommission vom 12. Dezember 2012 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Lampen mit gebündeltem Licht, LED-Lampen und dazugehörigen Geräten, 2012, Amtsblatt der Europäischen Union

European Commission, 2015, Phase-out of inefficient lamps postponed to September 2018, <https://ec.europa.eu/energy/en/news/phase-out-inefficient-lamps-postponed-1-september-2018>, letzter Aufruf 30.04.2016

GE: GE Energy Saving MR16, 2010, USA

Gigahertz Optik, 2016, BTS256-EF, <https://www.gigahertz-optik.de/de-de/produkt/BTS256-EF>, letzter Aufruf 15.05.2016

Gigahertz Optik, 2016, Spektralradiometer, <https://www.gigahertz-optik.de/de-de/produkte/cat/Spektralradiometer>, letzter Aufruf 08.05.2016

Gossen, 2016, Mavospec, http://www.gossen-photo.de/spektrum_p_mavospec.php, letzter Aufruf 21.05.2016

Greule, Roland: Licht und Beleuchtung im Medienbereich, 2015, Hanser-Verlag

Haagen-Schützenhofer, C.; Langer, S.; Hiller, R.; Kligenböck, A.; Rohringer, C.; Franz, G.; Parzer, V.; Ritt, P.; Steiner, C.; Stifter, D.: Vorstellungen zu weißem Licht, 2014, Frankfurt, Didaktik der Physik Frühjahrstagung

Harris, Daniel C.: Lehrbuch der Quantitativen Analyse, 2014, Springer Spektrum

Hecht, Eugen: Optik, 2014, De Gruyter

Hernandéz-Andrés, Javier; Lee, Raymond L.; Romero, Javier: Calculating correlated color temperature across the entire gamut of daylight and skylight chromaticities, 1999, Optical Society

Instrument Systems GmbH: 2008, Handbuch der LED-Messtechnik, http://www.instrumentsystems.de/fileadmin/editors/downloads/Products/LED_Handbuch.pdf, letzter Aufruf 20.05.2016

IES Illuminating Engineering Society: IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition, 2015; IES

JETI Technische Messinstrumente GmbH: Basics of Spectral Measurement, 2005, Jena

Ledsmagazine: 2015, ANSI works to update the solid-state lighting standard for chromaticity, <http://www.ledsmagazine.com/articles/print/volume-12/issue-2/features/standards/ansi-works-to-update-the-ssl-chromaticity-standard.html>, letzter Aufruf 11.05.2016

Ledsmagazine: 2016, ANSI continues advancements on SSL chromaticity standard, <http://www.ledsmagazine.com/articles/print/volume-12/issue-11/features/standards/ansi-continues-advancements-on-ssl-chromaticity-standard.html>, letzter Aufruf 11.05.2016

Licht.de: 2016, Ausstieg in vier Stufen, <http://www.licht.de/de/trends-wissen/licht-specials/ausfuer-die-gluehlampe-die-alternativen/ausstieg-in-vier-stufen/>, letzter Aufruf 18.05.2016

Licht.de: 2016, Energie-Effizienzklassen, <http://www.licht.de/de/trends-wissen/licht-specials/aus-fuer-die-gluehlampe-die-alternativen/welche-lampen-sind-betroffen/energie-effizienzklassen/>, letzter Aufruf 18.05.2016

Licht.de: 2016, Energie und Kosten sparen, <http://www.licht.de/de/trends-wissen/licht-specials/aus-fuer-die-gluehlampe-die-alternativen/das-ziel-energie-und-kosten-sparen/>, letzter Aufruf 18.05.2016

Licht.de: 2016, Farben aus dem Halbleiter, <http://www.licht.de/de/trends-wissen/licht-specials/modern-und-effizient-leds/die-lichtquelle-led/leds-farben-aus-dem-halbleiter/>, letzter Aufruf 04.05.2016

Lindbloom, Bruce, 2016, Chromatic Adaption, http://www.brucelindbloom.com/index.html?Eqn_ChromAdapt.html, letzter Aufruf 16.05.2016

Lübbe, Eva: Farbempfindung, Farbbeschreibung und Farbmessung, 2013, Springer Vieweg Verlag

Lumenetix: DDM One Spec Sheet, 2015, Lumenetix Inc.

Neumann, A., Wierer, J.J., Davis, W., Ohno, Y., Brueck, S.R.J., Tsao, J.Y.: Four-color laser white illuminant demonstrating high color-rendering quality, 2011, Optics Express

Noack, C. Claudius J.: Vorlesung Licht- und Messtechnik, 2016, HAW Hamburg

Ohno, Yoshi: Calculation of CCT and Duv and Practical Conversion Formulae, 2011, NIST (National Institute of Standards and Technology), PDF for CORM 2011 Conference

Ohno, Yoshi: Fundamentals of Colorimetry and Practical Colour Measurements, 2015, NIST (National Institute of Standards and Technology), PDF for UNEP (Collaborating Centre for Energy Efficient Lighting) GELC (Global Efficient Lighting Centre) Training Workshop

Ohno, Yoshi: Practical Use and Calculation of CCT and Duv, 2013, LEUKOS (Journal of the Illuminating Engineering Society of North America)

Osram, 2016, OSRAM-Wissen: die Lichtfarben der LED, <http://www.osram.de/media/resource/lightboxlarge2/333705/relative-spektrale-vertelung.jpg>, letzter Aufruf 04.05.2016

Rea, Mark S.: Value metrics for better lighting, 2013, SPIE

Ris, Hans Rudolf: Beleuchtungstechnik für Praktiker, 2015, VDE Verlag

Smet, K.A.G.; Schanda, J.; Whitehead, L.; Luo, R.M.: CRI 2012: A Proposal for updating the CIE colour rendering index, 2013, Lighting Research and Technology

Smet, K.A.G.; Schanda, J.; Whitehead, L.; Luo, R.M.: Toward a Replacement of the CIE Color Rendering Index for White Light Sources, 2015, LEUKOS (The Journal of the Illuminating Engineering Society (IES) of North America)

Söllner, Stefan: Untersuchungen zur spektralen Strahlungsverteilung für die Erzielung einer hohen Farbwiedergabegüte mit LEDs, 2009, TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, Diplomarbeit

Trilux: LED Guide, 2016, Trilux

Wikipedia, 2013, CIELUV-Farbraumsystem, <https://de.wikipedia.org/wiki/CIELUV-Farbraumsystem>, letzter Aufruf 20.05.2016

Wolfram Mathworld, 2016, Full Width at Half Maximum, <http://mathworld.wolfram.com/FullWidthHalfMaximum.html>, letzter Aufruf 14.06.2016

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Plancksches Strahlungsspektrum, Verschiebung des Maximums der Strahlungsverteilung hin zu kurzen Wellenlängen und Zunahme der spektralen Ausstrahlung bei hohen Temperaturen Quelle: Greule, Roland; 2015: 107
- Abbildung 2: LED-Spektren, Quelle: Osram, 2016, OSRAM-Wissen: Die Lichtfarben der LED, http://www.osram.de/osram_de/news-und-wissen/led-home/professionelles-wissen/led-grundlagen/lichtfarben/index.jsp, letzter Aufruf 04.05.016
- Abbildung 3: Spektrale Strahlungsverteilung der CIE-Normlichtarten A; Quelle: Hein, Mara; 2016
- Abbildung 4: Spektrale Strahlungsverteilung der CIE-Normlichtart D65; Quelle: Hein, Mara; 2016
- Abbildung 5: THT LED (z.B. 3,3mmx1,8mm), Quelle: TME Germany GmbH, 2014, Pastellfarbene THT- und SMD-Dioden von Optosupply, http://www.tme.eu/de/pages/New_Product:pastellfarbene-tht--und-smd-dioden-von-optosupply.html, letzter Aufruf 19.05.2016
- Abbildung 6: LED-Modul mit SMDs ($\varnothing 30\text{mm}$), Quelle: LED-Store, 2016, SMD LED Stiftsockellampe, <http://www.shop-014.de/michawi-p2453h305s358-SMD-LED-Stiftsockel-.html>, letzter Aufruf 05.05.2016
- Abbildung 7: Chip-on-Board Zenigata von Sharp (15mmx12mm), Quelle: Sharp, 2016, GW6NGWJCS0C, https://cdn.sharpsde.com/fileadmin/products/LED/downloads/2015/02/Product-Mini_Tuneable_White_8mm.png, letzter Aufruf 05.06.2016
- Abbildung 8: Flussdiagramm „vom Farbreiz zur Farbempfindung“, Quelle: Hein, Mara; 2016
- Abbildung 9: Relative spektrale Empfindlichkeit der Farbrezeptoren $\bar{s}(\lambda)$, $\bar{m}(\lambda)$, $\bar{l}(\lambda)$ Quelle: Lübbe, Eva; 2013: 14
- Abbildung 10: Spektralwertfunktionen der reelen Primärvalenzen \vec{B} (Blau), \vec{G} (Grün) und \vec{R} (Rot) zur Festlegung des 2°-Normalbeobachters Quelle: Lübbe, Eva; 2013: 23
- Abbildung 11: Spektralwertfunktionen $\bar{x}(\lambda)$ (Rot), $\bar{y}(\lambda)$ (Grün), $\bar{z}(\lambda)$ (Blau) des farbmtrischen 2°-Beobachters, Quelle: Hein, Mara; 2016
- Abbildung 12: durchgezogene Linien: Spektralwertfunktionen $\bar{x}(\lambda)$ (Rot), $\bar{y}(\lambda)$ (Grün), $\bar{z}(\lambda)$ (Blau) des farbmtrischen 2°-Beobachters; gestrichelte Linien: Spektralwertfunktionen $\bar{x}_{10}(\lambda)$ (Rot), $\bar{y}_{10}(\lambda)$ (Grün), $\bar{z}_{10}(\lambda)$ (Blau) des farbmtrischen 10°-Beobachters, Quelle: Hein, Mara; 2016
- Abbildung 13: MacAdam-Ellipsen (um den Faktor 10 vergrößert) im CIE 1931 Diagramm (x,y)

Quelle: CIE; CIE TN 001:2014: 2

Abbildung 14: MacAdam-Ellipsen (um den Faktor 10 vergrößert) im CIE 1976 Diagramm ($u'v'$)
Quelle: CIE; CIE TN 001:2014: 2

Abbildung 15: Planckscher Kurvenzug von 1000K bis 20.000K in der $u'v'$ -Farbtafel ;Quellen:
Darstellung in Excel von Mara Hein, Koordinaten BBC nach JETI und Noack,
Hintergrundbilder der Diagramme Wikipedia, 2013; efg2.com, 2009

Abbildung 16: Planckscher Kurvenzug von 1000K bis 20.000K in der u,v -Farbtafel ;Quellen:
Darstellung in Excel von Mara Hein, Koordinaten BBC nach JETI und Noack,
Hintergrundbilder der Diagramme Wikipedia, 2013; efg2.com, 2009

Abbildung 17: Beispiel einer Planckschen u,v -Tabelle nach Ohno, Quelle: Ohno, Yoshi; 2013

Abbildung 18: Prinzipien der Dreieck-Auflösung („triangularsolution“), Quelle: Ohno, Yoshi;
2013

Abbildung 19: fünffache MacAdam-Ellipsen für lineare Leuchtstofflampen nach IEC 60081
(IEC, 1997,) und sie annähernde Kreise mit einem Radius von 0,0055 in der $u'v'$ -
Farbtafel Quelle: CIE TN 001:2014

Abbildung 20: im ANSI-Standard C78.377-2015 festgelegte vier-stufige $u'v'$ -Kreise (Radius
0,0044, 4 SDCM entsprechend) Quelle: Ohno, Yoshi; 2015

Abbildung 21: Farbverlauf Halogenlampe A60 in der $u'v'$ -Farbtafel, die rote Markierung
kennzeichnet den betrachteten Ausschnitt, Quelle: Hein, Mara; 2016

Abbildung 22: berechnete SDCM nach der $u'v'$ -Kreismethode mit 100K-Schritten, Quelle: Hein,
Mara; 2016

Abbildung 23: Die 14 Testfarben nach DIN 6169, Quelle: Wikipedia, 2016,
[https://de.wikipedia.org/wiki/Farbwiedergabeindex#/media/File:DIN_Test_6169.s
vg](https://de.wikipedia.org/wiki/Farbwiedergabeindex#/media/File:DIN_Test_6169.svg), letzter Aufruf 02.05.2016

Abbildung 24: Wahrgenommene Helligkeit L^* in Abhängigkeit vom Hellbezugswert Y , $Y_n=100$,
Quelle: Hein, Mara; 2016

Abbildung 25: Diagrammbeispiel für die von der Autorin vorgeschlagene Verwendung der L^* -
Formel: Y_n entspricht dem Hellbezugswert Y des betrachteten Produktes bei
100% gemessener Helligkeit

Abbildung 26: Definition der optischen Bandbreite nach dem Rayleigh-Kriterium, Quelle: Jeti;
2015: 10

Abbildung 27: Definition der optischen Bandbreite nach der gemessenen FWHM, Quelle: Jeti;
2015: 10

Abbildung 28: Einfluss der Halbwertsbreite (FWHM) bei 5nm und 10nm auf das spezifische
Spektrum: LCD Fernseher mit CCFL Backlight, Quelle: Grafiken in Excel Hein,
Mara; 2016 ; Kalkulationstabelle Backrack, Lew; 2016

Abbildung 29: Einfluss der Halbwertsbreite (FWHM) bei 5nm und 10nm auf das spezifische
Spektrum: Kompaktleuchtstofflampe A60Quelle: Grafiken in Excel Hein, Mara;
2016 ; Kalkulationstabelle Backrack, Lew; 2016

- Abbildung 30: Einfluss der Halbwertsbreite (FWHM) bei 5nm und 10nm auf das spezifische Spektrum: Megaman DimtoWarm A60, Quelle: Grafiken in Excel Hein, Mara; 2016 ; Kalkulationstabelle Backrack, Lew; 2016
- Abbildung 31: Einfluss der Halbwertsbreite (FWHM) bei 5nm und 10nm auf das spezifische Spektrum: Halogenlampe Osram GU10 50W Quelle: Grafiken in Excel Hein, Mara; 2016 ; Kalkulationstabelle Backrack, Lew; 2016
- Abbildung 32: Einfluss der Halbwertsbreite (FWHM) von 5nm bis 20nm auf die Farbortkoordinaten u' und v' : LCD Fernseher mit CCFL Backlight, Quelle: Grafiken in Excel Hein, Mara; 2016 ; Kalkulationstabelle Backrack, Lew; 2016
- Abbildung 33: Einfluss der Halbwertsbreite (FWHM) von 5nm bis 20nm auf die Farbortkoordinaten u' und v' : Kompaktleuchtstofflampe A60, Quelle: Grafiken in Excel Hein, Mara; 2016 ; Kalkulationstabelle Backrack, Lew; 2016
- Abbildung 34: Einfluss der Halbwertsbreite (FWHM) von 5nm bis 20nm auf die Farbortkoordinaten u' und v' : Megaman DimtoWarm A60, Quelle: Grafiken in Excel Hein, Mara; 2016 ; Kalkulationstabelle Backrack, Lew; 2016
- Abbildung 35: Einfluss der Halbwertsbreite (FWHM) von 5nm bis 20nm auf die Farbortkoordinaten u' und v' : Halogenlampe Osram GU10 50W, Quelle: Grafiken in Excel Hein, Mara; 2016 ; Kalkulationstabelle Backrack, Lew; 2016
- Abbildung 36: Grober Aufbau des BTS256-EF, Quelle: telef. Gespräch mit Gigahertz Optik 13.04.2016
- Abbildung 37: Czerny-Turner-Aufbau, Quelle: Jeti; 2005;
- Abbildung 38: Das BTS256-EF von Gigahertz Optik, Quelle: Gigahertz Optik, 2016, Flickermessung mit dem BTS256-EF, <https://www.gigahertz-optik.de/de-de/service-und-support/informationsportal/flickermessung-mit-dem-bts256-ef/>, letzter Aufruf 15.05.2016

Kapitel Messtechnische Untersuchung:

Alle Excel-Grafiken sind von der Autorin erstellt. Die verwendeten Hintergrundgrafiken seien hier genannt:

4. Spektrale Strahlungsverteilung: BS-Wiki.de, 2015, http://www.bs-wiki.de/mediawiki/index.php/Elektromagnetisches_Spektrum, letzter Aufruf 27.05.2016;
5. Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen: Ausschnitt (1600K-3100K) von Lichtstrom Weser-EMS GmbH, 2016, <http://www.l-w-e.de/files/lichtstrom/images/content/lichtfarbe.png>, letzter Aufruf 27.05.2016;
6. Ausschnitt Farbortverlauf: Ausschnitt aus Wikipedia, 2008, https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:CIE_1976_UCS.png, letzter Aufruf 27.05.2016

- Abbildung 39: Skizze des prinzipiellen Messaufbaus mit der Black Box (Messkasten mit matter, schwarzer Oberfläche)
- Abbildung 40: Relative spektrale Strahlungsverteilung bei 100% relativer, gemessener Helligkeit, Vergleich Glühlampe klar A60 60W und Halogenlampe klar A60 105W
- Abbildung 41: Relative spektrale Strahlungsverteilung bei unterster Dimmstufe, Vergleich Glühlampe klar A60 60W und Halogenlampe klar A60 105W

- Abbildung 42: Relative spektrale Strahlungsverteilung MR16 Halogenlampen bei 100% relativer, gemessener Helligkeit
- Abbildung 43: Relative spektrale Strahlungsverteilung MR16 Halogenlampen bei unterster Dimmstufe
- Abbildung 44: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen, Glühlampe klar A60 60W
- Abbildung 45: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen, Halogenlampe klar A60 105W
- Abbildung 46: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen, Vergleich Halogen MR16, Glühlampe 60W, Halogenlampe 105W
- Abbildung 47: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen, Vergleich Halogen MR16, Glühlampe 60W, Halogenlampe 105W, Kurven auf gleichen Beginn gelegt
- Abbildung 48: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, Glühlampe klar A60 60W
- Abbildung 49: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, Halogenlampe klar A60 60W
- Abbildung 50: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, HALOPAR16 Value von Osram 50W
- Abbildung 51: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, Decostar von Osram 35W
- Abbildung 52: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, IR CC von GE 45W
- Abbildung 53: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, Brilliantline von Philips 35W
- Abbildung 54: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, Master UV-Filter von Philips 35W
- Abbildung 55: Ausschnitt u'v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Farbverlauf Glühlampe klar A60 60W
- Abbildung 56: Ausschnitt u'v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Farbverlauf Halogenlampe klar A60 105W
- Abbildung 57: Ausschnitt u'v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Farbverlauf HALOPAR16 Value von Osram 50W
- Abbildung 58: Ausschnitt u'v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Farbverlauf Decostar von Osram 35W
- Abbildung 59: Ausschnitt u'v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Farbverlauf IR CC von unbekanntem Hersteller 45W
- Abbildung 60: Spektrale Strahlungsverteilung bei 100% relativer, gemessener Helligkeit, IR CC von unbekanntem Hersteller 45W

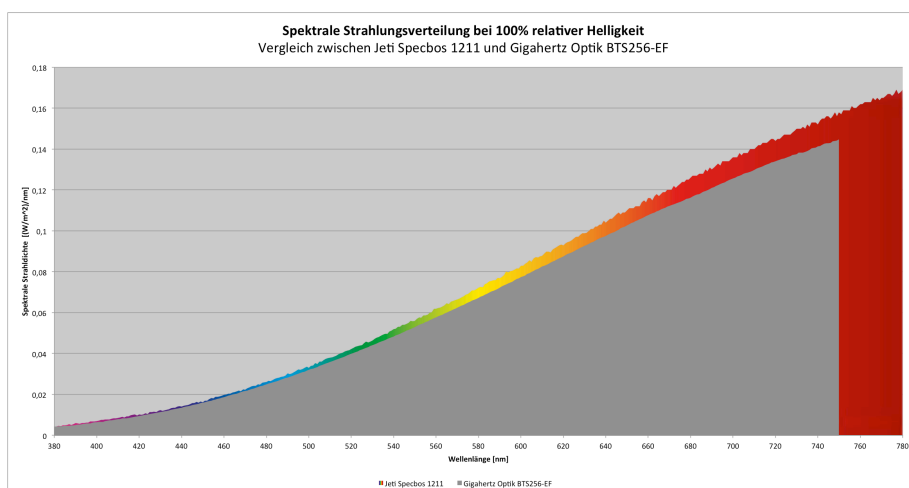
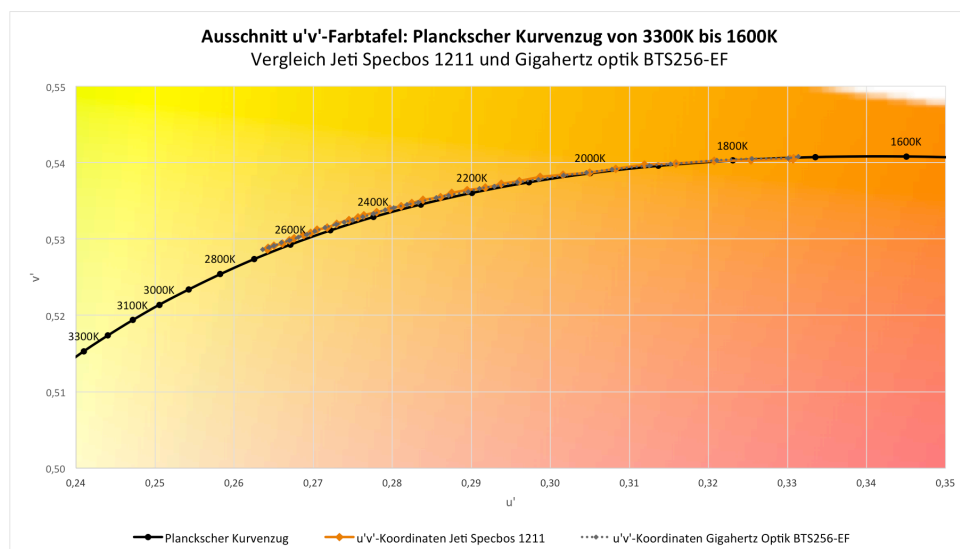
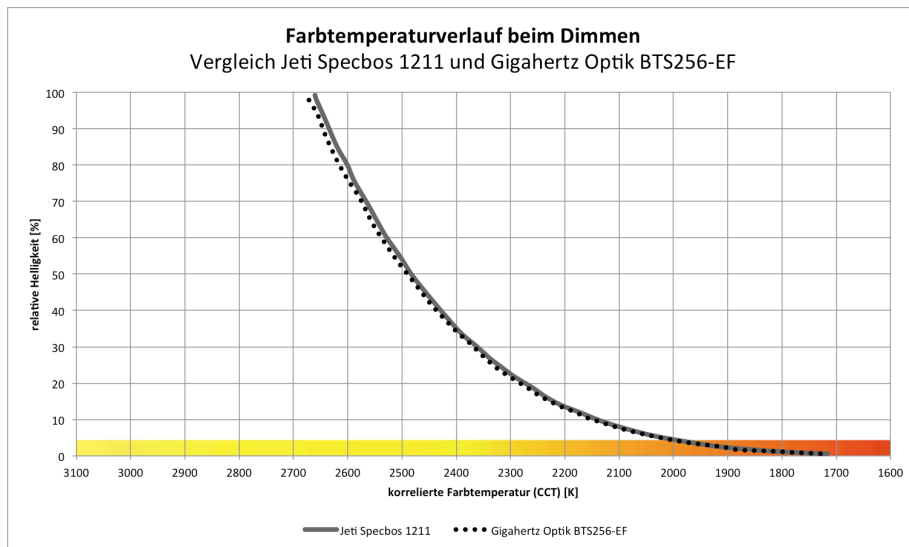
- Abbildung 61: Ausschnitt u'v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Farbortverlauf Brilliantline von Philips 35W
- Abbildung 62: Ausschnitt u'v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Farbortverlauf Master UV-Filter von Philips 35W
- Abbildung 63: wahrgenommene Helligkeit basierend auf L^* mit $Y_n=Y(100\%$ relative, gemessene Helligkeit), Glühlampe klar A60 60W
- Abbildung 64: wahrgenommene Helligkeit basierend auf L^* mit $Y_n=Y(100\%$ relative, gemessene Helligkeit), Halogenlampe klar A60 105W
- Abbildung 65: Relative spektrale Strahlungsverteilung bei 100% relativer, gemessener Helligkeit, Vergleich A60 und A65 LED Warm Dimming Retrofits
- Abbildung 66: Relative spektrale Strahlungsverteilung bei unterster Dimmstufe, Vergleich A60 und A65 LED Warm Dimming Retrofits
- Abbildung 67: Relative spektrale Strahlungsverteilung bei 100% und 20,83% relativer, gemessener Helligkeit, LED Lampe A65 Sunset Dimming von Ledon 10W
- Abbildung 68: Relative spektrale Strahlungsverteilung bei 100% relativer, gemessener Helligkeit, Vergleich MR16 LED Warm Dimming Retrofits
- Abbildung 69: Relative spektrale Strahlungsverteilung bei unterster Dimmstufe, Vergleich MR16 LED Warm Dimming Retrofits
- Abbildung 70: Relative spektrale Strahlungsverteilung bei 100% relativer, gemessener Helligkeit, Vergleich von A60 und A65 LED Warm Dimming Retrofits mit der Glühlampe klar A60 60W
- Abbildung 71: Relative spektrale Strahlungsverteilung bei 100% relativer, gemessener Helligkeit, Vergleich von MR16 LED Warm Dimming Retrofits mit der HALOPAR16 von Osram 50W
- Abbildung 72: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen, Vergleich von A60 und A65 LED Warm Dimming Retrofits mit der Glühlampe klar A60 60W
- Abbildung 73: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen, LED Lampe A65 Sunset Dimming von Ledon 10W
- Abbildung 74: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen, Vergleich von MR16 LED Warm Dimming Retrofits mit der Decostar von Osram 35W
- Abbildung 75: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf R_a und R_9 , LED Lampe MR16 Sunset Dimming von Ledon 7W
- Abbildung 76: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf R_a und R_9 , Parathome Advanced A60 GLOWdim von Osram 8,5W
- Abbildung 77: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf R_a und R_9 , LED Lampe A60 Sunset Dimming von Ledon 10W
- Abbildung 78: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf R_a und R_9 , Master LED A60 Dim Tone von Philips 8W

- Abbildung 79: Ausschnitt u'v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Farbortverlauf A60 und A65 LED Warm Dimming Retrofits
- Abbildung 80: Ausschnitt u'v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Farbortverlauf MR16 LED Warm Dimming Retrofits von Ledon und Philips
- Abbildung 81: Ausschnitt u'v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Farbortverlauf MR16 LED Warm Dimming Retrofits von Megaman und Osram
- Abbildung 82: wahrgenommene Helligkeit basierend auf L^* mit $Y_n=Y(100\% \text{ relative, gemessene Helligkeit})$, A60 Dim Tone von Philips 8W
- Abbildung 83: Relative spektrale Strahlungsverteilung bei 100% relativer, gemessener Helligkeit, Vergleich der verbauten LED-Chips in den LED Warm Dimming Leuchten + Vergleich mit Halogen
- Abbildung 84: Relative spektrale Strahlungsverteilung bei 100% relativer, gemessener Helligkeit, Vergleich der verbauten LED-Chips in den LED Warm Dimming Leuchten + Vergleich mit Halogen
- Abbildung 85: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen, Vergleich der verbauten LED-Chips in den LED Warm Dimming Leuchten + Vergleich mit Halogen- und Glühlampe
- Abbildung 86: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, Trybeca von Reggiani 13W (Sharp Chip-on-Board)
- Abbildung 87: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, Luxitune Gen 2.0 WF von LEDengin
- Abbildung 88: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, Panos Infinity von Zumtobel 12W (Cree LED-Chip mit SMDs)
- Abbildung 89: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, Air Mini WarmZero von ACDC 12,5W (Lumenetix LED-Chip mit SMDs)
- Abbildung 90: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur beim Dimmen und Verlauf Ra und R9, Alphabet Spectra von WILA 20W (Lumenetix LED-Chip mit SMDs)
- Abbildung 91: Ausschnitt u'v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Vergleich Farbortverlauf LED Warm Dimming Leuchten mit Sharp Chip-on-Board
- Abbildung 92: Ausschnitt u'v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Farbortverlauf Luxitune Gen 2.0 WF Developmentkit von LEDengin
- Abbildung 93: Ausschnitt u'v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Farbortverlauf Panos Infinity von Zumtobel 12W (Cree LED-Chip mit SMDs)
- Abbildung 94: Ausschnitt u'v'-Farbtafel: Planckscher Kurvenzug von 3300K bis 1600K, Vergleich Farbortverlauf LED Warm Dimming Leuchten mit Lumenetix LED-Chip
- Abbildung 95: wahrgenommene Helligkeit basierend auf L^* mit $Y_n=Y(100\% \text{ re., gem. Helligkeit})$, Trybeca von Reggiani 13W (Sharp Chip-on-Board)

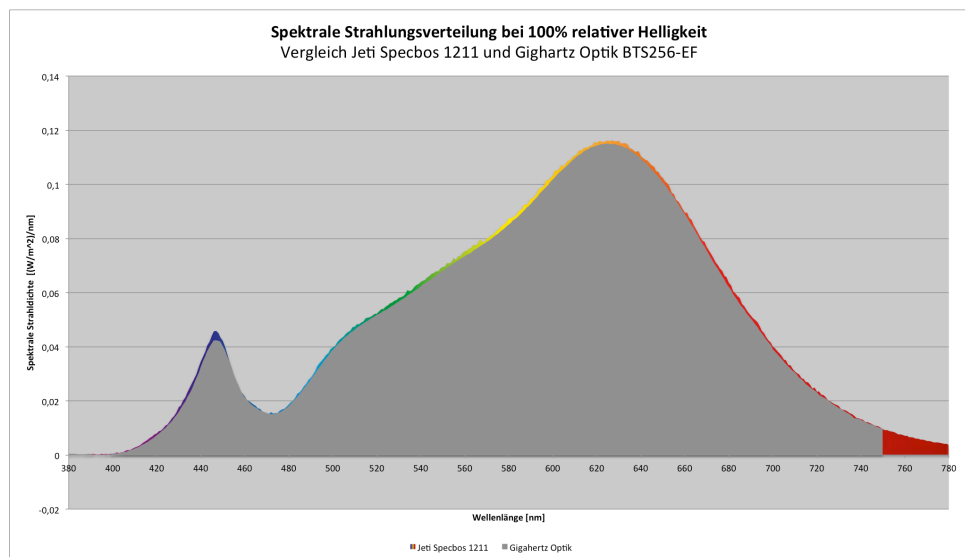
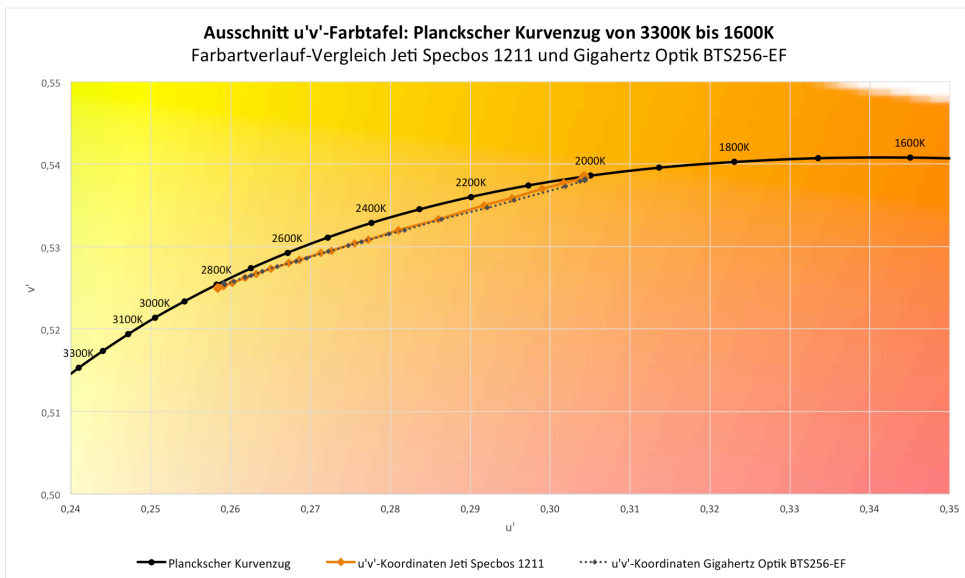
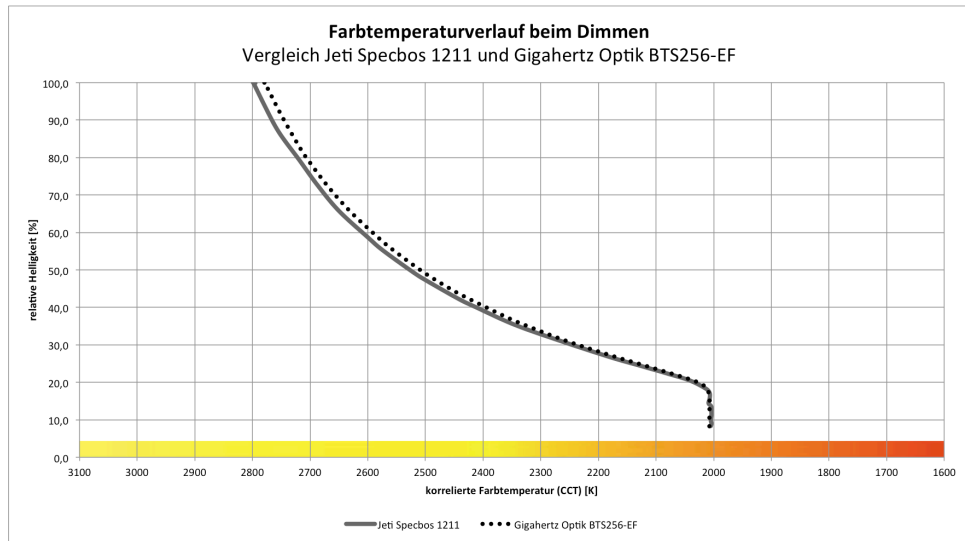
Anhang

1. Messwertvergleich Spektrometer

Zur Halogenlampe Osram GU10 50W:



zur Ledon GU10 Sunset Dimming:



2. Busch&Jäger LED-Dimmer 5236 U: Technische Daten und mögliche Lastarten

gesamte PDF downloadbar unter:

http://www.busch-jaeger-katalog.de/files_ONLINE/6523_BA_BJE_DinA4-Online_ger.pdf

1373-1-7953 | | 14.06.2012

LED-Dimmer

LED-Dimmer
6523 U



4 Technische Daten

Allgemein	
Nennspannung:	230 V~ ±10 %, 50 / 60 Hz
Nennleistung: (abhängig von der Umgebungstemperatur)	100 W / VA
Kurzschlussicherung:	elektronisch
Überlastschutz:	elektronisch
Umgebungstemperaturbereich:	0 °C – +35 °C
Schutzklasse:	IP 20
Klemme 4:	Maximal 100 mA

Zulässige Lasten	
Dimmbare Retrofit LEDi, 230 V~	
Min., Max. Last	2 W / VA, 25 W / VA ¹
Minimalstrom	8 mA
Max. Anzahl	20
Halogenlampen, 230 V~	
Min., Max. Last	10 W, 100 W
Minimalstrom	43 mA
Dimmbare Retrofit LEDi, 12 V~	
Min., Max. Last	4 W / VA, 25 W / VA ¹
Minimalstrom	16 mA
Max. Anzahl	20
Dimmbare Energiesparlampen	
Min., Max. Last	10 W, 100 W
Minimalstrom	43 mA
Glühlampen, 230 V~	
Min., Max. Last	10 W, 100 W
Minimalstrom	43 mA













1) Anschlussleistung bei LEDi Lasten

Oberhalb einer Anschlussleistung von 25 WVA sind beim Anschluss von LEDi nach IEC 61000-3-2 geeignete Maßnahmen zur Erhöhung der Anschlussleistung auf max. 100 VA notwendig, beispielsweise durch den Einsatz von Oberwellenfiltern.

5 Aufbau und Funktion

5.1 Lastarten

Das Gerät ermöglicht die Ansteuerung und das Dimmen der folgenden Lastarten:

 230 V~	Halogenlampen 230 V~
 230 V~	Glühlampen 230 V~
 230 V~	Dimmbare Halogen-Energiesparlampen ²⁾
 LEDi 230 V~	Dimmbare Retrofit-LED-Leuchtmittel (LEDi) 230 V~
 LEDi   	Dimmbare Niedervolt Retrofit-LED-Leuchtmittel (LEDi) an konventionellen Transformatoren oder Elektronik-Transformatoren (L, LC) ¹⁾
   	Dimmbare Niedervolthalogenlampen an konventionellen Transformatoren oder Elektronik-Transformatoren (L, LC) ¹⁾

Der Betrieb von Mischlasten ist zulässig.

- 1) Verwenden Sie nur L oder LC Transformatoren. Reine C Transformatoren sind nicht zulässig.
Bei der Verwendung von Transformatoren müssen die Angaben der jeweiligen Hersteller beachtet werden.
Beachten Sie insbesondere die Angaben zur Mindestlast.
- 2) Verwenden Sie nur Energiesparlampen, die als dimmbar gekennzeichnet sind.



Hinweis

Das Gerät ist optimiert für das Dimmen von Philips Retrofit-LED-Leuchtmittel (LEDi).

3. eldoLED: Toolbox und DUALdrive 560/A

PDF zur Toolbox herunterzuladen unter: <https://www.eldoled.com/led-drivers/accessories/toolbox-pro/toolbox-pro/>

eldoLED

your product | our drive

Datasheet TOOLbox pro **Accessories**

Colour is our nature

TOOLbox pro, the easy LED driver configuration tool

The TOOLbox pro is an easy-to-use, powerful configuration device for your eldoLED LED driver. Depending on the LED driver you need to configure, you will use either the FluxTool software or the ShowMaster DMX software. Both software programs are freely downloadable at www.eldoled.com/software.

FluxTool software

With the FluxTool software, you can

- program the driver via its LEDcode interface (e.g. precise current settings and dimming curve)
- set DMX parameters
- test DALI functionality

You can run FluxTool on both Windows and Mac systems.

ShowMaster DMX software

The ShowMaster DMX software lets you

- use ShowMaster to create show sequences, manage show libraries and upload shows to the driver for standalone mode
- set DMX parameters (no LED output current settings)

The ShowMaster DMX software can only be run on 32-bit Windows operating systems.



TOOLbox pro

Features & benefits

- advanced configuration parameters
- in-field programming of drivers
- future proofing of installations
- ShowMaster programming for standalone operation
- LED indicators for LEDcode, DMX and DALI activity
- ethernet and USB cable included

System requirements

- free USB port
- 256MB memory
- 1GB Pentium 4 CPU
- FluxTool software: 32-bit or 64-bit
Microsoft Windows XP, Vista or 7,
or Mac OS X 10.6/10.7/10.8 operating system

ShowMaster DMX software:
32-bit Microsoft Windows XP, Vista or 7



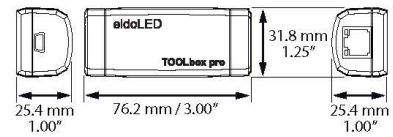
Product offering

Description	Product	Order no.
TOOLbox pro, LEDcode, DALI & DMX parameter programmer	TOOLbox pro	TLU20504
TOOLbox pro programming cable, LEDcode/DALI/DMX, 5-pack	TOOLbox pro programming cable	TLC03051

© 2015 eldoLED. All rights reserved. V2.3 More product documentation and eldoLED's terms and conditions are available at www.eldoled.com.

Dimensions and weight

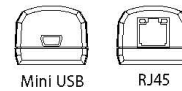
- Weight: 30 g / 1.06 oz



Connections

Connectors TOOLbox pro

- Data in: mini USB
- Data out: RJ45: DMX: pin 1 (DMX+), 2 (DMX-) and 7 (DMX shield)
DALI: pin 4 (DALI -) and 5 (DALI +)
LEDcode: pin 6 (LEDcode+) and pin 8 (LEDcode-)



Other information

Certifications

- CE

Environmental ratings

- Ta range: -20°C...+50°C / -4°F...+122°F

Europe, Rest of World

eldoLED B.V.
Science Park Eindhoven 5125
NL-5692 ED Son
The Netherlands
sales@eldoled.com

North America

eldoLED America
One Lithonia Way
Conyers, GA 30012
USA
nasales@eldoled.com

Warranty

eldoLED represents and warrants that for a period of 3 (three) years, as of the date of invoice, Products materially meet the specifications and specifically agreed upon quality, both as stated in the applicable data-sheet and/or written design-in specifications, or as stated in writing otherwise by eldoLED, provided that these specifications are explicitly designated by eldoLED as "warranted specifications".
For the complete warranty text and further product documentation, visit www.eldoled.com.



Light
is our passion

50W DALI 'Dim to Dark' LED Drivers

Input characteristics

Input voltage AC	120-250V (ENEC approved) 120-277V (UL approved)
Input voltage DC	120-250V
Input current	0.7A max
Input frequency	50-60Hz
Efficiency @ full load	89%
Efficiency @ 2/3 load	≥85%
Power factor @ full load	>0.9
THD @ full load	<20%
Inrush current	negligible: 30mA ² s @ 277V
Surge protection	1kV DM, 2kV CM
Standby power	<0.5W

Output characteristics

LED output power	50W max
LED output current range	200-1,050mA (settable per output)
LED output current resolution	programmable in 1mA steps
LED output current tolerance	+/- 5%
LED outputs	2 (UL Class 2)
LED output voltage range	2-55V

Control characteristics

Control channels	2
Dimming protocol	DALI
Dimming range	100%-0%
Dimming method	Hybrid HydraDrive
Dimming curve	linear or logarithmic
Driver configuration	with TOOLbox pro and FluxTool software

Protection

LED output short	yes
LED output cross short	yes
Overload	yes
Reverse polarity	yes, for LED output
Restart after protection	yes

Product offering



DUALdrive 560/A P/N: DL0560A1
DUALdrive AC, 50W, DALI, 2 ballasts, constant current, 2x 55V outputs, square metal/plastic

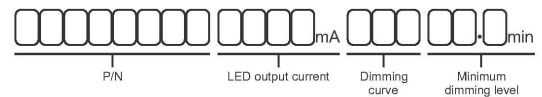


DUALdrive 560/M P/N: DL0560M1
DUALdrive AC, 50W, DALI, 2 ballasts, constant current, 2x 55V outputs, long metal



DUALdrive 560/S P/N: DL0560S1
DUALdrive AC, 50W, DALI, 2 ballasts, constant current, 2x 55V outputs, square metal

Order number configuration



P/N: for LED driver part number, see 'Product offering' above.

LED output current: in 1mA steps, e.g. "0258", "1011", etc.

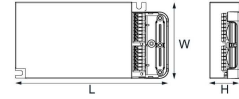
Dimming curve: enter "LOG" for a logarithmic, "LIN" for a linear dimming curve.

Minimum dimming level: write to one decimal place, e.g. "05.0" for 5%, "07.5" for 7.5%, "10.1" for 10.1%, etc. Leave blank if default minimum dimming level (0.1%) is required.

Dimensions, weight and packaging

DUALdrive 560/A

LxWxH	152.5x76x30.1mm / 6x2.99x1.19in
Weight	372 g / 13.12 oz
Drivers per carton	6 or 45 pcs



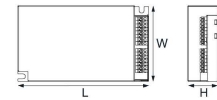
DUALdrive 560/M

LxWxH	444x29.9x21mm / 17.48x1.18x0.83in
Weight	360 g / 12.7 oz
Drivers per carton	8 or 28 pcs



DUALdrive 560/S

LxWxH	130x76x30mm / 5.12x2.99x1.18in
Weight	350 g / 12.35 oz
Drivers per carton	6, 10 or 45 pcs



Standards and certifications

Standards compliance

EN	61347-1/-2-13, 62384, 55015, 55022, 61000-3-2, 61547, 62386-101/-102/-207
UL, Recognized Component	UL 1310, UL 8750 (Class 2 output)
FCC	47 CFR Part 15 class B
RoHS	RoHS2

Certifications



Wiring Specifications

Wire type	AWG 20-16, 0.5-1.5mm ² solid or stranded copper
Wire strip length	9mm / 0.35in

Wiring diagrams

DUALdrive 560/A, 560/S



DUALdrive 560/M



Thermal protection

External NTC thermistor	throttling @ 70 °C / 158 °F (settable)
External thermistor value	47kΩ
Recommended thermistors	238164063473 (leaded) NTCASCWE3473J (screw)

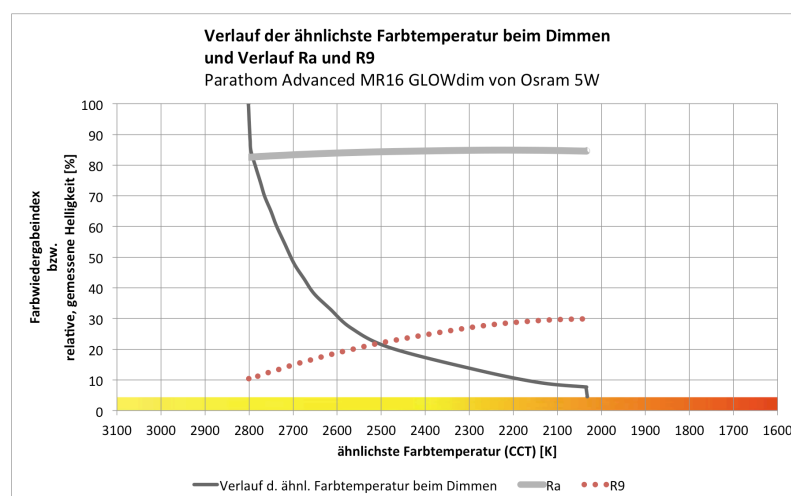
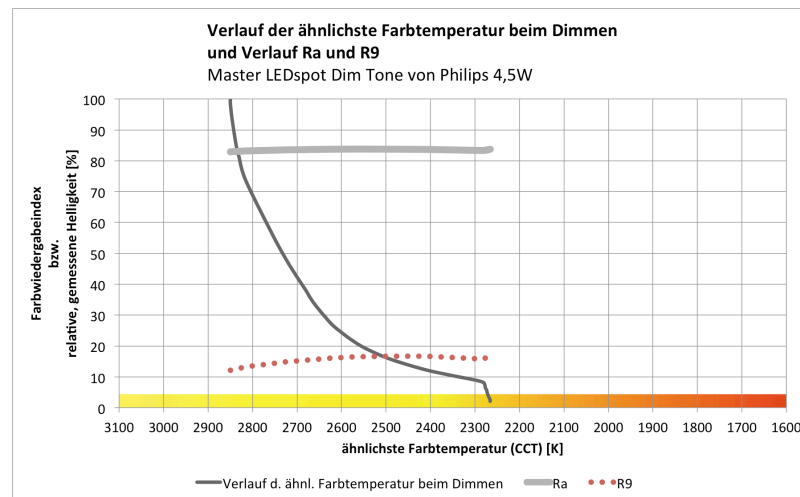
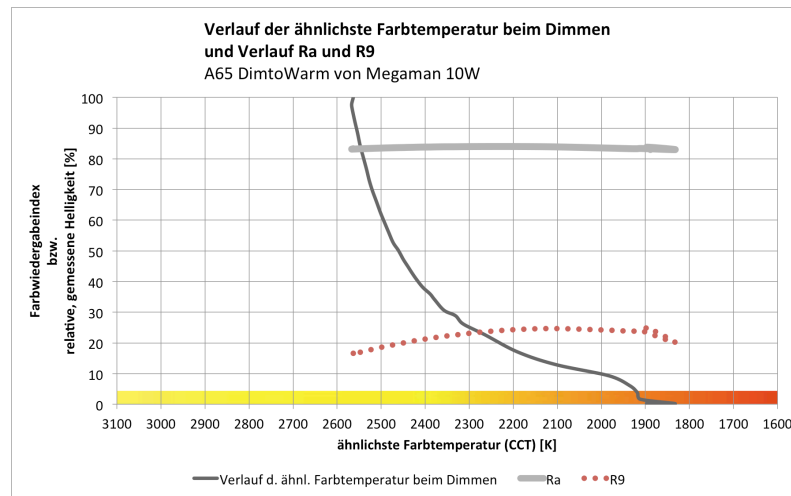
Thermal specification

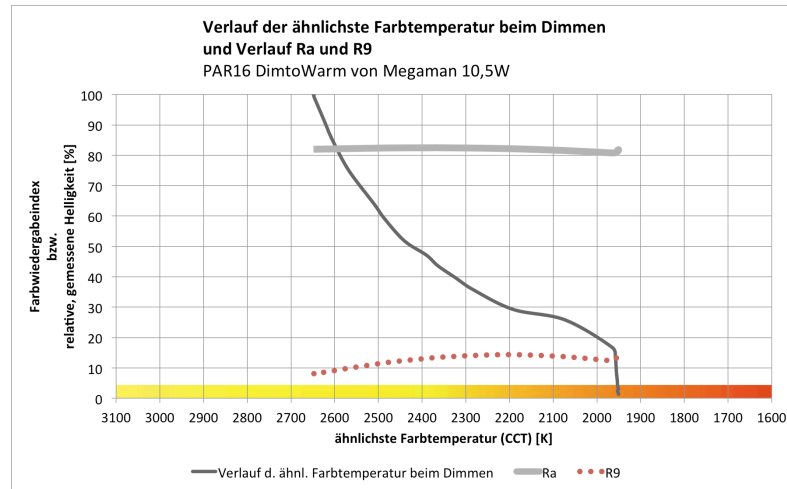
Ta operating range	-20 °C ... +50 °C / -4 °F ... +122 °F
Tc max	85 °C / 185 °F
Tc lifetime	78 °C / 172.4 °F

Warranty

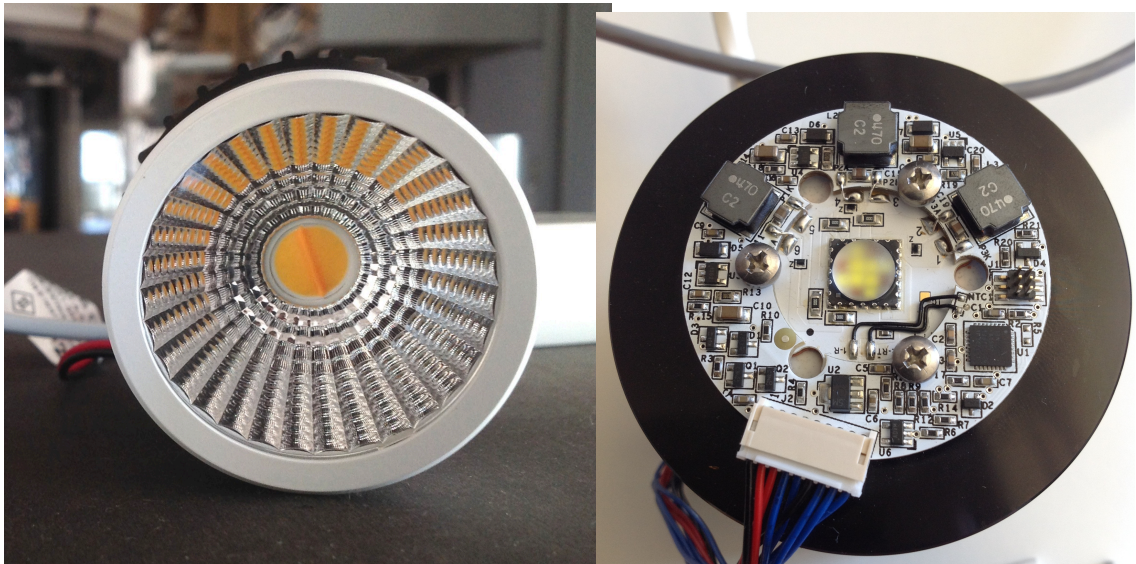
Warranty period	3 years
-----------------	---------

4. Farbwiedergabeindizes Ra und R9 – weitere Grafiken

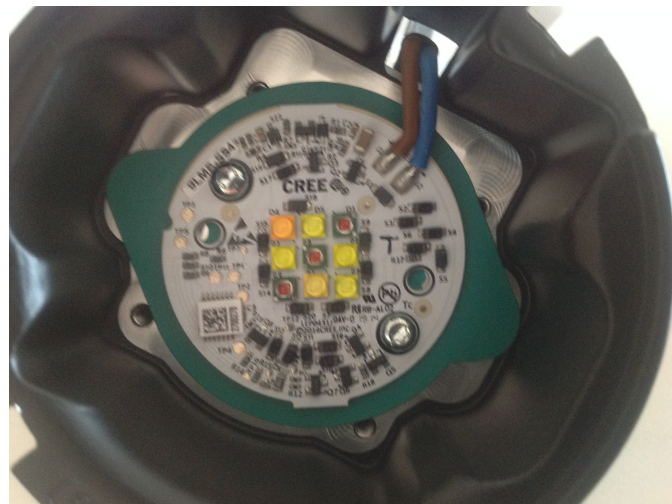




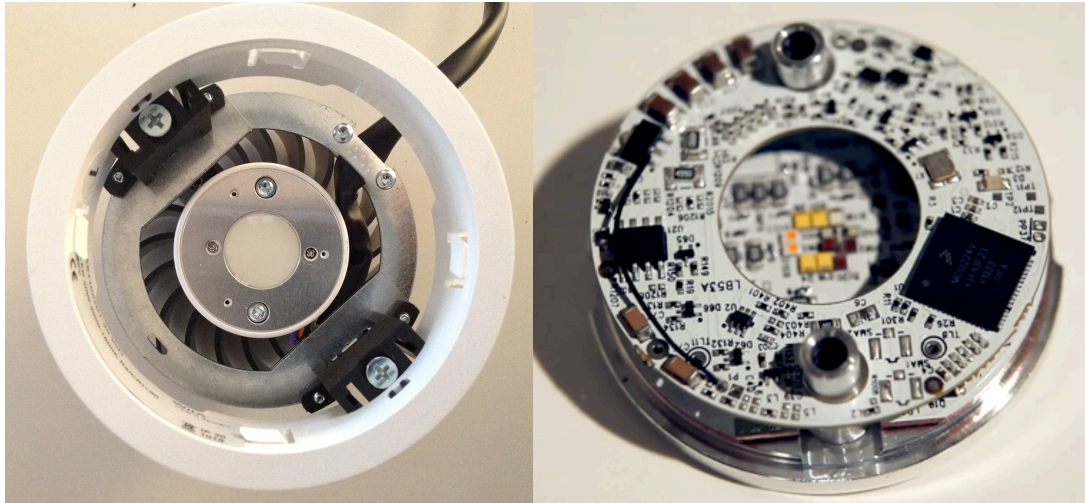
5. LED Warm Dimming Leuchten: verbaute LED-Chips



links: Sharp Chip-on-Board in der Leuchte Play von LEDS C4, rechts: Luxitone LED-Chip Gen 2.0 von LEDengin (Developmentkit ohne Optik)

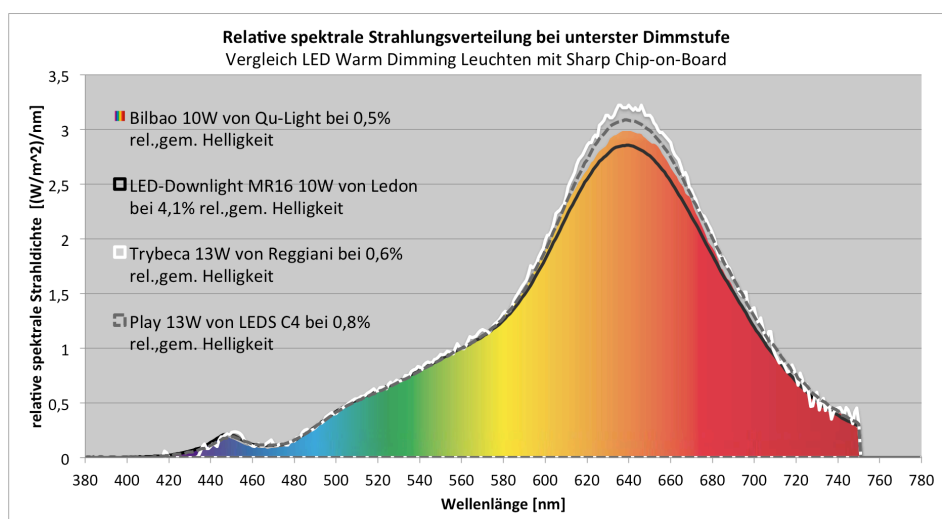
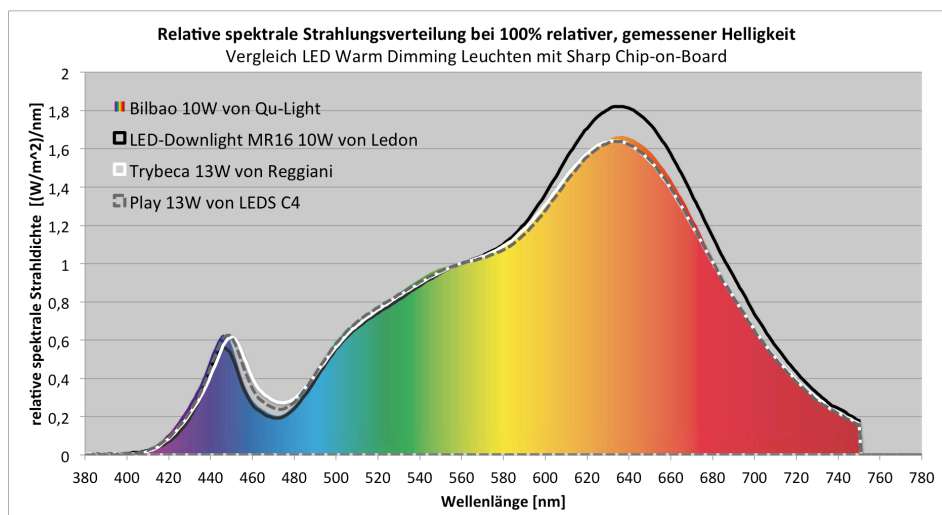


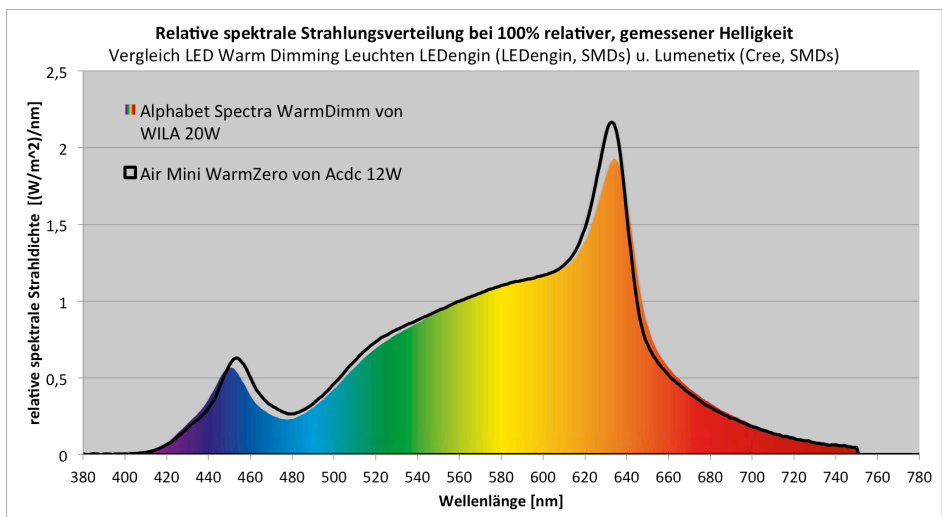
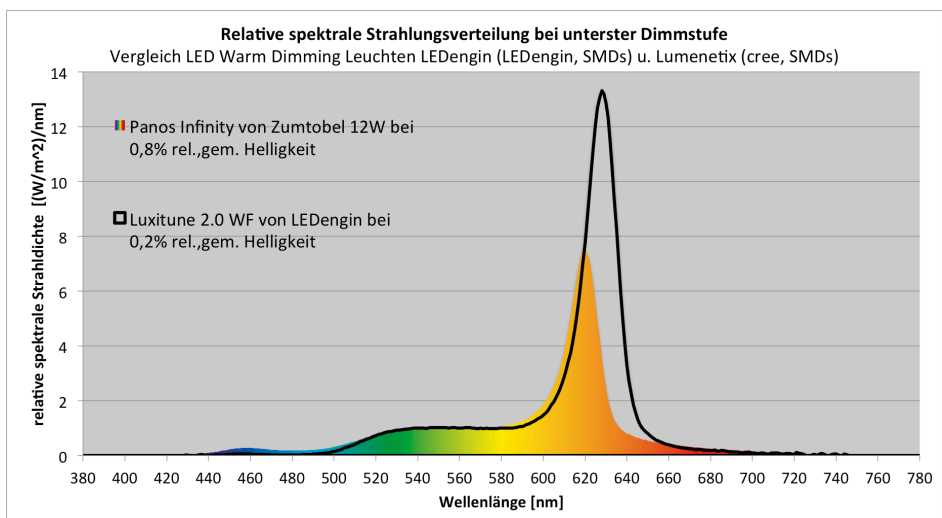
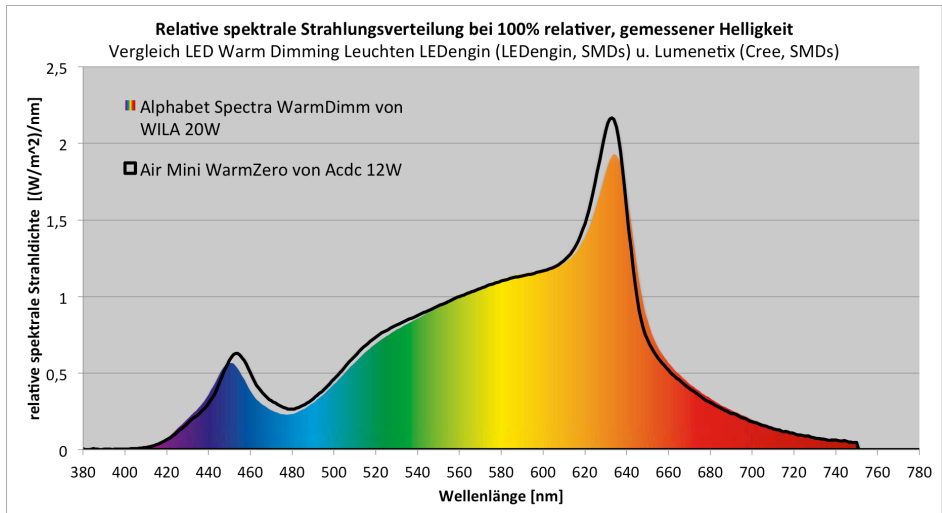
Cree LED-Chip in der Panos Infinity warmDimming von Zumtobel

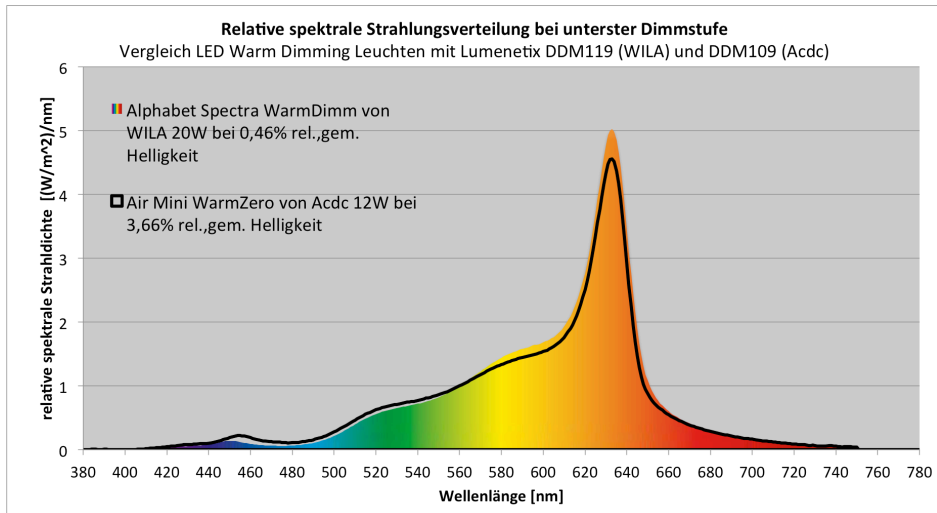


links: Lumenetix LED-Chip im Gehäuse in der Alphabet Spectra von WILA (ohne eingesetzten Reflektor), rechts: Einblick in das Gehäuse, Quelle: www.lumenetix.com, Screenshot aus dem Video *Araya Scene Set* (bei 00:36), 2014

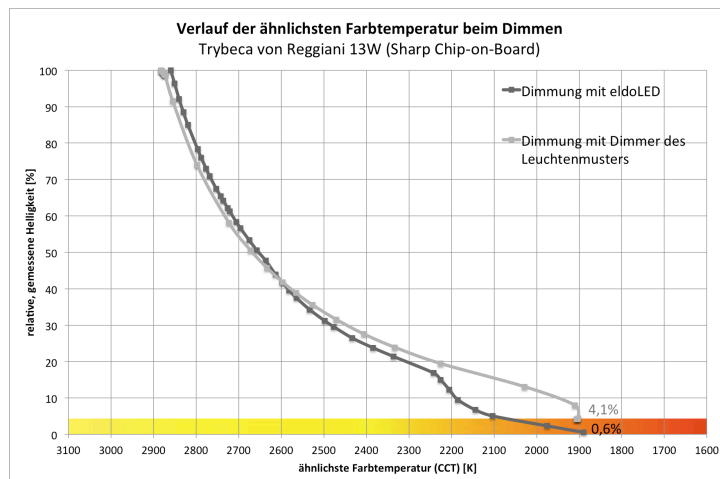
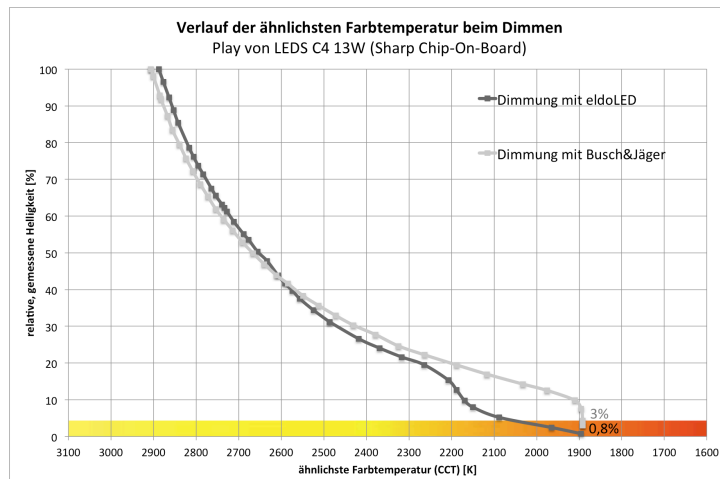
6. LED Warm Dimming Leuchten: Relative spektrale Verteilungen

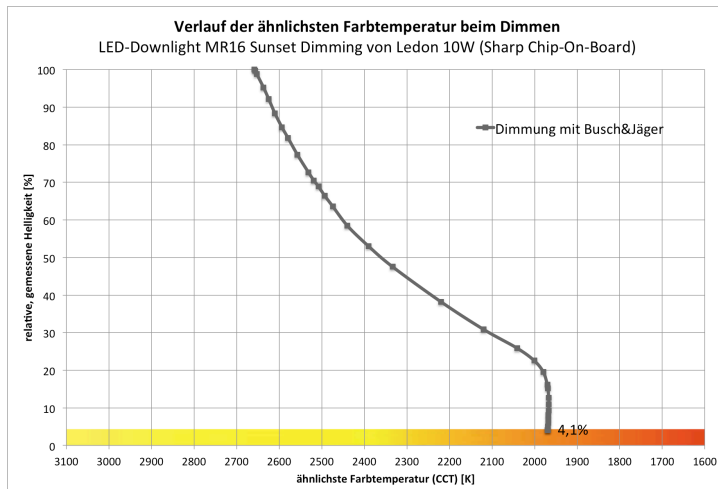
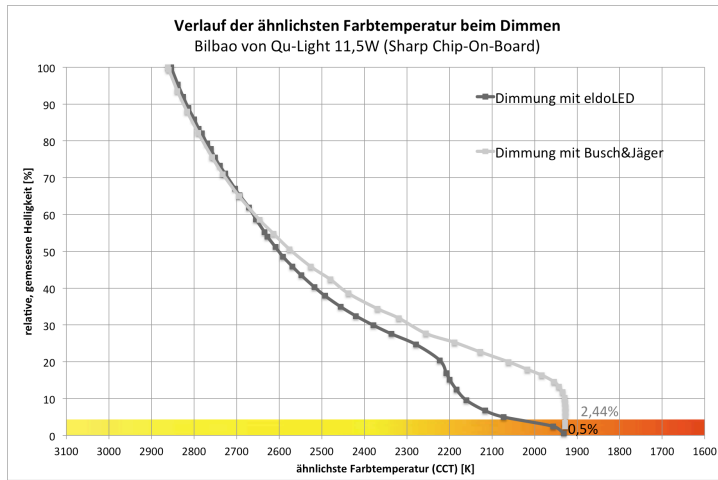




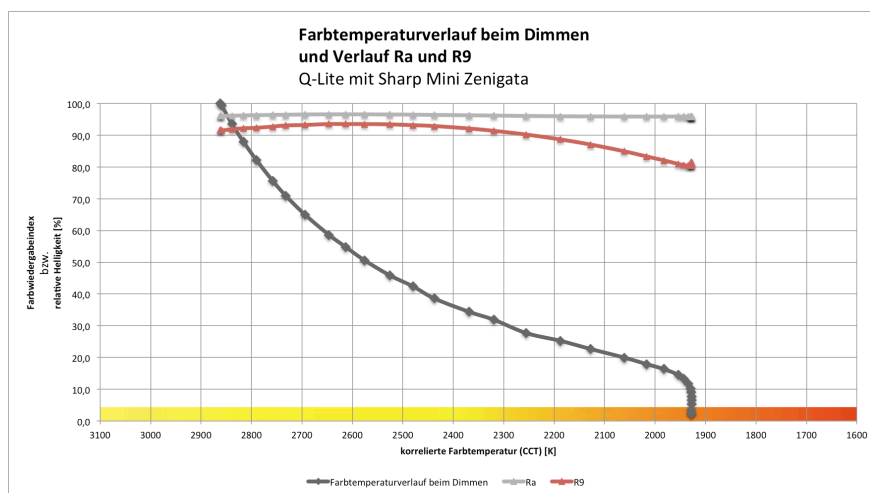
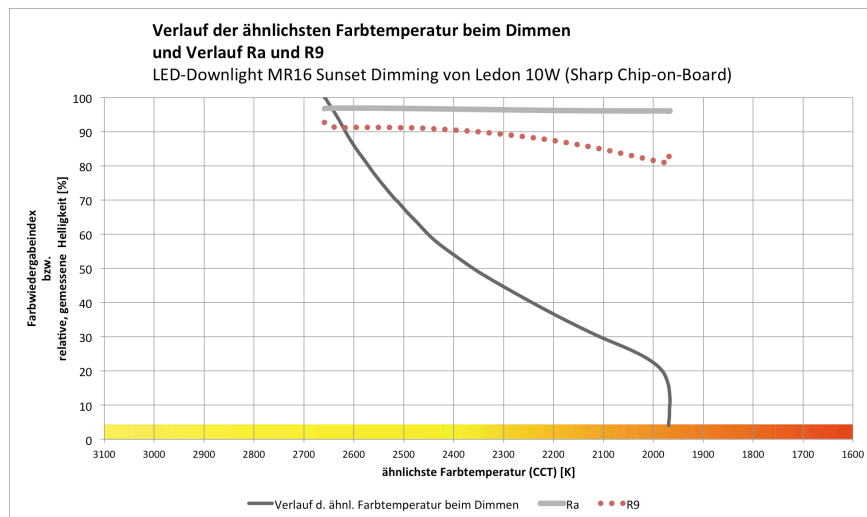
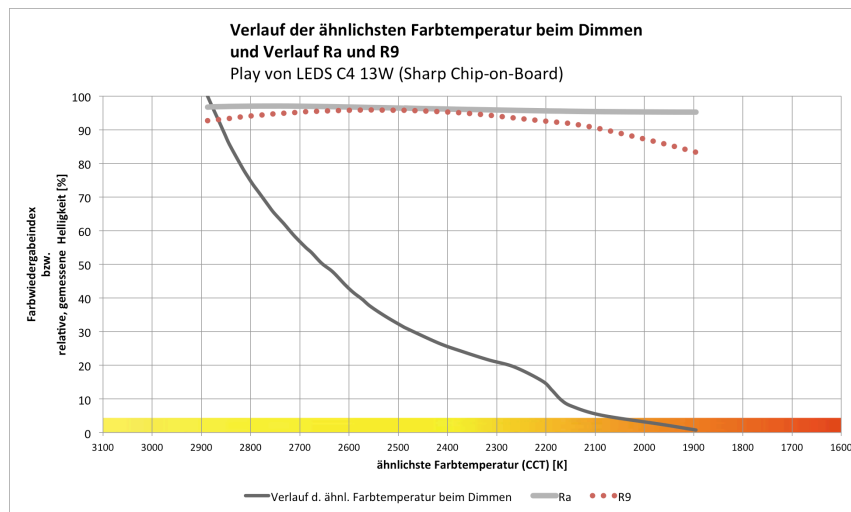


7. LED Warm Dimming Leuchten: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur bei Dimmen





8. LED Warm Dimming Leuchten: Verlauf von Ra und R9



9. ACDC Muster Leuchte Play

Dieses Leuchtenmuster wurde aufgrund der festen Installation nicht auseinander gebaut.

