Untersuchung von Spektralwertfunktionen für die Beschreibung der Wahrnehmung von Lichtfarbenunterschieden in Abhängigkeit von Alter und Umfeldlichtfarbe

Johannes Michl, Johannes Kolmer, Karin Bieske, Nicole Stubenrauch
Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik
Prof.-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau
karin.bieske@tu-ilmenau.de

Zusammenfassung

In der Praxis sind trotz messtechnisch gleicher Farbörter zum Teil deutliche Lichtfarbenunterschiede bei weißen LEDs beobachtet worden. Es werden Unzulänglichkeiten in den Normspektralwertfunktionen angenommen. Im Laborversuch wurden zehn LED-Typen paarweise in Lichtboxen mit Streuscheiben dargeboten und von insgesamt 80 jüngeren und älteren Probanden (< 35 Jahre vs. > 60 Jahre) anhand einer semantischen Skala bewertet. Der Vergleich der subjektiven Probandenurteile mit den rechnerischen Farbabständen $\Delta u'v'$ liefert eine Aussage über die Eignung der untersuchten Spektralwertfunktionen zur Modellierung der subjektiv wahrgenommenen Lichtfarbenunterscheide. Neben den Normspektralwertfunktionen CIE1931 und CIE1964, wurden die 2006 von der CIE veröffentlichten Spektralwertfunktionen CIE-2006-2° und CIE-2006-10° sowie die von POLSTER vorgeschlagenen Kurven 2006 TUIL-2° und 2006 TUIL-10° in die Untersuchung einbezogen. Zusätzlich wurden altersangepasste Spektralwertfunktionen nach CIE 170-1:2006 betrachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass alle getesteten Spektralwertfunktionen mit der subjektiven Farbwahrnehmung aller Probanden kaum korrelieren. Die besten Übereinstimmungen wurde mit den Spektralwertfunktionen 2006 TUIL-2° von POLSTER und CIE-2006-10° erzielt. Die Ergebnisse sind signifikant vom Alter der Probanden abhängig. Für jüngere Probanden kann die Wahrnehmung von Lichtfarbenunterschieden am besten mit den von POLSTER vorgeschlagenen Spektralwertfunktionen vorhergesagt werden. Für ältere Testpersonen liefern die Anwendung der Normspektralwertfunktionen CIE1931 und die altersangepassten Spektralwertfunktionen CIE 2006-10° A70 und 2006 TUIL 10° A70 die besseren Ergebnisse. Eine Veränderung der Bewertung des Lichtfarbenunterschiedes abhängig von der Umfeldlichtfarbe (2700 K, 3500 K, 6500 K und ohne Zusatzbeleuchtung) konnte nicht nachgewiesen werden. Jedoch ändern sich die wahrgenommenen Farben des Testzeichens in Abhängigkeit von der Lichtfarbe des adaptationsbestimmenden Umfeldes und vom Alter der Beobachter.

1 Einleitung und Stand der Wissenschaft

LEDs (Licht emittierende Dioden) haben sich in vielen Bereichen der Beleuchtungstechnik etabliert. Dabei werden oft mehrere LEDs in einem Beleuchtungssystem verbaut. Wesentlich für die Qualität der Beleuchtung ist ein homogenes Erscheinungsbild in Leuchtdichte und Lichtfarbe innerhalb und zwischen Leuchten. Toleranzen im Herstellungsprozess und im Betrieb von LEDs führen zu Varianzen in Spektralverteilung und Lichtfarbe [1]. Deren Kontrolle macht eine fotometrische und farbmetrische Charakterisierung und Klassifizierung (Binning) der LEDs erforderlich. Standard für die farbmetrische Messung von LEDs und das LED-Binning sind die CIE-1931-Normspektralwertfunktionen [2].

In Untersuchungen zeigten sich jedoch Schwierigkeiten bei der Modellierung der Farbwahrnehmung auf Basis der standardisierten Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 und 1964. Trotz messtechnisch gleicher Farbörter werden Lichtfarbenunterschiede erkannt [3], [4]. Je nach Spektralverteilung sind für weiße LEDs mit identischen Farbkoordinaten (CIE 1931) für visuelle Gleichheit der Lichtfarben Farbraumfehler bis zu $\Delta u'v'$ = 0,0165 von POLSTER beschrieben worden [5]. Die Farbdiskriminationsschwelle für weiße LED-Lichtfarben liegen nach KRAMER zwischen $\Delta u'v'$ = 0,0004 bis $\Delta u'v'$ = 0,0018 [6]. Die beobachteten Lichtfarbenunterschiede sind zum Teil deutlich auffällig und führen in praktischen Anwendungen zu kritisierten Lichtfarbunterschieden.

Im Technischen Report CIE 170-1: 2006 sind seitens der CIE physiologisch begründetet Spektralwertfunktionen veröffentlicht worden, die für einen Sehwinkelbereich von 1° bis 10° angepasst werden können (CIE 2006 2°/ CIE 2006 10°) und auch altersabhängige Veränderungen der Augenmedien berücksichtigen [7]. Basierend auf umfangreichen Arbeiten mit LED-Spektralkombinationen für weiße Lichtfarben gibt es von POLSTER Vorschläge für neue Spektralwertfunktionen: 2006 TUIL 2° und 2006 TUIL 10° [5].

Die Farbwahrnehmung wird durch viele Faktoren beeinflusst. Neben dem Sehobjekt selbst spielen die Beobachtungsbedingungen, wie die Lichtfarbe in der Umgebung eines Sehobjekts, eine Rolle. Zusätzlich beeinflussen individuelle Unterschiede zwischen Beobachtern die Wahrnehmung der Lichtfarbe. Eigenschaften der Linse und der Schicht des Makulapigments, die Dichte des Photopigments sowie die Anzahl und Verteilung der Rezeptoren in der Retina variieren zwischen Personen [8], [9]. Interindividuelle Unterschiede sowie altersabhänge Bewertungen liegen nahe und werden in Auswertung der Untersuchung mit betrachtet. Der Technische Report CIE 170-1: 2006 bietet Ansätze für die Berücksichtigung altersabhängiger Augenveränderungen [7].

2 Forschungshypothesen

Ziel der Untersuchung ist es, verschiedene Spektralwertfunktionen auf ihre Eignung für die Modellierung der Farbwahrnehmung zu testen. Ausgangspunkt sind folgenden Hypothesen:

1. Die neu vorgeschlagenen Spektralwertfunktionen nach POLSTER modellieren die Farbwahrnehmung von weißen LED-Lichtquellen besser als die Normspektralwertfunktionen.
2. Bei der Bewertung von Lichtfarbenunterschieden zeigen sich signifikante Unterschiede in Abhängigkeit vom Alter und können auf Basis der CIE 170-1: 2006 [7] gut beschreiben werden.
3. Unterschiedliche Lichtfarben im Umfeld haben keinen Einfluss auf die Bewertung des Lichtfarbenunterschieds, jedoch ändert sich die empfundene Lichtfarbe.

3 Untersuchungen

Basierend auf der Simulation möglicher Variationen im Spektrum durch Herstellungsprozess und Betrieb für weiße leuchtstoffkonvertierte LEDs mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von CCT = 4000 K wurden LED-Typen bezüglich ihrer Farbortunterschiede bei Verwendung unterschiedlicher Spektralwertfunktionen ausgewählt, gefertigt und messtechnisch charakterisiert. Dabei wurden die Normspektralwertfunktionen CIE 1931 und CIE 1964, die Spektralwertfunktionen CIE 2006 2° und 10°, sowie die von POLSTER vorgeschlagenen Spektralwertfunktionen 2006 TUIL 2° und 2006 TUIL 10° einbezogen [10], [7], [5]. Diese sind in Abbildung 1 gezeigt. Außerdem wurden Spektralwertfunktionen für ältere Personen mit einem Alter von 60 Jahren auf Grundlage von CIE 170-1: 2006 berechnet [7]. Ausgewählt wurden solche Spektren, die in den Bewertungssystemen verschiedene Lichtfarbenunterschiede vorhersagen. Zehn unterschiedliche LED-Typen konnten gefertigt werden und wurden vom Hersteller für unterschiedliche Betriebsbedingungen charakterisiert. Die LEDs wurden in COB[1]-Technologie ausgeführt. Anhand von Probandenurteilen für verschiedene LED-Kombinationen werden die Hypothesen überprüft.

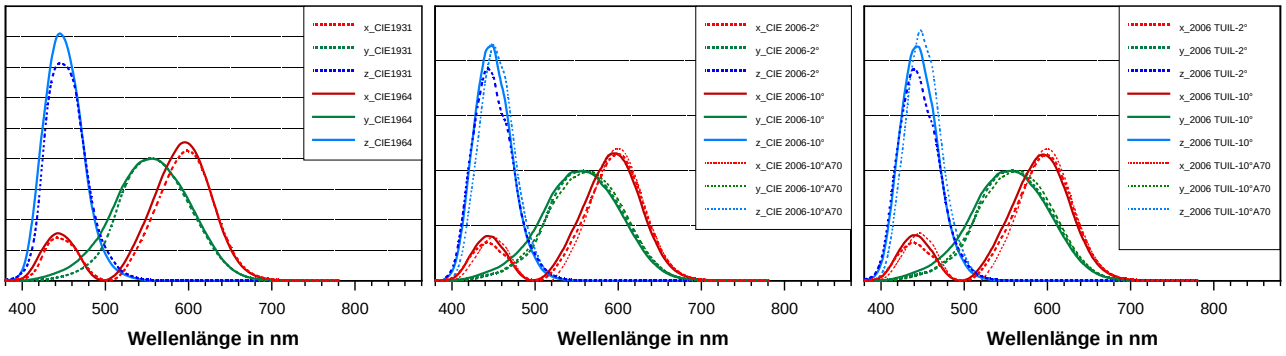


Abbildung 1: Spektralwertfunktionen nach [10], [7] und [5]

[1] COB: chip on board

3.1 Versuchsaufbau

Die gefertigten LEDs wurden auf Kühlkörper montiert, auf eine Trägerplatte verbaut und als Rückwand in Lichtboxen mit einer Streuscheibe integriert. Die Lichtboxen sind 40 cm tief und haben eine Lichtaustrittsfläche mit einer Größe von 300 mm x 300 mm. Den Aufbau der Lichtboxen zeigt Abbildung 2. Aus dem Aufbau resultiert eine ähnlichste Farbtemperatur von CCT = 3500 K für die Lichtboxen. In umfangreichen Messungen wurden Einflüsse der Lichtboxen auf Spektralverteilung der LED, Homogenität, zeitliche Stabilität und Reproduzierbarkeit der Lichtfarbe untersucht und optimiert. Innerhalb der Lichtbox wurden die Gleichmäßigkeit für die Leuchtdichte und die Lichtfarbe an 15 Messpunkten gemessen. Verwendet wurden dafür die Leuchtdichte- und Farbmesskamera LMK 98-4 color (Techno-Team) sowie das Spektralradiometer CS 2000A (Minolta). Die Lichtboxen weisen Leuchtdichten von L = 800 ± 93 cd/m² (MW ± σ) auf. Die Standardabweichung um den Mittelwert des Farborts beträgt $\Delta u'$ = ± 0,0003 und $\Delta v'$ = ± 0,0005. Zwischen benachbarten Boxen lagen die Unterschiede in der Leuchtdichte bei maximal ΔL = 56 cd/m² (7%). Grenzen sind durch die Ansteuerung über das DALI-Protokoll gegeben.

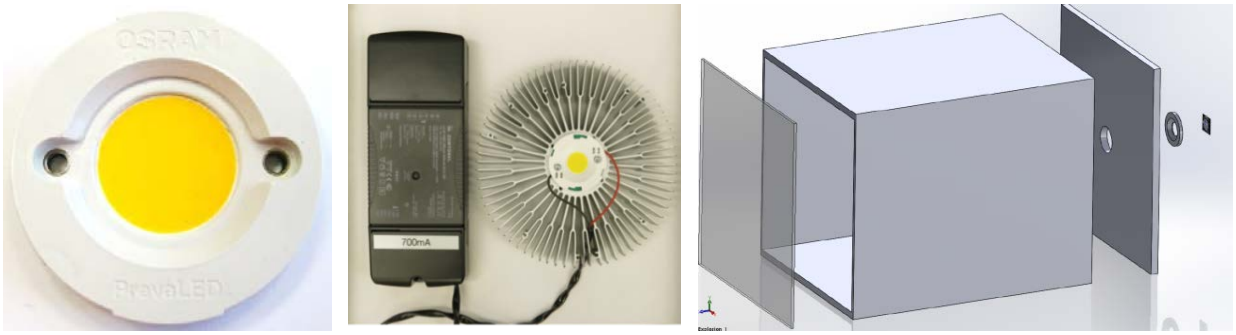


Abbildung 2: von links: Einzel-LED, auf Kühlkörper montierte LED mit Steuereinheit, schematischer Aufbau der Lichtbox [11]

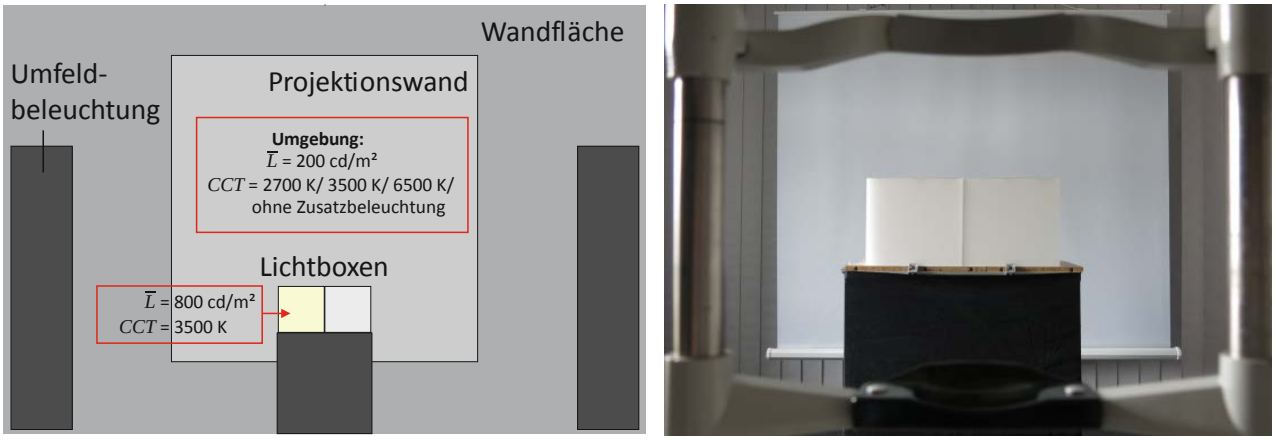


Abbildung 3: Schema der Versuchsaufbauten im Laborraum für die Beurteilung der Lichtfarbenunterscheide an Lichtboxen links und Foto aus Sicht des Beobachters, im Vordergrund die Kinnstütze [11]

In einem Laborraum (l = 6,6 m, b = 4,2 m, h = 2,8 m) wurden jeweils zwei benachbarte Lichtboxen vor einer beleuchteten Projektionswand (2 m x 2 m) den Probanden in einer Entfernung von 1,7 m dargeboten. Dies entspricht einer Beobachterfeldgröße von 10°. Die

Beobachterposition ist über eine Kopfstütze fixiert. Das Umfeld (≈ 40°) wird über Leuchten mit Leuchtstofflampen mit einer mittleren Leuchtdichte von L = 200 cd/m² gleichmäßig beleuchtet. Über Lampenwechsel konnten Lichtfarben mit ähnlichsten Farbtemperaturen von CCT: 2700 K, 3500 K und 6500 K realisiert werden. Abbildung 3 zeigt den Versuchsaufbau.

3.2 Probanden

An der Untersuchung nahmen in zwei Durchgängen insgesamt 80 Probanden teil. Dazu gehörten 41 jüngeren Personen (< 35 Jahre) und 39 älteren Personen (> 60 Jahre). Die Gruppe der jungen Probanden setzte sich aus 20 Frauen und 21 Männer zusammen. Der Altersdurchschnitt dieser Gruppe betrug 24 ± 4 Jahre. 22 Frauen und 17 Männer im Alter zwischen 61 und 82 Jahren bildeten die Versuchsgruppe der älteren Probanden. Das Durchschnittsalter war 71 ± 6 Jahre. Die Probanden wurden vorab auf Farbtüchtigkeit und Sehschärfe geprüft. Personen mit ausgeprägten Augenkrankheiten (z.B. grauer Star) und früheren Augenoperationen (z.B. Einsatz einer künstlichen Linse) wurden von der Untersuchung ausgeschlossen.

3.3 Methode

Den Probanden wurden 23 LED-Kombinationen in zufälliger Reihenfolge dargeboten. Einbezogen wurden solche Kombinationen, die für die CIE1931-Normspektralwertfunktionen keinen oder nur einen kleinen Lichtfarbenunterschied aufweisen dürften. Außerdem wurden alle weiteren Kombinationen untersucht, die bei Bewertung mit einer anderen Spektralwertfunktion kleine Lichtfarbunterschiede vorhersagen. Zur Bestimmung des resultierenden Farbortes der Lichtboxen wurde jeweils der Messwert im Mittelpunkt der Bewertungsfläche verwendet. Abbildung 4 zeigt Spektren der LEDs und für ausgewählte LED-Paarungen.

In Abbildung 5 sind die Farbkoordinaten in der UCS $u'v'$-Farbtafel auf Grundlage der Normspektralwertfunktionen CIE 1931 dargestellt. Zur Orientierung sind die MacAdam-Ellipsen und die 2015 an der TU Ilmenau bestimmten Ellipsen nach KRAMER [6] eingezeichnet. Das bisherige Binning-Verfahren orientiert sich üblicherweise an 3-Step MacAdam-Ellipsen. Die Farbörter der LED-Typen B, H und J befinden sich innerhalb der 1-Step-Ellipse. Die Lichtfarben dieser Typen sollten voneinander nicht unterscheidbar sein. Für ausgewählte Kombinationen sind die berechneten Farbabstände $\Delta u'v'$ beispielhaft für unterschiedliche Spektralwertfunktionen und Altersgruppen in der Tabelle neben der Abbildung zusammengefasst. Deutlich erkennbar sind die Unterschiede in den Farbabständen je nach Wahl der Spektralwertfunktionen.

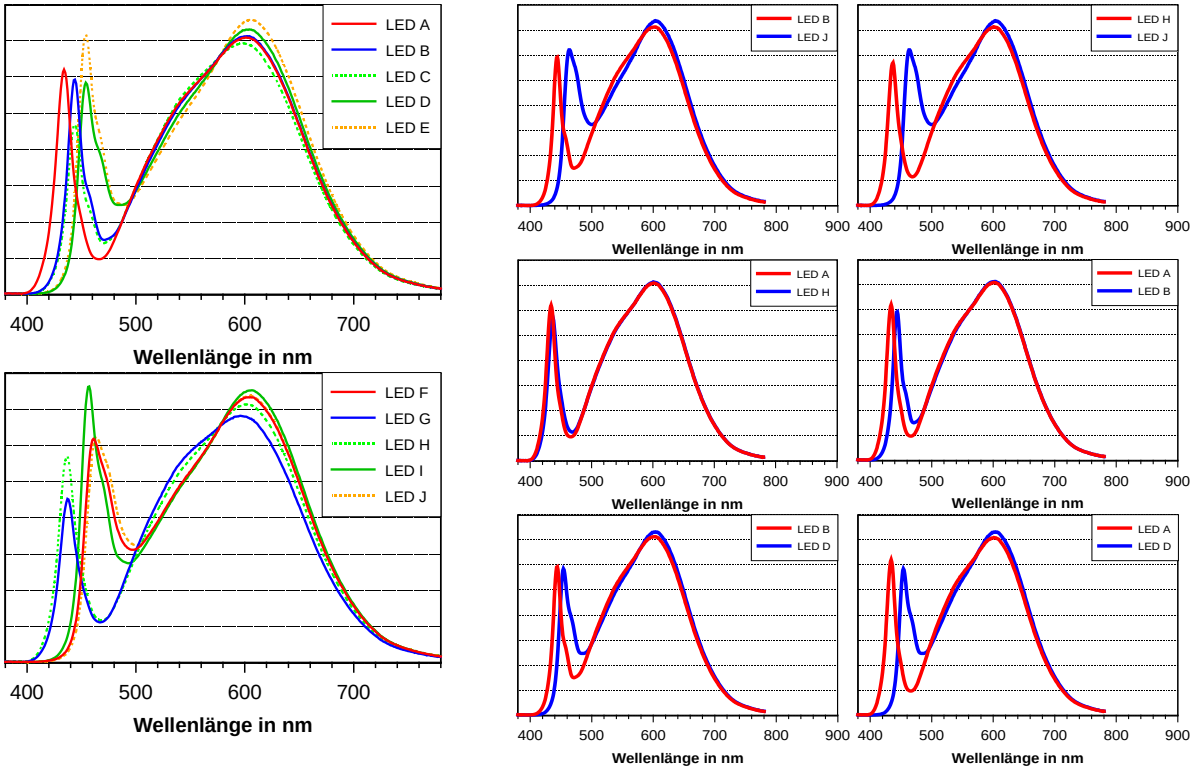
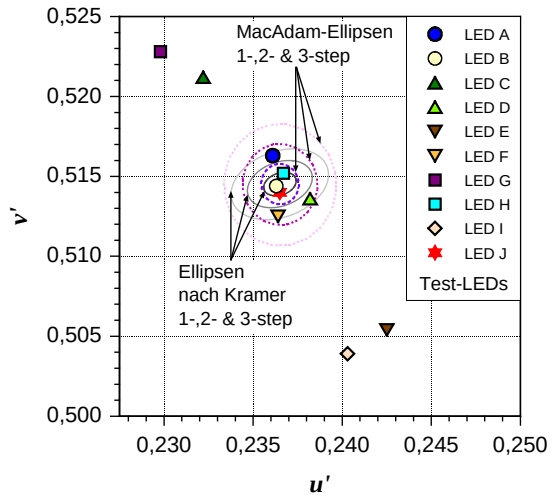


Abbildung 4: Spektren der LEDs (links) und LED-Paarungen für kleine Farbabstände $\Delta u'v'$ (CIE 1931) (rechts)



Farbabstand $\Delta u'v'$ für ausgewählte LED- Kombinationen auf Grundlage unterschiedlicher Spektralwertfunktionen und Altersgruppen nach [9], [5]

LED-Kombination	CIE 1931	2006-TUIL 10°	2006-TUIL 10° 60 Jahre
BH	0,0009	0,0016	0,0007
BJ	0,0005	0,0084	0,0056
HJ	0,0012	0,0100	0,0058
GJ	0,0111	0,0019	0,0048
FJ	0,0015	0,0022	0,0021
AB	0,0019	0,0013	0,0011

Abbildung 5: Farbörter der Lichtboxen in der UCS $u'v'$-Farbtafel auf Grundlage der Normspektralwertfunktionen CIE 1931. Außerdem eingezeichnet: MacAdam-Ellipsen und Ellipsen nach KRAMER [6] mit Ellipsenschwerpunkt im Mittelwert der Farbortkoordinaten der verwendeten LED-Typen B, H und J (links) und berechnete Lichtfarbenunterschiede $\Delta u'v'$ für ausgewählte LED-Kombinationen (rechts)

Der Farbabstand wurde für die LED-Kombinationen nach Gleichung (1) bestimmt [12]:

(1) $$\Delta u'v' = \sqrt{(u'_1 - u'_2)^2 + (v'_1 - v'_2)^2}$$

Jede LED-Kombination wurde von den Probanden anhand einer semantischen Bewertungsskala beurteilt (Abbildung 6). Der methodische Ansatz für die Datenauswertung ist in Abbildung 7 zusammengefasst. Für die dargebotenen LED-Kombinationen wurde die lineare Regression zwischen den subjektiven Probandenurteilen den berechneten Farbabständen $\Delta u'v'$ für die verschiedenen Spektralwertfunktionen berechnet.

0	1	2	3	4	5	6	7	8
kein Unterschied		gerade erkennbar		kleiner Unterschied		großer Unterschied		sehr großer Unterschied

Abbildung 6: Skala zur Bewertung der gesehenen Lichtfarbenunterschiede

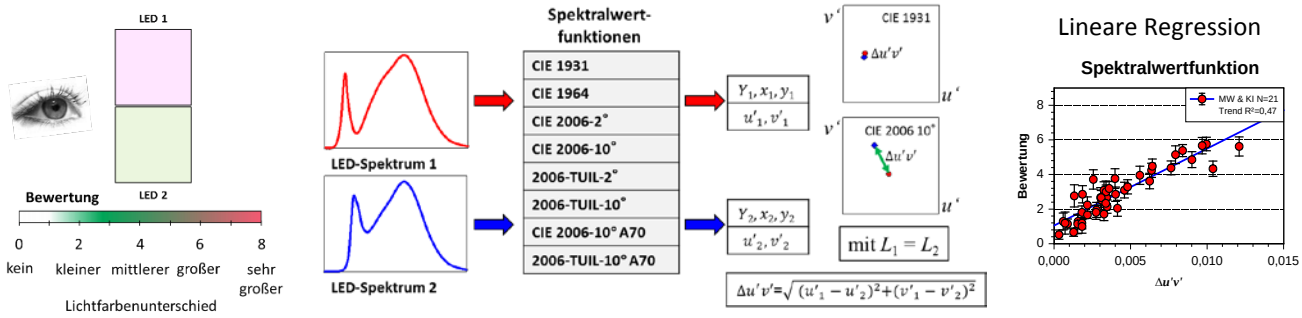


Abbildung 7: Methodik zur Datenanalyse

4 Ergebnisse

Für die in Abbildung 4 gezeigten LED-Kombinationen sind die mittleren Bewertungen und Konfidenzintervalle in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Farbabstände $\Delta u'v'$ für verschiedene Spektralwertfunktionen und subjektive Bewertungen für Lichtfarbenunterschiede (MW ± KI - Mittelwert/ Konfidenzintervall) ausgewählter LED-Kombinationen nach Abbildung 4

LED-Kombination	BJ	HJ	AH	AB	BD	AD
$\Delta u'v'$ CIE 1931	0,0008	0,0012	0,0013	0,0019	0,0020	0,0034
$\Delta u'v'$ CIE 1964	0,0046	0,0051	0,0009	0,0011	0,0009	0,0002
$\Delta u'v'$ CIE 2006-10°	0,0057	0,0061	0,0009	0,0012	0,0014	0,0004
$\Delta u'v'$ 2006-TUIL-10°	0,0084	0,0100	0,0003	0,0013	0,0034	0,0046
Bewertung junge Probanden	5,4 ± 0,4	5,6 ± 0,3	0,7 ± 0,2	0,7 ± 0,2	2,8 ± 0,3	3,0 ± 0,3
Bewertung alte Probanden	2,1 ± 0,3	2,7 ± 0,3	2,1 ± 0,2	3,3 ± 0,4	2,4 ± 0,4	4,1 ± 0,4
Bewertung alle Probanden	3,8 ± 0,4	4,2 ± 0,4	1,3 ± 0,2	2,0 ± 0,3	2,6 ± 0,2	3,5 ± 0,3

Deutlich zeigen sich die Widersprüche bezüglich der Normspektralwertfunktionen. Für kleine Farbabstände werden keine kleinen Lichtfarbenunterschiede von den Probanden angegeben. Außerdem sind deutliche Unterschiede zwischen den Altersgruppen in der subjektiven Bewertung erkennbar.

4.1 Einfluss von Spektralwertfunktionen und Alter

Für die visuellen Urteile der Probanden wurden lineare Regressionen für die Farbabstände $\Delta u'v'$ je Spektralwertfunktionen ermittelt und die Bestimmtheitsmaße R^2 als Güte des Daten-

fits berechnet. Die Regressionsdaten wurden aus den Einzelurteilen der Probanden bestimmt. In Abbildung 8 sind ausgewählte Beispiele gezeigt. Aufgrund der Beobachtungsbedingungen im Versuch wurden die Ergebnisse für den 10°-Beobachter im Vergleich zu den in der Praxis üblichen CIE 1931-Normspektralwertfunktionen dargestellt. Für die älteren Testpersonen sind altersangepassten Daten für 70-Jährige verwendet worden. Dies entspricht dem Durchschnittsalter dieser Probandengruppe. Tabelle 2 fasst die ermittelten Bestimmtheitsmaße R^2 zusammen.

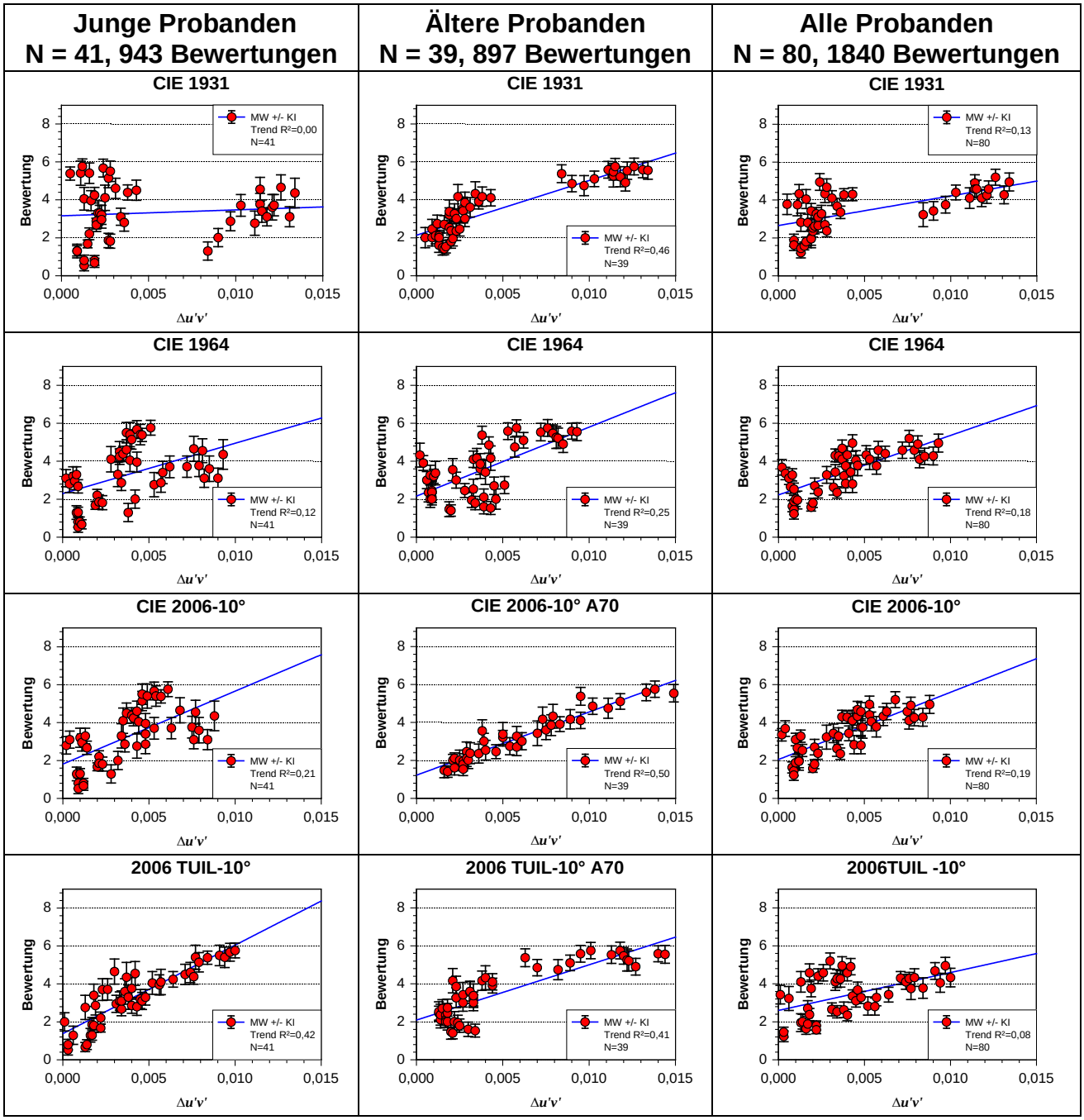


Abbildung 8: Bewertungen der subjektiv wahrgenommenen Lichtfarbunterschiede zwischen den Lichtboxen in Abhängigkeit von den Farbabständen $\Delta u'v'$ für verschiedene Spektralwertfunktionen beurteilt nach Bewertungsskala in Abbildung 4

Tabelle 2: Zusammenfassung Bestimmtheitsmaße R^2

Spektralwertfunktionen	Junge Probanden (< 35 Jahre, N = 41/ 966 Urteile)	ältere Probanden (> 60 Jahre, N = 39/ 897 Urteile)	Alle Probanden (N = 80/ 1840 Urteile)
CIE 1931	0,00	0,46	0,13
CIE 2006-2°	0,04	0,39	0,16
2006 TUIL-2°	0,34	0,19	0,26
CIE 1964	0,12	0,25	0,18
CIE 2006-10°	0,21	0,17	0,19
2006-TUIL-10°	0,42	0,02	0,08
CIE 2006-10° A70	0,03	0,50	0,18
2006 TUIL-10° A70	0,00	0,41	0,11

R^2	bis 0,05	bis 0,2	bis 0,4	bis 0,8	> 0,8
Interpretation	keine oder geringe Korrelation	geringe Korrelation	mittlere Korrelation	hohe Korrelation	sehr hohe Korrelation

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass alle getesteten Spektralwertfunktionen nur eine geringe Korrelation zwischen den Probandenurteilen aller Testpersonen zu den wahrgenommenen Lichtfarbenunterschieden und berechneten Farbabständen $\Delta u'v'$ aufweisen. Dabei zeigt die von POLSTER vorgeschlagenen Spektralwertfunktionen 2006 TUIL-2° die höchste Korrelation. Signifikant sind die Unterschiede zwischen den Altersgruppen. Dies wurde anhand von Boxplots mit Kerben nachgewiesen. Für 83% (19 von 23) der dargebotenen LED-Kombinationen zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen jüngeren und älteren Probanden.

4.2 Einfluss der Umfeldlichtfarbe

Der Einfluss der unterschiedlichen Lichtfarben auf die Urteile der Probanden wurde mit je 20 jungen und 20 älteren Probanden getestet. Variiert wurden die Lichtfarben im Umfeld für ähnlichste Farbtemperaturen von CCT: 2700 K, 3500 K und 6500 K. Zusätzlich wurde ein Versuchsdurchgang ohne Zusatzbeleuchtung durchgeführt. Die Adaptation wird in diesem Falle allein durch die Lichtfarben der Versuchsboxen bestimmt.

4.2.1 Bewertung des Lichtfarbenunterschiedes

Die Ergebnisse sind beispielhaft in Abbildung 9 dargestellt. Die statistische Analyse der Daten zeigt keine signifikanten Unterschiede in den Bewertungen der Probanden in Abhängigkeit von der gewählten Lichtfarbe im Umfeld im Vergleich zur Situation ohne Zusatzbeleuchtung. Demnach haben die getesteten Versuchsbedingungen keinen Einfluss auf die Bewertung des Lichtfarbenunterschieds durch die Probanden.

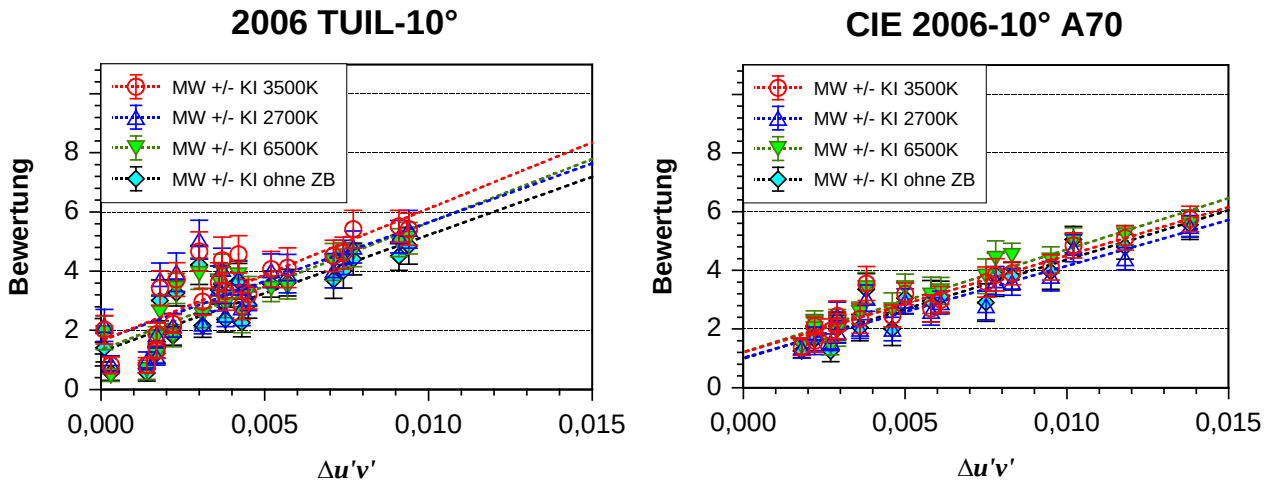


Abbildung 9: Bewertungen über subjektiv wahrgenommene Lichtfarbunterschiede zwischen den Lichtboxen der jungen Probanden (links) und älterer Probanden (rechts) beurteilt nach Bewertungsskala in Abbildung 4, (MW ± KI, 20 Probanden mit je 23 Urteilen) in Abhängigkeit von der Lichtfarbe im Umfeld mit Graden für die lineare Regression

4.2.2 Bewertung der Lichtfarbe

In den Untersuchungen wurden auch die Farbtönungen der Lichtboxen erfragt. Es zeigte sich, dass sich die wahrgenommenen Farbtönungen je nach Lichtfarbe im Umfeld verschieben. Wurden bei einer ähnlichsten Farbtemperatur von 3500 K im Umfeld neben Weiß die Farben Grün, Gelb und Grüngelb für einen LED-Typ genannt, waren dies bei 2700 K im Umfeld auch die Farben blau und lila. Bei 6500 K empfanden die Probanden die Bewertungsflächen häufiger rötlich und orange. Der Effekt der chromatischen Adaptation sei beispielhaft mit dem Weißabgleich einer Kamera vergleichen (Abbildung 10).

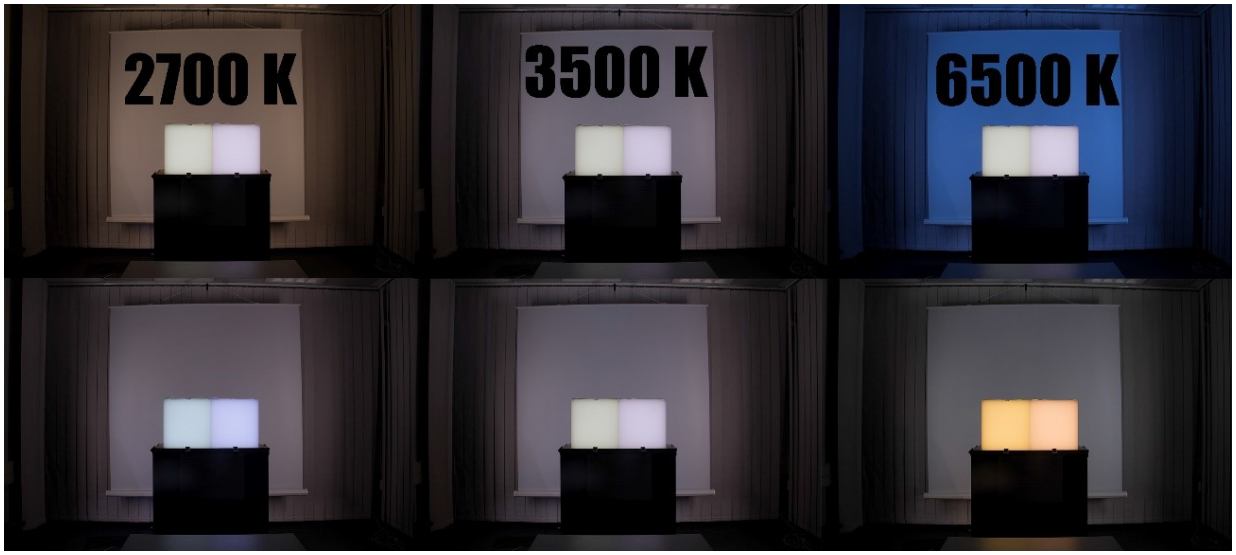


Abbildung 10: Darstellung der Versuchssituationen mit unterschiedlichen Lichtfarben im Umfeld ohne angepasstem Weißabgleich (oben) und mit Anpassung an die Umfeldlichtfarbe (unten) [13]

In Abhängigkeit vom Alter der Probanden wechselte außerdem bei einigen LED-Kombinationen die Zuordnung zu den Farbtönungen. Beispielhaft sei die LED-Kombination AB genannt. Junge Probanden bewerteten die Lichtbox mit der LED A als vorwiegend weiß und

beschrieben diejenige mit der LED B eher als gelb bis grünlich. Für die älteren Probanden wirkte für die Lichtbox mit der LED A eher grünlich und die Lichtbox mit der LED B wurde weißer wahrgenommen (Abbildung 11). Ursachen für diesen „Vertauschungseffekt“ bei der Farbwahrnehmung werden in den altersabhängigen Veränderungen im Auge vermutet.

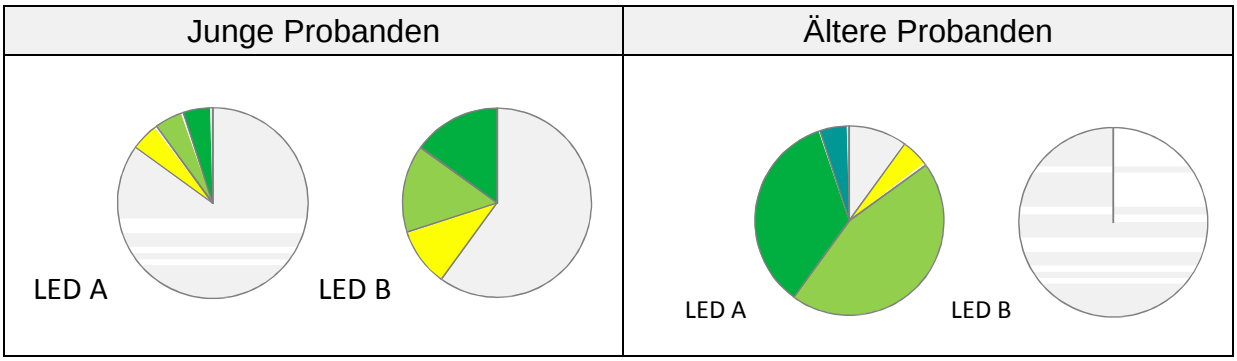


Abbildung 11: Häufigkeit der Farbbenennungen für die Lichtboxen mit LED A und LED B für jüngere Probanden (links) und ältere Probanden (recht), je 20 Probanden (Umfeld: CCT = 3500 K [13]

5 Zusammenfassung

In dieser Untersuchung wurden verschieden Spektralwertfunktionen bezüglich der Modellierung der Farbwahrnehmung untersucht. Dabei beschreiben die von POLSTER vorgeschlagenen Spektralwertfunktionen für junge Probanden den visuellen Unterschied signifikant am besten. Ein Vergleich mit den Ergebnissen für ältere Personen (> 60 Jahre) zeigt, dass es signifikante Unterschiede gibt und sich die Ergebnisse junger Probanden nicht verallgemeinern lassen. Die Anwendung altersangepasste Beschreibungen nach CIE 170-1: 2006 verbessert die Vorhersagegenauigkeit deutlich. Die höchsten Korrelationen erzielten für ältere Personen die CIE 1931-Normstektralwertfunktionen sowie die altersangepassten Spektralwertfunktionen CIE 2006-10° A70 und 2006 TUIL-10° A70.

Die Zusammenfassung aller Probandendaten unabhängig vom Alter verdeutlicht, dass es nur eine geringe Korrelation mit den untersuchten Spektralwertfunktionen gibt. Bei der Kombination von LED-Spektren sind altersabhängige Effekte zu berücksichtigen. Das Binning von LEDs auf der Basis der CIE 1931-Normaspektralwertfunktionen kann nicht verhindern, dass trotz ähnlicher Farbörter bei der Messung auffällige Lichtfarbenunterschiede in der Anwendung beobachtet werden. Die zusätzliche Klassifizierung auf Basis andere Spektralverteilungen, wie beispielsweise von OSRAM für weiße LEDs vorgeschlagen, bietet gute Ansätze [14]. Zusätzlich wären auch eine Überprüfung altersabhängiger Effekte sinnvoll. Die Unabhängigkeit von den getesteten Umgebungslichtfarben, lässt die Verallgemeinerung für typische Praxisanwendungen zu.

Die Untersuchung fand in enger Zusammenarbeit mit den Praxispartnern OSRAM Opto Semiconductors GmbH und Zumtobel Lighting GmbH statt und wurde im Rahmen des Projektes UNILED II (Förderkennzeichen: 13N13395) vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

6 Literaturverzeichnis

[1] Krückeberg, J.: *HochleistungsLEDs in der Praxis*. Franzis Verlag. 2007.

[2] ANSI_NEMA_ANSLG C78.377-2008. American National Standard for Electric Lamps. *Specifications for the chromaticity of solid state lighting products*; 2008.

[3] Bieske, K.; Csuti, P.; Schanda, J.: *Colour appearance of metameric lights and possible colorimetric description*. CIE Expert Symposium on Visual Appearance Paris 2006.

[4] Csuti, P.; Schanda, J.: *Colour Matching Experiments with RGB-LEDs*. In: Color Research and Application 33 (2008), S. 108-112.

[5] Polster, S.: *Neue Spektralwertfunktionen für die korrekte Bewertung von LED-Spektren und Einführung eines Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit*. Dissertation TU Ilmenau. Der Andere Verlag. 2014.

[6] Kramer, G.: *Farbdiskrimination - Ein empirischer Ansatz für die Gruppierung weißer LEDs*. Dissertation TU Ilmenau. Der Andere Verlag. 2014.

Kramer, G., Schierz, Ch.: *Color discrimination subject to illuminant and color transition*. Color Research and Application (2015), DOI: 10.1002/col.21979.

[7] Commission Internationale de L'eclairage: *Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes*. Technical Report CIE 170-1:2006. Wien. 2006.

[8] Stockman, A.; Sharpe, L.: *Cone spectral sensitivities and color matching*. In: Gegenfurtner, K. (Hrsg.); Sharpe, L. (Hrsg.): Color vision: from genes to perception. Cambridge University Press, 1999, S. 53–87.

[9] Webster, M.; MacLeod, D.: *Factors underlying differerences in the color matches of normal observers*. In: Journal of the Optical Society of America A 5 10 (1988), S. 1722–1735.

[10] Deutsches Institut für Normung: Farbmetrik - Teil 1. *CIE farbmetrische Normalbeobachter*. DIN EN ISO 11664-1, Berlin: Beuth Verlag, 2011.

[11] Michl, J.: *Untersuchung der Eignung verschiedener Spektralwertfunktionen für das Binning weißer LEDs*. Masterarbeit TU Ilmenau, Ilmenau, 2016

[12] *ISO 11664-5:2009(E) / CIE S 014-5/E:2009: Colorimetry - Part 5: CIE 1976 L*u*v* Colour Space and u', v' Uniform Chromaticity Scale Diagram*

[13] Kolmer, J.: *Untersuchung des Einflusses der Umfeldbeleuchtung auf die Gültigkeit der Spektralwertfunktionen*. Masterarbeit TU Ilmenau, Ilmenau, 2017

[14] Wilm, A.; Horst, C.; Heidel, G.: *SSL LEDs und die Anwendung der neuesten Spektralwertfunktionen - Die Geburt eines neuen Weißbinning*. Tagung Licht 2016, Karlsruhe, 2016, S. 522-532