



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Optimierung LED-basierter adaptiver Tageslichtsysteme unter Berücksichtigung der Beobachtermetamerie

Vom Fachbereich Elektro- und Informationstechnik
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktoringenieurs
(Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Adrian Eissfeldt, M.Sc.
geboren in Wiesbaden

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Tran Quoc Khanh

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam

Tag der Einreichung: 09.03.2022

Tag der mündlichen Prüfung: 09.11.2022

Darmstadt 2022
D17

Eissfeldt, Adrian: Optimierung LED-basierter adaptiver Tageslichtsysteme unter Berücksichtigung der Beobachtermetamerie

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt,

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUPrints: 2023

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-240539

Tag der mündlichen Prüfung: 09.11.2022

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/>



Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh, der meine Arbeit über die vergangenen Jahre fachlich betreut hat und mir die Möglichkeit gegeben hat mich frei in Themengebiete zu vertiefen, die meinen Interessen entsprechen.

Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam für die Übernahme des Korreferats.

Für die Unterstützung und Hilfsbereitschaft zahlreicher Kolleginnen und Kollegen sowie Studierenden und studentischen Hilfskräften des Fachgebiets für Adaptive Lichttechnische Systeme und Visuelle Verarbeitung möchte ich mich herzlich bedanken. Speziell danke ich den Kollegen Herrn Dr.-Ing. Quang Vinh Trinh und Herrn Dr.-Ing. Max Wagner für die fachlichen Diskussionen. Darüber hinaus möchte ich mich bei den Kollegen und Freunden Herrn Babak Zandi und Herrn Dr.-Ing. Alexander Herzog für ihre wertvolle Unterstützung bedanken.

Tief empfundener Dank gilt meinem Vater und meinen beiden Schwestern, die mich während der Promotionsphase unterstützt haben und mir in jeder Situation zur Seite gestanden haben.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	IX
Symbolverzeichnis	XII
Kurzfassung	XIV
Abstract	XVI
1. Einleitung und Motivation	1
2. Einführung in die Farbmeterik	5
2.1. Optischer Pfad des Lichts zu den Sehzellen	5
2.2. Berechnung von Farbvalenzen mittels Spektralwertfunktionen	7
2.2.1. Spektralwertfunktionen Standards CIE 1931 & CIE 1964	8
2.2.2. Physiologischer Beobachter CIEPO06	10
2.2.3. Individuelle und kategorische Beobachter	10
2.2.4. Beobachtermetamerie-Effekt	13
2.2.5. Farbabstand	15
2.3. Metriken der Lichtqualität	17
2.3.1. Farbwiedergabe	17
2.3.2. Beleuchtungsmetamerie-Index	18
2.3.3. Maximale Helligkeit	19
2.3.4. Nichtvisuelle Lichtwirkung	20
3. Beobachtermetamerie bei Tageslichtreferenz	23
3.1. Einleitung	23
3.1.1. Tageslicht-Referenzspektren	24
3.1.2. Zusammenfassung und Vergleich der Tageslichtreferenzspektren	30
3.1.3. LED-System zur Erzeugung von MetamerieSpektren	34
3.2. Berechnung der Beobachtermetamerie mit individuellen Spektralwertfunktionen	35
3.2.1. Variante 1: Simulation individueller MetamerieSpektren	35
3.2.2. Variante 2: Individuelle Farbabstände	38
3.2.3. Vergleich beider Berechnungsmethoden	39
3.3. Beobachtermetamerie-Index	39
3.3.1. Definition eines Beobachtermetamerie-Index	40
3.3.2. Korrelationsanalyse des Beobachtermetamerie-Index	46
3.3.3. Zusammenfassung (I)	49
3.4. Beobachtermetamerie-Koeffizient	50
3.4.1. Definition des Beobachtermetamerie-Koeffizienten	50
3.4.2. Korrelationsanalyse des Beobachtermetamerie-Koeffizienten	51
3.4.3. Minimierung des Beobachtermetamerie-Koeffizienten	52
3.4.4. Zusammenfassung (II)	58

3.5.	Beobachtermetamerie von Tageslichtspektren	58
3.6.	LED-System mit geringster Beobachtermetamerie	60
3.7.	Beobachtermetamerie und Farbwiedergabe	62
3.8.	Probandentest zur Beobachtermetamerie	63
3.8.1.	Aufbau	63
3.8.2.	LED-Leuchte	63
3.8.3.	Automatisches Versuchssystem	64
3.8.4.	Ergebnisse der Probandentests	70
3.8.5.	Zusammenfassung (III)	71
4.	Farbmischung	75
4.1.	Optimierung eines 3-Kanal-LED-Systems	75
4.1.1.	Ideales LED-System	76
4.1.2.	Nicht-ideales LED-System in der Literatur	79
4.1.3.	Algorithmus zur Farbmischung und Kompensation nicht-idealer Kennlinien	79
4.1.4.	Zusammenfassung (IV)	87
4.2.	Optimierung der Farbmischung eines 5-Kanal-LED-Systems	88
4.2.1.	Verfahren in der Literatur	89
4.2.2.	Farbmischung mit virtuellen Valenzen	90
4.2.3.	Optimierung von Qualitätsparametern	95
4.2.4.	Zusammenfassung (V)	101
5.	Fazit und Ausblick	103
A.	Anhang	107
	Literatur	119
	Eigene Veröffentlichungen und betreute Arbeiten	129
	Erklärung laut Promotionsordnung	131

Abbildungsverzeichnis

1.1.	Verschiedene Lichtszenen des Tageslichts, welche sich in der Helligkeit, Farbe, Diffusität und Lichtrichtung unterscheiden.	1
1.2.	Konzept eines adaptiven Beleuchtungssystems.	3
2.1.	Aufbau des menschlichen Auges und deren Netzhaut.	6
2.2.	(a) Optische Dichte der Linse bei kleiner Pupille, bei großer Pupille ist eine Skalierung von $\frac{1}{1,16}$ vorzunehmen [62].	7
2.3.	Spektralwertfunktionen CIE 1931 (a) für ein 2°-Sichtfeld und CIE 1964 (b) für ein 10°-Sichtfeld.	8
2.4.	Ein Farbort im XYZ-Farbraum wird zunächst vom Ursprung auf die Dreiecksebene und anschließend auf die zweidimensionale xy-Ebene projiziert.	10
2.5.	Spektralwertfunktionen 1000 simulierter individueller Beobachter.	12
2.6.	Spektralwertfunktionen der zehn kategorischen Beobachter von Asano et al. [84].	13
2.7.	(a): Die CIE Abweichungsfunktionen $\Delta\bar{x}(\lambda)$, $\Delta\bar{y}(\lambda)$, $\Delta\bar{z}(\lambda)$ für Beobachtermetamerie.	15
2.8.	Das gleichabständige u'v'-Farbdiagramm.	17
2.9.	Berechnung des Colour Fidelity Index R_f nach [103]	18
2.10.	Das melanopische Wirkungsspektrum $s_{mel}(\lambda)$ [65] verglichen mit der Hellempfindlichkeitskurve für photopisches Sehen $V(\lambda)$ [29], welche der CIE 1931 $\bar{y}(\lambda)$ Funktion entspricht.	20
3.1.	Schwarzkörperstrahlung im sichtbaren Bereich für Temperaturen von 4000 K bis 20 000 K, normiert bei 560 nm und berechnet mit Gleichung (3.1).	25
3.2.	Farbörter der Schwarzkörperstrahlung für Temperaturen von 2000 K bis 20 000 K im CIE1931 xy-Farbdiagramm.	25
3.3.	(a): Vektoren des Tageslichtmodells im sichtbaren Wellenlängenbereich.	27
3.4.	Der visuelle Bereich des extraterrestrischen Sonnenspektrums von Wehrli [128].	28
3.5.	Totaler Absorptionskoeffizient $\tau'(\lambda)$ von Tian et al. [126]	29
3.6.	Farbörter der mit dem Tian-Tageslichtmodell erzeugten Spektren im CIE 1976 Farbdiagramm (CIE 1964 10°-Beobachter).	29
3.7.	Mittels Spektrometer gemessene Farbörter des Tageslichts im CIE 1976 Farbdiagramm (CIE 1964 10°-Beobachter).	30
3.8.	(a): Farbörter der verschiedenen Referenzspektren im CIE 1976 Farbdiagramm (CIE 1964 10°-Beobachter).	31
3.9.	Vergleich der Verläufe von Referenzspektren aus verschiedenen Quellen, normiert bei 560 nm.	32
3.10.	Farbörter ausgewählter Tageslichtspektren aus unterschiedlichen Quellen mit gleicher ähnlichster Farbtemperatur.	33

3.11. Vergleich von Beobachtermetamerie bedingten durchschnittlichen Farbabständen $\Delta_{u'v',10}$ von 1000 simulierten Beobachtern (berechnet mit Gleichung (2.7)) zwischen einem LED-Spektrum und dem jeweiligen Tageslichtspektrum.	33
3.12. (a): Relative Strahlungsverteilung der zur Simulation von Metameriespektren verwendeten blauen (B), grünen (G), orangenen (O), roten (R1, R2), warmweißen (WW) und kaltweißen (KW) LED-Spektren.	34
3.13. Vergleich der LED-Metameriespektren (berechnet mit Gleichung (3.35)) 1000 individueller Beobachter (grau) sowie von zehn kategorischen Beobachtern (rot).	38
3.14. Vergleich zweier Berechnungsverfahren zu den durchschnittlichen und maximalen Farbabständen aufgrund von Beobachtermetamerie für das 2° (a) und das 10°-Sichtfeld (b).	39
3.15. Spektrale Varianzfunktionen $\sigma_X^2(\lambda)$, $\sigma_Y^2(\lambda)$, $\sigma_Z^2(\lambda)$ für das 2° (a) und das 10°-Sichtfeld (b). Die tabellierten Werte dieser Funktionen stehen im Anhang A.2 zur Verfügung.	40
3.16. (a), (b): Abweichungsfunktionen $\Delta_A\bar{x}(\lambda)$, $\Delta_A\bar{y}(\lambda)$, $\Delta_A\bar{z}(\lambda)$ des Allen-Ansatzes für das 2° (a) und das 10°-Sichtfeld (b).	44
3.17. (a), (b): Abweichungsfunktionen $\Delta_N\bar{x}(\lambda)$, $\Delta_N\bar{y}(\lambda)$, $\Delta_N\bar{z}(\lambda)$ des Nayatani-Ansatzes für das 2° (a) und das 10°-Sichtfeld (b).	46
3.18. Spektrale Varianz- und Abweichungsfunktionen von verschiedenen Varianten eines Beobachtermetamerie-Index, für das 2° (a) - (c) und das 10°-Sichtfeld (d) - (f).	47
3.19. Korrelation dreier Verfahren eines Beobachtermetamerie-Index und dem durchschnittlichen bzw. maximalen Farbabstand der individuellen LED-Metameriespektren, aus Perspektive des Referenzbeobachters für das 2° (a) und das 10°-Sichtfeld (b).	48
3.20. Korrelation des empfohlenen Beobachtermetamerie-Index M_N mit dem durchschnittlichen Farbabstand $\Delta_{u'v'}$ der individuellen Metameriespektren für ein 2° (a) und 10°-Sichtfeld (b).	49
3.21. Empfohlene Abweichungsfunktionen $\bar{x}_{\text{devN}}(\lambda)$, $\bar{y}_{\text{devN}}(\lambda)$, $\bar{z}_{\text{devN}}(\lambda)$ verglichen mit den ersten CIE Abweichungsfunktionen für das 2°-Beobachterfeld $\Delta_{\text{CIE}}\bar{x}(\lambda)$, $\Delta_{\text{CIE}}\bar{y}(\lambda)$, $\Delta_{\text{CIE}}\bar{z}(\lambda)$	49
3.22. Vergleich des Beobachtermetamerie-Koeffizienten C_{BM} der Spektren eines Metameriepaars (Gleichung (3.81)) und dem durchschnittlichen Farbabstand durch Beobachtermetamerie für das 2° (a) und das 10°-Sichtfeld (b) (Gleichung (3.36)).	52
3.23. Verlauf des Beobachtermetamerie-Koeffizienten C_{BM} (Gleichung (3.81)) bei Wechsel des 3-Kanal-LED-Systems, verglichen mit der Beobachtermetamerie, gemessen anhand des durchschnittlichen Farbabstands $\Delta_{u'v',10}$ individueller Beobachter (Gleichung (3.38)) für verschiedene Intervalle ähnlichster Farbtemperatur (a) - (j).	53
3.24. Beispielhafte Bestimmung des potentiellen Optimierungsfehlers $\Delta_{\text{BM}}(C_{\text{BM}})$ (Differenz des Beobachtermetamerie-Effekts) durch Interpolation zwischen verschiedenen 3-Kanal LED-Metameriespektren.	55
3.25. Optimierungsfehler Δ_{BM} , welcher sich aus der Differenz des größten und kleinsten Beobachtermetamerie-Effekts $\Delta_{u'v',10}$ ergibt.	56
3.26. Potentieller Optimierungsfehler Δ_{BM} der Beobachtermetamerie bei ausschließlicher Verwendung des Beobachtermetamerie-Koeffizienten des LED-Spektrums für das 2° (a) und das 10°-Sichtfeld (b).	57

3.27. Anzahl der LED-Metameriespektren zur Analyse des potentiellen Optimierungsfehlers in Abhängigkeit ihrer ähnlichsten Farbtemperatur.	57
3.28. Verlauf des durchschnittlichen Beobachtermetamerie-Farbfehlers $\Delta_{u'v'}$ der individuellen Metameriespektren (Gleichung (3.36)) in Abhängigkeit der ähnlichsten Farbtemperatur für das 2° (a) und das 10°-Sichtfeld (b).	59
3.29. Vergleich verschiedener Metameriepaare des Referenzbeobachters.	59
3.30. Beobachtermetamerie-Koeffizienten C_{BM} des Tageslichts für das 2° (a) und das 10°-Sichtfeld (b), sowie der simulierten LED-Metameriespektren für das 2° (c) und 10°-Sichtfeld (d) in Abhängigkeit der ähnlichsten Farbtemperatur (logarithmisch dargestellt).	61
3.31. Vergleich des Beobachtermetamerie-Effekts (Gleichung (3.36)) in Abhängigkeit des verwendeten 3-Kanal LED-Systems.	62
3.32. Korrelation des Colour Fidelity Index R_f und des durchschnittlichen Farbfehlers $\Delta_{u'v',10}$ der Metameriespektren (Gleichung (3.36)) zehn kategorischer Beobachter aus der Perspektive des ersten kategorischen Beobachters.	62
3.33. Mobiler Versuchsraum zum Abgleich von LED-Licht und Tageslicht aus der Seitenansicht (a) und aus der Draufsicht (b).	64
3.34. (a): Seitliche Schnittansicht der LED-Leuchte.	65
3.35. Flussdiagramm der Software zur Steuerung der Probandentests zum Abgleich von LED-Licht und Tageslicht.	66
3.36. Berechnung der mit dem aktuellen Tageslicht zu vergleichenden LED-Farbörter.	68
3.37. Grafische Benutzeroberfläche der Software zur Steuerung der Abgleichsversuche von LED-Licht und Tageslicht.	69
3.38. (a): Histogramm der Tageslicht-Farbdrifts $\Delta_{u'v',10}$ während eines Probandentests.	70
3.39. Beispiele der Versuchsauswertung. (a), (b): Der Schwerpunkt der Abgleichsfarbörter (rotes Kreuz) lässt sich mit einem Abstand von $\Delta_{u'v',10} = 1,7 \times 10^{-3}$ (a) und $\Delta_{u'v',10} = 2,5 \times 10^{-3}$ (b) zum Tageslichtfarbort bestimmen.	72
3.40. Ergebnisse des Abgleichs zwischen LED-Licht und Tageslicht von zehn Probanden bei unterschiedlichen ähnlichsten Farbtemperaturen des Tageslichts.	73
4.1. Spektren der beiden 3-Kanal LED-Systeme R-G-B (a) und KW-WW-G (b).	76
4.2. Ein LED-System, bestehend aus Treiber-Elektronik und LED, wird als ideales System bezeichnet, wenn der Zusammenhang zwischen der Eingangsstellgröße p und dem Tristimulus-Wert Y des emittierten Lichts linear verläuft.	77
4.3. Messaufbau zur Charakterisierung der LED- und Treiberkennlinien sowie zur Genauigkeitsmessung der Farbmisch-Algorithmen.	80
4.4. Stärkste gemessene Krümmung einer Dimmkennlinie, welche beim Dimmen des Y -Tristimulus-Werts der roten LED gemessen wird.	80
4.5. Gemessene Linearisierungsfehler der Tristimulus-Werte fünf verschiedener LED-Kanäle (a) bis (e) beim Dimmen mittels PWM bei konstanter Temperatur der LED-Platine.	81
4.6. Flussdiagramm des Algorithmus zur Farbmischung von drei LED-Kanälen und gleichzeitiger Optimierung der Genauigkeit von Farbe und Leuchtdichte durch Verwendung eines LED- und Treibermodells.	83
4.7. Farbabstand $\Delta_{u'v'}$ (CIE 1931-Beobachter) zwischen Soll-Farbort und gemessenem Farbort eines R-G-B LED-Systems (a) und eines KW-WW-G LED-Systems (b).	84

4.8. Relative 3-Kanal-LED-Spektren mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 5000 K eines R-G-B (a) und eines KW-WW-G (b) LED-Systems.	85
4.9. Leuchtdichtefehler $\Delta_L = 100 L_{\text{soll}} - L_{\text{ist}} /L_{\text{soll}}$ in Abhängigkeit der Leuchtdichte-Sollwerte bei einer ähnlichsten Farbtemperatur von 5000 K.	86
4.10. Farbabstand $\Delta_{u'v'}$ (CIE 1931-Beobachter) zwischen Soll-Farbot und gemessenem Farbort eines R-G-B LED-Systems (a) und eines KW-WW-G LED-Systems (b) in Abhängigkeit des Sollwerts der Leuchtdichte bei einer ähnlichsten Farbtemperatur von 5000 K.	86
4.11. Relative Strahlungsspektren des verwendeten 5-Kanal-Systems.	88
4.12. (a): Farbörter des 5-Kanal-Systems. Die virtuelle Valenz v_1 wird aus dem blauen und kaltweißen Kanal gebildet, die virtuelle Valenz v_2 aus dem roten und warmweißen Kanal.	91
4.13. Flussdiagramm zur Berechnung des Farborts x_v, y_v und der Intensität Y_v einer virtuellen Valenz, in Abhängigkeit ihres Parametrisierungswerts q und des Dimmwerts p_v	93
4.14. Flussdiagramm der 5-Kanal-Mischberechnung mittels virtueller Valenzen und Kompensation der nicht-idealen Dimmkennlinien.	94
4.15. Lichtqualitätswerte in Abhängigkeit der Parametrisierungswerte q_1 und q_2 der virtuellen Valenzen bei Erzeugung des CIE 1931 Farborts der Normlichtart D50 (5003 K).	96
4.16. Verlauf der Parametrisierungswerte q_1 und q_2 der virtuellen Valenzen zur Optimierung von Lichtqualitätsgrößen für ähnlichste Farbtemperaturen von 2700 K bis 10 000 K.	99
4.17. (a) - (d): Verlauf von Qualitätsparametern in Abhängigkeit von q_1 bzw. q_2 und der ähnlichsten Farbtemperatur, während für den anderen q -Wert der für die Optimierung berechnete Verlauf eingestellt ist.	100

Tabellenverzeichnis

2.1. Qualitätsgrad des Metamerie-Index nach [104].	19
3.1. 3-Kanal LED-Kombinationen zur Simulation von Metameriespektren.	34
3.2. Kennwerte der verwendeten LED-Spektren.	35
3.3. Grenzen der erzielbaren ähnlichsten Farbtemperaturen der verschiedenen LED-Systeme.	61
4.1. Anzahl der Iterationen des Farbmischalgorithmus zur Optimierung der Farbortsgenauigkeit beim Mischen verschiedener ähnlichster Farbtemperaturen mit maximaler Leuchtdichte.	85
4.2. LUT der Parametrisierungswerte der virtuellen Valenzen zur Optimierung von Qualitätsparametern.	101
A.1. Spektralwertfunktionen des ersten kategorischen Beobachters [84], welcher in Kapitel 3.3 und Kapitel 3.4 als Referenzbeobachter verwendet wird (sofern nicht anders angegeben).	107
A.2. Varianzfunktionen des in Kapitel 3.3.1 definierten Nimeroff-Ansatzes.	109
A.3. Abweichungsfunktionen des in Kapitel 3.3.1 definierten Allen-Ansatzes.	111
A.4. Abweichungsbeobachterfunktionen des in Kapitel 3.3.1 definierten Allen-Ansatzes, berechnet durch Addition der Abweichungsfunktionen (vgl. Tabelle A.3) zu den Spektralwertfunktionen des Referenzbeobachters (vgl. Tabelle A.1).	113
A.5. Abweichungsfunktionen des Nayatani-Ansatzes, gebildet durch die erste Komponente einer Hauptkomponentenanalyse von 1000 individuellen Spektralwertfunktionen (vgl. Kapitel 3.3.1).	115
A.6. Abweichungsbeobachterfunktionen des Nayatani-Ansatzes, welche zur Berechnung des Beobachtermetamerie-Index (Kapitel 3.3) und Koeffizienten (Kapitel 3.4) empfohlen werden, berechnet durch Addition der Abweichungsfunktionen (vgl. Tabelle A.5) zu den Spektralwertfunktionen des Referenzbeobachters (vgl. Tabelle A.1).	117

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Langfassung
AlGaInP	Aluminiumgalliumindiumphosphid
B	Blau
CCR	Konstantstromdimmung (Constant Current Reduction)
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage (Internationale Beleuchtungskommission)
CRI	Farbwiedergabeindex (Colour Rendering Index)
G	Grün
InGaN	Indiumgalliumnitrid
ipRGC	Fotosensitive Ganglienzelle (intrinsically photosensitive retinal ganglion cell)
KW	Kaltweiß
LED	Leuchtdiode
LUT	Lookup Tabelle
PWM	Pulsweitenmodulation
R	Rot
SDCM	Standard Deviation of Colour Matching
WW	Warmweiß

Symbolverzeichnis

Zeichen	Bezeichnung	Einheit
griechisch		
ΔE_{ab}^*	CIELAB Farbdifferenz	–
$\Delta_{u'v'}$	Farbabstand im CIE 1976 $u'v'$ -Farbdiagramm	–
Δ_{uv}	Farbabstand im CIE 1960 uv -Farbdiagramm	–
λ	Wellenlänge	m
σ^2	Varianz	–
lateinisch		
K_{mel}	Melanopische Effizienz	W/lm
L_{mel}	Melanopische Strahldichte	W/(m ² sr)
$L_{e,\lambda}(\lambda)$	Strahldichte	W/(m ² sr m)
M_A	Beobachtermetamerie-Index nach Allen	–
$M_{e,\lambda}(\lambda)$	Strahlungsspektrum	W/(m ² m)
M_N	Beobachtermetamerie-Index nach Nayatani	–
M_{Ni}	Beobachtermetamerie-Index nach Nimeroff	–
M_{obs}	CIE Beobachtermetamerie-Index	–
M_u	CIE Metamerie-Index für den ultravioletten und visuellen Bereich	–
M_v	CIE Metamerie-Index für den visuellen Bereich	–
R_a	allgemeiner Farbwiedergabeindex des CRI	–
R_i	spezieller Farbwiedergabeindex des CRI	–
R_f	Farbtreueindex (Colour Fidelity Index)	–
$s_{\text{mel}}(\lambda)$	Melanopisches Wirkungsspektrum	–
T	Temperatur	K
u, v	Farbkoordinaten CIE 1960	–
u', v'	Farbkoordinaten CIE 1976	–
X, Y, Z	Tristimulus-Werte	–
x, y	Farbkoordinaten	–
$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$	Spektralwertfunktionen	–
$V(\lambda)$	Spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion	–

Konstanten

K_m

Normalisierungskonstante

683,002 lm/W (2°)

683,599 lm/W (10°)

Kurzfassung

Natürliches Tageslicht besitzt eine signifikante Relevanz für das Wohlbefinden und die Gesundheit des Menschen, jedoch ist es in vielen Innenräumen nicht ausreichend vorhanden. Stattdessen kommen dort künstliche Lichtquellen zum Einsatz, welche zunehmend mit mehrkanaligen LED-Systemen realisiert werden. Dadurch besteht die Möglichkeit Farbe und Helligkeit des Lichts dynamisch zu variieren und somit das Tageslicht zu simulieren beziehungsweise zu imitieren.

Hieraus leitet sich die Motivation dieser Arbeit ab, Verfahren, Metriken und Algorithmen zu entwickeln, mit deren Hilfe die Farbgenauigkeit und weitere spektrale Qualitätsmerkmale von LED-Licht optimiert werden können. Dies geschieht im Hinblick auf eine Anwendung in der adaptiven Beleuchtung, welche sich an das vorherrschende Tageslicht anpassen kann. Eine dabei implizierte Anpassung der LED-Lichtfarbe an das natürliche Tageslicht kann aufgrund der Beobachtermetamerie zu wahrnehmbaren Farbdifferenzen zwischen den beiden Lichtarten führen. Die Beobachtermetamerie – der Effekt, dass Spektren zwar für den Normalbeobachter farblich identisch sind, ein realer Beobachter jedoch einen Farbunterschied wahrnimmt, aufgrund der individuellen spektralen Empfindlichkeit seiner Sehzellen – wird hier in Bezug auf die Tageslichtreferenz untersucht.

Es werden mit einem individuellen Beobachtermodell 1000 unterschiedliche Beobachter simuliert, um Farbdifferenzen zwischen Metameriepaaren zu berechnen. Hierfür werden anhand von Spektrometermessungen und verschiedener Tageslichtmodelle 1568 Referenzspektren generiert. Mittels acht verschiedener 3-Kanal-LED-Systeme werden für jeden individuellen Beobachter zu jeder Tageslichtreferenz MetamerieSpektren gemischt. Anhand dieser Daten wird gezeigt, welche LED-Spektren welche durchschnittliche individuelle Farbdifferenz hervorrufen. Da solche Berechnungen für echtzeitfähige Optimierungen auf den begrenzten Ressourcen des Mikrocontrollers einer adaptiven Leuchte nicht gut geeignet sind, werden drei Varianten eines Beobachtermetamerie-Index definiert. Basierend auf einer Korrelationsanalyse wird dabei die Variante mit der höchsten Korrelation zu der Referenzberechnung als Beobachtermetamerie-Index vorgeschlagen.

Der hierbei definierte Abweichungsbeobachter wird zusätzlich verwendet, um einen Beobachtermetamerie-Koeffizienten zu definieren. Anhand dieses Koeffizienten lässt sich die Variabilität des individuellen Farbstimulus von einem einzelnen Spektrum berechnen. Es wird gezeigt, dass sich dieser Koeffizient eignet, um die Beobachtermetamerie eines LED-Spektrums zu optimieren, wenn aufgrund von fehlenden Spektraldaten der Tageslichtreferenz der Beobachtermetamerie-Index nicht verwendet werden kann. Das individuelle Beobachtermodell, auf dem diese Simulationen basieren, wird mit einem Probandentest verifiziert. Hierbei führen die Testpersonen einen farblichen Abgleich von LED-Licht und natürlichem Tageslicht durch.

Die zur Generierung eines MetamerieSpektrums nötigen Farbmischberechnungen werden für ein 3- und 5-Kanal-System vorgestellt. Hierbei wird die nicht-ideale Dimmkennlinie von realen Systemen berücksichtigt und durch eine iterative Farbmischberechnung kompensiert. Dadurch wird die Farbgenauigkeit sowie die Genauigkeit der Leuchtdichte signifikant gesteigert, verglichen mit Berechnungen,

welche eine lineare Dimmkennlinie implizieren.

Durch die Verwendung von mehr als drei LED-Kanälen können bei konstanter Lichtfarbe unterschiedliche Lichtqualitätsmerkmale variiert werden. Die dazugehörigen spektralen Berechnungen eignen sich jedoch oft nicht für echtzeitfähige Implementierungen auf dem Mikrocontroller einer adaptiven Leuchte. Zusätzlich besteht bei der Farbmischung mit mehr als drei LED-Kanälen das Problem eines unterbestimmten Gleichungssystems. Um dieses Problem zu lösen wird ein neues Verfahren vorgestellt, bei dem die Lichtqualität zum Zeitpunkt der Farbmischung optimiert werden kann. Hierbei werden jeweils zwei physische LED-Kanäle zu einem virtuellen LED-Kanal zusammengefasst, wodurch ein eindeutig lösbares 3-Kanal-System simuliert werden kann. Die Farbvalenz eines virtuellen LED-Kanals wird aus dem Leuchtdichteverhältnis der beiden zugrunde liegenden physischen Kanäle bestimmt. Anhand solcher Leuchtdichteverhältnisse wird der unterbestimmte Lösungsraum der Farbmischung parametrisiert und gleichzeitig deren Einfluss auf verschiedene Lichtqualitätsmetriken untersucht. Dadurch können die gegenseitigen Abhängigkeiten unterschiedlicher Qualitätsmetriken analysiert werden und die Parametrisierungswerte, welche für ein Optimum sorgen, identifiziert werden. Die so bestimmten Parametrisierungswerte lösen das Problem der Unterbestimmtheit und ermöglichen es die Farbmischberechnung des hier verwendeten 5-Kanal-Systems in Echtzeit durchzuführen. Dabei können die verschiedenen Qualitätsmetriken dynamisch priorisiert und optimiert werden. Da die Farbmischberechnungen hierbei erst zum Zeitpunkt der gewünschten Farbeinstellung durchgeführt werden, eignet sich der Algorithmus für weitere Entwicklungen, bei denen beispielsweise eine alterungsbedingte Farbverschiebung der LEDs kompensiert werden soll.

Abstract

Natural daylight has a significant relevance for the well-being and health of humans. However, it is not sufficiently available in many indoor spaces. Instead, artificial light sources are used which are increasingly realised with multi-channel LED systems. Varying the light's colour and brightness dynamically, and thus simulating or mimicking daylight, is made thereby possible.

To enable the realisation of an LED system that adapts to the prevailing daylight, this research proposes methods, metrics and algorithms for the colour mixing process. Such an adaptation of the LED light's chromaticity to natural daylight can lead to perceptible chromaticity differences between the two types of light due to observer metamerism. The observer metamerism effect – two different spectra are identical in terms of chromaticity for the standard observer, yet a real observer perceives a chromaticity difference due to the individual spectral sensitivity of his photoreceptors – is investigated here in relation to the daylight reference.

An individual observer model is used to calculate metameric pairs of spectra for 1000 simulated observers and to investigate their resulting chromaticity differences. For this purpose, 1568 reference spectra are generated using spectrometer measurements and various daylight models. Using eight different 3-channel LED systems, metameric spectra are mixed for each individual observer and daylight reference, respectively. Based on this data, the average individual chromaticity differences are shown as a function of the LED spectrum, which is compared to daylight. Since such calculations are not well suited for real-time optimisations on the limited resources of an adaptive luminaire's microcontroller, three variants of an observer metamerism index are defined. The variant with the highest correlation to the reference calculation is identified by performing a correlation analysis and is proposed as the observer metamerism index, including a newly defined deviation observer.

Additionally, the deviation observer is used to develop an observer metamerism coefficient, which measures the variability of the individual colour stimulus from a single spectrum. Comparing the coefficients of LED spectra and the observer metamerism effect between LED light and daylight, this coefficient is shown to be suitable for optimising an LED spectrum when the observer metamerism index cannot be used due to missing spectral data of the daylight reference. However, the observer metamerism prediction's accuracy using the observer metamerism coefficient is less accurate than using the proposed observer metamerism index. The individual observer model, on which these simulations are based, is verified with an empirical study of participants matching the chromaticity of LED light to the chromaticity of the natural daylight in the outer environment.

The colour mixing calculations necessary to generate metameric spectra are presented as part of an algorithm for a 3- and 5-channel system. Non-ideal dimming characteristics of real systems are hereby considered and compensated by performing an iterative colour mixing calculation. Using this algorithm significantly increases chromaticity accuracy as well as luminance accuracy compared to calculations that imply a linear dimming characteristic.

Different light quality characteristics can be varied by using more than three LED channels while maintaining a steady chromaticity. However, the associated spectral calculations are often not suited for real-time implementations on embedded systems used to control multi-channel LED luminaires. Additionally, colour mixing with more than three LED channels involves the problem of an underdetermined system of equations. Therefore, a new method is presented in which the light quality can be optimised at the stage of colour mixing. For this purpose, two physical LED channels are combined into one virtual LED channel, thus simulating a uniquely solvable 3-channel system. The chromaticity of a virtual LED channel is determined by the luminance ratio of the two underlying physical channels. Based on such luminance ratios, the underdetermined solution space of colour mixing is parameterised and at the same time, their influence on various light quality metrics is investigated. The different quality metric's mutual dependencies are analysed with this strategy and the parameterisation values which lead to their optimum are identified. Hence, the problem of underdetermination is solved and the colour mixing computations of a 5-channel system can be carried out in real-time. Thereby, the distinct quality metrics can be prioritised and optimised dynamically. The algorithm is suitable for further enhancements, since the colour mixing calculations are performed at the time of the requested colour setting. For example, an age-related colour shift of the LEDs could be compensated in such a way.

1. Einleitung und Motivation

Während die Innenraumbeleuchtung zu den Zeiten der Glüh- und Leuchtstofflampen durch eine konstante Lichtfarbe gekennzeichnet war, steht heutzutage mit der LED-Technologie ein großer Spielraum in der Gestaltung von Lichtspektren und der dynamischen Beleuchtung zur Verfügung. Damit einhergehend besteht die Möglichkeit, das Licht gezielt an bestimmte Bedürfnisse und Beleuchtungsaufgaben anzupassen. Die Definition und Quantifizierung der entsprechenden lichttechnischen Parameter ist die Aufgabe zahlreicher Lichtqualitätsmetriken. Als Maßstab dient hierbei häufig das natürliche Tageslicht. Da diese Lichtart den Menschen evolutionär geprägt hat, beeinflusst sie dessen Psychologie und Physiologie. Auf physiologischer Ebene ist vor allem die nichtvisuelle Wirkung von Bedeutung, welche die innere Uhr und hormonelle Abläufe des Menschen steuert beziehungsweise beeinflusst [1] sowie die Bildung von Vitamin D [2]. Auf psychologischer Ebene spielen mehrere Eigenschaften des Tageslichts eine Rolle, da das Tageslicht eine hohe Dynamik über den Verlauf eines Tages beziehungsweise Jahres besitzt. Hierbei ändert sich die Helligkeit, die Farbe, die Diffusität und die Richtung des Lichts, wodurch sich der Begriff „Tageslicht“ auf eine Vielzahl an Lichtszenen bezieht (vgl. Abb. 1.1).

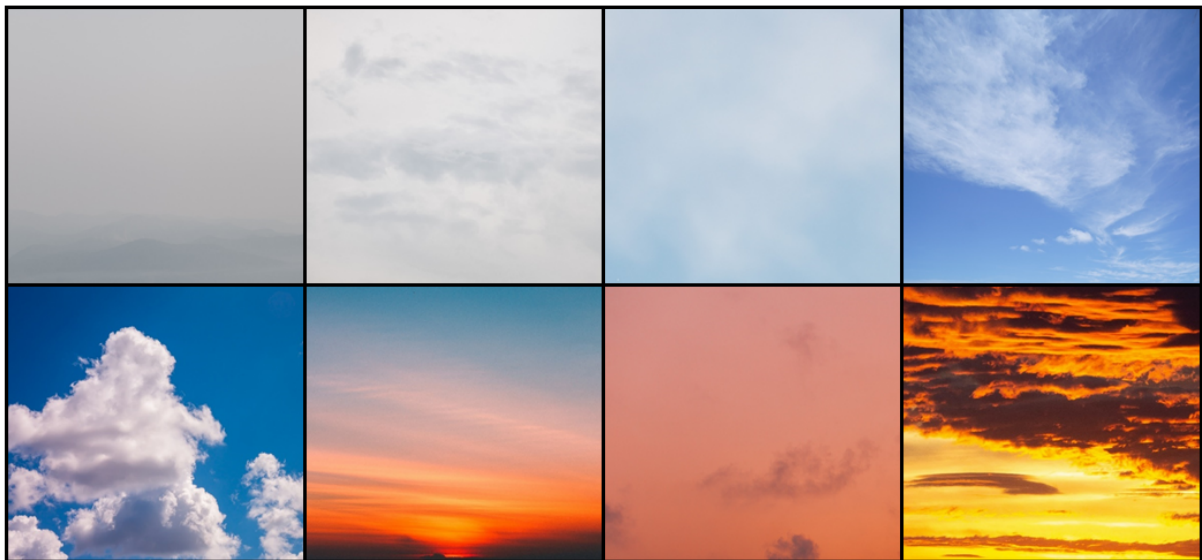


Abbildung 1.1.: Verschiedene Lichtszenen des Tageslichts, welche sich in der Helligkeit, Farbe, Diffusität und Lichtrichtung unterscheiden. Erstellt aus: pixabay.com

Die hohen Beleuchtungsstärken des natürlichen Tageslichts sorgen – verglichen mit den typischerweise niedrigeren Beleuchtungsstärken im Innenraum – unter anderem für besseren Schlaf [3]. Zu wenig Exposition von hohen Beleuchtungsstärken steht im Zusammenhang mit der Entwicklung von Kurzsichtigkeit bei Kindern [4]–[6]. Ein Einfluss der saisonal bedingten Reduktion von Tageslicht auf Farbfeldsichtigkeit wurde oberhalb des nördlichen Polarkreises in Norwegen nachgewiesen. Hierbei

wurde bei Erwachsenen, welche im Winter geboren wurden, eine geringere Farbempfindlichkeit nachgewiesen als bei den im Sommer geborenen, welche eine erhöhte Farbempfindlichkeit besitzen [7]. Bezogen auf die tägliche Tageslichtdynamik wurde ein Zusammenhang zwischen (simulierten) Sonnenaufgängen mit warmweißen Licht und einer verbesserten Stimmung und kognitiven Fähigkeiten gezeigt [8], [9]. Eine künstliche Nachbildung der variablen ähnlichsten Farbtemperatur und Helligkeit von Tageslicht zu typischen Arbeitszeiten ermöglicht eine verbesserte Konzentration [10] verglichen mit konstanter Beleuchtung. Die Bereiche hoher ähnlichster Farbtemperaturen (6000 K - 12 000 K) ermöglichen dabei eine höhere Aufmerksamkeit, führen jedoch auch schneller zu Augenermüdung als niedrigere Farbbereiche [11]. Durch entsprechende Berücksichtigung von genügend Tageslicht bei der Gestaltung von Innenräumen können Wohlbefinden, Stressreduktion, Schmerzlinderung und Schlafqualität verbessert werden [12]–[14].

Diese Zusammenhänge zeigen, dass bei zu wenig zur Verfügung stehendem Tageslicht – sei es aufgrund von baulichen Gegebenheiten, des Wetters oder der Jahreszeit – eine das Tageslicht simulierende Innenraumbeleuchtung sinnvoll ist. Hierbei kann zusätzlich durch gezielte Einstellung von der Lichtfarbe und Helligkeit die Atmosphäre (gemütlich, lebhaft) beeinflusst werden [15]. Dies ist sowohl für private als auch industrielle Beleuchtungen sinnvoll. Bei der industriellen Innenraumbeleuchtung kann zusätzlich zwischen einer Beleuchtungsanpassung zugunsten der Mitarbeiter oder der Kunden unterschieden werden, beispielsweise um deren Stimmung beim Einkaufen oder in Warteräumen zu beeinflussen [16]. Um auf die Dynamik des Tageslichts unmittelbar reagieren zu können, lassen sich Helligkeitssensoren verwenden. Dadurch kann der Energieverbrauch der Beleuchtung, welcher einen signifikanten Anteil des Gebäudeenergieverbrauchs ausmacht [17], minimiert werden, da bei ausreichend Tageslicht die künstliche Beleuchtung gedimmt werden kann. Hierfür finden sich in der Literatur verschiedene Algorithmen zur Dimmung mehrerer Zonen im Raum unter Berücksichtigung des Tageslichts und der Nutzerzufriedenheit [18]–[20].

Der Einsatz von Farb- und Spektrosensoren ermöglicht eine farbliche Anpassung des künstlichen Lichts an das umgebende Tageslicht [21], [22]. Eine messtechnische Rekonstruktion des Tageslichtspektrums ist dabei durch eine gezielte Kombinationen verschiedener Spektralempfindlichkeitskurven möglich [23]. Statt der Verwendung von Farbsensorik kann auch ein vorgegebener Verlauf von Weißtönen verwendet werden, um entsprechend das künstliche Licht über den Tagesverlauf zu variieren. Hierfür stellen beispielsweise Galabov und Ivanov verschiedene Verlaufskurven vor [24], unter zusätzlicher Berücksichtigung des Alters und der damit verbundenen Vergilbung der Augenlinse.

Gängige auf dem Markt erhältliche Produkte zur dynamischen Beleuchtung (beispielsweise Philips Hue [25], Philips Sleep & Wake-Up Light [26], Apple HomeKit [27]) greifen auf vordefinierte Verlaufskurven zurück, um Lichteinstellungen zu variieren und um Sonnenuntergänge bzw. Sonnenaufgänge zu simulieren. Eine Adaptivität wird hierbei lediglich über Dämmerung- und Bewegungssensoren ermöglicht. Hersteller für individuelle Lichtlösungen (beispielsweise Zumtobel [28]) bieten Tageslichtsensoren zur Steuerung adaptiver Lichtsysteme an, um Beleuchtungsniveaus automatisch anpassbar zu machen, jedoch nicht um farbliche Anpassung des Lichts zu ermöglichen.

Ein beispielhaftes adaptives Beleuchtungssystem, welches durch die Verwendung von optischen Sensoren sowohl eine automatische Anpassung des Helligkeitsniveaus als auch der Lichtfarbe ermöglicht, wird in Abbildung 1.2 gezeigt. Dabei misst ein Tageslichtsensor im Außenbereich die Farbe und Intensität des Tageslichts. Diese Daten werden von den Mehrkanal-LED-Leuchten im Innenraum genutzt, um

einen indirekten Beleuchtungsanteil farblich dem Tageslicht anzupassen. In den Leuchten integrierte Helligkeitssensoren messen die vorherrschende Leuchtdichte in dem zu beleuchtenden Bereich. Entsprechend wird mit steigendem Abstand vom Fenster ein niedrigeres Tageslichtniveau gemessen und kompensiert. Zusätzlich wird ein direkter Beleuchtungsanteil nach unten in den Raum abgegeben, um beispielsweise einen Arbeitsplatz mit separat einstellbarer Helligkeit und ähnlichster Farbtemperatur auszuleuchten.

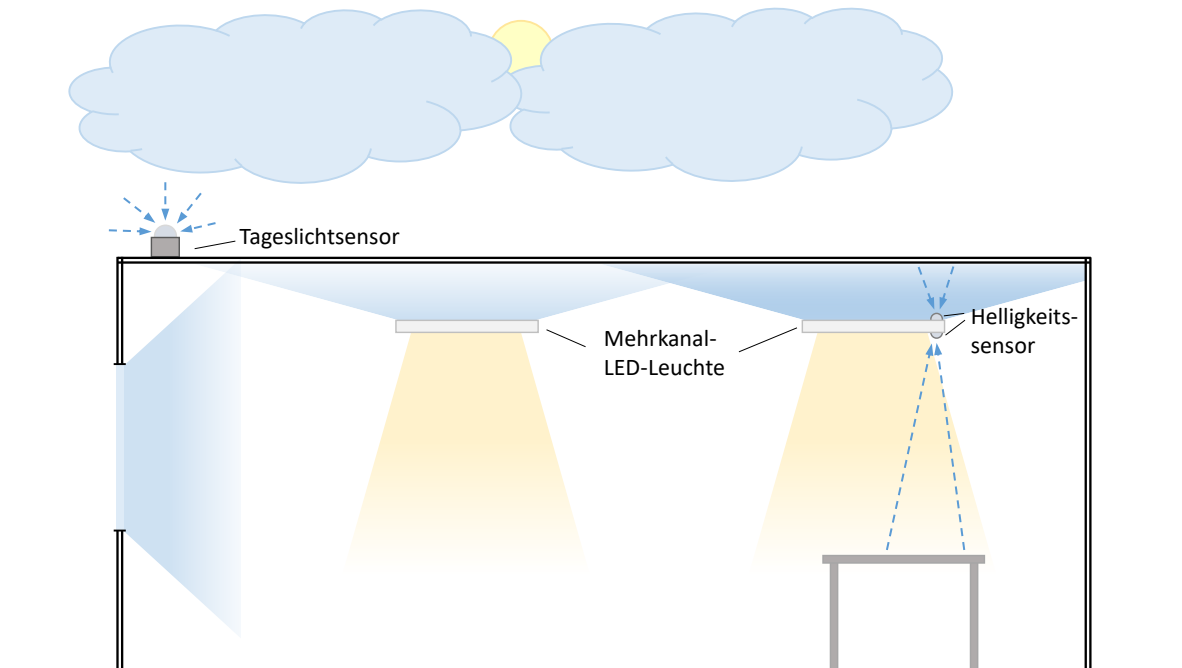


Abbildung 1.2.: Konzept eines adaptiven Beleuchtungssystems. Der Tageslichtsensor misst die Farbe des Tageslichts, welches im Innenraum als indirekte Beleuchtung von Mehrkanal-LED-Leuchten reproduziert wird und das einfallende Tageslicht ergänzt. Ein direkter Lichtanteil mit separat einstellbarer Lichtfarbe wird von den Leuchten nach unten abgegeben. Durch Verwendung von Helligkeitssensoren wird die Beleuchtungsstärke auf der Decke und dem Tisch geregelt.

Die in diesem Szenario beschriebene automatische farbliche Anpassung des LED-Lichts an das natürliche Tageslicht kann nur unter Verwendung von Spektralwertfunktionen realisiert werden, da somit die Farbörter der beiden Spektren (Tageslicht und LED-Licht) berechnet und abgeglichen werden können. Für diesen Zweck sind zwar Standardbeobachter definiert [29], jedoch bewirken die unterschiedlichen spektralen Farbempfindlichkeiten individueller Beobachter, dass trotz messtechnischen Farbabgleichs (unter Verwendung des Standardbeobachters) in der Realität häufig Farbunterschiede wahrgenommen werden können [30]–[32]. Dieser als Beobachtermetamerie bezeichnete Effekt lässt sich mit dem 2016 veröffentlichten individuellen Beobachtermodell von Asano et al. [33] modellieren. Auf diesem Modell basierende Untersuchungen in der Literatur zielen häufig auf Anwendungen im Display-Bereich ab [34]–[38]. Jedoch lassen sich anhand dieses Modells auch Aspekte der LED-basierten adaptiven Tageslichtbeleuchtung untersuchen. Entsprechend werden die ersten drei Forschungsfragen dieser Arbeit aufgestellt:

- Welche Farbunterschiede sind bei einem LED-basierten adaptiven Tageslichtsystem zu erwarten, wenn dessen Licht von individuellen Beobachtern mit dem natürlichen Tageslicht verglichen

wird?

- Wie kann dieser Effekt möglichst einfach modelliert werden, um dessen Berechnung auf dem Mikrocontroller eines adaptiven Beleuchtungssystems ausführen zu können und somit eine entsprechende Optimierung im Farbmischprozess des LED-Lichts zu ermöglichen?
- Decken sich die Vorhersagen von Farbunterschieden des individuellen Beobachtermodells mit den in der Realität auftretenden Farbunterschieden von LED- und Tageslicht?

Neben einer solchen Optimierung auf minimale Beobachtermetamerie kann mit einem adaptiven Beleuchtungssystem das Licht anhand weiterer Merkmale optimiert werden. Beispielsweise kann die Farbwiedergabe von Interesse sein, um farbige Materialien unter dem LED-Licht begutachten zu können oder sie ansprechend auszuleuchten. Ebenso kann eine gezielte Beeinflussung der physiologisch wirksamen Strahlungskomponenten [39], [40] von Vorteil sein.

Solche Qualitätsmerkmale des Lichts lassen sich bei der Verwendung von mehr als drei LED-Kanälen bei konstanter Lichtfarbe variieren. Somit kann eine gewünschte und veränderbare Priorisierung von Qualitätsmerkmalen bei der Lichterzeugung berücksichtigt werden, vorausgesetzt die entsprechenden Berechnungen lassen sich mit den begrenzten Rechenkapazitäten des Mikrocontrollers einer Leuchte in Echtzeit ausführen.

Um ein solches Beleuchtungssystem realisieren zu können, ergibt sich die Forschungsfrage:

- Wie ist ein Farbmischalgorithmus zu definieren, welcher es ermöglicht, beliebige Qualitätsmetriken bei der Farbmischberechnung in Echtzeit optimieren zu können?

Diese Fragestellungen werden in den Kapiteln „3. Beobachtermetamerie bei Tageslichtreferenz“ und „4. Farbmischung“ untersucht und beantwortet, nachdem im Folgenden die hierfür relevanten Grundlagen vorgestellt wurden.

2. Einführung in die Farbmatrik

Bereits im Jahr 1802 stellte Thomas Young fest, dass sich beliebige Farben aus drei Grundfarben mischen lassen und postulierte daraufhin das Vorhandensein dreier unterschiedlicher Farbrezeptoren im menschlichen Auge [41]. Somit wurde auch die interdisziplinäre Natur der Farbwahrnehmung offensichtlich. Ein Strahlungsspektrum, welches mit physikalischen Modellen beschrieben wird, erzeugt auf der Netzhaut des Auges eine Farbvalenz, entsprechend der biologischen Beschaffenheit des Auges und vor allem der Farbpigmente in den Sehzellen. Die für die Entstehung der Farbvalenz relevanten Vorgänge und Einflüsse werden in Abschnitt 2.1 beschrieben. Die Quantifizierung der Farbvalenzen ist Aufgabe der Farbmatrik. Die neuronale und psychologische Weiterverarbeitung einer oder mehrerer Farbvalenzen zu der wahrgenommenen Farbe – beispielsweise ob eine orangene Valenz als braun wahrgenommen wird und welchen Einfluss der Weißabgleich darauf hat – ist Bestandteil von Farberscheinungsmodellen wie zum Beispiel CIECAM02. Da diese Arbeit ausschließlich Lichtfarben behandelt, finden Farberscheinungsmodelle hier keine Verwendung.

Stattdessen sind hier die aus einem Strahlungsspektrum resultierenden Farbvalenzen von Interesse, welche sich mittels Spektralwertfunktionen berechnen lassen. In den Graßmannschen Gesetzen zur Additivität von Farben [42] wurde bereits deren Linearität impliziert, wodurch sich Farbvalenzen als Vektor in einem euklidischen Farbraum darstellen lassen. Entsprechend wird in Abschnitt 2.2, sowohl für einen Standardbeobachter als auch für individuelle Beobachter, die Berechnung der Farbvalenzen und Farbdifferenz, in denen für diese Arbeit relevanten Farbräumen, vorgestellt. Auf diesen Grundlagen wird ebenso die Beobachtermetamerie erläutert, sowie verschiedene Ansätze aus der Literatur, die Beobachtermetamerie als Metrik zu definieren, welche die Grundlage für Kapitel 3 bilden.

Neben der farblichen Erscheinung eines Strahlungsspektrums, können weitere Eigenschaften des Lichts analysiert werden, um die Qualität einer Beleuchtung zu bewerten (beispielsweise die Farbwiedergabe oder die physiologische Wirksamkeit). Diejenigen Metriken, welche bei der Farbmischberechnung in Kapitel 4 zur Optimierung der spektralen Lichtqualität dienen, werden in Abschnitt 2.3 gezeigt und erklärt.

2.1. Optischer Pfad des Lichts zu den Sehzellen

Bevor Licht auf die Netzhaut fällt, passiert es die Hornhaut, die Linse und den Glaskörper des Auges (vgl. Abb. 2.1). Vor allem die Linse bewirkt eine Filterung des Spektrums (vgl. Abb.2.2 (a)), hier werden kurze Wellenlängenbereiche (violett und blau) absorbiert [43]–[46]. Das Maß der Absorption steigt mit dem Alter [47], wodurch eine zunehmende Vergilbung erfolgt. Jedoch ist das Alter nicht der alleinige Grund für interpersonelle Unterschiede der optischen Dichte. Hierbei fallen auch Faktoren wie Rauchen [48] oder Diabetes ins Gewicht [49], wobei ein Einfluss des Alters von 50 % [49] bzw. 47 % [50]

festgestellt wurde.

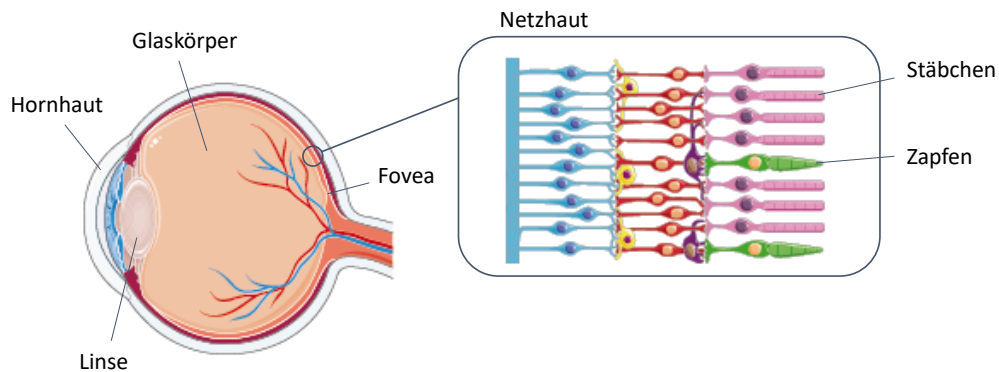


Abbildung 2.1.: Aufbau des menschlichen Auges und deren Netzhaut. Bild (bearbeitet): smart.servier.com

Bevor Licht auf die Sehzellen des zentralen Bereichs der Netzhaut – die Makula – fallen kann, wird es durch die Makula Pigmente gefiltert. Diese gelben Pigmente absorbieren energiereiches, blaues Licht [44], [45], [51] (vgl. Abb.2.2 (b)) und schützen dadurch die darunter liegenden Sehzellen. Die Dichte dieser Pigmente ist im Bereich der maximalen Sehschärfe – der Fovea – am höchsten und nimmt zum peripheren Sehbereich hin ab [44]. Ebenso wie bei der Linse treten hier interpersonelle Unterschiede in der Dichte auf, wobei Faktoren wie ethnische Herkunft [52]–[55], Geschlecht [55], [56], Körperfettanteil [57] und die Karotin-Zufuhr durch Nahrungsaufnahme [58] einen Einfluss haben.

Unter der Makula-Schicht, im Bereich der Fovea, befinden sich an Sehzellen ausschließlich die für das Farbsehen nötigen zapfenförmigen Zellen, deren Dichte zum peripheren Bereich hin abnimmt. Diese werden anhand ihrer maximalen Empfindlichkeit im langen („long“: L-Zapfen), mittleren („middle“: M-Zapfen) und kurzwelligen („short“: S-Zapfen) Wellenlängenbereich unterschieden. Mit einem ungefähren Verhältnis von 40:20:1 der L:M:S-Zapfen sind die S-Zapfen zahlenmäßig am wenigsten und im Zentrum der Fovea sogar überhaupt nicht vorhanden [59]. Während die Zapfen das photopische Sehen ermöglichen – Leuchtdichte oberhalb von 3 cd/m^2 – sind sie jedoch für den skotopischen Bereich – Leuchtdichten unterhalb $0,003 \text{ cd/m}^2$ – nicht sensitiv genug. Hier wird das Sehen durch stäbchenförmige Sehzellen ermöglicht, welche über 1000-mal lichtempfindlicher sind als die Zapfen [60], aber kein Farbsehen ermöglichen. Diese Stäbchen befinden sich vor allem im peripheren Bereich und ermöglichen die Wahrnehmung von Kontrasten bei dunklen Verhältnissen.

Für die Farbmeterik bei photopischen Verhältnissen sind somit die spektralen Empfindlichkeitskurven der Zapfen für die Farbvalenz ausschlaggebend. Hierfür können zwar die Absorptionskurven ihrer Farbpigmente gemessen werden, jedoch lässt sich darauf basierend nicht die Präzision von Spektralwertfunktionen erreichen, wie sie durch Farbabgleichsversuche erreicht wird. Die Dichte der Farbpigmentmoleküle einer einzelnen Sehzelle beeinflusst ihre spektrale Empfindlichkeit aufgrund des „self-screening“ Effekts [61]. Hierbei werden Photonen, deren Wellenlänge nahe am Empfindlichkeitsmaximum λ_{max} ist, mit einer höheren Wahrscheinlichkeit an der Oberfläche der Sehzelle absorbiert. Somit sind Photonen anderer Wellenlängen im tieferen Bereich der Sehzelle überrepräsentiert und die Sehzelle bekommt eine breitere spektrale Empfindlichkeitskurve als Sehzellen mit weniger Farbpigmenten. Zusätzlich zur Variation aufgrund unterschiedlicher Dichten der Farbpigmente unterliegt auch λ_{max} der drei Zapfentypen interpersonellen Unterschieden [45], [62], wobei ein genetischer Ursprung bei

denen der L- und M-Zapfen festgestellt wurde [62]. Abbildung 2.2 (c) und (d) zeigt die von Stockman & Sharpe konstruierten spektralen Empfindlichkeitskurven der drei Zapfentypen.

Neben den zwei Typen von lichtempfindlichen Sehzellen verfügt das menschliche Auge noch über lichtempfindliche Nervenzellen – ipRGCs (intrinsically photosensitive retinal ganglion cells) – mit deren Hilfe nichtvisuelle Vorgänge gesteuert werden, wie z.B. der circadiane Rhythmus oder Pupillenreflexe [63], [64]. Um den entsprechenden Stimulus zu quantifizieren, wird hier das von der CIE standardisierte melanopische Wirkungsspektrum [65] mit einer maximalen Empfindlichkeit bei 480 nm verwendet (vgl. Abschnitt 2.3.4). Dieses basiert auf dem Absorptionsspektrum des Photopigments Melanopsin der ipRGCs und der präzeptoralen Filterung eines 32 Jahre alten Beobachters [65], [66].

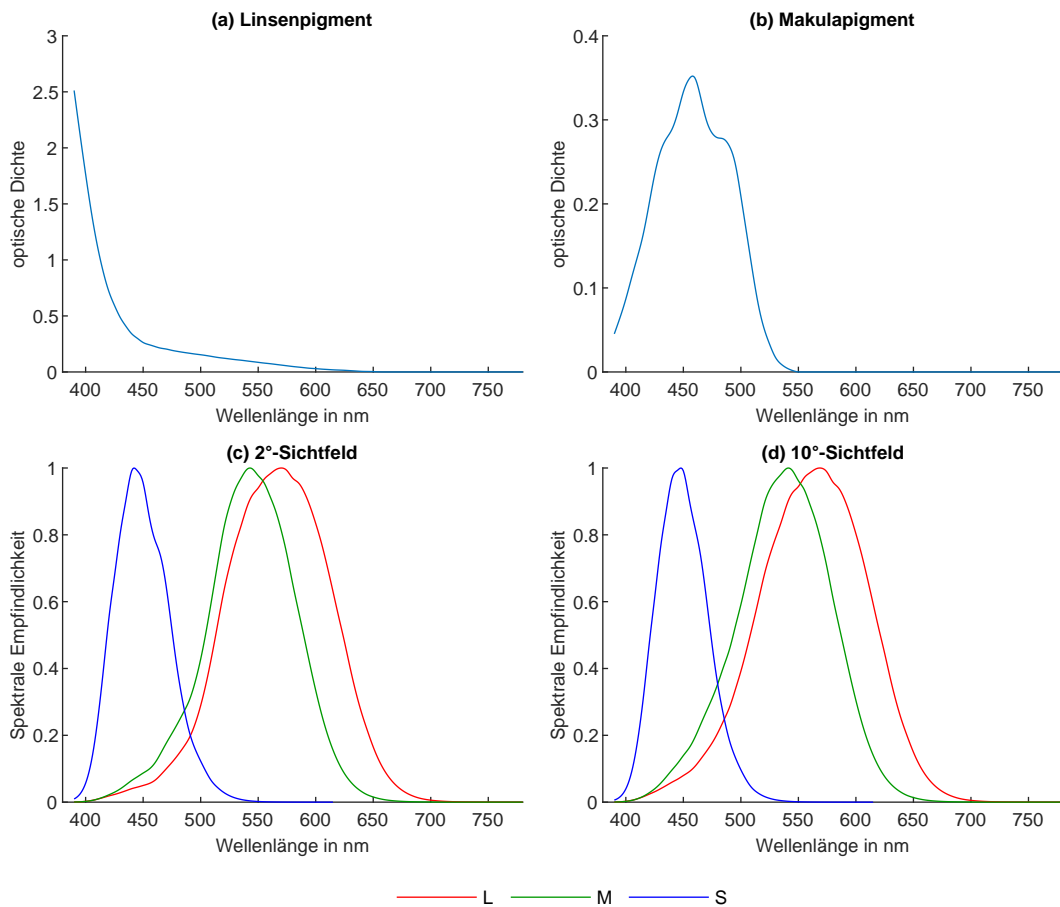


Abbildung 2.2.: (a) Optische Dichte der Linse bei kleiner Pupille, bei großer Pupille ist eine Skalierung von $\frac{1}{1,16}$ vorzunehmen [62]. (b) Optische Dichte des Makulapigments für einen 2°-Beobachter, von 5 nm zu 1 nm Schritten kubisch interpoliert. [45]. (c), (d): Spektrale Empfindlichkeitskurven der L,M,S-Zapfen für das 2°-Sichtfeld(c) und das 10°-Sichtfeld (d) [45], [62].

2.2. Berechnung von Farbvalenzen mittels Spektralwertfunktionen

Die zuvor beschriebenen Vorgänge beeinflussen unmittelbar, welches Verhältnis zwischen drei Primärfarben nötig ist, um den identischen Farbreiz einer Spektralfarbe zu erzeugen. Die Verläufe dieser Verhältnisse über den gesamten Wellenlängenbereich der sichtbaren Strahlung werden als Spektralwertfunktionen bezeichnet. Diese psychophysischen Funktionen lassen sich mittels Farbabgleichsversuchen messen. Hierbei wird von einem Beobachter die Farbe eines Abgleichsfelds so eingestellt, dass sie der

Farbe des Referenzfeldes gleicht. Unterschieden wird dabei zwischen der Maxwell Methode und der Maximum Saturation Methode. Bei letzterer besteht die Referenz aus monochromatischem Licht, dessen Wellenlänge über den sichtbaren Bereich variiert wird und jeweils durch Einstellung der Leuchtdichteverhältnisse dreier Primärfarben (meist monochromatisches Blau, Grün, Rot) nachgemischt werden muss [67]. Bei der Maxwell Methode besteht die Referenzseite aus einem weißen Referenzlicht, welches mit drei Primärfarben nachgemischt wird, während diese mit einer vierten Lichtquelle, variabler monochromatischer Strahlung, überlagert werden [68]. Trotz der wissenschaftlich belegten Additivität von Farben [69] wurden beim Vergleich dieser beiden Verfahren Additivitätsfehler festgestellt [70]. Oichermann et al. [71] fassen dies so zusammen, dass Spektralwertfunktionen, welche auf der Verwendung schmalbandiger Spektren basieren, bei der Vorhersage eines Abgleichs zwischen schmalbandigen und breitbandigen Spektren den nötigen Anteil an blauem Licht unterschätzen.

Aufgrund der variablen Dichte und Verteilung von Sehzellen auf der Netzhaut werden Spektralwertfunktionen in einem bestimmten Betrachtungswinkel (zentriert zur Sehachse) gemessen. In der Literatur finden sich unterschiedliche Spektralwertfunktionen. Im Folgenden werden diejenigen vorgestellt, welche aufgrund ihrer Relevanz als Grundlage dieser Arbeit dienen.

2.2.1. Spektralwertfunktionen Standards CIE 1931 & CIE 1964

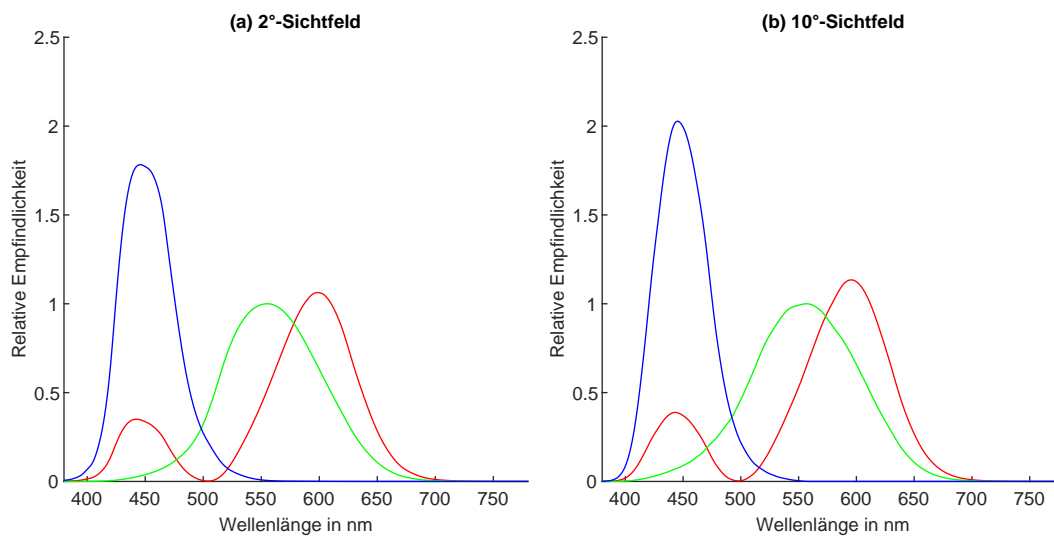


Abbildung 2.3.: Spektralwertfunktionen CIE 1931 (a) für ein 2°-Sichtfeld und CIE 1964 (b) für ein 10°-Sichtfeld.

Die ersten standardisierten Spektralwertfunktionen CIE 1931 wurden für einen Betrachtungswinkel von 2° definiert (vgl. Abb. 2.3 (a)). Basierend auf sieben untersuchten Beobachtern von Wright [72] und zehn Beobachtern von Guild [73] wurden entsprechend der Maximum Saturation Methode die Spektralfarben mit drei monochromatischen (rot – R, grün – G, blau – B) Spektren nachgemischt. Da nicht alle Spektralfarben damit abgeglichen werden konnten, wurde in entsprechenden Fällen der Referenzseite Licht der roten Primärquelle hinzugemischt und als negativer Mischanteil der Abgleichsseite notiert. Folglich waren die RGB-Kurven nicht ausschließlich positiv, was damals zu vermeiden galt, da noch keine Computer für Berechnungen zu Verfügung standen, sondern mechanische Rechenmaschinen verwendet wurden [74]. Neben der Anforderung, dass Spektralwertfunktionen ausschließlich positiv sein sollen, wurden weitere Anforderungen definiert. Unter anderem sollte eine der drei Funktionen der

$V(\lambda)$ Kurve gleichen, welche das Helligkeitsempfinden bei photopischen Leuchtdichten modelliert. Des Weiteren sollte die Farbvalenz eines isoenergetischen Spektrums aus drei gleich großen Anteilen von Tristimulus-Werten bestehen. Aus dieser Transformation der RGB-Kurven gingen Spektralwertfunktionen hervor, die mittels drei virtuellen Farbvalenzen – sie existieren nur rechnerisch und entsprechen keiner sichtbaren Farbe – den kompletten Spektralkurvenzug mischen lassen. Die drei virtuellen Valenzen, welche im dreidimensionalen XYZ-Farbraum einen Farbort beschreiben, werden als Tristimulus-Werte bezeichnet.

Die Berechnung der XYZ Tristimulus-Werte eines Strahlungsspektrums $s(\lambda)$ erfolgt durch seine Gewichtung mit den Spektralwertfunktionen $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$.

$$X = K_m \int_{380}^{780} \bar{x}(\lambda) s(\lambda) d\lambda \quad (2.1)$$

$$Y = K_m \int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda) s(\lambda) d\lambda \quad (2.2)$$

$$Z = K_m \int_{380}^{780} \bar{z}(\lambda) s(\lambda) d\lambda \quad (2.3)$$

Hierbei wird die photometrische Normalisierungskonstante K_m für Selbstleuchter so gewählt, dass Y der photopischen Größe des Spektrums entspricht: $K_m = 683,002 \text{ lm/W}$ für einen 2° -Beobachter, $K_m = 683,599 \text{ lm/W}$ für einen 10° -Beobachter [29]. Während die Tristimulus-Werte auch von der Leuchtdichte abhängen, lässt sich die reine Chromatizität durch eine Transformation in den zweidimensionalen xy -Farbraum isolieren (Gleichung (2.4) - (2.6)). Diese Transformation entspricht der Projektion des X, Y, Z Farborts auf eine Dreiecksebene, wodurch der Einfluss der Leuchtdichte auf den Farbort eliminiert wird (vgl. Abb. 2.4). Durch eine anschließende Projektion auf die xy -Ebene, wird der Farbort auf eine zweidimensionale Größe reduziert.

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (2.4)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (2.5)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \leftrightarrow z = 1 - x - y \quad (2.6)$$

Mit der gleichen Berechnungsmethode werden die Spektralwertfunktionen CIE 1964 (vgl. Abb. 2.3 (b)) verwendet, welche von der CIE für ein 10° -Sichtfeld standardisiert wurden. Sie beruhen auf den Abgleichergebnissen der 49 Beobachter von Stiles und Burch [75] sowie 27 Beobachter von Speranskaya [76] und werden ab einem Sichtfeld von 4° empfohlen [29].

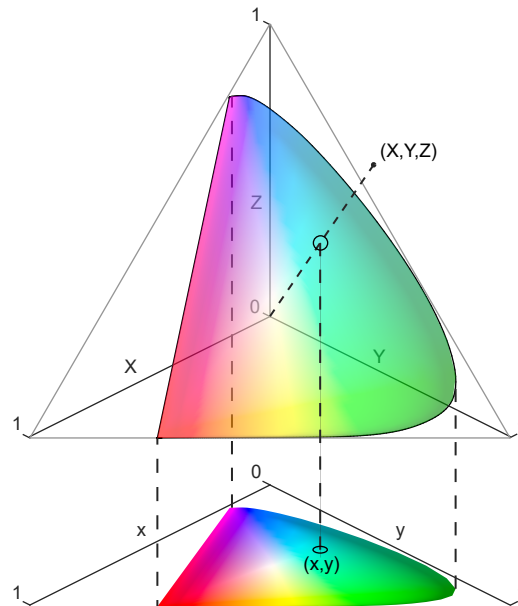


Abbildung 2.4.: Ein Farbpunkt im XYZ-Farbraum wird zunächst vom Ursprung auf die Dreiecksebene und anschließend auf die zweidimensionale xy -Ebene projiziert.

2.2.2. Physiologischer Beobachter CIEPO06

Mit dem physiologischen Beobachter von 2006 (Physiological Observer 2006 – CIEPO06) [77] veröffentlichte die CIE eine Empfehlung von Spektralwertfunktionen, welche die physiologischen Mechanismen der Farbwahrnehmung modellieren. Hierfür wurden die 10° Spektralwertfunktionen von Stiles und Burch [78] mit den Untersuchungen von Stockman und Sharpe [62] zu den spektralen Empfindlichkeiten der Sehzapfen kombiniert. Dabei wird die altersabhängige Filterung der Linse (20 bis 80 Jahre) sowie die betrachtungswinkelabhängige Dichte der Makulapigmente und der Sehzellen (1° bis 10°) berücksichtigt. Die somit berechenbaren Sehzapfen-Grundfunktionen $\bar{l}(\lambda)$, $\bar{m}(\lambda)$, $\bar{s}(\lambda)$ können mit einer 3×3 Transformationsmatrix in $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ -Funktionen umgerechnet werden.

In ihrer Analyse des physiologischen Beobachter-Modells stellten Sarkar et al. [79] fest, dass die CIE-PO06 Funktionen nicht immer eine Verbesserung gegenüber den CIE 1964 Funktionen bewirken. Die neue $\bar{z}(\lambda)$ Funktion schneide besser ab als die der CIE 1964 Funktionen. Bei den $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ Funktionen treten jedoch signifikante Abweichungen auf, die Sarkar durch eine nichtlineare Optimierung verbessern konnte, bei der L- und M-Grundfunktionen verschoben und gewichtet werden. Darauf aufbauend schlägt Sarkar vor, die maximale optische Dichte der L- und M-Zapfen als altersabhängige Größe in zukünftige Modelle aufzunehmen.

2.2.3. Individuelle und kategorische Beobachter

Ebenso schlugen Sarkar et al. [80] vor, acht Beobachter-Kategorien zu definieren, da er somit die Farbtreue bei Display-Anwendungen für individuelle Beobachter vergrößern konnte. In seinen Untersuchungen ließen sich nur 8 % der Beobachter mit den CIE 1964 Funktionen akkurat modellieren. Da keiner der kategorischen Beobachter es schafft 25% aller Beobachter zufriedenstellend zu beschreiben,

argumentiert er, dass ein einzelner Standardbeobachter immer eine nicht-normale Farbsicht des Großteils der Population implizieren würde. Deswegen plädiert er für eine Standardisierung von Beobachter-Kategorien, wodurch ein individueller Beobachter beispielsweise Farbeinstellung eines Displays auf sich anpassen könnte.

Fairchild und Heckaman [81], [82] simulierten eine Population von Normalbeobachtern, indem sie zusätzlich zu den Parametern Alter und Sichtfeld des CIEPO06-Beobachters die genetische bedingte Verschiebung der Spitzenwellenlänge λ_{\max} von L- und M- Zapfen in die Modellbildung miteinbezogen.

Individuelles Beobachtermodell von Asano et al.

Hierauf aufbauend entwickelten Asano et al. [33] ein Modell für die spektralen Empfindlichkeitsverläufe der L-, M- und S-Zapfen individueller Beobachter, bezeichnet als *lms-CMFs* (Colour Matching Functions, zu deutsch: Spektralwertfunktionen).

$$lms-CMFs = f(a, v, d_{\text{lens}}, d_{\text{macula}}, d_L, d_M, d_S, s_L, s_M, s_S) \quad (2.7)$$

Hierbei werden zehn Parameter verwendet:

- a : Alter
- v : Sehwinkel in °
- d_{lens} : Abweichung in % von der durchschnittlichen Linsen-Pigmentdichte (Standardabweichung 18,7%)
- d_{macula} : Abweichung in % vom Durchschnitt der maximalen optischen Dichte des Makula-Pigments (Standardabweichung 36,5 %)
- d_L, d_M, d_S : Abweichung in % vom Durchschnitt der maximalen optischen Dichte der L-, M-, S-Zapfenpigmente (Standardabweichung 9 % (L), 9 % (M), 7,4 % (S))
- s_L, s_M, s_S : Abweichung in nm von der durchschnittlichen Wellenlänge maximaler Empfindlichkeit λ_{\max} der L-, M-, S-Zapfenpigmente (Standardabweichung 2 nm (L), 1,5 nm (M), 1,3 nm (S))

Die physiologischen Parameter wurden als normalverteilt angenommen und deren Standardabweichung auf Basis umfangreicher Literaturergebnisse bestimmt. Asano et al. veröffentlichten auch den Code, welcher mittels Monte Carlo Simulation und der US Zensus 2010 Altersverteilung eine beliebige Anzahl an Spektralwertfunktionen generiert [83]. Hierauf basierend wurden für die vorliegende Arbeit 1000 xyz-Spektralwertfunktionen *xyz-CMFs* sowohl für das 2° als auch das 10°-Sichtfeld generiert (vgl. Abb. 2.5). Hierfür wurden die *lms*-Spektralwertfunktionen *lms-CMFs* mit einer Transformationsmatrix $M_{3 \times 3}$ zu *xyz*-Spektralwertfunktionen transformiert.

$$xyz-CMFs = lms-CMFs \times M_{3 \times 3} \quad (2.8)$$

Mit

$$M_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0,4151 & -0,2424 & 0,0425 \\ 0,1355 & 0,0833 & -0,0043 \\ -0,0093 & 0,0125 & 0,2136 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

für das 2°-Sichtfeld und

$$M_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0,4499 & -0,2630 & 0,0460 \\ 0,1617 & 0,0726 & -0,0011 \\ -0,0036 & 0,0054 & 0,2291 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

für das 10°-Sichtfeld. Diese beiden Matrizen bildeten Asano et al. durch eine lineare Regression zwischen seinen durchschnittlichen lms-Spektralwertfunktionen und den CIE 1931 bzw. CIE 1964 Funktionen.

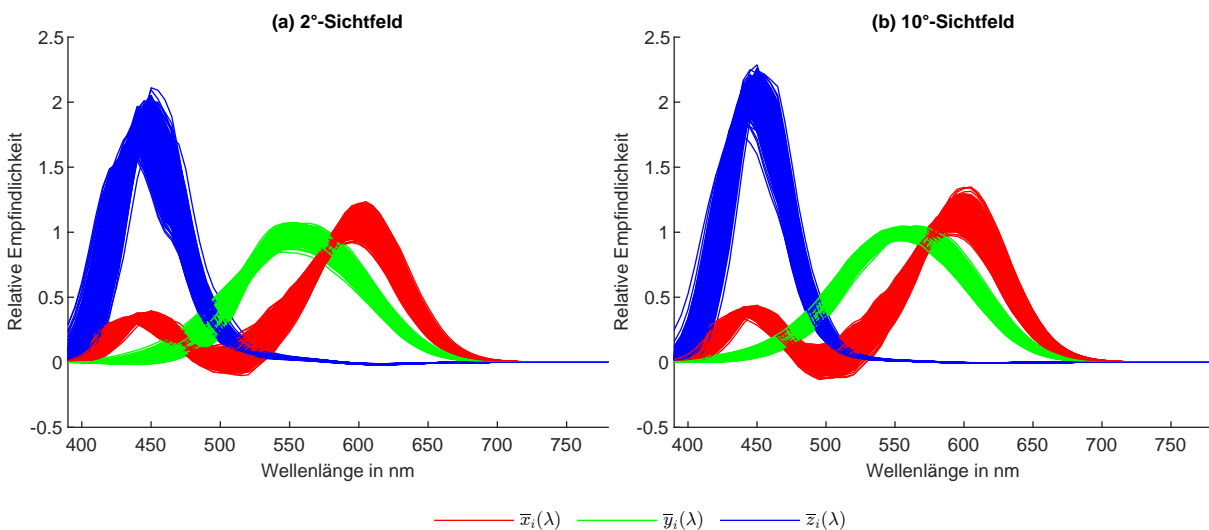


Abbildung 2.5.: Spektralwertfunktionen 1000 simulierter individueller Beobachter.

Kategorisches Beobachtermodell von Asano et al.

Entsprechend dem Vorschlag von Sarkar et al., Beobachter-Kategorien zu definieren, führten Asano et al. eine Analyse von 10 000 Spektralwertfunktionen durch, welche mit dem individuellen Beobachtermodell der Autoren erzeugt wurden [84]. Für jeden Beobachter wurden acht Paare an Metameriespektren berechnet, welche aus den RGB-Primärspektren unterschiedlicher Bildschirme sowie einem mit der Standardlichtart D50 beleuchteten weißen Testfeld eines ColorCheckers hervorgingen.

Als Referenzbeobachter wurde der Durchschnitt aus den 10 000 individuellen Spektralwertfunktionen gebildet, welcher einem 38-jährigen CIEPO06-Beobachter entspricht. Für diesen Referenzbeobachter wurden die CIELAB Farbörter der Metameriespektren berechnet und mit einem modifizierten k-Medoids Verfahren gruppiert. Die so definierten kategorischen Beobachter entsprechen denjenigen Spektralwertfunktionen, welche für die entsprechende Gruppe die kleinsten Farbdifferenzen erzeugen. Somit wird mit steigender Anzahl an Kategorien der potentielle Farbfehler minimiert. Asano et al. empfehlen zehn Beobachterkategorien, da mehr Kategorien in den meisten Anwendungen nur noch eine geringfügige Verbesserung erzielen. Bei Verwendung von sehr schmalbandigen Primärspektren, wie

bei denen eines Laserprojektors, seien jedoch 50 Kategorien nötig.

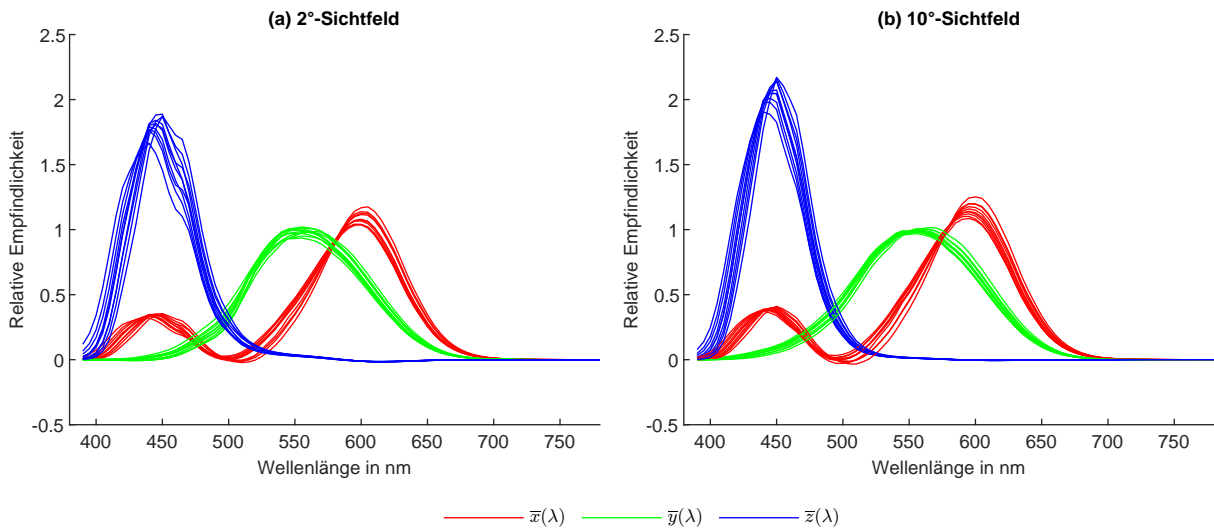


Abbildung 2.6.: Spektralwertfunktionen der zehn kategorischen Beobachter von Asano et al. [84].

Die 1000 individuellen und zehn kategorischen xyz-Beobachterfunktionen bilden die Grundlage zur Berechnung des Beobachtermetamerie-Effekts in dieser Arbeit.

2.2.4. Beobachtermetamerie-Effekt

Erzielen zwei Spektren trotz unterschiedlicher Spektralverteilung denselben Farbort, wird dies als Metamerie bezeichnet [85]. Mit den Abgleichversuchen als Basis für Spektralwertfunktionen bildet der Metamerieeffekt die Grundlage der Farbmeterik. Somit kann mit den Spektralwertfunktionen vorhergesagt werden, ob zwei Spektren den gleichen Farbort erzeugen, in welchem Fall die beiden Spektren als Metameriepaar bezeichnet werden. Da die Spektralwertfunktionen-Standards CIE 1931 und CIE 1964 auf den durchschnittlichen Testergebnissen vergleichsweise kleiner Beobachtergruppen basieren (relativ zur Gesamtpopulation), ist es nicht verwunderlich, dass sie sich von den Spektralwertfunktionen eines individuellen Beobachters unterscheiden können. Aufgrund der individuellen Variation in der spektralen Sehempfindlichkeit (vgl. Abschnitt 2.1) kann somit ein vermeintliches Metameriepaar von einem anderen Beobachter als unterschiedlich wahrgenommen werden. Dieser Effekt wird als Beobachtermetamerie bezeichnet [86] und kann bei Verwendung der Standards CIE 1931 und CIE 1964 zu Diskrepanzen zwischen Vorhersage und tatsächlich wahrgenommener Farbgleichheit führen [30]–[32]. Da die Größenordnung dieses Effekts von der spektralen Beschaffenheit der Metameriepaare abhängt, kann er beim Nachmischen einer gegebenen Farbe, durch eine gezielte Wahl von Primärspektren, minimiert werden. Voraussetzung hierfür ist ein Modell, welches diesen Effekt berechenbar macht. Zum Erstellen eines solchen Modells wurden verschiedene Herangehensweisen bisher erforscht.

Nimeroff 1962 [87]

Nimeroff et al. schlugen 1962 eine Methodik zur Definition eines kompletten Standardbeobachter-Modells vor. Neben den durchschnittlichen Spektralwertfunktionen sollen hierbei auch die spek-

trale Varianz und Kovarianz der einzelnen Spektralwertfunktionen beschrieben werden. Diese Varianzen sollen aus Messungen von inter- und intrapersonellen Variationen in Abgleichsversuchen gemessen werden. Zur damaligen Zeit lagen allerdings noch nicht genug Daten vor, um eine hierfür nötige repräsentative Statistik umsetzen zu können.

Allen 1970 [88]

Unter Verwendung der 20 getesteten Beobachter von Stiles und Burch [78] definierte Allen einen auf den Standardabweichungen der individuellen Beobachterfunktionen basierenden Beobachter (einen Standard-Abweichungsbeobachter). Mit dem Farbabstand der beiden Spektren für den Abweichungsbeobachter, welche für den Normalbeobachter ein Metameriepaar bilden, definiert Allen seinen Metamerie-Index.

Wyszecki und Stiles 1982 [44]

Die Beobachterdaten von Stiles und Burch [78] dienten auch weiteren Autoren als Quelle für individuelle Beobachterfunktionen. Wyszecki und Stiles benutzten sie, um 1982 einen Beobachtermetamerie-Index zu veröffentlichen, welcher auf dem durchschnittlichen Farbabstand der 20 individuellen Beobachter basiert.

Nayatani und Takahama 1983 [89]

Mittels Singulärwertzerlegung derselben 20 Spektralwertfunktionen berechnete Nayatani seine Abweichungsbeobachter-Funktionen. Die hieraus entstandenen ersten Abweichungsfunktionen der Singulärwertzerlegung ähnelten denen von Allen. Durch Optimierung seiner ersten Abweichungsfunktionen erstellte er ein zweites Set an Funktionen. Unter Verwendung von zwölf Metameriepaaren konnte die Korrelation zu der Beobachtermetamerie von 20 Beobachtern erhöht werden.

Ohta 1985 [90]

Ohta benutzte eine nichtlineare Optimierungstechnik, um aus den 20 Beobachtern von Stiles Abweichungsbeobachterfunktionen herzuleiten. Dabei erzielte er ähnliche Funktionsverläufe wie Nayatani und beschrieb, dass Nayatanis und seine Funktionen die Beobachtermetamerie besser modellieren als die Funktionen von Allen.

CIE Beobachtermetamerie-Index 1989 [86]

Auf Basis der Arbeiten von Nayatani [89] und seinem Kollegen Takahama [91] veröffentlichte die CIE 1989 den "CIE Special Metamerism Index: Change in Observer". Zur Berechnung des Metamerie-Index werden die ersten Abweichungsfunktionen $\Delta\bar{x}(\lambda)$, $\Delta\bar{y}(\lambda)$, $\Delta\bar{z}(\lambda)$ (vgl. Abb. 2.7 (a)) verwendet, während es insgesamt vier Sets von Abweichungsfunktionen gibt.

$$\bar{x}_d(\lambda) = \bar{x}(\lambda) + \Delta\bar{x}(\lambda) \tag{2.11}$$

$$\bar{y}_d(\lambda) = \bar{y}(\lambda) + \Delta\bar{y}(\lambda) \tag{2.12}$$

$$\bar{z}_d(\lambda) = \bar{z}(\lambda) + \Delta\bar{z}(\lambda) \tag{2.13}$$

Durch Addition der ersten Abweichungsfunktionen zu den Spektralwertfunktionen CIE 1931 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ werden die Funktionen des Standard-Abweichungsbeobachters $\bar{x}_d(\lambda)$, $\bar{y}_d(\lambda)$, $\bar{z}_d(\lambda)$

(vgl. Abb. 2.7 (b)) definiert [29]. Die CIELAB Farbdifferenz zwischen beiden Spektren eines Metameriepaars, bei Verwendung des Abweichungsbeobachters, ergibt den Metamerie-Index M_{obs} .

$$M_{\text{obs}} = \Delta E_{ab}^* \quad (2.14)$$

Dabei ist neben der CIELAB Farbdifferenz ΔE_{ab}^* auch eine anders definierte Farbdifferenz zulässig, sofern diese dabei angegeben wird. Zusätzlich können durch Verwendung aller vier Sets von Abweichungsfunktionen die 95% Konfidenzellipsen der Farbkoordinaten berechnet werden. Verschiedene Untersuchungen zeigten allerdings, dass hierbei die interpersonelle Variation signifikant unterschätzt wird [92] und nur 15% der tatsächlichen Variation beschreibt [86], [93].

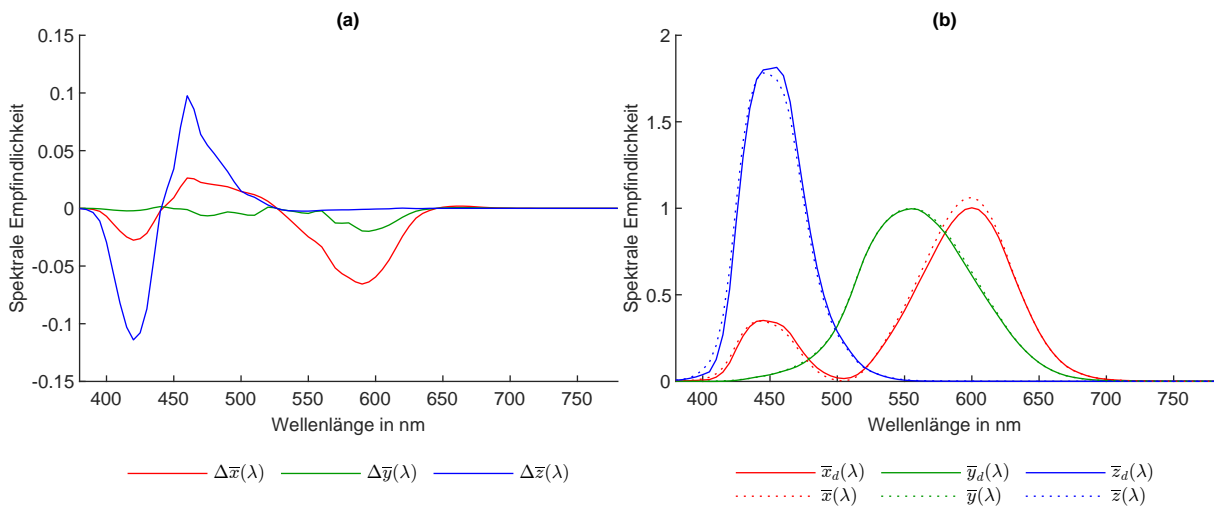


Abbildung 2.7.: (a): Die CIE Abweichungsfunktionen $\Delta\bar{x}(\lambda)$, $\Delta\bar{y}(\lambda)$, $\Delta\bar{z}(\lambda)$ für Beobachtermetamerie. (b): Der CIE Standard-Abweichungsbeobachter $\bar{x}_d(\lambda)$, $\bar{y}_d(\lambda)$, $\bar{z}_d(\lambda)$, welcher aus der Addition der Abweichungsfunktionen $\Delta\bar{x}(\lambda)$, $\Delta\bar{y}(\lambda)$, $\Delta\bar{z}(\lambda)$ zu den Funktionen des CIE 1931 Standardbeobachters $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ gebildet wird.[29]

2.2.5. Farbabstand

Ein Metameriefehler zeigt sich in Form eines wahrnehmbaren Farbunterschieds zwischen den beiden Spektren eines Metameriepaars. Um anhand ihrer Abstände im xy-Farbdigramm vorhersagen zu können, ob die Farben als gleich oder unterschiedlich wahrgenommen werden, führte MacAdam 2500 Farb- abgleiche mit einem einzigen Beobachter durch [94]. Zum Abgleich wurde nur ein Auge verwendet und das Testfeld auf 2° , mit weißem Hintergrund (ca. 6800 K), beschränkt. Auf Basis mehrmaliger Abgleiche berechnete MacAdam die Standardabweichungen und schloss daraus auf die geringste wahrnehmbare Farbdifferenz. Die hieraus hervorgegangenen Abstände zu einem Farbort im xy-Diagramm sind nicht gleichmäßig in alle Richtungen, sondern ellipsenförmig und werden als MacAdam Ellipsen bezeichnet. Die Größe dieser Ellipsen variiert in Abhängigkeit des Farborts. Unter Annahme einer Gaußschen Normalverteilung werden die Ellipsengrößen heute noch in SDCM (Standard Deviation of Colour Matching) als Maßeinheit verwendet, wobei 1 SDCM der original Ellipsengröße entspricht.

Der gleichabständige Farbraum CIE 1960

Aus der Bestrebung, ein Farbdigramm zu schaffen, in dem die xy -Ellipsen zu gleichgroßen Kreisen transformiert werden, ging das uv -Farbdigramm hervor [95] und wurde später als CIE 1960 Farbraum veröffentlicht. Hierbei werden die Farbkoordinaten u und v anhand der xy -Farbkoordinaten berechnet:

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad (2.15)$$

$$v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3} \quad (2.16)$$

Zwar gilt dieser Farbraum als überholt, was die Gleichabständigkeit betrifft, er wird jedoch genutzt, um die ähnlichste Farbtemperatur eines Farborts zu bestimmen. Lediglich im uv -Farbdigramm liegen Farbörter derselben ähnlichsten Farbtemperatur auf einer Geraden, den sogenannten Juddschen Geraden. Diese verlaufen senkrecht durch die Tangente eines Farborts auf dem Planckschen Kurvenzug. Durch entsprechende Berechnung werden in dieser Arbeit die ähnlichsten Farbtemperaturen von Farbörtern berechnet.

Der gleichabständige Farbraum CIE 1976

Aus einer Weiterentwicklung des CIE 1960 Farbraums ging der gleichabständige Farbraum CIE 1976 hervor [29] (vgl. Abb. 2.8), welcher die Gleichabständigkeit besser beschreibt als sein Vorgänger. Hierbei werden die Koordinaten $u'v'$ aus den Tristimulus-Werten berechnet.

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \leftrightarrow u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad (2.17)$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \leftrightarrow v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \quad (2.18)$$

Anhand des euklidischen Abstands $\Delta_{u'v'}$ zweier Farbörter ergibt sich der Farbunterschied.

$$\Delta_{u'v'} = \sqrt{(u'_1 - u'_2)^2 + (v'_1 - v'_2)^2} \quad (2.19)$$

Dieses Modell wird für Lichtfarben empfohlen, da hier Adaptionseinflüsse meist nicht relevant sind. Für Körperfarben werden jedoch andere Modelle, beispielsweise CIELab, empfohlen [29].

Die Transformation der MacAdam Ellipsen in $u'v'$ -Koordinaten ergibt zwar keine perfekten Kreise, jedoch können im Bereich des Planckschen Kurvenzugs die Ellipsen durch Kreise genähert werden. Hierbei hat ein SDCM einen Radius von $\Delta_{u'v'} = 1,1 \times 10^{-3}$. Ein mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% gerade noch wahrnehmbarer Unterschied kann hier mit einem Abstand von $\Delta_{u'v'} = 1,3 \times 10^{-3}$ angegeben werden [96].

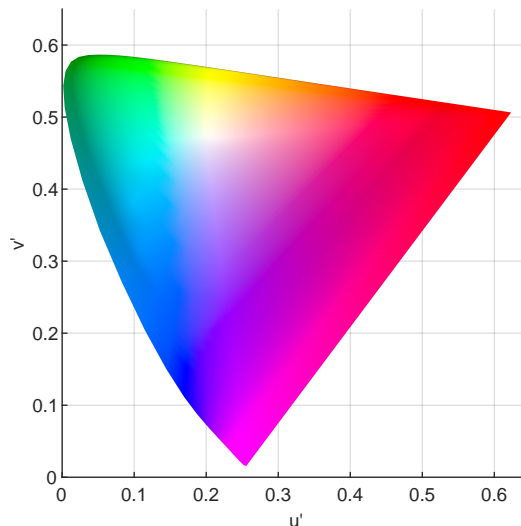


Abbildung 2.8.: Das gleichabständige $u'v'$ -Farbdiagramm.

2.3. Metriken der Lichtqualität

Während aufgrund des Metamerieeffekts zahlreiche Spektren denselben Farbort erzeugen können, können trotz gleicher Lichtfarbe verschiedene Aspekte solcher Metameriespektren stark variieren. Im Folgenden werden diejenigen Metriken beschrieben, welche in dieser Arbeit zur Bewertung der Lichtqualität verwendet werden.

2.3.1. Farbwiedergabe

Die Farbwiedergabe einer Beleuchtung bezieht sich darauf, inwieweit die Körperfarbe eines Objekts unter einer Testlichtquelle natürlich erscheint oder verfälscht wird. Als Referenz dient dabei, je nach ähnlichster Farbtemperatur, das Tageslicht oder das Spektrum eines Temperaturstrahlers. Noch heute wird der 1965 veröffentlichte Farbwiedergabeindex [97] CRI (Colour Rendering Index) R_a (a-average) von der CIE als Standard empfohlen [29]. Zwar wurde er 1974 und 1995 überarbeitet [98], trotzdem ist bekannt, dass er vor allem bei LED-Licht fehlerhafte Prognosen zur Farbwiedergabe machen kann [99]–[101]. Der CRI R_a berechnet sich aus dem Durchschnitt der einzelnen Farbwiedergabeindizes R_i von acht entsättigten Testfarben. Die R_a Werte werden nach einer Transformation (Von-Kries Transformation), um den Farbdrift der Wahrnehmung aufgrund der visuellen Adaption an das Umgebungslicht zu berücksichtigen, als Farbdifferenz zwischen Test- und Referenzlicht im CIE1964 $U^*V^*W^*$ Farbraum berechnet. Dabei wird ein Wert von $R_a = 100$ erreicht, wenn die Testfarben keinen Farbdrift verglichen mit der Referenz erfahren. Zwar wird diese Metrik in industriellen Anwendungen weiterhin verwendet, für den wissenschaftlichen Bereich wird jedoch der 2017 vorgestellte Colour Fidelity Index R_f empfohlen [102]. Dieser Index verwendet 99 Testfarben und wird im moderneren gleichabständigen Farbraum für Körperfarben CAM02-UCS berechnet (vgl. Abb. 2.9). Während der CRI R_a einen abrupten Wechsel der Referenzlichtart bei 5000 K hat – ähnlichste Farbtemperaturen unter 5000 K werden mit einem Temperaturstrahlerspektrum verglichen, höhere ähnlichste Farbtemperaturen werden mit einem simulierten Tageslichtspektrum verglichen –, wird bei der Berechnung des R_f ein stetiger Übergang

von 4000 K bis 5000 K zwischen beiden Lichtarten verwendet. Der Colour Fidelity Index wird in dieser Arbeit als Maß der Farbwiedergabe verwendet.

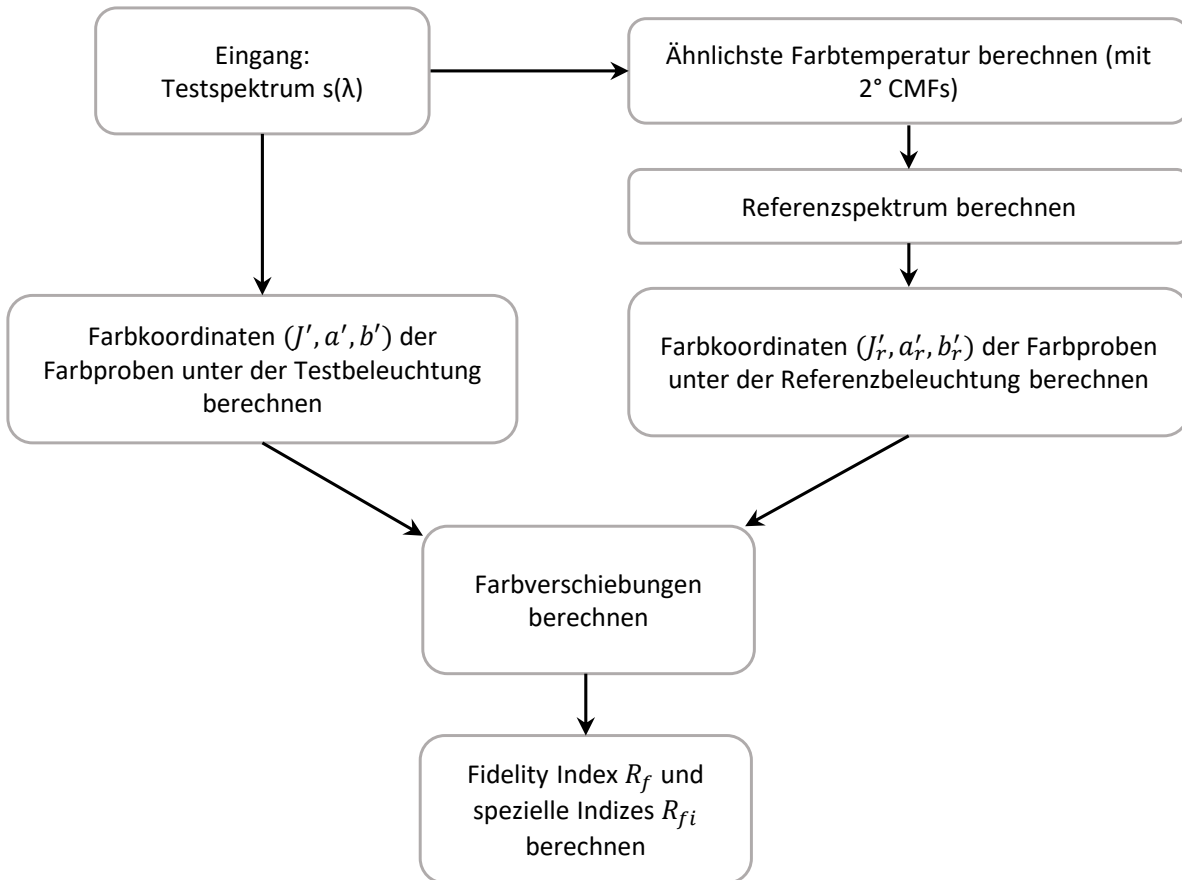


Abbildung 2.9.: Berechnung des Colour Fidelity Index R_f nach [103]. Bis auf die Berechnung der ähnlichsten Farbtemperatur werden für alle Berechnungen der CIE 1964 10° Beobachter verwendet.

2.3.2. Beleuchtungsmetamerie-Index

Der von der CIE definierte Metamerie-Index [104] bezieht sich nicht auf die Beobachtermetamerie, sondern auf die Beleuchtungsmetamerie. Hierbei bilden zwei Farbproben mit unterschiedlichen Reflexionsspektren unter einer Referenzlichtart (D50, D55, D65 oder D75) ein Metameriepaar. Während trotz der unterschiedlichen Reflexionsspektren die Farben eines solchen Paares unter der Referenzlichtart identisch aussehen (für den CIE 1964 10° Standardbeobachter), kann bei Änderung des Beleuchtungsspektrums eine Farbdifferenz zwischen den Farben eines Paares entstehen.

Der Metamerie-Index für den visuellen Bereich M_v verwendet fünf Farbpaare und wird aus deren durchschnittlicher CIE 1976 $L^*a^*b^*$ Farbdifferenz berechnet. Um den Einfluss von optischen Aufhellern mit einzubeziehen, wird ein zweiter Metamerie-Index definiert. Hierbei findet eine Anregung im ultravioletten Wellenlängenbereich statt, woraufhin im sichtbaren Wellenlängenbereich Licht emittiert wird. Anhand dreier Probenpaare wird dieser Effekt zur Berechnung des M_u berücksichtigt.

Dem Wert des Metamerie-Index entsprechend, wird einer Lichtquelle einer von fünf Qualitätsgraden zugeordnet (vgl. Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1.: Qualitätsgrad des Metamerie-Index nach [104].

Qualitätsgrad	Metamerie-Index M_v oder M_u
A	$\leq 0,25$
B	$> 0,25$ bis $0,50$
C	$> 0,50$ bis $1,00$
D	$> 1,00$ bis $2,00$
E	$> 2,00$

Während Metameriepaare von Objektfarben in der Realität zwar selten sind – Akbarinia und Gegenfurtner fanden in ihrer umfassenden Analyse durchschnittlich weniger als zwei Metameriepaare in 10 000 Proben [105] –, besitzt diese Metrik eine hohe Relevanz zur Klassifizierung von Tageslichtsimulatoren, beispielsweise in der industriellen Druckprüfung. Zhao et al. [106] beschreiben auf Basis dieser Metrik, dass in sechs spektralen Bändern Licht emittiert werden muss, um mittels LEDs Tageslicht zu simulieren. Diese Bänder können durch unterschiedliche schmalbandige LED-Typen (ultraviolett, violett, blau, grün, gelb, rot) oder leuchtstoffkonvertierte LEDs mit entsprechenden Emissionsbändern realisiert werden.

Da diese Arbeit künstlich erzeugte Lichtspektren im sichtbaren Bereich behandelt, findet nur der M_v hier Verwendung.

2.3.3. Maximale Helligkeit

Zur Messung der Helligkeit wurde 1924 [107] erstmals von der CIE die spektrale Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ veröffentlicht (vgl. Abb. 2.10), welche auf Flimmerphotometrie-Untersuchungen beruht. Sie ist von 360 nm bis 830 nm definiert und hat ihr Maximum bei 555 nm. Sie ist ebenfalls in der $\bar{y}(\lambda)$ -Spektralwertfunktion des CIE 1931 2°-Beobachters wiederzufinden und beschreibt die spektrale Helligkeitsempfindung bei Tagsehen (photopisches Sehen). Zwar wurden in der Zwischenzeit verschiedene Anpassungen der Helligkeitsfunktionen veröffentlicht [108]–[110], die ursprüngliche $V(\lambda)$ -Kurve besitzt jedoch noch immer die größte Relevanz, da sie auch in photometrischer Messtechnik Verwendung findet [111].

Mit dem 2°-Sichtfeld bezieht sich die $V(\lambda)$ -Funktion auf den fovealen Bereich der Netzhaut, bei dem keine S-Zapfen vorhanden sind. Dass die Stimulierung außerhalb der Fovea über die S-Zapfen die Helligkeitsempfindung beeinflusst, wodurch der kurzwellige Strahlungsanteil in der Helligkeitsmessung unterschätzt wird, zeigen verschiedene Untersuchungen [112], [113]. Entsprechend ist es nicht verwunderlich, dass bei der räumlichen Beleuchtung unterschiedliche Spektren trotz gleicher Leuchtdichte als unterschiedlich hell wahrgenommen werden [114]. Ebenso ist bekannt, dass Licht mit hoher ähnlichster Farbtemperatur heller wahrgenommen wird als Licht mit geringer ähnlichster Farbtemperatur [115]. Zur Einbeziehung der S-Zapfen in die Helligkeitsberechnung veröffentlichten Fotios und Levermore ein Modell [112], welches von Khanh et. al für eine in der Praxis einfachere Verwendung adaptiert wurde [116]–[118]. Hierbei wird eine äquivalente Beleuchtungsstärke definiert, welche mittels einer Polynomfunktion von der ähnlichsten Farbtemperatur skaliert wird.

Da die vorliegende Arbeit sich mit den farbmtrischen Aspekten der Farbmischung von LED-Spektren

auseinandersetzt, spielt die exakte Beschreibung der Helligkeit des gemischten Lichts eine untergeordnete Rolle. Aus diesem Grund wird als Vereinfachung der Helligkeitsbeschreibung der Y -Tristimulus-Wert gewählt, welcher bei der Verwendung des CIE 1931-Beobachters der photometrischen Größe entspricht, welche der Messung der LED-Spektren zugrunde liegt (Beleuchtungsstärke, Leuchtdichte, Lichtstrom oder Lichtstärke). Für den Vergleich der maximalen Helligkeit verschiedener Spektren wird dementsprechend im Folgenden der maximal erzielbare Y -Wert des gemischten Lichts einer Konstellation verschiedener LEDs verglichen.

2.3.4. Nichtvisuelle Lichtwirkung

Mit den ipRGCs verfügt das menschliche Auge über einen speziellen Typ an Ganglienzellen, welche die nichtvisuellen Funktionen steuern, wie z.B. den Pupillenreflex und die Synchronisierung des circadianen Rhythmus [63]. Sie leiten hierfür Signale der Zapfen- und Stäbchen weiter und verfügen mit ihrem Photopigment Melanopsin über eine eigene spektrale Empfindlichkeit.

Während die visuellen Empfindlichkeitskurven von Zapfen und Stäbchen durch psychophysische Messungen bestimmt werden können, gibt es für die psychophysische Messungen der spektralen nichtvisuellen Empfindlichkeit noch keine etablierten Messverfahren [65]. Die CIE definiert einen Standard für das melanopische Wirkungsspektrum [65] (vgl. Abb. 2.10). Basierend auf dem spektralen Absorptionsverhalten des aus Opsin und Vitamin A resultierenden Photopigments und der präzeptoralen Filterung wird hierbei die spektrale Empfindlichkeit der ipRGCs $s_{mel}(\lambda)$ abgeschätzt.

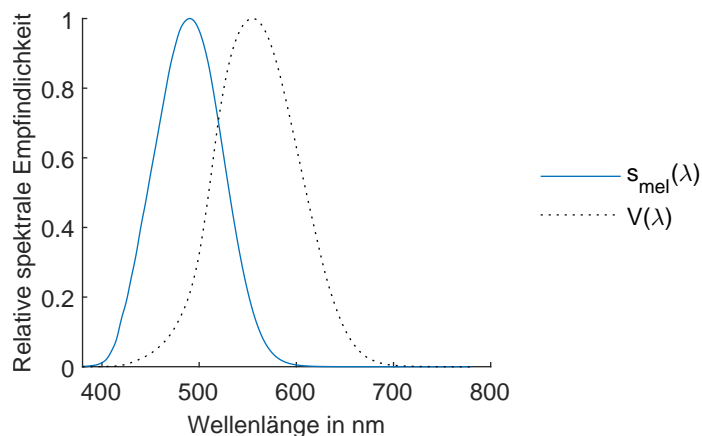


Abbildung 2.10.: Das melanopische Wirkungsspektrum $s_{mel}(\lambda)$ [65] verglichen mit der Hellempfindlichkeitskurve für photopisches Sehen $V(\lambda)$ [29], welche der CIE 1931 $\bar{y}(\lambda)$ Funktion entspricht.

Das melanopische Wirkungsspektrum $s_{mel}(\lambda)$ dient als Basis für verschiedene Größen. In dieser Arbeit finden zwei auf ihr aufbauenden Größen Verwendung:

Melanopische Strahldichte L_{mel} in $W/(m^2 \text{ sr})$: Um die Stärke der nichtvisuellen Stimulierung durch eine Strahldichte $L_{e,\lambda}(\lambda)$ zu bestimmen, wird diese mit dem melanopischen Wirkungsspektrum $s_{mel}(\lambda)$ gewichtet.

$$L_{mel} = \int L_{e,\lambda}(\lambda) s_{mel}(\lambda) d\lambda \quad (2.20)$$

Melanopische Effizienz K_{mel} in W/lm: Um das Verhältnis der nichtvisuellen Stimulierung zur visuellen Stimulierung zu beschreiben, wird die melanopische Strahldichte durch die Leuchtdichte geteilt. Die Leuchtdichte berechnet sich aus dem Integral der spektralen Strahldichtefunktion multipliziert mit der Hellempfindlichkeitsfunktion für ein 2° -Sichtfeld bei photopischen Sehbedingungen ($K_m = 683,002 \text{ lm/W}$).

$$K_{\text{mel,V}} = \frac{\int L_{e,\lambda}(\lambda) s_{\text{mel}}(\lambda) d\lambda}{K_m \int L_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (2.21)$$

3. Beobachtermetamerie bei Tageslichtreferenz

3.1. Einleitung

In diesem Kapitel wird die Beobachtermetamerie, welche bei einem Vergleich von natürlichem Tageslicht mit LED-Licht auftritt, untersucht und modelliert. Das Ziel dabei ist es, einen Überblick über die Größenordnung dieses Effekts zu erlangen sowie eine möglichst weit vereinfachte Berechnungsmethode aufzustellen. Somit soll eine Verwendung in den Farbmischberechnungen adaptiver, mehrkanaliger LED-Leuchten erleichtert bzw. ermöglicht werden, wodurch diese ihr Licht dem vorherrschenden Tageslicht optimal anpassen können, indem das Spektrum mit dem kleinsten Beobachtermetamerie-Effekt ausgewählt werden kann.

Hierfür werden zunächst in Abschnitt 3.1.1 Tageslichtspektren aus verschiedenen Quellen beziehungsweise Modellen zusammengetragen und analysiert. Diese Spektren dienen als Referenz für die darauf folgenden Untersuchungen. Die dazugehörigen Metamerie-Partnerspektren werden mit verschiedenen LED-Grundspektren simuliert, um für jede Tageslichtreferenz LED-Spektren mit unterschiedlich starker Beobachtermetamerie zu erzeugen (vgl. Abschnitt 3.1.3).

Um den Beobachtermetamerie-Effekt unter Verwendung von individuellen Spektralwertfunktionen zu berechnen, werden zwei Varianten gezeigt. Die erste Variante besteht in der Simulation von individuellen Metameriespektren und der anschließenden Betrachtung aller individuellen Metameriespektren in dem Farbraum des Referenzbeobachters. Dieses Verfahren bietet den Vorteil, dass die Beobachtermetamerie als Verteilung von Farbörtern in einem einzelnen Referenzsystem begutachtet werden kann. Als Nachteil kann der vergleichsweise hohe Rechenaufwand betrachtet werden, welcher durch die Simulation von individuellen Metameriespektren entsteht. Dieses Verfahren wird im Abschnitt 3.2.1 ausführlich erläutert.

Die zweite Variante zur Bestimmung der Beobachtermetamerie ist die Berechnung der Farbdifferenz eines einzelnen Metameriepaares, welches nur für den Referenzbeobachter farblich identisch erscheint (vgl. Abschnitt 3.2.2). Hierbei wird der Farbabstand zwischen den Spektren dieses Paares für jeden individuellen Beobachter berechnet. Da hierbei keine individuellen Metameriespektren simuliert werden, ist die Komplexität und der Aufwand geringer, verglichen mit der vorherigen Variante. Jedoch ist keine Betrachtung dieses Effekts in einem gemeinsamen Referenzsystem möglich, wodurch eine Verteilung von individuellen Farbörtern nicht weiter analysiert werden kann.

Damit für die Berechnung eines durchschnittlichen oder maximalen Farbfehlers durch Beobachtermetamerie keine Vielzahl an Spektralwertfunktionen verwendet werden muss, werden drei verschiedene Varianten eines Beobachtermetamerie-Index untersucht, ebenfalls publiziert in [119]. Diese werden in Abschnitt 3.3 beschrieben und in einer Korrelationsanalyse mit den zwei zuvor beschriebenen Berechnungsmethoden verglichen. Die Variante mit der höchsten Korrelation (bezogen auf den durchschnittlichen Farbabstand) wird als Beobachtermetamerie-Index vorgeschlagen.

Während alle zuvor diskutierten Berechnungen der Beobachtermetamerie typischerweise zwei Spektren (LED-Spektrum und Tageslichtspektrum) als Eingangsvariablen verwenden, wird in einer weiteren Analyse untersucht, inwiefern eine Aussage über die Beobachtermetamerie ohne Kenntnis des Tageslichtspektrums gemacht werden kann. Dies erlaubt im praktischen Anwendungsfall einer adaptiven LED-Leuchte, dass die Komplexität des Systems nicht unnötig gesteigert werden muss, da in diesem Fall auf spektrale Tageslichtmessung oder Modellierung verzichtet werden kann. Diese als Beobachtermetamerie-Koeffizient bezeichnete Metrik wird in Abschnitt 3.4 vorgestellt.

Die im Zuge dieser Analysen erzeugten Daten werden in den drei darauffolgenden Unterkapiteln auf die Beobachtermetamerie von Tageslichtspektren (Abschnitt 3.5), die Abhängigkeit der Beobachtermetamerie vom gewählten LED-System (Abschnitt 3.6) und auf den Zusammenhang von Beobachtermetamerie und Farbwiedergabe (Abschnitt 3.7) untersucht.

Nachdem die Beobachtermetamerie mithilfe von simulierten Beobachtern untersucht wurde, wird in Abschnitt 3.8 die Beobachtermetamerie in der Praxis mit Probandentests untersucht. Das hierfür entwickelte Testsystem, welches einen Abgleich von LED- zu natürlichem Tageslicht ermöglicht, wird zusammen mit den Ergebnissen präsentiert.

Die folgenden Berechnungen verwenden 1000 simulierte individuelle Beobachter [33] sowie zehn kategoriale Beobachter [84] als Repräsentation einer Population von Beobachtern (vgl. Abschnitt 2.2.3).

3.1.1. Tageslicht-Referenzspektren

Für die Korrelationsanalyse der drei Beobachtermetamerie-Indizes werden Tageslichtspektren als Referenz benötigt. Da die spektrale Strahlungsverteilung von Tageslicht sehr variabel ist und von vielen Faktoren abhängt (z.B. Wetter und dem Einfallswinkel der Sonne), werden eine Vielzahl an Spektren benötigt, um alle möglichen Tageslichtspektren zu repräsentieren. Aufgrund der Variabilität gestaltet sich eine messtechnische Erfassung, bei der alle Möglichkeiten abgedeckt werden, als schwierig. Deshalb werden mithilfe verschiedener Tageslichtmodelle, zusätzlich zu Spektrometermessungen, Referenzspektren erstellt. Während ausführliche Modelle [120]–[122] das Tageslicht über den gesamten spektralen Strahlungsbereich simulieren und hierfür eine Vielzahl an Eingangsparametern berücksichtigen, werden hier vereinfachte Modelle verwendet, da nur der visuelle Strahlungsbereich von Interesse ist. Diese werden im Folgenden vorgestellt und miteinander verglichen.

Die Spektren aus jedem dieser Modelle werden so generiert bzw. selektiert, dass die entsprechenden Farbörter einen Mindestabstand von $\Delta_{uv',10} = 1 \times 10^{-3}$ (CIE 1964) zueinander besitzen (pro Tageslichtmodell).

Schwarzkörperstrahlung

Da die Sonne ein Temperaturstrahler ist, kann das Modell der Schwarzkörperstrahlung als vereinfachtes Tageslichtmodell betrachtet werden. Das Strahlungsspektrum $M_{e,\lambda}(\lambda)$ in $W/(m^2 m)$ eines idealen schwarzen Körpers wird nach Planck [123] in Abhängigkeit der absoluten Temperatur T berechnet:

$$M_{e,\lambda}(\lambda) = c_1 \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (3.1)$$

Hierbei werden zur Übersichtlichkeit die Konstanten c_1 und c_2 verwendet.

$$c_1 = 2\pi hc^2 \leftrightarrow c_1 = 3,7418 \times 10^{-16} \text{ W/m}^2 \quad (3.2)$$

$$c_2 = h \frac{c}{k} \leftrightarrow c_2 = 1,443 88 \times 10^{-2} \text{ m K} \quad (3.3)$$

Dabei ist c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, h das Plancksche Wirkungsquantum und k die Boltzmann Konstante. Abbildung 3.1 zeigt die Spektralverteilungen für Temperaturen von 4000 K bis 20 000 K, während die entsprechenden Farbörter in Abbildung 3.2 auf dem Planckschen Kurvenzug liegen.

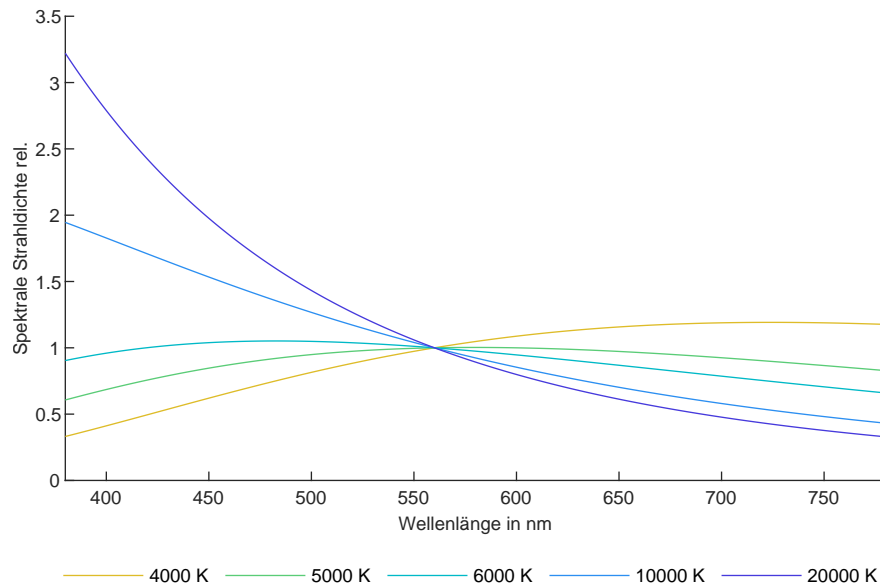


Abbildung 3.1.: Schwarzkörperstrahlung im sichtbaren Bereich für Temperaturen von 4000 K bis 20 000 K, normiert bei 560 nm und berechnet mit Gleichung (3.1).

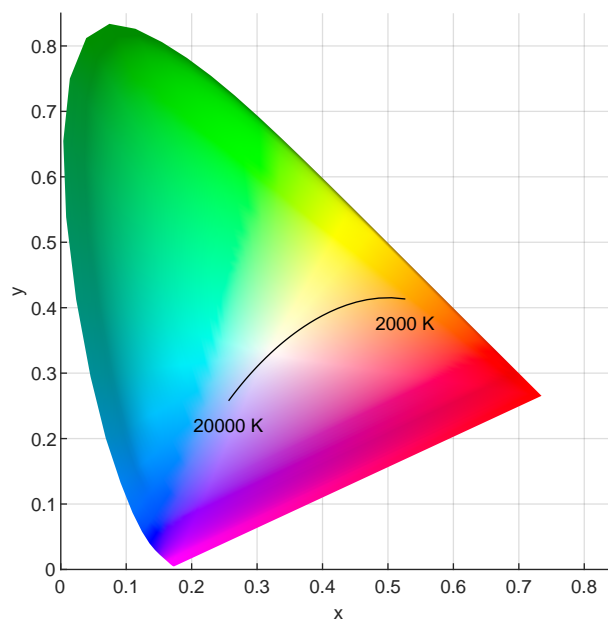


Abbildung 3.2.: Farbörter der Schwarzkörperstrahlung für Temperaturen von 2000 K bis 20 000 K im CIE1931 xy-Farbdiagramm.

Die Sonne strahlt zwar entsprechend ihrer Oberflächentemperatur von 5772 K [124] mit einem relativ

konstanten Strahlungsspektrum, jedoch werden durch die Einflüsse der Atmosphäre und des Wetters die Spektren so unterschiedlich gefiltert, dass dieses Modell als grobe Näherung betrachtet werden kann. Des Weiteren dient das Schwarzkörperspektrum als Referenzlichtart in vielen lichttechnischen Metriken (z.B. der Farbwiedergabe [29]).

Mit diesem Modell werden 454 Referenzspektren im Bereich von 300 K bis 88 000 K erstellt, da außerhalb dieser Grenzen keine signifikante Änderung in den zugehörigen Farbkoordinaten stattfindet. Die hiermit erzeugten Spektren weisen einen sehr gleichmäßigen Verlauf auf, was jedoch nicht der Realität entspricht. Eine akkuratere Modellierung wird in dem CIE Tageslichtmodell beschrieben.

CIE Tageslichtmodell

Das von der CIE in verschiedenen Metriken als Referenzlichtart eingesetzte Tageslichtmodell [29] basiert auf dem Modell von Judd et al. [125]. Die Autoren sammelten 622 Tageslichtspektren, welche sowohl aus Messungen des indirekten Tageslichts allein als auch von indirektem Tageslicht gemischt mit direktem Tageslicht (Sonnenlicht) hervorgingen. Sie bestimmten drei Vektoren $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$ und $S_2(\lambda)$ (vgl. Abb. 3.3 (a)), aus deren Kombination die unterschiedlichen Spektren rekonstruiert werden können. Die Verteilung der gemessenen CIE 1931 Farbörter wird mit einer Polynomfunktion zweiten Grades angenähert:

$$y_D = -3,000x_D^2 + 2,870x_D - 0,275 \quad (3.4)$$

Hierbei wird x_D in Abhängigkeit der ähnlichsten Farbtemperatur T berechnet. Im Bereich von 4000 K bis (inkl.) 7000 K mit

$$x_D = \frac{-4,6070 \times 10^9}{T^3} + \frac{2,9678 \times 10^6}{T^2} + \frac{0,09911 \times 10^3}{T} + 0,244063 \quad (3.5)$$

und für ähnlichste Farbtemperaturen T von 7000 K bis (inkl.) 25 000 K mit

$$x_D = \frac{-2,0064 \times 10^9}{T^3} + \frac{1,9018 \times 10^6}{T^2} + \frac{0,24748 \times 10^3}{T} + 0,237040. \quad (3.6)$$

Aus den Farbkoordinaten x_D und y_D werden die Gewichtungsfaktoren M_1 und M_2 berechnet.

$$M_1 = \frac{1,3515 - 1,7703x_D + 5,9114y_D}{0,0241 + 0,2562x_D - 0,7341y_D} \quad (3.7)$$

$$M_2 = \frac{0,0300 - 31,4424x_D + 30,0717y_D}{0,0241 + 0,2562x_D - 0,7341y_D} \quad (3.8)$$

Hiermit werden die drei Tageslichtvektoren $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$ und $S_2(\lambda)$ gewichtet und durch ihre Summierung das modellierte Tageslichtspektrum $S(\lambda)$ gebildet:

$$S(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1S_1(\lambda) + M_2S_2(\lambda) \quad (3.9)$$

Abbildung 3.3 (b) zeigt exemplarisch die Tageslichtspektren, welche aus ähnlichsten Farbtemperaturen von 4000 K bis 20 000 K resultieren. Unter Verwendung dieses Modells werden 102 Spektren im Bereich von 4000 K bis 25 000 K generiert.

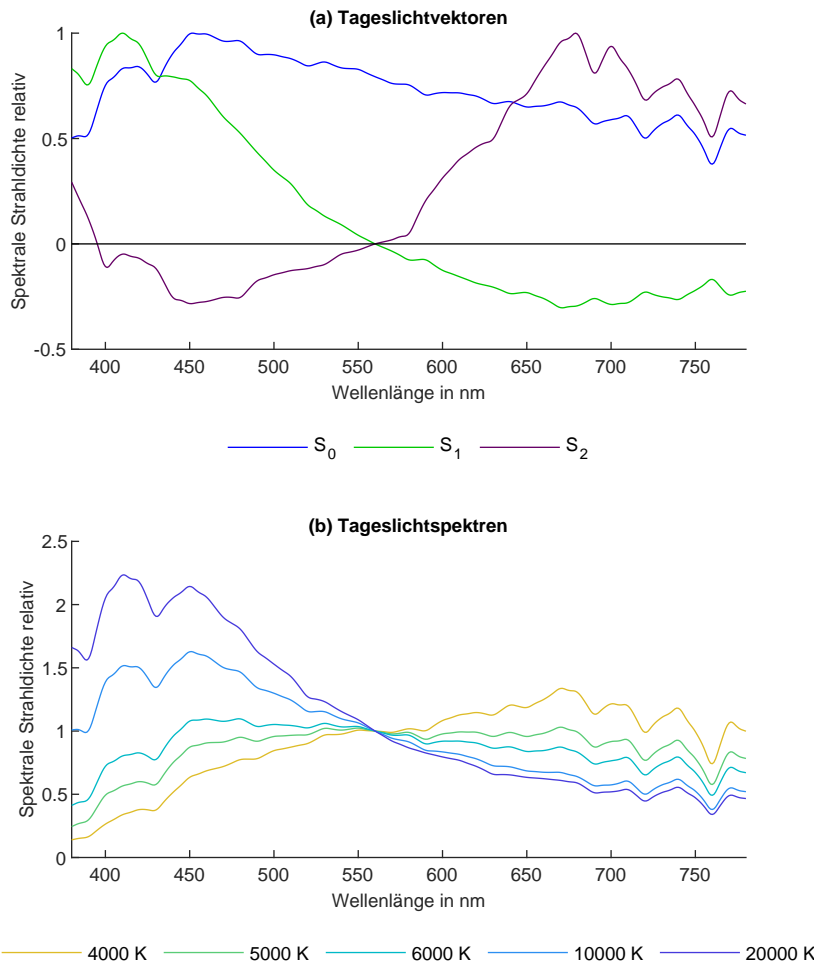


Abbildung 3.3.: (a): Vektoren des Tageslichtmodells im sichtbaren Wellenlängenbereich. (b): Spektren des Tageslichtmodells (normiert bei 560nm). [29]

Tageslichtmodell von Tian et al.

Während die zuvor beschriebenen Modelle nur Spektren erzeugen, deren Farbörter im Farbdigramm auf einer Kurve liegen (Planckscher Kurvenzug oder CIE Tageslichtkurve), ermöglicht das Modell von Tian et al. [126] eine realistischere Modellierung, bei der die Farbörter auch abseits einer Kurve liegen können. Dieses Modell erzeugt die drei Spektren

- direktes Licht $s_{\text{direkt}}(\lambda)$ (Sonnenlicht),
- indirektes Licht $s_{\text{diffus}}(\lambda)$ (Reflektion des Himmels),
- globales Licht $s_{\text{global}}(\lambda)$ (Mischung aus direktem und indirektem Licht).

Als Eingangsparameter werden drei Parameter benötigt:

- Der Sonnenwinkel γ , gemessen zum Zenit ($0^\circ \leq \gamma < 90^\circ$),
- der Bewölkungsgrad β ($0 \leq \beta \leq 0,4$), wobei klares Wetter den Wert 0,1 und sehr trübes Wetter den Wert 0,3 hat.

- Das extraterrestrische Sonnenspektrum $s_o(\lambda)$: Es existieren verschiedene Messungen und Messergebnisse der extraterrestrischen Sonnenstrahlung [127], die sich jedoch hauptsächlich im nicht-visuellen Strahlungsbereich unterscheiden. Deshalb wird in dieser Arbeit hierfür keine tiefere Differenzierung gemacht und das Sonnenspektrum von Wehrli [128] verwendet (vgl. Abb. 3.4).

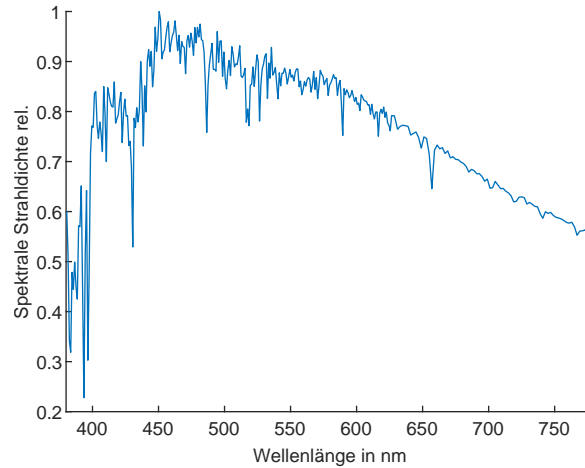


Abbildung 3.4.: Der visuelle Bereich des extraterrestrischen Sonnenspektrums von Wehrli [128].

Zunächst wird die Transmissionsfunktion $T(\lambda)$ der Absorption von Ozon, Stickstoffdioxid, Wasserdampf und verschiedenen Gasen für den sichtbaren Wellenlängenbereich vereinfacht zu

$$T(\lambda) = \exp(-\tau'(\lambda)m). \quad (3.10)$$

Dabei ist m die Luftmasse, die sich mit sinkendem Sonnenstand γ vergrößert

$$m = 1/\cos(\gamma); \quad (3.11)$$

und $\tau'(\lambda)$ der spektrale Transmissionskoeffizient (vgl. Abb. 3.5). Somit wird als Zwischenschritt das Sonnenlicht nach Absorption in der Atmosphäre $s_{in}(\lambda)$ berechnet.

$$s_{in}(\lambda) = s_o(\lambda) \cdot T(\lambda) \quad (3.12)$$

Das **direkte Tageslicht** $s_{direkt}(\lambda)$ ergibt sich zu

$$s_{direkt}(\lambda) = s_{in}(\lambda) \cdot T_r(\lambda) \cdot T_\alpha(\lambda), \quad (3.13)$$

wobei $T_r(\lambda)$ die Transmission der Rayleigh-Streuung als Funktion der Wellenlänge λ und der Luftmasse m modelliert

$$T_r(\lambda) = \exp(-8,735 \cdot 10^{-3} \lambda^{-4,08} \cdot m). \quad (3.14)$$

Die Aerosol-Streuung $T_\alpha(\lambda)$ hängt zusätzlich noch von dem Bewölkungsgrad β ab.

$$T_\alpha(\lambda) = \exp(-\beta \cdot \lambda^{-1,3} \cdot m) \quad (3.15)$$

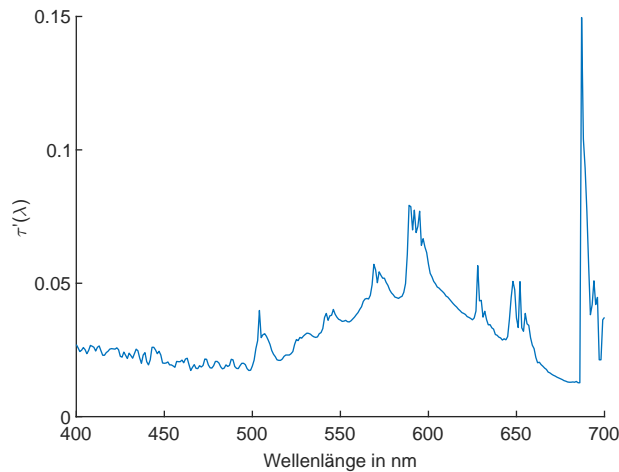


Abbildung 3.5.: Totaler Absorptionskoeffizient $\tau'(\lambda)$ von Tian et al. [126]

Das **indirekte Tageslicht** $s_{\text{diffus}}(\lambda)$ wird vereinfacht als ein Teil κ des in der Atmosphäre gestreuten Lichts berechnet:

$$s_{\text{diffus}}(\lambda) = s_{\text{in}}(\lambda) \cdot \cos(\gamma) \cdot [1 - T_r(\lambda)T_\alpha(\lambda)] \cdot \kappa \quad (3.16)$$

Für κ geben die Autoren für den Winkelbereich von 20° bis 80° Werte von 0,65 bis 0,52 an.

Das **globale Tageslicht** $s_{\text{global}}(\lambda)$ wird berechnet, indem das direkte Tageslicht, gewichtet mit dem Kosinus des Zenitwinkels, und das indirekte Tageslicht summiert werden.

$$s_{\text{global}}(\lambda) = s_{\text{diffus}}(\lambda) + s_{\text{direkt}}(\lambda) \cdot \cos \gamma \quad (3.17)$$

Die Farbörter der 900 Spektren, welche mit diesem Modell erzeugt werden, sind in Abbildung 3.6 gezeigt. Die Farben des direkten Tageslichts bei niedrigem Sonnenstand haben eine niedrige ähnlichste Farbtemperatur, jedoch ist deren Leuchtdichte-Anteil mit steigendem Zenitwinkel so gering, dass das globale Tageslicht keine ähnlichste Farbtemperatur unter 5000 K annimmt.

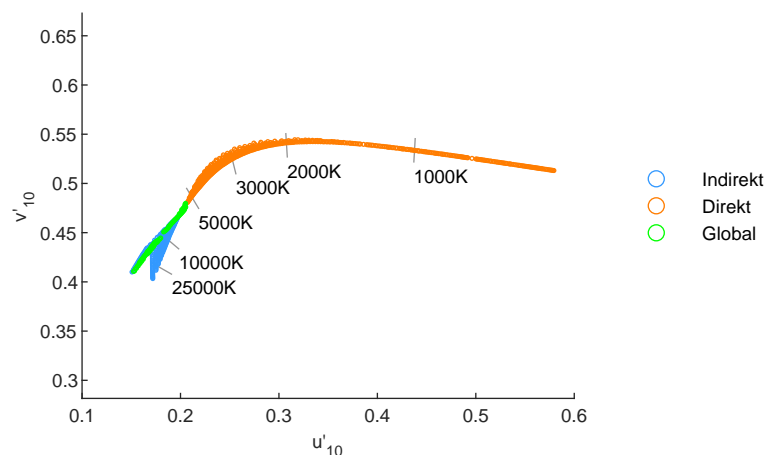


Abbildung 3.6.: Farbörter der mit dem Tian-Tageslichtmodell erzeugten Spektren im CIE 1976 Farbdiaagramm (CIE 1964 10° -Beobachter). Zum Vergleich sind die Juddschen Geraden verschiedener ähnlichster Farbtemperaturen gegeben.

Spektrometermessungen

Bei den in Abschnitt 3.8 beschriebenen Probandentests werden Farbabweichungen von LED-Licht und Tageslicht durchgeführt. Hierbei fällt indirektes Tageslicht durch eine Öffnung in das Innere einer weißen Kammer. Dabei wird das von dem Boden dieser Kammer reflektierte Tageslicht mit einem Spektrometer (CS2000 Konica Minolta) zu zahlreichen Zeitpunkten gemessen. Somit repräsentieren die Messungen keine reinen Tageslichtspektren, sondern Tageslichtspektren im Innenraum. Die gemessenen Spektren besitzen ähnlichste Farbtemperaturen von 5130 K bis 14 705 K. Anhand des zur Auswahl an Tageslichtspektren definierten Mindestabstands der Farbörter von $\Delta_{u'v',10} = 1 \times 10^{-3}$ (CIE 1964) werden von diesen Messungen 112 Tageslichtspektren als Referenz verwendet. Die Farbörter dieser Spektren sind in Abbildung 3.7 gezeigt.

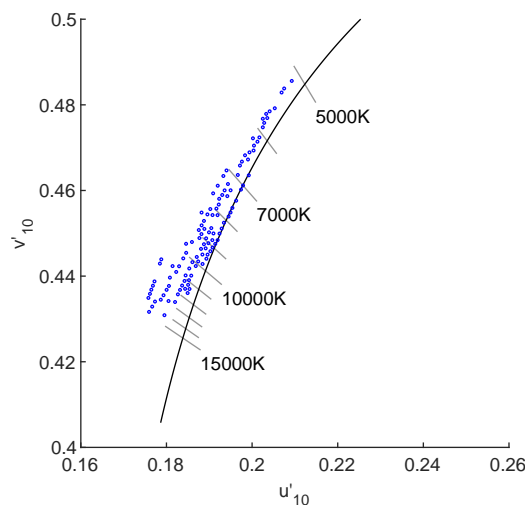


Abbildung 3.7.: Mittels Spektrometer gemessene Farbörter des Tageslichts im CIE 1976 Farbdiaagramm (CIE 1964 10°-Beobachter).

3.1.2. Zusammenfassung und Vergleich der Tageslichtreferenzspektren

Aus den zuvor beschriebenen Quellen werden 1568 Referenzspektren generiert (454 Schwarzkörperstrahlung, 102 CIE Tageslichtmodell, 900 Modell Tian et al., 112 Spektrometermessungen). Somit werden sowohl der Plancksche Kurvenzug als auch Farbörter abseits von ihm abgedeckt (vgl. Abb. 3.8). Durch die Verwendung des Tageslichtmodells von Tian et al. werden auch Farbkoordinaten des blauen Himmels verwendet ($> 10\,000$ K oberhalb des Planckschen Kurvenzugs), wodurch dieses Modell realitätsnäher ist als das CIE Modell, welches sich ausschließlich auf eine Kurve von Farbörtern bezieht. Der Verlauf der Spektren unterscheidet sich je nach verwendeter Quelle, ebenso wie die spektrale Auflösung (5 nm bei dem CIE Modell, sonst 1 nm) und das verwendete Wellenlängenintervall (400 nm bis 700 nm bei dem Modell von Tian et al., sonst 380 nm bis 780 nm). Um einen Vergleich zu ermöglichen werden in Abb. 3.9 Spektren mit denselben ähnlichsten Farbtemperaturen gezeigt. Die dazugehörigen Farbörter sind in Abb. 3.10 im gleichabständigen $u'v'$ -Diagramm dargestellt.

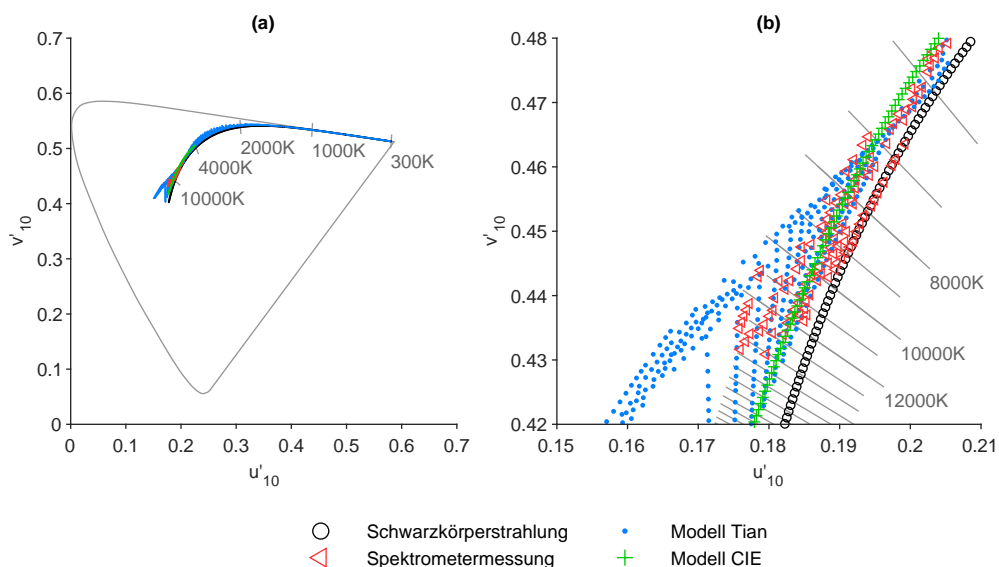


Abbildung 3.8.: (a): Farbörter der verschiedenen Referenzspektren im CIE 1976 Farbdigramm (CIE 1964 10°-Beobachter). (b): Vergrößerter Bereich des Farbdigramms. Alle Farbörter eines Sets haben einen Mindestabstand von $\Delta_{u'v',10} = 1 \times 10^{-3}$ zueinander. Zum Vergleich sind die Juddschen Geraden verschiedener ähnlichster Farbtemperatureuren gegeben.

Die Spektrometermessungen haben einen Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm mit einem Messintervall von 1 nm, wobei der Spektralverlauf zu 380 nm abnimmt (vgl. Abb. 3.9 (b), (f), (j)). Diese Abflachung zum violetten Wellenlängenbereich ist durch den Messaufbau zu erklären, bei dem das Tageslicht durch einen Plexiglasdiffusor und durch Reflexionen an weißen Wänden gefiltert wird (vgl. Abschnitt 3.8.1). Im Gegensatz hierzu zeigen die Schwarzkörperspektren und die CIE Tageslichtmodellspektren einen höheren violetten Strahlungsanteil. Die hierdurch verursachten Farbunterschiede sind jedoch aufgrund der schwachen Gewichtung durch Spektralwertfunktionen in diesem Bereich vernachlässigbar (vgl. Abb. 2.6).

Die Spektren aus dem Tageslichtmodell von Tian (vgl. Abb. 3.9 (c), (g), (k)) verfügen über den kleinsten Wellenlängenbereich, von 400 nm bis 700 nm mit einem 1 nm Intervall, was jedoch ebenfalls aufgrund der Gewichtung mittels Spektralwertfunktionen ausreichend ist.

Die CIE Tageslichtspektren (vgl. Abb. 3.9 (d), (h), (l)) haben aufgrund des 5 nm Intervalls einen größeren Verlauf als die beiden zuvor diskutierten Spektren. Die Überlagerung der Spektren aus diesen drei Quellen (vgl. Abb. 3.9 (a), (e), (i)) zeigt, dass sie nahezu deckungsgleich sind und sich hauptsächlich durch ihren Detailgrad unterscheiden. Um zu untersuchen, ob sich diese geringfügigen spektralen Unterschiede bei einem Farbgleich mit LED-Spektren bemerkbar machen, werden für diese exemplarisch ausgewählten Tageslichtspektren Metameriespektren berechnet und von 1000 simulierten individuellen Beobachtern verglichen. Das Ergebnis wird in Abb. 3.11 als durchschnittlicher Farbabstand $\Delta_{u'v',10}$ dargestellt. Da die zuvor diskutierten Farbörter des Schwarzkörperstrahlers und der Tageslichtspektren nicht exakt übereinstimmen (vgl. Abb. 3.10), wird ein Schwarzkörperspektrum der Temperatur 6999 K mit einem gleichfarbigen ($\Delta_{u'v',10} = 6,3 \times 10^{-5}$) Tageslichtspektrum aus einer Spektrometermessung verglichen. Die simulierten Metameriespektren für den Referenzbeobachter (CIE1964) in Abb. 3.11 (a) bestehen aus Primärspektren der Farben Rot-Grün-Blau (vgl. Abb. 3.12)), während in Abb. 3.11 (b) Primärspektren der Farben Kaltweiß-Warmweiß-Grün verwendet werden. Es ist ersichtlich, dass die spektralen Unterschiede der verschiedenen Referenzspektren geringe Abweichungen in der simulier-

ten Beobachtermetamerie bewirken. Am stärksten ist der Unterschied in diesem Vergleich zwischen der Spektrometermessung und den beiden übrigen Tageslichtspektren mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 5129 K, was auch im kurz- und langwelligen Bereich von Abbildung 3.9 (b) auffällt. Die Größenordnung der Unterschiede ist im Bezug auf die relativen Farbfehler der Beobachtermetamerie jedoch gering. Von daher eignen sich die Referenzspektren gleichermaßen für die folgende Korrelationsanalyse eines Beobachtermetamerie-Index.

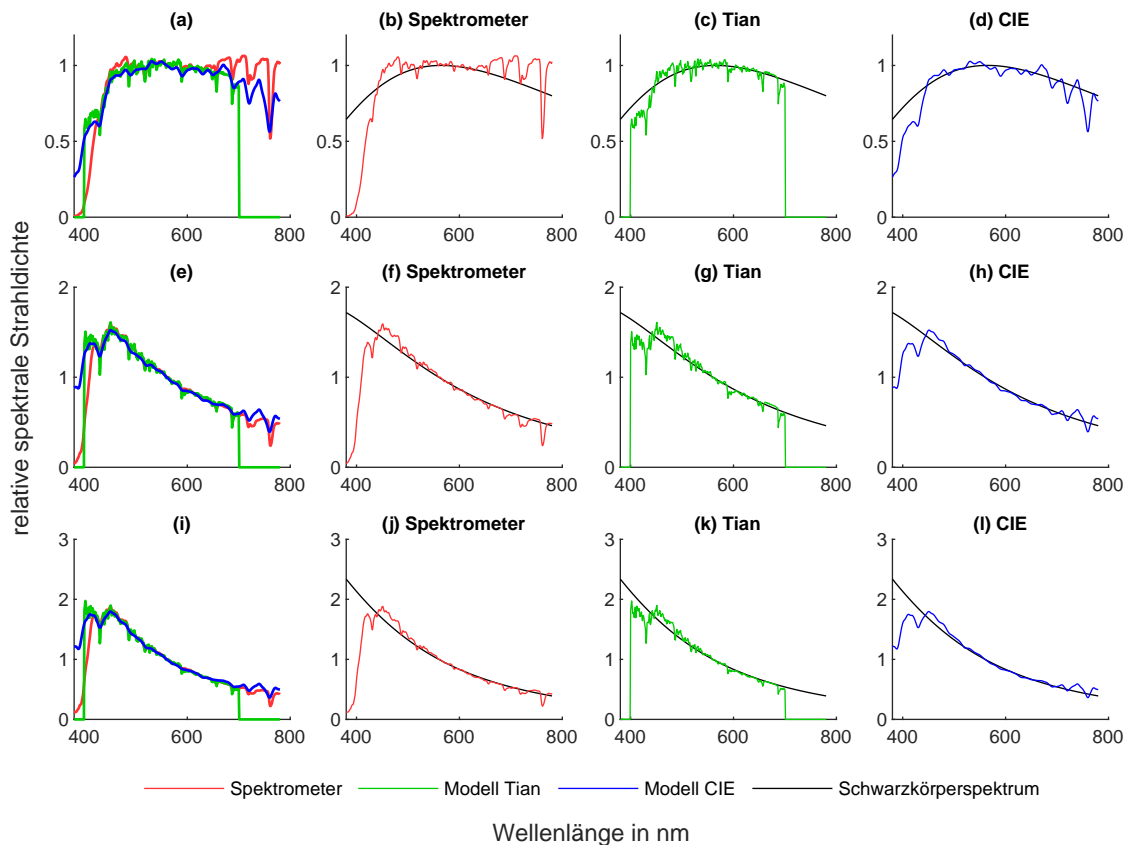


Abbildung 3.9.: Vergleich der Verläufe von Referenzspektren aus verschiedenen Quellen, normiert bei 560 nm. Die erste Zeile ((a) - (d)) zeigt Spektren mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 5129 K. Die zweite Zeile ((e) - (h)) zeigt Spektren mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 8989 K. Die dritte Zeile ((i) - (l)) zeigt Spektren mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 12 075 K. Die Spektrometermessungen besitzen eine spektrale Auflösung von 1 nm und ein Messintervall von 380 nm bis 780 nm. Die Tageslichtspektren des Modells von Tian et al. besitzen eine spektrale Auflösung von 1 nm und ein Intervall von 400 nm bis 700 nm. Die Spektren des CIE Tageslichtmodells besitzen eine spektrale Auflösung von 5 nm und ein Intervall von 380 nm bis 780 nm. Die Schwarzkörperspektren besitzen eine spektrale Auflösung von 1 nm und ein Intervall von 380 nm bis 780 nm.

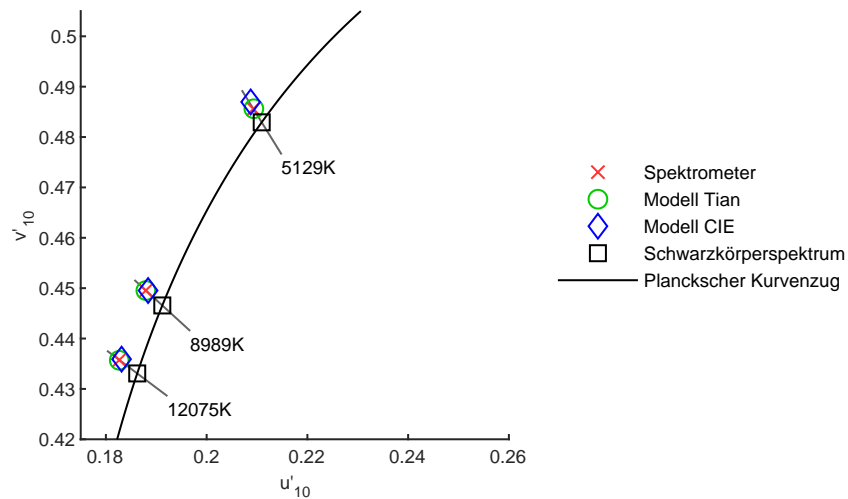


Abbildung 3.10.: Farbörter ausgewählter Tageslichtspektrn aus unterschiedlichen Quellen mit gleicher ähnlichster Farbtemperatur.

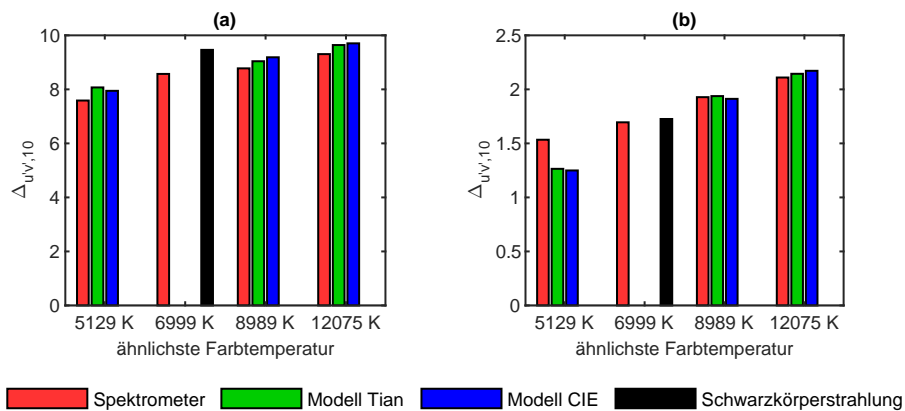


Abbildung 3.11.: Vergleich von Beobachtermetamerie bedingten durchschnittlichen Farbabständen $\Delta_{u'v',10}$ von 1000 simulierten Beobachtern (berechnet mit Gleichung (2.7)) zwischen einem LED-Spektrum und dem jeweiligen Tageslichtspektrum. Jedes LED-Spektrum besitzt aus Sicht des Referenzbeobachters denselben Farbort wie das Tageslichtspektrum und wird mittels R-G-B (a) beziehungsweise KW-WW-G (b) Systemen gemischt. Das Schwarzkörperspektrum wird aufgrund seines Farbabstandes zu den übrigen Vergleichsspektren mit einer Spektrometermessung des gleichen Farborts verglichen.

3.1.3. LED-System zur Erzeugung von Metameriespektren

Zum Simulieren von Metameriespektren werden die Grundspektren einer 7-Kanal LED-Leuchte verwendet (vgl. Abschnitt 3.8.2), deren LED-Spektren den gesamten sichtbaren Wellenlängenbereich abdecken. Leuchtstoff-konvertierte LEDs mit einem breiten Strahlungsspektrum erzeugen kaltweißes (KW) und warmweißes (WW) Licht (vgl. Abb. 3.12 (a)). Zusätzlich wird mit schmalbandigen LEDs, in den Farben Blau (B), Grün (G), Orange (O) und Rot (R1, R2), eine gezieltere spektrale Manipulation ermöglicht (vgl. spektrale Kennwerte in Tabelle 3.2).

Damit jedes Tageslichtspektrum mit mehreren und verschiedenen spektralen Strahlungsverteilungen farblich nachgemischt werden kann, werden mit den sieben LED-Grundspektren verschiedene 3-Kanal-Systeme gebildet. Diese werden so gebildet, dass jedes resultierende Farbgamut ausreichend groß ist, um die verschiedenen Tageslichtfarben reproduzieren zu können (vgl. Abb. 3.12 (b)). Die acht 3-Kanal-Kombinationen sind in Tabelle 3.1 aufgelistet.

Tabelle 3.1.: 3-Kanal LED-Kombinationen zur Simulation von Metameriespektren.

Index	LED 1	LED 2	LED 3
1	R2	G	B
2	R1	G	B
3	O	G	B
4	WW	G	B
5	R2	G	KW
6	R1	G	KW
7	O	G	KW
8	WW	G	KW

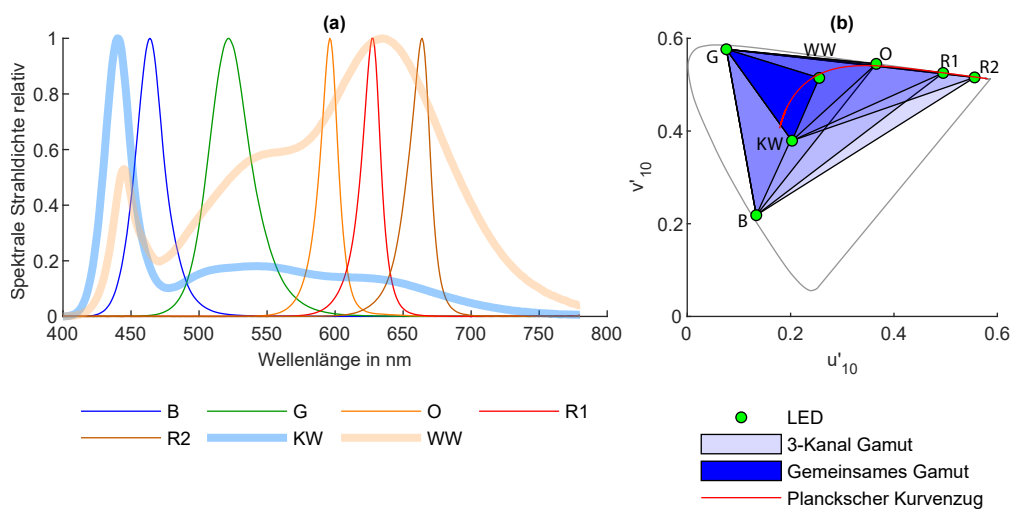


Abbildung 3.12.: (a): Relative Strahlungsverteilung der zur Simulation von Metameriespektren verwendeten blauen (B), grünen (G), orangenen (O), roten (R1, R2), warmweißen (WW) und kaltweißen (KW) LED-Spektren. (b): CIE 1964 Farbörter der verschiedenen LED-Kanäle im $u'v'$ -Farbdiagramm zusammen mit dem jeweiligen Farbgamut einer 3-Kanal Kombination.

Tabelle 3.2.: Kennwerte der verwendeten LED-Spektren. Der Farbort der kaltweißen LED liegt jenseits unendlicher hoher ähnlicher Farbtemperaturen, weswegen stattdessen die Spitzenwellenlänge angegeben wird.

LED	Spitzenwellenlänge	Halbwertsbreite	ähnlichste Farbtemperatur
B	464 nm	25 nm	-
G	522 nm	37 nm	-
O	596 nm	17 nm	-
R1	627 nm	17 nm	-
R2	664 nm	19 nm	-
WW	-	-	2992 K
KW	440 nm	-	-

3.2. Berechnung der Beobachtermetamerie mit individuellen Spektralwertfunktionen

Bevor im weiteren Verlauf anhand der zuvor diskutierten LED-Spektren die verschiedenen Tageslichtspektren nachgemischt und auf die Beobachtermetamerie untersucht werden, werden zwei verschiedene Varianten zur Berechnung des Beobachtermetamerie-Effekts vorgestellt.

3.2.1. Variante 1: Simulation individueller Metameriespektren

Bei dieser Variante wird für jeden individuellen Beobachter i ein LED-Spektrum gemischt, welches für den jeweiligen Beobachter denselben Farbort wie das Referenzspektrum besitzt. Bei Betrachtung aller dieser LED-Spektren, aus der Perspektive eines Referenzbeobachters, kann anhand der resultierenden Farbabstände die Beobachtermetamerie beschrieben werden.

Hierfür werden mit den Gleichungen (3.18) - (3.20), unter Verwendung der individuellen Spektralwertfunktionen $\bar{x}_i(\lambda)$, $\bar{y}_i(\lambda)$, $\bar{z}_i(\lambda)$, die Tristimulus-Werte jedes LED-Grundspektrums $s_{\text{LED},1}(\lambda)$, $s_{\text{LED},2}(\lambda)$, $s_{\text{LED},3}(\lambda)$ sowie des Referenzspektrums $s_{\text{ref}}(\lambda)$ berechnet.

$$X_i = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \bar{x}_i(\lambda) s(\lambda) d\lambda \quad (3.18)$$

$$Y_i = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \bar{y}_i(\lambda) s(\lambda) d\lambda \quad (3.19)$$

$$Z_i = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \bar{z}_i(\lambda) s(\lambda) d\lambda \quad (3.20)$$

Die Normalisierungskonstante K_m ($K_m = 683,002 \text{ lm/W}$ für den 2° Normalbeobachter, $K_m = 683,599 \text{ lm/W}$ für den 10° Normalbeobachter [29]) hat auf die folgende Berechnung der Beobachtermetamerie keinen Einfluss.

Zur Bildung eines Metameriepaars aus einem Referenzspektrum und der additiven Mischung von drei

LED-Spektren müssen beide die gleichen Tristimulus-Werte erzielen.

$$X_{i,\text{ref}} = X_{i,\text{LED},1} + X_{i,\text{LED},2} + X_{i,\text{LED},3} \quad (3.21)$$

$$Y_{i,\text{ref}} = Y_{i,\text{LED},1} + Y_{i,\text{LED},2} + Y_{i,\text{LED},3} \quad (3.22)$$

$$Z_{i,\text{ref}} = Z_{i,\text{LED},1} + Z_{i,\text{LED},2} + Z_{i,\text{LED},3} \quad (3.23)$$

Der Tristimulus-Wert Y wird aufgrund seiner Korrelation mit der photometrischen Größe im Folgenden als Intensität bezeichnet. Somit können die Intensität und die Farbkoordinaten x, y gesondert zur Charakterisierung eines Spektrums verwendet werden. Mit

$$x_i = \frac{X_i}{X_i + Y_i + Z_i} \quad (3.24)$$

$$y_i = \frac{Y_i}{X_i + Y_i + Z_i} \quad (3.25)$$

$$z_i = \frac{Z_i}{X_i + Y_i + Z_i} \leftrightarrow z_i = 1 - x_i - y_i \quad (3.26)$$

und Verwendung der Additivität (Gleichungen 3.21 - 3.23) können die resultierenden Farbkoordinaten des Referenzspektrums $x_{i,\text{ref}}, y_{i,\text{ref}}$ und dessen Intensität $Y_{i,\text{ref}}$ geschrieben werden als:

$$Y_{i,\text{ref}} = Y_{i,\text{LED},1} + Y_{i,\text{LED},2} + Y_{i,\text{LED},3} \quad (3.27)$$

$$x_{i,\text{ref}} = \frac{\sum_{k=1}^3 X_{i,\text{LED},k}}{\sum_{k=1}^3 X_{i,\text{LED},k} + Y_{i,\text{LED},k} + Z_{i,\text{LED},k}} \quad (3.28)$$

$$y_{i,\text{ref}} = \frac{\sum_{k=1}^3 Y_{i,\text{LED},k}}{\sum_{k=1}^3 X_{i,\text{LED},k} + Y_{i,\text{LED},k} + Z_{i,\text{LED},k}} \quad (3.29)$$

Da im Folgenden nur theoretische Spektren von Interesse sind, kann zur Vereinfachung eine ideale Kennlinie der LEDs vorausgesetzt werden. Dies bedeutet, eine Skalierung der Intensität Y wirkt sich mit demselben Faktor auch auf die Tristimulus-Werte X und Z aus. Somit bleibt die Farbe bei unterschiedlichen Intensitäten konstant, wodurch sich die Berechnung vereinfachen lässt (vgl. Kapitel 4.1 zur Berücksichtigung von realen Kennlinien). Mit dieser Vereinfachung können lineare Gleichungssysteme verwendet werden, um die nötigen LED-Intensitäten $Y_{i,\text{LED},k}$, in Abhängigkeit der LED Farbörter $x_{i,\text{LED},k}, y_{i,\text{LED},k}$ (für $k = 1; 2; 3$) und der des Referenzspektrums $x_{i,\text{ref}}, y_{i,\text{ref}}$, zu berechnen.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sum_{k=1}^3 Y_{i,\text{LED},k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_{i,\text{LED},1} - x_{i,\text{ref}}}{y_{i,\text{LED},1}} & \frac{x_{i,\text{LED},2} - x_{i,\text{ref}}}{y_{i,\text{LED},2}} & \frac{x_{i,\text{LED},3} - x_{i,\text{ref}}}{y_{i,\text{LED},3}} \\ \frac{y_{i,\text{LED},1} - y_{i,\text{ref}}}{y_{i,\text{LED},1}} & \frac{y_{i,\text{LED},2} - y_{i,\text{ref}}}{y_{i,\text{LED},2}} & \frac{y_{i,\text{LED},3} - y_{i,\text{ref}}}{y_{i,\text{LED},3}} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Y_{i,\text{LED},1} \\ Y_{i,\text{LED},2} \\ Y_{i,\text{LED},3} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Zur Bewertung der Beobachtermetamerie ist nur der Farbeindruck von Interesse, unabhängig von der Gesamtintensität eines Spektrums. Somit kann $Y_{i,\text{LED},1} = 1$ gesetzt werden, wodurch sich die Berechnung vereinfacht zu:

$$\begin{bmatrix} Y_{i,\text{LED},1} \\ Y_{i,\text{LED},2} \\ Y_{i,\text{LED},3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ f(D) \\ g(D) \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

mit

$$D = \begin{bmatrix} x_{i,\text{LED},1} & y_{i,\text{LED},1} \\ x_{i,\text{LED},2} & y_{i,\text{LED},2} \\ x_{i,\text{LED},3} & y_{i,\text{LED},3} \\ x_{i,\text{ref}} & y_{i,\text{ref}} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Die Funktionen $f(D)$ und $g(D)$ ergeben sich mit $a = x/y$ und $b = z/y$ zu

$$f(D) = \frac{(b_{i,\text{LED},3} - b_{i,\text{ref}})(a_{i,\text{LED},1} - a_{i,\text{ref}}) - (a_{i,\text{ref}} - a_{i,\text{LED},3})(b_{i,\text{ref}} - b_{i,\text{LED},1})}{(b_{i,\text{ref}} - b_{i,\text{LED},1})(a_{i,\text{ref}} - a_{i,\text{LED},2}) - (b_{i,\text{LED},2} - b_{i,\text{ref}})(a_{i,\text{LED},1} - a_{i,\text{ref}})} \quad (3.33)$$

und

$$g(D) = \frac{f(D)(b_{i,\text{LED},2} - b_{i,\text{ref}}) + b_{i,\text{LED},3} - b_{i,\text{ref}}}{b_{i,\text{ref}} - b_{i,\text{LED},1}}. \quad (3.34)$$

Mit den so bestimmten drei LED-Intensitäten $\begin{bmatrix} Y_{i,\text{LED},1} & Y_{i,\text{LED},2} & Y_{i,\text{LED},3} \end{bmatrix}^T$ werden die LED-Primärspektren gewichtet, um das Metameriespektrum $s_{i,m}(\lambda)$ eines individuellen Beobachters zu simulieren.

$$s_{i,m}(\lambda) = s_{i,\text{LED},1}(\lambda)Y_{i,\text{LED},1} + s_{i,\text{LED},2}(\lambda)Y_{i,\text{LED},2} + s_{i,\text{LED},3}(\lambda)Y_{i,\text{LED},3} \quad (3.35)$$

Werden mit dieser Methode für verschiedene Beobachter individuelle Metameriespektren erzeugt, können die resultierenden xy -Farbkoordinaten eines Referenzbeobachters berechnet werden (Gleichung (3.21) - (3.26)). Durch eine Transformation in die CIE 1976 $u'v'$ Koordinaten (Gleichung (2.17) - (2.18)) können die Farbabstände $\Delta_{u'v'}$ der verschiedenen Metameriespektren zu dem Referenzspektrum berechnet werden (Gleichung 2.19).

Somit kann neben der Verteilung der $u'v'$ -Koordinaten der durchschnittliche Farbabstand $\Delta_{u'v',\text{avg}}$ der n simulierten Metameriespektren $s_{i,m}(\lambda)$ zum Referenzspektrum $s_{\text{ref}}(\lambda)$ als Maßzahl verwendet werden.

$$\Delta_{u'v',\text{avg}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{u'v'}(s_{i,m}(\lambda), s_{\text{ref}}(\lambda)) \quad (3.36)$$

Alternativ lässt sich der maximale Farbabstand $\Delta_{u'v',\text{max}}$ als Maß der Beobachtermetamerie verwenden.

$$\Delta_{u'v',\text{max}} = \max\left(\Delta_{u'v'}(s_{1,m}(\lambda), s_{\text{ref}}(\lambda)), \Delta_{u'v'}(s_{2,m}(\lambda), s_{\text{ref}}(\lambda)), \dots, \Delta_{u'v'}(s_{n,m}(\lambda), s_{\text{ref}}(\lambda))\right) \quad (3.37)$$

Das Ergebnis einer solchen Simulation ist in Abbildung 3.13 exemplarisch für zwei unterschiedliche 3-Kanal-Systeme gezeigt (R-G-B und KW-WW-G). In beiden Fällen wird das Strahlungsspektrum eines schwarzen Strahlers mit einer Temperatur von 6500 K als Referenz verwendet. Der Farbort des Referenzspektrums wird für jeden der 1000 individuellen und zehn kategorischen Beobachter ermittelt und eine Gewichtung der jeweiligen LED-Primärspektren berechnet, um den gleichen Farbort zu erzielen (vgl. Abb.3.13 (a), (b)). Zur gleichzeitigen Betrachtung der Farbörter aller Metameriespektren wird der erste kategorische Beobachter als Referenzbeobachter verwendet. Aus seiner Perspektive ergeben sich, in Abhängigkeit der verwendeten Primärspektren, unterschiedlich starke Farbunterschiede zum Referenzspektrum. Der durchschnittliche Farbabstand beträgt in diesem Beispiel $\Delta_{u'v',\text{avg},10} = 9,35 \times 10^{-3}$

(R-G-B) bzw. $\Delta_{u'v',\text{avg},10} = 1,50 \times 10^{-3}$ (KW-WW-G) (vgl. Abb.3.13 (c), (d)).

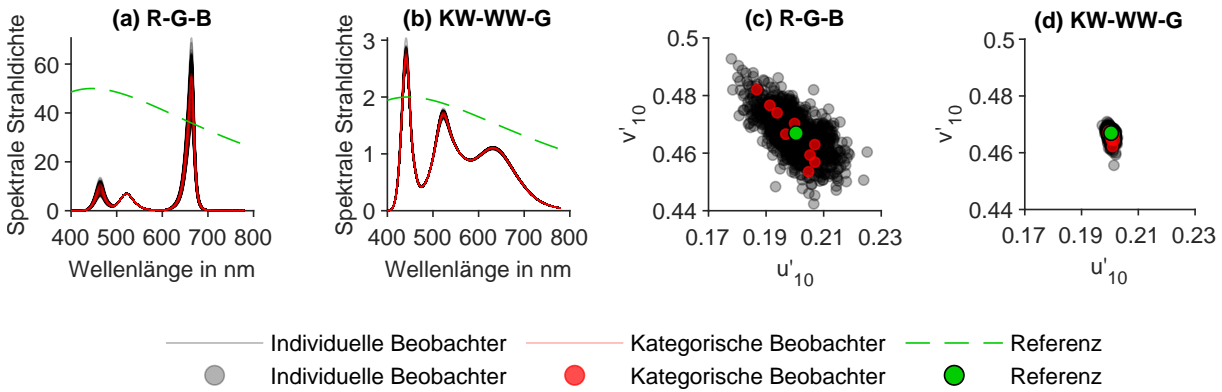


Abbildung 3.13.: Vergleich der LED-Metameriespektren (berechnet mit Gleichung (3.35)) 1000 individueller Beobachter (grau) sowie von zehn kategorischen Beobachtern (rot). Jedes LED-Spektrum entspricht aus der Perspektive des jeweiligen Beobachters der Farbe eines Temperaturstrahlers der Temperatur 6500 K (grün). Wird ein R-G-B LED-System zur Erzeugung der Metameriespektren verwendet (a) ergibt sich aus der Perspektive des ersten kategorischen Beobachters ein durchschnittlicher Farbabstand der Metameriespektren zur Referenz von $\Delta_{u'v',\text{avg},10} = 9,35 \times 10^{-3}$. Bei Verwendung eines KW-WW-G LED-Systems (b) ergibt sich ein durchschnittlicher Farbabstand von $\Delta_{u'v',\text{avg},10} = 1,50 \times 10^{-3}$.

3.2.2. Variante 2: Individuelle Farbabstände

Die vorherige Methode benötigt die Simulation einer Vielzahl von Metameriespektren, weswegen der Rechenaufwand vergleichsweise hoch ist. Wenn nur die individuellen Farbabstände von Interesse sind, kann auf diese Simulation jedoch verzichtet werden. Ist ein Metameriepaar (des Referenzbeobachters) gegeben, werden unter Verwendung der individuellen Spektralwertfunktionen die individuellen Tristimulus-Werte berechnet (Gleichung (3.18) - (3.20)).

Anhand der resultierenden individuellen Farbabstände $\Delta_{i,u'v'}$ (Gleichung (3.24) - (3.26), (2.17) - (2.19)) kann der durchschnittliche Farbabstand $\Delta_{u'v',\text{avg}}$ von n Beobachtern

$$\Delta_{u'v',\text{avg}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{i,u'v'}(s_1(\lambda), s_2(\lambda)) \quad (3.38)$$

oder der maximale Farbabstand $\Delta_{u'v',\text{max}}$

$$\Delta_{u'v',\text{max}} = \max\left(\Delta_{1,u'v'}(s_1(\lambda), s_2(\lambda)), \Delta_{2,u'v'}(s_1(\lambda), s_2(\lambda)), \dots, \Delta_{n,u'v'}(s_1(\lambda), s_2(\lambda))\right) \quad (3.39)$$

als Maß der Beobachtermetamerie verwendet werden.

Da jeder Farbabstand in dem individuellen Farbraum des entsprechenden Beobachters berechnet wird, lassen sich hierbei keine weiteren Vergleiche als die der verschiedenen Abstandsbeträge ziehen.

3.2.3. Vergleich beider Berechnungsmethoden

Um die Ergebnisse beider Varianten zu vergleichen, werden für die in Abschnitt 3.1.1 beschriebenen Tageslichtspektren für jeden individuellen Beobachter acht (vgl. Tabelle 3.1) unterschiedliche Metameriespektren simuliert (sowohl für das 2° als auch das 10°-Sichtfeld). Anhand dieser Daten werden die durchschnittlichen und maximalen Farbabstände mit beiden Varianten berechnet (vgl. Abb. 3.14). Für den durchschnittlichen Farbabstand $\Delta_{u'v',avg}$ ergibt sich eine hohe Korrelation von 99,98 % (2°-Sichtfeld) bzw. 100,00 % (10°-Sichtfeld) zwischen beiden Verfahren.

Bei der Berechnung des maximalen Farbfehlers unterscheiden sich beide Verfahren mit 96,43 % (2°-Sichtfeld) bzw. 97,24 % (10°-Sichtfeld) leicht voneinander.

Bei Verwendung des durchschnittlichen Farbfehlers als Messgröße der Beobachtermetamerie spielt es somit keine Rolle, mit welchem der beiden Varianten diese berechnet wurde.

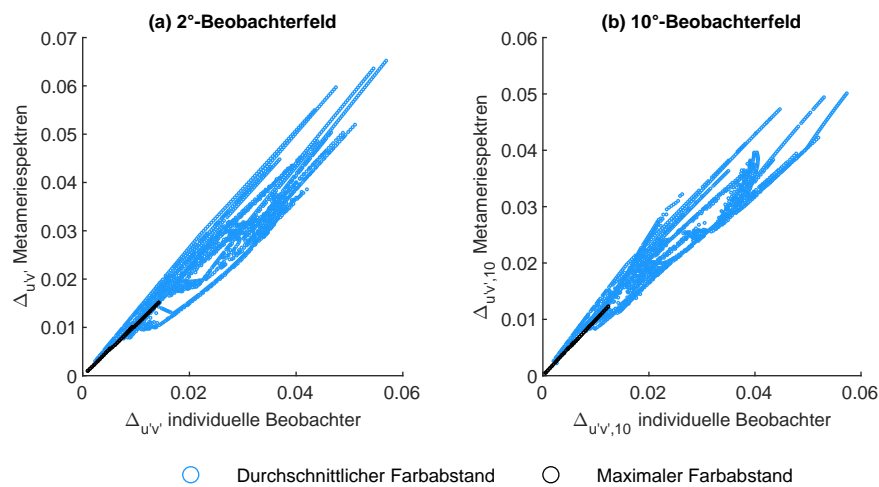


Abbildung 3.14.: Vergleich zweier Berechnungsverfahren zu den durchschnittlichen und maximalen Farbabständen aufgrund von Beobachtermetamerie für das 2° (a) und das 10°-Sichtfeld (b). Die Abszisse zeigt den Farbabstand zwischen Tageslichtreferenz und dem LED-Metameriespektrum des Referenzbeobachters, berechnet im Farbraum eines jeden individuellen Beobachters mit Gleichung (3.38) bzw. (3.39). Die Ordinate zeigt den Farbabstand zwischen der Tageslichtreferenz und den individuellen LED-Metameriespektren berechnet mit Gleichung (3.36) bzw. (3.37). Der durchschnittliche Farbabstand beider Verfahren korreliert mit 99,98 % (a) bzw. 100,00 % (b). Bezogen auf den maximalen Farbabstand korrelieren beide Verfahren mit 96,43 % (a) bzw. 97,24 % (b).

3.3. Beobachtermetamerie-Index

Während die beiden zuvor beschriebenen Methoden eine Vielzahl an Spektralwertfunktionen benötigen, kann durch die Verwendung eines Beobachtermetamerie-Index die Berechnung stark vereinfacht werden. Hierzu werden auf Basis von Ansätzen aus der Literatur drei verschiedene Definitionen eines Beobachtermetamerie-Index formuliert und in einer Korrelationsanalyse mit den Ergebnissen der zuvor gezeigten Berechnungen verglichen. Der hier als Referenzbeobachter verwendete erste kategoriale Beobachter steht im Anhang A.1 in tabellierter Form zur Verfügung.

3.3.1. Definition eines Beobachtermetamerie-Index

Von den verschiedenen Konzepten eines Beobachtermetamerie-Index (vgl. Abschnitt 2.2.4) werden drei dieser Verfahren auf die 1000 simulierten individuellen Beobachterfunktionen angewendet und hierfür teilweise modifiziert.

Nimeroff-Ansatz

Entsprechend dem Vorschlag von Nimeroff et al. [87], die Varianzen und Kovarianzen von individuellen Spektralwertfunktionen zur Berechnung der Farbkoordinatenvarianz zu verwenden, wird hier die Varianz der $u'v'$ Koordinaten berechnet. Hierfür wird die kolorimetrische Fehlerfortpflanzungstheorie verwendet [129], [130] und die intrapersonelle Varianz vernachlässigt, unter der Annahme, dass sie für alle Beobachter gleich ist. Aus den 1000 simulierten individuellen Spektralwertfunktionen werden die Tristimulusvarianzen $\sigma_X^2(\lambda)$, $\sigma_Y^2(\lambda)$, $\sigma_Z^2(\lambda)$ berechnet (vgl. Abb. 3.15).

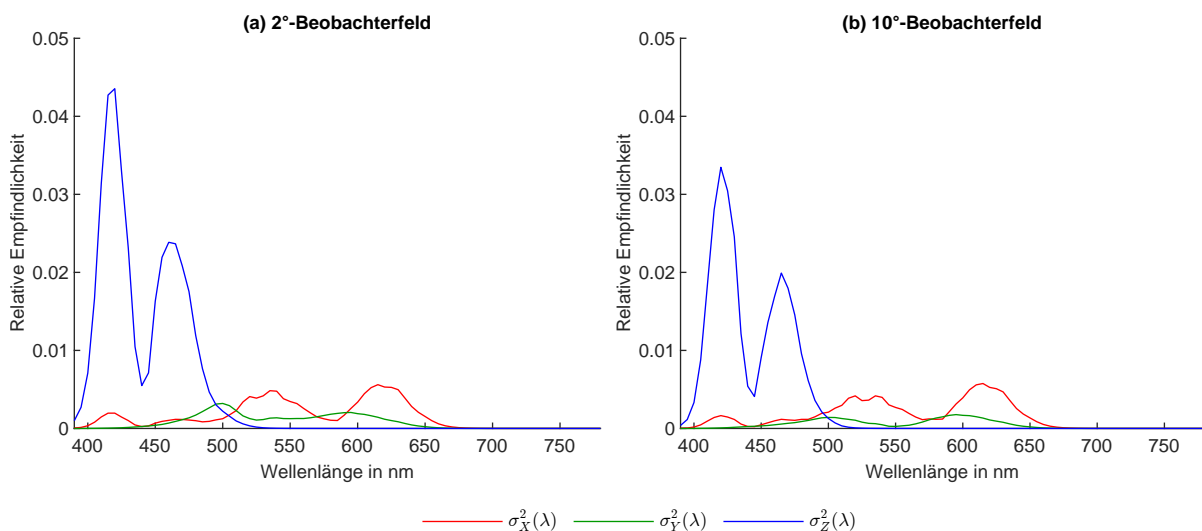


Abbildung 3.15.: Spektrale Varianzfunktionen $\sigma_X^2(\lambda)$, $\sigma_Y^2(\lambda)$, $\sigma_Z^2(\lambda)$ für das 2° (a) und das 10°-Sichtfeld (b). Die tabellierten Werte dieser Funktionen stehen im Anhang A.2 zur Verfügung.

Die Kovarianzmatrix

$$\Sigma_{u'v'} = \begin{bmatrix} \sigma_{u'}^2(\lambda) & \sigma_{u'v'}(\lambda) \\ \sigma_{u'v'}(\lambda) & \sigma_{v'}^2(\lambda) \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

ergibt sich nach der Fehlerfortpflanzungstheorie [129], [130] in Abhängigkeit eines Spektrums $s(\lambda)$ und

der Tristimulus-Werte des Referenzbeobachters X, Y, Z zu:

$$\begin{aligned} \sigma_{u'}^2(\lambda) &= \frac{(60Y + 12Z)^2}{(X + 15Y + 3Z)^4} \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} s^2(\lambda) \sigma_X^2(\lambda) d\lambda + \frac{(-60X)^2}{(X + 15Y + 3Z)^4} \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} s^2(\lambda) \sigma_Y^2(\lambda) d\lambda \\ &+ \frac{(-12X)^2}{(X + 15Y + 3Z)^4} \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} s^2(\lambda) \sigma_Z^2(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (3.41)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{v'}^2(\lambda) &= \frac{(-9Y)^2}{(X + 15Y + 3Z)^4} \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} s^2(\lambda) \sigma_X^2(\lambda) d\lambda + \frac{(9X + 27Z)^2}{(X + 15Y + 3Z)^4} \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} s^2(\lambda) \sigma_Y^2(\lambda) d\lambda \\ &+ \frac{(-27Y)^2}{(X + 15Y + 3Z)^4} \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} s^2(\lambda) \sigma_Z^2(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (3.42)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{u'v'}(\lambda) &= \frac{(60Y + 12Z)(-9Y)}{(X + 15Y + 3Z)^4} \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} s^2(\lambda) \sigma_X^2(\lambda) d\lambda + \frac{(-60X)(9X + 27Z)}{(X + 15Y + 3Z)^4} \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} s^2(\lambda) \sigma_Y^2(\lambda) d\lambda \\ &+ \frac{(-12X)(-27Y)}{(X + 15Y + 3Z)^4} \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} s^2(\lambda) \sigma_Z^2(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (3.43)$$

Anhand der Eigenvektoren E_1, E_2 der Kovarianzmatrix lassen sich Fehlerellipsen konstruieren und mittels der χ^2 Verteilung zweier Freiheitsgrade skalieren. Um jedoch einen Metamerie-Index zu definieren, ist es vorteilhafter, einen einzelnen Wert zum Messen der Beobachtermetamerie zu erzeugen. Long und Fairchild [131] haben aus diesem Grund, ebenfalls unter Verwendung einer Kovarianzmatrix, im CIE-LAB Farbraum das Volumen von Ellipsoiden berechnet. Da hier für eine bessere Gleichabständigkeit von Lichtfarben das $u'v'$ -Diagramm Verwendung findet, wird der Flächeninhalt $A_{Ellipse}$ der resultierenden $u'v'$ -Ellipse als Metamerie-Index verwendet.

$$A_{Ellipse} = \pi r_1 r_2 \quad (3.44)$$

Für einen Konfidenzwert von 95 % ergeben sich die zwei Radien einer Ellipse r_1, r_2 zu

$$r_k = \sqrt{5,991 E_k} \quad \text{für } k = 1; 2. \quad (3.45)$$

Auf die folgende Korrelationsanalyse der Genauigkeit dieses Beobachtermetamerie-Index hat die Skalierung mit dem Konfidenzwert jedoch keinen Einfluss.

Der zu untersuchende Beobachtermetamerie-Index M_{Ni} (der Index Ni kennzeichnet den Nimeroff-Ansatz) wird hier über die Ellipsenfläche definiert, welche aus der Differenz $\Delta s(\lambda)$ zweier Spektren eines Metameriepaars $s_1(\lambda)$ und $s_2(\lambda)$ hervorgeht.

$$\Delta s(\lambda) = s_1(\lambda) - s_2(\lambda) \quad (3.46)$$

$$M_{Ni} = A_{Ellipse}(\Delta s(\lambda)) \quad (3.47)$$

(Für die Berechnung der Tristimulus-Werte in den Gleichungen (3.41) - (3.43) wird nicht die Differenz, sondern ein einzelnes Metameriepektrum verwendet.)

Allen-Ansatz

Zur Definition eines Abweichungsbeobachters, mit dessen Verwendung Farbunterschiede von zwei Spektren berechnet werden, welche für den Normalbeobachter identisch aussehen, verwendete Allen [88] die Standardabweichung der 20 Spektralwertfunktionen von Stiles und Burch [78]. Mit der Abweichung der Spektralwertfunktionen eines individuellen Beobachters $\delta\bar{x}_i(\lambda)$, $\delta\bar{y}_i(\lambda)$, $\delta\bar{z}_i(\lambda)$ zum Mittelwert (dem Normalbeobachter) $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$

$$\delta\bar{x}_i(\lambda) = \bar{x}_i(\lambda) - \bar{x}(\lambda) \quad (3.48)$$

$$\delta\bar{y}_i(\lambda) = \bar{y}_i(\lambda) - \bar{y}(\lambda) \quad (3.49)$$

$$\delta\bar{z}_i(\lambda) = \bar{z}_i(\lambda) - \bar{z}(\lambda) \quad (3.50)$$

ergeben sich die Standardabweichungen zu

$$\Delta\bar{x}(\lambda) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\delta\bar{x}_i(\lambda))^2} \quad (3.51)$$

$$\Delta\bar{y}(\lambda) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\delta\bar{y}_i(\lambda))^2} \quad (3.52)$$

$$\Delta\bar{z}(\lambda) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\delta\bar{z}_i(\lambda))^2}. \quad (3.53)$$

Die Vorzeichen der spektralen Abweichungen $\delta\bar{x}_i(\lambda)$, $\delta\bar{y}_i(\lambda)$, $\delta\bar{z}_i(\lambda)$ korrelieren miteinander. Beispielsweise korreliert eine positive Abweichung der $\bar{z}_i(\lambda)$ Funktion im Bereich von 420 nm mit einer negativen Abweichung im Bereich von 470 nm. Durch die Quadratur in der Berechnung der Standardabweichung geht jedoch das Vorzeichen verloren, wodurch ebenfalls der Korrelationszusammenhang verschwindet. Um der spektralen Standardabweichung wieder Vorzeichen zuzuordnen zu können, führte Allen eine Korrelationsanalyse der individuellen Spektralwertfunktionen sowie die Interstimulus-Korrelation durch. Die dabei auftretenden Muster verwendete er, um den verschiedenen spektralen Bereichen der Standardabweichung Vorzeichen zuzuordnen. Eine entsprechende Korrelationsanalyse der 1000 simulierten individuellen Spektralwertfunktionen ergab jedoch keine vergleichbaren Muster, weswegen Allens Methode der Vorzeichenfestlegung nicht verwendet werden konnte. Stattdessen werden hier alle spektralen Abweichungen eines Sets von individuellen Spektralwertfunktionen mit dem Vorzeichen v_i von $\delta\bar{z}_i(420 \text{ nm})$ multipliziert. Die anschließende Mittelwertbildung der $N = 1000$ individuellen Differenzfunktionen ergibt die Abweichungsfunktionen $\Delta_A\bar{x}(\lambda)$, $\Delta_A\bar{y}(\lambda)$, $\Delta_A\bar{z}(\lambda)$ nach Allen (gekennzeichnet durch den Index A)

$$\Delta_A\bar{x}(\lambda) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta\bar{x}_i(\lambda)v_i \quad (3.54)$$

$$\Delta_A\bar{y}(\lambda) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta\bar{y}_i(\lambda)v_i \quad (3.55)$$

$$\Delta_A\bar{z}(\lambda) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta\bar{z}_i(\lambda)v_i \quad (3.56)$$

mit

$$v_i = \begin{cases} 1 & \delta\bar{z}(420 \text{ nm}) \geq 0 \\ -1 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (3.57)$$

Durch Addition der Abweichungsfunktionen zum Referenzbeobachter wird der Abweichungsbeobachter $\bar{x}_{\text{devA}}, \bar{y}_{\text{devA}}, \bar{z}_{\text{devA}}$ gebildet.

$$\bar{x}_{\text{devA}}(\lambda) = \Delta_A \bar{x}(\lambda) + \bar{x}(\lambda) \quad (3.58)$$

$$\bar{y}_{\text{devA}}(\lambda) = \Delta_A \bar{y}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) \quad (3.59)$$

$$\bar{z}_{\text{devA}}(\lambda) = \Delta_A \bar{z}(\lambda) + \bar{z}(\lambda) \quad (3.60)$$

Da der erste kategorische Beobachter auf dem Durchschnitt von 10 000 individuellen Beobachtern beruht [84], wird dieser als Referenzbeobachter verwendet. Die resultierenden Abweichungsfunktionen sowie der Abweichungsbeobachter sind in Abb. 3.16 gezeigt.

Der zu untersuchende Beobachtermetamerie-Index nach Allen M_A wird als der $\Delta_{u'v'}$ Farbabstand (Gl. 2.19) zweier Spektren $s_1(\lambda), s_2(\lambda)$ für den Abweichungsbeobachter definiert, welche für den Referenzbeobachter ein Metameriepaar bilden.

$$X_{\text{devA},k} = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \bar{x}_{\text{devA}}(\lambda) s_k(\lambda) d\lambda \quad (3.61)$$

$$Y_{\text{devA},k} = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \bar{y}_{\text{devA}}(\lambda) s_k(\lambda) d\lambda \quad (3.62)$$

$$Z_{\text{devA},k} = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \bar{z}_{\text{devA}}(\lambda) s_k(\lambda) d\lambda \quad \text{für } k = 1; 2. \quad (3.63)$$

$$M_A = \Delta_{u'v'}((X_{\text{devA},1}, Y_{\text{devA},1}, Z_{\text{devA},1}), (X_{\text{devA},2}, Y_{\text{devA},2}, Z_{\text{devA},2})) \quad (3.64)$$

Nayatani-Ansatz

Zur Definition eines Abweichungsbeobachters wendeten Nayatani et al. [89] eine Singulärwertzerlegung der 20 Spektralwertfunktionen von Stiles und Burch [78] an. Dabei ließen sich, durch entsprechende Gewichtungen der ersten drei Komponenten, die zugrunde liegenden Spektralwertfunktionen rekonstruieren. Auf Basis der ersten Komponente wurde der Abweichungsbeobachter gebildet. Zur Anwendung dieses Verfahrens auf die 1000 individuellen Beobachter wird eine Hauptkomponentenanalyse (PCA-Principal Component Analysis) in Matlab 2020b durchgeführt, welche ebenfalls auf einer Singulärwertzerlegung basiert. Um die spektrale Korrelation zwischen den $x_i(\lambda), y_i(\lambda)$ und $z_i(\lambda)$ zu bewahren, werden die drei Funktionen eines individuellen Beobachters mit jeweils 79 Stützstellen (390 nm

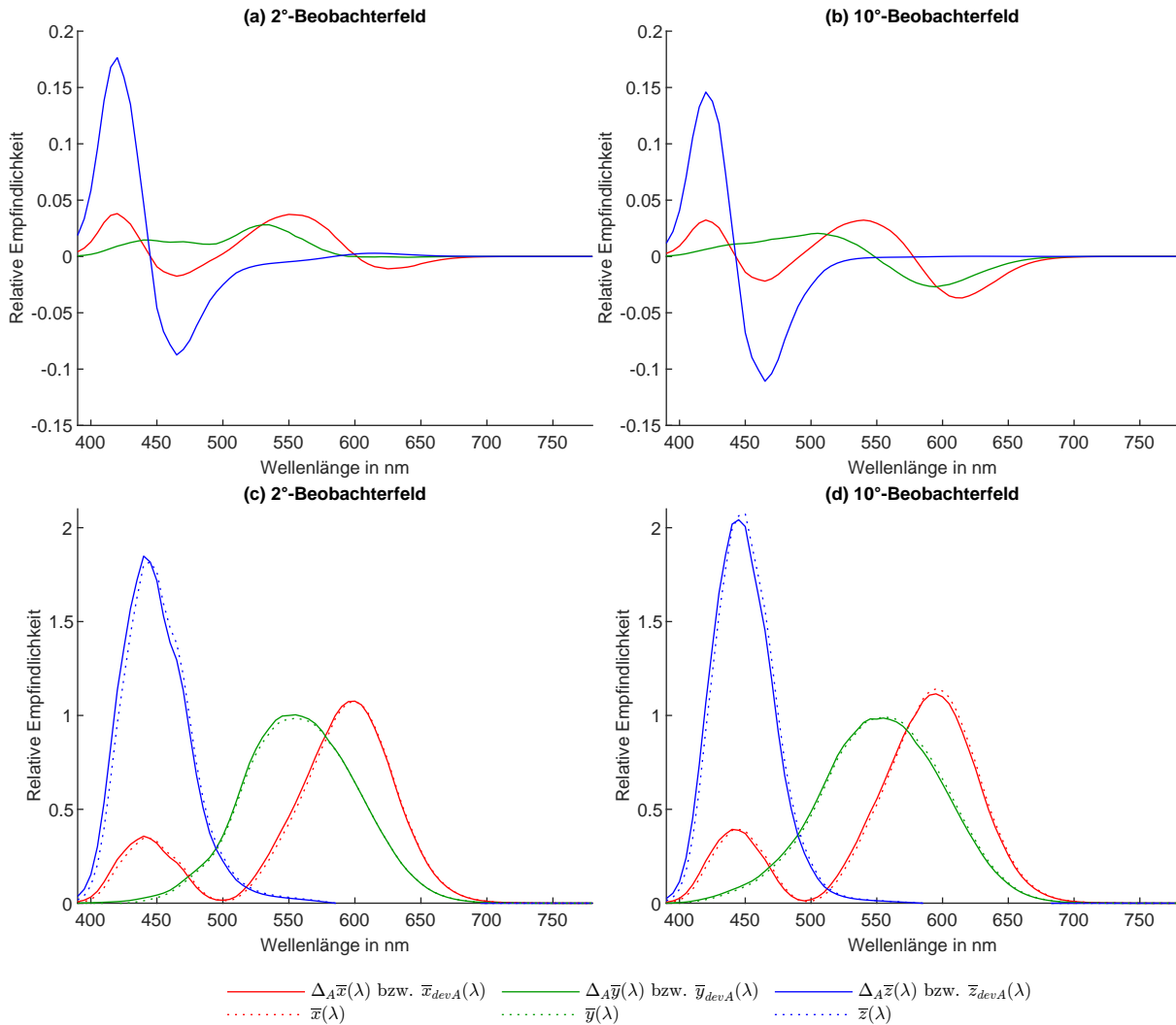


Abbildung 3.16.: (a), (b): Abweichungsfunktionen $\Delta_A \bar{x}(\lambda)$, $\Delta_A \bar{y}(\lambda)$, $\Delta_A \bar{z}(\lambda)$ des Allen-Ansatzes für das 2° (a) und das 10°-Sichtfeld (b). (c), (d): Abweichungsbeobachterfunktionen $\bar{x}_{devA}(\lambda)$, $\bar{y}_{devA}(\lambda)$, $\bar{z}_{devA}(\lambda)$ des Allen-Ansatzes für das 2° (c) und das 10°-Sichtfeld (d). Die tabellierten Werte dieser Funktionen stehen im Anhang A.3 und A.4 zur Verfügung.

bis 780 nm im 5 nm Intervall) in einen Vektor cmf_i der Länge 237 (3 mal 79 Stützstellen) geschrieben:

$$cmf_i = \begin{bmatrix} x_{i,1} & x_{i,2} & \dots & x_{i,79} & y_{i,1} & \dots & y_{i,79} & z_{i,1} & \dots & z_{i,79} \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

$$E = \begin{bmatrix} cmf_1 \\ cmf_2 \\ \vdots \\ cmf_{1000} \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

Bei Verwendung der 1000 individuellen Beobachter ergibt sich somit eine 1000 x 237 Matrix E , auf welche die Matlab-Hauptkomponentenanalyse $PCA(E)$ angewendet wird. Die erste der resultierenden Komponenten für das 2°-Sichtfeld erklärt 69,30 % der Variationen, bei den Funktionen für das 10°-Sichtfeld werden 76,52 % der Variationen mit der ersten Komponente erklärt. Durch eine Deserialisierung des entsprechenden Vektors werden die Abweichungsfunktionen nach Nayatani $\Delta_N \bar{x}(\lambda)$, $\Delta_N \bar{y}(\lambda)$, $\Delta_N \bar{z}(\lambda)$ gebildet (vgl. Abb. 3.17 (a), (b)).

Der Abweichungsbeobachter \bar{x}_{devN} , \bar{y}_{devN} , \bar{z}_{devN} (vgl. Abb. 3.17 (c), (d)) wird durch die Addition der Abweichungsfunktionen zu denen des Referenzbeobachters gebildet:

$$\bar{x}_{devN}(\lambda) = \Delta_N \bar{x}(\lambda) + \bar{x}(\lambda) \quad (3.67)$$

$$\bar{y}_{devN}(\lambda) = \Delta_N \bar{y}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) \quad (3.68)$$

$$\bar{z}_{devN}(\lambda) = \Delta_N \bar{z}(\lambda) + \bar{z}(\lambda) \quad (3.69)$$

Durch die Berechnung der Tristimulus-Werte des Abweichungsbeobachters bei Betrachtung zweier Metamerieespektren $s_1(\lambda)$, $s_2(\lambda)$ und deren Farbabstand $\Delta_{u'v'}$ (Gl. 2.19) wird der zu untersuchende Beobachtermetamerie-Index nach Nayatani M_N definiert.

$$X_{devN,k} = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \bar{x}_{devN}(\lambda) s_k(\lambda) d\lambda \quad (3.70)$$

$$Y_{devN,k} = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \bar{y}_{devN}(\lambda) s_k(\lambda) d\lambda \quad (3.71)$$

$$Z_{devN,k} = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \bar{z}_{devN}(\lambda) s_k(\lambda) d\lambda \quad \text{für } k = 1; 2. \quad (3.72)$$

$$M_N = \Delta_{u'v'}((X_{devN,1}, Y_{devN,1}, Z_{devN,1}), (X_{devN,2}, Y_{devN,2}, Z_{devN,2})) \quad (3.73)$$

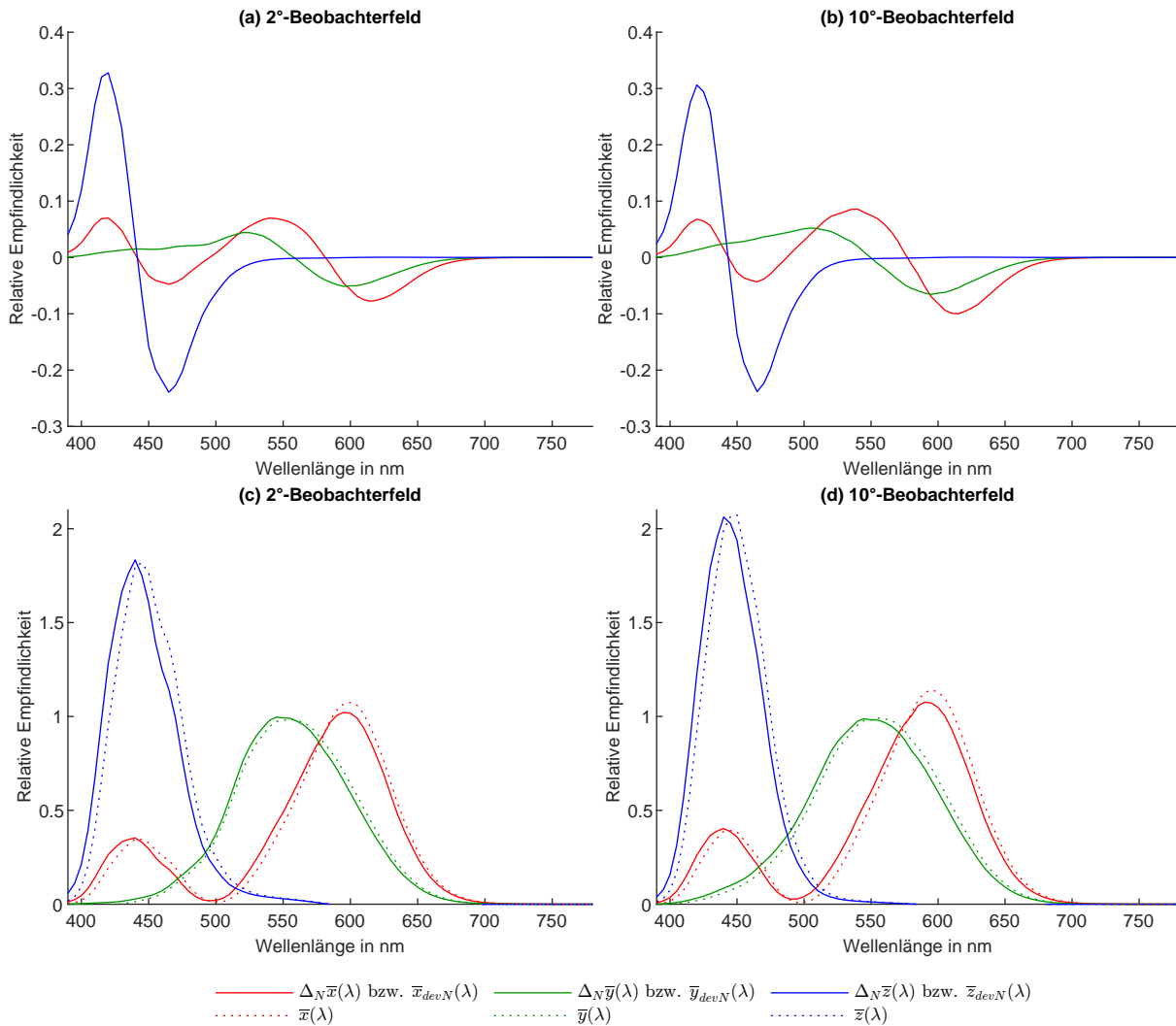


Abbildung 3.17.: (a), (b): Abweichungsfunktionen $\Delta_N \bar{x}(\lambda)$, $\Delta_N \bar{y}(\lambda)$, $\Delta_N \bar{z}(\lambda)$ des Nayatani-Ansatzes für das 2° (a) und das 10°-Sichtfeld (b). (c), (d): Abweichungsbeobachterfunktionen $\bar{x}_{devN}(\lambda)$, $\bar{y}_{devN}(\lambda)$, $\bar{z}_{devN}(\lambda)$ des Nayatani-Ansatzes für das 2° (c) und das 10°-Sichtfeld (d). Die tabellierten Werte dieser Funktionen stehen im Anhang A.5 und A.6 zur Verfügung.

3.3.2. Korrelationsanalyse des Beobachtermetamerie-Index

Die drei zuvor definierten Beobachtermetamerie-Indizes basieren auf unterschiedlichen mathematischen Verfahren, welche die individuell unterschiedlichen spektralen Stimulationen auf eine einzelne Kenngröße vereinfachen. Wie in Abb. 3.18 erkennbar, führen die mit Vorzeichen versehenen Standardabweichungen des Allen-Ansatzes (Abb. 3.18 (b), (e)) zu einem ähnlichen Verlauf wie die Funktionen der ersten Komponente der Hauptkomponentenanalyse (Abb. 3.18 (c), (f)), wenn auch mit unterschiedlichen Skalierungen. Diese beiden Ansätze ähneln sich auch dahin gehend, dass der entsprechende Beobachtermetamerie-Index über den Farbabstand $\Delta_{u'v'}$ zweier Spektren eines Metameriepaars gebildet wird, bewertet von dem jeweilig definierten Abweichungsbeobachter.

Der Nimeroff-Ansatz hingegen verwendet die spektrale Varianz der Tristimulus-Werte, welche ausschließlich positive Vorzeichen besitzen (Abb. 3.18 (a), (d)). Diese Funktionen bilden die Basis zur Berechnung der Kovarianzmatrix $\Sigma_{u'v'}$, deren resultierende Fehler-Ellipse als Beobachtermetamerie-Index

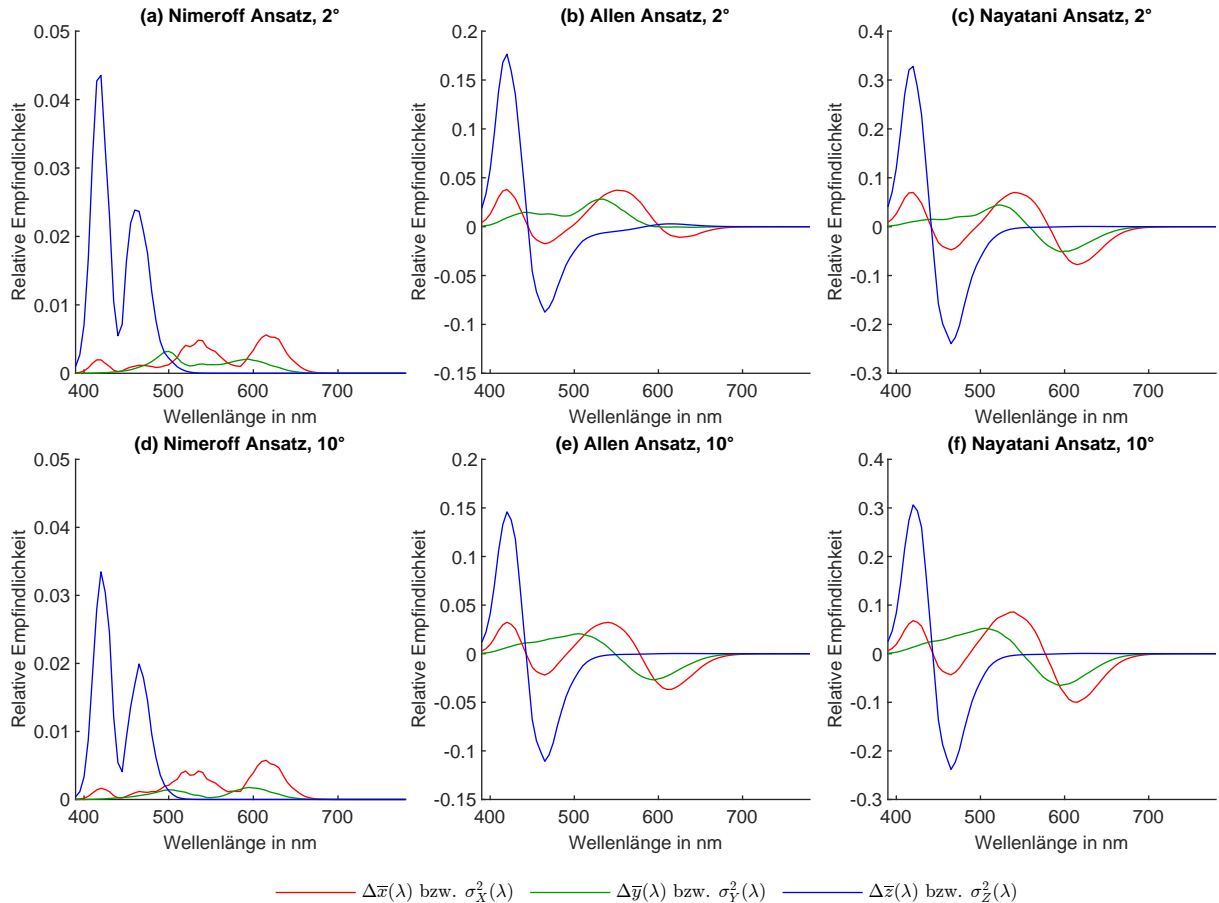


Abbildung 3.18.: Spektrale Varianz- und Abweichungsfunktionen von verschiedenen Varianten eines Beobachtermetamerie-Index, für das 2° (a) - (c) und das 10°-Sichtfeld (d) - (f). (a), (d): Varianzfunktionen $\sigma_X^2(\lambda)$, $\sigma_Y^2(\lambda)$, $\sigma_Z^2(\lambda)$ des Nimeroff-Ansatzes. (b), (e): Abweichungsfunktionen $\Delta_A \bar{x}(\lambda)$, $\Delta_A \bar{y}(\lambda)$, $\Delta_A \bar{z}(\lambda)$ des Allen-Ansatzes. (c), (f): Abweichungsfunktionen $\Delta_N \bar{x}(\lambda)$, $\Delta_N \bar{y}(\lambda)$, $\Delta_N \bar{z}(\lambda)$ des Nayatani-Ansatzes.

verwendet wird.

Um zu ermitteln, welcher dieser drei Ansätze am akkuratesten den Beobachtermetamerie-Effekt beschreibt, werden ihre Ergebnisse einer Korrelationsanalyse unterzogen. Die folgenden Ergebnisse basieren auf der Anwendung der drei zuvor definierten Beobachtermetamerie-Indizes auf simulierte Metameriepaare. Diese Metameriepaare bestehen jeweils aus einem Tageslichtspektrum (Referenz) und einem 3-Kanal-LED-Spektrum. Hierbei wird jedes der 1568 Tageslichtspektren (vgl. Abschnitt 3.1.1) als Referenz für bis zu acht spektral unterschiedliche Metameriepaare verwendet, abhängig davon, ob der Tageslichtfarbort im Gamut des einzelnen LED-Systems liegt (vgl. acht 3-Kanal-Systeme in Abschnitt 3.1.3). Diese Simulation wird für jeden einzelnen der 1000 individuellen Beobachter durchgeführt, sowohl für das 2° als auch für das 10°-Sichtfeld.

Anhand dieser Datenbasis wird in Abschnitt 3.3.2 der Beobachtermetamerie-Index mit der höchsten Korrelation zu der Berechnung basierend auf einzelnen individuellen Beobachterfunktionen bestimmt. Darauf folgend wird gezeigt, wie stark der Beobachtermetamerie-Effekt von der Tageslichtfarbe abhängt (Abschnitt 3.5) und inwiefern der resultierende Farbfehler durch die Wahl des verwendeten 3-Kanal-Systems beeinflusst wird (Abschnitt 3.6). Zuletzt wird in Abschnitt 3.7 die Korrelation des Beobachtermetamerie-Effekts und der Farbwiedergabe betrachtet.

Die Ergebnisse der drei Varianten eines Beobachtermetamerie-Index (vgl. Abschnitt 3.3) werden auf

ihre Korrelation mit dem durchschnittlichen bzw. maximalen Farbabstand der individuellen Metameriespektren untersucht (vgl. Abb. 3.19). Der Vergleich zeigt, dass der Allen-Ansatz und der Nayatani-Ansatz zu ähnlich hohen Korrelationen führen. Der Nayatani-Ansatz erreicht die höchsten Werte, mit Korrelationen von 95,67 % (2°-Sichtfeld) und 98,09 % (10°-Sichtfeld) bezogen auf den durchschnittlichen Farbabstand. Somit bildet dieses Verfahren, unter Verwendung der Gleichungen (3.67) bis (3.73), die Basis des hier vorgeschlagenen Beobachtermetamerie-Index. Der Nimeroff-Ansatz hingegen erzielt eine deutlich geringere Korrelation, was auf die Bildung der Varianz der individuellen Beobachterfunktionen zurückzuführen sein kann, da hierbei negative spektrale Vorzeichen verloren gehen.

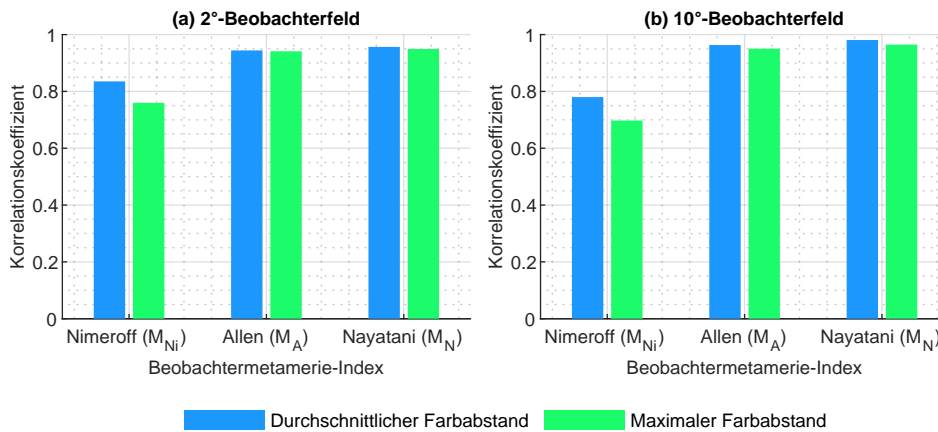


Abbildung 3.19.: Korrelation dreier Verfahren eines Beobachtermetamerie-Index und dem durchschnittlichen bzw. maximalen Farbabstand der individuellen LED-Metameriespektren, aus Perspektive des Referenzbeobachters für das 2° (a) und das 10°-Sichtfeld (b).

Eine detailliertere Betrachtung der Korrelation des Nayatani-Ansatzes und des durchschnittlichen Farbfehlers ist in Abb. 3.20 gegeben. Da der Verlauf annähernd linear ist, kann mit Gleichung 3.74 der durchschnittliche Farbabstand berechnet werden.

$$\Delta_{u'v'} = p_1 M_N + p_2 \quad (3.74)$$

Für das 2°-Sichtfeld ergeben sich die beiden Koeffizienten zu $p_1 = 0,4416$ und $p_2 = 1,875 \times 10^{-3}$ mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9153$. Für das 10°-Sichtfeld ergeben sich die Werte zu $p_1 = 0,4610$ und $p_2 = 9,119 \times 10^{-4}$ mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9621$.

Die hier empfohlenen Abweichungsfunktionen (vgl. Abb. 3.17), aus welchen der neu definierte Abweichungsbeobachter gebildet wird, werden in Abbildung 3.21 mit denen der CIE [29] verglichen. Zu beachten ist dabei, dass die CIE nur ein Set von Abweichungsfunktionen definiert (für das 2°-Beobachterfeld), welche hier auch mit den neu definierten 10° Abweichungsfunktionen verglichen werden (Abb. 3.21 (b)). Hierfür sind die CIE-Funktionen mit einem Faktor von $-0,3477$ (Abb. 3.21 (a)) bzw. $-0,3723$ skaliert (Abb. 3.21 (b)). Während die Abweichungsfunktionen $\bar{z}_{devN}(\lambda)$ und $\Delta_{CIE}\bar{z}(\lambda)$ relativ betrachtet einen ähnlichen Verlauf haben, sind die größten Unterschiede zwischen den Funktionen $\bar{x}_{devN}(\lambda)$ und $\Delta_{CIE}\bar{x}(\lambda)$ zu erkennen.

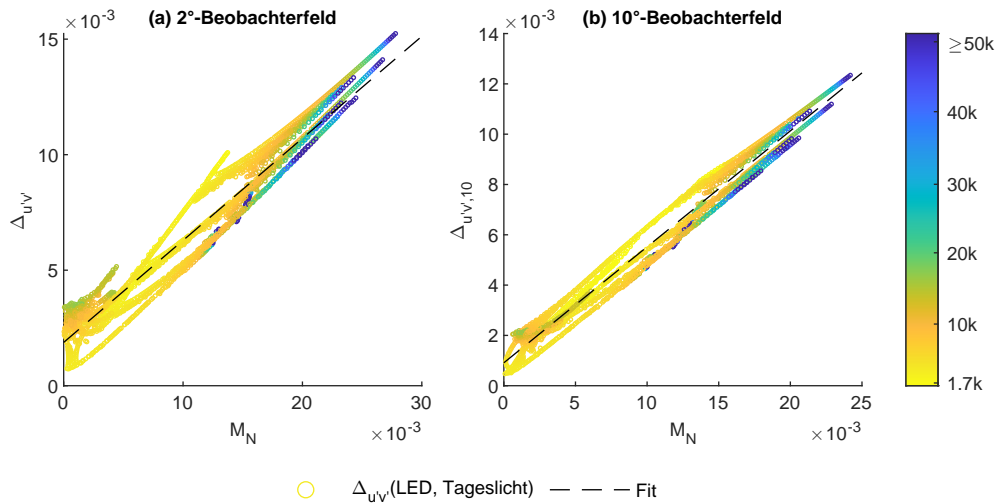


Abbildung 3.20.: Korrelation des empfohlenen Beobachtermetamerie-Index M_N mit dem durchschnittlichen Farbabweichungsmaß Δ_{uv} der individuellen MetamerieSpektren für ein 2° (a) und 10° -Sichtfeld (b). Die Korrelation ist mit einer Gerade genähert (schwarz gestrichelte Linie) und hat ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9153$ (a) und $R^2 = 0,9621$ (b). Jeder Datenpunkt im Diagramm stellt ein Metameriepaar dar, dessen ähnlichste Farbtemperatur im Bereich von 1700 K bis 50 000 K farbcodiert ist.

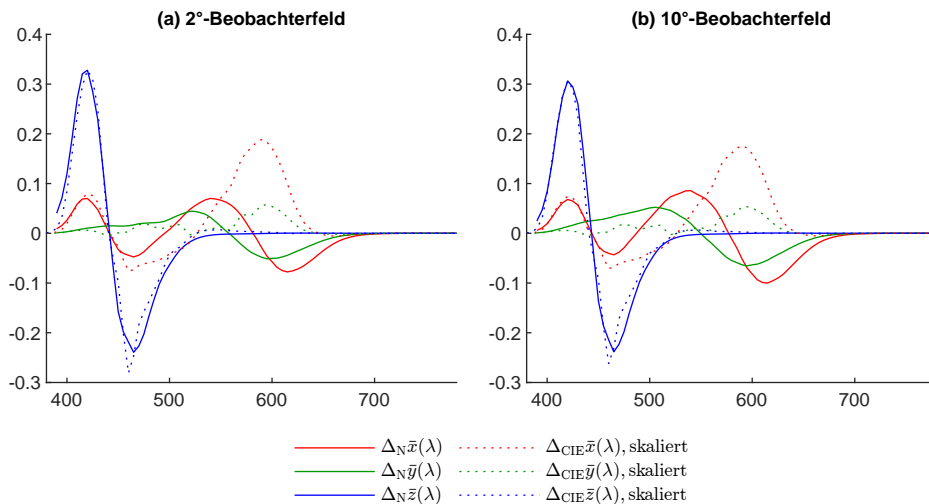


Abbildung 3.21.: Empfohlene Abweichungsfunktionen $\bar{x}_{devN}(\lambda)$, $\bar{y}_{devN}(\lambda)$, $\bar{z}_{devN}(\lambda)$ verglichen mit den ersten CIE Abweichungsfunktionen für das 2° -Beobachterfeld $\Delta_{CIE}\bar{x}(\lambda)$, $\Delta_{CIE}\bar{y}(\lambda)$, $\Delta_{CIE}\bar{z}(\lambda)$. Um einen besseren Vergleich zu ermöglichen, sind die CIE-Funktionen mit einem Faktor von $-0,3477$ (a) bzw. $-0,3723$ (b) skaliert.

3.3.3. Zusammenfassung (I)

Es wurde ein Beobachtermetamerie-Index definiert, welcher die Berechnung des durchschnittlichen Farbfehlers durch Beobachtermetamerie stark vereinfacht. Hierfür wurden drei Methoden aus der Literatur verwendet und angepasst (Nimeroff-, Allen- und Nayatani-Ansatz). Hierbei erzielt der Ansatz von Nayatani, einen Abweichungsbeobachter mithilfe der Hauptkomponenten von individuellen Beobachterfunktionen zu definieren, die höchste Korrelation. Dass die maximale Korrelation von 98,09 % bei dem 10° -Sichtfeld auftritt, ist vorteilhaft für den Praxiseinsatz, da dieses Sichtfeld im Bezug auf Tageslicht eine höhere Relevanz besitzt als das 2° -Sichtfeld, welches mit 95,67 % geringfügig weniger

stark korreliert. Der Ansatz nach Allen zeigt eine ähnlich gute Eignung, während der Nimeroff-Ansatz eine deutlich geringere Korrelation besitzt. Für den hier auf Basis des Naytani-Ansatzes definierten Beobachtermetamerie-Index wird ein linearer Fit angegeben, um den resultierenden durchschnittlich wahrgenommenen Farbunterschied zu berechnen.

Die Anwendung dieses Beobachtermetamerie-Index erleichterte die Echtzeit-Optimierung für adaptive LED-Systeme, welche mehr als drei LED-Kanäle verwenden und somit für jeden Zielfarbart unterschiedliche Spektralverteilungen erzeugen können. Verwendet ein adaptives LED-System nur drei LED-Kanäle, kann ein Zielfarbart nur mit einem möglichen Mischspektrum erzeugt werden und eine spektrale Optimierung ist in Echtzeit nicht möglich. Jedoch kann zum Entwicklungszeitpunkt auf Basis des Beobachtermetamerie-Index verschiedener 3-Kanal-Systeme ein System ausgesucht werden, welches im Durchschnitt den geringsten individuellen Farbfehler erzeugt (vgl. Abschnitt 3.6).

Abgesehen von der Optimierung von Lichtfarben ist die Beobachtermetamerie auch eine Herausforderung bei der Entwicklung von WCG (Wide Color Gamut) und HDR (High Dynamic Range) Displays [34]–[36], [131], weswegen für diese Anwendung spezielle Beobachtermetamerie-Indizes vorgeschlagen werden [37], [131]. WCG-Displays benötigen schmalbandige Subpixelspektren, um ein großes Farbgamut zu erzeugen, wodurch individuelle wahrgenommene Farbfehler jedoch begünstigt werden. Werden bei einem solchen Display mehr als drei Subpixel verwendet, ist auch hier eine spektrale Optimierung in der Transformation von Bilddaten möglich, wofür eine Verwendung des vorgestellten Beobachtermetamerie-Index denkbar ist.

3.4. Beobachtermetamerie-Koeffizient

Während Metamerie sich immer auf den Vergleich zweier Spektren bezieht, ermöglichen die zuvor hergeleiteten Abweichungsfunktionen (vgl. Abb. 3.17) eine Bewertung der individuellen Farbwahrnehmungsvariabilität eines einzelnen Strahlungsspektrums. Hierauf aufbauend wird im Folgenden der Beobachtermetamerie-Koeffizient definiert und in Abschnitt 3.4.2 untersucht, wie die Differenz der beiden Koeffizienten eines Metameriepaars mit deren Beobachtermetamerie korreliert.

Ist das Strahlungsspektrum der Tageslicht-Referenz unbekannt, kann mit den gängigen Berechnungsverfahren auch der Beobachtermetamerie-Effekt nicht berechnet werden. Inwieweit jedoch eine Abschätzung der Beobachtermetamerie anhand des Koeffizienten eines einzelnen LED-Spektrums möglich ist, wird in Abschnitt 3.4.3 analysiert.

3.4.1. Definition des Beobachtermetamerie-Koeffizienten

Der Beobachtermetamerie-Koeffizient C_{BM} wird als Farbabstand $\Delta_{u'v'}$ zwischen den Tristimulus-Werten des Referenzbeobachters $X_{ref}, Y_{ref}, Z_{ref}$ und denen des Abweichungsbeobachters $X_{devN}, Y_{devN}, Z_{devN}$

definiert.

$$X_{\text{ref}} = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \bar{x}(\lambda)s(\lambda)d\lambda \quad (3.75)$$

$$Y_{\text{ref}} = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \bar{y}(\lambda)s(\lambda)d\lambda \quad (3.76)$$

$$Z_{\text{ref}} = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \bar{z}(\lambda)s(\lambda)d\lambda \quad (3.77)$$

$$X_{\text{devN}} = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \bar{x}_{\text{devN}}(\lambda)s(\lambda)d\lambda \quad (3.78)$$

$$Y_{\text{devN}} = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \bar{y}_{\text{devN}}(\lambda)s(\lambda)d\lambda \quad (3.79)$$

$$Z_{\text{devN}} = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \bar{z}_{\text{devN}}(\lambda)s(\lambda)d\lambda \quad (3.80)$$

Unter Verwendung der Farbkoordinaten-Transformation (Gleichung (2.17), (2.18)) werden die $u'v'$ -Koordinaten berechnet. Deren euklidischer Abstand (Gleichung (2.19)) ergibt den hier definierten Beobachtermetamerie-Koeffizient C_{BM} .

$$C_{\text{BM}} = \Delta_{u'v'}((X_{\text{ref}}, Y_{\text{ref}}, Z_{\text{ref}}), (X_{\text{devN}}, Y_{\text{devN}}, Z_{\text{devN}})) \quad (3.81)$$

Der hiermit berechenbare Wert eines einzelnen Strahlungsspektrums wird als Kenngröße der Variabilität der interpersonellen visuellen Stimulierung betrachtet. Die Korrelation zweier Koeffizienten eines Metameriepaars mit deren Beobachtermetamerie-Effekt sowie die interpersonelle Variabilität in der Stimulierung durch Tageslicht wird im Folgenden gezeigt.

3.4.2. Korrelationsanalyse des Beobachtermetamerie-Koeffizienten

Als Referenz des Beobachtermetamerie-Effekts dienen die von dem Referenzbeobachter (erster kategorischer Beobachter) wahrgenommenen durchschnittlichen $\Delta_{u'v'}$ Farbabstände bei Betrachtung der Metameriepaare von 1000 individuellen Beobachtern. Diese Metameriepaare werden für jedes der 1568 Tageslichtspektren (vgl. Abschnitt 3.1.1) generiert und der Beobachtermetamerie-Koeffizient jedes einzelnen Spektrums wird berechnet.

Hierbei zeigt sich eine erkennbare Korrelation von der Differenz der Koeffizienten eines Paares und dem Beobachtermetamerie-Effekt (vgl. Abb. 3.22). Somit kann die Differenz der Koeffizienten, ebenso wie der Beobachtermetamerie-Index, zur Quantifizierung der Beobachtermetamerie verwendet werden. Allerdings ist hierbei die Korrelation geringer als bei dem Beobachtermetamerie-Index (vgl. Abb. 3.20), weswegen dieses Verfahren nicht weiter vertieft wird.

Stattdessen wird analysiert, welche Aussagen von einem LED-Strahlungsspektrum über die Beobach-

termetamerie bei einem Vergleich zu natürlichem Tageslicht abgeleitet werden können. Der Vergleich in Abb. 3.22 zeigt, dass das Tageslicht mit seinem relativ gleichmäßigen Spektrum (im sichtbaren Wellenlängenbereich, vgl. Abb.3.9) in den meisten Fällen einen vergleichsweise geringen Beobachtermetamerie-Koeffizienten erzielt (vgl. grüne Punkte in Abb. 3.22). Der Wert des LED-Spektrums gleicher Farbe ist jedoch deutlich größer, bis auf den Bereich von geringen Farbfehlern der Beobachtermetamerie $\Delta_{u'v'} < 5 \times 10^{-3}$ (vgl. blaue Punkte in Abb. 3.22). Es stellt sich somit die Frage, ob die Minimierung des Beobachtermetamerie-Koeffizienten des LED-Lichts gleichbedeutend mit einer Minimierung der Beobachtermetamerie ist. Dies wird im folgenden Abschnitt untersucht.

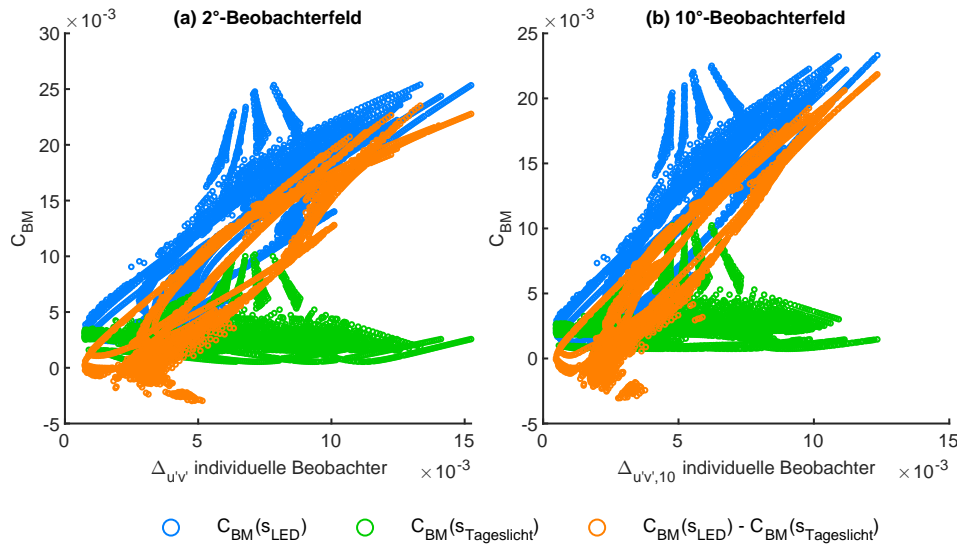


Abbildung 3.22.: Vergleich des Beobachtermetamerie-Koeffizienten C_{BM} der Spektren eines Metameriepaars (Gleichung (3.81)) und dem durchschnittlichen Farbabstand durch Beobachtermetamerie für das 2° (a) und das 10°-Sichtfeld (b) (Gleichung (3.36)). Während der Vergleich zur Beobachtermetamerie nur für die Differenz der Koeffizienten gilt, sind die Koeffizienten der einzelnen Spektren zum Vergleich gegeben.

3.4.3. Minimierung des Beobachtermetamerie-Koeffizienten

Um zu analysieren, ob die Minimierung des Beobachtermetamerie-Koeffizienten des LED-Lichts einen geringeren individuellen Farbfehler bewirkt (wenn es mit natürlichem Tageslicht verglichen wird) müssen Metameriepaare derselben Tageslichtreferenz und desselben Beobachters verglichen werden. Hierfür stehen je nach Farbort maximale acht 3-Kanal-LED-Spektren (vgl. Abschnitt 3.1.3) mit unterschiedlichem Koeffizient zur Verfügung. Wird aus deren durchschnittlichen individuellen Farbfehlern (bezogen auf je eines der 1568 Tageslichtspektren) und deren Beobachtermetamerie-Koeffizienten eine Kurve gebildet, ergibt sich der in Abb. 3.23 dargestellte Verlauf. Zur Bildung dieser Kurven sind die Datenpunkte der einzelnen LED-Metameriepaare entsprechend der aufsteigenden Reihenfolge ihrer C_{BM} -Werte verbunden.

Im Idealfall sind keine Wendepunkte in der Kurve enthalten, womit es für eine Optimierung der Beobachtermetamerie ausreichend ist den Beobachtermetamerie-Koeffizient des LED-Lichts auf den kleinstmöglichen Wert zu bringen. Dies ist bei den hier verwendeten acht 3-Kanal LED-Systemen für ähnliche Farbtemperaturen ab 7000 K möglich (vgl. Abb. 3.23 (f) - (j)).

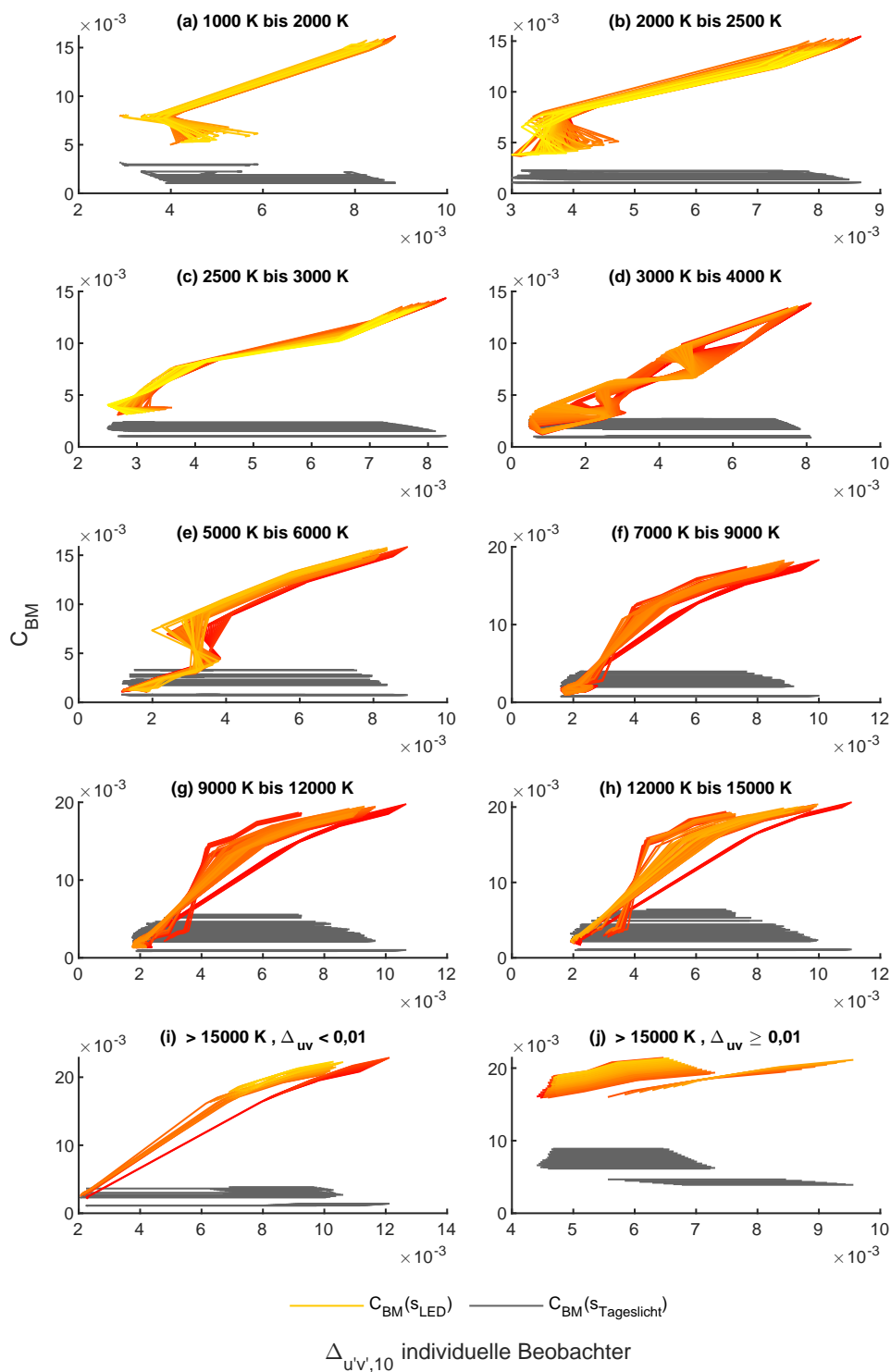


Abbildung 3.23.: Verlauf des Beobachtermetamerie-Koeffizienten C_{BM} (Gleichung (3.81)) bei Wechsel des 3-Kanal-LED-Systems, verglichen mit der Beobachtermetamerie, gemessen anhand des durchschnittlichen Farbabstands $\Delta_{u'v',10}$ individueller Beobachter (Gleichung (3.38)) für verschiedene Intervalle ähnlichster Farbtemperatur (a) - (j). Der Koeffizient der jeweiligen Tageslichtreferenzen ist in grau dargestellt.

Bei geringeren ähnlichsten Farbtemperaturen sind Wendepunkte in der Kurve vorhanden (vgl. Abb. 3.23 (a) - (e)), wodurch bei diesen Farbörtern eine Verringerung des Koeffizienten C_{BM} nicht immer

mit einer Minimierung der Beobachtermetamerie einhergeht. Wird dennoch der Beobachtermetamerie-Koeffizient als Kenngröße der Beobachtermetamerie in einem Optimierungssystem verwendet, entsteht in solchen Fällen ein Optimierungsfehler Δ_{BM} , welcher hier mit der Differenz zweier Beobachtermetamerie-Größen $\Delta_{u'v'}$ definiert wird.

$$\Delta_{BM}(C_{BM}) = \Delta_{u'v',max}(C_{BM}) - \Delta_{u'v',min}(C_{BM}) \quad (3.82)$$

Als Beispiel hierfür ist in Abb. 3.23 (e) erkennbar, dass ein Wert von $C_{BM} \approx 7 \times 10^{-3}$ einen mit $\Delta_{u'v',10} \approx 2 \times 10^{-3}$ kleineren Beobachtermetamerie-Effekt erzielt als eine Minimierung des Koeffizienten zu $C_{BM} \approx 5 \times 10^{-3}$, wodurch ein Optimierungsfehler von $\Delta_{BM}(C_{BM} \approx 7 \times 10^{-3}) \approx 2 \times 10^{-3}$ entsteht.

Um diesen Optimierungsfehler genauer quantifizieren zu können und allgemeinere Aussagen über dessen Auftreten bei der Simulation von Tageslicht machen zu können, werden LED-Metameriespektren benötigt, welche trotz unterschiedlichem Strahlungsspektrum denselben Beobachtermetamerie-Koeffizient besitzen. Solche Spektren werden in einer weiteren Simulation generiert, indem mittels Kombination von jeweils zwei der (maximal) acht LED-Metameriespektren derselben Tageslichtreferenz neue Metameriespektren simuliert werden. Da hierbei zwei LED-Metameriespektren unterschiedlicher 3-Kanal-Systemen kombiniert werden, handelt es sich bei den so gemischten LED-Spektren um 4 bis 6-Kanal-Spektren.

Dieser Vorgang ist exemplarisch in Abb. 3.24 gezeigt. Die acht LED-Metameriespektren mit unterschiedlichen Beobachtermetamerie-Koeffizienten erzeugen unterschiedliche Metamerie-Fehler (vgl. Abb. 3.24 (a)). Zur Generierung zusätzlicher LED-Metameriespektren werden pro zweier LED-Spektren drei zusätzliche Metameriespektren durch deren Kombination in den Verhältnissen $^{25/75,50/50}$ und $^{75/25}$ erzeugt (vgl. grüne Kreuze in Abb. 3.24 (b)). Nachdem auf diese Weise alle möglichen Kombinationen zweier LED-Metameriespektren gebildet wurden, werden die Grenzlinien um alle LED-Spektren berechnet (vgl. blaue Linien in Abb. 3.24 (c)). Anhand der so konstruierten Flächen kann nun für einen gegebenen Beobachtermetamerie-Koeffizienten ein zugehöriges Intervall auf der x-Achse bestimmt werden (vgl. rote Linien in Abb. 3.24 (d)). Dieses Intervall wird als potentieller Optimierungsfehler $\Delta_{BM}(C_{BM})$ definiert, da eine Optimierung bzw. Minimierung des Beobachtermetamerie-Koeffizienten einen um diesen Betrag höheren Metamerieeffekt bewirken kann, verglichen mit dem kleinsten Beobachtermetamerie-Effekt des verwendeten Koeffizienten-Werts. Dieser Optimierungsfehler wird für elf Beobachtermetamerie-Koeffizienten-Werte berechnet, gleichmäßig zwischen dem kleinsten und dem größten Wert (vgl. graue Linien in Abb. 3.24 (d)).

Angewendet auf die LED-Metameriespektren jeweils einer Tageslichtreferenz pro Intervall ähnlichster Farbtemperatur zeigt Abb. 3.25, dass der Optimierungsfehler je nach ähnlichster Farbtemperatur in unterschiedlichen Bereichen des Beobachtermetamerie-Koeffizienten maximal ist. Zur weiteren Analyse werden die Mittelwerte der Optimierungsfehler sowie deren Standardabweichung bei allen Tageslichtreferenzspektren und den zugehörigen 3 bis 6-Kanal LED-Metameriespektren ermittelt.

Anhand des Verlaufs in Abb. 3.26 zeigt sich, dass der Optimierungsfehler im groben Trend mit steigender ähnlichster Farbtemperatur sinkt. Dies bedeutet, dass im Bereich von 4000 K bei einem 10° -Sichtfeld mit einem durchschnittlichen Optimierungsfehler von bis zu $\Delta_{BM} \approx 1,5 \times 10^{-3}$ eine Optimierung unter zusätzlicher Verwendung des Referenz-Tageslichtspektrums den Farbfehler um $\Delta_{u'v',10} \approx 1,5 \times 10^{-3}$ noch weiter verringern könnte.

Hierbei ist jedoch auch noch die vergleichsweise hohe Standardabweichung zu beachten, welche ebenfalls mit steigender ähnlichster Farbtemperatur fällt. Somit kann vor allem im Bereich der hohen ähn-

lichsten Farbtemperaturen der Beobachtermetamerie-Koeffizient des LED-Spektrums als alleinige Optimierungsgröße zur Minimierung der Beobachtermetamerie verwendet werden. Dabei ist bei der Verwendung eines 10° -Sichtfeldes der Optimierungsfehler geringer als bei dem 2° -Sichtfeld.

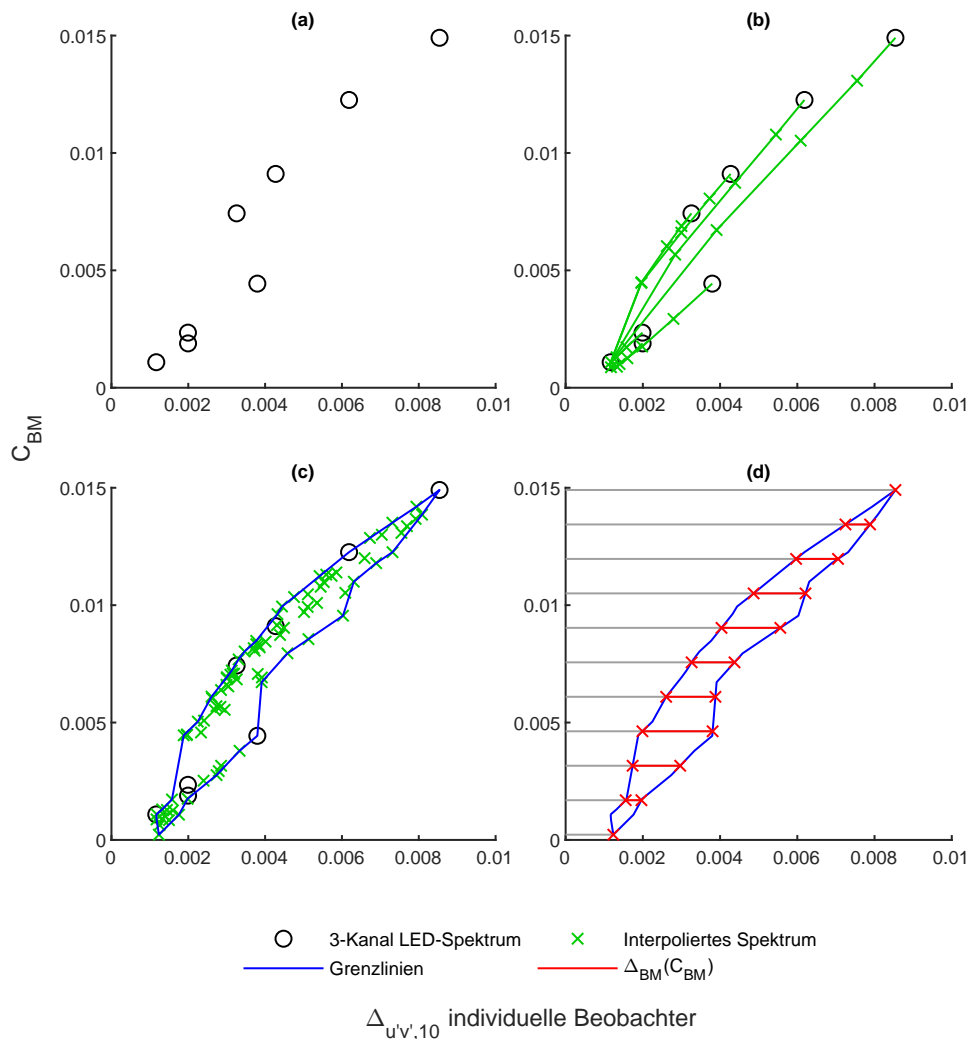


Abbildung 3.24.: Beispielhafte Bestimmung des potentiellen Optimierungsfehlers $\Delta_{BM}(C_{BM})$ (Differenz des Beobachtermetamerie-Effekts) durch Interpolation zwischen verschiedenen 3-Kanal LED-Metameriespektren. (a): Beobachtermetamerie-Koeffizienten C_{BM} acht verschiedener 3-Kanal LED-Metameriespektren, verglichen mit dem Beobachtermetamerie-Effekt anhand des durchschnittlichen Farbabstandes $\Delta_{u'v',10}$ individueller Beobachter zur Tageslichtreferenz. (b): Mischung des Spektrums mit dem geringsten Koeffizient C_{BM} mit jeweils einem der übrigen sieben Spektren in den Verhältnissen $25/75$, $50/50$ und $75/25$. (c): Berechnung der Grenzlinien, welche alle Spektren umranden, nachdem alle Kombinationen der acht 3-Kanal LED-Metameriespektren mit den drei Verhältnissen wie zuvor gemischt wurden. (d): Berechnung des Optimierungsfehlers $\Delta_{BM}(C_{BM})$ anhand der Differenz der Schnittpunkte von elf Geraden mit den Grenzlinien. Die Geraden hierfür werden gleichmäßig zwischen dem kleinsten und größten Beobachtermetamerie-Koeffizient gezogen.

3. Beobachtermetamerie bei Tageslichtreferenz

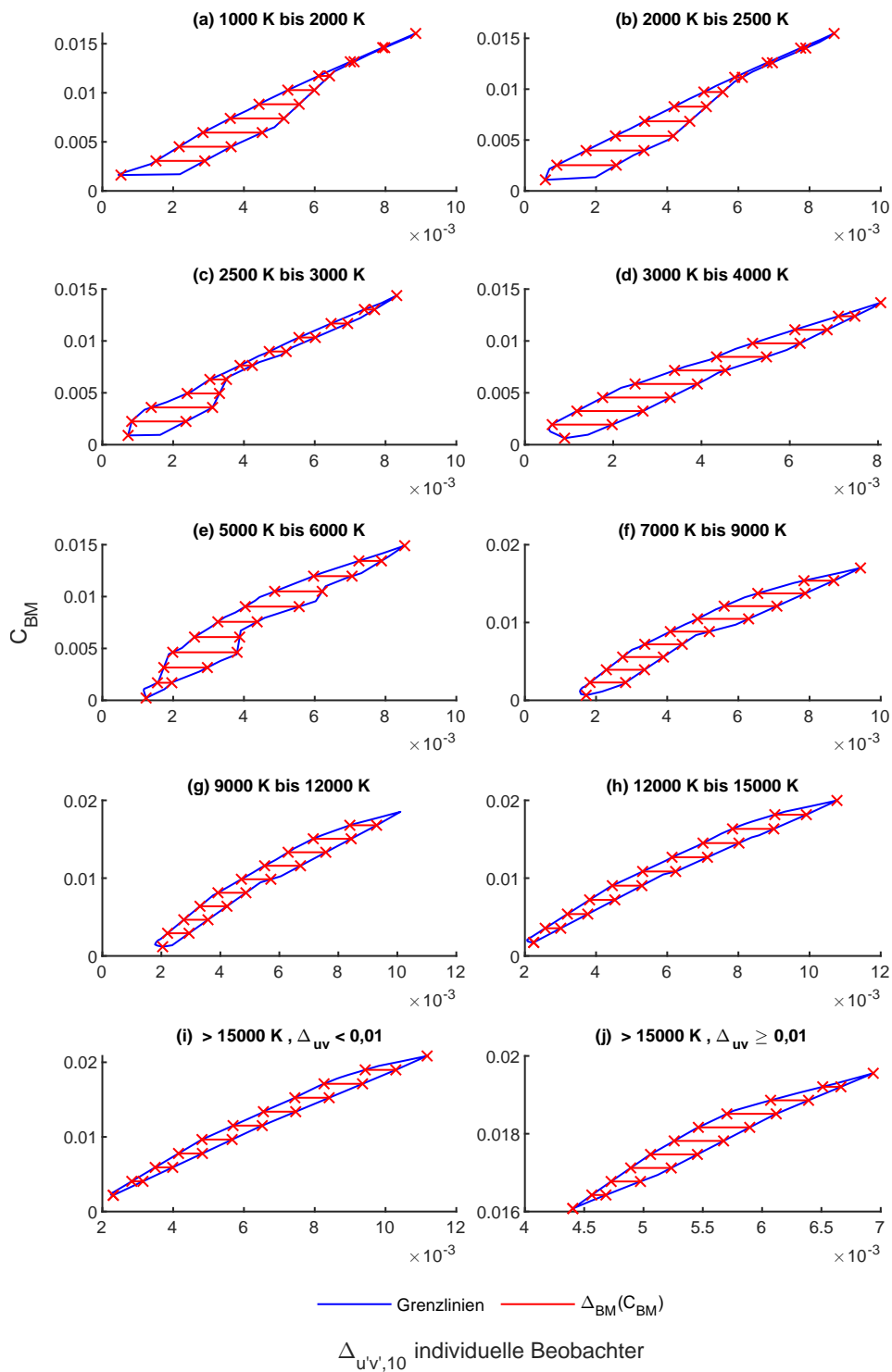


Abbildung 3.25.: Optimierungsfehler Δ_{BM} , welcher sich aus der Differenz des größten und kleinsten Beobachtermetamerie-Effekts $\Delta_{u'v',10}$ ergibt. Es werden beispielhaft die LED-Metameriespektren einer Tageslichtreferenz pro Intervall der ähnlichsten Farbtemperatur (a) - (j) gezeigt.

Diese Aussagen beziehen sich auf die Verwendung der zuvor beschriebenen LED-Grundspektren (vgl. Abschnitt 3.1.3). Aufgrund der unterschiedlichen erzielbaren Farbgamuts bei Verwendung dieser LED-Grundspektren beruht die vorgestellte Analyse auf unterschiedlichen vielen LED-Metameriespektren pro Tageslichtreferenz, je nach ähnlichster Farbtemperatur (vgl. Abb. 3.27). Mit 92 LED-Metameriespektren pro Tageslichtreferenz stehen im Bereich von 3237 K bis 17 345 K die höchste Anzahl an Untersu-

chungsdaten zur Verfügung. Im Bereich des geringsten Optimierungsfehler (ähnlichste Farbtemperatur > 17 345 K) wurden pro Referenzspektrum 22 LED-Metameriespektren verwendet.

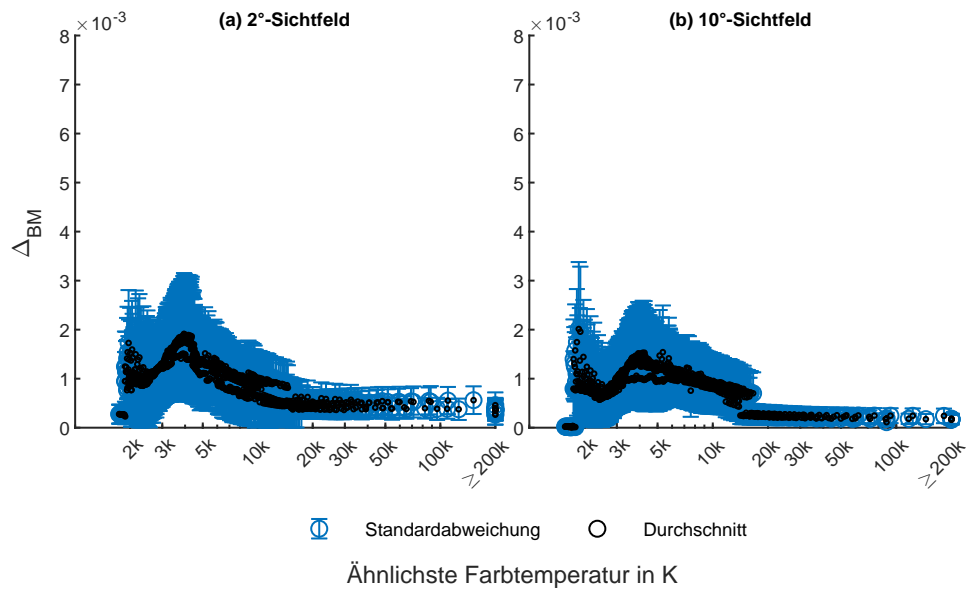


Abbildung 3.26.: Potentieller Optimierungsfehler Δ_{BM} der Beobachtermetamerie bei ausschließlicher Verwendung des Beobachtermetamerie-Koeffizienten des LED-Spektrums für das 2° (a) und das 10°-Sichtfeld (b).

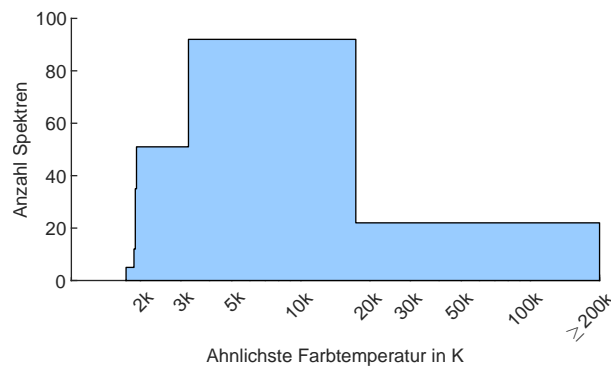


Abbildung 3.27.: Anzahl der LED-Metameriespektren zur Analyse des potentiellen Optimierungsfehlers in Abhängigkeit ihrer ähnlichsten Farbtemperatur. Die Spektren wurden mithilfe von acht 3-Kanal LED-Systemen erzeugt, die aufgrund ihrer unterschiedlichen Gamuts unterschiedliche Intervalle von erzeugbaren ähnlichsten Farbtemperaturen besitzen. Durch Kombination von jeweils zwei LED-Metameriespektren unterschiedlicher 3-Kanal-Systeme werden bis zu 92 LED-Metameriespektren pro Tageslichtreferenz ermöglicht.

3.4.4. Zusammenfassung (II)

Es wurde gezeigt, dass der hier definierte Beobachtermetamerie-Koeffizient, angewendet auf die beiden Spektren eines Metameriepaares, mit der Größe des durch Beobachtermetamerie hervorgerufenen Farbfehlers korreliert. Diese Korrelation ist jedoch weniger stark als bei dem in Abschnitt 3.3 vorgestellten Beobachtermetamerie-Index. Somit wird die Verwendung dieses Koeffizienten nicht zur Berechnung der Beobachtermetamerie empfohlen, wenn das Referenzspektrum bekannt ist.

Ist das Referenzspektrum jedoch unbekannt, ermöglicht die spektrale Optimierung anhand des Beobachtermetamerie-Koeffizienten die Minimierung von individuell wahrgenommenen Farbfehlern. Der hierbei in Kauf zu nehmende Optimierungsfehler wurde für die hier verwendeten acht LED-Grundspektren in Abhängigkeit der Tageslichtfarbe gezeigt. Dabei ist im Bereich mittlerer ähnlichster Farbtemperaturen mit durchschnittlichen Optimierungsfehlern im Bereich von $1 \times 10^{-3} < \Delta_{u'v',10} < 1,5 \times 10^{-3}$ zu rechnen. Bei hohen ähnlichsten Farbtemperaturen ($>20\,000$ K) sind diese Fehler geringer, jedoch ist dabei auch die Beobachtermetamerie mit den hier verwendeten LED-Grundspektren vergleichsweise hoch. Weitere Untersuchungen können hierauf aufbauend untersuchen, ob dieser geringe Optimierungsfehler der hohen ähnlichsten Farbtemperaturen auch dann noch gegeben ist, wenn LED-Grundspektren verwendet werden, welche eine geringere Beobachtermetamerie erzeugen.

Mit diesem Beobachtermetamerie-Koeffizienten wird es ermöglicht, dass adaptive LED-Leuchten die Beobachtermetamerie optimieren können, ohne dabei die Spektralverteilung des Tageslichtspektrums zu kennen. Somit werden der Bauteilufwand und die Komplexität eines adaptiven Systems deutlich reduziert.

Des Weiteren ermöglicht der Beobachtermetamerie-Koeffizient einem Strahlungsspektrum eine Maßzahl bezüglich der individuellen Farbstimulus-Variabilität zuzuordnen. Eine solche Information kann in Untersuchungen miteinbezogen werden, bei denen es nicht um direkte Vergleiche geht, sondern bei denen einzelne Lichteinstellungen bewertet werden, um beispielsweise die Nutzerpräferenz oder die räumliche Hellempfindung zu analysieren [115], [118], [132], [133].

3.5. Beobachtermetamerie von Tageslichtspektren

Wie schon bei der Analyse des Beobachtermetamerie-Index erkenntlich (vgl. Abb. 3.20), haben die untersuchten Metameriepaare vor allem bei hohen ähnlichsten Farbtemperaturen einen größeren Farbfehler durch Beobachtermetamerie als bei geringeren ähnlichsten Farbtemperaturen. Um die Abhängigkeit der resultierenden Farbfehler von der Tageslichtfarbe genauer analysieren zu können, zeigt Abb. 3.28 den durchschnittlichen Farbabstand $\Delta_{u'v'}$ der individuellen Metameriespektren, aufgetragen über die logarithmisch skalierte ähnlichste Farbtemperatur.

Der Abstand der Farbörter zum Planckschen Kurvenzug Δ_{uv} ist durch Farbcodierung dargestellt und der kleinste durchschnittliche Farbfehler von $\Delta_{u'v',10} = 0,476 \times 10^{-3}$ wird bei einer ähnlichsten Farbtemperatur von 3549 K erreicht. Die zu diesem Minimum gehörigen Spektren sind in Abb.3.29 (a) gezeigt. Es ist erkennbar, dass hier das LED-Spektrum einen ähnlichen Verlauf zur Tageslichtreferenz hat. Wird dieselbe Tageslichtfarbe mit maximaler Beobachtermetamerie erzeugt (vgl. Abb.3.29 (c)), tritt bei dem LED-Spektrum ein deutliches Ungleichgewicht der spektralen Maxima auf.

Im Bereich von hohen ähnlichsten Farbtemperaturen ($> 20\,000\text{ K}$) lassen sich mit den hier verwendeten LED-Grundspektren die Verläufe der Referenzspektren nicht nachbilden (vgl. Abb.3.29 (b) und (d)).

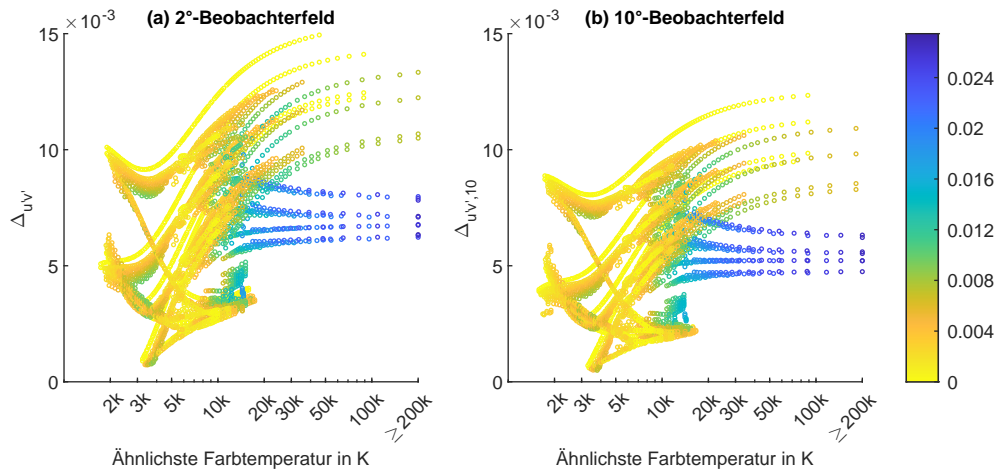


Abbildung 3.28.: Verlauf des durchschnittlichen Beobachtermetamerie-Farbfehlers $\Delta_{u'v'}$ der individuellen Metameriespektren (Gleichung (3.36)) in Abhängigkeit der ähnlichsten Farbtemperatur für das 2° (a) und das 10° -Sichtfeld (b). Der Farbabstand Δ_{uv} der Tageslichtspektren zum Planckschen Kurvenzug ist farbcodiert dargestellt.

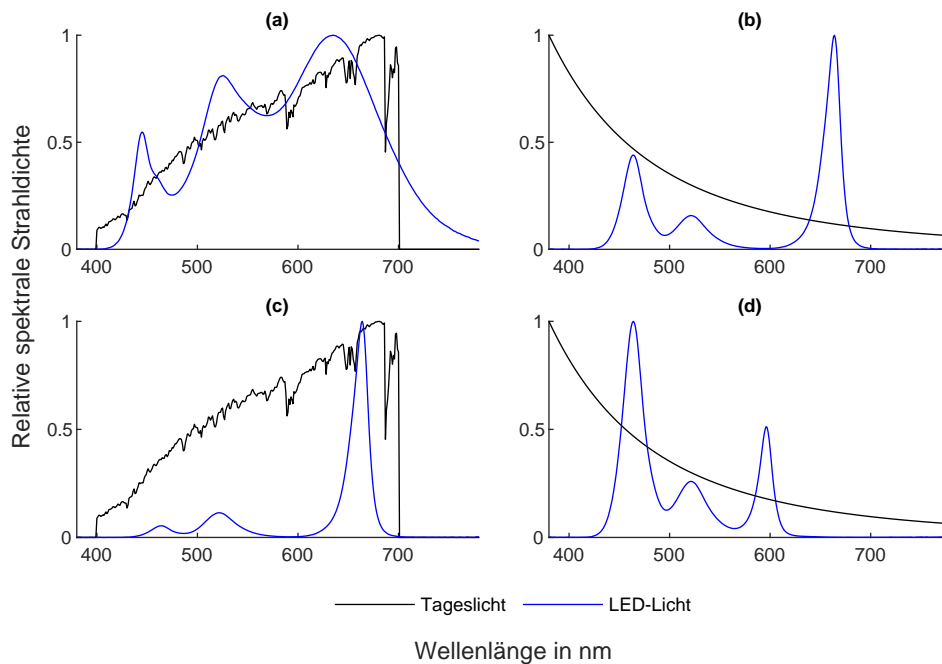


Abbildung 3.29.: Vergleich verschiedener Metameriepaare des Referenzbeobachters. (a): Metameriepaar mit der geringsten Beobachtermetamerie von $\Delta_{u'v',10} = 0,476 \times 10^{-3}$ der Simulation (3549 K). (b): Metameriepaar mit der größten Beobachtermetamerie $\Delta_{u'v',10} = 12,34 \times 10^{-3}$ der Simulation (88 542 K). (c): Metameriepaar mit maximaler Beobachtermetamerie $\Delta_{u'v',10} = 7,346 \times 10^{-3}$, bei Verwendung desselben Tageslichtspektrums als Referenz wie (a). (d): Metameriepaar mit minimaler Beobachtermetamerie $\Delta_{u'v',10} = 9,848 \times 10^{-3}$, bei Verwendung desselben Tageslichtspektrums als Referenz wie (b).

Bei einer ähnlichsten Farbtemperatur von 88 542 K tritt der maximale durchschnittliche Farbfehler von $\Delta_{u'v',10} = 12,34 \times 10^{-3}$ der Simulation auf. Der Vergleich zwischen Abb.3.29 (b) und (d) lässt darauf

schließen, dass für eine Optimierung der blauen Himmelsfarben des Tageslichts LED-Grundspektren verwendet werden müssen, welche den kurzwelligen Spektralbereich besser füllen können. Der geringste erzielbare durchschnittliche Farbfehler dieser Tageslichtfarbe ist mit $\Delta_{u'v',10} = 9,848 \times 10^{-3}$ im Bereich von deutlich wahrnehmbaren Farbabständen [96].

Bei einem Vergleich der Farbfehler zwischen 2° und 10°-Sichtfeld (vgl. Abb. 3.28 (a) und (b)) ist erkennbar, dass der Farbfehler bei Metameriespektren für das 10°-Sichtfeld geringer als bei denen für das 2°-Sichtfeld ausfällt.

Anhand des zuvor vorgestellten Beobachtermetamerie-Koeffizienten lässt sich die individuelle Variabilität des Farbstimulus jedes verwendeten Spektrums vergleichen. Hierfür ist in Abb. 3.30 der Beobachtermetamerie-Koeffizient in Abhängigkeit der ähnlichsten Farbtemperatur und des Abstands zum Planckschen Kurvenzug dargestellt. Natürliche Tageslichtspektren unterhalb 10 000 K erzielen einen vergleichbar niedrigen Beobachtermetamerie-Koeffizienten und besitzen somit eine geringere Variabilität in der individuellen farblichen Stimulierung. Die mittels LED nachgebildeten Tageslichtfarben weisen in diesem Bereich eine höhere Bandbreite an Koeffizienten auf.

Im Bereich hoher ähnlichster Farbtemperaturen ($> 10\,000\text{ K}$) und steigendem Abstand $\Delta_{u'v'}$ zum Planckschen Kurvenzug steigt der Beobachtermetamerie-Koeffizient der Tageslichtspektren deutlich an (vgl. blaue Punkte in Abb.3.30). Diese bläulichen Tageslichtspektren rufen somit eine deutliche Variabilität in dem individuellen Farbstimulus hervor, da die Abweichungsfunktionen im kurzwelligen Wellenlängenbereich ihre höchste Sensitivität haben (vgl. Abb.3.18).

Tageslichtspektren mit gleicher ähnlichster Farbtemperatur und geringem Abstand zum Planckschen Kurvenzug (vgl. gelbe Punkte in Abb.3.30) erzielen zwar einen geringen Beobachtermetamerie-Koeffizienten, jedoch einen höheren Beobachtermetamerie-Effekt bei den hier verwendeten LED-Spektren (vgl. Abb. 3.28). Dies ist verständlich, da die Differenz der beiden Koeffizienten eines Metameriepaars mit dem Beobachtermetamerie-Effekt korreliert und hier die Differenz zu den Koeffizienten der LED-Spektren am größten ist. Hierauf aufbauend kann in weiteren Simulationen untersucht werden, ob und bei welchen LED-Grundspektren eine geringe Beobachtermetamerie dieser Himmelsfarben möglich ist.

3.6. LED-System mit geringster Beobachtermetamerie

Da die Beobachtermetamerie von der spektralen Form der Strahlungsspektren abhängt, wird bei der Nachahmung von Tageslicht der Effekt maßgeblich von der Auswahl der LED-Grundspektren beeinflusst. Die acht in dieser Simulation verwendeten 3-Kanal-Systeme (vgl. Abschnitt 3.1.3) werden hier auf den durchschnittlichen Farbfehler durch Beobachtermetamerie untersucht. Es zeigt sich, dass der geringste Farbfehler durchschnittlich bei der Verwendung der Leuchtstoff-konvertierten LEDs (warmweiß und kalt-weiß) entsteht (siehe Abb. 3.31). Der maximale Farbfehler tritt hingegen im Durchschnitt bei der Verwendung der schmalbandigen R-G-B LEDs auf.

Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass das WW-G-WW LED-System zwar im Durchschnitt den geringsten Metameriefehler erzeugt, hierbei jedoch aufgrund des vergleichsweise kleinen Gamuts (vgl. Abb. 3.12 (b)) nur ähnlichste Farbtemperaturen von ca. 3200 K bis 17 000 K erzeugt werden können. Überhalb dieser Grenze können nur die LED-Systeme 1 bis 4 verwendet werden (vgl. Tabelle 3.3).

Aufgrund der teilweise hohen Standardabweichungen können vor allem für die LED-Systeme 2 bis 5 keine pauschalen Aussagen über optimale Auswahl eines 3-Kanal-Systems gemacht werden.

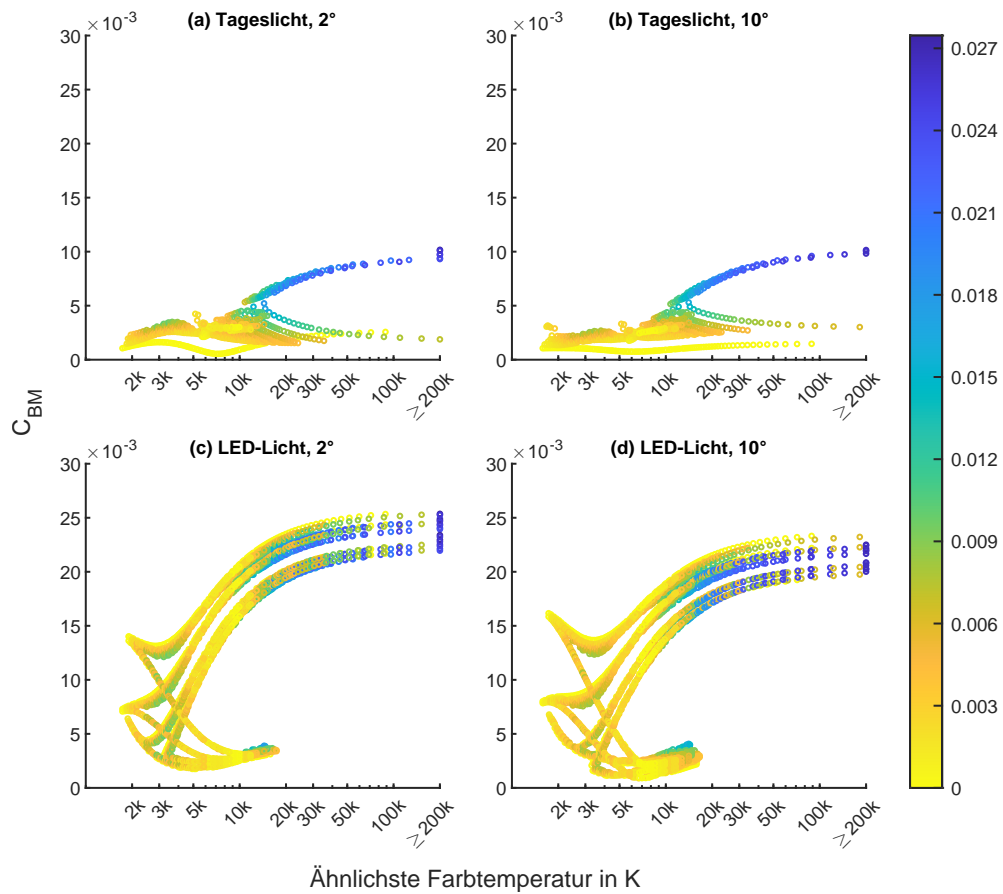


Abbildung 3.30.: Beobachtermetamerie-Koeffizienten C_{BM} des Tageslichts für das 2° (a) und das 10°-Sichtfeld (b), sowie der simulierten LED-Metamerie-Spektren für das 2° (c) und 10°-Sichtfeld (d) in Abhängigkeit der ähnlichsten Farbtemperatur (logarithmisch dargestellt). Der Farbabstand Δ_w des Tageslichts zum Planckschen Kurvenzug ist farbcodiert dargestellt.

Tabelle 3.3.: Grenzen der erzielbaren ähnlichsten Farbtemperaturen der verschiedenen LED-Systeme. Da die Farbörter von unendlich hohen ähnlichsten Farbtemperaturen konvergieren, besitzen nicht alle LED-Systeme eine obere Grenze.

Index	geringste ähnlichste Farbtemperatur		maximale ähnlichste Farbtemperatur	
	2°	10°	2°	10°
1	1899 K	1711 K	-	-
2	1731 K	1558 K	-	-
3	1874 K	1741 K	-	-
4	3237 K	3265 K	-	-
5	1899 K	1711 K	17 345 K	16 588 K
6	1731 K	1558 K	17 345 K	16 588 K
7	1922 K	1785 K	17 345 K	16 588 K
8	3237 K	3265 K	17 345 K	16 588 K

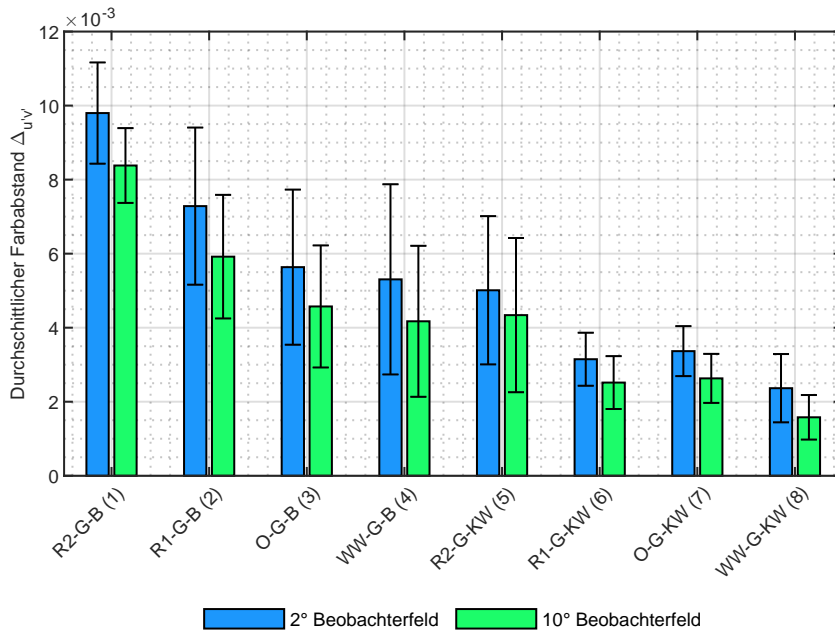


Abbildung 3.31.: Vergleich des Beobachtermetamerie-Effekts (Gleichung (3.36)) in Abhängigkeit des verwendeten 3-Kanal LED-Systems. Die durchschnittlichen Farbabstände der individuellen Metameriespektren zur Referenz werden als Kennwerte der Beobachtermetamerie verwendet und die Standardabweichung der Farbabstände wird als Fehlerbalken dargestellt.

3.7. Beobachtermetamerie und Farbwiedergabe

Eine Korrelation der Beobachtermetamerie mit der Farbwiedergabe könnte gegebenenfalls die Optimierung im Anwendungsfall vereinfachen, indem nur eine statt zwei Metriken berechnet werden müsste. Dies wird anhand des Colour Fidelity Index R_f (vgl. Abschnitt 2.3.1) und dem durchschnittlichen Farbabstand der individuellen Metameriespektren (vgl. Abschnitt 3.1.3) durchgeführt. Der in Abb. 3.32

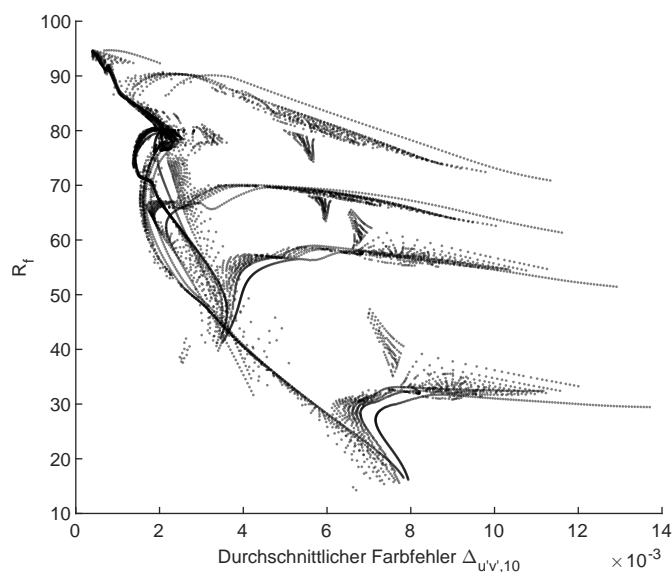


Abbildung 3.32.: Korrelation des Colour Fidelity Index R_f und des durchschnittlichen Farbfehlers $\Delta_{u'v',10}$ der Metameriespektren (Gleichung (3.36)) zehn kategorischer Beobachter aus der Perspektive des ersten kategorischen Beobachters.

dargestellte Zusammenhang der beiden Metriken zeigt, dass nur bei maximalem $R_f > 95$ auch ein minimaler Farbfehler durch Beobachtermetamerie erreicht wird. Bei niedrigeren Werten des R_f steigt die Variabilität der Beobachtermetamerie, wodurch der R_f dort keine Rückschlüsse auf die Beobachtermetamerie zulässt.

3.8. Probandentest zur Beobachtermetamerie

Während zuvor die Beobachtermetamerie bei Tageslichtreferenz auf Basis einer Simulation beschrieben wurde, werden hier der Aufbau und die Durchführung eines Probandentests gezeigt und dessen Ergebnisse mit denen aus der Simulation verglichen.

3.8.1. Aufbau

Die Basis dieses Versuchs bildet eine Zwei-Kammer-Box, bei der die farbliche Gleichheit der beiden Kammern von Probanden bewertet und herbeigeführt wird. Diese Box befindet sich in einem mobilen Versuchsraum (vgl. Abb. 3.33 (a)). Die linke Kammer wird mit einer Multi-Kanal LED-Leuchte von oben ausgeleuchtet, während in die rechte Kammer Tageslicht einfällt (vgl. Abb. 3.33 (b)). Das einfallende Tageslicht kann dabei mittels Verschiebung zweier aufeinander liegender Gitter von dem Versuchsleiter gedimmt werden, damit die Leuchtdichte auf den Wänden der Kammer nicht die der LED-Seite übersteigt. Innerhalb der Kammern wird aufgrund der weißen Innenwände das Licht gestreut und homogenisiert. Durch ein Loch in der Rückseite jeder Kammer misst jeweils ein Spektrometer (Konica Minolta CS2000) die spektrale Strahldichte auf dem Boden der Kammer (vgl. Abb. 3.33 (c)).

Der mobile Testraum wird unter freiem Himmel platziert und durch eine Schiebetür betreten (vgl. Abb. 3.33 (d)). Um Störlicht zu minimieren, ist der Innenraum mit schwarzen Wänden ausgestattet. Die Testperson sitzt mittig vor der Zwei-Kammer-Box und navigiert mittels zweier Taster eines Controllers durch den Versuch, wobei ein Lautsprecher akustisches Feedback gibt.

3.8.2. LED-Leuchte

Für diesen Versuch wird eine eigens entwickelte 7-Kanal-LED-Leuchte verwendet. Diese Leuchte beinhaltet eine Temperaturregelung der LED-Metallkernplatine, um das temperaturabhängige Strahlungsspektrum der LEDs konstant halten zu können. Hierfür ist hinter jeder LED-Gruppe ein Peltier-Element angebracht, welches über einen Kühlkörper und Lüfter die von den LEDs abgeleitete Wärme in die Umgebungsluft abgibt (vgl. Abb. 3.34 (a) und (b)). Über einen Temperaturwiderstand wird die Temperatur der LED-Platine gemessen, welche zur thermischen Entkopplung von dem Stahlblechgehäuse der Leuchte auf einer Silikonschicht aufliegt.

Die LEDs werden mit 100 mA Konstantstromquellen betrieben und mit Puls-Weiten-Modulation (PWM) gedimmt. Es sind sieben verschiedene LED-Typen mit unterschiedlichen Primärspektren verbaut, sodass der komplette visuelle Spektralbereich gefüllt und variiert werden kann: Blau (B, 464 nm), Grün (G, 522 nm), Orange (O, 596 nm), Rot (R1, 627 nm; R2, 664 nm), Kaltweiß (KW, 440 nm – der Farbort liegt jenseits unendlich hoher ähnlichster Farbtemperaturen), Warmweiß (WW, 2992 K) (vgl. Abb. 3.34 (c))

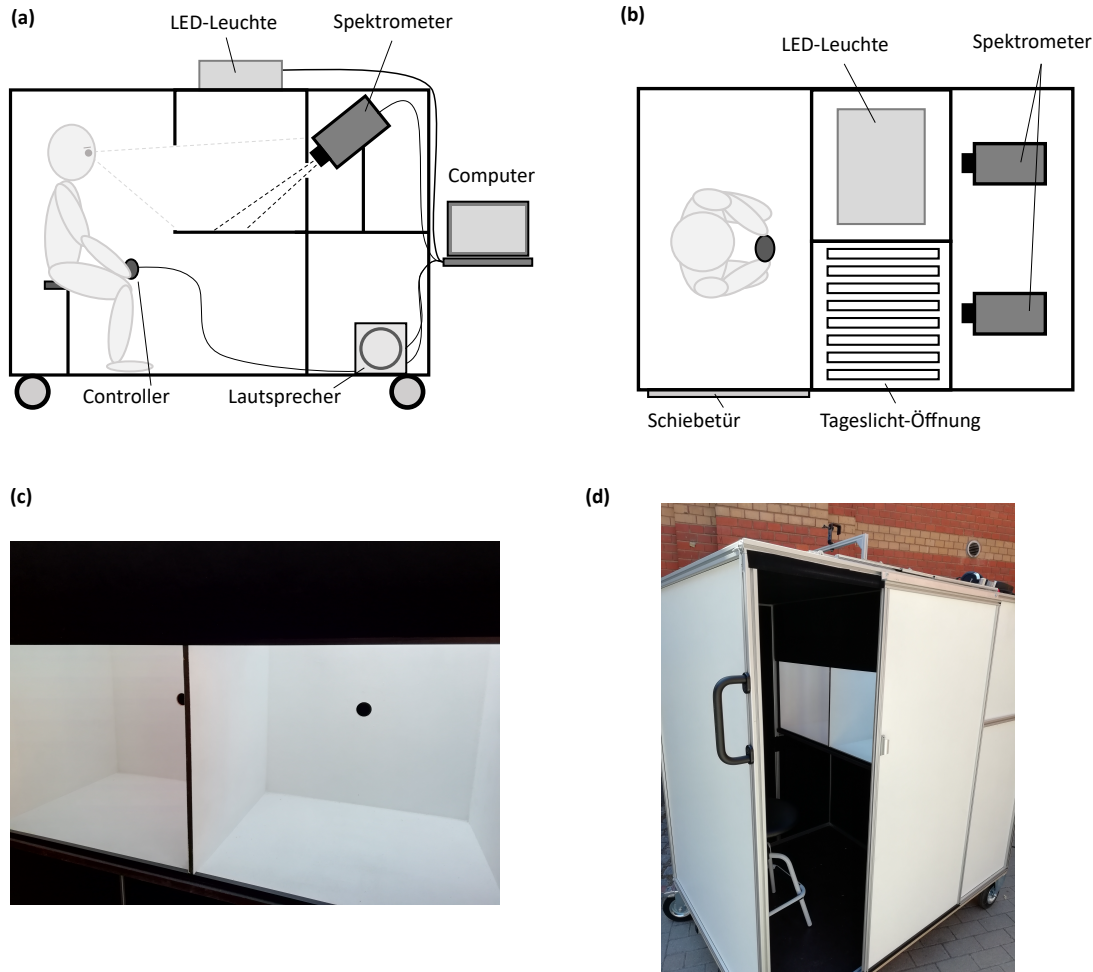


Abbildung 3.33.: Mobiler Versuchsraum zum Abgleich von LED-Licht und Tageslicht aus der Seitenansicht (a) und aus der Draufsicht (b). (c): Zwei-Kammer-Box zum visuellen Abgleich von LED-Licht (linke Kammer) auf Tageslicht (rechte Kammer), jeweils mit einem Loch in der Rückwand zur Messung der Strahlungsspektren. (d): Außenansicht des Versuchsraums bei geöffneter Schiebetür.

und Tabelle 3.2 für die spektralen Kennwerte). Während der Probandentests werden zunächst mithilfe des 3-Kanal-Systems G-KW-WW die Tageslichtfarben gemischt und nur wenn ein Zielfarbtort außerhalb des Gamuts dieses LED-Systems liegt, werden die LEDs B und R1 soweit hinzugemischt, bis das resultierende Gamut die Zielfarbtörter beinhaltet (vgl. Abb. 3.34 (d)).

3.8.3. Automatisches Versuchssystem

Aufgrund der hohen zeitlichen Dynamik von Helligkeit und Farbe des Tageslichts wird der Versuchsablauf von einer speziell hierfür entwickelten Software gesteuert. Diese hat die Aufgabe, verschiedene LED-Lichteinstellungen, in Abhängigkeit des aktuell vorherrschenden Tageslichts, dem Probanden zu präsentieren sowie die Protokollierung aller Lichtspektren und Versuchsdaten.

Der softwaregesteuerte Ablauf des Tests ist in Abb. 3.35 in einem Flussdiagramm dargestellt. Zu Beginn eines Versuchs wird das Tageslichtspektrum gemessen und dessen Farbort mithilfe der CIE 1964 10°-Beobachterfunktionen berechnet. Zur Berechnung weiterer zu vergleichenden LED-Farbtörter, wird

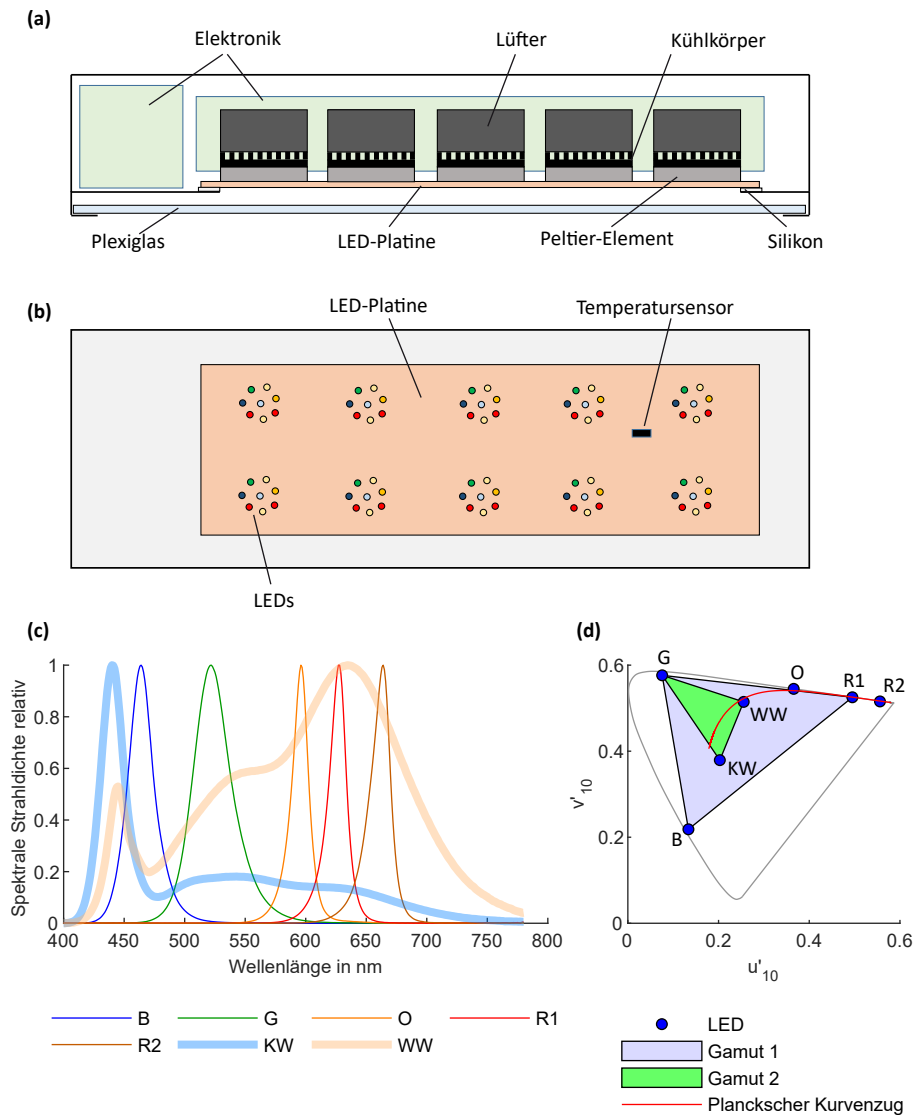


Abbildung 3.34.: (a): Seitliche Schnittansicht der LED-Leuchte. Im Gehäuse befindet sich unter anderem die Elektronik zum Steuern der sieben LED-Kanäle über Bluetooth. Die LEDs werden mittels 16-bit Pulsweitenmodulation eines Konstantstroms gedimmt. Zur Regelung der Metallkernplatinen-Temperatur befindet sich über jeder LED-Gruppe ein Peltier-Element mit Kühlkörper und Lüfter. Die Temperaturisolierung zwischen LED-Platine und dem Stahlblech-Gehäuse wird mit einer Silikonauflage realisiert. (b): Ansicht von unten auf die LED-Leuchte (ohne Plexiglas). Auf der Metallkernplatine befinden sich zehn Gruppen mit jeweils acht LEDs (sieben unterschiedlichen und zwei warmweißen LEDs) und ein Temperatursensor für die Temperaturregelung der Platine. (c): Relative Strahlungsspektren der sieben unterschiedlichen LED-Typen. (d): Farbörter der sieben LED-Typen im $u'v'$ -Diagramm des CIE 1964 10°-Beobachters. Während der Probandenversuche wird das Gamut 2 verwendet und im Falle eines außerhalb von Gamut 2 liegenden Zielfarbborts durch Zumischen des Gamuts 1 der darstellbare Farbraum vergrößert.

die ähnlichste Farbtemperatur des Tageslichts ermittelt und eine Gerade (Juddsche Gerade) zu dem Farbort mit gleicher ähnlichsten Farbtemperatur auf dem Planckschen Kurvenzug im $u'v'_{10}$ Farbdia-gramm konstruiert (vgl. Abb. 3.36 (a)). Von dieser Gerade ausgehend werden im Winkel von $\pi/4$ drei weitere Geraden konstruiert, sodass, anhand der Schnittpunkte dreier Kreise mit den Radien $\Delta_{u'v',10} = 2 \times 10^{-3}; 4 \times 10^{-3}; 6 \times 10^{-3}$ um den Tageslichtfarbort, die Farbkoordinaten der zu vergleichenden LED-Spektren definiert werden (vgl. Abb. 3.36 (b)).

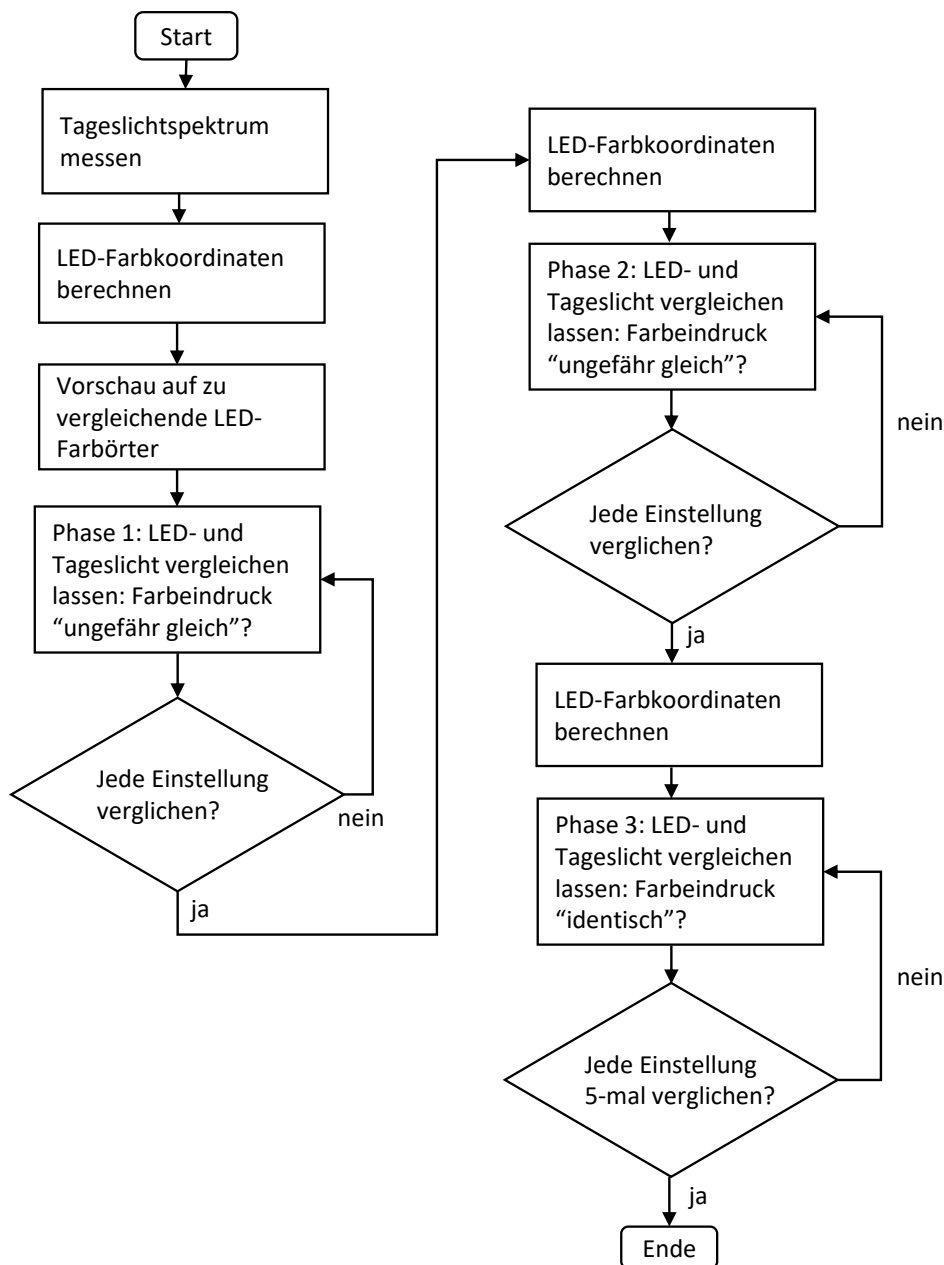


Abbildung 3.35.: Flussdiagramm der Software zur Steuerung der Probandentests zum Abgleich von LED-Licht und Tageslicht.

Bevor der Proband diese 25 LED-Farbörter einzeln mit dem Tageslicht vergleichen soll, werden die 25 hierfür gemischten LED-Spektren im Schnelldurchlauf (800 ms pro Spektrum) präsentiert, damit ein Eindruck gewonnen werden kann, wie stark sich die Lichtfarben beider Kammern ähneln oder vonein-

ander unterscheiden können. Anschließend wird dem Probanden über ein auditives Feedback signalisiert, dass die erste Phase des Vergleichs beginnt.

In der ersten Phase des Versuchs lautet die Frage, ob das Licht der beiden Kammern „ungefähr gleich“ ist. Ziel dabei ist, es im Farbdigramm einen Bereich zu finden, in dem im weiteren Verlauf des Versuchs eine exakte farbliche Übereinstimmung mit dem Tageslicht gefunden werden kann. Zur Nutzereingabe stehen zwei Taster zur Verfügung, die jeweils einer negativen („nicht ungefähr gleich“) und einer positiven Antwort („ungefähr gleich“) zugeordnet sind. Sobald eine Nutzereingabe erfolgt, wird akustisch signalisiert, dass eine Eingabe registriert wurde (hoher perkussiver Ton) und ein zweites akustisches Signal folgt, sobald das nächste zu vergleichende LED-Spektrum eingestellt wurde (tiefer perkussiver Ton). Der Grund für diese zwei unterschiedlichen akustischen Signale ist, dass nur bei positiven Antworten die Spektren des LED-Lichts und des Tageslichts gemessen werden, wodurch eine Verzögerung von wenigen Sekunden verursacht wird. Bei negativen Antworten erfolgt keine Messung, wodurch die zeitliche Versuchsdauer und somit das Risiko einer Farbverschiebung des Tageslichts minimiert wird. Damit eine Farbverschiebung des Tageslichts in jedem Fall registriert wird, wird mittels eines Timers sichergestellt, dass mindestens alle 10 Sekunden eine Spektrometermessung erfolgt. Wird eine solche Verschiebung ($\Delta_{u'v',10} > 1 \times 10^{-3}$) detektiert, werden die zu vergleichenden LED-Farbörter mit dem gleichen $u'v'$ -Vektor verschoben.

Nachdem in der ersten Phase alle LED-Spektren in zufälliger Reihenfolge verglichen wurden, wird der Mittelwert der Koordinaten mit positiver Antwort als neuer Mittelpunkt der zu vergleichenden LED-Farbörter verwendet (vgl. Abb. 3.36 (c) - (d)). Hierbei wird wie in der vorherigen Phase vorgegangen, indem die Schnittpunkte zwischen drei Kreisen mit den Radien $\Delta_{u'v',10} = 2 \times 10^{-3}; 4 \times 10^{-3}; 6 \times 10^{-3}$ und vier Geraden berechnet werden. Nachdem auch diese 25 Farbörter in zufälliger Reihenfolge auf ungefähre Gleichheit mit dem Tageslicht verglichen wurden, wird wieder der Schwerpunkt der Koordinaten mit positiver Antwort berechnet.

Für die dritte und letzte Phase wird ähnlich wie zuvor vorgegangen, um 24 zusätzliche Farbkoordinaten zu berechnen, jedoch werden nun kleiner Radien von $\Delta_{u'v',10} = 1 \times 10^{-3}; 2 \times 10^{-3}; 3 \times 10^{-3}$ verwendet. Der Proband wird angewiesen, eine positive Antwort nur dann abzugeben, wenn die Lichtfarben beider Kammern identisch aussehen. Nachdem diese 25 LED-Spektren fünf-mal in zufälliger Reihenfolge verglichen wurden, ist der Versuch beendet.

Die Software hierzu ist in C++ programmiert und verwendet den in Abschnitt 4.2.2 vorgestellten Farbmischalgorithmus zur Berechnung der PWM-Werte für die einzelnen LED-Kanäle. Die Leuchtdichte des gemischten LED-Spektrums wird dabei ebenfalls auf den Wert der gemessenen Tageslichtleuchtdichte eingestellt, kann jedoch für den Fall eines wahrgenommenen Helligkeitsunterschieds nachjustiert werden. Die Kommunikation zwischen Computer und LED-Leuchte erfolgt über Bluetooth und alle Daten werden in einer SQLite-Datenbank gespeichert. Zur Durchführung trägt der Versuchsleiter die Daten Alter, Geschlecht und Verwendung einer Sehhilfe in der grafischen Benutzeroberfläche der Software ein (vgl. Abb. 3.37) und startet den automatischen Test. Der Versuch kann über die Anzeigen der Benutzeroberfläche überwacht werden, um beispielsweise extreme Tageslichtfarbverschiebung zu detektieren und gegebenenfalls den Versuch neu zu starten.

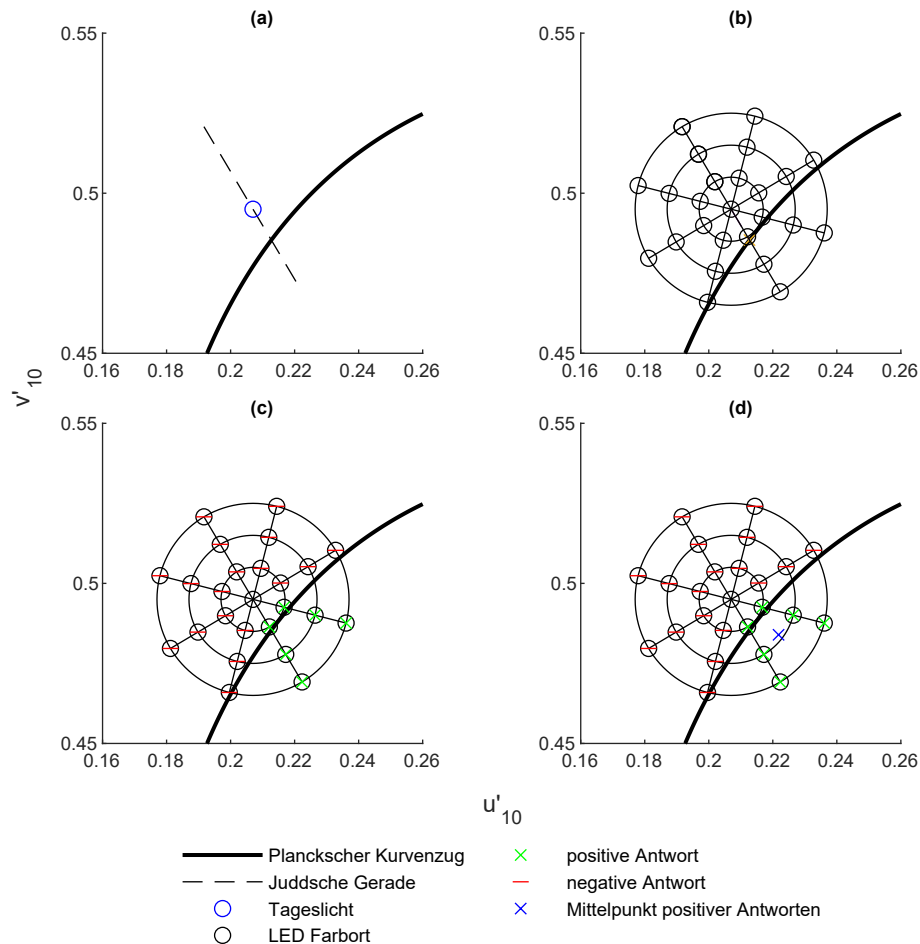


Abbildung 3.36.: Berechnung der mit dem aktuellen Tageslicht zu vergleichenden LED-Farbörter. (a): Für die erste Versuchsphase wird der Farbort des Tageslichts berechnet, sowie die Juddsche Gerade, welche den Tageslicht-Farbort schneidet. (b): Drei weitere Geraden werden konstruiert, indem die Juddsche Gerade in Winkelabständen von $\pi/4$ um den Mittelpunkt gedreht wird. In Phase 1 wird der Tageslichtfarbort als Mittelpunkt verwendet, in den weiteren Phasen wird stattdessen der Schwerpunkt der Koordinaten vorheriger positiver Antworten als Mittelpunkt verwendet. Anhand der Schnittpunkte zwischen den Geraden und drei Kreisen werden die zu vergleichenden LED-Farbörter berechnet. In den ersten beiden Phasen werden die drei Radien $\Delta_{u'v',10} = 2 \times 10^{-3}; 4 \times 10^{-3}; 6 \times 10^{-3}$ verwendet, in der letzten Phase werden diese verkleinert auf $\Delta_{u'v',10} = 1 \times 10^{-3}; 2 \times 10^{-3}; 3 \times 10^{-3}$. (c): Nachdem eine Phase durchlaufen wurde, wurden für jeden LED-Farbort drei Antworten abgegeben. (d): Anhand des Schwerpunkts der Koordinaten positiver Antworten wird ein neuer Mittelpunkt für die zu vergleichenden LED-Farbörter der nächsten Phase berechnet. Hierbei wird wieder wie in (b) beschrieben vorgegangen.

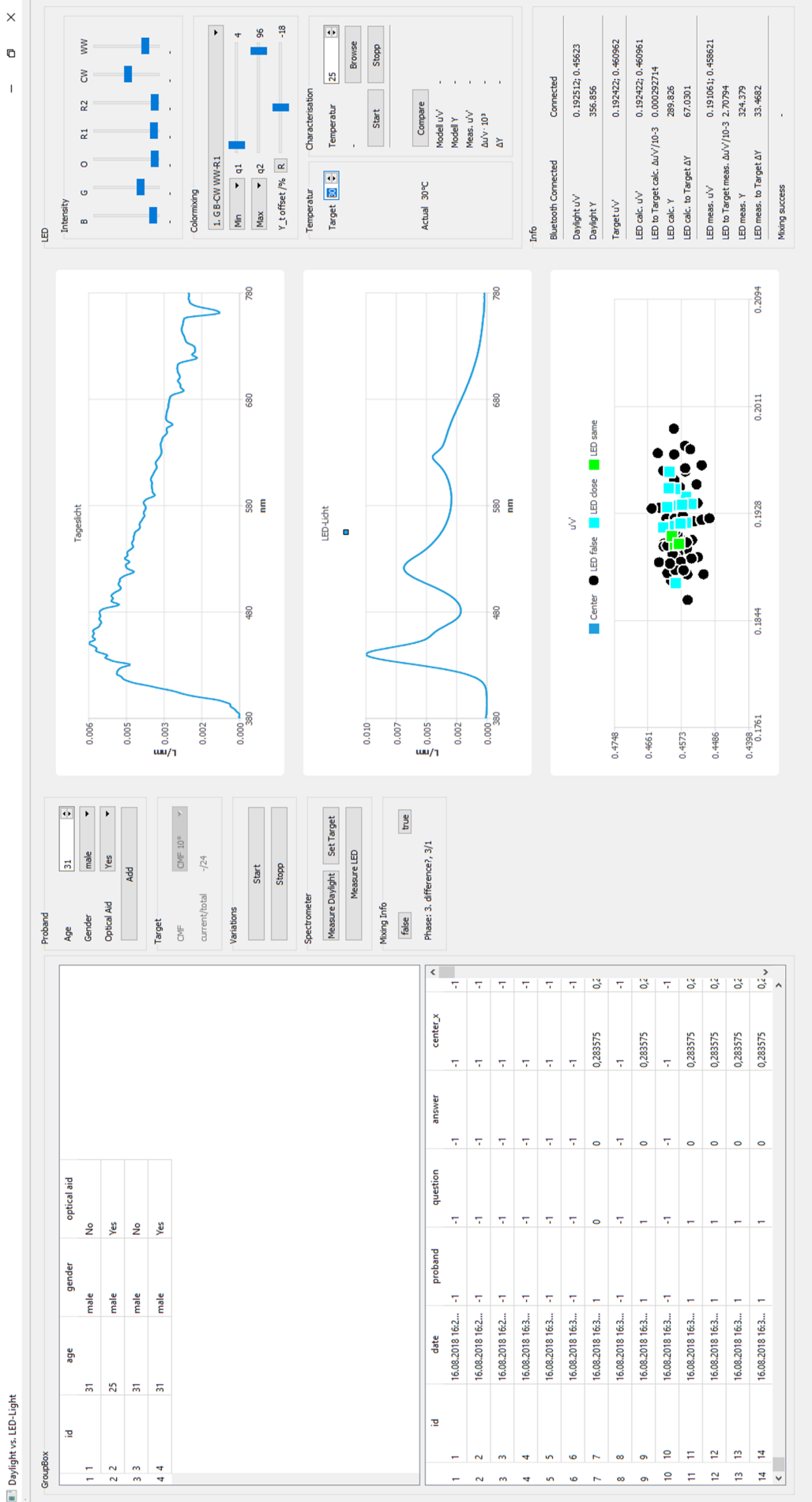


Abbildung 3.37.: Grafische Benutzeroberfläche der Software zur Steuerung der Abgleichversuche von LED-Licht und Tageslicht. Links oben: Eingabe und Ansicht der Probanden-Daten Alter, Geschlecht und Verwendung einer Sehhilfe. Links unten: Ansicht aller Versuchsdaten, wie Datum, Proband, Versuchsphase, LED-Zielfarbtort, Spektren von LED- und Tageslicht. Mitte: Ansicht des zuletzt gemessenen Tageslicht- und LED-Spektrums sowie der verglichenen CIE 1964-Farbtörter im $u'v'$ -Diagramm. Rechts: Schieberegler zum Dimmen der einzelnen LED-Kanäle, welche durch den Farbmischalgorithmus automatisch eingestellt werden, Auswahl der zu verwendenden LED-Kanäle, Schieberegler zum Einstellen eines Offsets der Helligkeit zwischen beiden Kammern sowie weitere Statusanzeigen, Steuerung der Temperaturregelung und automatische Kalibrierung der LEDs.

3.8.4. Ergebnisse der Probandentests

Die Versuche wurden von 59 Testpersonen durchgeführt, welche vor Testbeginn mithilfe eines Ishihara-Tests auf negative Farbfehlsichtigkeit getestet wurden. In 25 dieser Versuche fand ein Drift der Tageslichtfarbe von $\Delta_{u'v',10} \geq 1 \times 10^{-3}$ statt (vgl. Abb. 3.38 (a)), wodurch auch eine Verschiebung der zu vergleichenden LED-Farbörter von dem Steuerprogramm ausgelöst wurde. Die durchschnittliche Dauer eines Versuchs beträgt 11,9 min (vgl. Abb. 3.38 (b)). Hierbei traten jedoch die maximalen Tageslichtfarbänderungen nicht bei den Versuchen mit vergleichsweise langer Versuchsdauer auf, sondern fanden im Bereich durchschnittlicher Versuchsdauern statt.

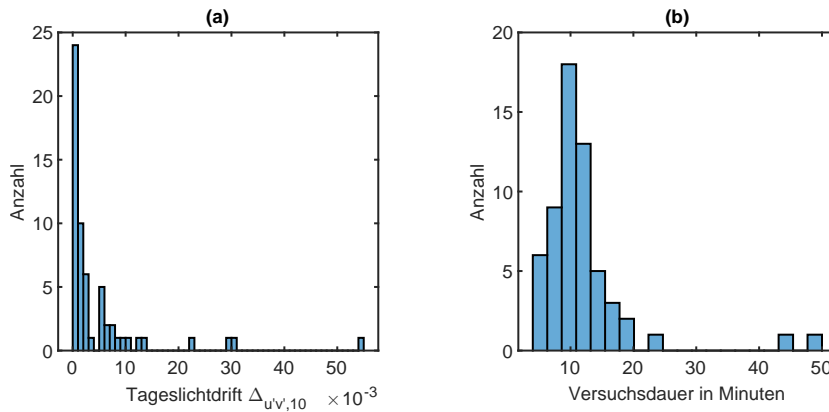


Abbildung 3.38.: (a): Histogramm der Tageslicht-Farbdrifts $\Delta_{u'v',10}$ während eines Probandentests. (b) Histogramm der Versuchsdauer.

Um anhand der Versuchsdaten die individuelle Beobachtermetamerie des jeweiligen Probanden zu berechnen, wird für jeden der mehrfach verglichenen LED-Farbörter die Wahrscheinlichkeit p für einen identischen Farbeindruck mit dem zugehörigen Tageslichtspektrum berechnet. Dies geschieht anhand des Verhältnisses positiver zu negativer Antworten der letzten Versuchsphase (positive Antwort nur bei identischem Farbeindruck beider Kammern). So wird beispielsweise bei vier positiven Abgleichen eines LED-Farborts, welcher $n = 5$ -mal verglichen wurde, eine Wahrscheinlichkeit von $p = 4/5$ dem LED-Farbort zugeordnet. Der Schwerpunkt der positiven Abgleiche $\left(u'_{10,S}, v'_{10,S}\right)^T$ wird durch Gewichtung der N verschiedenen LED-Farbörter der letzten Versuchsphase $\left(u'_{10,i}, v'_{10,i}\right)^T$ mit deren Abgleichswahrscheinlichkeit p_i und deren Abgleichsanzahl n_i berechnet:

$$\begin{pmatrix} u'_{10,S} \\ v'_{10,S} \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^N \begin{pmatrix} u'_{10,i} \\ v'_{10,i} \end{pmatrix} p_i n_i \quad (3.83)$$

Das Ergebnis dieser Berechnung zweier Versuche ist exemplarisch in Abb. 3.39 (a) und (b) dargestellt. Da keine signifikante Tageslichtfarbverschiebung stattfand, ist eine sternenförmige Verteilung der LED-Farbörter erkennbar, welche anhand der berechneten Abgleichswahrscheinlichkeit farbcodiert ist. Diese zwei Versuche waren in der Suche nach dem Abgleichsmaximum erfolgreich, was daran erkennbar ist, dass Farbörter mit hoher Abgleichswahrscheinlichkeit komplett umgeben sind von Farbörtern mit geringerer Wahrscheinlichkeit für einen positiven Abgleich. Der ermittelte Schwerpunkt ist mit einem roten Kreuz gekennzeichnet und liegt im Bereich der grauen Punktwolke, welche die Abgleichsfarb-

örter von 1000 simulierten Beobachtern zeigt.

Diese erfolgreiche Auswertung des Schwerpunkts des Abgleichsfarborts lässt sich jedoch nicht auf alle durchgeführten Versuche anwenden. Abb. 3.39 (c) und (d) zeigen den Fall, dass das Abgleichsmaximum nicht komplett von Farbörtern mit geringer positiver Abgleichswahrscheinlichkeit umgeben ist. Zusätzlich ist in diesen Fällen kein LED-Farbort gefunden worden, bei dem die Abgleichswahrscheinlichkeit $p = 1$ beträgt. Aus diesen Gründen eignen sich die zugehörigen Daten nicht dazu, eine exakte Aussage über den Schwerpunkt des Abgleichsfarborts des Probanden zu tätigen.

Des Weiteren sorgen die Tageslichtfarbdrifts während mancher Versuche für eine zu geringe Aussagekraft über die einzelnen Abgleiche, weswegen entsprechende Versuche (vgl. Abb. 3.39 (e) und (f)) in der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt werden.

Entsprechend dieser Begutachtung werden im Folgenden nur die Versuchsdaten verglichen, bei denen ein Schwerpunkt der Abgleichsfarbörter bestimmt werden kann. Dies ist bei zehn Versuchen der Fall, welche in Abb.3.40 dargestellt sind. Bei all diesen Versuchen ist erkennbar, dass der Schwerpunkt des Abgleichsfarborts eines Probanden im Bereich der Punktwolke liegt, welche die simulierten Abgleichsfarbörter von 1000 individuellen Beobachtern zeigt. Auf Basis dieser stichprobenartigen Daten kann die Gültigkeit des individuellen Beobachtermodells von Asano et al. [33] bestätigt werden. Des Weiteren ist erkenntlich, dass der durchschnittliche Farbabstand durch Beobachtermetamerie, welcher ebenfalls mit dem hier vorgestellten Metamerie-Index genähert werden kann, in allen untersuchten Fällen die Varianz der ähnlichsten Farbtemperatur beschreibt.

3.8.5. Zusammenfassung (III)

In diesem Abschnitt wurde gezeigt, wie ein Versuchssystem aufgebaut ist, welches es ermöglicht, künstliches und natürliches Tageslicht visuell zu vergleichen. Dieses System wurde auf eine kurze Versuchsdauer optimiert, damit möglichst wenig Änderung der Tageslichtfarbe während der Versuchsdurchführung auftritt. Trotz dieser Bemühungen war durchschnittlich nur jeder sechste Versuch dazu geeignet, den genauen Farbort des individuellen Abgleichs sicher zu bestimmen. Anhand dieser erfolgreichen Abgleiche kann bestätigt werden, dass das individuelle Beobachtermodell von Asano et al. [33] geeignet ist, um die Beobachtermetamerie bei künstlichem Tageslicht vorherzusagen. Während Farbabgleichsversuche in der Literatur häufig mit fest eingestelltem Beobachterfeld von 2° oder 10° arbeiten [32], [72], [73], [134], wurde hier mit den offenen Kammern das Beobachterfeld nicht fest eingestellt. Je nach Kopfposition des Probanden beträgt es zwischen 34° und 50° . Der Aufbau wurde so gewählt, damit in weiteren Untersuchungen farbige Objekte in den beiden Kammern platziert werden können. Auf diese Weise kann die Präferenz bezüglich Farbwiedergabe oder die wahrgenommene Helligkeit von LED-Licht im direkten Vergleich zu Tageslicht untersucht werden. Dies wurde in der Literatur bisher nur im parallelen Vergleich zu weiteren künstlich erzeugten Spektren durchgeführt [135], [136] oder bei Vergleichen, bei denen nacheinander eingestellte LED-Spektren verglichen werden [116], [118], [137]. Ergebnisse wie beispielsweise, dass ohne gleichzeitige Tageslichtreferenz oftmals eine höhere Farbsättigung von Objekten als normal angesehen wird [133], könnten somit im direkt Vergleich untersucht werden.

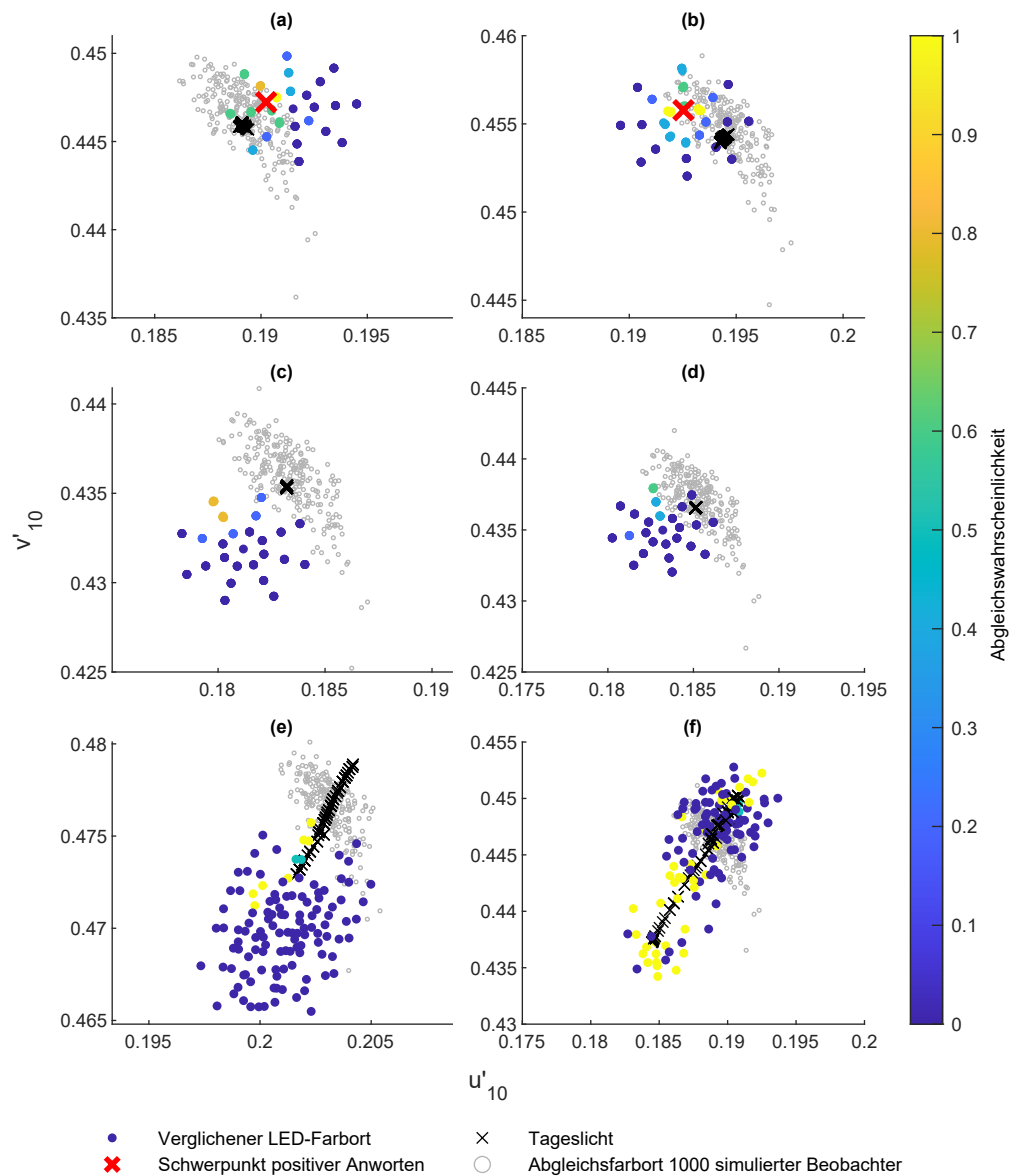


Abbildung 3.39.: Beispiele der Versuchsauswertung. (a), (b): Der Schwerpunkt der Abgleichsfarbörter (rotes Kreuz) lässt sich mit einem Abstand von $\Delta_{u'v',10} = 1,7 \times 10^{-3}$ (a) und $\Delta_{u'v',10} = 2,5 \times 10^{-3}$ (b) zum Tageslichtfarbort bestimmen. (c), (d): Während des Versuchs wurde weder ein Farbort mit einer Abgleichswahrscheinlichkeit von $p = 1$ gefunden, noch sind die Farbörter mit maximaler Abgleichswahrscheinlichkeit von Farbörtern mit geringer Abgleichswahrscheinlichkeit umgeben, weswegen sich die Daten nicht zur Berechnung eines Schwerpunkts der Abgleichsfarbörter eignen. (e), (f): Aufgrund der Tageslichtfarbdrifts von $\Delta_{u'v',10} = 6,5 \times 10^{-3}$ (e) bzw. $\Delta_{u'v',10} = 14,4 \times 10^{-3}$ (f) während der Versuchsdurchführung eignen sich die Daten nicht zur Bestimmung eines Schwerpunkts der Abgleichsfarbörter.

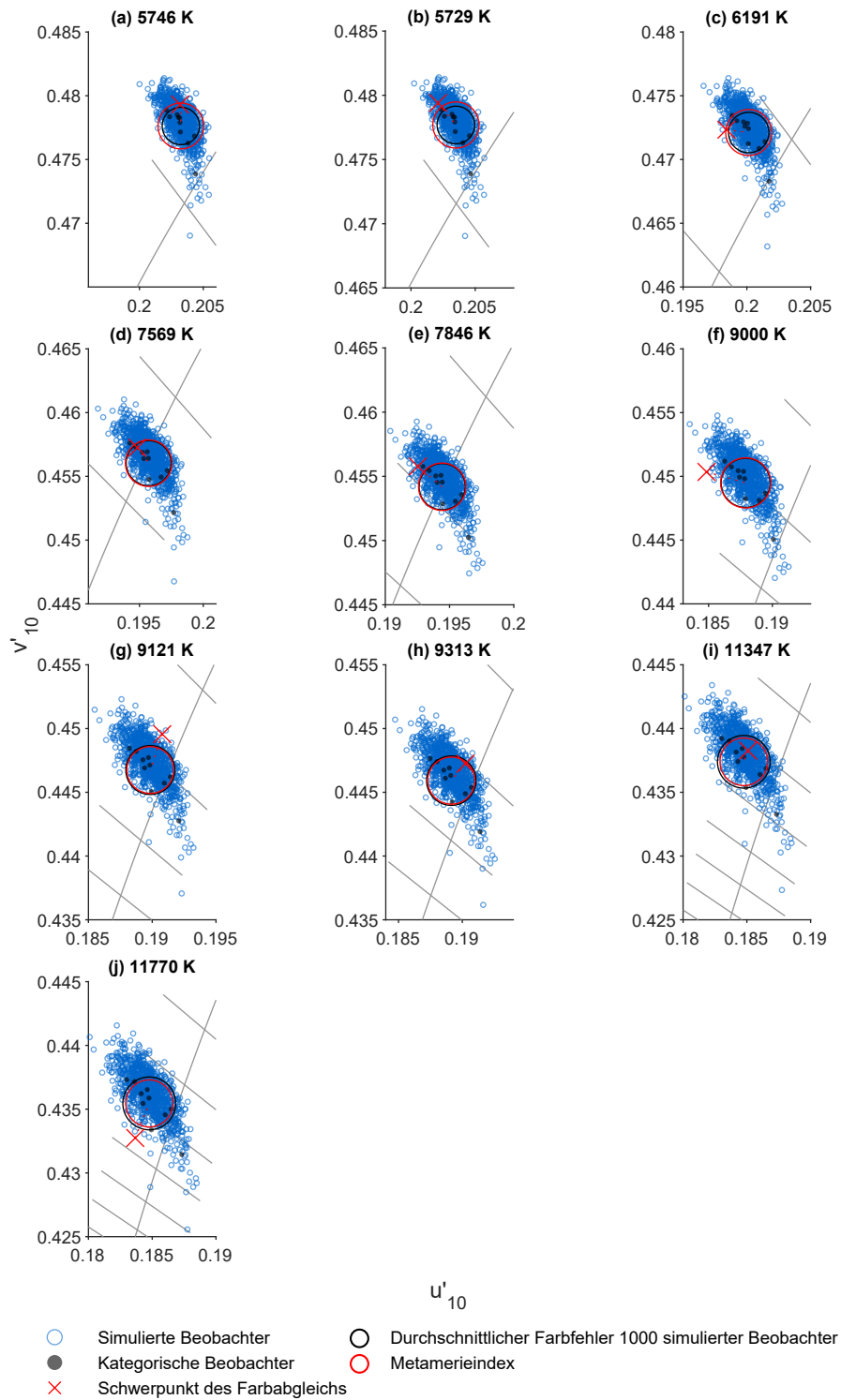


Abbildung 3.40.: Ergebnisse des Abgleichs zwischen LED-Licht und Tageslicht von zehn Probanden bei unterschiedlichen ähnlichsten Farbtemperaturen des Tageslichts. Der Schwerpunkt (rotes Kreuz) der Abgleichsfarbörter jedes Probanden ist in einer eigenen Teilabbildung (a) - (j) dargestellt, mit der ähnlichsten Farbtemperatur des Tageslichts im Titel. Die Abgleichsfarbörter von 1000 simulierten Beobachtern sind als blaue Punkte dargestellt, die der zehn kategorischen Beobachter als graue Punkte. Der Plancksche Kurvenzug zusammen mit den Juddschen Geraden im 1000 K-Intervall ist zur Orientierung als graue Linie im Hintergrund gezeigt. Der durchschnittliche Farbabstand der Metameriespektren von 1000 simulierten Beobachtern zu dem Tageslichtfarbort ist als schwarzer Kreis dargestellt. Der durchschnittliche Farbabstand, berechnet mit dem Beobachtermetamerie-Index, ist als roter Kreis dargestellt.

4. Farbmischung

Damit eine mehrkanalige LED-Leuchte Licht mit einem gewünschten Farbort erzeugen kann, müssen die Leuchtdichteverhältnisse der einzelnen LED-Kanäle berechnet werden. Bei der adaptiven Beleuchtung, welche sich an gegebene Lichtbedingungen anpasst, müssen folglich die vorgegeben Farbkordinaten möglichst exakt erzielt werden, da bei einem Direktvergleich zweier Farben schon geringe Farbünterschiede vom Menschen wahrgenommen werden [94]. Die Farbmischberechnungen lassen sich zwar mit linearen Gleichungen beschreiben, jedoch weisen die Dimmkennlinien gängiger LED-Systeme Nichtlinearitäten auf. Werden diese in der Berechnung vernachlässigt, wirkt sich das negativ auf die erzielbare Farbgenauigkeit aus. Des Weiteren sollte bei der Farbmischberechnung, implementiert auf dem Mikrocontroller einer Leuchte, keine spürbare Latenz zwischen dem Eingang der Ziel-Farbkordinaten und der Einstellung des gewünschten Farborts auftreten.

Diese Aspekte werden in Abschnitt 4.1 für ein 3-Kanal-System genauer vorgestellt, da hierbei die Farbmischberechnung eindeutig lösbar ist. Dabei werden Methoden aus der Literatur vorgestellt sowie ein eigens entwickelter Algorithmus zur Farbmischung in Echtzeit, welcher die Nichtlinearitäten realer LED-Systeme kompensiert. Die damit erzielbare Verbesserung gegenüber einer Vernachlässigung der Nichtlinearitäten wird anhand zweier LED-Systeme gezeigt, indem die erzeugten Spektren mittels Spektrometer gemessen und mit den Sollwerten verglichen werden.

Wird ein LED-System aus mehr als drei LED-Kanälen gebildet, besitzen die Gleichungen der Farbmischung keine eindeutige Lösung, sondern unendlich viele. Es besteht also die Möglichkeit einen Farbort mit einer Vielzahl an unterschiedlichen Spektralverteilungen zu realisieren. Somit kann das zu erzeugende Licht, bezogen auf konkrete Lichtqualitätsmerkmale, optimiert werden. Dies wird in Abschnitt 4.2 genauer erörtert, zusammen mit Methoden aus der Literatur. Zusätzlich wird ein neues Verfahren vorgestellt, bei dem ein 5-Kanal-System auf ein virtuelles 3-Kanal-System reduziert wird. Dadurch lässt sich in Echtzeit eine optimale Lösung der Mischberechnungen ermitteln, wofür Randbedingungen in einer vorangehenden Analyse bestimmt werden müssen. Eine solche Analyse wird beispielhaft durchgeführt, wodurch zusätzlich erkenntlich wird, welche Qualitätswerte gleichzeitig optimiert werden können und bei welchen dies nicht der Fall ist. Diese Vorgehensweise zur Optimierung eines 5-Kanal-Systems wurde ebenfalls in [138] publiziert.

4.1. Optimierung eines 3-Kanal-LED-Systems

Um die Lichtfarbe einer LED-Beleuchtung variieren zu können, sind mindestens zwei LED-Kanäle nötig. Für einen variablen Weißpunkt werden häufig warmweiße und kaltweiße LEDs kombiniert. Da hierbei aber nur entlang der resultierenden Gerade im Farbdiagramm variiert werden kann, lassen sich weder alle Farbörter des Planckschen Kurvenzugs darstellen noch die Variabilität des Tageslichts exakt nachstellen, da diese sich nicht auf eine Linie oder Kurve beschränkt (vgl. Abb. 3.8).

Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit ein 3-Kanal-System als Minimalvariante eines adaptiven Beleuchtungssystem betrachtet und anhand zweier beispielhafter Konfigurationen (R-G-B und KW-WW-G, vgl. Abb. 4.1 und die spektralen Kennwerte in Tabelle 3.2) untersucht.

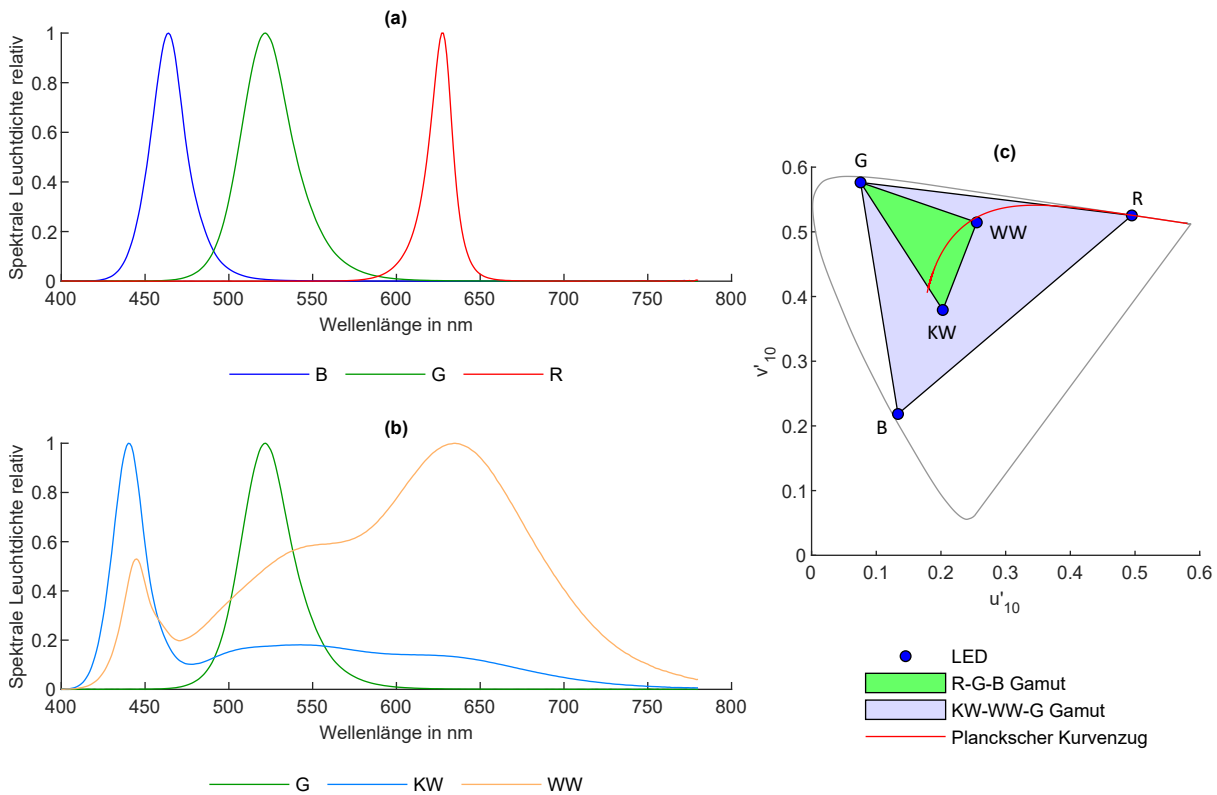


Abbildung 4.1.: Spektren der beiden 3-Kanal LED-Systeme R-G-B (a) und KW-WW-G (b). (c): Farbörter der beiden 3-Kanal-Systeme.

Deren Farbmischung wird in Abschnitt 4.1.1 für ein ideales LED-System beschrieben, welches dadurch gekennzeichnet ist, dass die Eingangsstellgröße eines LED-Dimmers p in linearem Zusammenhang zu der emittierten Leuchtdichte bzw. Tristimulus-Werten steht (vgl. Abb. 4.2). Im Gegensatz hierzu beschreibt das nicht-ideale LED-System einen realen Aufbau, bei dem das Übertragungsverhalten von LEDs und der zum Dimmen nötigen Treiber-Elektronik nicht linear verläuft. Wie trotz dieses Störverhaltens exakte Farb- und Leuchtdichteinstellungen vorgenommen werden können, wird in Abschnitt 4.1.2 beschrieben.

4.1.1. Ideales LED-System

Bevor die Nichtlinearitäten eines realen LED-Systems miteinbezogen werden, wird ein ideales LED-System betrachtet. Dies bedeutet, dass die Variable $p_n \in \mathbb{R}[0,1]$, welche den am LED-Treiber einzustellenden Dimm-Wert beschreibt, als lineare Skalierung des LED-Spektrums bei maximaler Aussteuerung $S_{n,max}(\lambda)$ jedes LED-Kanals $n = 1; 2; 3$ definiert werden kann.

$$S_n(\lambda) = p_n S_{n,max}(\lambda) \quad (4.1)$$

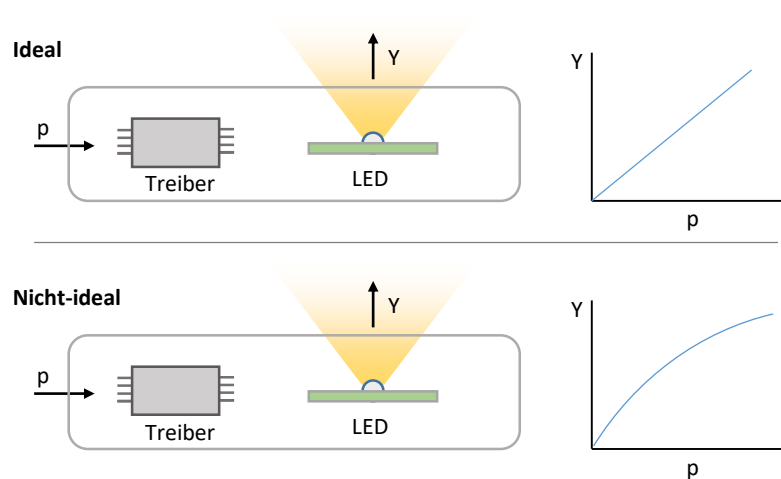


Abbildung 4.2.: Ein LED-System, bestehend aus Treiber-Elektronik und LED, wird als ideales System bezeichnet, wenn der Zusammenhang zwischen der Eingangsstellgröße p und dem Tristimulus-Wert Y des emittierten Lichts linear verläuft. Andernfalls wird es als nicht-ideales System bezeichnet.

Entsprechend werden die Tristimulus-Werte X_n, Y_n, Z_n jedes LED-Kanals mit p_n gleichsam skaliert.

$$\begin{aligned}
 X_n &= K p_n \int_{380}^{780} S_{n,\max}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\
 Y_n &= K p_n \int_{380}^{780} S_{n,\max}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\
 Z_n &= K p_n \int_{380}^{780} S_{n,\max}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad \text{für } n = 1; 2; 3
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Die Normalisierungskonstante K wird für Lichtquellen zu $K_m = 683,002 \text{ lm/W}$ für das 2° -Sichtfeld und zu $K_{m,10} = 683,599 \text{ lm/W}$ für das 10° -Sichtfeld gesetzt [29]. Da die $\bar{y}(\lambda)$ -Funktion der Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ entspricht (bei Verwendung des CIE 1931-Beobachters), kann der Tristimulus-Wert Y mit der zugrunde liegenden photometrischen Messgröße gleichgesetzt werden (z.B. Leuchtdichte eines LED-Kanals). Zur Verallgemeinerung wird hier im Folgenden für Y die Bezeichnung „Intensität“ verwendet.

Wie auch schon in Abschnitt 3.2.1 gezeigt, lassen sich nach der Berechnung der x, y -Farbkoordinaten mit

$$x_n = \frac{X_n}{X_n + Y_n + Z_n} \tag{4.3}$$

$$y_n = \frac{Y_n}{X_n + Y_n + Z_n} \tag{4.4}$$

$$z_n = \frac{Z_n}{X_n + Y_n + Z_n} \leftrightarrow z_n = 1 - x_n - y_n \tag{4.5}$$

die nötigen relativen $Y_{n,\text{rel}}$ Verhältnisse für einen Soll-Farbtort $x_{\text{soll}}, y_{\text{soll}}$ berechnen:

$$\begin{bmatrix} Y_{1,\text{rel}} \\ Y_{2,\text{rel}} \\ Y_{3,\text{rel}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ f(D) \\ g(D) \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

mit

$$D = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \\ x_{\text{soll}} & y_{\text{soll}} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

und den Funktionen $f(D)$ und $g(D)$, welche sich mit $a = x/y$ und $b = z/y$ zu

$$f(D) = \frac{(b_3 - b_{\text{soll}})(a_1 - a_{\text{soll}}) - (a_{\text{soll}} - a_3)(b_{\text{soll}} - b_1)}{(b_{\text{soll}} - b_1)(a_{\text{soll}} - a_2) - (b_2 - b_{\text{soll}})(a_1 - a_{\text{soll}})} \quad (4.8)$$

$$g(D) = \frac{f(D)(b_2 - b_{\text{soll}}) + b_3 - b_{\text{soll}}}{b_{\text{soll}} - b_1} \quad (4.9)$$

ergeben. Da dieses ideale System einen linearen Zusammenhang der Tristimuluswerte bei einer Änderung der Intensität Y_n impliziert

$$\Delta X_n, \Delta Z_n \propto \Delta Y_n, \quad (4.10)$$

kann eine Skalierung auf den Soll-Wert der Leuchtdichte $Y_{\text{mix,soll}}$ durch den Faktor c erfolgen, ohne dass dies einen Einfluss auf den resultierenden Farbtort hat.

$$c = \frac{Y_{1,\text{rel}} + Y_{2,\text{rel}} + Y_{3,\text{rel}}}{Y_{\text{mix,soll}}} \quad (4.11)$$

Hieraus ergeben sich die Absolutwerte der einzelnen LED-Kanäle $Y_{n,\text{abs}}$:

$$\begin{bmatrix} Y_{1,\text{abs}} \\ Y_{2,\text{abs}} \\ Y_{3,\text{abs}} \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} Y_{1,\text{rel}} \\ Y_{2,\text{rel}} \\ Y_{3,\text{rel}} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Die Treibergröße p_n folgt aus dem Verhältnis von $Y_{n,\text{abs}}$ zu der maximalen Leuchtdichte Y_{max} (gemessen bei $p_n = 1$).

$$p_n = \frac{Y_{n,\text{max}}}{Y_{n,\text{abs}}} \quad \text{für } n = 1; 2; 3 \quad (4.13)$$

Das hier vorausgesetzte lineare Dimmverhalten lässt sich in der Praxis nur mit mechanischen Verdunklungssystemen zwischen LED und Beobachter realisieren, beispielsweise durch Abschattung, wodurch der proportionale Zusammenhang (Gleichung (4.10)) gegeben ist. Mechanische Dimmverfahren haben jedoch außerhalb des Labors bei LED-Beleuchtung keine große Bedeutung, da elektronische Dimmer günstiger und effizienter sind. Zwar können elektronische Dimmverfahren näherungsweise als linear betrachtet werden, hierbei wird jedoch ein Fehler in Kauf genommen, welcher im folgenden Abschnitt

diskutiert und optimiert wird.

4.1.2. Nicht-ideales LED-System in der Literatur

Das nicht-ideale LED-System beschreibt Systeme, bei denen LEDs elektronisch gedimmt werden, beispielsweise durch Reduzierung eines Konstantstroms (Constant Current Reduction – CCR), durch Pulsweitenmodulation (PWM) oder durch eine Kombination aus beiden Verfahren [139], [140]. Hieraus resultierende Unterschiede in der Vorwärtsspannung, dem Vorwärtsstrom und der Halbleitertemperatur bewirken eine Änderung des Emissionsspektrums und somit auch eine Änderung der Farbkoordinaten [141]. Damit verbundene Verschiebungen der Spitzenwellenlänge hängen von dem Materialsystem einer LED ab. So erfolgt bei AlGaInP-LEDs eine Verschiebung hin zu kürzeren Wellenlängen (PWM und CCR), während die Verschiebung bei InGaN-LEDs bei PWM und CCR in entgegengesetzte Wellenlängenbereiche erfolgt [139], [142], [143]. Durch ein hybrides Verfahren beider Dimm-Methoden lässt sich diese Verschiebung für InGaN und Leuchtstoff-konvertierte LEDs teilweise kompensieren, wodurch die Farbverschiebung beim Dimmen minimiert wird [139]. Ebenso kann durch ein hybrides Verfahren oder auch im einfacheren Fall eines zugeschalteten Gleichstromanteils zur PWM die optische Effizienz von LEDs gesteigert werden [140].

Des Weiteren haben die Temperatur und der Vorwärtsstrom bei Nitrid-basierten LEDs eine gegensätzliche Verschiebung der Spitzenwellenlänge zur Folge, weswegen für die Farbstabilität von blauen Leuchtstoff-konvertierten LEDs eine CCR-Dimmung besser geeignet ist [142]. Die Temperaturerhöhung als einzelner Parameter bewirkt eine Verringerung der optischen Effizienz, somit auch der Lichtausbeute, sowie eine Verschiebung der Spitzenwellenlänge in Richtung des langwelligen Bereichs [144]. Zur Kompensation von temperaturbedingten Änderungen lässt sich beispielsweise die Temperatur am Kühlkörper einer LED messen, um somit die Temperatur am PN-Übergang abzuschätzen. Für eine zuverlässige Verwendung in der Farbmischung ist die mit diesem Verfahren berechenbare Änderung der Lichtausbeute alleine zwar nicht geeignet, die zusätzliche Verwendung einer Strahlungsmessung mittels Photodiode kann dies jedoch ermöglichen [145]. Durch Messung der Temperatur auf der LED-Platine zeigen Man und Ashdown in [146], dass die spektrale Änderung von InGaN- und AlInGaP-LEDs mittels eines doppelten Gauß-Modells modelliert werden kann. Für echtzeitfähige Implementierungen auf Mikrocontrollern ist dieses Verfahren nach Angaben von Man und Ashdown jedoch nicht geeignet. Da die Temperatur am Strahlungsübergang einer LED deren Spannung beeinflusst, kann auch eine Messung der Vorwärtsspannung als Grundlage zur Korrektur von temperaturbedingten Änderungen dienen und in die Farbmischberechnung einfließen [147]. Des Weiteren besteht die Möglichkeit mittels optischer Sensorik (Farbsensoren, Spektrometern) die Änderungen zu messen und im Farbmischprozess zu kompensieren [148], [149].

4.1.3. Algorithmus zur Farbmischung und Kompensation nicht-idealer Kennlinien

Die im Zuge des in Abschnitt 3.8 beschriebenen Versuchsaufbaus entwickelte LED-Leuchte verfügt über eine Temperaturstabilisierung. Da der im Folgenden beschriebene Farbmischalgorithmus zur Anwendung in dieser Leuchte entwickelt wurde, beinhaltet er keine Kompensation von temperaturbedingten Änderungen, sondern kompensiert die Linearitätsfehler der zum Farbmischen nötigen Dimm-

Vorgänge.

Während das Dimmen der einzelnen LED-Kanäle hierbei über eine PWM des LED-Stroms erfolgt, lässt sich das Verfahren auch auf andere Dimm-Methoden anwenden. Zur Ermittlung der Dimmkennlinien der hier verwendeten Leuchte werden mittels Spektrometer (CS2000, Konica Minolta) die spektralen Strahldichtevertiefungen der einzelnen LED-Kanäle gemessen (vgl. Abb. 4.3). Dabei wird über die Temperaturregelung die Temperatur der LED-Platine konstant auf 35 °C gehalten.

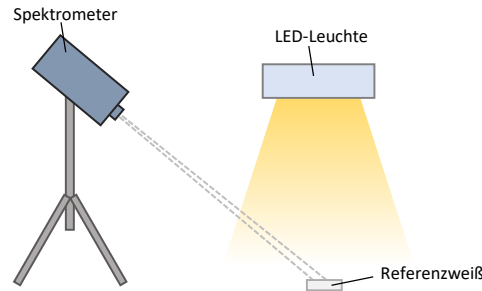


Abbildung 4.3.: Messaufbau zur Charakterisierung der LED- und Treiberkennlinien sowie zum Genauigkeitsmessung der Farbmisch-Algorithmen. Hierfür misst ein Spektrometer auf einem Referenzweiß die spektrale Strahldichte der mehrkanaligen LED-Leuchte.

Abb. 4.5 (a) bis (e) zeigt die dabei gemessenen Linearitätsfehler der Tristimuluswerte. Der Fehler wird hierbei aus der prozentualen Abweichung gegenüber einer linearen Skalierung des Strahlungsspektrums bei maximalem PWM-Tastverhältnis berechnet. Die farbigen LEDs mit schmalbandigen Emissionsspektren zeigen mit sinkendem Dimmfaktor größere Fehler als die leuchtstoffkonvertierten kaltweißen und warmweißen LEDs. Bei allen LEDs sind es vor allem die niedrigen PWM-Tastverhältnisse, welche für starke Abweichungen gegenüber einer durch den Ursprung verlaufende Linearisierung sorgen.

Entsprechend dieser Fehler ergeben sich Verschiebungen der Farbkoordinaten eines LED-Kanals, welche bei dem grünen LED-Kanal mit einer maximalen Verschiebung von $\Delta_{u'v'} = 6,98 \times 10^{-3}$ am größten ist. Die geringste maximale Farbänderung $\Delta_{u'v'} = 3,37 \times 10^{-3}$ tritt bei dem Kanal der warmweißen LEDs auf. Verglichen mit einem idealen linearen Verlauf der Kennlinie, erzeugen diese Linearitätsfehler eine Krümmung der Kennlinie, welche bei den Y-Werten des roten Kanals am stärksten ausgeprägt ist (vgl. Abb. 4.4).

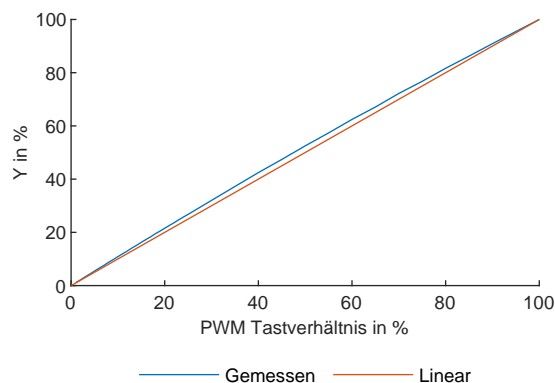


Abbildung 4.4.: Stärkste gemessene Krümmung einer Dimmkennlinie, welche beim Dimmen des Y-Tristimulus-Werts der roten LED gemessen wird.

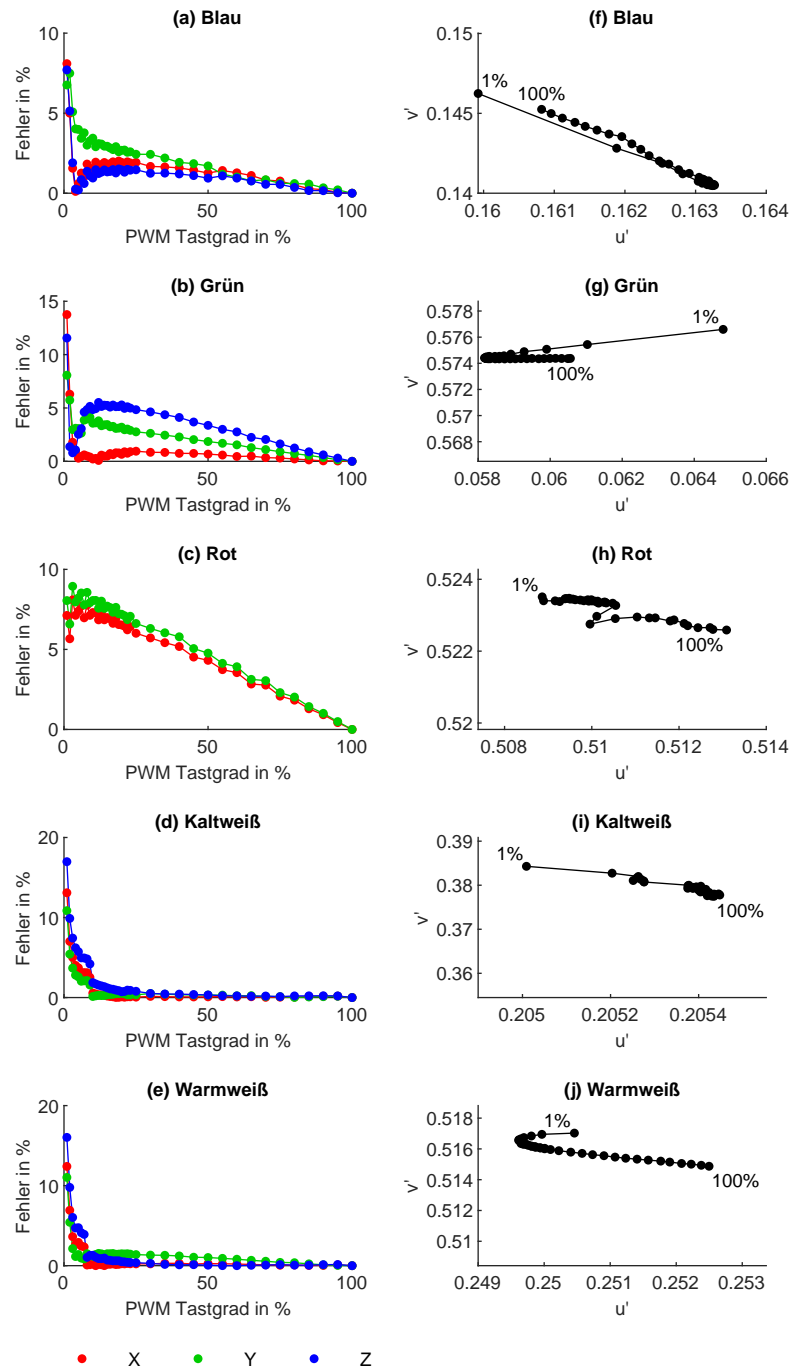


Abbildung 4.5.: Gemessene Linearisierungsfehler der Tristimulus-Werte fünf verschiedener LED-Kanäle (a) bis (e) beim Dimmen mittels PWM bei konstanter Temperatur der LED-Platine. Der prozentuale Fehler (bezogen auf den jeweiligen Maximalwert) wird für alle Tristimulus-Werte T nach der Formel $Fehler = 100 |(T_{max}^{p/p_{max}} - T) T^{-1}|$ berechnet. Die Messintervalle des Dimmwerts p sind 5% im Bereich von 100% bis 25% und 1% im Wertebereich 23% bis 1%. Das Spektrum der roten LEDs (c) liegt außerhalb des Sensitivitätsbereichs der $\bar{z}(\lambda)$ -Funktion, weshalb in diesem Fall gemessene relative Fehler keine Relevanz besitzen und auf die Darstellung der Z-Tristimuluswerte verzichtet wird. Die aus den Linearitätsfehler resultierenden Farbortverschiebungen sind im $u'v'$ Farbdia-gramm des CIE 1931 2°-Beobachters dargestellt (f) bis (j). Die maximalen Farbverschiebungen zwischen zwei Dimmwerten betragen $\Delta_{u'v'} = 6,65 \times 10^{-3}$ (f), $\Delta_{u'v'} = 6,98 \times 10^{-3}$ (g), $\Delta_{u'v'} = 4,33 \times 10^{-3}$ (h), $\Delta_{u'v'} = 6,83 \times 10^{-3}$ (i), $\Delta_{u'v'} = 3,37 \times 10^{-3}$ (j).

Zur Modellierung dieser gekrümmten Dimmkennlinien wird hier ein Polynom vierten Grades für jeden LED-Kanal n verwendet, wodurch der Tristimulus-Wert X_n, Y_n, Z_n in Abhängigkeit des Dimmwerts p_n beschrieben wird.

$$\begin{bmatrix} X_n \\ Y_n \\ Z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{n,x4} & c_{n,x3} & c_{n,x2} & c_{n,x1} & c_{n,x0} \\ c_{n,y4} & c_{n,y3} & c_{n,y2} & c_{n,y1} & c_{n,y0} \\ c_{n,z4} & c_{n,z3} & c_{n,z2} & c_{n,z1} & c_{n,z0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_n^4 \\ p_n^3 \\ p_n^2 \\ p_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Ebenso wird ein Polynom zur Berechnung des nötigen Dimmwerts p_n in Abhängigkeit eines Intensitätswerts Y_n eines LED-Kanals verwendet.

$$p_n = \begin{bmatrix} c_{n,p4} & c_{n,p3} & c_{n,p2} & c_{n,p1} & c_{n,p0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_n^4 \\ Y_n^3 \\ Y_n^2 \\ Y_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Die hierfür nötigen Konstanten $c_{n,x0}, \dots, c_{n,p4}$ werden mithilfe der Curve Fitting Toolbox von Matlab R2020b bestimmt. In der Farbmischberechnung eines 3-Kanal-Systems (Gleichung (4.6)) werden die drei LED-Intensitäten $\begin{bmatrix} Y_{1,rel} & Y_{2,rel} & Y_{3,rel} \end{bmatrix}^T$ in Abhängigkeit ihrer eigenen x, y -Farbkoordinaten berechnet. Wie jedoch in Abb. 4.5 gezeigt wurde, sind die Farbörter abhängig von der LED-Intensität (bzw. des Dimmwerts) und somit abhängig von dem Ausgang der Farbmischberechnung.

Aus diesem Grund wird ein Algorithmus vorgestellt, welcher durch Iteration der Farbmischberechnung die LED-Farbkoordinaten als Eingangsgröße (entsprechend den Mischverhältnissen der vorherigen Iteration) solange anpasst, bis der Farbabstand zwischen Sollwert und modelliertem Istwert vernachlässigbar ist. Abb. 4.6 zeigt diesen Algorithmus in Form eines Flussdiagramms. Hierbei werden neben den Zielwerten der Intensität $Y_{mix,soll}$ und des Farborts $x_{mix,soll}, y_{mix,soll}$ die Toleranzwerte $\Delta_{Y,max}$ und $\Delta_{u'v',max}$ definiert. Diese Toleranzwerte beschreiben den jeweiligen maximalen zulässigen Fehler, bei deren Unterschreitung die iterative Berechnung beendet wird. Neben einer konkreten Soll-Intensität kann $Y_{mix,soll}$ auch mit einem negativen Wert initialisiert werden, woraufhin der Algorithmus auf die maximal erzielbare Intensität mischt. Zu Beginn der Mischberechnung werden die Farbkoordinaten der LED-Kanäle verwendet, welche bei dem maximalen Dimmwert p_{max} auftreten. Ist der Zielfarbort mischbar (erkennbar an positiven Werten der nötigen Kanalintensitäten Y_n), wird zunächst die Farbmischberechnung solange wiederholt, bis weder der Toleranzbereich der Gesamtintensität $Y_{mix,ist}$ verfehlt wird noch eine Übersteuerung ($Y_n > Y_{n,max}$) auftritt. Da die Farbmischverhältnisse relative Werte sind, dient der Dimmwert des ersten LED-Kanals p_1 als Skalierungsgröße, mit deren Hilfe die Intensitäten der beiden übrigen LED-Kanäle $Y_{2,abs}, Y_{3,abs}$ angepasst werden.

Im nächsten Schritt wird anhand der Polynomfunktionen, welche als LED- und Treibermodell dienen, der resultierende Ist-Farbort $x_{mix,ist}, y_{mix,ist}$ simuliert. Anhand des Farbabstands zum Zielfarbort $x_{mix,soll}, y_{mix,soll}$ wird beurteilt, ob eine weitere Iteration erfolgt oder ob die Berechnung beendet wird. Ist der modellierte Farbabstand $\Delta_{u'v',neu}$ größer als der zulässige Abstand $\Delta_{u'v',max}$, wird eine weitere Iteration durchgeführt, solange ein geringer Farbabstand als in der Iteration zuvor erreicht wird.

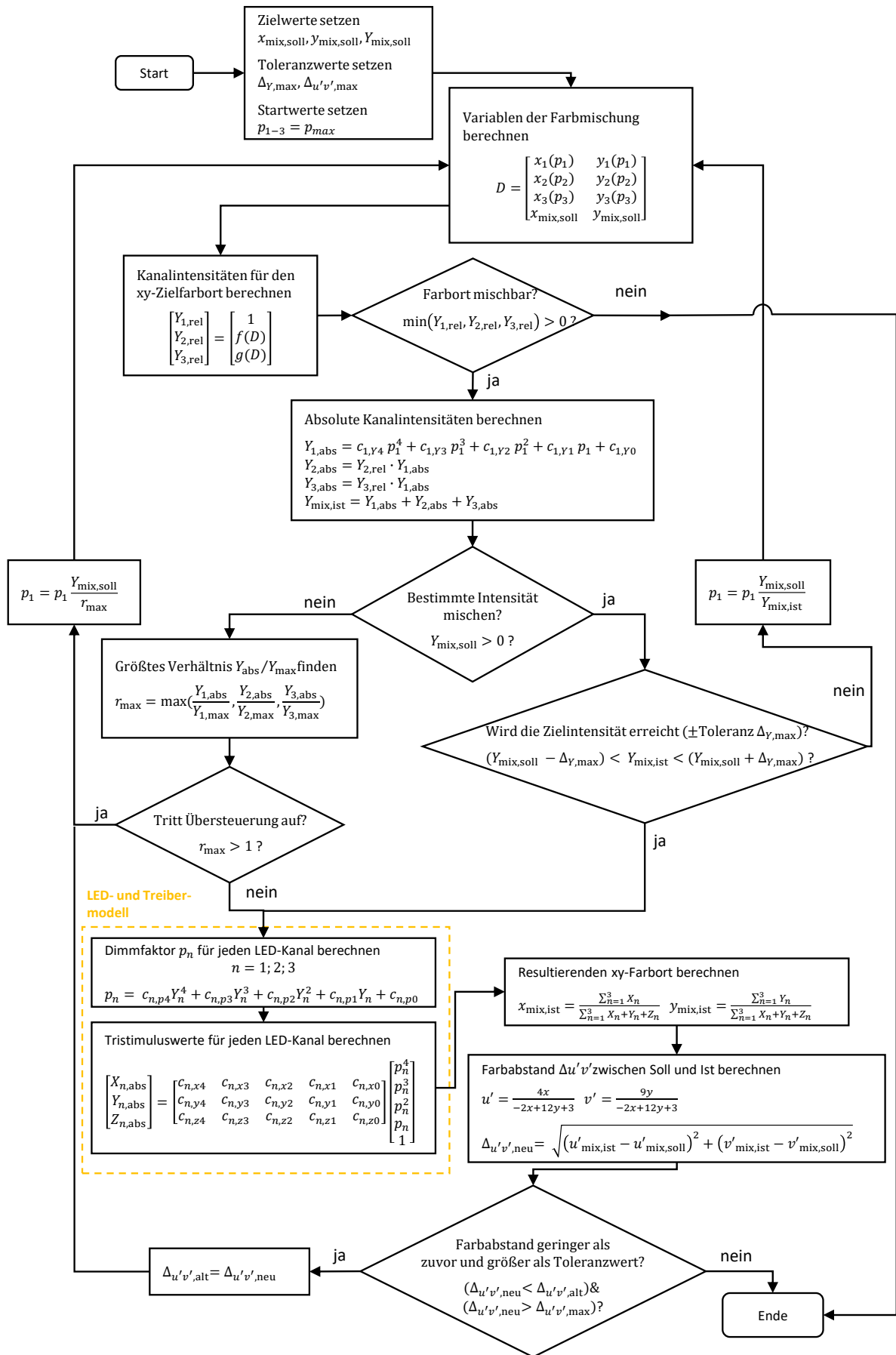


Abbildung 4.6.: Flussdiagramm des Algorithmus zur Farbmischung von drei LED-Kanälen und gleichzeitiger Optimierung der Genauigkeit von Farbe und Leuchtdichte durch Verwendung eines LED- und Treibermodells.

Die mit diesem Algorithmus erreichbare Verbesserung der Genauigkeit von Farbe und Leuchtdichte einer 3-Kanal-LED-Mischung wird mit dem in Abb. 4.3 gezeigten Messaufbau für das R-G-B und KW-WW-G LED-System (vgl. Abb. 4.1) untersucht. Es wird im Folgenden zuerst für verschiedene ähnlichste Farbtemperaturen die erzielte Farbgenauigkeit betrachtet. Anschließend wird bei einen konstanten Zielfarbtort mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 5000 K analysiert, wie das Dimmen die Genauigkeit der Farbe und der Leuchtdichte des gemischten Lichts beeinflusst.

Variable ähnlichste Farbtemperatur

Zur Untersuchung der Farbgenauigkeit werden die CIE 1931 Farbkoordinaten von ähnlichsten Farbtemperaturen zwischen 2700 K und 10 000 K als Zielwerte vorgegeben. Über die Vorgabe $Y_{\text{mix,soll}} = -1$ stellt der Algorithmus die maximal erzielbare Leuchtdichte des jeweiligen Systems ein. Abb. 4.7 zeigt die gemessenen Farbabstände zwischen den Zielwerten des Farbmischalgorithmus und der Spektrometermessung. Als Vergleichswerte werden die gemessenen Farbabstände, welche aus einer linearen Farbmischberechnung resultieren, gezeigt. Es ist erkennbar, dass die iterative Farbmischberechnung zu deutlich geringeren Farbfehlern führt. Bei beiden LED-Systemen können die Farbfehler soweit minimiert werden, dass kein wahrnehmbarer Farbunterschied zwischen Ziel- und Ist-Farbtort zu erwarten ist [96].

Der durchschnittliche Farbfehler des R-G-B-Systems sinkt von $\Delta_{u'v'} = 2,13 \times 10^{-3}$ auf $\Delta_{u'v'} = 0,50 \times 10^{-3}$ und der des KW-WW-G-Systems von $\Delta_{u'v'} = 0,75 \times 10^{-3}$ auf $\Delta_{u'v'} = 0,07 \times 10^{-3}$. Die Anzahl der hierfür nötigen Iterationen liegt im Bereich zwischen vier und elf Durchläufen (vgl. Tabelle 4.1). Aufgrund des kleineren Farbgamuts des KW-WW-G-Systems (verglichen mit dem R-G-B-System) lassen sich bei den gezeigten Untersuchungen die ähnlichsten Farbtemperaturen 2700 K und 3000 K mit dem KW-WW-G-System nicht erzeugen.

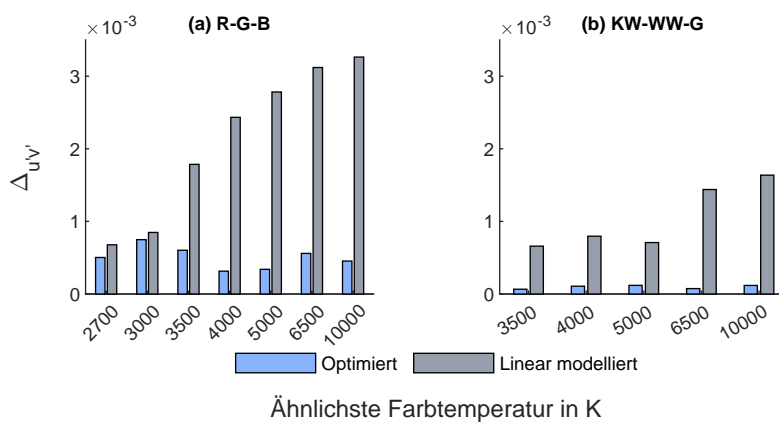


Abbildung 4.7.: Farbabstand $\Delta_{u'v'}$ (CIE 1931-Beobachter) zwischen Soll-Farbtort und gemessenem Farbtort eines R-G-B LED-Systems (a) und eines KW-WW-G LED-Systems (b). Die Farbgenauigkeit wird in beiden Fällen durch die Verwendung des vorgestellten Optimierungsalgorithmus gesteigert, verglichen mit einer linearen Farbmischberechnung.

Tabelle 4.1.: Anzahl der Iterationen des Farbmischalgorithmus zur Optimierung der Farbortsgenauigkeit beim Mischen verschiedener ähnlichster Farbtemperaturen mit maximaler Leuchtdichte.

LED-System	Ähnlichste Farbtemperatur in K						
	2700	3000	3500	4000	5000	6500	10000
R-G-B	7	4	8	9	10	5	5
KW-WW-G	-	-	4	5	10	5	11

Dimmen bei konstanter Farbtemperatur

Während zuvor der Zielfarbort variiert wurde, wird hier die Genauigkeit der Farb- und LeuchtdichteEinstellung beim Dimmen eines konstanten Zielfarborts mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 5000 K betrachtet. Die relativen Spektren dieses Farborts, bei maximaler Leuchtdichte, sind in Abb. 4.8 gezeigt.

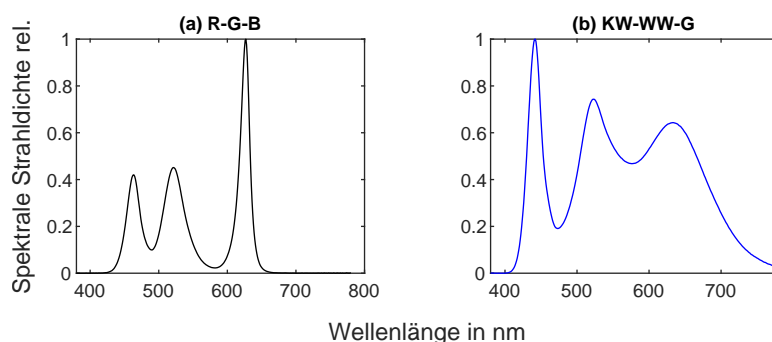


Abbildung 4.8.: Relative 3-Kanal-LED-Spektren mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 5000 K eines R-G-B (a) und eines KW-WW-G (b) LED-Systems.

Aus der Kongruenz des Y -Tristimulus-Werts des CIE1931-Beobachters mit der Leuchtdichte L geht hervor, dass das Verhältnis von Sollwert zu Maximalwert der Leuchtdichte $L_{\text{soll}}/L_{\text{max}}$ einem Dimmfaktor (zwischen 0 und 1) entspricht. Entsprechend werden die prozentualen Abweichungen der gemessenen Leuchtdichten verschiedener Zielvorgaben $\Delta_L = 100|L_{\text{soll}} - L_{\text{ist}}|/L_{\text{soll}}$ bei Verwendung des iterativen Algorithmus und der linearen Farbmischung verglichen (vgl. Abb. 4.9). Das KW-WW-G erreicht die höchste Genauigkeit. Hier werden im Dimmbereich von 20 % bis 100 % mit dem iterativen Algorithmus Fehler von maximal 0,4 % erreicht, während die lineare Berechnung bis zu 1,5 % abweicht. Größer sind die Leuchtdichteabweichungen bei Verwendung des R-G-B-Systems. Die lineare Berechnung erzielt bei maximaler Leuchtdichte eine Abweichung von 1,5 %, welche mit sinkendem Dimmfaktor bis auf einen Wert von 6,0 % wächst. Durch Anwendung des iterativen Algorithmus wird hierbei die Abweichung von 0,07 % bei maximaler Leuchtdichte zu 2,3 % bei einem Dimmfaktor von 1,6 % optimiert.

Ähnlich verhält sich der Verlauf des Farbfehlers beim Dimmen (vgl. Abb. 4.10). Bei Anwendung der Farbmischung auf das KW-WW-G-System erzielt die lineare Berechnung eine Abweichung von $\Delta_{u'v'} = 0,8 \times 10^{-3}$ bei maximaler Leuchtdichte, welche mit sinkendem Dimmwert stetig steigt und bei einem Dimmwert von 4,2 % den Farbabstand $\Delta_{u'v'} = 4,8 \times 10^{-3}$ erreicht. Im selben Dimmbereich erzielt der iterative Algorithmus Farbabstände $\Delta_{u'v'} < 0,2 \times 10^{-3}$. Die Farbabstände des R-G-B-Systems desselben Dimmintervalls liegen bei der linearen Farbmischung zwischen $\Delta_{u'v'} = 2,7 \times 10^{-3}$ und $\Delta_{u'v'} = 3,9 \times 10^{-3}$.

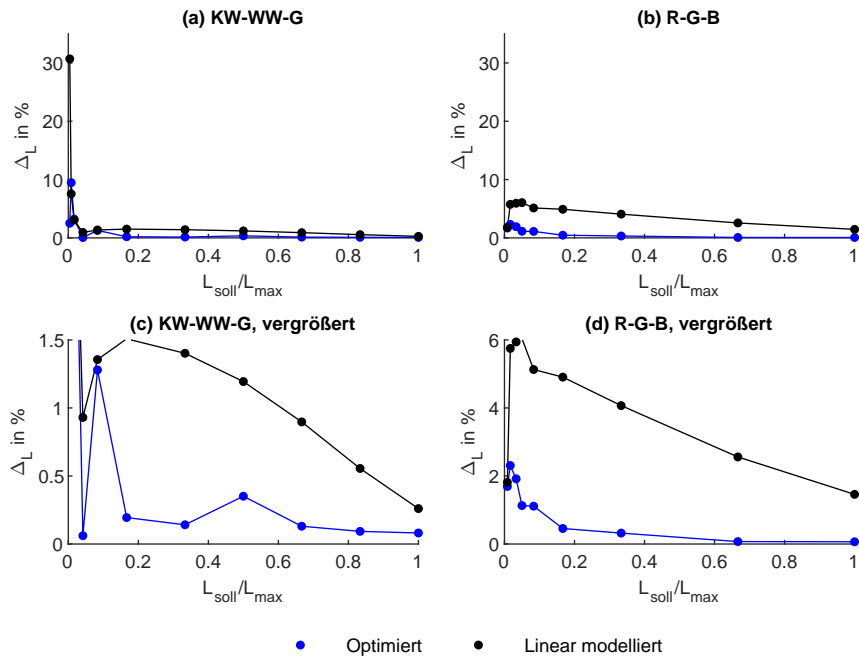


Abbildung 4.9.: Leuchtdichtefehler $\Delta_L = 100|L_{\text{soll}} - L_{\text{ist}}|/L_{\text{soll}}$ in Abhängigkeit der Leuchtdichte-Sollwerte bei einer ähnlichsten Farbtemperatur von 5000 K. Die Sollwerte beziehen sich auf die maximal erzielbare Leuchtdichte L_{max} . Die Leuchtdichte-Istwerte beruhen auf Spektromessungen. Die Verläufe des KW-WW-G (a) und R-G-B (b) LED-Systems sind in (c) bzw. (d) vergrößert dargestellt.

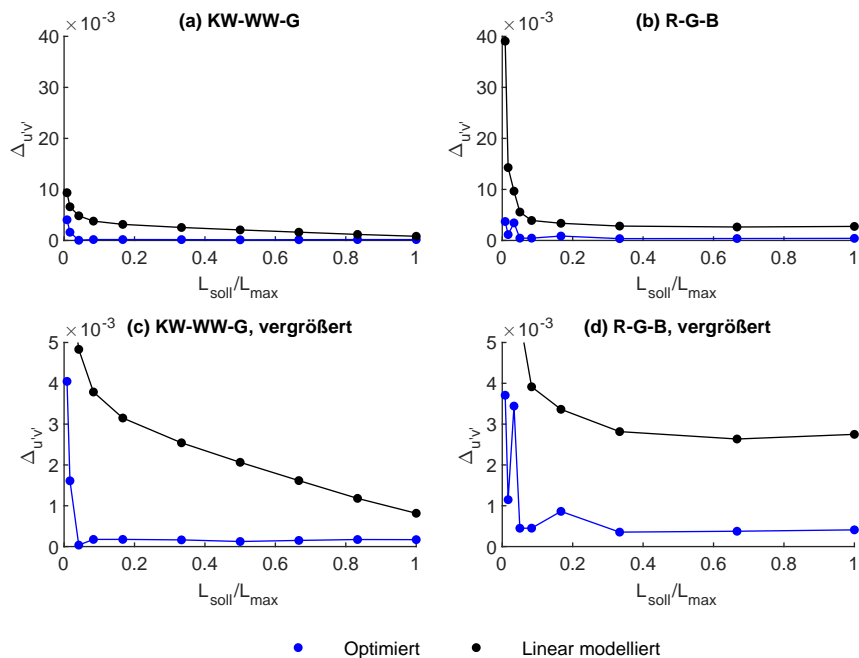


Abbildung 4.10.: Farbabweichung $\Delta_{u'v'}$ (CIE 1931-Beobachter) zwischen Soll-Farbot und gemessenem Farbot eines R-G-B LED-Systems (a) und eines KW-WW-G LED-Systems (b) in Abhängigkeit des Sollwerts der Leuchtdichte bei einer ähnlichsten Farbtemperatur von 5000 K. Die Sollwerte beziehen sich auf die maximal erzielbare Leuchtdichte L_{max} . Die jeweiligen Verläufe sind in (c) bzw. (d) vergrößert dargestellt.

Auch hier werden diese Abstände mit dem iterativen Verfahren auf Werte zwischen $\Delta_{u'v'} = 0,3 \times 10^{-3}$ und $\Delta_{u'v'} = 0,9 \times 10^{-3}$ minimiert.

Im Bereich von sehr niedrigen Dimmwerten ($L_{\text{soll}}/L_{\text{max}} < 5\%$) steigen die Farbfehler stark an, wobei das R-G-B-System den größten gemessenen Farbabstand von $\Delta_{u'v'} = 39,1 \times 10^{-3}$ bei einem Dimmfaktor von 0,8 % aufweist.

4.1.4. Zusammenfassung (IV)

Es wurde gezeigt, dass der vorgestellte iterative Farbmischalgorithmus die Linearisierungsfehler des Dimmvorgangs soweit kompensiert, dass die Farbabstände zwischen Soll- und Istfarbort in fast allen Fällen im Bereich von $\Delta_{u'v'} < 1 \times 10^{-3}$ liegen. Lediglich beim Einstellen einer minimalen Leuchtdichte wird diese Grenze überschritten. Somit lässt sich LED-Licht mischen, welches von der Farbe eines Referenzlichts nicht zu unterscheiden ist [96], vorausgesetzt, es werden die Spektralwertfunktionen des jeweiligen Beobachters verwendet. Hierbei wird vor allem beim Dimmen hin zu minimalen Leuchtdichten die Farbstabilität gewahrt, während dies bei einer linearen Farbmischberechnung deutliche Änderungen des Farbortes bewirkt. Eine Anwendung ist in konventionellen Mehrkanal-LED-Leuchten sinnvoll, vor allem jedoch in Leuchten mit einer hohen Helligkeitsdynamik.

Zusätzlich wird hierbei die Leuchtdichtegenauigkeit gesteigert. Somit ist dieses Verfahren auch für technischen Verwendungen von LED-Beleuchtung sinnvoll, beispielsweise in der Belichtung lichtempfindlicher Materialien.

Die vorgestellte Implementierung der iterativen Farbmischung verwendet Polynomfunktionen zur Modellierung der Tristimulus-Dimmkennlinien. Die Temperatur findet hierbei keine Verwendung als zusätzliche Variable, da die hier verwendete Mehrkanal-LED-Leuchte eine Temperaturstabilisierung beinhaltet. Zur Einbeziehung variabler LED-Temperaturen, beispielsweise aufgrund der Verwendung einer passiven Kühlung, kann das entsprechende Modul des Algorithmus der LED- und Treibermodellierung ausgetauscht und weiterentwickelt werden (vgl. Kennzeichnung in Abb. 4.6). Ebenso kann statt einer PWM-Dimmung eine andere Dimmtechnologie ([139], [140]) verwendet werden. Hierbei ist jedoch sicherzustellen, dass die Dimmkennlinien keine lokalen Maxima oder Minima beinhalten, damit die Konvergenz der Farbmischberechnung sichergestellt ist.

Der iterative Farbmischalgorithmus wurde auf unterschiedlichen Systemen implementiert (Matlab-Funktion, C++ Desktop-Anwendung, Firmware verschiedener Mikrocontroller), wobei stets die Ausführung und Einstellung der Dimmwerte ohne spürbare Latenz erfolgte. Bei den vorgestellten Farb- und Leuchtdichteeinstellungen sind maximal elf Iterationen zur Berechnung nötig. Somit kann eine Echtzeit-Tauglichkeit des Verfahrens bestätigt werden.

4.2. Optimierung der Farbmischung eines 5-Kanal-LED-Systems

Das zuvor beschriebene Verfahren der Farbmischberechnung wird in diesem Abschnitt zur Anwendung auf ein System erweitert, welches aus fünf LED-Kanälen besteht. Die damit verbundene Möglichkeit der spektralen Optimierung verschiedener Lichtqualitätsmetriken wird beispielhaft für die in Abb. 4.11 gezeigten LED-Grundspektren (vgl. spektrale Kennwerte in Tabelle 3.2) demonstriert und analysiert.

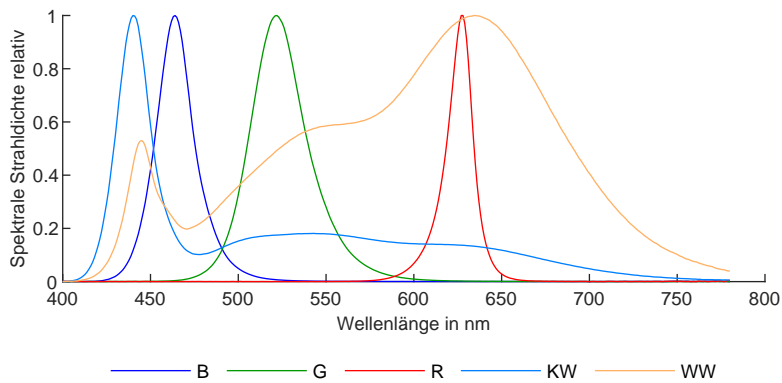


Abbildung 4.11.: Relative Strahlungsspektren des verwendeten 5-Kanal-Systems.

Während die Farbmischberechnung eines 3-Kanal-Systems für einen Zielfarbart $x_{\text{mix}}, y_{\text{mix}}$ eindeutig lösbar ist, tritt bei einer höheren Kanalanzahl eine Unterbestimmtheit des Gleichungssystems auf. Für eine beliebige Anzahl N an LED-Kanälen beschreibt Gleichung (4.16) den Zusammenhang zwischen den nötigen Kanalintensitäten Y_1, \dots, Y_N und dem Zielfarbart $x_{\text{mix}}, y_{\text{mix}}$ mit der Intensität Y_{mix} .

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Y_{\text{mix}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_1 - x_{\text{mix}}}{y_1} & \dots & \frac{x_N - x_{\text{mix}}}{y_N} \\ \frac{y_1 - y_{\text{mix}}}{y_1} & \dots & \frac{y_N - y_{\text{mix}}}{y_N} \\ 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_N \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Mit

$$\begin{aligned} B &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Y_{\text{mix}} \end{bmatrix} \\ A &= \begin{bmatrix} \frac{x_1 - x_{\text{mix}}}{y_1} & \dots & \frac{x_N - x_{\text{mix}}}{y_N} \\ \frac{y_1 - y_{\text{mix}}}{y_1} & \dots & \frac{y_N - y_{\text{mix}}}{y_N} \\ 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \\ I &= \begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_N \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.17)$$

lässt sich dieser Zusammenhang vereinfacht mit

$$B = A \times I \quad (4.18)$$

beschreiben. Zur Farbmischung ist der Vektor I zu bestimmen.

$$I = A^{-1} \times B \quad (4.19)$$

Für $N = 3$ ergibt sich eine eindeutige Lösung für I bzw. $[Y_1, Y_2, Y_3]^T$ (vgl. Gleichung (4.12)). Bei $N > 3$ ist das Gleichungssystem unterbestimmt und es existieren unendlich viele Lösungen. Die verschiedenen möglichen Lösungen resultieren in unterschiedlichen Spektralverteilungen des gemischten Spektrums, wodurch die Möglichkeit zur Optimierung spektraler Lichtqualitätsparameter gegeben ist, wie beispielsweise der Farbwiedergabe oder der nichtvisuellen Wirkung (vgl. Abschnitt 2.3). Entsprechend sind Verfahren, welche die Farbmischberechnung solcher LED-Systeme beschreiben, anhand zweier verwandter Aspekte zu beurteilen: Wie wird das unterbestimmte Gleichungssystem gelöst und wie wird die spektrale Optimierung durchgeführt? Vor allem im Hinblick auf mögliche Implementierungen in alltagstauglichen adaptiven LED-Systemen ist der nötige Rechenaufwand entscheidend, ob ein Verfahren in Echtzeit und ohne große Steigerung der Kosten möglich ist. Bevor ein hierfür geeignetes Verfahren vorgestellt wird, werden unterschiedliche Ansätze aus der Literatur aufgezeigt und diskutiert.

4.2.1. Verfahren in der Literatur

Die Optimierung des Spektrums anhand diverser Metriken beginnt bei der Auswahl der LED-Typen und Grundspektren. In diesem Zusammenhang kann auch das Spektrum eines 3-Kanal-Systems zum Entwicklungszeitpunkt optimiert werden [150]–[152]. Jedoch sind für eine optimale Farbwiedergabe bei variabler ähnlichster Farbtemperatur vier bis fünf LED-Kanäle nötig [153], [154], wodurch auch gleichzeitig die optische Effizienz maximiert werden kann und die melanopische Effizienz in relevantem Maß änderbar ist. Zur Simulation von Tageslicht mit einem CIE Metamerie-Index der Klasse A (vgl. Abschnitt 2.3.2) beschreiben die Autoren in [106], dass sechs Kanäle nötig sind, von denen ein Kanal ultraviolettes Licht erzeugt.

Die Berechnungen dieser Metriken beinhalten die Verwendung von Spektraldaten. Es muss somit das resultierende Spektrum der Farbmischung bekannt sein und aufgrund der Unterbestimmtheit des Gleichungssystems (für $N > 3$) für eine Vielzahl an Mischspektren berechnet werden, um ein Optimum zu finden. Diese Berechnungen können zum Entwicklungszeitpunkt durchgeführt werden und die ermittelten optimalen Mischverhältnisse als Lookup-Tabelle (LUT) im Speicher einer Multikanalleuchte abgelegt werden. Somit wird das Problem der Echtzeit-fähigen Farbmischung und Optimierung umgangen, da die begrenzten Ressourcen eines Mikrocontrollers einer Leuchte hierfür in der Regel nicht geeignet sind. Nachteilig an diesem Verfahren ist jedoch, dass hierbei nicht auf Änderungen der LED-Spektren eingegangen werden kann, welche beispielsweise aus der LED-Alterung resultieren [155].

Für eine echtzeitfähige Farbmischung muss zunächst das unterbestimmte Gleichungssystem der inversen Matrix A^{-1} bestimmt werden. Hierfür wird in der Literatur häufig A^{-1} mit der Moore-Penrose Pseudoinverse A^+ gelöst [151], [156].

$$A^+ = A^T(AA^T)^{-1} \quad (4.20)$$

Jedoch orientiert sich die somit gewählte Lösung nicht an lichttechnischen Qualitätsparametern, sondern an der geringsten euklidischen Norm des Lösungsvektors I [157].

$$\|I_1 \dots I_N\|_2 := \sqrt{Y_1^2 + \dots + Y_N^2} \quad (4.21)$$

In [158] beschreiben die Autoren wie hierbei, unter Verwendung eines Optimierungsvektors, die Berechnung gelöst wird und mit einem hohen Farbwiedergabeindex korreliert. Dies wird für LED-Systeme von vier bis sechs Kanälen gezeigt und lässt sich auf den begrenzten Ressourcen eines Mikrocontrollers einer LED-Leuchte implementieren. Inwieweit dieses Verfahren sich auf beliebige Qualitätsmetriken übertragen lässt und eine gleichzeitige Optimierung mit Priorisierung zulässt, bleibt offen.

Die Berechnung der Farbwiedergabe R_a und der Color Quality Scale (CQS) [159], ohne Verwendung von Spektraldaten während der Ausführung, wird in [160] vorgestellt. Hierbei wird die Tatsache ausgenutzt, dass diese Metriken die resultierende Farbverschiebung unterschiedlicher Testfarben (deren Reflexionsspektren gegeben sind) als Messgröße verwenden. Somit können zum Entwicklungszeitpunkt die Farbkoordinaten der Testfarben unter Beleuchtung der einzelnen LED-Kanäle bestimmt werden. Diese Tristimulus-Werte müssen während der Anwendung nur noch entsprechend den einzelnen LED-Intensitäten gewichtet werden, um den Farbort der Testfarben unter dem aktuell gemischten LED-Licht zu simulieren. Eine Minimierung des Abstand dieses Farborts zu dem gespeicherten Referenzfarbort bewirkt eine Verbesserung des Farbwiedergabeindex bzw. der CQS. Es können also zum Zeitpunkt einer Farbmischung verschiedene Lösungen von Gleichung (4.19) auf ihre Farbwiedergabe untersucht werden und, aufgrund des vergleichsweise geringen Rechenaufwands, in Echtzeit eine optimale Lösung gefunden werden. Eine Adaption dieses Verfahrens auf die weiteren in Kapitel 2.3 beschriebenen Qualitätsmetriken ist denkbar. Dieses Verfahren wird hier jedoch nicht aufgegriffen und weiterentwickelt. Anstatt LED-Spektren auf einen gezielten Farbort zu mischen und dabei anhand verschiedener Metriken zu optimieren, gehen die Autoren in [149] den Weg der spektralen Anpassung des gemischten LED-Spektrums an ein Zielspektrum. Hierbei kann zusätzlich durch Verwendung eines Spektrometers eine Verschiebung von LED-Spitzenwellenlängen berücksichtigt und kompensiert werden. Der Einsatz ist jedoch eher für wissenschaftliche Zwecke geeignet, als zur Implementierung in alltagstauglichen adaptiven Beleuchtungssystemen.

Diese in der Literatur beschriebenen Verfahren erlauben teilweise eine praktikable Anwendung zur Echtzeit-Optimierung eines adaptiven Beleuchtungssystems. Um eine gezielte Optimierung und gleichzeitigen Überblick über die Verläufe und Abhängigkeiten der Qualitätsmetriken zu erhalten, wird im Folgenden ein Verfahren vorgestellt, welches dies durch Bildung virtueller Valenzen ermöglicht.

4.2.2. Farbmischung mit virtuellen Valenzen

Durch die Definition von virtuellen Valenzen lässt sich die Kanal-Anzahl eines LED-Systems virtuell verkleinern, wodurch die Farbmischung auf ein eindeutig lösbares 3-Kanal-System zurückgeführt wird. Eine virtuelle Valenz wird aus zwei physischen LED-Kanälen a und b gebildet, deren Intensitätsverhältnis die Farbe der virtuellen Valenz beschreibt. Dies Intensitätsverhältnis wird hier als $q \in \mathbb{N}_0[0,100]$ definiert, wodurch q den prozentualen Intensitätsanteil des LED-Kanals a und $100 - q$ den prozentualen Anteil des LED-Kanals b beschreibt. Somit eignet sich q als Größe, anhand derer die unendlich vielen Lösungen eines unterbestimmten Gleichungssystem parametrisiert werden können. Bevor auf den Nutzen dieser Parametrisierung weiter eingegangen wird, wird die Berechnung und eine beispielhafte

Anwendung von virtuellen Valenzen gezeigt.

Im Fall des hier verwendeten 5-Kanal-Systems (Abb.4.11) sind zwei virtuelle Valenzen v_1 und v_2 nötig, um ein 3-Kanal-System zu simulieren. Je nach Lage der einzelnen LED-Farbörter sind die LED-Kanäle a und b , welche eine virtuelle Valenz bilden, so zu wählen, dass das resultierende minimale Gamut die relevanten zu erzeugenden Farbbereiche beinhaltet. Bezogen auf die hier verwendeten fünf LED-Kanäle ergibt sich eine Zusammenlegung des blauen und des kaltweißen sowie des roten und warmweißen LED-Kanals (vgl. Abb. 4.12 (a)). Hier wird die Parametrisierung so gewählt, dass mit steigendem Wert q_1 bzw. q_2 das Farbgamut wächst (vgl. Abb. 4.12 (b) und (d)). Die maximale Intensität $Y_{v,max}$ der beiden virtuellen Valenzen ist ebenfalls abhängig von q , da die zusammengelegten LED-Kanäle unterschiedliche Maximalintensitäten besitzen (vgl. Abb. 4.12 (c) und (e)).

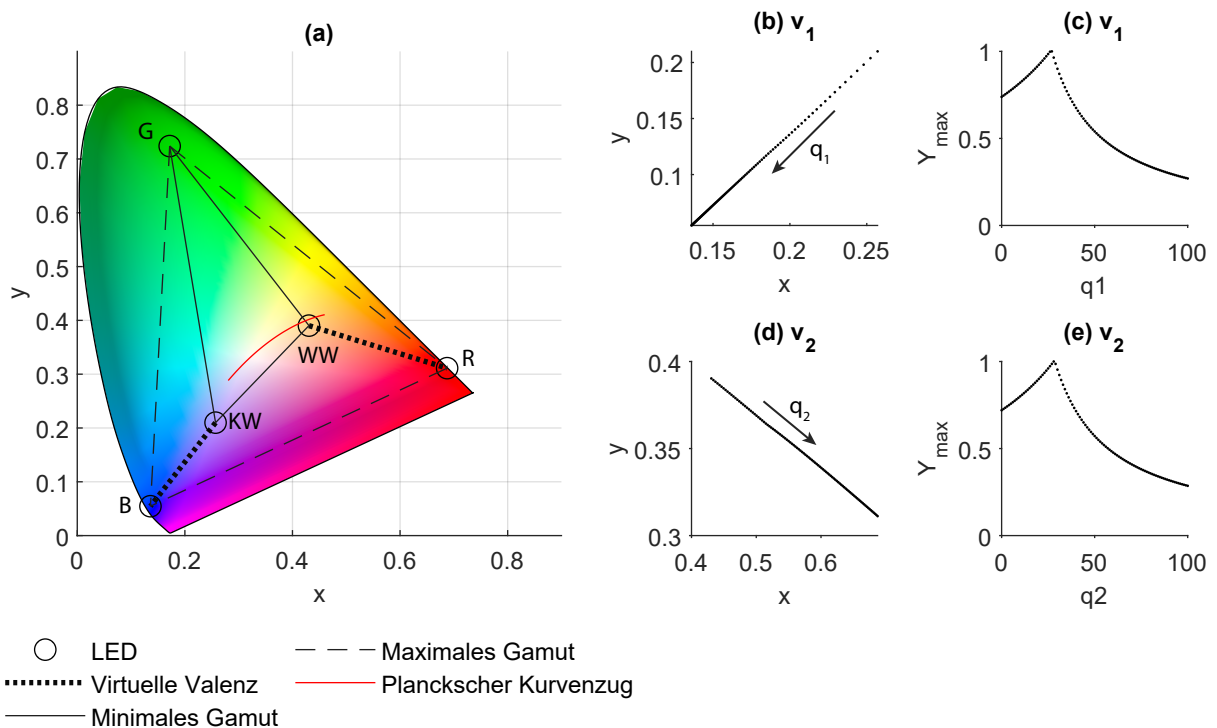


Abbildung 4.12.: (a): Farbörter des 5-Kanal-Systems. Die virtuelle Valenz v_1 wird aus dem blauen und kaltweißen Kanal gebildet, die virtuelle Valenz v_2 aus dem roten und warmweißen Kanal. Der Wert des Quantisierungsparameters q_1 bzw. q_2 bestimmt die Farbkoordinaten (b), (d) sowie die maximale Intensität der virtuellen Valenz (c), (e).

Zum Dimmen einer virtuellen Valenz wird der Parameter p_v als Skalierung der maximal möglichen Intensität definiert. Folglich muss bei $p_v = p_{v,max}$ einer der beiden LED-Kanäle a oder b maximal angesteuert sein. Die Berechnung der Valenzwerte x_v, y_v, Y_v in Abhängigkeit ihrer Parametrisierung q und ihres Dimmwerts p_v ist in Abb. 4.13 als Flussdiagramm dargestellt.

Zunächst werden die Intensitätswerte $Y_{a,rel}, Y_{b,rel}$ der zugrundeliegenden LED-Kanäle a und b berechnet, welche das Verhältnis von $q/100-q$ mit maximaler Aussteuerung einer der beiden LED-Kanäle erreichen. Diese maximale Intensität der virtuellen Valenz wird entsprechend des Dimmwerts p_v/p_{max} skaliert, um die absoluten LED-Kanal-Intensitäten $Y_{a,abs}, Y_{b,abs}$ zu erhalten. Um auch hier die Nichtlinearität des LED-Dimmverhaltens zu berücksichtigen, werden Polynomfunktionen zur Modellierung der Kennlinien verwendet (vgl. Abschnitt 4.1.3). Somit werden die resultierenden LED-Dimmwerte p_a, p_b berechnet, aus denen im letzten Schritt der Farbort x_v, y_v und die Intensität Y_v der virtuellen Valenz hervorgehen.

Mit diesem neuen Konzept lassen sich vier LED-Kanäle durch zwei virtuelle Valenzen mit den Farbörtern $x_{v1}(p_{v1}, q_{v1})$, $y_{v1}(p_{v1}, q_{v1})$ und $x_{v2}(p_{v2}, q_{v2})$, $y_{v2}(p_{v2}, q_{v2})$ beschreiben, wodurch sie in dem Algorithmus der 3-Kanal-Mischung mit Kompensation von Dimmfehlern 4.1.3 eingesetzt werden können. Hieraus ergibt sich der in Abb. 4.14 als Flussdiagramm dargestellte Algorithmus zur Mischung eines 5-Kanal-Systems mit gleichzeitiger Kompensation von Treiberfehlern. Nachdem die Startwerte des Algorithmus gesetzt wurden, werden unter Verwendung der virtuellen Valenzen v_1, v_2 die Intensitätsverhältnisse $[Y_{1,rel}, Y_{2,rel}, Y_{3,rel}]^T$ berechnet, wobei sich $Y_{1,rel}, Y_{2,rel}$ auf die Intensität der jeweiligen virtuellen Valenz bezieht. Im weiteren Verlauf des Algorithmus werden anhand des LED- und Treibermodells (vgl. gelbe Markierung in Abb. 4.14) die aus den zuvor berechneten Dimmwerten p_n , für $n = 1_a; 1_b; 2_a; 2_b; 3$, der zu erwartende Farbort berechnet. Hierbei beschreiben $1_a, 1_b$ bzw. $2_a, 2_b$ die vier physischen LED-Kanäle der beiden virtuellen Valenzen.

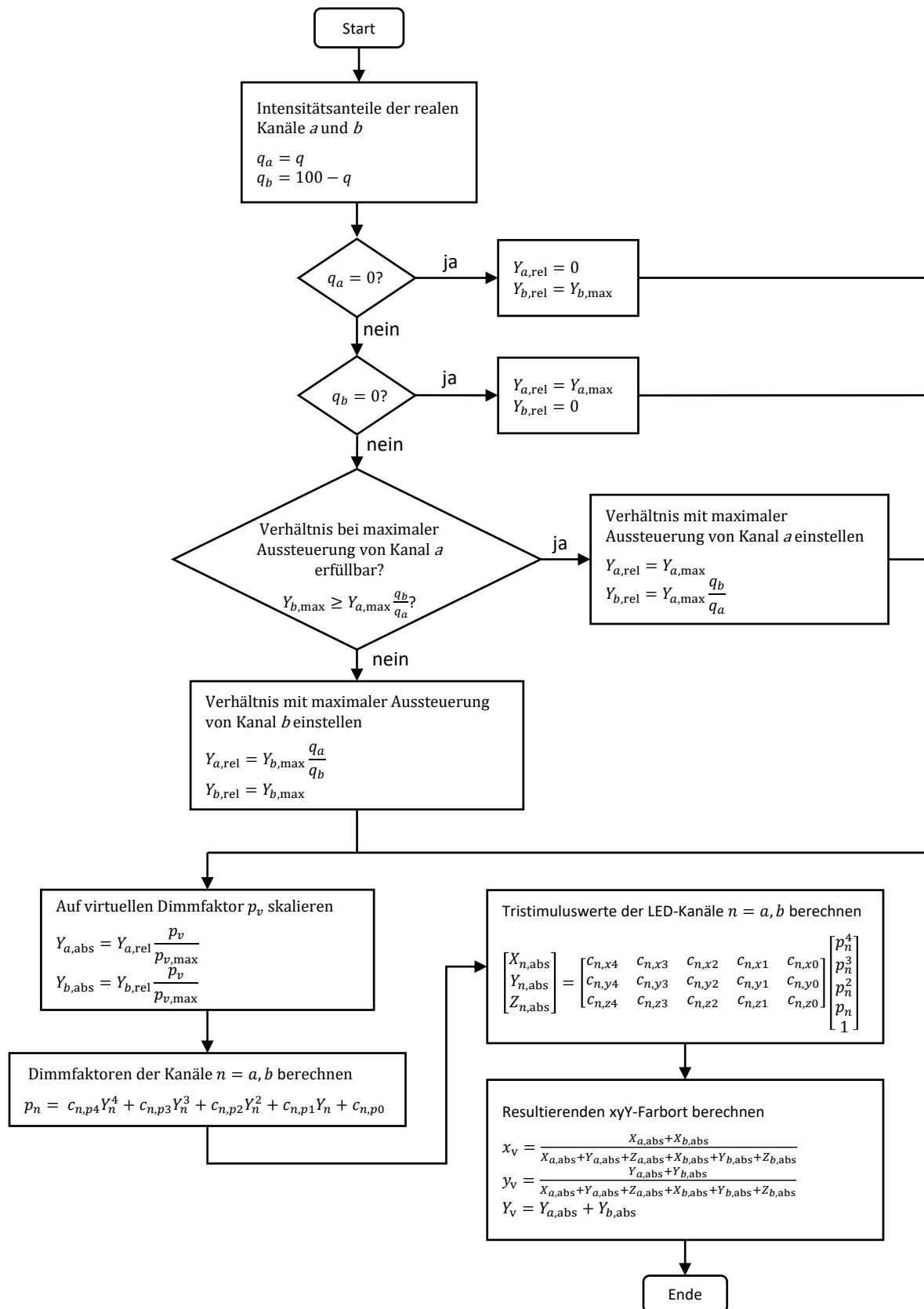


Abbildung 4.13.: Flussdiagramm zur Berechnung des Farborts x_v, y_v und der Intensität Y_v einer virtuellen Valenz, in Abhängigkeit ihres Parametrisierungswerts q und des Dimmwerts p_v . Die virtuelle Valenz basiert auf den zwei LED-Kanälen a und b , deren Dimmwerte p_a, p_b ebenfalls berechnet werden.

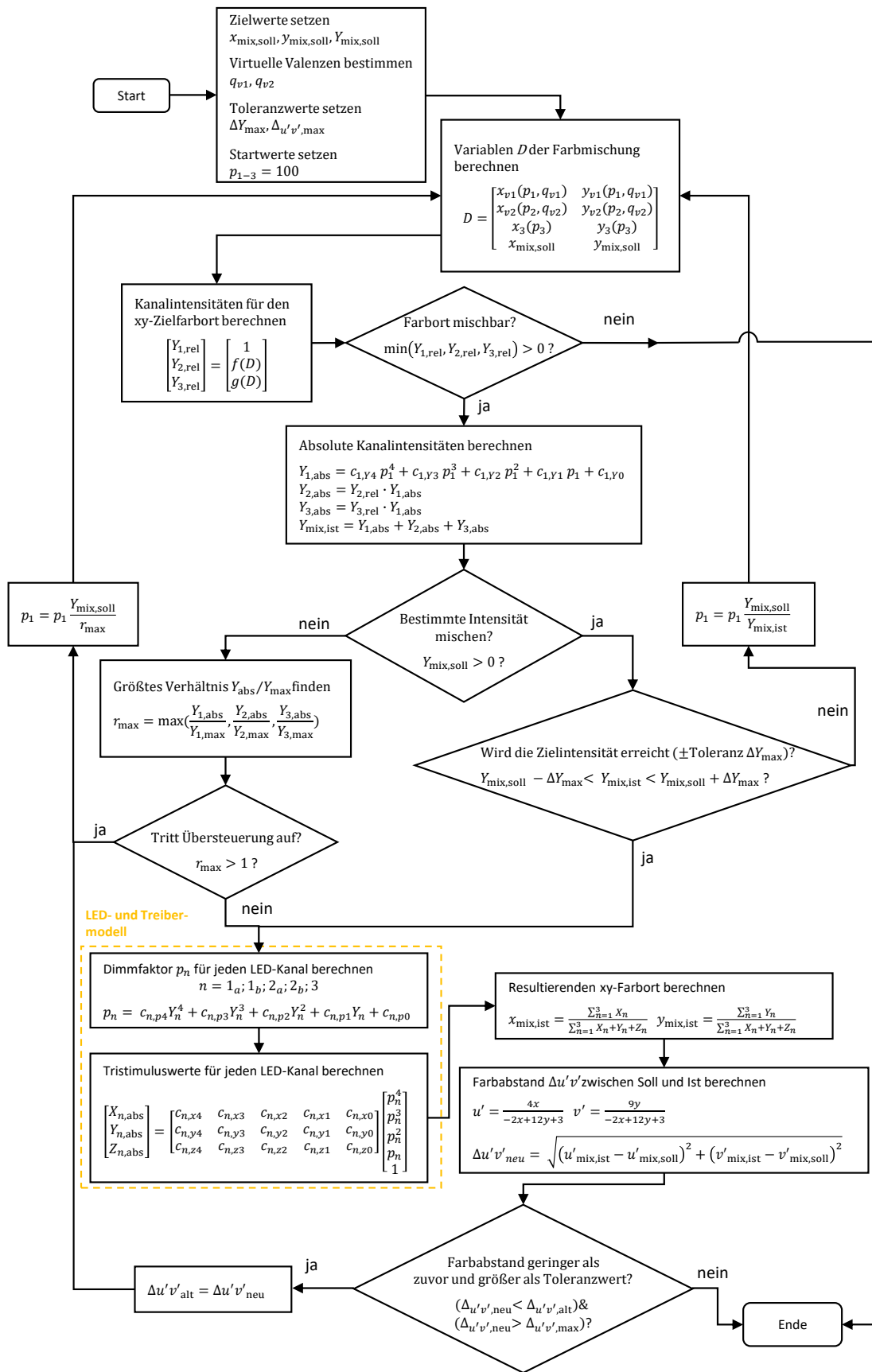


Abbildung 4.14.: Flussdiagramm der 5-Kanal-Mischberechnung mittels virtueller Valenzen und Kompensation der nicht-idealen Dimmkennlinien.

4.2.3. Optimierung von Qualitätsparametern

Mit den Parametrisierungsgrößen q_1, q_2 des 5-Kanal-Farbmischalgorithmus, welche über den Farbort der virtuellen Valenz entscheiden, ist das zugrunde liegende Gleichungssystem des Algorithmus eindeutig definiert. Indem die Mischberechnung für q -Werte des gesamten Wertebereichs $[0,100]$ durchgeführt wird, kann der gesamte Lösungsraum möglicher Spektralverteilungen desselben Farborts quantifiziert betrachtet werden. Hierfür wird das resultierende Spektrum $s_{\text{mix}}(\lambda)$ anhand der LED-Grundspektren berechnet, welche zur Messung der Dimmkennlinien aufgenommen wurden.

$$s_{\text{mix}}(\lambda) = s_{\text{LED},1}(\lambda)Y_{1a} + s_{\text{LED},2}(\lambda)Y_{1b} + s_{\text{LED},3}(\lambda)Y_{2a} + s_{\text{LED},4}(\lambda)Y_{2b} + s_{\text{LED},5}(\lambda)Y_3 \quad (4.22)$$

Die Werte verschiedener Qualitätsmetriken können somit dem Spektrum bestimmter q -Werte zugeordnet werden. Dabei lässt sich analysieren, welche q -Werte das entsprechende Qualitätsmaß optimieren, sodass, bei einer späteren Echtzeit-Mischberechnung innerhalb einer Leuchte, die entsprechenden q -Werte als Vorgabe verwendet werden. Eine solche Analyse wird im Folgenden für das hier verwendete 5-Kanal-System für eine statische und für variable ähnlichste Farbtemperaturen beispielhaft durchgeführt. Hierbei wird der Einfluss auf die in Abschnitt 2.3 beschriebenen Metriken der Lichtqualität untersucht.

Statische ähnlichste Farbtemperatur

Als beispielhafte konstante Farbbedingung wird eine ähnlichste Farbtemperatur von 5003 K (Farbort der Normlichtart D50 [104]) ausgewählt. Die mit diesem Farbort erzeugbaren Spektren werden anhand von sieben Lichtqualitätsparametern analysiert:

- Die melanopische Strahldichte L_{mel} ,
- der Colour Fidelity Index R_f ,
- der CIE Metamerie-Index M_v ,
- die maximale Intensität Y_{max} ,
- die melanopische Effizienz $K_{\text{mel},V}$,
- die Beobachtermetamerie BM anhand des zuvor definierten Beobachtermetamerie-Index
- und der Beobachtermetamerie-Koeffizient C_{BM} .

Die entsprechenden Werte sind in Abb.4.15 in Abhängigkeit der Parametrisierungswerte q_1 und q_2 gezeigt. Um einfache Randbedingungen der q -Werte für die Farbmischung formulieren zu können, ist es von Vorteil, wenn zur Optimierung eines Qualitätsparameters ein q -Wert maximal oder minimal sein muss. Dies ist hier bei der melanopischen Effizienz $K_{\text{mel},V}$ sowie den Beobachtermetamerie zugeordneten Größen BM und C_{BM} der Fall (vgl. Abb.4.15 (e) - (g)). Bei den übrigen Größen ist jeweils für entweder q_1 oder q_2 ein konkreter Wert einzustellen, um die entsprechende Größe zu optimieren (vgl. Abb.4.15 (a) - (d)).

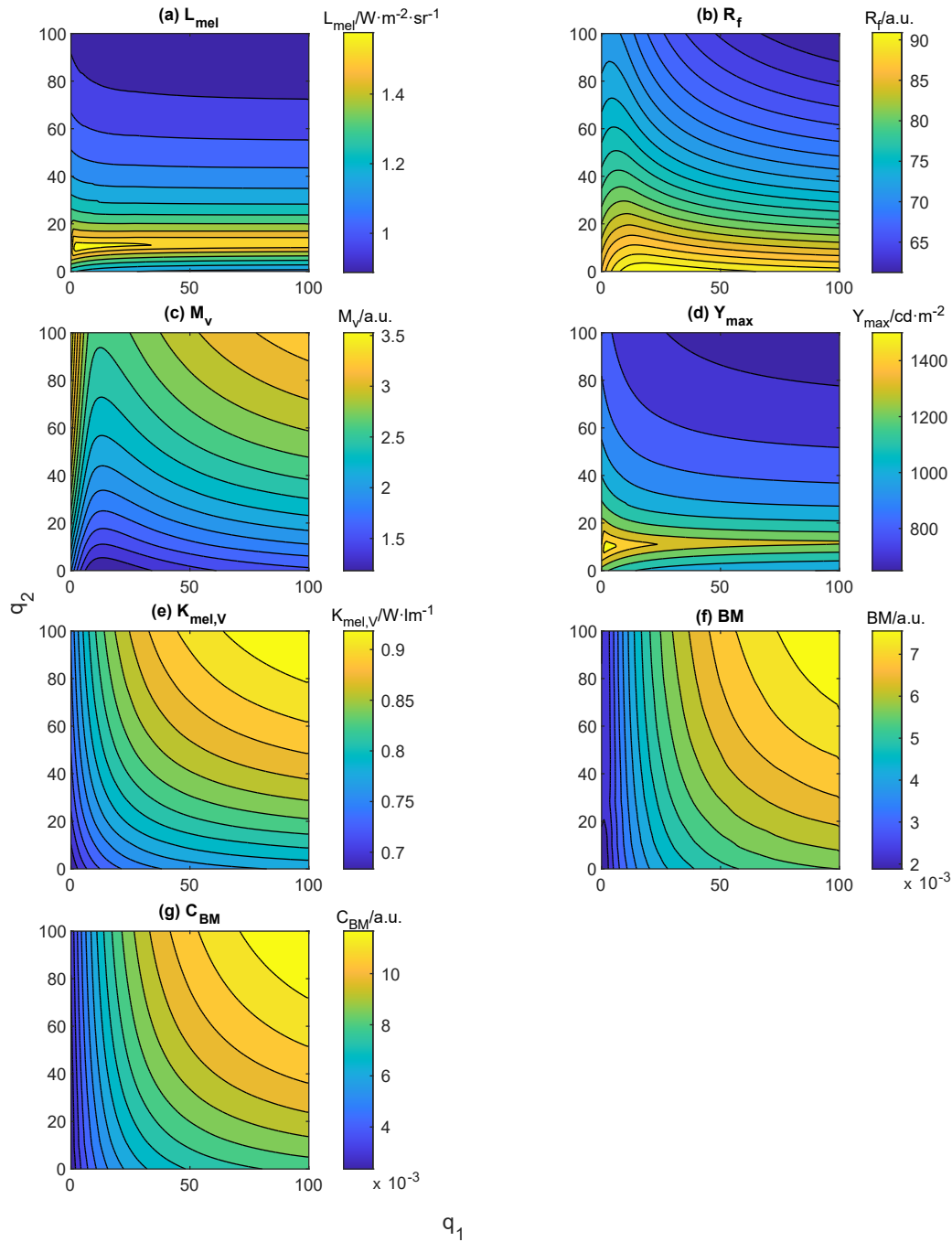


Abbildung 4.15.: Lichtqualitätswerte in Abhängigkeit der Parametrisierungswerte q_1 und q_2 der virtuellen Valenzen bei Erzeugung des CIE 1931 Farborts der Normlichtart D50 (5003 K). (a): Melanopische Strahllichtdichte L_{mel} . (b): Colour Fidelity Index R_f . (c): CIE Metamerie-Index M_v . (d): Maximale erzielbare Intensität Y_{max} . (e): Melanopische Effizienz $K_{\text{mel},v}$. (f): Beobachtermetamerie BM anhand des Beobachtermetamerie-Index. (g): Beobachtermetamerie-Koeffizient C_{BM} .

Anhand einer solchen Betrachtung bei einer statischen Farbbedingung lassen sich die Korrelationen der unterschiedlichen Qualitätsmetriken erkennen. In dem gezeigten Fall geht ein minimaler Metamerie-Index M_v (Beleuchtungsmetamerie) mit einer maximalen Farbwiedergabe R_f einher. Die Beobachtermetamerie, gemessen mit dem Beobachtermetamerie-Index, zeigt einen nahezu identischen Verlauf zu dem Beobachtermetamerie-Koeffizient. Somit ließe sich in diesem Fall die Beobachtermetamerie auch ohne Kenntnis des Referenzspektrums abschätzen, jedoch nur relativ – also ohne Kenntnis des durch-

schnittlich wahrgenommenen Farbabstands.

Die maximale melanopische Strahldichte L_{mel} korreliert mit der maximal möglichen Leuchtdichte Y_{max} . Bezogen auf eine konstante Leuchtdichte zeigt die melanopische Effizienz K_{mel} eine Variabilität von 0,683 W/lm bis 0,934 W/lm, wobei eine maximale melanopische Stimulierung mit einem maximalen Beobachtermetamerie-Effekt einhergeht (vgl. Abb.4.15 (e) und (f)).

Neben den Korrelationen der Qualitätsmetriken ist eine solche Analyse bei dem Design einer Leuchte hilfreich, da ersichtlich wird, zu wieviel Prozent die LEDs eines bestimmten Kanals zum Erreichen des gezeigten Werts nötig sind. Beispielsweise erreicht die maximal erzielbare Leuchtdichte bei $q_2 \approx 10$ den höchsten Wert, dementsprechend werden 10 % der Leuchtdichte des virtuellen Kanals v_2 von roten LEDs erzeugt und 90 % von warmweißen LEDs.

Variable ähnlichste Farbtemperatur

Für die Realisierung eines adaptiven Beleuchtungssystems, welches bei verschiedenen ähnlichsten Farbtemperaturen die Lichtqualität optimieren kann, ist die Kenntnis der nötigen Verläufe der q -Werte für verschiedene ähnlichste Farbtemperaturen nötig. Das Ergebnis einer entsprechenden Simulation für die hier verwendeten fünf LED-Kanäle ist in Abb. 4.16 gezeigt. Hierbei werden Farbörter auf dem Planckschen Kurvenzug von 2700 K bis 10 000 K gemischt. Da die q -Werte das Farbgamut beeinflussen, sind ähnlichste Farbtemperaturen unter 3200 K nur ab bestimmten Werten für q_2 mischbar (vgl. hellgrüne Flächen in Abb. 4.16).

Hier werden für die Berechnung des Beobachtermetamerie-Index die entsprechenden Strahlungsspektren eines idealen schwarzen Körpers als Referenz verwendet (vgl. Abschnitt 3.1.1), wodurch die Beobachtermetamerie bezogen auf natürliche Tageslichtspektren abweichen kann (vgl. Abb. 3.11). Da der CIE Metamerie-Index für nur vier Referenzlichtarten definiert ist, wird er in dieser Analyse nicht mit einbezogen. Die melanopische Effizienz hingegen wird im Gegensatz zu den anderen Größen sowohl auf ihr Maximum als auch ihr Minimum untersucht, um den Verlauf des melanopischen Kontrasts zu ermöglichen. Bevor die resultierenden Größen diskutiert werden, müssen einzelne Verläufe der Optimierung genauer untersucht werden.

Sowohl der Verlauf der maximalen melanopischen Strahldichte L_{mel} als auch die des maximalen Colour Fidelity Index R_f und der minimalen Beobachtermetamerie zeigen in bestimmten Bereichen der ähnlichsten Farbtemperatur eine starke Änderung des optimalen q -Werts (vgl. Abb. 4.16 (b), (c), (f)). Aufgrund der Korrelation der unterschiedlichen Qualitätsmetriken kann eine solche sprunghafte Änderung erkennbar sein, beispielsweise durch die Änderung der Farbwiedergabe eines Stoffes, dessen Reflektionsspektrum maximal im Bereich der Spitzenwellenlängenänderung reflektiert.

Aus diesem Grund wird in einer weiteren Analyse eine Korrektur der optimalen q -Werte durchgeführt, um sprunghafte Änderungen zu vermeiden. Um die q_1 -Verläufe korrigieren zu können, werden die drei Qualitätsparameter in Abhängigkeit von q_1 gezeigt, während für q_2 die Werte des zuvor ermittelten Verlaufs verwendet werden (vgl. Abb. 4.17 (a) bis (c)). Durch eine Verschiebung der für das Optimum formulierten q_1 -Werte wird ein Verlauf ermöglicht, bei dem eine Änderung der ähnlichsten Farbtemperatur nur geringe Änderungen der virtuellen Valenz verlangt. Dabei ergeben sich nur geringfügige Änderungen der Qualitätswerte, sodass die korrigierten Verläufe ebenfalls als Optimierung betrachtet werden können (vgl. Abb. 4.17 (d) bis (f)). Bei der minimalen Beobachtermetamerie zeigt auch der Verlauf von q_2 zwischen 5000 K und 6000 K einen sprunghaften Anstieg, welcher auf die gleiche Weise

korrigiert wird (vgl. Abb. 4.17 (g) bis (h)).

Bei diesen Korrekturen wird ausgenutzt, dass das Spektrum von q_1 bei der Erzeugung von Licht mit niedrigen ähnlichsten Farbtemperaturen nur einen geringen Anteil ausmacht, wodurch der Einfluss auf die Qualitätsmerkmale dort gering ist. Ebenso erlaubt der umgekehrte Fall eines geringen Mischanteils von q_2 bei der Erzeugung von Licht mit hoher ähnlichster Farbtemperatur in entsprechenden Bereichen die Korrektur des optimalen Verlaufs.

Ein Vergleich der Verläufe der optimalen q -Werte für die verschiedenen Qualitätsparameter zeigt, dass nur bei der Optimierung auf eine maximale melanopische Effizienz die virtuellen Valenzen maßgeblich durch die schmalbandigen LED-Spektren realisiert werden ($(q_1, q_2) \approx 100$). Die übrigen Größen werden optimiert, wenn die virtuellen Valenzen zum größeren Teil aus den breitbandigen Spektren der leuchtstoffkonvertierten LEDs gebildet werden (niedrige q -Werte).

Die Minima und Maxima der melanopischen Effizienz zeigen, dass bei 10 000 K eine Steigerung von 41 % (von 0,92 zu 1,30) möglich ist, während im Bereich wärmerer Weißtöne bei 2700 K eine Steigerung von 27 % (von 0,47 zu 0,59) erreicht wird. Somit kann vor allem bei den kühleren Weißtönen der biologisch wirksame Strahlungsanteil variiert werden, ohne eine Änderung der Leuchtdichte zu bewirken. Dies gilt jedoch in diesem Beispiel nur, wenn das System nicht bei maximaler Leuchtdichte betrieben wird, da diese stark von den q -Werten abhängt.

Anhand der teilweise gegensätzlichen Abhängigkeiten der verschiedenen optimierten Qualitätsparameter von den q -Werten ist ersichtlich, dass in der konkreten Anwendung eine Priorisierung vorgenommen werden muss. Diese kann durch entsprechende Programmierung dynamisch geändert werden. Hierfür müssen die in Tabelle 4.2 gezeigten q -Werte, welche der vorangegangenen Analyse entstammen, als LUT in einer Leuchte gespeichert werden. Zur Laufzeit kann zwischen den Werten, je nach ähnlichster Farbtemperatur, interpoliert werden. Ebenso kann entsprechend der Priorisierung und gegebenenfalls einer Gewichtung zweier konkurrierender Qualitätsparameter zwischen den entsprechenden Werten interpoliert werden. Die fett gedruckten Werte der LUT können auch als Bedingung formuliert werden, dass die Farbmischung den kleinstmöglichen Wert einer erfolgreichen Farbmischberechnung verwendet. Ebenso können die Werte von 100 als Bedingung des größtmöglichen Werts einer Farbmischung im Algorithmus implementiert werden. Der Vorteil hierbei ist, dass somit das Gamut nicht durch fixe q -Werte limitiert wird. Beispielsweise wird hier mit dem Wert $q_2 = 22$ bei 2700 K das Gamut so begrenzt, dass Farbörter unterhalb des Planckschen Kurvenzugs bei gleicher ähnlichster Farbtemperatur nicht mischbar sind. Durch eine Formulierung als kleinst möglicher Wert kann in der Farbmischberechnung der q_2 -Wert solange erhöht werden, bis das Gamut groß genug ist, um den entsprechenden Farbort zu beinhalten.

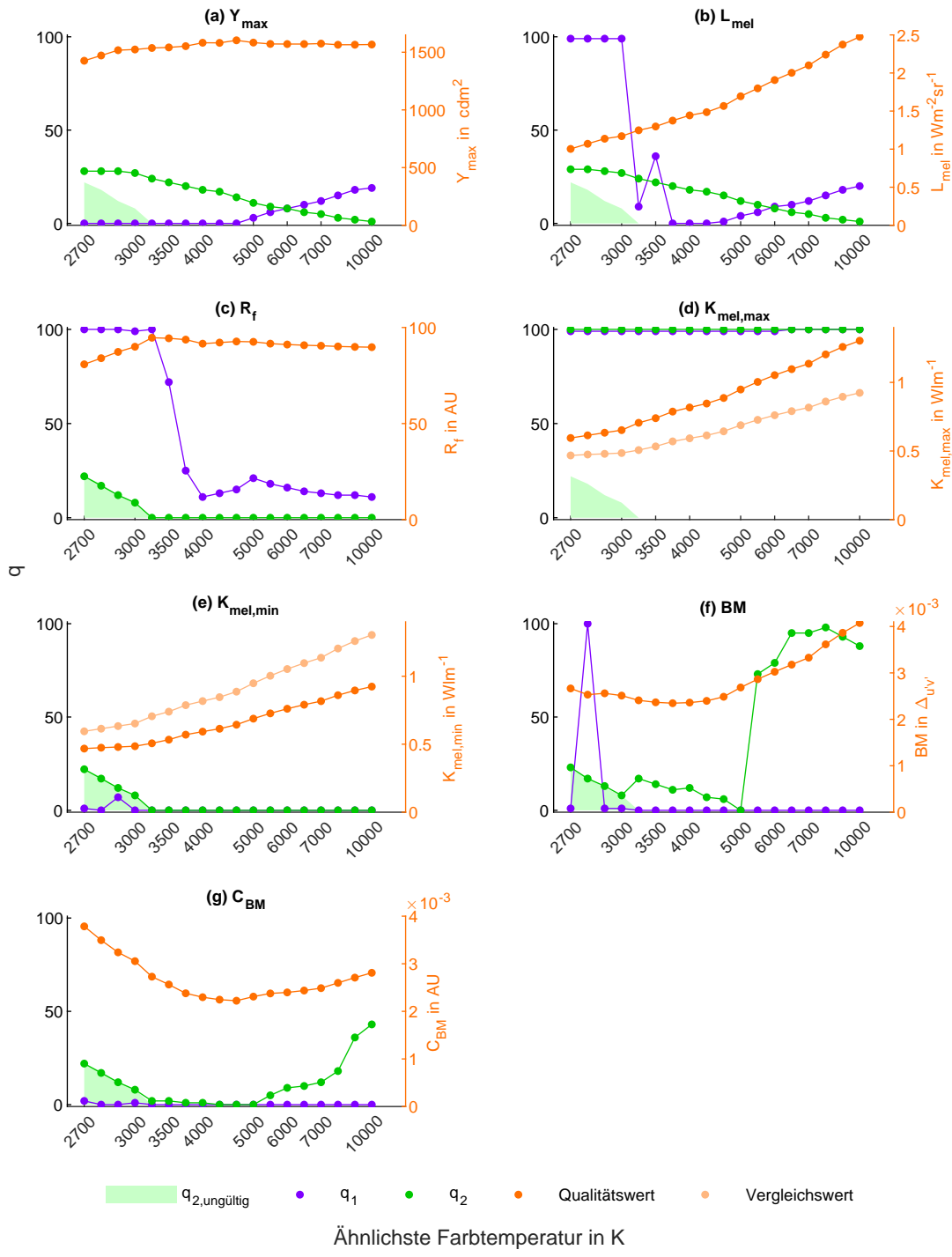


Abbildung 4.16.: Verlauf der Parametrisierungswerte q_1 und q_2 der virtuellen Valenzen zur Optimierung von Lichtqualitätsgrößen für ähnlichste Farbtemperaturen von 2700 K bis 10 000 K. (a): Maximal erzielbare Intensität Y_{\max} . (b): Melanopische Strahlendichte L_{mel} . (c): Colour Fidelity Index R_f . (d): Maximale melanopische Effizienz $K_{\text{mel,max}}$. (e): Minimale melanopische Effizienz $K_{\text{mel,min}}$. (f): Beobachtermetamerie BM ermittelt anhand des Beobachtermetamerie-Index. (g): Beobachtermetamerie-Koeffizient C_{BM} . Wertebereiche von q_2 , welche einen zu kleinen Farbgamut zur Erzeugung der verglichenen ähnlichsten Farbtemperatur bewirken, sind als grüne Fläche gekennzeichnet ($q_{2,\text{ungültig}}$).

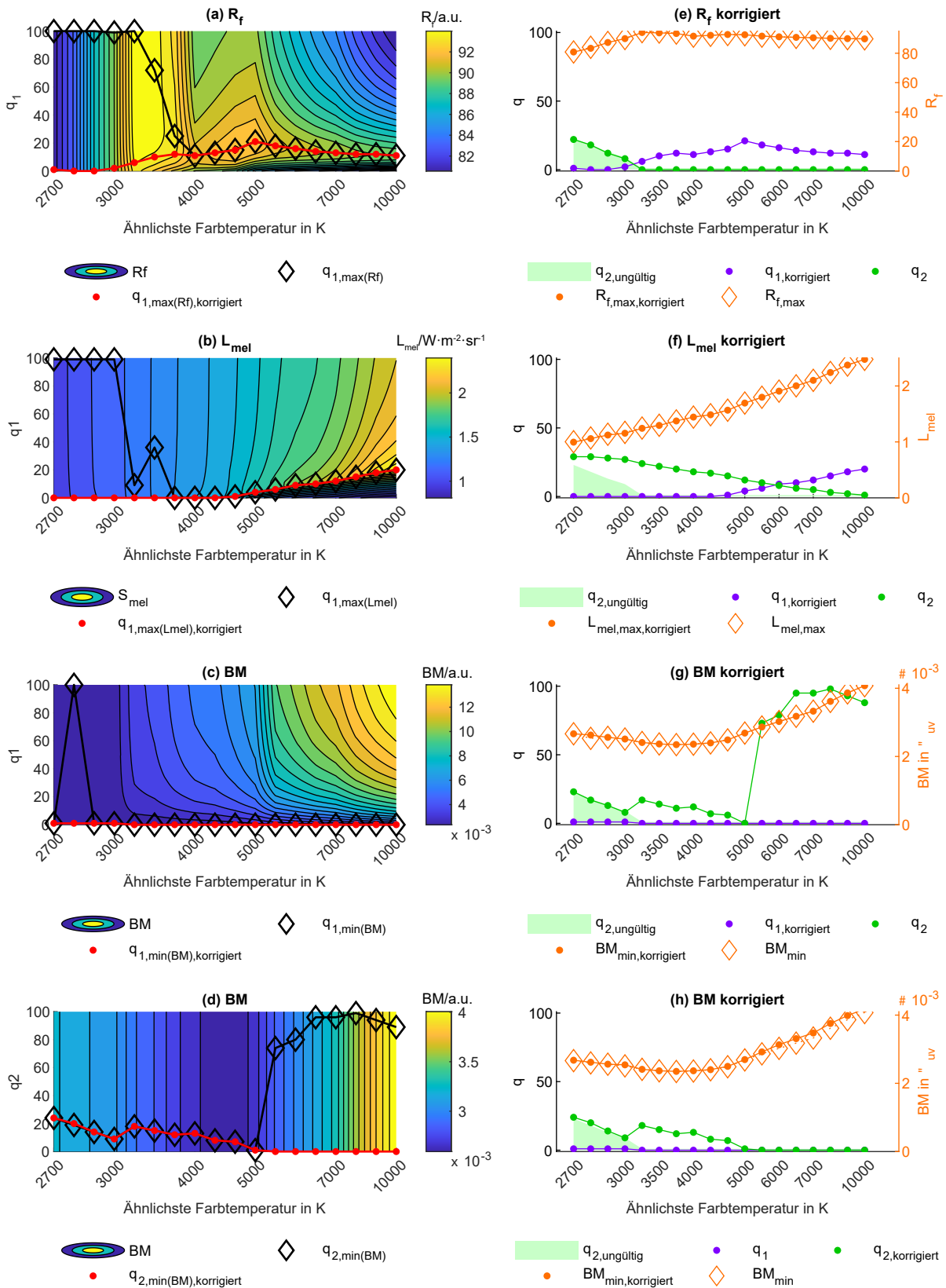


Abbildung 4.17.: (a) - (d): Verlauf von Qualitätsparametern in Abhängigkeit von q_1 bzw. q_2 und der ähnlichsten Farbtemperatur, während für den anderen q -Wert der für die Optimierung berechnete Verlauf eingestellt ist. Der jeweilige Verlauf wird für den maximalen Colour Fidelity Index R_f (a), die maximale melanopische Strahlendichte L_{mel} (b) und die minimale Beobachtermetamerie BM (c) und (d) angepasst, um große Änderungen bei wechselnder Zielfarbe zu verhindern. Die resultierenden Verläufe der Qualitätsparameter werden hierdurch nur geringfügig verändert (e) - (h).

Tabelle 4.2.: LUT der Parametrisierungswerte der virtuellen Valenzen zur Optimierung von Qualitätsparametern. Fettgedruckte Werte können als Randbedingung des kleinstmöglichen q -Werts der Farbmischung formuliert werden, Werte von 100 als größtmöglicher Wert der Farbmischung.

Ähnlichste Farbtemperatur	Y_{\max}		L_{mel}		R_f		$K_{\text{mel,max}}$		$K_{\text{mel,min}}$		BM		C_{BM}	
	q_1	q_2	q_1	q_2	q_1	q_2	q_1	q_2	q_1	q_2	q_1	q_2	q_1	q_2
2700 K	0	28	0	29	1	22	99	100	1	22	1	23	2	22
2800 K	0	28	0	29	0	17	99	100	0	17	1	17	0	17
2900 K	0	28	0	28	0	12	99	100	7	12	1	13	0	12
3000 K	0	27	0	27	2	8	99	100	0	8	1	8	1	8
3300 K	0	24	0	24	6	0	99	100	0	0	0	17	0	2
3500 K	0	22	0	22	10	0	99	100	0	0	0	14	0	2
3800 K	0	20	0	20	12	0	99	100	0	0	0	11	0	1
4000 K	0	18	0	18	11	0	99	100	0	0	0	12	0	1
4200 K	0	17	0	17	13	0	99	100	0	0	0	7	0	0
4500 K	0	14	1	15	15	0	99	100	0	0	0	6	0	0
5000 K	3	11	4	12	21	0	99	100	0	0	0	0	0	0
5500 K	6	9	6	10	18	0	99	100	0	0	0	73	0	5
6000 K	8	8	9	8	16	0	99	100	0	0	0	79	0	9
6500 K	10	6	10	6	14	0	100	100	0	0	0	95	0	10
7000 K	12	5	12	5	13	0	100	100	0	0	0	95	0	12
8000 K	15	3	15	3	12	0	100	100	0	0	0	98	0	18
9000 K	18	2	18	2	12	0	100	100	0	0	0	93	0	36
10 000 K	19	1	20	1	11	0	100	100	0	0	0	88	0	43

4.2.4. Zusammenfassung (V)

Es wurde eine Methode vorgestellt, bei welcher die Mischberechnung eines 5-Kanal-LED-Systems zu einem eindeutig lösbareren 3-Kanal-System vereinfacht wird. Hierfür werden jeweils zwei physische LED-Kanäle zu einem virtuellen LED-Kanal kombiniert. Dabei wird das Mischverhältnis über eine Variable definiert, welche gleichzeitig Verwendung findet, um den Lösungsraum der möglichen Mischverhältnisse zu parametrisieren. Dadurch lassen sich die Qualitätsmetriken vereinfacht analysieren, da statt der Abhängigkeit von einer Spektralverteilung mit beispielsweise 401 Werten (380 nm bis 780 nm in 1 nm-Schritten) nur die Abhängigkeit von zwei Werten betrachtet werden muss.

Während diese Methode auch für eine größere Anzahl an LED-Kanälen verwendet werden kann, wird sie hier exemplarisch auf ein 5-Kanal-System angewendet, da der hieraus resultierende zweidimensionale Lösungsraum eines Zielfarbborts anschaulich analysiert werden kann.

Dies wurde am Beispiel einer statischen Zielfarbe demonstriert, wobei die zusätzliche Dimension des einzelnen Qualitätsparameters zu einer grafischen Darstellung von 3-dimensionalen Daten führt. Durch den Vergleich der Verläufe von verschiedenen Qualitätsparametern können die unterschiedlichen und

teilweise konkurrierenden Abhängigkeiten erkannt werden, wodurch eine solche Analyse auch für den Entwurf eines LED-Systems hilfreich ist.

Um die optimalen Mischwerte der virtuellen Valenzen für eine variable ähnlichste Farbtemperatur zu erhalten, werden deren Verläufe in Abhängigkeit des Zielfarborts analysiert. Hierbei kann die Suche nach maximalen oder minimalen Werten der Qualitätsparameter sprunghafte Änderungen der virtuellen Valenzen erzeugen. Diese können korrigiert werden, um Artefakte in der dynamischen Beleuchtung zu vermeiden. Die ermittelten Mischwerte der virtuellen LED-Kanäle können als LUT im Mikrocontroller einer adaptiven Leuchte gespeichert werden.

Des Weiteren wird gezeigt, wie eine Implementierung eines solchen Farbmischalgorithmus zu realisieren ist, indem die iterative 3-Kanal-Berechnung entsprechend erweitert wird. Da die Analyse zur Bestimmung der optimalen Parametrisierungswerte zum Entwicklungszeitpunkt geschieht, kann zum Ausführungszeitpunkt auf die rechenintensiven Spektraldaten verzichtet werden. Dadurch ist dieser Algorithmus auf gängigen Mikrocontrollern in Echtzeit ausführbar, was erfolgreich durch eine Implementierung in C getestet wurde.

Für zukünftige Entwicklungen von adaptiven LED-Leuchten mit Sensorfeedback lässt sich dieses Verfahren erweitern, indem untersucht wird inwiefern die optimalen Parametrisierungswerte ihre Gültigkeit behalten, wenn sich das Strahlungsspektrum der LEDs beispielsweise aufgrund von Alterungsprozessen verändert.

5. Fazit und Ausblick

Mit der Motivation, verschiedene Aspekte der adaptiven LED-Beleuchtung zu untersuchen und zu verbessern, werden in dieser Arbeit die Beobachtermetamerie modelliert und Algorithmen vorgestellt, welche die Farbmischung und spektrale Optimierung für mehrkanalige LED-Systeme beinhalten. Aufgrund der Relevanz von Tageslicht für den Menschen wird dieses natürliche Licht als Referenz für die hier vorgestellten Beobachtermetamerie-Analysen verwendet. Hierfür wurde mittels verschiedener Tageslichtmodelle ein umfangreicher Datensatz an Spektralverteilungen generiert, welcher repräsentativ für alle potentiell auftretenden Tageslichtspektren Verwendung findet. Dabei unterscheiden sich die Spektraldaten, je nach Quelle, bezogen auf das verwendete Wellenlängenintervall und die spektrale Auflösung (5 nm bis 1 nm), wodurch ein geringer Einfluss dieser Unterschiede auf den simulierten Farbfehler durch Beobachtermetamerie bei einem Vergleich mit künstlichem Tageslicht gezeigt wurde. Die Berechnungen der Beobachtermetamerie basieren auf 1000 simulierten individuellen Beobachterfunktionen, welche unter Verwendung des Modells von Asano et al. [33] generiert wurden. Zur Berechnung des Beobachtermetamerie-Effekts, welcher sich in einem individuell wahrgenommenen Farbfehler äußert, werden zwei unterschiedliche Berechnungsverfahren vorgestellt. Die Berechnung in jedem individuellen Farbraum eines individuellen Beobachters erlaubt nur den Vergleich der jeweiligen ermittelten Farbabstände. Wird für jeden Beobachter ein individuelles Metameriepektrum bezogen auf ein gemeinsames Referenzspektrum berechnet, so können all diese Spektren in einem einzelnen Referenzfarbraum betrachtet werden. Es wurde gezeigt, dass beide Berechnungsmethoden das gleiche Ergebnis erzielen, wenn der durchschnittliche Farbfehler berechnet wird. Die Ergebnisse des maximalen Farbfehlers unterscheiden sich jedoch leicht. Da hier der durchschnittliche Farbfehler als Messgröße der Beobachtermetamerie verwendet wird, können beide Berechnungsverfahren als Referenz betrachtet werden.

Solche Berechnungen benötigen jedoch zahlreiche Spektralwertfunktionen, was ihre Anwendung erschwert. Deshalb werden drei Methoden aus der Literatur zur Definition eines Beobachtermetamerie-Index modifiziert und einer Korrelationsanalyse unterzogen. Hierfür werden eine Vielzahl an Metameriepaaren mit unterschiedlich starken Beobachtermetamerie-Fehlern simuliert, indem verschiedene drei-Kanal LED-Spektren pro Tageslichtreferenz und Beobachter verwendet werden. Hieraus geht hervor, dass der Ansatz von Nayatani et al. [89] mit 95,67 % (2°-Sichtfeld) und 98,09 % (10°-Sichtfeld) die höchste Korrelation zu den Referenzberechnungen hat. Bei dieser Methode werden Abweichungsfunktionen mittels Singulärwertzerlegung der individuellen Beobachterfunktionen gebildet. Die durchschnittlichen individuellen Beobachterfunktionen werden als Referenzbeobachter definiert. Durch die Addition der Abweichungsfunktionen zu denen des Referenzbeobachters, wird der Abweichungsbeobachter definiert. Der von dem Abweichungsbeobachter wahrgenommene Farbunterschied zwischen zwei Spektren eines Metameriepaars verläuft näherungsweise linear zu dem durchschnittlichen Farbfehler, welcher mit der Referenzberechnungsmethode ermittelt wird, und wird deshalb als Beobachtermetamerie-Index vorgeschlagen. Mittels einer Regression kann der durchschnittliche Farbfehler aus

ihm berechnet werden. Somit sind statt den hier verwendeten 1000 Spektralwertfunktionen nur noch zwei Spektralwertfunktionen (die Abweichungsfunktionen und die des Referenzbeobachters) zur Berechnung der Beobachtermetamerie nötig. Dadurch können Farbmischberechnungen, bei denen Spektraldaten vorhanden sind, diesen Effekt berücksichtigen und mit minimiertem Rechenaufwand in adaptiven Beleuchtungssystemen optimieren.

Die hierbei aufgestellten Abweichungsfunktionen beschreiben die interpersonelle Variation des Farbstimulus, welche von einem einzelnen Strahlungsspektrum ausgeht. Um hieraus eine einzelne skalare Größe zu extrahieren, wird ein Beobachtermetamerie-Koeffizient eingeführt. Er berechnet sich aus dem Farbabstand der Tristimulus-Werte des Referenzbeobachters und denen des Abweichungsbeobachters. Es wird gezeigt, dass die Differenz zweier Koeffizienten, welche aus der Anwendung auf ein Metameriepaar aus Tageslicht- und LED-Spektrum hervorgehen, mit deren Beobachtermetamerie-Effekt korreliert. Allerdings ist diese Korrelation geringer als bei dem Beobachtermetamerie-Index, weswegen dieser zu bevorzugen ist.

Ist das Tageslicht-Referenzspektrum jedoch unbekannt, kann anhand des Beobachtermetamerie-Koeffizienten der Beobachtermetamerie-Effekt optimiert werden, indem ein LED-Spektrum gemischt wird, welches diesen Koeffizient minimiert. Hierbei ist es möglich, dass dadurch ein LED-Spektrum ausgewählt wird, welches einen höheren Beobachtermetamerie-Effekt erzeugt, als es bei Kenntnis des Referenzspektrums möglich wäre. Dieser Optimierungsfehler ist, bezogen auf die hier verwendeten LED-Grundspektren und Tageslicht als Referenz, abhängig von der ähnlichsten Farbtemperatur. Hierbei bewegt sich der durchschnittliche Optimierungsfehler im Bereich von $\Delta_{u'v',10} \approx 1 \times 10^{-3}$ und erreicht noch niedrigere Werte bei hohen ähnlichsten Farbtemperaturen ($>20\,000\text{ K}$). Dabei muss beachtet werden, dass Tageslichtfarben in diesem Bereich mit den verwendeten LED-Grundspektren nicht mit vergleichbar geringen Beobachtermetamerie-Fehlern erzeugt werden können, wie dies für niedrigere ähnlichste Farbtemperaturen der Fall ist. Beispielsweise wird der geringste Farbfehler mit $\Delta_{u'v',10} = 0,476 \times 10^{-3}$ bei 3549 K erreicht, während oberhalb von $20\,000\text{ K}$ der geringste Farbfehler um den Faktor 10 größer ist. Zukünftige Untersuchungen können hierauf aufbauen und können durch eine höhere Anzahl von unterschiedlichen LED-Grundspektren im blauen Spektralbereich prüfen, ob es möglich ist auch diese hohen ähnlichsten Farbtemperaturen mit geringeren individuellen Farbfehlern zu mischen. Dieser Farbbereich des Tageslichts ist jedoch vor allem bei zunehmendem Abstand zum Planckschen Kurvenzug von einer hohen interpersonellen Variabilität des Farbstimulus geprägt. So beträgt der Beobachtermetamerie-Koeffizient entsprechender Tageslichtspektren einen bis zu 10-mal höheren Wert als Spektren mit geringer ähnlichster Farbtemperatur.

Neben der Anwendung in der adaptiven LED-Beleuchtung kann der Beobachtermetamerie-Koeffizient auch in der Forschung zu der biologischen Wirksamkeit oder der Nutzerpräferenz von Beleuchtungssituationen Verwendung finden, um eine spektral abhängige individuelle Varianz der Ergebnisse zu erklären.

In einem speziell für den Vergleich von natürlichem Tageslicht und LED-Licht entwickelten Versuchsaufbau wurden von 59 Testpersonen Farbabgleichsversuche durchgeführt. Aufgrund von Farbverschiebungen des Tageslichts (Referenzseite) während der Versuchsdurchführung konnte nicht bei allen Versuchen ein Abgleichsfarbbort in der Auswertung bestimmt werden. Bei zehn Versuchen ließ sich der Schwerpunkt des Abgleichsfarbborts erfolgreich bestimmen und lag dabei innerhalb der Punktwolke, welche die Abgleichsfarbbörter von 1000 simulierten Beobachtern darstellt. Diese Stichprobe bestätigt somit das individuelle Beobachtermodell von Asano et al. [33] auf dem der hier definierte Beobachterme-

tamerie-Index und -Koeffizient basiert.

Der softwaregesteuerte Versuchsablauf regelte bei den Versuchen zunächst auf gleiche Leuchtdichtewerte der beiden zu vergleichenden Kammern. Die hierbei vom Probanden wahrgenommenen Helligkeitsunterschiede wurden durch das Einstellen eines Offsets korrigiert und in der Auswertung nicht berücksichtigt. Zukünftige Untersuchungen können dies aufgreifen, um Modelle der Helligkeitswahrnehmung [113], [114], [132], [161] im Direktvergleich zu Tageslicht zu untersuchen. Ebenso lassen sich Modelle zur Präferenz [116]–[118] und individuellen Wahrnehmung beispielsweise von Gedächtnisfarben [133] hier untersuchen, da die Kammern genug Platz bieten, um farbige Objekte dort zu platzieren.

Neben den Untersuchungen zur Beobachtermetamerie widmet sich die vorliegende Arbeit der echtzeitfähigen Farbmischung von mehrkanaligen LED-Leuchten. Zunächst werden die Mischberechnungen eines 3-Kanal-Systems vorgestellt und dabei die Nichtlinearitäten in den Übertragungskennlinien zwischen den Dimmwerten und den Tristimulus-Werten jedes LED-Kanals kompensiert. Es wird an zwei exemplarischen 3-Kanal-Systemen (R-G-B und KW-WW-G) gezeigt, dass hierbei eine signifikante Steigerung in der Genauigkeit bei Farb- und LeuchtdichteEinstellung erzielt wird. Die gemessene Anzahl der Iterationen liegt zwischen 4 und 11 bei den vorgestellten Tests. Implementierungen auf unterschiedlichen Systemen (PC, Mikrocontroller) führten diese Berechnungen in Echtzeit ohne wahrnehmbare Latenz zwischen Nutzereingabe und Lichteinstellung aus.

Durch eine Steigerung der Kanalanzahl können verschiedene Spektren desselben Farborts erzeugt werden. Die damit verbundene Möglichkeit der Optimierung spektraler Lichtqualitätswerte wird anhand eines 5-Kanal-Systems gezeigt. Hierfür wird ein neues Verfahren vorgestellt, welches durch die Definition von virtuellen LED-Kanälen gekennzeichnet ist, welche jeweils aus zwei physischen LED-Kanälen bestehen. Deren Leuchtdichteverhältnis bestimmt die Farbe und Leuchtdichte des virtuellen Kanals und kann mit einer einzelnen Variablen beschrieben werden. Diese Variable wird gleichzeitig genutzt, um den Lösungsraum des unterbestimmten Gleichungssystems der Farbmischberechnung zu parametrisieren und die Verläufe verschiedener Qualitätsmetriken zu analysieren. Diese Analyse wird exemplarisch für ein 5-Kanal-System (R-G-B-KW-WW) vorgeführt. Hierbei werden zwei virtuelle LED-Kanäle definiert, KW-B und WW-G, wodurch ein eindeutig lösbares 3-Kanal-System entsteht. Der zuvor gezeigte 3-Kanal-Algorithmus wird für die Berechnung mit virtuellen LED-Kanälen angepasst und in einem Flussdiagramm präsentiert.

Anhand der beiden Parametrisierungswerte werden die melanopische Strahldichte L_{mel} , der Colour Fidelity Index R_f , der CIE (Beleuchtungs-) Metamerie-Index M_v , die maximale Intensität Y_{max} , die melanopische Effizienz $K_{mel,V}$, die Beobachtermetamerie BM anhand des zuvor definierten Beobachtermetamerie-Index und des Beobachtermetamerie-Koeffizienten C_{BM} bei einer statischen Farbbedingung von 5003 K (Farbort der Normlichtart D50) analysiert. Hierbei lässt sich erkennen, welche Größen gemeinsam optimiert werden können und bei welchen dies nicht der Fall ist. So geht ein minimaler CIE Metamerie-Index mit einem maximalen Colour Fidelity Index R_f einher. Der Beobachtermetamerie-Index verläuft ähnlich wie der Beobachtermetamerie-Koeffizient. Bei der minimalen Beobachtermetamerie ist auch die melanopische Effizienz $K_{mel,V}$ am geringsten. Soll diese maximiert werden, wächst auch der individuelle Farbfehler durch Beobachtermetamerie um das 4-fache.

Solche Erkenntnisse können in den Entwicklungsprozess einer Leuchte einfließen, während für die Ausführung letztendlich nur die Parametrisierungswerte gespeichert werden müssen, bei der eine Größe ihr Optimum erreicht. Dies wird ausführlicher für eine variable ähnlichste Farbtemperatur von 2700 K

bis 10 000 K vorgeführt. Hierbei zeigen die optimalen Parametrisierungswerte (je nach Qualitätsparameter) Verläufe, welche teilweise sprunghafte Änderungen beinhalten. Bei einem dynamischen Verlauf der Lichtfarbe könnten solche sprunghaften Änderungen der virtuellen LED-Kanal-Farbe potentiell erkennbar sein anhand der Farbwiedergabe eines Stoffes, deren Reflexionsspektrum maximal ist im Bereich der spektralen Änderung des virtuellen Kanals. Deswegen werden diese sprunghaften Verläufe korrigiert, wodurch in dem verwendeten Beispiel nur minimale Änderungen der Lichtqualität hervorgerufen werden. Die dadurch bestimmten Parametrisierungswerte werden als Tabelle präsentiert, welche beispielhaft für die hier verwendeten LED-Kanäle, als LUT im Speicher einer adaptiven LED-Leuchte die Optimierung der Lichtqualität ermöglicht. Eine Implementierung auf unterschiedlichen Mikrocontrollern zeigte auch hier keine wahrnehmbare Latenz zwischen der Nutzereingabe und der Lichteinstellung.

Somit ermöglicht dieser Algorithmus der Farbmischung die echtzeitfähige Optimierung von adaptiven LED-Systemen. Da hierbei die Leuchtdichteverhältnisse zum Zeitpunkt der gewünschten Lichteinstellung erfolgt und nicht schon zum Entwicklungszeitpunkt festgelegt werden, ist der Algorithmus für weitere Entwicklungen geeignet, bei denen aktuelle Änderungen der LED-Farbvalenzen oder Fremdlicht im Mischprozess berücksichtigt werden sollen.

A. Anhang

Tabellen der Beobachtermetamerie-Indizes und des Beobachtermetamerie-Koeffizienten

Tabelle A.1.: Spektralwertfunktionen des ersten kategorischen Beobachters [84], welcher in Kapitel 3.3 und Kapitel 3.4 als Referenzbeobachter verwendet wird (sofern nicht anders angegeben).

Wellenlänge in nm	2°-Sichtfeld			10°-Sichtfeld		
	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$
390	3,77E-03	3,38E-05	1,77E-02	2,88E-03	3,28E-04	1,29E-02
395	8,70E-03	1,02E-04	4,09E-02	6,90E-03	8,06E-04	3,11E-02
400	1,97E-02	1,83E-04	9,34E-02	1,63E-02	1,85E-03	7,41E-02
405	4,32E-02	1,36E-04	2,06E-01	3,73E-02	3,94E-03	1,71E-01
410	8,29E-02	-4,01E-05	3,98E-01	7,45E-02	7,54E-03	3,46E-01
415	1,36E-01	-4,79E-04	6,63E-01	1,28E-01	1,25E-02	6,03E-01
420	1,95E-01	-6,41E-04	9,56E-01	1,93E-01	1,91E-02	9,23E-01
425	2,41E-01	3,11E-04	1,20E+00	2,52E-01	2,66E-02	1,23E+00
430	2,84E-01	2,60E-03	1,43E+00	3,10E-01	3,62E-02	1,53E+00
435	3,18E-01	7,29E-03	1,63E+00	3,53E-01	4,81E-02	1,78E+00
440	3,47E-01	1,29E-02	1,80E+00	3,88E-01	6,09E-02	1,99E+00
445	3,44E-01	2,02E-02	1,82E+00	3,93E-01	7,39E-02	2,06E+00
450	3,28E-01	2,91E-02	1,76E+00	3,85E-01	8,94E-02	2,07E+00
455	2,90E-01	4,05E-02	1,60E+00	3,44E-01	1,06E-01	1,91E+00
460	2,58E-01	5,63E-02	1,47E+00	3,00E-01	1,28E-01	1,74E+00
465	2,34E-01	7,94E-02	1,38E+00	2,54E-01	1,57E-01	1,56E+00
470	1,94E-01	1,07E-01	1,22E+00	1,94E-01	1,87E-01	1,30E+00
475	1,42E-01	1,36E-01	9,77E-01	1,33E-01	2,20E-01	1,01E+00
480	9,48E-02	1,66E-01	7,44E-01	8,13E-02	2,57E-01	7,53E-01
485	5,85E-02	1,98E-01	5,58E-01	4,42E-02	3,00E-01	5,60E-01
490	3,27E-02	2,32E-01	4,13E-01	1,98E-02	3,45E-01	4,05E-01
495	1,85E-02	2,81E-01	3,18E-01	9,07E-03	4,04E-01	2,99E-01
500	1,34E-02	3,46E-01	2,50E-01	1,07E-02	4,66E-01	2,18E-01
505	1,39E-02	4,26E-01	1,88E-01	1,98E-02	5,37E-01	1,51E-01
510	2,45E-02	5,20E-01	1,39E-01	4,09E-02	6,13E-01	1,01E-01
515	4,99E-02	6,20E-01	1,08E-01	7,70E-02	6,89E-01	7,13E-02
520	8,35E-02	7,18E-01	8,47E-02	1,20E-01	7,66E-01	5,16E-02
525	1,27E-01	7,93E-01	6,76E-02	1,74E-01	8,25E-01	3,83E-02
530	1,77E-01	8,55E-01	5,54E-02	2,34E-01	8,71E-01	2,93E-02
535	2,31E-01	9,03E-01	4,68E-02	2,99E-01	9,12E-01	2,34E-02
540	2,95E-01	9,48E-01	4,06E-02	3,76E-01	9,56E-01	1,93E-02
545	3,60E-01	9,73E-01	3,56E-02	4,53E-01	9,79E-01	1,63E-02
550	4,23E-01	9,78E-01	3,12E-02	5,25E-01	9,82E-01	1,38E-02
555	4,96E-01	9,86E-01	2,74E-02	6,09E-01	9,92E-01	1,18E-02

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A.1.: Fortsetzung

Wellenlänge in nm	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$
560	5,74E-01	9,79E-01	2,33E-02	6,96E-01	9,88E-01	9,85E-03
565	6,56E-01	9,69E-01	1,93E-02	7,84E-01	9,79E-01	8,02E-03
570	7,44E-01	9,47E-01	1,48E-02	8,74E-01	9,59E-01	6,07E-03
575	8,26E-01	9,12E-01	1,00E-02	9,52E-01	9,25E-01	4,09E-03
580	8,99E-01	8,61E-01	5,00E-03	1,01E+00	8,75E-01	2,09E-03
585	9,80E-01	8,18E-01	6,61E-05	1,09E+00	8,35E-01	1,76E-04
590	1,04E+00	7,67E-01	-4,24E-03	1,13E+00	7,85E-01	-1,44E-03
595	1,07E+00	7,07E-01	-8,07E-03	1,14E+00	7,26E-01	-2,84E-03
600	1,07E+00	6,43E-01	-1,12E-02	1,13E+00	6,61E-01	-3,94E-03
605	1,06E+00	5,78E-01	-1,35E-02	1,10E+00	5,96E-01	-4,75E-03
610	1,01E+00	5,10E-01	-1,47E-02	1,03E+00	5,27E-01	-5,14E-03
615	9,41E-01	4,44E-01	-1,50E-02	9,49E-01	4,59E-01	-5,21E-03
620	8,55E-01	3,81E-01	-1,46E-02	8,52E-01	3,94E-01	-5,04E-03
625	7,61E-01	3,23E-01	-1,37E-02	7,51E-01	3,34E-01	-4,70E-03
630	6,48E-01	2,66E-01	-1,21E-02	6,34E-01	2,75E-01	-4,11E-03
635	5,39E-01	2,15E-01	-1,03E-02	5,23E-01	2,22E-01	-3,50E-03
640	4,43E-01	1,72E-01	-8,70E-03	4,28E-01	1,78E-01	-2,93E-03
645	3,60E-01	1,37E-01	-7,22E-03	3,46E-01	1,41E-01	-2,43E-03
650	2,81E-01	1,05E-01	-5,69E-03	2,69E-01	1,08E-01	-1,91E-03
655	2,14E-01	7,92E-02	-4,36E-03	2,04E-01	8,13E-02	-1,46E-03
660	1,60E-01	5,87E-02	-3,30E-03	1,52E-01	6,03E-02	-1,10E-03
665	1,19E-01	4,31E-02	-2,46E-03	1,13E-01	4,42E-02	-8,21E-04
670	8,66E-02	3,13E-02	-1,80E-03	8,21E-02	3,21E-02	-6,01E-04
675	6,23E-02	2,24E-02	-1,30E-03	5,90E-02	2,30E-02	-4,34E-04
680	4,42E-02	1,59E-02	-9,25E-04	4,18E-02	1,63E-02	-3,08E-04
685	3,09E-02	1,11E-02	-6,47E-04	2,92E-02	1,14E-02	-2,15E-04
690	2,12E-02	7,60E-03	-4,45E-04	2,01E-02	7,79E-03	-1,48E-04
695	1,48E-02	5,29E-03	-3,10E-04	1,40E-02	5,42E-03	-1,03E-04
700	1,03E-02	3,68E-03	-2,16E-04	9,73E-03	3,77E-03	-7,19E-05
705	7,14E-03	2,55E-03	-1,50E-04	6,75E-03	2,62E-03	-4,98E-05
710	4,89E-03	1,75E-03	-1,03E-04	4,63E-03	1,79E-03	-3,41E-05
715	3,35E-03	1,20E-03	-7,02E-05	3,17E-03	1,23E-03	-2,34E-05
720	2,31E-03	8,29E-04	-4,85E-05	2,19E-03	8,49E-04	-1,61E-05
725	1,60E-03	5,74E-04	-3,35E-05	1,51E-03	5,88E-04	-1,11E-05
730	1,11E-03	4,00E-04	-2,33E-05	1,05E-03	4,10E-04	-7,74E-06
735	7,76E-04	2,79E-04	-1,62E-05	7,34E-04	2,86E-04	-5,39E-06
740	5,40E-04	1,95E-04	-1,13E-05	5,11E-04	1,99E-04	-3,75E-06
745	3,81E-04	1,38E-04	-7,93E-06	3,60E-04	1,41E-04	-2,64E-06
750	2,68E-04	9,70E-05	-5,57E-06	2,53E-04	9,93E-05	-1,85E-06
755	1,90E-04	6,88E-05	-3,94E-06	1,79E-04	7,04E-05	-1,31E-06
760	1,35E-04	4,91E-05	-2,80E-06	1,28E-04	5,02E-05	-9,29E-07
765	9,62E-05	3,50E-05	-1,99E-06	9,09E-05	3,58E-05	-6,61E-07
770	6,89E-05	2,52E-05	-1,42E-06	6,52E-05	2,57E-05	-4,73E-07
775	4,94E-05	1,81E-05	-1,02E-06	4,67E-05	1,84E-05	-3,38E-07
780	3,57E-05	1,31E-05	-7,35E-07	3,38E-05	1,34E-05	-2,44E-07

Tabelle A.2.: Varianzfunktionen des in Kapitel 3.3.1 definierten Nimeroff-Ansatzes. Die Werte wurden durch Berechnung der Varianz von 1000 individuellen Spektralwertfunktionen gebildet.

Wellenlänge in nm	2°-Sichtfeld			10°-Sichtfeld		
	$\sigma_X^2(\lambda)$	$\sigma_Y^2(\lambda)$	$\sigma_Z^2(\lambda)$	$\sigma_X^2(\lambda)$	$\sigma_Y^2(\lambda)$	$\sigma_Z^2(\lambda)$
390	4,96E-05	7,94E-07	9,90E-04	2,13E-05	5,97E-07	3,86E-04
395	1,34E-04	2,26E-06	2,71E-03	6,25E-05	1,81E-06	1,14E-03
400	3,45E-04	5,73E-06	7,10E-03	1,78E-04	4,96E-06	3,32E-03
405	7,97E-04	1,29E-05	1,67E-02	4,59E-04	1,21E-05	8,78E-03
410	1,47E-03	2,57E-05	3,14E-02	9,44E-04	2,58E-05	1,84E-02
415	1,96E-03	4,26E-05	4,27E-02	1,40E-03	4,48E-05	2,80E-02
420	1,96E-03	6,50E-05	4,35E-02	1,64E-03	7,12E-05	3,35E-02
425	1,46E-03	9,17E-05	3,29E-02	1,46E-03	1,02E-04	3,05E-02
430	1,01E-03	1,34E-04	2,31E-02	1,15E-03	1,49E-04	2,46E-02
435	4,49E-04	1,85E-04	1,05E-02	5,63E-04	1,94E-04	1,21E-02
440	2,44E-04	2,48E-04	5,49E-03	2,57E-04	2,42E-04	5,41E-03
445	3,25E-04	3,12E-04	7,12E-03	2,27E-04	2,80E-04	4,09E-03
450	6,79E-04	4,02E-04	1,63E-02	4,70E-04	3,24E-04	9,08E-03
455	9,06E-04	5,15E-04	2,19E-02	7,27E-04	3,80E-04	1,36E-02
460	1,04E-03	6,88E-04	2,39E-02	9,78E-04	4,69E-04	1,69E-02
465	1,17E-03	9,02E-04	2,37E-02	1,17E-03	5,61E-04	1,99E-02
470	1,15E-03	1,12E-03	2,08E-02	1,09E-03	6,60E-04	1,80E-02
475	1,08E-03	1,36E-03	1,75E-02	1,04E-03	7,45E-04	1,45E-02
480	9,93E-04	1,71E-03	1,19E-02	1,16E-03	8,85E-04	9,56E-03
485	8,46E-04	2,16E-03	7,66E-03	1,16E-03	1,03E-03	6,13E-03
490	9,07E-04	2,64E-03	4,67E-03	1,49E-03	1,19E-03	3,60E-03
495	1,10E-03	3,12E-03	3,02E-03	1,93E-03	1,36E-03	2,14E-03
500	1,25E-03	3,20E-03	2,21E-03	2,09E-03	1,41E-03	1,28E-03
505	1,73E-03	2,92E-03	1,57E-03	2,60E-03	1,40E-03	7,08E-04
510	2,28E-03	2,28E-03	9,58E-04	2,96E-03	1,27E-03	3,28E-04
515	3,39E-03	1,61E-03	5,86E-04	3,87E-03	1,16E-03	1,56E-04
520	4,08E-03	1,26E-03	3,32E-04	4,18E-03	1,05E-03	7,47E-05
525	3,88E-03	1,07E-03	1,73E-04	3,57E-03	8,07E-04	3,55E-05
530	4,18E-03	1,14E-03	8,77E-05	3,63E-03	6,52E-04	1,71E-05
535	4,84E-03	1,32E-03	4,32E-05	4,18E-03	6,12E-04	8,63E-06
540	4,77E-03	1,36E-03	2,18E-05	3,98E-03	4,73E-04	4,78E-06
545	3,81E-03	1,27E-03	1,16E-05	3,02E-03	2,80E-04	2,89E-06
550	3,45E-03	1,26E-03	6,64E-06	2,69E-03	2,62E-04	1,97E-06
555	3,19E-03	1,27E-03	4,18E-06	2,43E-03	3,37E-04	1,52E-06
560	2,56E-03	1,27E-03	2,87E-06	1,92E-03	4,11E-04	1,25E-06
565	1,99E-03	1,37E-03	2,18E-06	1,46E-03	5,89E-04	1,12E-06
570	1,47E-03	1,50E-03	1,76E-06	1,12E-03	8,22E-04	1,04E-06
575	1,24E-03	1,66E-03	1,52E-06	1,22E-03	1,11E-03	1,00E-06
580	1,05E-03	1,82E-03	1,21E-06	1,17E-03	1,33E-03	8,34E-07
585	1,02E-03	1,93E-03	8,76E-07	1,20E-03	1,49E-03	6,04E-07
590	1,70E-03	2,02E-03	7,18E-07	2,16E-03	1,68E-03	5,22E-07
595	2,56E-03	2,05E-03	5,61E-07	3,13E-03	1,77E-03	4,29E-07
600	3,37E-03	1,89E-03	4,38E-07	3,92E-03	1,68E-03	3,56E-07
605	4,46E-03	1,80E-03	3,71E-07	4,95E-03	1,64E-03	3,27E-07
610	5,23E-03	1,63E-03	3,31E-07	5,58E-03	1,50E-03	3,11E-07

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A.2.: Fortsetzung

Wellenlänge in nm	$\sigma_X^2(\lambda)$	$\sigma_Y^2(\lambda)$	$\sigma_Z^2(\lambda)$	$\sigma_X^2(\lambda)$	$\sigma_Y^2(\lambda)$	$\sigma_Z^2(\lambda)$
615	5,61E-03	1,43E-03	3,12E-07	5,76E-03	1,33E-03	2,99E-07
620	5,30E-03	1,18E-03	2,82E-07	5,26E-03	1,09E-03	2,71E-07
625	5,26E-03	1,01E-03	2,85E-07	5,09E-03	9,35E-04	2,70E-07
630	4,97E-03	8,57E-04	2,76E-07	4,68E-03	7,89E-04	2,56E-07
635	3,90E-03	6,41E-04	2,18E-07	3,59E-03	5,81E-04	1,99E-07
640	2,82E-03	4,49E-04	1,59E-07	2,54E-03	4,02E-04	1,42E-07
645	2,07E-03	3,16E-04	1,19E-07	1,85E-03	2,80E-04	1,05E-07
650	1,53E-03	2,25E-04	9,02E-08	1,35E-03	1,98E-04	7,88E-08
655	9,93E-04	1,43E-04	5,91E-08	8,66E-04	1,25E-04	5,12E-08
660	5,88E-04	8,36E-05	3,52E-08	5,09E-04	7,26E-05	3,03E-08
665	3,37E-04	4,74E-05	2,03E-08	2,90E-04	4,09E-05	1,74E-08
670	1,90E-04	2,65E-05	1,15E-08	1,63E-04	2,28E-05	9,83E-09
675	1,05E-04	1,45E-05	6,39E-09	8,96E-05	1,24E-05	5,43E-09
680	5,61E-05	7,70E-06	3,43E-09	4,78E-05	6,59E-06	2,91E-09
685	2,96E-05	4,04E-06	1,82E-09	2,52E-05	3,45E-06	1,54E-09
690	1,43E-05	1,94E-06	8,78E-10	1,21E-05	1,66E-06	7,41E-10
695	6,58E-06	8,99E-07	4,04E-10	5,59E-06	7,67E-07	3,41E-10
700	3,22E-06	4,40E-07	1,98E-10	2,73E-06	3,75E-07	1,67E-10
705	1,60E-06	2,18E-07	9,85E-11	1,36E-06	1,86E-07	8,30E-11
710	7,83E-07	1,07E-07	4,83E-11	6,63E-07	9,07E-08	4,07E-11
715	3,60E-07	4,91E-08	2,22E-11	3,05E-07	4,18E-08	1,87E-11
720	1,67E-07	2,28E-08	1,03E-11	1,42E-07	1,94E-08	8,67E-12
725	7,89E-08	1,08E-08	4,85E-12	6,69E-08	9,18E-09	4,08E-12
730	3,72E-08	5,11E-09	2,28E-12	3,16E-08	4,35E-09	1,92E-12
735	1,82E-08	2,50E-09	1,12E-12	1,54E-08	2,13E-09	9,40E-13
740	8,64E-09	1,19E-09	5,28E-13	7,32E-09	1,01E-09	4,45E-13
745	4,15E-09	5,73E-10	2,53E-13	3,52E-09	4,87E-10	2,13E-13
750	2,06E-09	2,85E-10	1,25E-13	1,74E-09	2,42E-10	1,06E-13
755	1,00E-09	1,39E-10	6,08E-14	8,48E-10	1,18E-10	5,12E-14
760	5,01E-10	6,97E-11	3,04E-14	4,24E-10	5,92E-11	2,55E-14
765	2,50E-10	3,49E-11	1,51E-14	2,12E-10	2,96E-11	1,27E-14
770	1,27E-10	1,77E-11	7,65E-15	1,07E-10	1,51E-11	6,44E-15
775	6,46E-11	9,07E-12	3,90E-15	5,46E-11	7,69E-12	3,27E-15
780	3,11E-11	4,40E-12	1,86E-15	2,62E-11	3,72E-12	1,56E-15

Tabelle A.3.: Abweichungsfunktionen des in Kapitel 3.3.1 definierten Allen-Ansatzes. Die Werte beruhen auf der Standardabweichung von 1000 individuellen Spektralwertfunktionen und individueller Vorzeichenzuweisung.

Wellenlänge in nm	2°-Sichtfeld			10°-Sichtfeld		
	$\Delta_A \bar{x}(\lambda)$	$\Delta_A \bar{y}(\lambda)$	$\Delta_A \bar{z}(\lambda)$	$\Delta_A \bar{x}(\lambda)$	$\Delta_A \bar{y}(\lambda)$	$\Delta_A \bar{z}(\lambda)$
390	4,15E-03	5,30E-04	1,87E-02	2,71E-03	4,02E-04	1,17E-02
395	7,42E-03	1,02E-03	3,35E-02	5,11E-03	7,85E-04	2,21E-02
400	1,29E-02	1,85E-03	5,84E-02	9,32E-03	1,43E-03	4,07E-02
405	2,10E-02	3,18E-03	9,57E-02	1,59E-02	2,42E-03	7,02E-02
410	3,02E-02	5,04E-03	1,38E-01	2,39E-02	3,71E-03	1,06E-01
415	3,64E-02	7,10E-03	1,68E-01	2,97E-02	5,01E-03	1,33E-01
420	3,80E-02	9,13E-03	1,76E-01	3,24E-02	6,35E-03	1,46E-01
425	3,41E-02	1,07E-02	1,59E-01	3,02E-02	7,54E-03	1,38E-01
430	2,87E-02	1,23E-02	1,35E-01	2,55E-02	8,90E-03	1,18E-01
435	1,94E-02	1,36E-02	9,19E-02	1,58E-02	9,94E-03	7,38E-02
440	9,89E-03	1,46E-02	4,69E-02	5,49E-03	1,08E-02	2,57E-02
445	8,42E-05	1,45E-02	-2,53E-04	-4,47E-03	1,12E-02	-2,14E-02
450	-9,12E-03	1,39E-02	-4,56E-02	-1,40E-02	1,16E-02	-6,77E-02
455	-1,34E-02	1,31E-02	-6,66E-02	-1,83E-02	1,21E-02	-8,96E-02
460	-1,58E-02	1,27E-02	-7,83E-02	-2,05E-02	1,30E-02	-1,01E-01
465	-1,75E-02	1,29E-02	-8,74E-02	-2,19E-02	1,40E-02	-1,11E-01
470	-1,64E-02	1,31E-02	-8,26E-02	-1,99E-02	1,52E-02	-1,04E-01
475	-1,41E-02	1,25E-02	-7,43E-02	-1,61E-02	1,58E-02	-9,16E-02
480	-1,08E-02	1,17E-02	-6,17E-02	-1,09E-02	1,65E-02	-7,39E-02
485	-7,61E-03	1,09E-02	-5,06E-02	-6,08E-03	1,73E-02	-5,87E-02
490	-4,07E-03	1,08E-02	-3,95E-02	-1,15E-03	1,81E-02	-4,46E-02
495	-1,03E-03	1,12E-02	-3,16E-02	3,52E-03	1,90E-02	-3,42E-02
500	2,40E-03	1,33E-02	-2,52E-02	8,14E-03	2,01E-02	-2,59E-02
505	6,25E-03	1,58E-02	-1,95E-02	1,29E-02	2,05E-02	-1,87E-02
510	1,07E-02	1,88E-02	-1,47E-02	1,75E-02	2,00E-02	-1,25E-02
515	1,54E-02	2,22E-02	-1,18E-02	2,18E-02	1,88E-02	-8,61E-03
520	1,99E-02	2,51E-02	-9,74E-03	2,56E-02	1,77E-02	-5,88E-03
525	2,44E-02	2,70E-02	-8,25E-03	2,84E-02	1,57E-02	-4,01E-03
530	2,85E-02	2,80E-02	-7,15E-03	3,03E-02	1,29E-02	-2,76E-03
535	3,19E-02	2,81E-02	-6,36E-03	3,16E-02	1,03E-02	-1,94E-03
540	3,44E-02	2,63E-02	-5,78E-03	3,23E-02	6,66E-03	-1,43E-03
545	3,61E-02	2,40E-02	-5,25E-03	3,15E-02	2,66E-03	-1,11E-03
550	3,74E-02	2,15E-02	-4,71E-03	2,94E-02	-1,58E-03	-9,14E-04
555	3,69E-02	1,79E-02	-4,22E-03	2,66E-02	-5,96E-03	-7,96E-04
560	3,65E-02	1,56E-02	-3,62E-03	2,31E-02	-9,43E-03	-7,09E-04
565	3,49E-02	1,23E-02	-3,02E-03	1,81E-02	-1,36E-02	-6,52E-04
570	3,20E-02	9,22E-03	-2,31E-03	1,18E-02	-1,74E-02	-5,93E-04
575	2,78E-02	6,23E-03	-1,53E-03	4,44E-03	-2,07E-02	-5,21E-04
580	2,36E-02	4,36E-03	-6,93E-04	-3,75E-03	-2,34E-02	-4,34E-04
585	1,74E-02	2,37E-03	1,64E-04	-1,17E-02	-2,52E-02	-3,40E-04
590	1,19E-02	1,00E-03	9,14E-04	-1,93E-02	-2,65E-02	-2,43E-04
595	6,06E-03	-7,56E-06	1,59E-03	-2,64E-02	-2,70E-02	-1,42E-04
600	1,59E-03	1,09E-06	2,15E-03	-3,08E-02	-2,58E-02	-5,10E-05
605	-3,37E-03	-4,04E-04	2,58E-03	-3,50E-02	-2,49E-02	3,25E-05

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A.3.: Fortsetzung

Wellenlänge in nm	$\Delta_A \bar{x}(\lambda)$	$\Delta_A \bar{y}(\lambda)$	$\Delta_A \bar{z}(\lambda)$	$\Delta_A \bar{x}(\lambda)$	$\Delta_A \bar{y}(\lambda)$	$\Delta_A \bar{z}(\lambda)$
610	-6,65E-03	-3,99E-04	2,80E-03	-3,66E-02	-2,31E-02	9,44E-05
615	-9,07E-03	-4,68E-04	2,85E-03	-3,68E-02	-2,10E-02	1,38E-04
620	-1,00E-02	-2,50E-04	2,77E-03	-3,50E-02	-1,86E-02	1,62E-04
625	-1,10E-02	-3,47E-04	2,61E-03	-3,25E-02	-1,61E-02	1,70E-04
630	-1,06E-02	-4,21E-04	2,30E-03	-2,92E-02	-1,39E-02	1,67E-04
635	-1,01E-02	-6,06E-04	1,97E-03	-2,56E-02	-1,17E-02	1,55E-04
640	-9,39E-03	-7,23E-04	1,66E-03	-2,21E-02	-9,78E-03	1,41E-04
645	-8,25E-03	-6,35E-04	1,38E-03	-1,82E-02	-7,83E-03	1,20E-04
650	-6,47E-03	-4,55E-04	1,09E-03	-1,44E-02	-6,10E-03	9,70E-05
655	-5,16E-03	-3,96E-04	8,37E-04	-1,13E-02	-4,71E-03	7,74E-05
660	-4,00E-03	-3,10E-04	6,34E-04	-8,60E-03	-3,54E-03	5,98E-05
665	-2,96E-03	-2,06E-04	4,72E-04	-6,36E-03	-2,59E-03	4,47E-05
670	-2,15E-03	-1,36E-04	3,46E-04	-4,64E-03	-1,88E-03	3,29E-05
675	-1,53E-03	-8,92E-05	2,50E-04	-3,34E-03	-1,35E-03	2,38E-05
680	-1,08E-03	-5,69E-05	1,77E-04	-2,37E-03	-9,51E-04	1,69E-05
685	-7,49E-04	-3,73E-05	1,24E-04	-1,66E-03	-6,63E-04	1,18E-05
690	-4,96E-04	-1,84E-05	8,51E-05	-1,14E-03	-4,56E-04	8,17E-06
695	-3,55E-04	-1,59E-05	5,94E-05	-7,93E-04	-3,17E-04	5,69E-06
700	-2,46E-04	-1,09E-05	4,14E-05	-5,52E-04	-2,21E-04	3,96E-06
705	-1,72E-04	-7,83E-06	2,87E-05	-3,82E-04	-1,53E-04	2,74E-06
710	-1,16E-04	-4,64E-06	1,96E-05	-2,62E-04	-1,05E-04	1,88E-06
715	-7,86E-05	-3,04E-06	1,34E-05	-1,80E-04	-7,19E-05	1,29E-06
720	-5,50E-05	-2,43E-06	9,28E-06	-1,24E-04	-4,97E-05	8,86E-07
725	-3,78E-05	-1,63E-06	6,41E-06	-8,57E-05	-3,44E-05	6,12E-07
730	-2,66E-05	-1,26E-06	4,46E-06	-5,96E-05	-2,40E-05	4,25E-07
735	-1,86E-05	-9,21E-07	3,10E-06	-4,16E-05	-1,67E-05	2,96E-07
740	-1,28E-05	-6,00E-07	2,16E-06	-2,90E-05	-1,17E-05	2,06E-07
745	-9,20E-06	-5,11E-07	1,52E-06	-2,04E-05	-8,24E-06	1,44E-07
750	-6,41E-06	-3,49E-07	1,07E-06	-1,43E-05	-5,82E-06	1,01E-07
755	-4,56E-06	-2,63E-07	7,55E-07	-1,02E-05	-4,13E-06	7,16E-08
760	-3,26E-06	-2,01E-07	5,36E-07	-7,22E-06	-2,94E-06	5,07E-08
765	-2,31E-06	-1,43E-07	3,81E-07	-5,14E-06	-2,10E-06	3,60E-08
770	-1,68E-06	-1,13E-07	2,73E-07	-3,68E-06	-1,51E-06	2,57E-08
775	-1,19E-06	-7,80E-08	1,95E-07	-2,64E-06	-1,08E-06	1,84E-08
780	-8,57E-07	-5,71E-08	1,41E-07	-1,91E-06	-7,88E-07	1,33E-08

Tabelle A.4.: Abweichungsbeobachterfunktionen des in Kapitel 3.3.1 definierten Allen-Ansatzes, berechnet durch Addition der Abweichungsfunktionen (vgl. Tabelle A.3) zu den Spektralwertfunktionen des Referenzbeobachters (vgl. Tabelle A.1).

Wellenlänge in nm	2°-Sichtfeld			10°-Sichtfeld		
	$\bar{x}_{\text{devA}}(\lambda)$	$\bar{y}_{\text{devA}}(\lambda)$	$\bar{z}_{\text{devA}}(\lambda)$	$\bar{x}_{\text{devA}}(\lambda)$	$\bar{y}_{\text{devA}}(\lambda)$	$\bar{z}_{\text{devA}}(\lambda)$
390	7,92E-03	5,64E-04	3,64E-02	5,59E-03	7,30E-04	2,46E-02
395	1,61E-02	1,12E-03	7,44E-02	1,20E-02	1,59E-03	5,32E-02
400	3,26E-02	2,03E-03	1,52E-01	2,56E-02	3,28E-03	1,15E-01
405	6,42E-02	3,32E-03	3,02E-01	5,32E-02	6,35E-03	2,41E-01
410	1,13E-01	5,00E-03	5,37E-01	9,84E-02	1,12E-02	4,52E-01
415	1,73E-01	6,62E-03	8,31E-01	1,58E-01	1,75E-02	7,36E-01
420	2,33E-01	8,49E-03	1,13E+00	2,25E-01	2,54E-02	1,07E+00
425	2,75E-01	1,10E-02	1,36E+00	2,82E-01	3,42E-02	1,37E+00
430	3,13E-01	1,49E-02	1,57E+00	3,35E-01	4,51E-02	1,65E+00
435	3,38E-01	2,08E-02	1,72E+00	3,68E-01	5,80E-02	1,85E+00
440	3,57E-01	2,75E-02	1,85E+00	3,93E-01	7,17E-02	2,02E+00
445	3,44E-01	3,47E-02	1,82E+00	3,88E-01	8,51E-02	2,04E+00
450	3,19E-01	4,30E-02	1,72E+00	3,71E-01	1,01E-01	2,01E+00
455	2,77E-01	5,36E-02	1,53E+00	3,25E-01	1,18E-01	1,82E+00
460	2,42E-01	6,90E-02	1,39E+00	2,79E-01	1,41E-01	1,64E+00
465	2,16E-01	9,22E-02	1,30E+00	2,33E-01	1,71E-01	1,45E+00
470	1,77E-01	1,20E-01	1,13E+00	1,74E-01	2,03E-01	1,20E+00
475	1,28E-01	1,48E-01	9,03E-01	1,17E-01	2,35E-01	9,16E-01
480	8,40E-02	1,78E-01	6,82E-01	7,03E-02	2,74E-01	6,79E-01
485	5,09E-02	2,08E-01	5,08E-01	3,81E-02	3,17E-01	5,01E-01
490	2,86E-02	2,43E-01	3,73E-01	1,87E-02	3,63E-01	3,60E-01
495	1,75E-02	2,92E-01	2,86E-01	1,26E-02	4,23E-01	2,65E-01
500	1,58E-02	3,59E-01	2,24E-01	1,88E-02	4,87E-01	1,92E-01
505	2,01E-02	4,42E-01	1,69E-01	3,27E-02	5,58E-01	1,32E-01
510	3,52E-02	5,39E-01	1,24E-01	5,84E-02	6,33E-01	8,82E-02
515	6,53E-02	6,43E-01	9,60E-02	9,88E-02	7,08E-01	6,27E-02
520	1,03E-01	7,43E-01	7,50E-02	1,46E-01	7,84E-01	4,57E-02
525	1,51E-01	8,20E-01	5,93E-02	2,02E-01	8,41E-01	3,43E-02
530	2,06E-01	8,83E-01	4,82E-02	2,64E-01	8,84E-01	2,65E-02
535	2,63E-01	9,31E-01	4,04E-02	3,30E-01	9,22E-01	2,14E-02
540	3,29E-01	9,75E-01	3,49E-02	4,08E-01	9,62E-01	1,79E-02
545	3,96E-01	9,97E-01	3,04E-02	4,84E-01	9,82E-01	1,52E-02
550	4,61E-01	1,00E+00	2,65E-02	5,54E-01	9,81E-01	1,29E-02
555	5,33E-01	1,00E+00	2,32E-02	6,35E-01	9,86E-01	1,10E-02
560	6,11E-01	9,95E-01	1,97E-02	7,19E-01	9,78E-01	9,14E-03
565	6,91E-01	9,81E-01	1,63E-02	8,02E-01	9,65E-01	7,37E-03
570	7,76E-01	9,56E-01	1,25E-02	8,86E-01	9,42E-01	5,47E-03
575	8,54E-01	9,18E-01	8,49E-03	9,57E-01	9,04E-01	3,57E-03
580	9,23E-01	8,66E-01	4,31E-03	1,01E+00	8,51E-01	1,66E-03
585	9,98E-01	8,21E-01	2,30E-04	1,07E+00	8,09E-01	-1,64E-04
590	1,05E+00	7,68E-01	-3,32E-03	1,11E+00	7,58E-01	-1,68E-03
595	1,07E+00	7,07E-01	-6,48E-03	1,12E+00	6,99E-01	-2,98E-03
600	1,08E+00	6,43E-01	-9,02E-03	1,10E+00	6,35E-01	-3,99E-03
605	1,06E+00	5,77E-01	-1,09E-02	1,06E+00	5,71E-01	-4,71E-03

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A.4.: Fortsetzung

Wellenlänge in nm	$\bar{x}_{\text{devA}}(\lambda)$	$\bar{y}_{\text{devA}}(\lambda)$	$\bar{z}_{\text{devA}}(\lambda)$	$\bar{x}_{\text{devA}}(\lambda)$	$\bar{y}_{\text{devA}}(\lambda)$	$\bar{z}_{\text{devA}}(\lambda)$
610	1,01E+00	5,10E-01	-1,19E-02	9,97E-01	5,04E-01	-5,05E-03
615	9,32E-01	4,44E-01	-1,22E-02	9,12E-01	4,38E-01	-5,07E-03
620	8,45E-01	3,81E-01	-1,19E-02	8,17E-01	3,76E-01	-4,87E-03
625	7,50E-01	3,23E-01	-1,11E-02	7,18E-01	3,18E-01	-4,52E-03
630	6,37E-01	2,66E-01	-9,80E-03	6,05E-01	2,61E-01	-3,95E-03
635	5,29E-01	2,14E-01	-8,37E-03	4,98E-01	2,10E-01	-3,34E-03
640	4,34E-01	1,72E-01	-7,04E-03	4,06E-01	1,68E-01	-2,79E-03
645	3,52E-01	1,36E-01	-5,83E-03	3,28E-01	1,33E-01	-2,31E-03
650	2,75E-01	1,05E-01	-4,60E-03	2,54E-01	1,02E-01	-1,81E-03
655	2,09E-01	7,88E-02	-3,53E-03	1,93E-01	7,66E-02	-1,38E-03
660	1,56E-01	5,84E-02	-2,67E-03	1,44E-01	5,68E-02	-1,04E-03
665	1,16E-01	4,29E-02	-1,99E-03	1,06E-01	4,16E-02	-7,76E-04
670	8,44E-02	3,11E-02	-1,46E-03	7,74E-02	3,02E-02	-5,68E-04
675	6,08E-02	2,23E-02	-1,05E-03	5,57E-02	2,17E-02	-4,10E-04
680	4,31E-02	1,58E-02	-7,48E-04	3,95E-02	1,53E-02	-2,91E-04
685	3,01E-02	1,10E-02	-5,23E-04	2,76E-02	1,07E-02	-2,04E-04
690	2,07E-02	7,58E-03	-3,60E-04	1,89E-02	7,33E-03	-1,40E-04
695	1,44E-02	5,27E-03	-2,51E-04	1,32E-02	5,10E-03	-9,75E-05
700	1,00E-02	3,67E-03	-1,75E-04	9,18E-03	3,55E-03	-6,79E-05
705	6,97E-03	2,55E-03	-1,21E-04	6,37E-03	2,46E-03	-4,71E-05
710	4,78E-03	1,75E-03	-8,30E-05	4,36E-03	1,69E-03	-3,22E-05
715	3,27E-03	1,20E-03	-5,68E-05	2,99E-03	1,16E-03	-2,21E-05
720	2,26E-03	8,27E-04	-3,92E-05	2,06E-03	8,00E-04	-1,52E-05
725	1,56E-03	5,72E-04	-2,71E-05	1,43E-03	5,53E-04	-1,05E-05
730	1,09E-03	3,99E-04	-1,88E-05	9,93E-04	3,86E-04	-7,31E-06
735	7,57E-04	2,78E-04	-1,31E-05	6,92E-04	2,69E-04	-5,09E-06
740	5,28E-04	1,94E-04	-9,11E-06	4,82E-04	1,88E-04	-3,54E-06
745	3,72E-04	1,37E-04	-6,41E-06	3,40E-04	1,33E-04	-2,50E-06
750	2,62E-04	9,67E-05	-4,51E-06	2,39E-04	9,35E-05	-1,75E-06
755	1,85E-04	6,86E-05	-3,18E-06	1,69E-04	6,63E-05	-1,24E-06
760	1,32E-04	4,89E-05	-2,26E-06	1,20E-04	4,73E-05	-8,78E-07
765	9,38E-05	3,49E-05	-1,61E-06	8,58E-05	3,37E-05	-6,25E-07
770	6,73E-05	2,51E-05	-1,15E-06	6,15E-05	2,42E-05	-4,47E-07
775	4,82E-05	1,80E-05	-8,23E-07	4,41E-05	1,73E-05	-3,20E-07
780	3,49E-05	1,30E-05	-5,94E-07	3,19E-05	1,26E-05	-2,31E-07

Tabelle A.5.: Abweichungsfunktionen des Nayatani-Ansatzes, gebildet durch die erste Komponente einer Hauptkomponentenanalyse von 1000 individuellen Spektralwertfunktionen (vgl. Kapitel 3.3.1). Diese Funktionen werden zur Berechnung des Beobachtermetamerie-Index (Kapitel 3.3) und Koeffizienten (Kapitel 3.4) empfohlen.

Wellenlänge in nm	2°-Sichtfeld			10°-Sichtfeld		
	$\Delta_N \bar{x}(\lambda)$	$\Delta_N \bar{y}(\lambda)$	$\Delta_N \bar{z}(\lambda)$	$\Delta_N \bar{x}(\lambda)$	$\Delta_N \bar{y}(\lambda)$	$\Delta_N \bar{z}(\lambda)$
390	8,96E-03	1,02E-03	4,03E-02	5,82E-03	9,02E-04	2,49E-02
395	1,56E-02	1,83E-03	7,03E-02	1,07E-02	1,71E-03	4,61E-02
400	2,63E-02	3,07E-03	1,20E-01	1,93E-02	3,05E-03	8,37E-02
405	4,18E-02	4,78E-03	1,91E-01	3,27E-02	5,08E-03	1,43E-01
410	5,88E-02	6,87E-03	2,71E-01	4,91E-02	7,77E-03	2,17E-01
415	6,90E-02	8,73E-03	3,21E-01	6,14E-02	1,05E-02	2,74E-01
420	6,99E-02	1,04E-02	3,28E-01	6,80E-02	1,35E-02	3,06E-01
425	6,02E-02	1,15E-02	2,86E-01	6,47E-02	1,62E-02	2,94E-01
430	4,77E-02	1,30E-02	2,29E-01	5,66E-02	1,95E-02	2,60E-01
435	2,67E-02	1,41E-02	1,32E-01	3,66E-02	2,20E-02	1,69E-01
440	5,67E-03	1,50E-02	3,18E-02	1,52E-02	2,43E-02	6,88E-02
445	-1,47E-02	1,50E-02	-6,75E-02	-6,34E-03	2,57E-02	-3,49E-02
450	-3,28E-02	1,45E-02	-1,58E-01	-2,67E-02	2,69E-02	-1,36E-01
455	-4,05E-02	1,45E-02	-1,98E-01	-3,60E-02	2,84E-02	-1,87E-01
460	-4,42E-02	1,52E-02	-2,19E-01	-4,05E-02	3,09E-02	-2,14E-01
465	-4,74E-02	1,68E-02	-2,39E-01	-4,33E-02	3,35E-02	-2,38E-01
470	-4,41E-02	1,92E-02	-2,27E-01	-3,83E-02	3,67E-02	-2,23E-01
475	-3,73E-02	2,02E-02	-2,03E-01	-2,93E-02	3,85E-02	-1,98E-01
480	-2,75E-02	2,09E-02	-1,66E-01	-1,67E-02	4,08E-02	-1,61E-01
485	-1,82E-02	2,12E-02	-1,33E-01	-5,27E-03	4,31E-02	-1,28E-01
490	-8,96E-03	2,20E-02	-1,02E-01	7,14E-03	4,55E-02	-9,82E-02
495	-5,48E-04	2,40E-02	-8,05E-02	1,90E-02	4,83E-02	-7,58E-02
500	7,73E-03	2,81E-02	-6,33E-02	3,00E-02	5,09E-02	-5,75E-02
505	1,73E-02	3,29E-02	-4,76E-02	4,17E-02	5,23E-02	-4,14E-02
510	2,76E-02	3,73E-02	-3,38E-02	5,29E-02	5,13E-02	-2,80E-02
515	3,85E-02	4,11E-02	-2,43E-02	6,42E-02	4,87E-02	-1,94E-02
520	4,84E-02	4,43E-02	-1,71E-02	7,28E-02	4,62E-02	-1,34E-02
525	5,57E-02	4,40E-02	-1,18E-02	7,71E-02	4,07E-02	-9,18E-03
530	6,20E-02	4,16E-02	-8,07E-03	8,09E-02	3,41E-02	-6,36E-03
535	6,72E-02	3,83E-02	-5,51E-03	8,53E-02	2,84E-02	-4,52E-03
540	7,01E-02	3,18E-02	-3,87E-03	8,58E-02	1,98E-02	-3,37E-03
545	6,90E-02	2,33E-02	-2,80E-03	7,98E-02	9,13E-03	-2,61E-03
550	6,65E-02	1,42E-02	-2,15E-03	7,47E-02	-8,58E-04	-2,16E-03
555	6,28E-02	4,73E-03	-1,76E-03	6,87E-02	-1,08E-02	-1,89E-03
560	5,67E-02	-3,46E-03	-1,50E-03	5,87E-02	-1,95E-02	-1,68E-03
565	4,78E-02	-1,32E-02	-1,35E-03	4,58E-02	-2,96E-02	-1,53E-03
570	3,59E-02	-2,26E-02	-1,22E-03	2,89E-02	-3,93E-02	-1,38E-03
575	2,05E-02	-3,14E-02	-1,08E-03	7,67E-03	-4,85E-02	-1,18E-03
580	4,24E-03	-3,88E-02	-9,25E-04	-1,15E-02	-5,48E-02	-9,77E-04
585	-1,15E-02	-4,38E-02	-7,53E-04	-2,97E-02	-5,90E-02	-7,61E-04
590	-2,93E-02	-4,84E-02	-5,53E-04	-5,13E-02	-6,34E-02	-5,05E-04
595	-4,60E-02	-5,13E-02	-3,45E-04	-6,99E-02	-6,54E-02	-2,54E-04
600	-5,73E-02	-5,04E-02	-1,47E-04	-8,18E-02	-6,34E-02	-2,91E-05

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A.5.: Fortsetzung

Wellenlänge in nm	$\Delta_N \bar{x}(\lambda)$	$\Delta_N \bar{y}(\lambda)$	$\Delta_N \bar{z}(\lambda)$	$\Delta_N \bar{x}(\lambda)$	$\Delta_N \bar{y}(\lambda)$	$\Delta_N \bar{z}(\lambda)$
605	-6,88E-02	-5,00E-02	3,98E-05	-9,36E-02	-6,20E-02	1,81E-04
610	-7,49E-02	-4,75E-02	1,86E-04	-9,90E-02	-5,84E-02	3,36E-04
615	-7,77E-02	-4,43E-02	2,93E-04	-1,00E-01	-5,40E-02	4,41E-04
620	-7,56E-02	-3,98E-02	3,56E-04	-9,55E-02	-4,81E-02	4,93E-04
625	-7,19E-02	-3,54E-02	3,88E-04	-9,01E-02	-4,27E-02	5,17E-04
630	-6,68E-02	-3,12E-02	3,92E-04	-8,28E-02	-3,75E-02	5,10E-04
635	-5,94E-02	-2,67E-02	3,69E-04	-7,26E-02	-3,19E-02	4,68E-04
640	-5,17E-02	-2,26E-02	3,36E-04	-6,23E-02	-2,66E-02	4,16E-04
645	-4,31E-02	-1,83E-02	2,90E-04	-5,18E-02	-2,16E-02	3,56E-04
650	-3,48E-02	-1,45E-02	2,39E-04	-4,20E-02	-1,72E-02	2,94E-04
655	-2,75E-02	-1,13E-02	1,92E-04	-3,32E-02	-1,34E-02	2,36E-04
660	-2,11E-02	-8,56E-03	1,49E-04	-2,53E-02	-1,01E-02	1,82E-04
665	-1,57E-02	-6,30E-03	1,12E-04	-1,88E-02	-7,47E-03	1,37E-04
670	-1,15E-02	-4,60E-03	8,29E-05	-1,38E-02	-5,46E-03	1,01E-04
675	-8,33E-03	-3,31E-03	6,03E-05	-1,01E-02	-3,95E-03	7,38E-05
680	-5,94E-03	-2,35E-03	4,32E-05	-7,20E-03	-2,82E-03	5,30E-05
685	-4,18E-03	-1,65E-03	3,05E-05	-5,09E-03	-1,99E-03	3,76E-05
690	-2,88E-03	-1,14E-03	2,10E-05	-3,51E-03	-1,37E-03	2,60E-05
695	-2,00E-03	-7,88E-04	1,46E-05	-2,42E-03	-9,46E-04	1,79E-05
700	-1,39E-03	-5,49E-04	1,02E-05	-1,69E-03	-6,59E-04	1,25E-05
705	-9,67E-04	-3,82E-04	7,07E-06	-1,18E-03	-4,59E-04	8,71E-06
710	-6,66E-04	-2,63E-04	4,86E-06	-8,12E-04	-3,17E-04	6,01E-06
715	-4,55E-04	-1,80E-04	3,32E-06	-5,55E-04	-2,16E-04	4,10E-06
720	-3,13E-04	-1,24E-04	2,28E-06	-3,81E-04	-1,49E-04	2,82E-06
725	-2,16E-04	-8,57E-05	1,58E-06	-2,63E-04	-1,03E-04	1,94E-06
730	-1,50E-04	-5,96E-05	1,09E-06	-1,82E-04	-7,14E-05	1,34E-06
735	-1,05E-04	-4,16E-05	7,60E-07	-1,27E-04	-4,99E-05	9,35E-07
740	-7,29E-05	-2,90E-05	5,28E-07	-8,83E-05	-3,47E-05	6,48E-07
745	-5,11E-05	-2,04E-05	3,69E-07	-6,18E-05	-2,44E-05	4,53E-07
750	-3,60E-05	-1,44E-05	2,59E-07	-4,35E-05	-1,72E-05	3,18E-07
755	-2,54E-05	-1,02E-05	1,83E-07	-3,07E-05	-1,21E-05	2,23E-07
760	-1,81E-05	-7,25E-06	1,29E-07	-2,18E-05	-8,63E-06	1,58E-07
765	-1,28E-05	-5,17E-06	9,18E-08	-1,55E-05	-6,15E-06	1,12E-07
770	-9,19E-06	-3,71E-06	6,55E-08	-1,11E-05	-4,40E-06	8,00E-08
775	-6,58E-06	-2,66E-06	4,68E-08	-7,91E-06	-3,16E-06	5,71E-08
780	-4,73E-06	-1,92E-06	3,35E-08	-5,65E-06	-2,26E-06	4,07E-08

Tabelle A.6.: Abweichungsbeobachterfunktionen des Nayatani-Ansatzes, welche zur Berechnung des Beobachtermetamerie-Index (Kapitel 3.3) und Koeffizienten (Kapitel 3.4) empfohlen werden, berechnet durch Addition der Abweichungsfunktionen (vgl. Tabelle A.5) zu den Spektralwertfunktionen des Referenzbeobachters (vgl. Tabelle A.1).

Wellenlänge in nm	2°-Sichtfeld			10°-Sichtfeld		
	$\bar{x}_{\text{devN}}(\lambda)$	$\bar{y}_{\text{devN}}(\lambda)$	$\bar{z}_{\text{devN}}(\lambda)$	$\bar{x}_{\text{devN}}(\lambda)$	$\bar{y}_{\text{devN}}(\lambda)$	$\bar{z}_{\text{devN}}(\lambda)$
390	1,27E-02	1,05E-03	5,80E-02	8,70E-03	1,23E-03	3,78E-02
395	2,43E-02	1,93E-03	1,11E-01	1,76E-02	2,52E-03	7,72E-02
400	4,61E-02	3,26E-03	2,13E-01	3,56E-02	4,90E-03	1,58E-01
405	8,50E-02	4,92E-03	3,97E-01	7,00E-02	9,02E-03	3,15E-01
410	1,42E-01	6,83E-03	6,69E-01	1,24E-01	1,53E-02	5,63E-01
415	2,05E-01	8,25E-03	9,84E-01	1,89E-01	2,31E-02	8,78E-01
420	2,65E-01	9,71E-03	1,28E+00	2,61E-01	3,25E-02	1,23E+00
425	3,01E-01	1,18E-02	1,48E+00	3,17E-01	4,29E-02	1,52E+00
430	3,32E-01	1,56E-02	1,66E+00	3,66E-01	5,56E-02	1,79E+00
435	3,45E-01	2,14E-02	1,76E+00	3,89E-01	7,01E-02	1,95E+00
440	3,53E-01	2,79E-02	1,83E+00	4,03E-01	8,51E-02	2,06E+00
445	3,30E-01	3,52E-02	1,75E+00	3,87E-01	9,96E-02	2,03E+00
450	2,95E-01	4,36E-02	1,61E+00	3,59E-01	1,16E-01	1,94E+00
455	2,50E-01	5,50E-02	1,40E+00	3,08E-01	1,34E-01	1,72E+00
460	2,14E-01	7,15E-02	1,25E+00	2,59E-01	1,59E-01	1,52E+00
465	1,86E-01	9,62E-02	1,14E+00	2,11E-01	1,90E-01	1,33E+00
470	1,49E-01	1,26E-01	9,89E-01	1,56E-01	2,24E-01	1,08E+00
475	1,05E-01	1,56E-01	7,74E-01	1,04E-01	2,58E-01	8,10E-01
480	6,73E-02	1,87E-01	5,78E-01	6,46E-02	2,98E-01	5,92E-01
485	4,03E-02	2,19E-01	4,26E-01	3,89E-02	3,43E-01	4,31E-01
490	2,37E-02	2,54E-01	3,10E-01	2,70E-02	3,90E-01	3,07E-01
495	1,80E-02	3,05E-01	2,38E-01	2,81E-02	4,52E-01	2,24E-01
500	2,11E-02	3,74E-01	1,86E-01	4,06E-02	5,17E-01	1,60E-01
505	3,11E-02	4,59E-01	1,41E-01	6,15E-02	5,89E-01	1,09E-01
510	5,21E-02	5,57E-01	1,05E-01	9,38E-02	6,64E-01	7,28E-02
515	8,84E-02	6,61E-01	8,34E-02	1,41E-01	7,38E-01	5,19E-02
520	1,32E-01	7,62E-01	6,76E-02	1,93E-01	8,13E-01	3,82E-02
525	1,82E-01	8,37E-01	5,58E-02	2,51E-01	8,66E-01	2,91E-02
530	2,39E-01	8,97E-01	4,73E-02	3,15E-01	9,05E-01	2,29E-02
535	2,98E-01	9,41E-01	4,13E-02	3,84E-01	9,40E-01	1,88E-02
540	3,65E-01	9,80E-01	3,68E-02	4,61E-01	9,76E-01	1,60E-02
545	4,29E-01	9,96E-01	3,28E-02	5,33E-01	9,88E-01	1,37E-02
550	4,90E-01	9,92E-01	2,90E-02	6,00E-01	9,81E-01	1,16E-02
555	5,59E-01	9,90E-01	2,56E-02	6,78E-01	9,81E-01	9,92E-03
560	6,31E-01	9,76E-01	2,18E-02	7,55E-01	9,68E-01	8,17E-03
565	7,04E-01	9,56E-01	1,80E-02	8,30E-01	9,49E-01	6,49E-03
570	7,80E-01	9,25E-01	1,36E-02	9,03E-01	9,20E-01	4,69E-03
575	8,47E-01	8,80E-01	8,95E-03	9,60E-01	8,76E-01	2,91E-03
580	9,04E-01	8,22E-01	4,07E-03	1,00E+00	8,20E-01	1,12E-03
585	9,69E-01	7,75E-01	-6,87E-04	1,06E+00	7,76E-01	-5,85E-04
590	1,01E+00	7,19E-01	-4,79E-03	1,08E+00	7,22E-01	-1,95E-03
595	1,02E+00	6,56E-01	-8,41E-03	1,07E+00	6,60E-01	-3,09E-03
600	1,02E+00	5,93E-01	-1,13E-02	1,05E+00	5,98E-01	-3,97E-03

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A.6.: Fortsetzung

Wellenlänge in nm	$\bar{x}_{\text{devN}}(\lambda)$	$\bar{y}_{\text{devN}}(\lambda)$	$\bar{z}_{\text{devN}}(\lambda)$	$\bar{x}_{\text{devN}}(\lambda)$	$\bar{y}_{\text{devN}}(\lambda)$	$\bar{z}_{\text{devN}}(\lambda)$
605	9,91E-01	5,28E-01	-1,35E-02	1,00E+00	5,34E-01	-4,56E-03
610	9,38E-01	4,63E-01	-1,46E-02	9,35E-01	4,69E-01	-4,81E-03
615	8,64E-01	4,00E-01	-1,47E-02	8,49E-01	4,05E-01	-4,77E-03
620	7,79E-01	3,41E-01	-1,43E-02	7,56E-01	3,46E-01	-4,54E-03
625	6,89E-01	2,88E-01	-1,33E-02	6,61E-01	2,92E-01	-4,18E-03
630	5,81E-01	2,35E-01	-1,17E-02	5,51E-01	2,37E-01	-3,60E-03
635	4,80E-01	1,88E-01	-9,97E-03	4,51E-01	1,90E-01	-3,03E-03
640	3,92E-01	1,50E-01	-8,37E-03	3,66E-01	1,51E-01	-2,52E-03
645	3,17E-01	1,19E-01	-6,93E-03	2,94E-01	1,19E-01	-2,07E-03
650	2,46E-01	9,08E-02	-5,45E-03	2,27E-01	9,11E-02	-1,61E-03
655	1,86E-01	6,79E-02	-4,17E-03	1,71E-01	6,79E-02	-1,22E-03
660	1,39E-01	5,02E-02	-3,15E-03	1,27E-01	5,02E-02	-9,21E-04
665	1,03E-01	3,68E-02	-2,35E-03	9,38E-02	3,68E-02	-6,84E-04
670	7,51E-02	2,67E-02	-1,72E-03	6,82E-02	2,66E-02	-5,00E-04
675	5,40E-02	1,91E-02	-1,24E-03	4,90E-02	1,91E-02	-3,60E-04
680	3,83E-02	1,35E-02	-8,82E-04	3,47E-02	1,35E-02	-2,55E-04
685	2,67E-02	9,42E-03	-6,17E-04	2,41E-02	9,37E-03	-1,78E-04
690	1,83E-02	6,46E-03	-4,24E-04	1,66E-02	6,42E-03	-1,22E-04
695	1,28E-02	4,50E-03	-2,96E-04	1,16E-02	4,47E-03	-8,53E-05
700	8,90E-03	3,13E-03	-2,06E-04	8,04E-03	3,11E-03	-5,94E-05
705	6,17E-03	2,17E-03	-1,43E-04	5,57E-03	2,16E-03	-4,11E-05
710	4,23E-03	1,49E-03	-9,78E-05	3,81E-03	1,48E-03	-2,81E-05
715	2,89E-03	1,02E-03	-6,69E-05	2,61E-03	1,01E-03	-1,93E-05
720	2,00E-03	7,05E-04	-4,62E-05	1,81E-03	7,00E-04	-1,33E-05
725	1,38E-03	4,88E-04	-3,19E-05	1,25E-03	4,85E-04	-9,16E-06
730	9,63E-04	3,40E-04	-2,22E-05	8,70E-04	3,38E-04	-6,40E-06
735	6,71E-04	2,38E-04	-1,55E-05	6,06E-04	2,36E-04	-4,45E-06
740	4,67E-04	1,66E-04	-1,07E-05	4,23E-04	1,65E-04	-3,10E-06
745	3,30E-04	1,17E-04	-7,56E-06	2,98E-04	1,16E-04	-2,19E-06
750	2,32E-04	8,26E-05	-5,32E-06	2,10E-04	8,21E-05	-1,53E-06
755	1,64E-04	5,86E-05	-3,76E-06	1,49E-04	5,83E-05	-1,09E-06
760	1,17E-04	4,18E-05	-2,67E-06	1,06E-04	4,16E-05	-7,71E-07
765	8,33E-05	2,99E-05	-1,90E-06	7,54E-05	2,97E-05	-5,49E-07
770	5,98E-05	2,15E-05	-1,36E-06	5,41E-05	2,13E-05	-3,93E-07
775	4,28E-05	1,54E-05	-9,71E-07	3,88E-05	1,52E-05	-2,81E-07
780	3,10E-05	1,12E-05	-7,02E-07	2,81E-05	1,11E-05	-2,03E-07

Literatur

- [1] M. E. Kompier, K. Smolders und Y. de Kort, „A systematic literature review on the rationale for and effects of dynamic light scenarios,“ *Building and Environment*, Jg. 186, S. 107-126, 2020, ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107326.
- [2] R. S. Mason, V. B. Sequeira und C. Gordon-Thomson, „Vitamin D: the light side of sunshine,“ *European journal of clinical nutrition*, Jg. 65, Nr. 9, S. 986–993, 2011. DOI: 10.1038/ejcn.2011.105.
- [3] S. Hubalek, M. Brink und C. Schierz, „Office workers’ daily exposure to light and its influence on sleep quality and mood,“ *Lighting Research & Technology*, Jg. 42, Nr. 1, S. 33–50, 2010, ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153509355632.
- [4] A. N. French, R. S. Ashby, I. G. Morgan und K. A. Rose, „Time outdoors and the prevention of myopia,“ *Experimental eye research*, Jg. 114, S. 58–68, 2013, ISSN: 0014-4835. DOI: 10.1016/j.exer.2013.04.018.
- [5] R. Hobday, „Myopia and daylight in schools: a neglected aspect of public health?“, *Perspectives in Public Health*, Jg. 136, Nr. 1, S. 50–55, 2016. DOI: 10.1177/1757913915576679.
- [6] W. A. Lagrèze und F. Schaeffel, „Preventing Myopia,“ *Deutsches Ärzteblatt international*, Jg. 114, Nr. 35-36, S. 575–580, 2017. DOI: 10.3238/arztebl.2017.0575.
- [7] B. Laeng, T. Brennen, A. Elden, H. Gaare Paulsen, A. Banerjee und R. Lipton, „Latitude-of-birth and season-of-birth effects on human color vision in the Arctic,“ *Vision Research*, Jg. 47, Nr. 12, S. 1595–1607, 2007, ISSN: 0042-6989. DOI: 10.1016/j.visres.2007.03.011.
- [8] V. Gabel, M. Maire, C. F. Reichert et al., „Effects of artificial dawn and morning blue light on daytime cognitive performance, well-being, cortisol and melatonin levels,“ *Chronobiology international*, Jg. 30, Nr. 8, S. 988–997, 2013. DOI: 10.3109/07420528.2013.793196.
- [9] V. Gabel, M. Maire, C. F. Reichert et al., „Dawn simulation light impacts on different cognitive domains under sleep restriction,“ *Behavioural Brain Research*, Jg. 281, S. 258–266, 2015, ISSN: 0166-4328. DOI: 10.1016/j.bbr.2014.12.043.
- [10] P. J. Slegers, N. M. Moolenaar, M. Galetzka, A. Pruyn, B. E. Sarroukh und B. van der Zande, „Lighting affects students’ concentration positively: Findings from three Dutch studies,“ *Lighting Research & Technology*, Jg. 45, Nr. 2, S. 159–175, 2013, ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153512446099.
- [11] M. Ye, S. Q. Zheng, M. L. Wang und M. R. Luo, „The effect of dynamic correlated colour temperature changes on alertness and performance,“ *Lighting Research & Technology*, Jg. 50, Nr. 7, S. 1070–1081, 2018, ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153518755617.
- [12] R. S. Ulrich, „Biophilic theory and research for healthcare design,“ *Biophilic design: The theory, science, and practice of bringing buildings to life*, S. 87–106, 2008.
- [13] J. A. Veitch, J. Christoffersen und A. D. Galasiu, *Daylight and view through residential windows: effects on well-being*. 2013. Adresse: <http://www.velux.com/~media/com/research/f0140%202013%20-%20luxeuropa%20-%20veitch%20et%20al%20-%20daylight%20and%20view%20through%20residential%20windows%20-%20effects%20on%20well-being.pdf> (besucht am 07.03.2022).

- [14] M. Boubekri, I. N. Cheung, K. J. Reid, C.-H. Wang und P. C. Zee, „Impact of windows and daylight exposure on overall health and sleep quality of office workers: a case-control pilot study,“ *Journal of clinical sleep medicine : JCSM : official publication of the American Academy of Sleep Medicine*, Jg. 10, Nr. 6, S. 603–611, 2014. DOI: 10.5664/jcsm.3780.
- [15] Y. Lu, W. Li, W. Xu und Y. Lin, „Impacts of LED dynamic white lighting on atmosphere perception,“ *Lighting Research & Technology*, Jg. 51, Nr. 8, S. 1143–1158, 2019, ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153518823833.
- [16] S. Singh, „Impact of color on marketing,“ *Management Decision*, Jg. 44, Nr. 6, S. 783–789, 2006, ISSN: 0025-1747. DOI: 10.1108/00251740610673332.
- [17] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz und C. Pout, „A review on buildings energy consumption information,“ *Energy and Buildings*, Jg. 40, Nr. 3, S. 394–398, 2008, ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007.
- [18] A. Pandharipande und D. Caicedo, „Daylight integrated illumination control of LED systems based on enhanced presence sensing,“ *Energy and Buildings*, Jg. 43, Nr. 4, S. 944–950, 2011, ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.12.018.
- [19] A. Pandharipande und D. Caicedo, „Adaptive Illumination Rendering in LED Lighting Systems,“ *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Jg. 43, Nr. 5, S. 1052–1062, 2013, ISSN: 2168-2216. DOI: 10.1109/TSMCA.2012.2231859.
- [20] A. Seyedolhosseini, N. Masoumi, M. Modarressi und N. Karimian, „Daylight adaptive smart indoor lighting control method using artificial neural networks,“ *Journal of Building Engineering*, Jg. 29, S. 101141, 2020, ISSN: 2352-7102. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.101141.
- [21] P. K. Maiti und B. Roy, „Evaluation of a daylight-responsive, iterative, closed-loop light control scheme,“ *Lighting Research & Technology*, Jg. 52, Nr. 2, S. 257–273, 2020, ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153519853318.
- [22] J. M. Gilman, M. E. Miller und M. R. Grimaila, „A simplified control system for a daylight-matched LED lamp,“ *Lighting Research & Technology*, Jg. 45, Nr. 5, S. 614–629, 2013, ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153512452276.
- [23] J. Hernández-Andrés, J. L. Nieves, E. M. Valero und J. Romero, „Spectral-daylight recovery by use of only a few sensors,“ *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, Jg. 21, Nr. 1, S. 13–23, 2004.
- [24] B. Galabov und Z. Ivanov, „Adapted lighting control model for Human Centric Lighting,“ *2019 11th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*, Jg. 2019, S. 1–6, DOI: 10.1109/BulEF48056.2019.9030786.
- [25] Signify GmbH, *Philips Hue*, <https://www.philips-hue.com/de-de>, letzter Zugriff: 20.11.2022.
- [26] Philips GmbH Market DACH, *Healthy Sleep Solutions*, <https://www.philips.de/c-m-hs/healthy-sleep-solutions/sleep-and-wake-up-lights/>, letzter Zugriff: 20.11.2022.
- [27] Apple Inc., *Home App*, <https://www.apple.com/de/home-app>, letzter Zugriff: 20.11.2022.
- [28] Zumtobel Lighting GmbH, *LITECOM Daylight linking*, https://www.zumtobel.com/PDB/Ressource/manual/LITECOM_DL_HB_en.pdf, letzter Zugriff: 20.11.2022.
- [29] CIE, *CIE 015:2018 Colorimetry*, 4th edition. USA: CIE, 2018, ISBN: 9783902842138.
- [30] J. Li, P. Hanselaer und K. A. G. Smet, „Impact of Color-Matching Primaries on Observer Matching: Part I – Accuracy,“ *LEUKOS*, S. 1–23, 2021, ISSN: 1550-2724. DOI: 10.1080/15502724.2020.1864395.
- [31] J. Li, P. Hanselaer und K. A. G. Smet, „Impact of Color Matching Primaries on Observer Matching: Part II – Observer Variability,“ *LEUKOS*, S. 1–18, 2021, ISSN: 1550-2724.

- [32] P. Csuti und J. Schanda, „Colour matching experiments with RGB-LEDs,“ *Color Research & Application*, Jg. 33, Nr. 2, S. 108–112, 2008, ISSN: 0361-2317. DOI: 10.1002/col.20385.
- [33] Y. Asano, M. D. Fairchild und L. Blondé, „Individual Colorimetric Observer Model,“ *PloS one*, Jg. 11, Nr. 2, e0145671, 2016. DOI: 10.1371/journal.pone.0145671.
- [34] M. D. Fairchild, F. Jiang und H. Xie, „Perception in HDR and Displays,“ *Information Display*, Jg. 37, Nr. 3, S. 15–19, 2021, ISSN: 2637-496X. DOI: 10.1002/msid.1211.
- [35] Y. Hu, M. Wei und M. R. Luo, „Observer metamerism to display white point using different primary sets,“ *Optics express*, Jg. 28, Nr. 14, S. 20305–20323, 2020. DOI: 10.1364/OE.395568.
- [36] H. Xie, S. P. Farnand und M. J. Murdoch, „Observer metamerism in commercial displays,“ *Journal of the Optical Society of America A*, Jg. 37, Nr. 4, A61–A69, 2020, ISSN: 1084-7529. DOI: 10.1364/JOSAA.382228.
- [37] Y. Park und M. J. Murdoch, „Efficiently evaluating the effect of color gamut and spectral bandwidth on observer metamerism in high dynamic range displays,“ *Journal of the Society for Information Display*, 2021, ISSN: 1071-0922. DOI: 10.1002/jsid.1027.
- [38] J. Wu, M. Wei, Y. Fu und C. Cui, „Color mismatch and observer metamerism between conventional liquid crystal displays and organic light emitting diode displays,“ *Optics express*, Jg. 29, Nr. 8, S. 12292–12306, 2021. DOI: 10.1364/OE.418675.
- [39] B. Zandi, A. Eissfeldt, A. Herzog und T. Q. Khanh, „Melanopic Limits of Metamer Spectral Optimisation in Multi-Channel Smart Lighting Systems,“ *Energies*, Jg. 14, Nr. 3, S. 527, 2021. DOI: 10.3390/en14030527.
- [40] B. Zandi, O. Stefani, A. Herzog, L. J. M. Schlangen, Q. V. Trinh und T. Q. Khanh, „Optimising metameric spectra for integrative lighting to modulate the circadian system without affecting visual appearance,“ *Scientific Reports*, Jg. 11, Nr. 1, S. 23188, 2021, ISSN: 2045-2322. DOI: 10.1038/s41598-021-02136-y.
- [41] T. Young, „II. The Bakerian Lecture. On the theory of light and colours,“ *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Jg. 92, S. 12–48, 1802, ISSN: 0261-0523. DOI: 10.1098/rstl.1802.0004.
- [42] H. Grassmann, „Zur Theorie der Farbenmischung,“ *Annalen der Physik*, Jg. 165, Nr. 5, S. 69–84, 1853.
- [43] D. V. Norren und J. J. Vos, „Spectral transmission of the human ocular media,“ *Vision Research*, Jg. 14, Nr. 11, S. 1237–1244, 1974, ISSN: 0042-6989.
- [44] G. Wyszecki und W. S. Stiles, „Color science: concepts and methods, quantitative data and formulas,“ 1982.
- [45] A. Stockman, L. T. Sharpe und C. Fach, „The spectral sensitivity of the human short-wavelength sensitive cones derived from thresholds and color matches,“ *Vision Research*, Jg. 39, Nr. 17, S. 2901–2927, 1999, ISSN: 0042-6989. DOI: 10.1016/S0042-6989(98)00225-9.
- [46] J. Pokorny und V. C. Smith, „How much light reaches the retina?“ In *Colour Vision Deficiencies XIII*, Ser. Documenta Ophthalmologica Proceedings Series, C. R. Cavonius, Hrsg., Bd. 59, Dordrecht: Springer Netherlands, 1997, S. 491–511, ISBN: 978-94-010-6275-6. DOI: 10.1007/978-94-011-5408-6_56.
- [47] J. Pokorny, V. C. Smith und M. Lutze, „Aging of the human lens,“ *Applied optics*, Jg. 26, Nr. 8, S. 1437–1440, 1987. DOI: 10.1364/AO.26.001437.
- [48] B. R. Hammond, B. R. Wooten, J. E. Náñez und A. J. Wenzel, „Smoking and lens optical density,“ *Ophthalmic and Physiological Optics*, Jg. 19, Nr. 4, S. 300–305, 1999, ISSN: 0275-5408. DOI: 10.1016/S0275-5408(98)00085-4.

- [49] T. T. J. M. Berendschot, W. M. R. Broekmans, I. A. A. Klöpping-Ketelaars, A. F. M. Kardinaal, G. van Poppel und D. van Norren, „Lens aging in relation to nutritional determinants and possible risk factors for age-related cataract,“ *Archives of ophthalmology (Chicago, Ill. : 1960)*, Jg. 120, Nr. 12, S. 1732–1737, 2002, ISSN: 0003-9950. DOI: 10.1001/archophth.120.12.1732.
- [50] J. M. Artigas, A. Felipe, A. Navea, A. Fandiño und C. Artigas, „Spectral transmission of the human crystalline lens in adult and elderly persons: color and total transmission of visible light,“ *Investigative ophthalmology & visual science*, Jg. 53, Nr. 7, S. 4076–4084, 2012. DOI: 10.1167/iovs.12-9471.
- [51] R. A. Bone, J. T. Landrum und A. Cains, „Optical density spectra of the macular pigment in vivo and in vitro,“ *Vision Research*, Jg. 32, Nr. 1, S. 105–110, 1992, ISSN: 0042-6989. DOI: 10.1016/0042-6989(92)90118-3.
- [52] O. Howells, F. Eperjesi und H. Bartlett, „Macular pigment optical density in young adults of South Asian origin,“ *Investigative ophthalmology & visual science*, Jg. 54, Nr. 4, S. 2711–2719, 2013. DOI: 10.1167/iovs.12-10957.
- [53] P. J. Kelty, J. F. Payne, R. H. Trivedi, J. Kelty, E. M. Bowie und B. M. Burger, „Macular thickness assessment in healthy eyes based on ethnicity using Stratus OCT optical coherence tomography,“ *Investigative ophthalmology & visual science*, Jg. 49, Nr. 6, S. 2668–2672, 2008. DOI: 10.1167/iovs.07-1000.
- [54] A. V. Pilat, F. A. Proudlock, S. Mohammad und I. Gottlob, „Normal macular structure measured with optical coherence tomography across ethnicity,“ *The British journal of ophthalmology*, Jg. 98, Nr. 7, S. 941–945, 2014. DOI: 10.1136/bjophthalmol-2013-303119.
- [55] A. Iannaccone, M. Mura, K. T. Gallaher et al., „Macular pigment optical density in the elderly: findings in a large biracial Midsouth population sample,“ *Investigative ophthalmology & visual science*, Jg. 48, Nr. 4, S. 1458–1465, 2007. DOI: 10.1167/iovs.06-0438.
- [56] J. M. Nolan, J. Stack, O. O’ Donovan, E. Loane und S. Beatty, „Risk factors for age-related maculopathy are associated with a relative lack of macular pigment,“ *Experimental eye research*, Jg. 84, Nr. 1, S. 61–74, 2007, ISSN: 0014-4835. DOI: 10.1016/j.exer.2006.08.016.
- [57] J. Nolan, O. O’ Donovan, H. Kavanagh et al., „Macular pigment and percentage of body fat,“ *Investigative ophthalmology & visual science*, Jg. 45, Nr. 11, S. 3940–3950, 2004. DOI: 10.1167/iovs.04-0273.
- [58] R. A. Bone, J. T. Landrum, L. H. Guerra und C. A. Ruiz, „Lutein and zeaxanthin dietary supplements raise macular pigment density and serum concentrations of these carotenoids in humans,“ *The Journal of nutrition*, Jg. 133, Nr. 4, S. 992–998, 2003, ISSN: 0022-3166. DOI: 10.1093/jn/133.4.992.
- [59] M. D. Fairchild, *Color appearance models* (Wiley-IS&T series in imaging science and technology), Third edition. Chichester, West Sussex: Wiley, 2013, ISBN: 9781118653128. DOI: 10.1002/9781118653128.
- [60] M. F. Bear, B. W. Connors und M. A. Paradiso, *Neurowissenschaften: Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie*, 4. Aufl. 2018. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, ISBN: 9783662572627. DOI: 10.1007/978-3-662-57263-4.
- [61] P. B. M. Thomas, M. A. Formankiewicz und J. D. Mollon, „The effect of photopigment optical density on the color vision of the anomalous trichromat,“ *Vision Research*, Jg. 51, Nr. 20, S. 2224–2233, 2011, ISSN: 0042-6989. DOI: 10.1016/j.visres.2011.08.016.
- [62] A. Stockman und L. T. Sharpe, „The spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype,“ *Vision Research*, Jg. 40, Nr. 13, S. 1711–1737, 2000, ISSN: 0042-6989. DOI: 10.1016/S0042-6989(00)00021-3.
- [63] M. T. H. Do und K.-W. Yau, „Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells,“ *Physiological reviews*, Jg. 90, Nr. 4, S. 1547–1581, 2010. DOI: 10.1152/physrev.00013.2010.

- [64] B. Zandi und T. Q. Khanh, „Deep learning-based pupil model predicts time and spectral dependent light responses,“ *Scientific Reports*, Jg. 11, Nr. 1, S. 841, 2021, ISSN: 2045-2322. DOI: 10.1038/s41598-020-79908-5.
- [65] CIE, „CIE S 026/E: 2018 CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light,“ *CIE Central Bureau: Vienna, Austria*, 2018.
- [66] CIE, *CIE TN003:2015. Report on the First International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry*, 2013, 2015.
- [67] J. Schanda, Hrsg., *Colorimetry: Understanding the CIE system* (A Wiley-Interscience publication). Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience, 2007, ISBN: 9780470175620. DOI: 10.1002/9780470175637.
- [68] M. D. Fairchild, „A novel method for the determination of color matching functions,“ *Color Research & Application*, Jg. 14, Nr. 3, S. 122–130, 1989, ISSN: 0361-2317.
- [69] C. Oleari und M. Pavesi, „Grassmann’s laws and individual color-matching functions for non-spectral primaries evaluated by maximum saturation technique in foveal vision,“ *Color Research & Application*, Jg. 33, Nr. 4, S. 271–281, 2008, ISSN: 0361-2317. DOI: 10.1002/col.20421.
- [70] Y. Nayatani und H. Sobagaki, „Prediction of experimental results on additivity-law failure,“ *Color Research & Application*, Jg. 25, Nr. 1, S. 32–42, 2000, ISSN: 0361-2317. DOI: 10.1002/col.5080110112.
- [71] B. Oicherman, M. R. Luo, B. Rigg und A. Robertson, „Adaptation and colour matching of display and surface colours,“ *Color Research & Application*, Jg. 34, Nr. 3, S. 182–193, 2009, ISSN: 0361-2317. DOI: 10.1002/col.20492.
- [72] W. D. Wright, „A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours,“ *Transactions of the Optical Society*, Jg. 30, Nr. 4, S. 141–164, 1929, ISSN: 1475-4878. DOI: 10.1088/1475-4878/30/4/301.
- [73] J. Guild, „The colorimetric properties of the spectrum,“ *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, Jg. 230, Nr. 681-693, S. 149–187, 1931, ISSN: 0264-3952. DOI: 10.1098/rsta.1932.0005.
- [74] H. S. Fairman, M. H. Brill und H. Hemmendinger, „How the CIE 1931 color-matching functions were derived from Wright-Guild data,“ *Color Research & Application*, Jg. 22, Nr. 1, S. 11–23, 1997, ISSN: 0361-2317. DOI: 10.1002/(SICI)1520-6378(199702)22:1<11::AID-COL4>3.0.CO;2-7.
- [75] W. S. Stiles und J. M. Burch, „Interim report to the commission internationale de l’éclairage, Zurich, 1955, on the National Physical Laboratory’s investigation of colour-matching (1955),“ *Optica Acta: International Journal of Optics*, Jg. 2, Nr. 4, S. 168–181, 1955, ISSN: 0030-3909.
- [76] N. I. Speranskaya, „Determination of spectrum color coordinates for 27 normal observers,“ *Optics and Spectroscopy*, Jg. 7, S. 424, 1959.
- [77] CIE, *Fundamental chromaticity diagram with physiological axes*, Vienna, 2006.
- [78] W. S. Stiles und J. M. Burch, „N.P.L. Colour-matching Investigation: Final Report (1958),“ *Optica Acta: International Journal of Optics*, Jg. 6, Nr. 1, S. 1–26, 1959, ISSN: 0030-3909.
- [79] A. Sarkar, F. Autrusseau, F. Viénot, P. Le Callet und L. Blondé, „From CIE 2006 physiological model to improved age-dependent and average colorimetric observers,“ *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, Jg. 28, Nr. 10, S. 2033–2048, 2011. DOI: 10.1364/JOSAA.28.002033.
- [80] Sarkar, A and Blondé, L, „Colourimetric observer categories and their applications in colour and vision sciences,“ in *CIE Centenary Conference*, 2013.
- [81] M. D. Fairchild und R. L. Heckaman, „Measuring observer metamerism: The Nimeroff approach,“ *Color Research & Application*, Jg. 41, Nr. 2, S. 115–124, 2015, ISSN: 0361-2317. DOI: 10.1002/col.21954.

- [82] M. D. Fairchild, „Modeling Observer Metamerism through Monte Carlo Simulation (Poster),“ in *OSA Annual Meeting*, Rochester, 1996.
- [83] Y. Asano, *Observer Function Database*. Adresse: https://www.rit.edu/science/sites/rit.edu.science/files/2019-01/MCSL-Observer_Function_Database.pdf (besucht am 05.02.2022).
- [84] Y. Asano und M. D. Fairchild, „Categorical observers for metamerism,“ *Color Research & Application*, Jg. 45, Nr. 4, S. 576–585, 2020, ISSN: 0361-2317. DOI: 10.1002/col.22493.
- [85] P. van der Burgt, „Metamerism,“ in *Encyclopedia of color science and technology*, Ser. Springer-Reference, R. Luo, Hrsg., Berlin und Heidelberg: Springer, 2016, S. 1–5, ISBN: 978-3-642-27851-8. DOI: 10.1007/978-3-642-27851-8_150-6.
- [86] A. Sarkar, „CIE Special Metamerism Index: Change in Observer,“ in *Encyclopedia of color science and technology*, Ser. Springer-Reference, R. Luo, Hrsg., Berlin und Heidelberg: Springer, 2016, S. 1–9, ISBN: 978-3-642-27851-8. DOI: 10.1007/978-3-642-27851-8_322-1.
- [87] I. Nimeroff, J. R. Rosenblatt und M. C. Dannemiller, „Variability of Spectral Tristimulus Values,“ *Journal of the Optical Society of America*, Jg. 52, Nr. 6, S. 685, 1962, ISSN: 0030-3941. DOI: 10.1364/JOSA.52.000685.
- [88] E. Allen, „An index of metamerism for observer differences,“ in *Proceedings of the 1st AIC congress*, *Color*, Bd. 69, 1970, S. 771–784.
- [89] Y. Nayatani, K. Takahama und H. Sobagaki, „A proposal of new standard deviate observers,“ *Color Research & Application*, Jg. 8, Nr. 1, S. 47–56, 1983, ISSN: 0361-2317.
- [90] N. Ohta, „Formulation of a standard deviate observer by a nonlinear optimization technique,“ *Color Research & Application*, Jg. 10, Nr. 3, S. 156–164, 1985, ISSN: 0361-2317.
- [91] K. Takahama, H. Sobagaki und Y. Nayatani, „Prediction of observer variation in estimating colorimetric values,“ *Color Research & Application*, Jg. 10, Nr. 2, S. 106–117, 1985, ISSN: 0361-2317.
- [92] R. L. Alfvén und M. D. Fairchild, „Observer variability in metameric color matches using color reproduction media,“ *Color Research & Application*, Jg. 22, Nr. 3, S. 174–188, 1997, ISSN: 0361-2317.
- [93] B. Oicherman, R. Luo, A. Tarrant und A. Robertson, „The Uncertainty of Colour-Matching Data,“ *Color and Imaging Conference*, Jg. 2005, Nr. 1, S. 326–332, 2005, ISSN: 2166-9635. Adresse: <https://www.ingentaconnect.com/content/ist/cic/2005/00002005/00000001/art00063> (besucht am 05.02.2022).
- [94] D. L. MacAdam, „Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight*,“ *Journal of the Optical Society of America*, Jg. 32, Nr. 5, S. 247, 1942, ISSN: 0030-3941. DOI: 10.1364/JOSA.32.000247.
- [95] D. L. MacAdam, „Projective Transformations of I C I Color Specifications,“ *Journal of the Optical Society of America*, Jg. 27, Nr. 8, S. 294, 1937, ISSN: 0030-3941. DOI: 10.1364/JOSA.27.000294.
- [96] Y. Ohno und P. Blattner, „Chromaticity difference specification for light sources,“ *International Commission on Illumination, Tech. Rep. CIE TN*, Jg. 1, S. 2014, 2014.
- [97] CIE, *Methods of measuring and specifying colour rendering properties of light sources*, Vienna, Austria, 1965.
- [98] CIE, *Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources* (Publication / CIE, Commission Internationale de l’Eclairage). Vienna: Commission Internationale de l’Eclairage, 1995, Bd. 13.3, ISBN: 3900734577.
- [99] CIE, *Colour rendering of white LED light sources*, Vienna, 2007.
- [100] N. Narendran und L. Deng, „Color rendering properties of LED light sources,“ in *Solid State Lighting II*, I. T. Ferguson, N. Narendran, S. P. DenBaars und Y.-S. Park, Hrsg., Ser. SPIE Proceedings, SPIE, 2002, S. 61. DOI: 10.1117/12.452574.

- [101] S. Jost, C. Cauwerts und P. Avouac, „CIE 2017 color fidelity index Rf: a better index to predict perceived color difference?“ *Journal of the Optical Society of America A*, Jg. 35, Nr. 4, B202–B213, 2018, ISSN: 1084-7529. DOI: 10.1364/JOSAA.35.00B202.
- [102] CIE, *CIE 2017 colour fidelity index for accurate scientific use*, Vienna, 2017.
- [103] CIE, *CIE 2016 COLOUR FIDELITY INDEX FOR ACCURATE SCIENTIFIC USE: DRAFT FOR FINAL TC1-90 MEMBER CONSIDERATION*, 2016.
- [104] ISO 23603: 2005/CIE S 012/E: 2004, „Standard method of assessing the spectral quality of daylight simulators for visual appraisal and measurement of color,“ 2004.
- [105] A. Akbarinia und K. R. Gegenfurtner, „Color metamerism and the structure of illuminant space,“ *Journal of the Optical Society of America A, Optics, image science, and vision*, Jg. 35, Nr. 4, B231–B238, 2018. DOI: 10.1364/JOSAA.35.00B231.
- [106] Y. Zhao, P. Zhong und G. He, „Optimization of the light-emitting diode daylight simulator based on the CIE metamerism index method,“ *Color Research & Application*, 2021, ISSN: 0361-2317. DOI: 10.1002/co1.22700.
- [107] CIE, „Commission Internationale de l'Éclairage Proceedings,“ *Commission Internationale de l'Éclairage Proceedings*, 1924.
- [108] K. Sagawa und Y. Takahashi, „Spectral luminous efficiency as a function of age,“ *Journal of the Optical Society of America A*, Jg. 18, Nr. 11, S. 2659–2667, 2001, ISSN: 1084-7529. DOI: 10.1364/josaa.18.002659.
- [109] L. T. Sharpe, A. Stockman, W. Jagla und H. Jägle, „A luminous efficiency function, VD65* (λ), for daylight adaptation: A correction,“ *Color Research & Application*, Jg. 36, Nr. 1, S. 42–46, 2011, ISSN: 0361-2317. DOI: 10.1002/co1.20602.
- [110] CIE, „CIE 170-2:2015: Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes – Part 2: Spectral Luminous Efficiency Functions and Chromaticity Diagrams,“ Jg. 2015,
- [111] Y. Ohno, „OSA Handbook of Optics, Volume III Visual Optics and Vision Chapter for Photometry and Radiometry,“ *Optical Technology Division*, Jg. 26, 1999.
- [112] S. A. Fotios und G. J. Levermore, „Chromatic effect on apparent brightness in interior spaces II: sws Lumens model,“ *Lighting Research & Technology*, Jg. 30, Nr. 3, S. 103–106, 1998, ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/096032719803000302.
- [113] L. T. Sharpe, A. Stockman, W. Jagla und H. Jägle, „A luminous efficiency function, V*(λ), for daylight adaptation,“ *Journal of vision*, Jg. 5, Nr. 11, S. 948–968, 2005. DOI: 10.1167/5.11.3.
- [114] S. Fotios, D. Atli, C. Cheal, K. Houser und Á. Logadóttir, „Lamp spectrum and spatial brightness at photopic levels: A basis for developing a metric,“ *Lighting Research & Technology*, Jg. 47, Nr. 1, S. 80–102, 2015, ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/14771535153503170.
- [115] J. Ju, D. Chen und Y. Lin, „Effects of correlated color temperature on spatial brightness perception,“ *Color Research & Application*, Jg. 37, Nr. 6, S. 450–454, 2012, ISSN: 0361-2317. DOI: 10.1002/co1.20711.
- [116] T. Q. Khanh, P. Bodrogi, X. Guo und P. Q. Anh, „Towards a user preference model for interior lighting Part 1: Concept of the user preference model and experimental method,“ *Lighting Research & Technology*, Jg. 51, Nr. 7, S. 1014–1029, 2019, ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153518816469.
- [117] T. Q. Khanh, P. Bodrogi, X. Guo und P. Q. Anh, „Towards a user preference model for interior lighting. Part 2: Experimental results and modelling,“ *Lighting Research & Technology*, Jg. 51, Nr. 7, S. 1030–1043, 2019, ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153518816474.
- [118] J. Klabes, S. Babilon, S. Beck et al., „Towards a comprehensive lighting-quality model: validation of brightness, visual clarity, and color preference formulae applicability in two realistic mock-up scenarios,“ *OSA Continuum*, Jg. 4, Nr. 12, S. 3139, 2021. DOI: 10.1364/OSAC.431467.

- [119] A. Eissfeldt, B. Zandi, A. Herzog und T. Q. Khanh, „Quantifying observer metamerism of LED spectra which chromatically mimic natural daylight,“ *Optics Express*, Jg. 29, Nr. 23, S. 38 168–38 184, 2021. DOI: 10 . 1364/OE . 433411.
- [120] C. Gueymard, *SMARTS2, a simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: algorithms and performance assessment*. 1995.
- [121] A. Berk, L. S. Bernstein und D. C. Robertson, *MODTRAN: A moderate resolution model for LOW-TRAN*, 1987.
- [122] R. E. Bird und C. Riordan, „Simple Solar Spectral Model for Direct and Diffuse Irradiance on Horizontal and Tilted Planes at the Earth’s Surface for Cloudless Atmospheres,“ *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Jg. 25, Nr. 1, S. 87–97, 1986, ISSN: 0733-3021.
- [123] N. Ohta und A. Robertson, *Colorimetry: Fundamentals and applications* (Wiley-IS&T series in imaging science and technology). Chichester, West Sussex, England und Hoboken, NJ, USA: J. Wiley, 2005, ISBN: 9781280339837. DOI: 10 . 1002/0470094745.
- [124] Williams D.R., *Sun Fact Sheet*, NASA Goddard Space Flight Center, Hrsg., 2018. Adresse: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html> (besucht am 19.01.2022).
- [125] D. B. Judd, D. L. MacAdam, G. Wyszecki et al., „Spectral Distribution of Typical Daylight as a Function of Correlated Color Temperature,“ *Journal of the Optical Society of America*, Jg. 54, Nr. 8, S. 1031, 1964, ISSN: 0030-3941.
- [126] J. Tian, Z. Duan, W. Ren, Z. Han und Y. Tang, „Simple and effective calculations about spectral power distributions of outdoor light sources for computer vision,“ *Optics express*, Jg. 24, Nr. 7, S. 7266–7286, 2016. DOI: 10 . 1364/OE . 24 . 007266.
- [127] C. Gueymard, „Revised composite extraterrestrial spectrum based on recent solar irradiance observations,“ *Solar Energy*, Jg. 169, S. 434–440, 2018, ISSN: 0038-092X.
- [128] C. Wehrli, *Extraterrestrial solar spectrum: Publication no. 615 Physikalisch-Meteorologisches Observatorium and World Radiation Center (PMO/WRC) Davos Dorf*, 1985.
- [129] I. Nimeroff, „Propagation of errors in spectrophotometric colorimetry,“ *Journal of the Optical Society of America*, Jg. 43, Nr. 6, S. 531–533, 1953, ISSN: 0030-3941. DOI: 10 . 1364/JOSA . 43 . 000531.
- [130] I. Nimeroff, „Propagation of Errors in Tristimulus Colorimetry,“ *Journal of the Optical Society of America*, Jg. 47, Nr. 8, S. 697, 1957, ISSN: 0030-3941. DOI: 10 . 1364/JOSA . 47 . 000697.
- [131] D. L. Long und M. D. Fairchild, „Modeling Observer Variability and Metamerism Failure in Electronic Color Displays,“ *Journal of Imaging Science and Technology*, Jg. 58, Nr. 3, S. 304021–3040214, 2014, ISSN: 1062-3701. DOI: 10 . 2352/J . ImagingSci . Technol . 2014 . 58 . 3 . 030402.
- [132] J. Duff, K. Kelly und C. Cuttle, „Perceived adequacy of illumination, spatial brightness, horizontal illuminance and mean room surface exitance in a small office,“ *Lighting Research & Technology*, Jg. 49, Nr. 2, S. 133–146, 2017, ISSN: 1477-1535. DOI: 10 . 1177/1477153515599189.
- [133] S. Babilon, J. Klages, P. Myland und T. Q. Khanh, „Memory colors and the assessment of color quality in lighting applications,“ *Optics Express*, Jg. 29, Nr. 18, S. 28 968–28 993, 2021, ISSN: 1094-4087. DOI: 10 . 1364/OE . 426774.
- [134] S. Polster, *Neue Spektralwertfunktionen für die korrekte Bewertung von LED-Spektren und Einführung eines Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit*. 2014. Adresse: https://www.db-thueringen.de/servlets/mcrfilenodeservlet/dbt_derivate_00041621/ilm1-2018200111.pdf (besucht am 05.02.2022).

- [135] C. Teunissen, F. van der Heijden, S. H. Poort und E. de Beer, „Characterising user preference for white LED light sources with CIE colour rendering index combined with a relative gamut area index,“ *Lighting Research & Technology*, Jg. 49, Nr. 4, S. 461–480, 2017, ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153515624484.
- [136] M. S. Islam, R. Dangol, M. Hyvärinen, P. Bhusal, M. Puolakka und L. Halonen, „User preferences for LED lighting in terms of light spectrum,“ *Lighting Research & Technology*, Jg. 45, Nr. 6, S. 641–665, 2013, ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153513475913.
- [137] T. Q. Khanh, P. Bodrogi und X. Guo, „Towards a user preference model for interior lighting, Part 3: An alternative model,“ *Lighting Research & Technology*, Jg. 52, Nr. 2, S. 189–201, 2020, ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153519856056.
- [138] A. Eissfeldt und T. Q. Khanh, „Algorithm for real-time colour mixing of a five-channel LED system while optimising spectral quality parameters,“ *Lighting Research & Technology*, 2021. DOI: 10.1177/14771535211058096.
- [139] S. Bęczkowski und S. Munk-Nielsen, „Led spectral and power characteristics under hybrid PWM/AM dimming strategy,“ in *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2010, S. 731–735.
- [140] W. Lun, K. H. Loo, S. Tan, Y. M. Lai und C. K. Tse, „Bilevel Current Driving Technique for LEDs,“ *IEEE Transactions on Power Electronics*, Jg. 24, Nr. 12, S. 2920–2932, 2009, ISSN: 1941-0107.
- [141] M. Dyble, N. Narendran, A. Bierman und T. Klein, „Impact of dimming white LEDs: chromaticity shifts due to different dimming methods,“ in *Fifth International Conference on Solid State Lighting*, I. T. Ferguson, J. C. Carrano, T. Taguchi und I. E. Ashdown, Hrsg., Ser. SPIE Proceedings, SPIE, 2005, 59411H. DOI: 10.1117/12.625924.
- [142] K. H. Loo, Y. M. Lai, S. C. Tan und C. K. Tse, „On the Color Stability of Phosphor-Converted White LEDs Under DC, PWM, and Bilevel Drive,“ *IEEE Transactions on Power Electronics*, Jg. 27, Nr. 2, S. 974–984, 2012, ISSN: 1941-0107. DOI: 10.1109/TPEL.2010.2086080.
- [143] Y. Gu, N. Narendran, T. Dong und H. Wu, „Spectral and luminous efficacy change of high-power LEDs under different dimming methods,“ in *Sixth International Conference on Solid State Lighting*, I. T. Ferguson, N. Narendran, T. Taguchi und I. E. Ashdown, Hrsg., Ser. SPIE Proceedings, SPIE, 2006, 63370J. DOI: 10.1117/12.680531.
- [144] M. Wagner, „Einfluss von Temperatur und Strom auf die Zuverlässigkeit und das lichttechnische Verhalten von LED-Systemen,“ Diss., Technische Universität, Darmstadt, 2018. Adresse: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/8208/> (besucht am 07.03.2022).
- [145] S. Muthu, F. J. P. Schuurmans und M. D. Pashley, „Red, green, and blue LEDs for white light illumination,“ *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Jg. 8, Nr. 2, S. 333–338, 2002, ISSN: 1558-4542.
- [146] K. Man und I. Ashdown, „Accurate colorimetric feedback for RGB LED clusters,“ in *Sixth International Conference on Solid State Lighting*, I. T. Ferguson, N. Narendran, T. Taguchi und I. Ashdown, Hrsg., Ser. SPIE Proceedings, SPIE, 2006, S. 633 702. DOI: 10.1117/12.683239.
- [147] X. Qu, S. C. Wong und C. K. Tse, „Color Control System for RGB LED Light Sources Using Junction Temperature Measurement,“ in *IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, S. 1363–1368. DOI: 10.1109/IECON.2007.4459976.
- [148] A. T. L. Lee, H. Chen, S. Tan und S. Y. Hui, „Precise Dimming and Color Control of LED Systems Based on Color Mixing,“ *IEEE Transactions on Power Electronics*, Jg. 31, Nr. 1, S. 65–80, 2016, ISSN: 1941-0107.
- [149] A. Llenas und J. Carreras, „Arbitrary spectral matching using multi-LED lighting systems,“ *Optical Engineering*, Jg. 58, Nr. 03, S. 1, 2019, ISSN: 0091-3286. DOI: 10.1117/1.OE.58.3.035105.

- [150] H. Ries, I. Leike und J. Muschaweck, „Optimized additive mixing of colored light-emitting diode sources,“ *Optical Engineering*, Jg. 43, Nr. 7, S. 1531, 2004, ISSN: 0091-3286.
- [151] Kumavat Shailesh und Singh Tanuja, „Novel technique for implementation of Color Algorithm for LED used for general illumination,“ 2009.
- [152] S. Afshari, L. Moynihan und S. Mishra, „An optimisation toolbox for multi-colour LED lighting,“ *Lighting Research & Technology*, Jg. 50, Nr. 3, S. 467–481, 2018, ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153516669881.
- [153] Y. J. Saw, V. Kalavally und C. P. Tan, „The Spectral Optimization of a Commercializable Multi-Channel LED Panel With Circadian Impact,“ *IEEE Access*, Jg. 8, S. 136 498–136 511, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3010339.
- [154] F. Zhang, H. Xu und Z. Wang, „Optimizing spectral compositions of multichannel LED light sources by IES color fidelity index and luminous efficacy of radiation,“ *Applied optics*, Jg. 56, Nr. 7, S. 1962–1971, 2017.
- [155] A. Herzog, A. Eissfeldt, M. Wagner und T. Q. Khanh, „Degradation of Green High-Power LEDs - Influence on Color Stability of Multi-Channel Luminaires,“ *LED professional Review*, Nr. vol. 79, S. 59–66, 2020.
- [156] H. Kim, J. Liu, H.-S. Jin und H.-J. Kim, „An LED color control system with independently changeable illuminance,“ in *31st International Telecommunications Energy Conference, 2009*, Piscataway, NJ: IEEE, 2009, S. 1–5, ISBN: 978-1-4244-2490-0. DOI: 10.1109/INTLEC.2009.5351875.
- [157] J. C. A. Barata und M. S. Hussein, „The Moore–Penrose Pseudoinverse: A Tutorial Review of the Theory,“ *Brazilian Journal of Physics*, Jg. 42, Nr. 1-2, S. 146–165, 2012, ISSN: 0103-9733.
- [158] L. Lohaus, E. Leicht, S. Dietrich, R. Wunderlich und S. Heinen, „Advanced color control for multicolor LED illumination systems with parametric optimization,“ in *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2013, S. 3305–3310.
- [159] W. Davis und Y. Ohno, „Color quality scale,“ *Optical Engineering*, Jg. 49, Nr. 3, S. 033 602, 2010, ISSN: 0091-3286. DOI: 10.1117/1.3360335.
- [160] M. M. Sisto und J. Gauvin, „Accurate chromatic control and color rendering optimization in LED lighting systems using junction temperature feedback,“ in *Thirteenth International Conference on Solid State Lighting*, M. H. Kane, J. Jiao, N. Dietz und J.-J. Huang, Hrsg., Ser. SPIE Proceedings, SPIE, 2014, S. 919 002. DOI: 10.1117/12.2060391.
- [161] J. Duff, K. Kelly und C. Cuttle, „Spatial brightness, horizontal illuminance and mean room surface exitance in a lighting booth,“ *Lighting Research & Technology*, Jg. 49, Nr. 1, S. 5–15, 2017, ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153515597733.

Eigene Veröffentlichungen und betreute Arbeiten

Journal Veröffentlichungen

A. Eissfeldt und T.Q. Khanh: *Algorithm for real-time colour mixing of a five-channel LED system while optimising spectral quality parameters*. In: Lighting Research & Technology, 2021. <https://doi.org/10.1177/14771535211058096>

A. Eissfeldt, B. Zandi, A. Herzog und T. Q. Khanh: *Quantifying observer metamerism of LED spectra which chromatically mimic natural daylight*. In: Opt. Express 29, 38168-38184, 2021. <https://doi.org/10.1364/OE.433411>

B. Zandi, A. Eissfeldt, A. Herzog und T. Q. Khanh: *Melanopic Limits of Metamer Spectral Optimisation in Multi-Channel Smart Lighting Systems*. In: Energies. 2021; 14(3):527. <https://doi.org/10.3390/en14030527>

A. Herzog, A. Eissfeldt, M. Wagner und T. Q. Khanh: *Degradation of Green High-Power LEDs - Influence on Color Stability of Multi-Channel Luminaires*. In: LED professional Review (LpR), vol. 79, pp. 59-66, 2020

A. Eissfeldt und T.Q. Khanh: *Auf den Punkt gemischt – Ein Algorithmus zur Echtzeitfarbmischung eines 3-Kanal-LED-Systems*. In: Licht 9/2019, pp. 77-81, 2019

A. Eissfeldt und T.Q. Khanh: *LED-Licht und Tageslichtspektren: Adaptive LED-Beleuchtung für Räume mit Tageslichteintrag*. In: Licht 8/2017, pp. 74-79, 2017

Konferenzbeiträge

A. Herzog, A. Eissfeldt und T.Q. Khanh: *Variabilität von Tagesstrahlung – Spektren im Innenraum – Feldmessergebnisse und Analyse*. In: Tagungsband 4. Praxisforum Biologische Lichtwirkungen (BioWi 2016), Berlin: Praxisforum Biologische Lichtwirkung (BioWi 2016) 2016.

A. Eissfeldt und T.Q. Khanh: *Konzept zur adaptiven LED-Beleuchtung*. In: Tagungsband Lux junior 2017, Ilmenau: Lux junior 2017, 2017.

B. Zandi, A. Herzog, A. Eissfeldt und T. Q. Khanh: *Die spektrale Vermessung von Tageslicht und seine Auswirkung auf die circadian wirksamen Kenngrößen*. In: Tagungsband 5. Praxisforum Biologische Lichtwirkungen (BioWi 2017), Berlin: 5. Praxisforum Biologische Lichtwirkung (BioWi 2017) 2017.

Gastbeiträge

A. Eissfeldt und T.Q. Khanh: *Daytime and LED Light – Colorimetric and Technological Challenges*. Electronica 2018, München, 2018.

Betreute Arbeiten

P. Sauerbrunn. *Entwicklung und Charakterisierung eines adaptiven grafischen LED-Panels*. Bachelorarbeit, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2019.

S. Kunz. *Machbarkeitsstudie einer Flächenleuchte zur Simulation von Sonnenlichteinfall im Innenraum*. Masterarbeit, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2018.

J. Nix. *Entwicklung und Charakterisierung einer vernetzbaren und modularen LED-Leuchte zur adaptiven Innenraumbeleuchtung*. Masterarbeit, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2018.

L. Braisz. *Entwicklung eines wetterfesten Tageslichtsensors zur richtungsaufgelösten Farbort- und Intensitätsmessung*. Masterarbeit, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2018.

C. Becker. *Rekonstruktion von Tageslichtspektren mithilfe eines Farbsensors*. Bachelorarbeit, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2017.

W. Anjum. *Entwicklung eines Farbsensormoduls zur Echtzeitmessung des Tageslichts im Außenbereich*. Bachelorarbeit, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2017.

Erklärung laut Promotionsordnung

§Abs. 1 lit. c PromO

Ich versichere hiermit, dass die elektronische Version meiner Dissertation mit der schriftlichen Version übereinstimmt.

§8 Abs. 1 lit. d PromO

Ich versichere hiermit, dass zu einem vorherigen Zeitpunkt noch keine Promotion versucht wurde. In diesem Fall sind nähere Angaben über Zeitpunkt, Hochschule, Dissertationsthema und Ergebnis dieses Versuchs mitzuteilen.

§9 Abs. 1 PromO

Ich versichere hiermit, dass die vorliegende Dissertation selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen verfasst wurde.

§9 Abs. 2 PromO

Die Arbeit hat bisher noch nicht zu Prüfungszwecken gedient.

Darmstadt, 08.03.2022

gez. Adrian Eissfeldt

