

Probandenversuch zur Ermittlung von Grenzwerten für Farbsäume bei Optiken für die Allgemeinbeleuchtung

Marie Henning

TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik

BJB GmbH & Co. KG

Abstract/Zusammenfassung

Im Rahmen einer Masterarbeit wurde ein Versuch zur Ermittlung von Grenzwerten für Farbsäume durchgeführt. Das Ziel dieses Versuches war es, Werte zu ermitteln die in der Optikentwicklung verwendet werden können um vorab beurteilen zu können, ob die Farbsäume störend sind oder akzeptiert bzw. nicht gesehen werden.

Dazu wurde ein Versuch im Labor aufgebaut, bei dem Probanden aus der Entwicklungsabteilung ihre Beurteilung zu 15 verschiedenen Optiken bezüglich der Farbsäume abgegeben haben. Diese subjektiven Bewertungen wurden anschließend mit Messwerten der Optiken verglichen. Es wurden dazu verschiedene Möglichkeiten der Auswertung erprobt.

Zudem wurde der Versuch in LightTools nachgebaut und ein Vergleich zwischen den Messwerten und den Simulationsergebnissen gezogen.

Index Terms: Farbsäume, Allgemeinbeleuchtung,

1 Einleitung

Im Rahmen einer Masterarbeit wurde ein Probandenversuch durchgeführt, um Grenzwerte für Farbabstände von Farbsäumen zu ermitteln. Das Ziel bestand darin, festzustellen, welche Farbabstände als Grenzwerte für die Simulation von Farbsäumen verwendet werden können und ob es dabei Abweichungen zur Realität gibt. Der Versuch wurde in einem bestimmten Szenario durchgeführt, welches die realen Bedingungen widerspiegelte. Die Teilnehmer wurden gebeten, verschiedene Farbsäume zu beurteilen, indem sie die Zonen bestimmten, in denen sie den Übergang von einer Farbe zu einer anderen wahrnehmen konnten. Dabei wurden unterschiedliche Optiken verwendet, um sowohl gute als auch schlechte Ergebnisse abzudecken.

Nach Abschluss des Probandenversuchs wurden die erhobenen Daten analysiert. Es wurde überprüft, ob konsistente Muster bei den Bewertungen der Farbabstände identifiziert werden konnten. Anschließend wurde das Versuchsszenario in einer Simulation nachgebildet. Dabei wurden die ermittelten Grenzwerte der Farbabstände aus dem Probandenversuch als Referenz verwendet. In der Simulation wurde



überprüft, ob diese Grenzwerte auch gültig waren oder ob es größere Abweichungen gab. Die Ergebnisse des Probandenversuchs und der Simulation wurden analysiert und miteinander verglichen. Des Weiteren wurden die Grenzwerte aus dem Probandenversuch betrachtet und überprüft, ob sie auch für die Simulation geeignet sind.

Es folgen eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus, der Durchführung und der Ergebnisse des Probandenversuchs. Es wird aufgezeigt, wie die Grenzwerte für Farbabstände von Farbsäumen ermittelt und wie sie in der Simulation angewendet wurden, um eine realitätsnahe Darstellung zu erreichen.

2 Aufbau und Durchführung

Für die Durchführung des Versuches wurden zwei verschiedene Ansätze verwendet, zum einen die Verwendung einer Farbmesskamera und zum anderen die Befragung von Personen zu denselben Lichtbildern basierend auf ihrem subjektiven Empfinden.

Der Versuch wurde in einem Dunkellabor durchgeführt, um eine kontrollierte Umgebung für die Farbwahrnehmung zu gewährleisten. Der Aufbau ist in *Abbildung 2.1* aus der Sicht des Probanden dargestellt. Dieser umfasst eine weiße Papp-/Schaumstoff-Platte mit den Abmessungen 1,38 m x 2,37 m. Auf dieser Platte wurden Zonen eingezeichnet, die einer Zielscheibe ähneln.

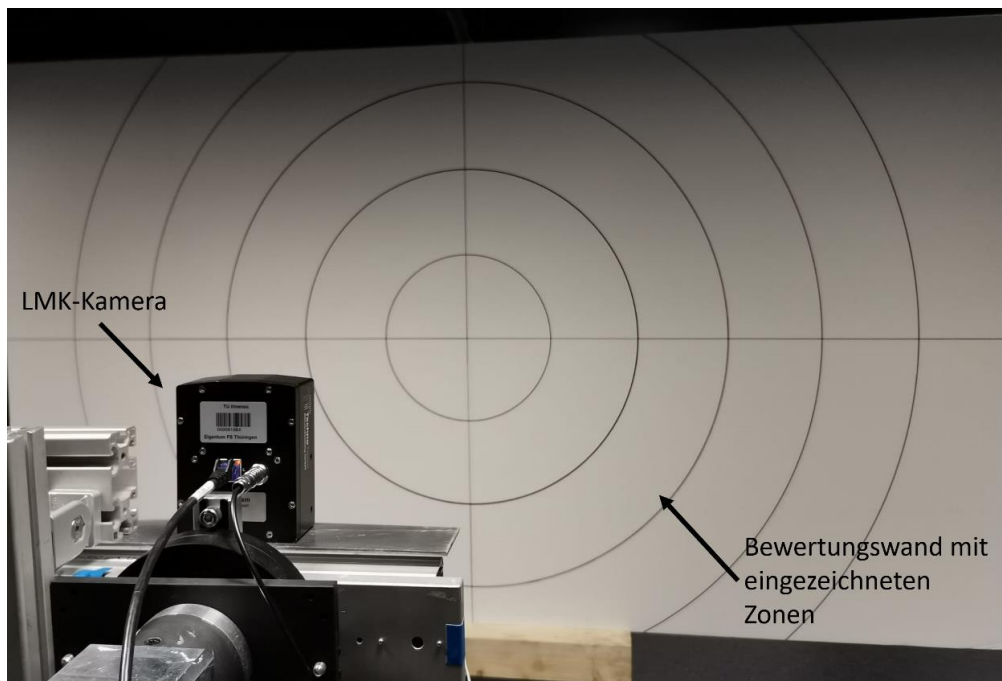


Abbildung 2.1: Versuchsaufbau des Probandenversuchs: Blickfeld des Probanden auf die Bewertungswand

In der *Abbildung 2.2* ist die Seitenansicht des Versuchsaufbaus dargestellt. Zur Durchführung des Probandenversuchs wurde das Leuchtmittel, bestehend aus Optik

und Platine, auf einer Vorrichtung parallel zur Wand positioniert. Der Abstand zwischen der Vorderseite der Optik und der Wand betrug $l = 1,52$ m. Die aktuelle Bewertung von Farbsäumen bei BJB erfolgt bereits anhand eines ähnlichen Aufbaus. Allerdings sind auf der Bewertungswand keine Zonen markiert.

In der Mitte oberhalb der Optik wurde die Farbmesskamera LMK 4 Color der Firma Techno Team angebracht. Ein Wagen auf einem Schienensystem wurde fixiert, um sicherzustellen, dass die Ausrichtung des Leuchtmittels und der Kamera zur Bewertungswand immer gleich blieb. Die Beobachtungswand wurde so ausgerichtet, dass sich der Mittelpunkt der Wand nahezu mittig zum geometrischen Mittelpunkt der Optik befand, obwohl dadurch eine Verzerrung im Kamerabild entstand. Dennoch wurde es für sinnvoller erachtet, die Optik mittig zur Platte auszurichten und nicht die Kamera. Um die Verzerrung so gering wie möglich zu halten, wurde das Objektiv der Kamera so nah wie möglich an den Mittelpunkt der Optik gebracht. Der Abstand in der Höhe zwischen dem Mittelpunkt des Kameraobjektivs und dem Mittelpunkt der Optik betrug 8 cm. Das Kameraobjektiv befand sich 6 cm näher an der Wand als das Leuchtmittel.

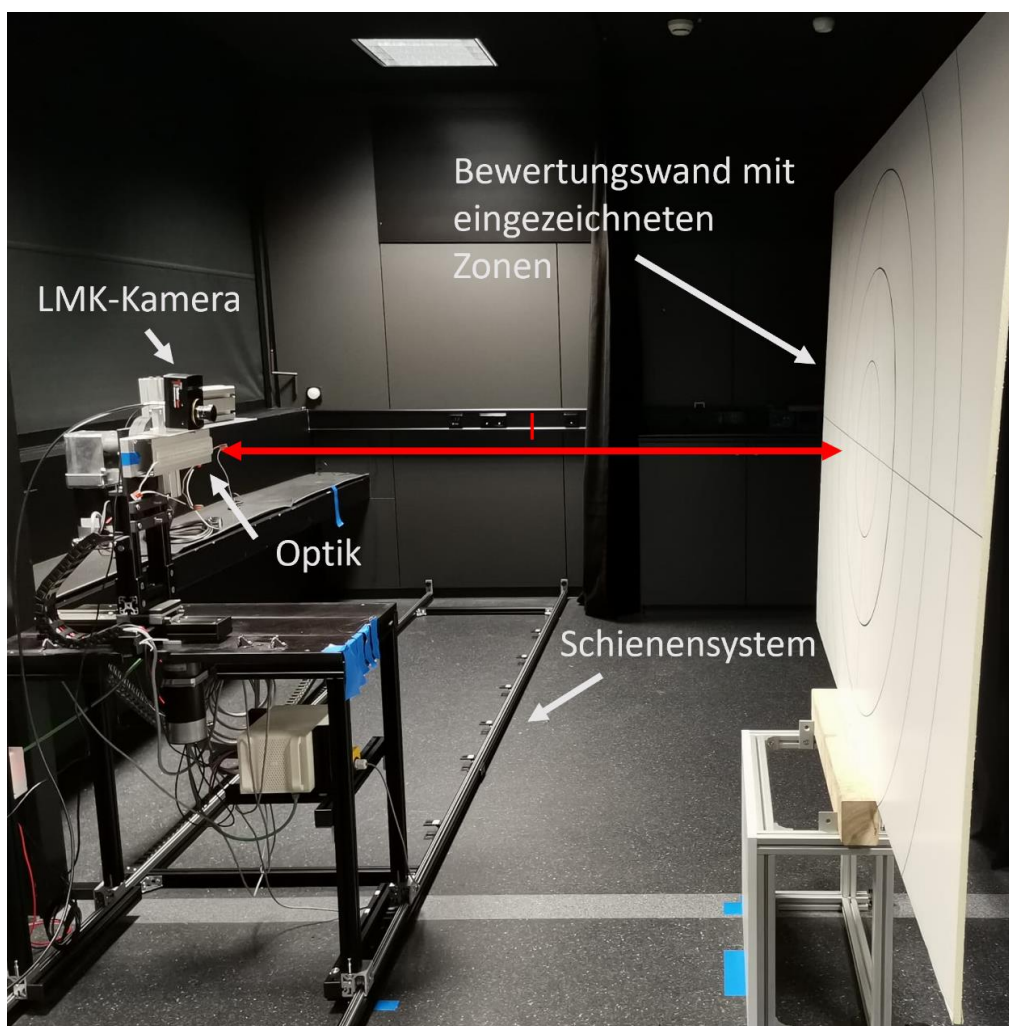
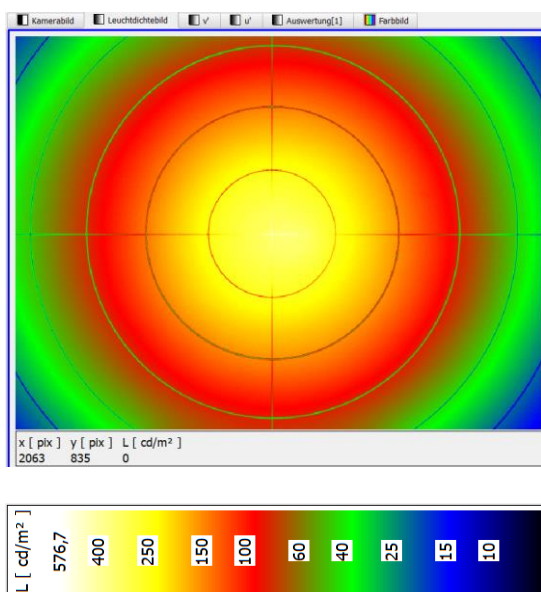


Abbildung 2.2: Versuchsaufbau des Probandenversuches: Seitenansicht

Der Versuch wurde mit 15 verschiedenen Optiken durchgeführt. Um eine detaillierte Bewertung der Optiken vorzunehmen, wurde von jeder Optik eine Aufnahme mit der Farbmesskamera gemacht. Die Kamera wurde über einen Laptop mit der Software LMK LabSoft verbunden, um das Bild zu erfassen. Aus den Aufnahmen wurden ein Leuchtdichtebild und ein Farbbild generiert. Die *Abbildung 2.3* stellt diese beiden Darstellungen am Beispiel der Optik A dar.

Das Leuchtdichtebild wird in einer Falschfarbendarstellung präsentiert. Normalerweise befindet sich rechts neben dem Bild eine Skala, die die Werte darstellt. In diesem Fall wurde die Skala unter dem Bild platziert, um eine bessere Darstellung zu gewährleisten. Das Farbbild berücksichtigt nicht nur die Farborte in den Koordinaten u' und v' , sondern auch die Leuchtdichte. Es gibt keine Skala für dieses Bild, aber wenn die Maus über das Bild bewegt wird, werden die entsprechenden Werte für u' , v' und L unter dem Diagramm angezeigt. Beide Diagramme wurden logarithmisch dargestellt.

a) Leuchtdichtebild



b) Farbbild

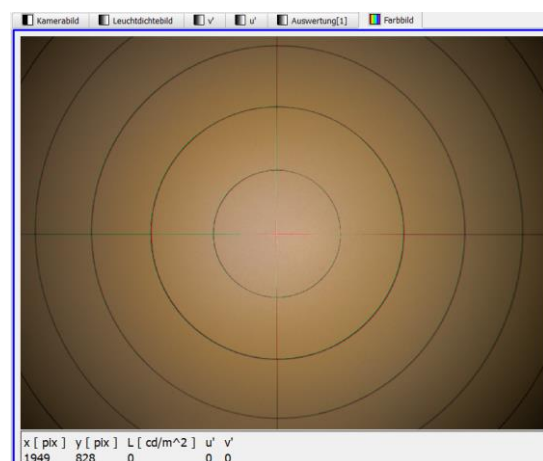
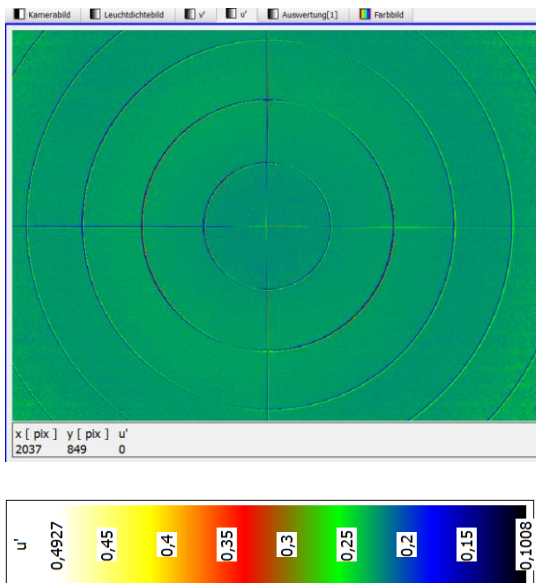


Abbildung 2.3: Kameraaufnahme der Optik A a) Leuchtdichtebild in Falschfarben b) Farbbild

In der *Abbildung 2.4* werden die grafische Darstellung der Farbortkoordinaten u' und v' in Falschfarben dargestellt. Anhand des Beispiels der Optik A lässt sich in b) gut erkennen, wie sich der Farbort in den verschiedenen Zonen verändert. Auch in a) ist dies sichtbar, allerdings schwerer zu erkennen. Durch Bewegen der Maus über das Bild in der Software werden unten links die jeweiligen u' - und v' -Werte angezeigt, die an der entsprechenden Stelle im Bild abgebildet sind.

a) u'



b) v'

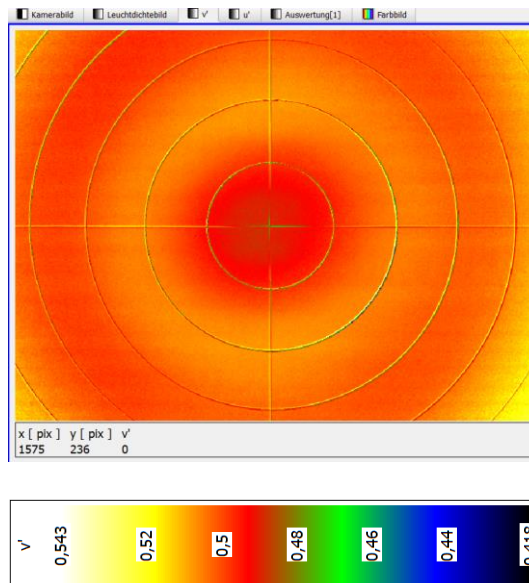


Abbildung 2.4: Farbkoordinaten der Kameraaufnahme der Optik A a) u' b) v'

In der *Abbildung 2.5* wird ein Bild mit Farbunterschieden in Falschfarbendarstellung gezeigt. Hierbei werden nicht nur die Farbunterschiede, sondern auch die Unterschiede in der Leuchtdichte berücksichtigt. Als Referenz wurde die Zone 4, also Kreisring Nummer 4, ausgewählt. Da die Software LabSoft nur rechteckige Regionen als Referenz zulässt und keine Kreisringe, wurde in den Ring eine kleine rechteckige Region mit der Nummer 1 eingezeichnet, die als Referenz verwendet wird. Dies war möglich, da die Optik eine rotationssymmetrische Abstrahlung aufweist.

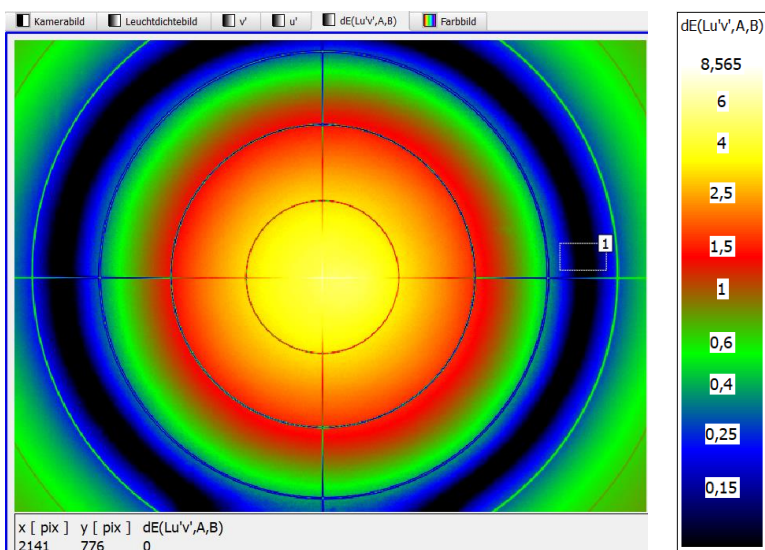


Abbildung 2.5: Kameraaufnahme der Optik A Farbunterschiedsbild mit der Referenz Region 1

In dem Bild, das von der ersten Optik aufgenommen wurde, wurden Regionen erzeugt, siehe *Abbildung 2.6*. Die Regionen, auf die im weiteren Verlauf der Arbeit Bezug genommen wird, werden als Zonen bezeichnet. Durch das Erstellen dieser Zonen wurden die schwarzen Linien eliminiert, um sicherzustellen, dass sie die Messergebnisse nicht beeinflussen. Die Zonen wurden zu Beginn nur einmal eingezeichnet und konnten für alle weiteren Aufnahmen übernommen werden, wodurch sie immer gleich groß und an derselben Stelle platziert waren. Die Zonen 6 und 7 wurden verwendet, um die horizontale und vertikale schwarze Linie zu eliminieren. In *Abbildung 2.7* ist im Farbwertflächendiagramm zu erkennen, dass die Messwerte in den Zonen 6 und 7 stark streuen und daher nicht berücksichtigt werden sollten.

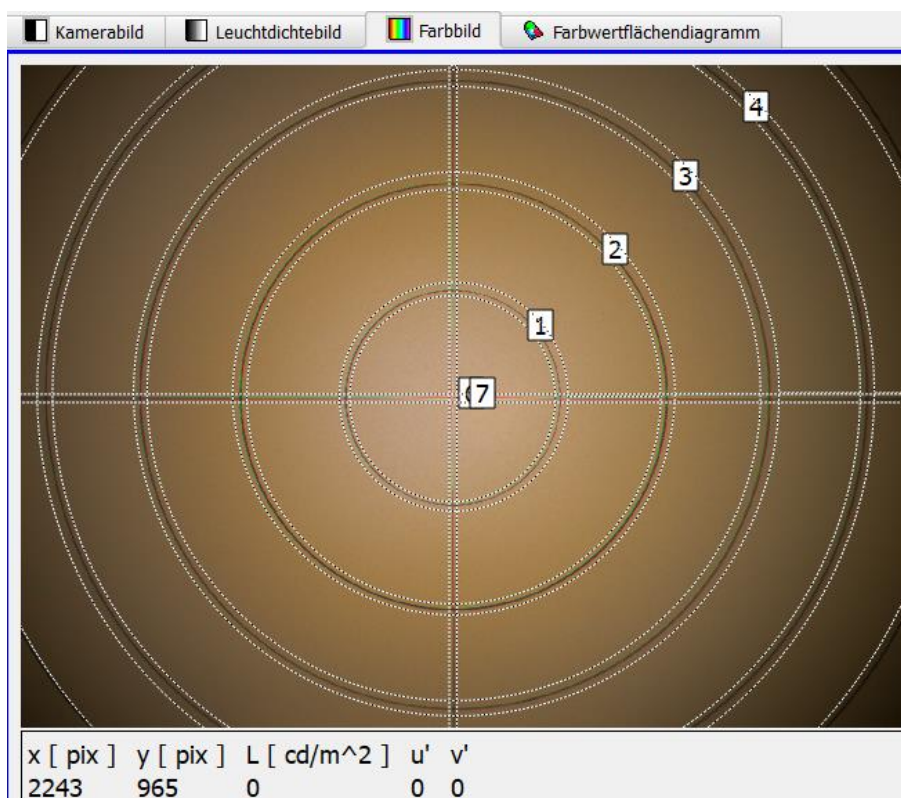


Abbildung 2.6: Farbbild des Lichtbildes der Optik A mit eingezeichneten Regionen

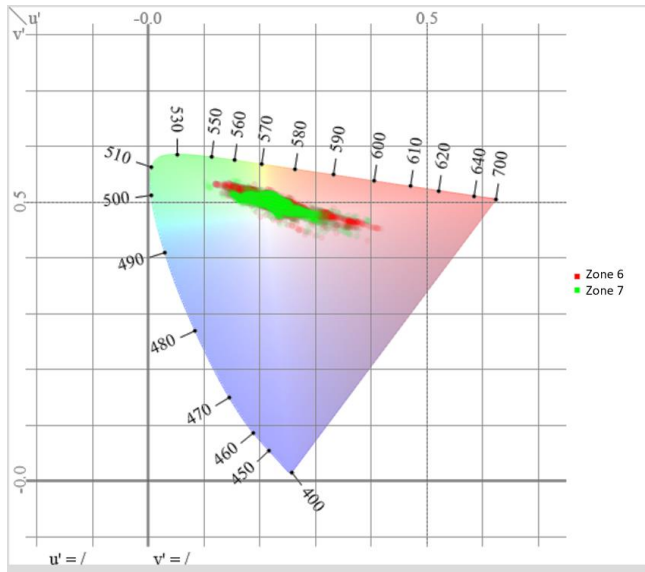
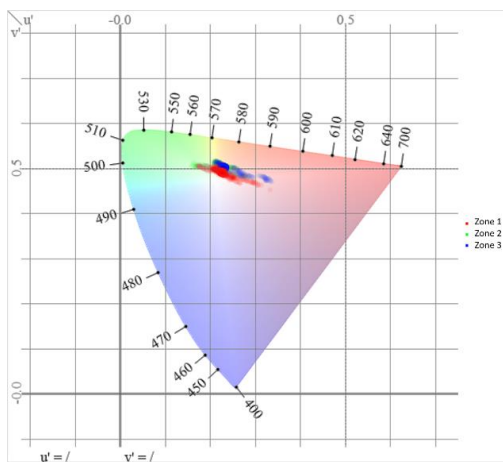


Abbildung 2.7: Farbwertflächendiagramm der Zonen 6 und 7 des Lichtbildes der Optik A: Messwerte der Zone 6 dargestellt in rot und Messwerte der Zone 7 dargestellt in grün

Anschließend wurde ein Farbwertflächendiagramm erstellt, das alle Messwerte der einzelnen Zonen in verschiedenen Farben darstellt. Dieses Diagramm in *Abbildung 2.8* ermöglicht es, die Streuung der Messwerte in jeder Zone deutlich zu erkennen. Im Hintergrund des Diagramms wird die CIE-Farbtabelle von 1976 mit den Farbkoordinaten u' und v' angezeigt. Die Daten des Farbwertflächendiagramms umfassen die Pixelkoordinaten x und y , die Leuchtdichte L und die Farbkoordinaten u' und v' für jeden Punkt. Die Daten wurden exportiert und anschließend in Excel zur weiteren Auswertung verwendet. Für das Farbwertflächendiagramm wurden pro Zone 50.000 Datenpunkte generiert, wobei eine Glättung von 1 angewendet wurde.

a)



b)

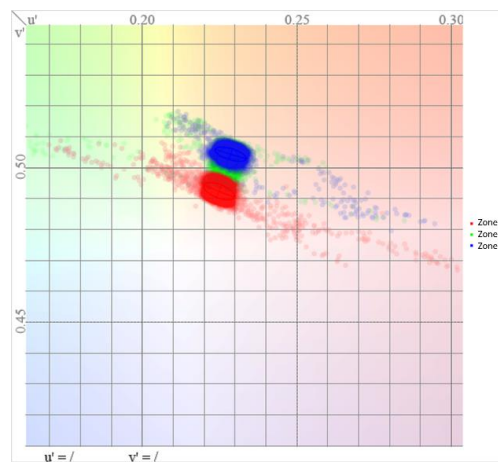
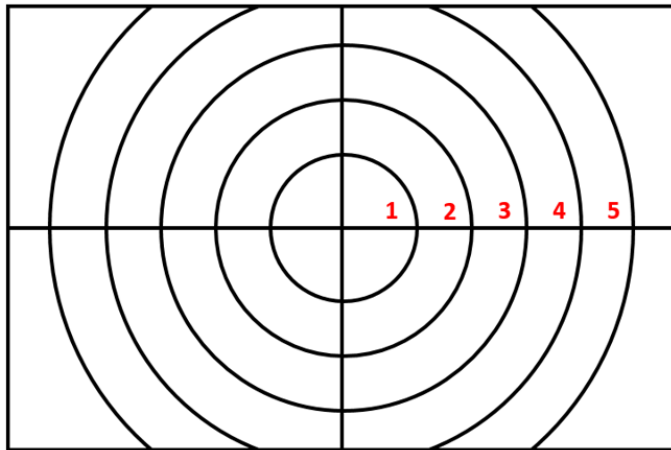


Abbildung 2.8: Farbwertflächendiagramm des Lichtbildes der Optik A der Zonen 1, 2 und 3 a) Original b) Ausschnitt vergrößert

Im Anschluss daran erfolgte der zweite Teil des Versuchs, bei dem die drei Probanden gemeinsam die Lichtbilder der verschiedenen Optiken begutachteten und ebendiese bewerteten. Im Zuge dessen füllten sie einen Bewertungsbogen aus. Zur Veranschaulichung ist ein Beispiel für die Optik A in *Abbildung 2.9* dargestellt.

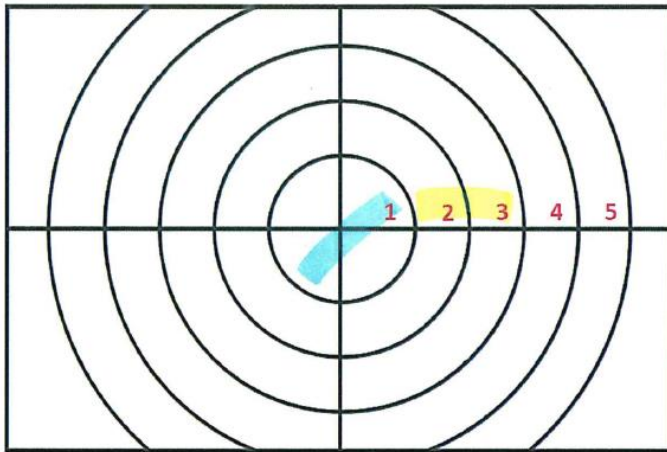


Referenz: Zone

Z1:
Z2:
Z3:
Z4:
Z5:

Abbildung 2.9: Probandenversuch: Leeres Bewertungsfeld für die Optik A

Die *Abbildung 2.9* stellt die Bewertungstafel mit den fünf Ringen, jeweils für jede Optik dar. Zunächst einigten sich die Probanden auf eine Referenzzone. Diese wurde so gewählt, dass sie sich annähernd bei 4000K befand und in der jeweiligen Zone ein möglichst homogener Farbverlauf vorlag. Das heißt, es fand kein Farbwechsel von beispielsweise blau zu gelb innerhalb der Zone statt. Um die 4000K-Zone zu bestimmen, wurde ein Vergleich mit einer Referenzquelle durchgeführt. Dabei wurde eine Platine mit 4000K-LEDs abwechselnd mit der zu bewertenden Optik eingeschaltet und verglichen. Anschließend wurden die einzelnen Zonen in Bezug zur Referenzzone bewertet. Dabei wurde versucht, die Zonen unabhängig von der spezifischen Abstrahlcharakteristik der Optik zu bewerten. Es gab nur zwei Bewertungsoptionen: Entweder wurde die jeweilige Zone als "in Ordnung" oder "nicht in Ordnung" gekennzeichnet. Zusätzlich wurden die Zonen, die als "nicht in Ordnung" bewertet wurden, in gelb oder blau markiert. Dies war von der Richtung, in welche sie nach Meinung der Probanden von der Referenz abwichen, abhängig. Ein Beispiel dafür ist in *Abbildung 2.10* für die Optik A zu sehen.



Referenz: Zone 4

Z1: }
 Z2: } nicht ok
 Z3: }
 Z4: }
 Z5: } ok

Abbildung 2.10: Probandenversuch: Ausgefülltes Bewertungsfeld für die Optik A

3 Bewertungsmethoden

Im Folgenden werden zwei verschiedene Bewertungsmethoden vorgestellt, die speziell für den Probandenversuch entwickelt wurden.

3.1 Bewertungsmethode 1

Die Daten des Farbwertflächendiagramms wurden in Excel importiert. Die Datei enthielt die Pixelpositionen x und y , die Farbkoordinaten u' und v' sowie die Leuchtdichte L für jede einzelne Zone.

Zunächst wurden die Werte der Zonen 6 und 7 aus *Abbildung 2.6* herausgefiltert, sodass nur die Zonen 1 bis 5 berücksichtigt wurden. Dadurch reduzierte sich die Anzahl der Messwerte pro Zone von jeweils 50.000 auf die in *Tabelle 3.1* dargestellten Werte.

Tabelle 3.1: Anzahl der Messwerte pro Zone

Zonenummer	Anzahl der Messwerte
1	36722
2	37033
3	37976
4	37559
5	33559

Exemplarisch wird die Auswertung der Optik A gezeigt. Zunächst wird die von den Probanden als Referenzzone ausgewählte Zone betrachtet, in diesem Fall Zone 4. Ein Ausschnitt der Auswertung dieser Zone ist in *Abbildung 3.1* dargestellt, auf den im Folgenden Bezug genommen wird.

Zuerst wurde der Mittelwert der Farbkoordinaten u' und v' dieser Zone ermittelt (Zellen F2 und G2). Anschließend wurde der Farbabstand der einzelnen Messwerte zum Mittelwert berechnet. Diese Werte sind fortlaufend in Spalte H zu finden. Der Mittelwert der berechneten Farbabstände wurde anschließend ermittelt. In Zelle N2 wird dieser als direkter Abstand von $u'v'$ angegeben, während er in Zelle N3 als SDCM (Standard Deviation of Colour Matching), also in Form von MacAdam-Ellipsen, angegeben wird. Zudem wurde die Standardabweichung der Farbabstände in Zelle Q2 bestimmt.

Des Weiteren wurde ein Farbabstand unter Berücksichtigung der Leuchtdichte ermittelt. Hierbei wurde zunächst der Mittelwert der Leuchtdichte in Zone 4 gebildet (Zelle I2). Daraufhin wurde der Farbabstand der einzelnen Messwerte zu den

Mittelwerten von u' , v' und L der Zone berechnet. Auch aus diesen Farbabständen wurde ein Mittelwert gebildet (Zelle N11). Die dazugehörige Standardabweichung ist in Zelle Q11 zu finden.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	N	Q
1	pX[4]	pY[4]	L (Lu'v')	u' (Lu'v')	v' (Lu'v')	Mittelwert u'	Mittelwert v'	Delta u'v'	Mittelwert L	Delta u'v' inkl. Leuchtdichte		Mittelwert der Farbabstände	Standardabweichung
2	336	12	45,75	0,2276	0,4979	0,226221418	0,500848815	0,00325515	61,91183663	0,261066284		0,002717735	0,001486104
3	339	12	46,28	0,2244	0,4982	0,226221418	0,500848815	0,00321462	61,91183663	0,252505892	SDCM:	2,470668248	
4	342	12	47,08	0,2268	0,4994	0,226221418	0,500848815	0,001560071	61,91183663	0,239568908			
5	345	12	46,93	0,2276	0,4984	0,226221418	0,500848815	0,002810193	61,91183663	0,242002946			
6	348	12	47,21	0,2276	0,498	0,226221418	0,500848815	0,003164844	61,91183663	0,237485158			
7	351	12	47,16	0,2272	0,4963	0,226221418	0,500848815	0,004652885	61,91183663	0,238317094			
8	354	12	48,17	0,2248	0,4986	0,226221418	0,500848815	0,002660375	61,91183663	0,221974091			
9	357	12	48,19	0,2273	0,4967	0,226221418	0,500848815	0,004286725	61,91183663	0,22167656			
10	360	12	48,23	0,2329	0,4955	0,226221418	0,500848815	0,008556476	61,91183663	0,221154616		inkl. Leuchtdichte	
11	363	12	49,26	0,2278	0,4977	0,226221418	0,500848815	0,003522351	61,91183663	0,204382823		0,129726467	0,076589467

Abbildung 3.1: Ausschnitt der Auswertung der Referenzzone 4 für die Optik A

Im Anschluss daran wurde die gleiche Prozedur für die Zonen 1, 2, 3 und 5 wiederholt. Der einzige Unterschied bestand darin, dass die zuvor ermittelten Mittelwerte der Referenzzone 4 als Referenzwerte für die anderen Zonen verwendet wurden. Dies bedeutet, dass in den Spalten F, G und I der anderen Zonen nicht ihre eigenen berechneten Mittelwerte zu finden sind, sondern die Mittelwerte der Referenzzone 4. Dadurch konnte der Abstand der Messwerte zum Mittelwert der Referenzzone berechnet werden.

Nach Abschluss der Auswertung für die fünf Zonen, wurden die Ergebnisse in einer Excel-Mappe mit den Auswertungen der Probanden zusammengefasst, wie in *Abbildung 3.2* und *Abbildung 3.3* dargestellt. In den Spalten A bis C sind die Auswertungen der Probanden zu sehen. Die Zonen, die als "nicht in Ordnung" markiert wurden, sind jeweils in der entsprechenden Farbe hervorgehoben, die nach Ansicht der Beobachter von der Referenzzone abweicht. In der *Abbildung 3.2* in Spalte H werden die Mittelwerte der Farbabstände der einzelnen Zonen im Vergleich zum Mittelwert der Referenzzone aufgeführt. Die Werte sind farblich gekennzeichnet und werden in der Einheit SDCM angegeben. Der Wert, der in kräftigem Rot dargestellt ist, vergleiche Zelle H4, ist der größte Wert und weicht somit am stärksten vom Mittelwert der Referenzzone ab. Der Wert in kräftigem Grün hingegen ist der kleinste Wert und liegt daher am nächsten am Mittelwert der Referenzzone. In der Regel entspricht dieser Wert auch dem Wert der jeweiligen Referenzzone. Die anderen Werte liegen entsprechend der Farbskala zwischen dem größten und dem kleinsten Wert. Diese Farbskala ist in *Abbildung 3.4* dargestellt und wird auch für die Hervorhebung der Mittelwerte der Farbabstände aus *Abbildung 3.3*, einschließlich der Leuchtdichte in Spalte L übernommen. In Spalte I und M werden die Standardabweichungen der Mittelwerte für die beiden verschiedenen Abstände dargestellt. Zudem wurde der Variationskoeffizient aus dem Quotienten der Standardabweichung und dem Mittelwert in Spalte J und N berechnet. Diese Spalten zeigen, dass die Streuung der Messwerte in den einzelnen Zonen stark variiert. In Spalte O und P sind schließlich die Mittelwerte der jeweiligen Zonen für u' und v' angegeben.

	A	B	C	D	E	H	I	J	
1		Probandenbewertung					Mittelwert der Farbabstände	Standardabweichung	Variationskoeffizient [%]
2	1	schlecht		Zone 1					
3	2	schlecht				0,00864471	0,002114289	24,45760471	
4	3	schlecht			SDCM:	7,858827273	1,922080909		
5	4	ok		Zone 2					
6	5	ok				0,00421202	0,00201256	47,78134957	
7	Gesamt	schlecht			SDCM:	3,829109091	1,8296		
8	Referenz	4		Zone 3					
9						0,00484026	0,00168126	34,73491093	
10					SDCM:	4,400236364	1,528418182		
11				Referenzzone 4					
12						0,002717735	0,001486104	54,68171106	
13					SDCM:	2,470668182	1,351003636		
14				Zone 5					
15						0,00659885	0,00361985	54,85577032	
16					SDCM:	5,998954545	3,290772727		

Abbildung 3.2: Zusammenfassende Auswertung der Optik A inklusive Probandenauswertungen nach der Bewertungsmethode 1

	A	B	C	D	L	M	N	O	P	
1		Probandenbewertung				der Farbabstände inkl. Leuchtdichte	Standardabweichung inkl. Leuchtdichte	Variationskoeffizient [%]: Standardabweichung durch Mittelwert	Mittelwert u' - der jeweiligen Zone	Mittelwert v' - der jeweiligen Zone
2	1	schlecht		Zone 1						
3	2	schlecht			3,709082964	0,419831987	11,31902389	0,224535228	0,492685284	
4	3	schlecht								
5	4	ok		Zone 2						
6	5	ok			2,153997175	0,426670493	19,80831258	0,227560261	0,50323753	
7	Gesamt	schlecht								
8	Referenz	4		Zone 3						
9					0,791958258	0,282270457	35,64208769	0,228138926	0,504609627	
10				Referenzzone 4						
12					0,129726467	0,076589467	59,03919885	0,22622142	0,50084882	
14				Zone 5						
15					0,441019748	0,08422837	19,09854835	0,228000188	0,50596844	

Abbildung 3.3: Zusammenfassende Auswertung der Optik A inklusive Probandenauswertungen nach der Bewertungsmethode 1 inklusive Berücksichtigung der Leuchtdichte



Abbildung 3.4: Farbskala für die farblich markierten Werte in der Gesamtauswertung der Optik A, aus Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3

3.2 Bewertungsmethode 2

Im Rahmen der zweiten Bewertungsmethode wurde in *Abbildung 3.5* eine waagerechte Linie als Region in das Bild eingezeichnet. Innerhalb dieser Region wurden die Pixelwerte sowie die Farbkoordinaten x , y , u' und v' der jeweiligen Pixel extrahiert. Anschließend erfolgte die Berechnung der ähnlichsten Farbtemperatur mithilfe von Gleichung (1).

$$CCT = 437 \times n^3 + 3601 \times n^2 + 6861 \times n + 5517 \quad (1)$$

Die Gleichung (2) ermöglicht die Berechnung von n .

$$n = \frac{x - 0,332}{0,1858 - y} \quad (2)$$

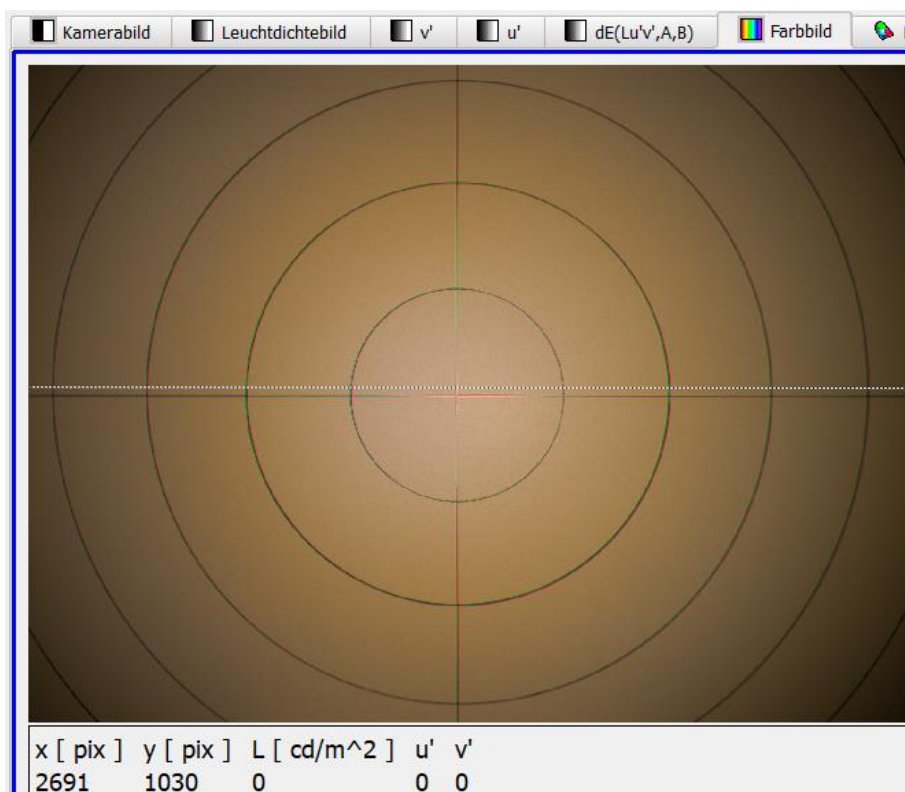


Abbildung 3.5: Kameraaufnahme der Optik A mit einer waagrecht eingezeichneten Region

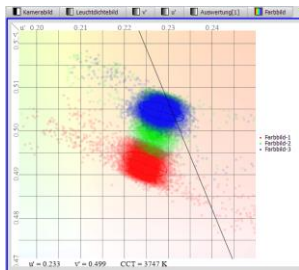
Für die Datenanalyse wurde ein Script in Matlab erstellt. Mit diesem Script wurde aus den einzelnen Messwerten der Region ein Polynom 9. Grades generiert. Anschließend wurden die Steigungen in den verschiedenen Zonen sowie die Schnittmenge der jeweiligen Zone mit der Referenzzone ermittelt.

Es wurden zunächst Versuche mithilfe der ähnlichsten Farbtemperatur durchgeführt. Die CCT-Werte erwiesen sich schnell als ungenau für die Betrachtung der

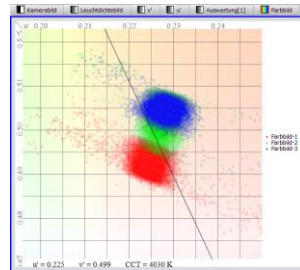
Farbunterschiede. In *Abbildung 3.6* sind drei Bilder aus der LMK LabSoft zu sehen, die das Farbwertflächendiagramm der Optik A im CIE 1976 Farbraum darstellen. In diesem Diagramm werden die Messwerte der Zone 1 bis 3 jeweils in den Farben rot, grün und blau visualisiert. Die Unterscheidung zwischen den drei Bildern liegt in der schwarzen Linie, der sogenannten Judd'schen Geraden, die den Planck'schen Kurvenzug an einem bestimmten Punkt schneidet.

In Bild a) nehmen alle Messwerte, die sich entlang dieser Geraden befinden, den Wert 3747 K an. Die Werte unterscheiden sich in u' und v' , jedoch entsprechen sie der ähnlichsten Farbtemperatur. Ähnlich verhält es sich in Bild b) mit 4030 K und in Bild c) mit 4162 K. Diese Beispiele verdeutlichen, dass die CCT-Werte für eine detailliertere Betrachtung zu ungenau sind, da verschiedene Messwerte denselben Wert annehmen würden.

a) 3747 K



b) 4030 K



c) 4162 K

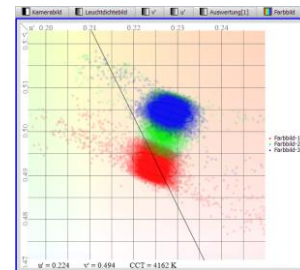


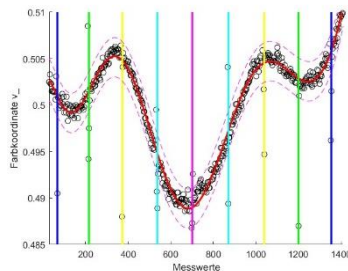
Abbildung 3.6: Farbwertflächendiagramm der Optik A im CIE 1976 Farbraum mit verschiedenen Judd'schen Geraden a) 3747 K b) 4030 K c) 4162 K

Auch Herr Rotscholl und Herr Neumann [1] teilen eine ähnliche Ansicht und betonen, dass die Farbtemperatur als Beschreibungsgröße für kleine Farbunterschiede ungeeignet ist und leicht zu Fehlinterpretationen führen kann. Allerdings halten sie eine generelle Zuordnung von Farbarten und eine grobe Abschätzung großer Farbunterschiede für legitim. Daher wurde die Entscheidung getroffen, die Auswertung mit den u' - und v' -Koordinaten fortzusetzen. Diese Werte bieten eine detailliertere und präzisere Darstellung der Farbabweichungen und ermöglichen eine genauere Beurteilung der Farbqualität von LED-Beleuchtungen.

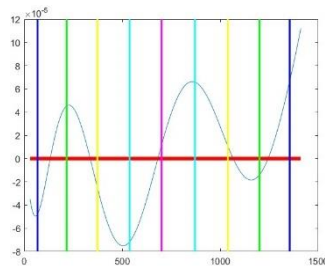
Für die Analyse der u' und v' Farbkoordinaten wurde schließlich ein Matlab-Script erstellt. Zunächst wurden die zuvor in einer Excel-Datei gespeicherten Messwerte in das Programm eingelesen. Anschließend erfolgte eine Filterung der Werte unter Verwendung eines Delta-Werts, der den Standardfehler für die Vorhersage darstellt. Ein Delta bedeutet, dass 68 % der Messwerte innerhalb der Grenzen liegen würden. In *Abbildung 3.7 a)* ist ersichtlich, dass sich außerhalb der Grenzen nur die Werte befinden, die auf den schwarzen Linien der Zonen liegen. Alle Werte, die außerhalb der durch das Delta definierten Grenzen lagen, wurden eliminiert. Aus den gefilterten Werten wurde ein Polynom 9. Grades erstellt. Anschließend wurden die erste und zweite Ableitung des Polynoms berechnet, um Extremstellen und Wendepunkte zu

ermitteln. Der Bereich jeder einzelnen Zone wurde aus dem Polynom extrahiert und die Steigung innerhalb dieses Bereichs wurde durch die erste Ableitung bestimmt. Hierbei wurde der Mittelwert der Steigung für jede Zone berechnet und zwischen der linken sowie rechten Zone unterschieden, da sich jede Zone zweimal, aber nicht zusammenhängend in der Region an der Bewertungswand befindet.

Die *Abbildung 3.7* zeigt drei verschiedene Grafiken, die zur Optik A gehören. a) In der ersten Grafik sind die einzelnen Messwerte der v' -Farbkoordinate durch schwarze Kreise dargestellt. Die rote Funktion repräsentiert ein Polynom 9. Grades, das den Verlauf der Messwerte wiedergibt. Die rot gestrichelten Linien links und rechts vom Polynom markieren die Grenzen, die durch das Delta definiert sind. Zusätzlich sind die verschiedenen Zonen durch senkrecht unterschiedlich farbige Linien gekennzeichnet. Die Zone 1 befindet sich beispielsweise zwischen den beiden cyanfarbenen Linien und wird durch die magentafarbene Linie in eine linke und eine rechte Hälfte geteilt. b) Die zweite Grafik stellt die erste Ableitung dar, die verwendet wird, um die Extrema zu ermitteln. c) Die dritte Grafik zeigt die zweite Ableitung, welche zur Bestimmung der Wendepunkte verwendet wird. In den Grafiken b) und c) stellt die waagerechte rote Linie die Nulllinie dar.

a) v' 

b) 1. Ableitung



c) 2. Ableitung

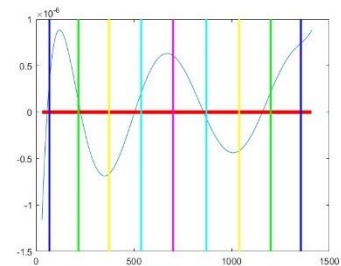


Abbildung 3.7: Grafiken zur Bewertung der Optik A a) Darstellung aller Messwerte v' , einschließlich des Polynoms und der durch das Delta definierten Grenzen b) Darstellung der ersten Ableitung zur Ermittlung der Extrema c) Darstellung der zweiten Ableitung zur Ermittlung der Wendepunkte

Die Schnittmenge zwischen der Referenzzone und jeder anderen Zone wurde ermittelt, um ihre Ähnlichkeit zu quantifizieren. Dieser Vorgang wurde durch den Vergleich der v' -Werte an der Stelle $x = 0$, erreicht. Wenn beispielsweise die Zone 4 als Referenzzone festgelegt wurde, wurde die Schnittmenge mit der Zone 1 bestimmt, indem die Werte von der Zone 1 bei $x = 0$ betrachtet wurden, um den prozentualen Übereinstimmungsanteil zu ermitteln. Dies ermöglichte eine quantitative Aussage darüber, inwiefern sich die Farbkoordinaten und damit die Farbtemperatur zwischen den Zonen ähnelten. Je höher der prozentuale Übereinstimmungsanteil, desto größer war die Ähnlichkeit zwischen den Zonen hinsichtlich des Farbeindrucks.

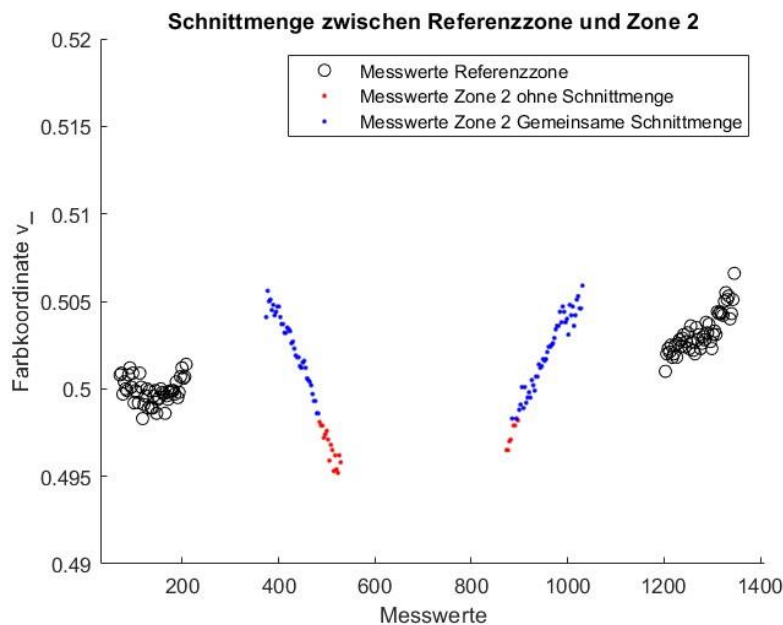


Abbildung 3.8: Schnittmenge der Referenzzone 4 und der Zone 2 der Optik A

Es wurde deutlich, dass eine Einbeziehung der Zone 5 in die Bewertung nicht sinnvoll war. Im Vergleich zu den anderen vier Zonen war die Zone 5 weniger als halb so groß und enthielt daher auch deutlich weniger Messwerte. Darüber hinaus wurde die Zone 5, insbesondere bei den 30 Grad Optiken, nur sehr schwach beleuchtet. Der FWHM von 30 Grad deckt gerade die ersten beiden Zonen ab, das bedeutet die Lichtstärke innerhalb dieses Bereiches erreicht mindestens 50 % des Maximalwertes. In den restlichen Zonen liegen die Werte unter 50 %. Dadurch wurde die Zone 5 nur minimal beleuchtet. Bei den beiden Optiken B V2 und V3 lagen die Werte in Zone 5 zwischen 9 und $12 \frac{cd}{m^2}$. Aus diesen Gründen wurde beschlossen, die Zone 5 bei der Bewertung nicht weiter zu berücksichtigen, um eine verzerrte Beurteilung zu vermeiden und den Fokus auf die repräsentativeren Zonen zu legen.

Zunächst wurde die Auswertung für die u' - und v' -Farbkoordinaten durchgeführt. Im Zuge dessen wurde deutlich, dass sich die Verläufe bzw. Formen der Kurven sehr ähnlich sehen. Jedoch unterscheiden sich die Werte erheblich. Bei genauer Betrachtung der Farbtafel von 1976 wird deutlich, dass der Farbverlauf zwischen gelb und blau durch die v' -Koordinate deutlicher erkennbar ist als durch die u' -Koordinate. Aufgrund dieser Erkenntnis wurde die Entscheidung getroffen, die Auswertung ausschließlich anhand der v' -Koordinate durchzuführen.

Bei der Beurteilung der Farbveränderungen wurden vier Kriterien verwendet, um eine umfassende Analyse durchzuführen. Diese Kriterien umfassen die Steigung, die Schnittmenge, die Wendepunkte und die Extrema.

Die Steigung dient als Maß für die Intensität der Farbveränderung an einer bestimmten Stelle oder innerhalb einer Zone. Je größer die Steigung, desto größer ist die wahrgenommene Farbänderung an dieser Stelle oder in der Zone.

Die Schnittmenge zwischen einer Zone und der Referenzzone gibt Auskunft darüber, inwieweit die Farben der Zone mit den Farben der Referenzzone übereinstimmen. Durch die Bestimmung des prozentualen Anteils, der farblich mit der Referenzzone übereinstimmt, kann eine quantitative Bewertung der Farbähnlichkeit zwischen den Zonen vorgenommen werden.

Die Wendepunkte spielen eine wichtige Rolle bei der Identifizierung von starken Farbveränderungen. An diesen Punkten unterscheidet sich die Farbe signifikant von den benachbarten Bereichen, entweder durch einen Übergang von einer Rechtskurve zu einer Linkskurve oder umgekehrt. Die Steigung erreicht an den Wendepunkten ihr Maximum.

Die Extrema markieren die Stellen, mit der lokal größten bzw. kleinsten Farbkoordinate.

Im Rahmen der Auswertung wurde festgestellt, dass das Lichtbild der Optiken entweder nicht immer perfekt mittig ausgerichtet war oder dass die Optiken keine exakte Rotationssymmetrie aufwiesen. Dies führte dazu, dass sich die Wendepunkte oder Extrema gelegentlich auf der linken Seite einer Zone befanden, beispielsweise in der Zone 2, während sie auf der rechten Seite in der Zone 3 lagen. In solchen Fällen liegt die wahre Position des Wendepunktes oder Extrems vermutlich irgendwo in der Mitte der beiden Zonen oder knapp innerhalb einer der beiden Zonen. Dieses Erkenntnis verdeutlicht, dass eine genaue Bestimmung des tatsächlichen Verlaufs der Farbänderung eine gewisse Flexibilität erfordert, um den wahrscheinlichen Bereich des Wendepunktes oder Extrems angemessen abzudecken.

Auch bei dieser Bewertungsmethode wurde die Auswertung basierend auf dem Abstrahlwinkel unterteilt. Ein Beispiel für die Auswertung der A ist in *Tabelle 3.2* dargestellt. Die Tabelle umfasst verschiedene Spalten mit unterschiedlichen Informationen. In der ersten Spalte sind die Zonennummern aufgeführt, während die Bewertung der Probanden in der zweiten Spalte vermerkt ist. Die Felder der Probandenbewertungen sind entsprechend der Abweichung in den gelben oder blauen Bereich eingefärbt, während die Referenzzone in grün dargestellt ist. Die dritte Spalte führt die stärkste absolute Steigung auf, wobei die Steigungen von der Zone 1 links und der Zone 1 rechts verglichen wurden und die größere Steigung in dieser Spalte vermerkt ist. Den Mittelwert der Steigungen der jeweiligen Zone links und rechts ist in der vierten Spalte zu finden. Die Schnittmenge in Bezug auf die Referenzzone wird in der fünften Spalte angezeigt. In der sechsten Spalte wird mit einem "X" markiert, ob sich in der Zone ein Wendepunkt befindet. Die Spalten sieben und acht zeigen ebenfalls mit einem "X" an, ob sich in der Zone ein Maximum oder Minimum befindet. In der sechsten bis achten Spalte wird hinter dem "X" gegebenenfalls ein "(l)" oder "(r)" angezeigt. Dies kennzeichnet, dass sich der Wendepunkt oder das Extrema nur in einer der beiden Zonen, entweder der linken oder der rechten, befindet. Das deutet darauf hin, dass die Abstrahlung der Optik nicht rotationssymmetrisch ist. In der letzten Spalte werden Bedingungen aufgeführt, unter denen die jeweilige Zone als "nicht in

Ordnung" betrachtet wird. Wenn mehr als ein Argument angegeben ist, wird die Zone als "nicht in Ordnung" eingestuft. Die Farbskala für die Steigungswerte ist in *Abbildung 3.9* dargestellt.

*Tabelle 3.2: Auswertung der 30° Optik A in Bezug auf Steigung, Schnittmenge, Wendepunkte und Extremwerte in dem Verlauf der v'-Farbkoordinate aus der Region in *Abbildung 3.5* nach Bewertungsmethode 2 mit einer Begründung warum die jeweilige Zone nicht in Ordnung ist*

	A	stärkste absolute Steigung [x10 ⁻⁵]	Mittelwert aus Steigung [x10 ⁻⁵]	Schnittmenge [%]	Wendepunkt	Max	Min	Warum n.i.O?
1	schlecht	4,93	4,3	0	X (r)		X (l)	- Hohe Steigung - keine Schnittmenge - Wendepunkt - Minimum
2	schlecht	6,07	5,205	79,41	X (l)			- Hohe Steigung - Wendepunkt
3	schlecht	2,66	1,94	80,41	X	X		- Wendepunkt - Maximum
4	ok	2,74	2,555	100			X	- Minimum



Abbildung 3.9: Farbskala für die farblich markierten Steigungswerte in der Auswertung der Optik A nach Bewertungsmethode 2 (aus Tabelle 3.2)

Eine hohe Steigung liegt vor, wenn der Mittelwert der Steigungen größer als $3,2 \times 10^{-5}$ ist. Wenn es keine Schnittmenge gibt, bedeutet dies 0 % Übereinstimmung, während eine geringe Schnittmenge weniger als 50 % Übereinstimmung bedeutet. Zusätzlich wird angegeben, ob in der Zone ein Wendepunkt sowie ein Minimum oder Maximum auftritt.

Das Ziel besteht darin, eine möglichst geringe Steigung und eine möglichst hohe Schnittmenge zu erreichen. Des Weiteren sollten keine Wendepunkte in den Zonen vorhanden sein, da dies auf eine signifikante Farbveränderung hindeuten würde.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Bewertungsmethoden 1 und 2 genauer erläutert.

4.1 Ergebnisse Bewertungsmethode 1

Für alle 15 Optiken wurden analoge Auswertungen durchgeführt. Für die abschließende Zusammenfassung wurden die Werte auf zwei Nachkommastellen gerundet. Während der Auswertung der verschiedenen Optiken wurde deutlich, dass es sinnvoll ist, die Optiken entsprechend ihres Halbwertswinkels aufzuteilen. Eine Auswertung für alle drei Halbwertswinkel (30° , 60° und 90°) gemeinsam war nicht möglich. Es wurde versucht, die Lichtbilder unabhängig vom Abstrahlwinkel durch die Probanden zu beurteilen. Allerdings war es beispielsweise bei einer 30° Optik aufgrund einer sehr geringen Leuchtdichte im Randbereich nicht möglich, die Farbunterschiede korrekt zu erkennen.

In *Tabelle 4.1* sind die Auswertungen der 30° -Optiken zusammengefasst. Diese Tabelle zeigt in Spalte 2 und 3 die Farbabstände unter Berücksichtigung der Leuchtdichte. In Spalte 2 ist der größte Wert aufgeführt, der als „in Ordnung“ deklariert wurde. Während in Spalte 3 der kleinste Wert angegeben wird, der als „nicht mehr in Ordnung“ angegeben wurde. In Spalte 4 und 5 sind entsprechend die MacAdam-Ellipsen in SDCM angeführt, die den Einfluss der Leuchtdichte nicht berücksichtigen.

Tabelle 4.1: Auswertung der 30° -Optiken: Spalte 2 und 3 zeigen die Farbabstände unter Berücksichtigung der Leuchtdichte, in Spalte 4 und 5 sind entsprechend die MacAdam-Ellipsen in SDCM angeführt

Artikelnummer	„In Ordnung“ - inkl. Leuchtdichte	„Nicht in Ordnung“ - inkl. Leuchtdichte	„In Ordnung“ - SDCM	„Nicht in Ordnung“ - SDCM
A	0,44	0,79	6,00	3,83
B V2	0,65	1,84	3,70	3,48
B V3	0,37	0,71	3,31	5,59
A mit Anderer LED	0,40	0,66	5,75	3,81
C	7,18	-	16,32	-
D	0,37	0,76	3,69	4,90

Am Beispiel der Optik A wird deutlich, dass die Auswertung in MacAdam-Ellipsen ohne Berücksichtigung der Leuchtdichte für 30°-Optiken nicht sinnvoll ist. In diesem Fall hat die Zone mit dem größten Wert, die noch als akzeptabel angesehen wird, einen Wert von 6 SDCM, während die Zone, die als „nicht mehr in Ordnung“ betrachtet wird, einen Wert von 3,83 SDCM aufweist. Dies verdeutlicht die Unzulänglichkeit der reinen MacAdam-Ellipsen-Bewertung für die Beurteilung von Farbabweichungen bei 30°-Optiken. Unter Berücksichtigung der Leuchtdichte ergeben sich andere Ergebnisse. In diesem Fall ist der Wert der Zone, die als „in Ordnung“ betrachtet wird, kleiner als der Wert der Zone, die als „nicht mehr in Ordnung“ gilt. Der Grund für diese Veränderung liegt in der geringen Leuchtdichte in Zone 5. Da eine 30°-Optik eng abstrahlt, werden die Zonen 1 und 2 deutlich stärker beleuchtet als die äußeren Zonen. Die Probanden haben angegeben, dass sie Zone 5 in Bezug auf Zone 4 als akzeptabel empfinden. Rein aufgrund des Farbunterschieds in SDCM betrachtet, ist Zone 5 jedoch „nicht in Ordnung“. Wenn jedoch die Leuchtdichte berücksichtigt wird und die Tatsache, dass Zone 5 sehr dunkel ist, ist die Abweichung von Zone 4 nicht mehr als signifikant zu betrachten. Das zeigt, dass es bei großen Leuchtdichteunterschieden einen Einfluss auf Farbabweichungen gibt und eine alleinige Betrachtung der MacAdam-Ellipsen nicht ausreicht, um eine korrekte Bewertung vorzunehmen. Das gleiche Phänomen tritt auch bei den zwei 30°-Optiken, der B V2 und der A mit der Anderer LED, auf. In diesen Fällen ist Zone 5 aufgrund der geringen Leuchtdichte deutlich dunkler als die umliegenden Zonen. Obwohl die Farbabweichung in SDCM für Zone 5 als nicht akzeptabel betrachtet werden kann, haben die Probanden aufgrund der Berücksichtigung der Leuchtdichte angegeben, dass sie die Zone dennoch als „in Ordnung“ empfinden.

Die Optik C weist eine deutlich abweichende Bewertung im Vergleich zu den anderen Optiken auf. Die Farbabstände sind hier im Vergleich zu den anderen Optiken sehr groß, insbesondere in den Zonen 1 und 2, die eine stärkere Neigung zu bläulichen Farbtönen aufweisen. Jedoch sind dies auch die am stärksten beleuchteten Zonen. In *Tabelle 4.2* wird deutlich, dass die maximale Leuchtdichte bei der Optik C signifikant höher ist als bei allen anderen Optiken. Eine Vermutung besteht darin, dass die Probanden Schwierigkeiten hatten, eine klare Unterscheidung zwischen Helligkeit und Bläulichkeit vorzunehmen. Dies könnte erklären, warum die Farbabweichungen bei dieser Optik möglicherweise nicht gut erkannt wurden. Darüber hinaus wird vermutet, dass der bläulichere Farbton aufgrund der Hellempfindlichkeitskurve des Auges nicht so deutlich wahrgenommen werden konnte. Die Hellempfindlichkeitskurve zeigt, dass das Auge Farben im grünen oder gelben Bereich besser wahrnimmt als blaue Farbtöne. Dieser Unterschied in der Hellempfindlichkeit könnte dazu beitragen, dass die bläulichen Farbabweichungen bei der Optik C möglicherweise weniger stark wahrgenommen wurden und somit die Bewertung der Farbabstände beeinflusst wurde. Es sind weitere Untersuchungen denkbar, um das Phänomen der abweichenden Wahrnehmung und Bewertung der Optik C genauer zu untersuchen. Eine Möglichkeit besteht darin, die Platine hinter der Optik mit einem geringeren Strom

zu betreiben, um die Leuchtdichte zu reduzieren. Dadurch könnte eine Minimierung der Leuchtdichte erreicht werden, was wiederum dazu führen könnte, dass die Farbsäume in den beiden inneren Zonen deutlicher sichtbar werden.

Tabelle 4.2: Maximale Leuchtdichten der 30° Optiken

Artikelnummer	Maximale Leuchtdichte [$\frac{cd}{m^2}$]
A	567,7
B V2	160,1
B V3	144,6
A mit Anderer LED	781,7
C	819,4
D	417,9

Ohne Berücksichtigung der Optik C würde ein potenzieller Grenzwert zwischen 0,65 und 0,66 liegen. Diese Werte werden in *Tabelle 4.1* durch die Farbe Gelb hervorgehoben. Allerdings stellt sich die Frage, wie repräsentativ dieser Wert ist, da der Unterschied zwischen den beiden Werten nur 0,01 beträgt. Es ist wichtig zu beachten, dass die Festlegung eines Grenzwerts eine Herausforderung darstellt und verschiedene Faktoren berücksichtigt werden müssen, wie zum Beispiel die Anforderungen der Anwendung, die Wahrnehmung der Farbabweichungen durch die Benutzer und die spezifischen Eigenschaften der betrachteten Optiken. Es kann sinnvoll sein, weitere Untersuchungen durchzuführen und zusätzliche Informationen zu sammeln, um eine fundierte Entscheidung über einen geeigneten Grenzwert zu treffen. Des Weiteren sollten die Simulationsergebnisse ausgewertet und mit den Messergebnissen verglichen werden, bevor ein finaler Entschluss gefasst wird. Dieser Vergleich ermöglicht eine umfassendere und verlässlichere Beurteilung der Farbabweichungen und der Grenzwertfestlegung.

Die Auswertung der 60°-Optiken ist in *Tabelle 4.3* zu finden. Dort werden ebenfalls in Spalte 2 und 3 die Farbabstände unter Berücksichtigung der Leuchtdichte dargestellt. Der größte Wert in Spalte 2 wurde als „in Ordnung“ bewertet, während der kleinste Wert in Spalte 3 als „nicht mehr in Ordnung“ betrachtet wurde. Die Spalten 4 und 5 enthalten die entsprechenden MacAdam-Ellipsen in SDCM, die den Einfluss der Leuchtdichte nicht berücksichtigen.

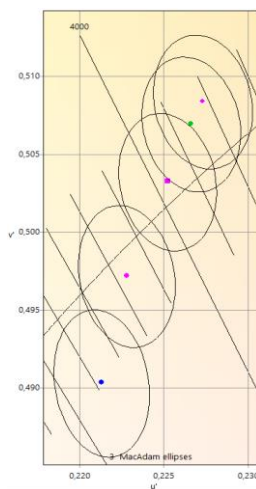
Tabelle 4.3: Auswertung der 60°-Optiken: Spalte 2 und 3 zeigen die Farbabstände unter Berücksichtigung der Leuchtdichte, in Spalte 4 und 5 sind entsprechend die MacAdam-Ellipsen in SDCM angeführt

Artikelnummer	“In Ordnung“ - inkl. Leuchtdichte	“Nicht in Ordnung“ - inkl. Leuchtdichte	“In Ordnung“ - SDCM	“Nicht in Ordnung“ - SDCM
E	0,52	0,73	2,64	9,65
F	0,68	-	5,55	-
G	0,87	1,14	9,76	16,00

Bei Betrachtung der *Tabelle 4.3* ist ein Widerspruch erkennbar. Der Farbabstand der Optik G, der noch als “in Ordnung“ gilt, beträgt 0,87. Im Gegensatz dazu wurde der Farbabstand der Optik E als „nicht mehr in Ordnung“ deklariert und liegt bei 0,73. Dies bedeutet, dass bei der Optik G eine größere Toleranz akzeptiert wird.

Um den Grund für diese größere Toleranz bei der Optik G herauszufinden, wurde eine genauere Analyse durchgeführt. Dafür wurden die Mittelwerte der einzelnen Zonen in den ColorCalculator von OSRAM Sylvania eingegeben und visualisiert. Die *Abbildung 4.1* repräsentiert a) die Darstellung der Mittelwerte der Optik G in der CIE-Farbtafel 1976 und b) die Legende. Der grün markierte Kreis repräsentiert den Mittelwert der Referenzzone, während der blaue Kreis die Zone 1 darstellt, die als zu blau und somit als „nicht mehr in Ordnung“ betrachtet wurde. Die rosa Symbole repräsentieren alle Zonen, die als “in Ordnung“ deklariert wurden.

a)



b)



Abbildung 4.1: a) Darstellung der Mittelwerte der Optik G in der CIE-Farbtafel 1976
 b) Legende

Der Abstand zwischen der Zone 2 und dem Mittelwert der Referenzzone 4 weist den Wert 0,87 auf. In diesem Fall liegt die Zone 2 näher an der Zone 3 als an der Zone 4. Die Zone 3 liegt auch näher an den 4000K, die als Referenz dienen sollten. Dies wirft die Frage auf, warum die Probanden, die Zone 4 und nicht die Zone 3 als Referenz gewählt haben. Um dies genauer zu untersuchen, wurde die u' und v' Darstellung in der Labsoft Software genauer betrachtet, wie in *Abbildung 4.2* dargestellt.

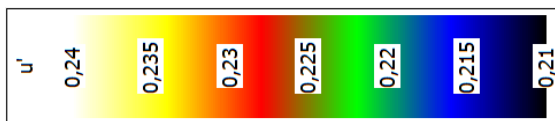
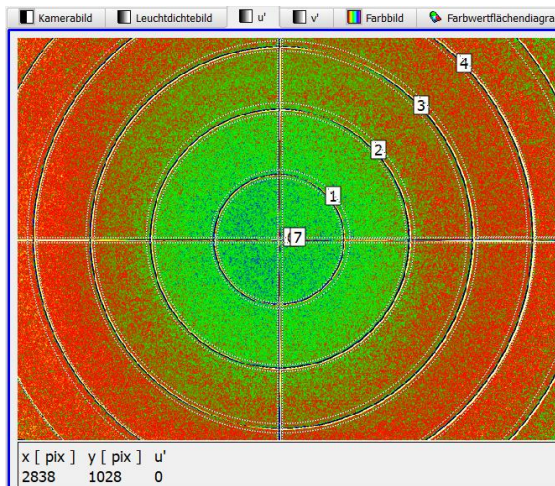
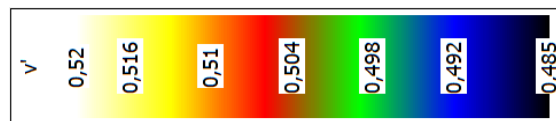
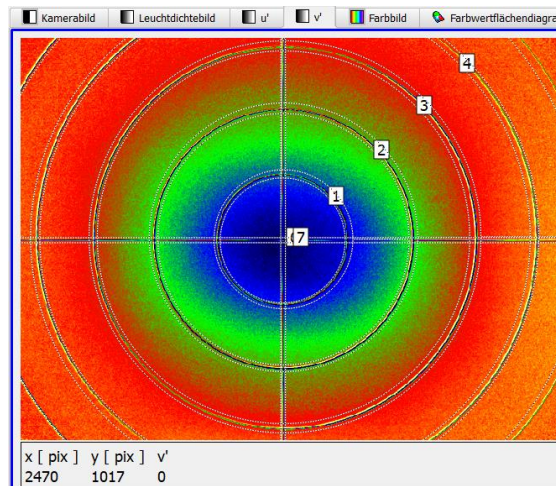
a) u' b) v' 

Abbildung 4.2: Farbkoordinaten der Kameraaufnahme der Optik G a) u' b) v'

Die *Abbildung 4.2 b)* verdeutlicht, dass innerhalb der Zone 3 ein Farbwechsel stattgefunden hat. Dies könnte erklären, warum diese Zone vermutlich nicht als Referenz gewählt wurde, da die Referenzzone nicht nur in etwa 4000K entsprechen, sondern auch möglichst farblich homogen sein sollte. An dieser Stelle sind zwei Kritikpunkte anzumerken. Erstens ist die erarbeitete Methode nicht geeignet, wenn ein Farbwechsel innerhalb einer Zone auftritt. Zweitens ist der Mittelwert einer solchen Zone nicht repräsentativ, da beispielsweise die eine Hälfte der Messwerte über 4000K liegt und die andere Hälfte darunter, was sich im Mittelwert neutralisiert. Dadurch könnte fälschlicherweise angenommen werden, dass eine perfekt homogene 4000K Referenzzone vorliegt, obwohl dies in der Realität nicht der Fall ist.

Bei den 60°-Optiken tritt das Problem mit dem Leuchtdichteunterschied, wie es bei den 30°-Optiken der Fall war, nicht mehr auf. Aus den Werten in *Tabelle 4.3* wird deutlich, dass die Werte ohne Berücksichtigung der Leuchtdichte in SDCM und die Werte mit Berücksichtigung der Leuchtdichte immer eine ähnliche Tendenz aufweisen. Daher lässt sich daraus schließen, dass die Bewertung nicht unabhängig vom Abstrahlwinkel durchgeführt werden kann. Bei den 60°-Optiken wurden jedoch nur drei Optiken dieser

Art bewertet. Diese Anzahl wird als zu gering betrachtet, um eine fundierte Aussage über einen Grenzwert zu treffen.

Es ist zu beachten, dass die Ergebnisse in der *Tabelle 4.4* eine spezifische Bewertung für die 90°-Optiken widerspiegeln. Ähnlich wie bei den Ergebnissen der 30°- und 60°-Optiken in der *Tabelle 4.1* und der *Tabelle 4.3* zeigen die Farbabstände unter Berücksichtigung der Leuchtdichte in den Spalten 2 und 3 eine Tendenz, welcher Wert als "in Ordnung" bzw. „nicht mehr in Ordnung“ betrachtet wird. In den Spalten 4 und 5 werden die entsprechenden MacAdam-Ellipsen in SDCM angegeben, ohne Berücksichtigung des Leuchtdichteinflusses.

Die Auswertung der 90°-Optiken ermöglicht eine Analyse und Bewertung des Farbabstands für diesen spezifischen Abstrahlwinkel. Es ist jedoch zu beachten, dass bei den 90°-Optiken nur 4 Optiken bewertet wurden, was keine ausreichende Anzahl für valide Schlussfolgerungen darstellt.

Tabelle 4.4: Auswertung der 90°-Optiken: Spalte 2 und 3 zeigen die Farbabstände unter Berücksichtigung der Leuchtdichte, in Spalte 4 und 5 sind entsprechend die MacAdam-Ellipsen in SDCM angeführt

Artikelnummer	“In Ordnung“ - inkl. Leuchtdichte	“Nicht in Ordnung“ - inkl. Leuchtdichte	“In Ordnung“ - SDCM	“Nicht in Ordnung“ - SDCM
H	0,28	-	2,51	-
I	0,28	-	2,45	-
J	0,57	-	3,52	-
K	0,17	0,21	4,74	6,48

Bei den 90°-Optiken tritt in der Regel seltener das Problem von Farbsäumen im Lichtbild auf, was sich auch in *Tabelle 4.4* widerspiegelt. Bei 3 von 4 Optiken wurde im Lichtbild keine Zone als "nicht in Ordnung" deklariert. Allerdings zeigen die Werte, die die Berücksichtigung der Leuchtdichte einschließen, einen Widerspruch zu den Optiken, bei denen ein farbsaumfreies Lichtbild festgestellt wurde. Die Werte der Optiken H, I und J, die als "in Ordnung" bewertet wurden, sind im Vergleich zum Wert der Optik K, der als "nicht in Ordnung" eingestuft wurde, größer.

Die Werte in den MacAdam-Ellipsen entsprechen dem, was von den Probanden auf der Wand gesehen wurde. Aufgrund dieser Beobachtung wird es als sinnvoll erachtet, bei breitstrahlenden Optiken die Bewertung in SDCM vorzunehmen. Ein Grenzwert von 4,74 SDCM könnte als vorläufiger Richtwert festgehalten werden. Allerdings ist es

notwendig, den Versuch mit weiteren 90°-Optiken zu erweitern, um einen verifizierten Grenzwert zu bestimmen.

Bei dieser Bewertungsmethode wurden die Mittelwerte der jeweiligen Zonen betrachtet. Wie bereits erwähnt, kann dies dazu führen, dass Zonen, in denen Farbwechsel stattfinden, messtechnisch als "in Ordnung" eingestuft werden, obwohl sie es nicht sind. Es wurde jedoch deutlich, dass die Streuung der Messwerte sehr groß ist, wie durch den Variationskoeffizienten veranschaulicht, der sich aus dem Verhältnis von Standardabweichung zu Mittelwert ergibt. Dieser ist exemplarisch in *Abbildung 3.2* dargestellt. Dort sind Streuungen bei den Farbabständen ohne Berücksichtigung der Leuchtdichte im Bereich von 24 % bis 55 % zu beobachten, während die Streuung bei den Abständen, die die Leuchtdichte berücksichtigen, zwischen 11 % und 59 % liegt. Dies wurde auch durch die Betrachtung der Farbwertflächendiagramme bestätigt. Folglich ist es nicht sinnvoll, sich ausschließlich auf die Mittelwerte der einzelnen Zonen zu verlassen.

Die Optiken M und L konnten von den Probanden nicht beurteilt werden, da das Lichtbild Flecken aufwies. Da bei der Bewertung die Mittelwerte der einzelnen Zonen verwendet werden, können diese Flecken nicht berücksichtigt werden. Aus diesem Grund ist es lediglich möglich, Optiken zu bewerten, die eine rotationssymmetrische Abstrahlung und Farbverteilung aufweisen. Diese Aussage wurde durch die Messergebnisse bestätigt, die in *Abbildung 4.3* und *Abbildung 4.4* dargestellt sind. Insgesamt wurden somit 13 Optiken in die Beurteilung einbezogen.

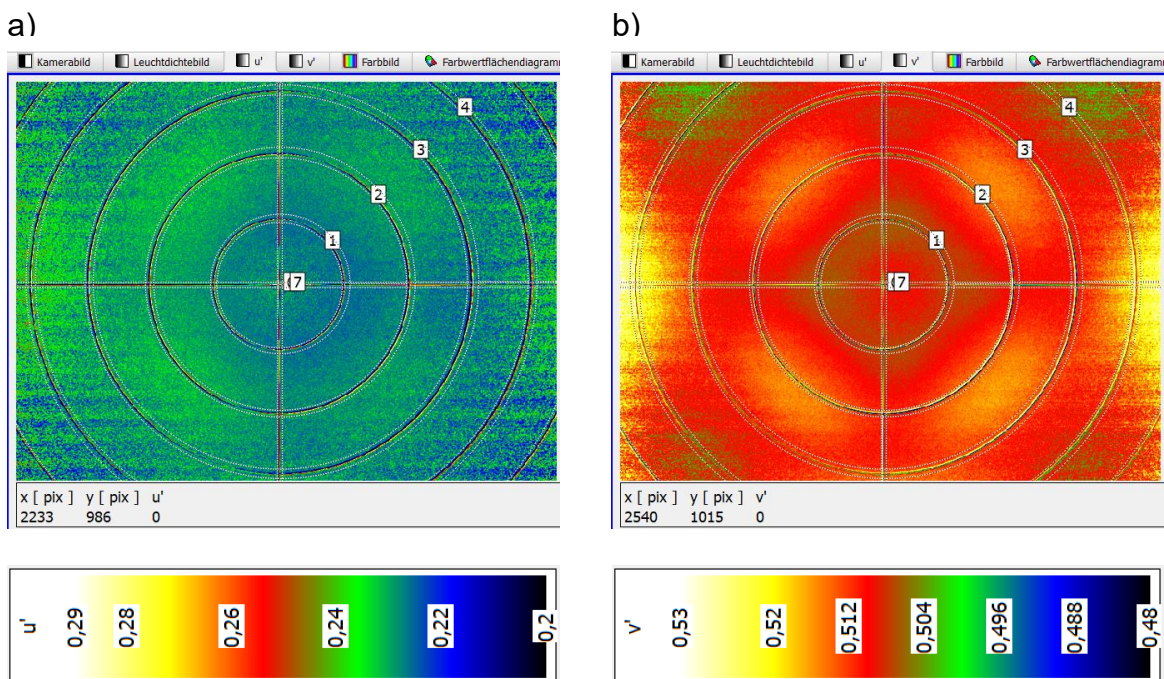


Abbildung 4.3: Farbkordinaten der Kameraaufnahme der Optik L a) u' b) v'

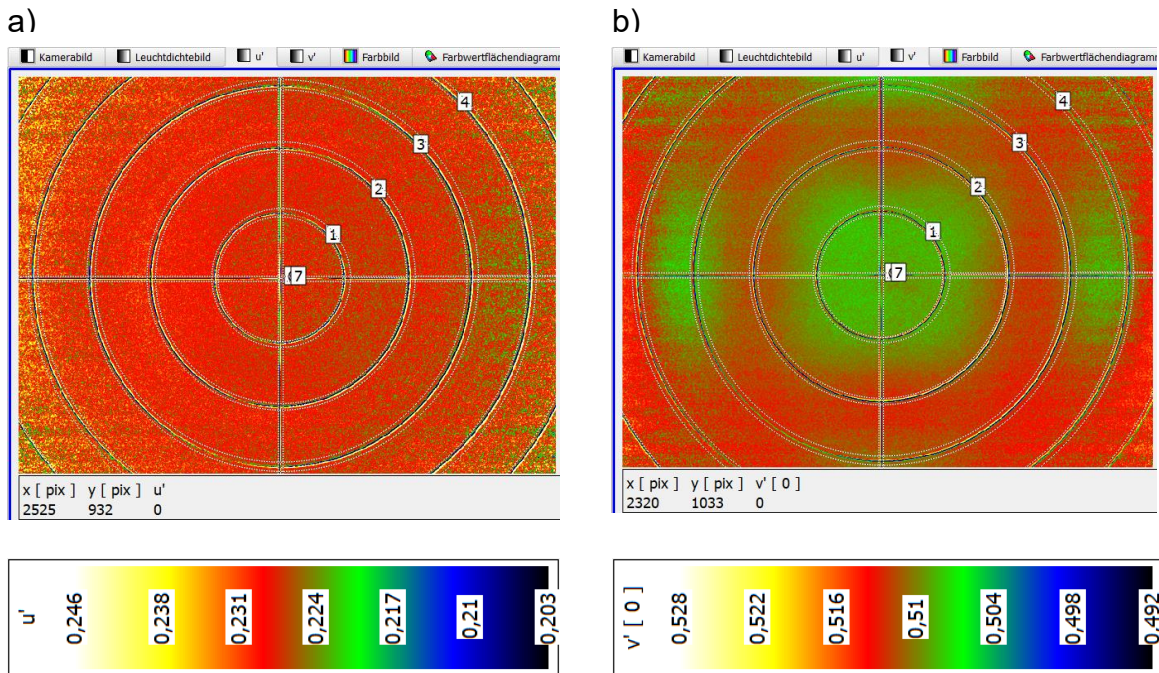


Abbildung 4.4: Farbkoordinaten der Kameraaufnahme der Optik M a) u' b) v'

4.2 Ergebnisse Bewertungsmethode 2

In der *Tabelle 4.5* werden die Bewertungen der Probanden für die einzelnen Zonen der 30° Optiken aufgeführt. Hierbei wird dargelegt, welche Zonen der jeweiligen Optik als "in Ordnung" oder als "nicht in Ordnung" eingestuft wurden. In grün sind die Referenzzonen hinterlegt.

Tabelle 4.5: Bewertungen der Probanden für die einzelnen Zonen der 30° Optiken

Zonen-nr.	A	B V2	B V3	C	D	A mit Anderer LED
1	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Ok	Schlecht	Schlecht
2	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Ok	Schlecht	Schlecht
3	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Ok	Schlecht	Schlecht
4	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok

In der *Tabelle 4.6* ist die maximale Differenz in v' dargestellt, welche bei den 30° Optiken im Durchschnitt am größten ist. Bei diesen Optiken hat sich gezeigt, dass es sinnvoll ist, die Steigung, die Schnittmenge und die Wendepunkte bei der Bewertung zu berücksichtigen. Bezüglich der Extremwerte besteht noch Unsicherheit, ob sie ein

gutes Bewertungskriterium darstellen. Denn sie repräsentieren lediglich lokale Minima und Maxima, ohne die Umgebung zu berücksichtigen. Es könnte sein, dass eines der lokalen Minima genau der Referenzfarbe entspricht. In erster Linie geht es jedoch darum, die Farbwechsel zu beschreiben, und dies geschieht gut über die Wendepunkte und die Steigung. Daher sollten, wenn die maximale Differenz, Stand jetzt, über 0,0181 liegt, immer diese drei Kriterien zur Bewertung herangezogen werden. Durch die Berücksichtigung zusätzlicher Optiken kann sich der Grenzwert natürlich verändern.

Tabelle 4.6: maximale Differenz der v' Koordinate im Lichtbild der 30° Optik an der Bewertungswand

Artikelnummer	Maximale Differenz in v'
A	0,024
B V2	0,0195
B V3	0,024
C	0,0238
D	0,0215
A mit Anderer LED	0,0181

Die Ergebnisse der Messauswertung aller 30° Optiken sind in *Tabelle 4.7* und *Tabelle 4.8* zusammengefasst. In diesen Tabellen wird erläutert, aus welchen Gründen bestimmte Zonen als "in Ordnung" oder als "nicht in Ordnung" betrachtet werden.

Tabelle 4.7: Bewertung der einzelnen Zonen für die folgenden 30° Optiken: A, B V2 und B V3

Zonen- nr.	A	B V2	B V3
1	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Steigung - keine Schnittmenge - Wendepunkt (r) 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Steigung - keine Schnittmenge 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Steigung - keine Schnittmenge
2	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Steigung - Wendepunkt (l) 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Steigung - Wenig Schnittmenge - Wendepunkt 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Steigung - Wendepunkt
3	<ul style="list-style-type: none"> - Wendepunkt 	<ul style="list-style-type: none"> - Wenig Schnittmenge - Wendepunkt 	<ul style="list-style-type: none"> - Wenig Schnittmenge - Wendepunkt
4			

Bei den Optiken A, B V2 und V3 aus *Tabelle 4.7* sowie der Optik A mit Anderer LED aus *Tabelle 4.8* stimmen die Auswertungen der Messergebnisse mit den Bewertungen der Probanden überein. Zone 1, 2 und 3 wurden jeweils als ungünstig eingestuft, da sie mindestens eines der folgenden Kriterien erfüllen: hohe Steigung, geringe oder keine Schnittmenge oder das Vorhandensein eines Wendepunktes. Zone 4 wurde bei allen vier Optiken als Referenzzone festgelegt und daher als "in Ordnung" betrachtet. In dieser Zone sind weder eine hohe Steigung, eine geringe Schnittmenge noch ein Wendepunkt vorhanden.

Tabelle 4.8: Bewertung der einzelnen Zonen für die folgenden 30° Optiken: C, D und A mit Anderer LED

Zonen-nr.	C	D	A mit Anderer LED
1	<ul style="list-style-type: none"> - keine Schnittmenge - Wendepunkt (r) 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Steigung - keine Schnittmenge - Wendepunkt (r) 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Steigung - wenig Schnittmenge - Wendepunkt (r)
2	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Steigung - Keine Schnittmenge - Wendepunkt (r) 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Steigung - Wenig Schnittmenge - Wendepunkt (l) 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Steigung - Wendepunkt (l)
3	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Steigung - Wenig Schnittmenge - Wendepunkt 	<ul style="list-style-type: none"> - Wenig Schnittmenge - Wendepunkt (l) 	<ul style="list-style-type: none"> - Wendepunkt
4		<ul style="list-style-type: none"> - Wendepunkt (r) 	

Bei der Optik C weichen die Messergebnisse von den Bewertungen der Probanden ab. Dies ist auf dieselbe Begründung wie bei der Bewertungsmethode 1 zurückzuführen. Insbesondere die ersten beiden Zonen wurden zu hell beleuchtet, sodass eine Unterscheidung zwischen Helligkeit und Bläulichkeit nicht möglich war. Daher führen diese Umstände zu Abweichungen zwischen den Probandenbewertungen und den Messergebnissen. Zusätzlich dazu wurde auch die dritte Zone messtechnisch als "nicht in Ordnung" eingestuft.

Auch bei der D stimmt die Bewertung nicht mit den Messergebnissen überein. Sogar die Referenzzone 4 wird bei dieser Optik als "nicht in Ordnung" eingestuft, da sich in dieser Zone ein Wendepunkt befindet. Es besteht eine Diskrepanz zwischen den Bewertungen der Probanden und den ermittelten Messergebnissen dieser Optik. In Abbildung 39 werden die Messwerte und das Polynom 9. Grades der Optik des Mitbewerbers 1 dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass das Polynom die Messwerte in den rechten Bereichen von Zone 1 und Zone 2 nicht korrekt abbildet. Zudem ist ersichtlich, dass sich die Verteilung nicht in der Mitte befindet. Der Wendepunkt, der dazu führt, dass Zone 4 als "nicht in Ordnung" betrachtet wird, liegt in Zone 4 links. In Zone 4 rechts hingegen liegt kein Wendepunkt, dafür aber in Zone 3 rechts. Wenn die Verteilung symmetrisch wäre, würde der Wendepunkt vermutlich

irgendwo dazwischen oder knapp innerhalb einer der beiden Zonen liegen. Diese beiden Faktoren können Einflüsse sein, die darauf hinweisen, dass die Probandenbeurteilung durch die Messergebnisse nicht angemessen widerspiegelt wird.

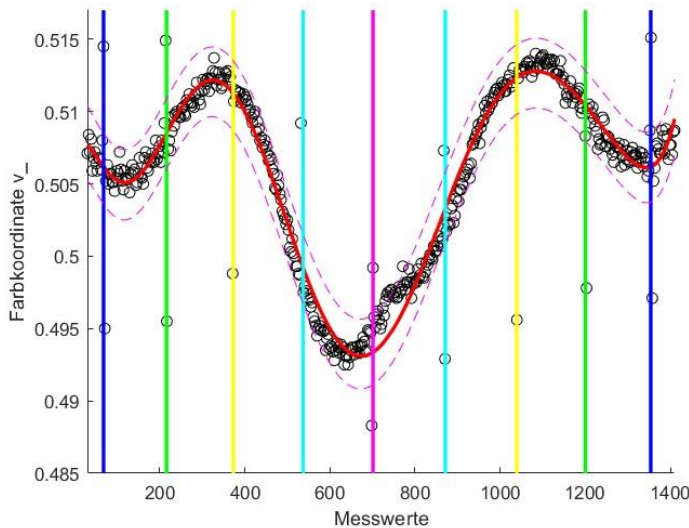


Abbildung 4.5: v' Messwerte und Polynom 9. Grades der D Optik

Die Bewertungen der Probanden für die einzelnen Zonen der 60° Optiken sind in *Tabelle 4.9* aufgeführt. Sowohl bei den Optiken E als auch F wurden alle Zonen als "in Ordnung" eingestuft. Bei der Optik G hingegen wurde lediglich Zone 1 als "nicht in Ordnung" bewertet, während die restlichen drei Zonen als "in Ordnung" gelten.

Tabelle 4.9: Bewertungen der Probanden für die einzelnen Zonen der 60° Optiken

Zonennr.	E	G	F
1	Ok	Schlecht	Ok
2	Ok	Ok	Ok
3	Ok	Ok	Ok
4	Ok	Ok	Ok

Die Optik G weist eine maximale Differenz in v' auf, die größer als 0,0181 ist. Daher ist es ratsam, bei der Bewertung dieser Optik die Steigung, die Schnittmenge und die Wendepunkte zu berücksichtigen. In *Tabelle 4.10* sind die maximalen Differenzen in v' für alle 60° Optiken aufgeführt. Die restlichen Optiken weisen maximale Differenzen in v' auf, die unterhalb von 0,0181 liegen. Für diese Optiken sollten ausschließlich die Steigung und die Schnittmenge betrachtet werden, da die Wendepunkte in diesem Fall

weniger aussagekräftig sind. Es gibt Farbwechsel von lokalen Minima zu lokalen Maxima, jedoch liegen diese so nah beieinander, dass der Wendepunkt keine relevante Rolle spielt.

Tabelle 4.10: maximale Differenz der v' Koordinate im Lichtbild der 60° Optik an der Bewertungswand

Artikelnummer	Maximale Differenz in v'
E	0,0157
G	0,0239
F	0,0112

Bei den 60° Optiken stimmt keine Optik vollständig mit den Probandenaussagen überein, sondern es sind immer nur einzelne Zonen, die mit diesen übereinstimmen. Die Auswertungen sind in *Tabelle 4.11* dargestellt.

Bei der Optik E würde nach der Bewertungsmethode eine Zone als "nicht in Ordnung" eingestuft werden, nämlich die Zone 4. In dieser Zone ist die Steigung größer als $3,2 \times 10^{-5}$, was den Probandenurteilen widerspricht. Bei der Optik G werden nicht nur die Zone 1, wie von den Probanden beurteilt, als "nicht in Ordnung" betrachtet, sondern auch die Zonen 2 und 3. Die Optik F weist zwei Zonen auf, die messtechnisch als "nicht in Ordnung" deklariert werden würden, nämlich die Zone 1 und die Zone 4 aufgrund einer zu geringen Schnittmenge.

Tabelle 4.11: Bewertung der einzelnen Zonen für die 60° Optiken

Zonen-nr.	E	G	F
1		- keine Schnittmenge	- geringe Schnittmenge
2		- Hohe Steigung - keine Schnittmenge - Wendepunkt	
3		- Hohe Steigung - Wenig Schnittmenge	

Zonen- nr.	E	G	F
4	- Hohe Steigung		- Geringe Schnittmenge

Die Bewertungen der Probanden für die einzelnen Zonen der 90° Optiken sind in *Tabelle 4.12* dargestellt. Bei den Optiken H, I und J wurden alle Zonen als "in Ordnung" eingestuft. Bei der Optik des Mitbewerbers 3 hingegen wurde nur Zone 4 als "nicht in Ordnung" bewertet, während die restlichen drei Zonen als "in Ordnung" gelten.

Tabelle 4.12: Bewertungen der Probanden für die einzelnen Zonen der 90° Optiken

Zonen- nr.	H	I	K	J
1	Ok	Ok	Ok	Ok
2	Ok	Ok	Ok	Ok
3	Ok	Ok	Ok	Ok
4	Ok	Ok	Schlecht	Ok

In *Tabelle 4.13* sind die maximalen Differenzen in v' für alle 90° Optiken aufgeführt. Bei allen vier Optiken liegen die maximalen Differenzen in v' unterhalb von 0,0181, was bedeutet, dass nur die beiden Kriterien Steigung und Schnittmenge berücksichtigt werden sollten.

Tabelle 4.13: maximale Differenz der v' Koordinate im Lichtbild der 90° Optik an der Bewertungswand

Artikelnummer	Maximale Differenz in v'
H	0,0045
I	0,0053
K	0,0139
J	0,0063

In *Tabelle 4.14* sind die Bewertungen der einzelnen Zonen der 90° Optiken aufgeführt. Bei den Optiken H, I und K stimmen die Messergebnisse genau mit den Bewertungen der Probanden überein. Bei der Optik J würden messtechnisch die Zonen 3 und 4

aufgrund der geringen Schnittmenge als "nicht in Ordnung" eingestuft werden, während die Probanden diese Zonen als "in Ordnung" bewertet haben.

Tabelle 4.14: Bewertung der einzelnen Zonen für die folgende 90° Optiken: H, I, K und J

Zonen-nr.	H	I	K	J
1				
2				
3				- Geringe Schnittmenge
4			- Hohe Steigung - Geringe Schnittmenge	- Geringe Schnittmenge

5 Simulation

Abschließend wurde das Szenario in LightTools nachgestellt, um zu überprüfen, ob ähnliche Werte wie bei den Messungen erzielt werden können. Durch die Simulation sollen weitere Erkenntnisse gewonnen werden und es kann eine Validierung der Messergebnisse erfolgen. Es ist wichtig, die Übereinstimmung zwischen den beiden Methoden zu überprüfen, um sicherzustellen, dass die Simulation ein geeignetes Werkzeug für die Untersuchung der Farbabweichungen und deren Ursachen ist.

Die Simulation wurde an der Optik A durchgeführt. Bei der Durchführung der Simulation wurden mehrere wichtige Einflussfaktoren berücksichtigt, darunter ein Lichtquellenmodell sowie Informationen über Material- und Oberflächeneigenschaften. Diese Faktoren spielen eine entscheidende Rolle in der Simulation und sollten sorgfältig berücksichtigt werden.

Die genaue Modellierung der Lichtquellen ist von entscheidender Bedeutung, da sie die Ausbreitung und Interaktion des Lichts beeinflussen. Dies beinhaltet die Berücksichtigung von Parametern wie Spektrum, Intensität, Richtung und anderen relevanten Eigenschaften der Lichtquelle. Um die Strahlendaten der LED messen zu können, wurden fünf LEDs von der Platine abgelötet und einzeln auf separaten Platinen wieder aufgelötet. Vor der Vermessung der Strahlendaten wurden die LEDs in der U-Kugel überprüft, um sicherzustellen, dass sie durch die Lötvorgänge keine Defekte aufweisen. Die Ergebnisse der Messungen aus der Ulbricht-Kugel sind in der *Tabelle 5.1* aufgeführt, wobei die Strahlendaten der LED Nr. 3 extern vermessen

wurden. Bei der Betrachtung der fünf einzelnen LEDs untereinander wurde deutlich, dass sich ihre Farbtemperaturen voneinander unterscheiden. Insbesondere zwischen der Platine 2 und der Platine 5 wurde ein Farbunterschied von 181 K festgestellt. Dies verdeutlicht, dass innerhalb dieser Auswahl von fünf LEDs, die einen Teil der insgesamt 24 Leuchtdioden auf der Platine darstellen, verschiedene Farbtemperaturen vorhanden sind. Somit ist offensichtlich, dass eine Variation der Farbtemperatur innerhalb der einzelnen LEDs auf der Platine besteht.

Tabelle 5.1: Messergebnisse aus der Ulbricht-Kugel der fünf einzelnen LEDs der Signify Platine zur Strahlendatenvermessung

Nr.	Lichtstrom [lm]	Farbtemperatur [K]	CRI
1	52,0	4093	83,3
2	51,1	4101	82,9
3	49,3	4096	83,0
4	51,4	3966	82,6
5	51,9	3920	82,0

Die Materialeigenschaften der Objekte im simulierten Szenario haben einen erheblichen Einfluss auf die Lichtausbreitung, Reflexion, Brechung und Absorption. Daher ist es wichtig, die richtigen Materialeigenschaften auszuwählen und sie genau zu modellieren, um realistische Simulationsergebnisse zu erzielen. Gerade bei transmittierenden Bauteilen ist der Brechungsindex der jeweiligen Materialien eine entscheidende Eigenschaft. Für die Optik A wurde das entsprechende Polycarbonat, aus dem sie gefertigt ist, in der Simulation berücksichtigt. Für die Papp-/Schaumstoff-Platte, die als Bewertungswand diente, wurde in der Simulation ein Papiermaterial ausgewählt. Da die genaue Bezeichnung des Materials nicht bekannt war und die Reflexion anstatt der Transmission im Vordergrund stand, war die genaue Materialbezeichnung weniger relevant. Dennoch ist dies ein Bereich, in dem noch Verbesserungen in der Simulation erzielt werden können.

Die Oberflächeneigenschaften von Objekten wie Glanz, Rauheit, Transparenz und Streuung beeinflussen die Lichtverteilung und das Erscheinungsbild. Eine genaue Modellierung dieser Eigenschaften ist entscheidend, um realistische Simulationsergebnisse zu erzielen. Bei der Papp-/Schaumstoff-Platte, die als Bewertungswand fungierte, war insbesondere die Oberflächenbeschaffenheit und Reflektivität von Bedeutung. Daher wurde eine Vermessung der Oberfläche unter verschiedenen Winkeln (0°, 20°, 40° und 60°) und für verschiedene Wellenlängen (465 nm, 525 nm, 630 nm) mit dem Mini Diff durchgeführt. Die gemessenen Daten wurden

dann in das LightTools-Format exportiert und in die Simulation eingebunden, um die optischen Eigenschaften der Oberfläche korrekt zu berücksichtigen.

Des Weiteren sollten die 3D-Geometrien der optischen Elemente möglichst den realen Gegebenheiten entsprechen und auch fertigungsrelevante Radien und Formschrägen berücksichtigen.

Aufgrund der höheren Variationskoeffizienten wurde die Bewertungsmethode zwei als geeigneter angesehen als die Methode eins. Aus diesem Grund wurde bei der Auswertung der Simulationsergebnisse auch die Bewertungsmethode zwei angewendet.

Im Anschluss wurden die Ergebnisse der Messungen mit den Simulationsergebnissen verglichen. Die Messergebnisse sind in *Tabelle 5.2* und der oberen Zeile von *Tabelle 5.4* aufgeführt. Die Simulationsergebnisse sind hingegen in *Tabelle 5.3* und der unteren Zeile von *Tabelle 5.4* dargestellt.

Für die Filterung der Simulationsergebnisse wurde zweimal Delta verwendet, im Gegensatz zur Auswertung der Messergebnisse, bei der nur einmal Delta angewendet wurde. Der Delta-Wert, gibt Auskunft über den Standardfehler für die Vorhersage. Dieser Unterschied ergibt sich daraus, dass in der Simulation die schwarzen Linien nicht dargestellt wurden, wodurch andere Reflexionen, wie sie bei der realen Bewertungswand auftraten, nicht berücksichtigt wurden. Durch die Verwendung eines doppelten Delta wurden 95 % der Messwerte zur Erstellung des Polynoms 9. Grades einbezogen.

Die absoluten Werte der Steigung unterscheiden sich zwischen Messung und Simulation. Sowohl ist bei der Messung als auch bei der Simulation die steilste Steigung in der Zone 2 und die Steigung mit der zweithöchsten Steigung in der Zone 1 zu beobachten. Bei der Messung folgt darauf die Zone 4 und schließlich die Zone 3 mit der geringsten Steigung. In der Simulation hingegen ergibt sich ein anderes Ergebnis, da dort die Steigung in der Zone 4 geringer ist als in der Zone 3. Die Farbskala der beiden Auswertungen ist in *Abbildung 5.1* dargestellt.

Im Vergleich der Schnittmengen ist zu erkennen, dass bei der Messung nur Zone 1 eine Schnittmenge aufweist, die weniger als 50 % Übereinstimmung mit der Referenzzone hat. In der Simulation hingegen umfasst eine geringe Schnittmenge die Zonen 1 bis 3, bei der weniger als 50 % Übereinstimmung mit der Referenzzone besteht.

In der Messung sowie in der Simulation befinden sich die Wendepunkte und Extremwerte in denselben Zonen.

Tabelle 5.2: Auswertung der Messwerte der 30° Optik A in Bezug auf Steigung, Schnittmenge, Wendepunkte und Extremwerte

	A	stärkste absolute Steigung [x10 ⁻⁵]	Mittelwert aus Steigung [x10 ⁻⁵]	Schnittmenge [%]	Wendepunkt	Max	Min	Warum n.i.O.?
1	schlecht	4,93	4,3	0	X (r)		X (l)	- Hohe Steigung - keine Schnittmenge - Wendepunkt - Minimum
2	schlecht	6,07	5,205	79,41	X (l)			- Hohe Steigung - Wendepunkt
3	schlecht	2,66	1,94	80,41	X	X		- Wendepunkt - Maximum
4	ok	2,74	2,555	100			X	- Minimum

Tabelle 5.3: Auswertung der Simulationsergebnisse der 30° Optik A in Bezug auf Steigung, Schnittmenge, Wendepunkte und Extremwerte

	A	stärkste absolute Steigung [x10 ⁻⁵]	Mittelwert aus Steigung [x10 ⁻⁵]	Schnittmenge [%]	Wendepunkt	Max	Min	Warum n.i.O.?
1	schlecht	7,7	6,785	16,52	X (l)		X (re)	- Hohe Steigung - Geringe Schnittmenge - Wendepunkt - Minimum
2	schlecht	8	7,07	16,81	X (r)			- Hohe Steigung - Geringe Schnittmenge - Wendepunkt
3	schlecht	6,14	5,67	7,55	X	X		- Hohe Steigung - Geringe Schnittmenge - Wendepunkt - Maximum
4	ok	4,04	3,82	100			X	- Minimum



Abbildung 5.1: Farbskala für die farblich markierten Steigungswerte in der Auswertung der Optik A nach Bewertungsmethode 2 – Messergebnisse und Simulationsergebnisse (aus Tabelle 5.2 und Tabelle 5.3)

Die maximale Differenz in v' beträgt in der Messung 0,0240 und in der Simulation 0,0241. Diese Werte stimmen also sehr gut miteinander überein. Die Bewertung der Probanden, dass Zone 1 bis 3 als "nicht in Ordnung" und nur Zone 4 als "in Ordnung" bewertet wurden, wird sowohl von den Messwerten als auch von den Simulationswerten bestätigt, wenn auch mit verschiedenen Kriterien.

In den Diagrammen von v' in *Tabelle 5.4* ist zu erkennen, dass sich die Extremwerte in der Mitte von Zone 1 und auf den gelben Linien zwischen Zone 2 und 3 zwischen

Messung und Simulation unterscheiden. Die Werte der Simulation sind absolut betrachtet größer als die der Messung. Der Abfall der Kurve nach Zone 3 ist in der Simulation viel stärker ausgeprägt als in den Messwerten.

Die Kurve der Simulationsergebnisse ist insgesamt symmetrischer als die der Messergebnisse, was auch in der 1. und 2. Ableitung deutlich sichtbar ist. Dies könnte darauf hindeuten, dass in der Simulation keine Berücksichtigung von Fertigungstoleranzen erfolgte, wie beispielsweise Einfallstellen der Optik oder Fertigungstoleranzen bei der Bestückung der Platine.

Tabelle 5.4: Vergleich der Diagramme der Messergebnisse mit den Simulationsergebnissen

	v'	1. Ableitung	2. Ableitung
Messung			
Simulation			

Um die Eignung der Methode zur Bewertung von Farbabständen bei Farbsäumen zu überprüfen, ist es ratsam, weitere Simulationen zur Auswertung hinzuzufügen. Durch den Vergleich der Simulationsergebnisse mit bekannten Referenzwerten oder Messdaten können die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Methode bewertet werden. Wenn die Simulationsergebnisse konsistent und vergleichbar mit den Referenzwerten oder Messdaten sind, spricht dies für die Eignung der Methode zur Bewertung von Farbabständen bei Farbsäumen.

6 Zusammenfassung und Verbesserungsvorschläge

Insgesamt wurden zwei verschiedene Bewertungsmethoden zur Beurteilung der Farbsäume betrachtet. Bewertungsmethode 1 basiert auf der Mittelwertbildung aller Messwerte einer Zone mit Standardabweichung, während Bewertungsmethode 2 einen waagerechten Schnitt durch die Bewertungsebene verwendet und Kriterien wie Steigung und Schnittmenge berücksichtigt.

Bei Bewertungsmethode 1 haben die durchgeführten Versuche in Bezug auf die Leuchtdichte und den Abstrahlwinkel wertvolle Erkenntnisse geliefert. Es wurde festgestellt, dass es keinen festen Grenzwert für alle Abstrahlwinkel gibt, da die Beurteilung stark von der Leuchtdichte abhängt. Engstrahlende Optiken sollten daher unter Berücksichtigung der Leuchtdichte bewertet werden, während für breitstrahlende Optiken die MacAdam-Methode zur Beurteilung geeignet ist, sofern keine großen Standardabweichungen bei den Mittelwerten vorliegen. Es wurde jedoch deutlich, dass die Streuung der Messwerte groß ist, wie durch den Variationskoeffizienten verdeutlicht. Dies wurde auch durch die Betrachtung der Farbwertflächendiagramme bestätigt. Daher ist es nicht ratsam, sich allein auf die Mittelwerte zu verlassen. Eine Erhöhung der Anzahl der Zonen könnte dazu beitragen, kleinere Bereiche abzudecken und eine präzisere Beurteilung der Optiken zu ermöglichen.

Bei der Bewertungsmethode 2 sind eine geringe Steigung und eine hohe Schnittmenge erstrebenswert, und weitere Versuche sind erforderlich, um die genauen Werte für eine maximale Steigung und eine minimale Schnittmenge zu ermitteln. Durch die Untersuchung zusätzlicher Optiken kann auch die Bedeutung der Betrachtung der Wendepunkte und Extremwerte ermittelt werden.

Für Bewertungsmethode 2 wurde ein potenzieller Verbesserungsvorschlag erarbeitet, um das Problem der außermittigen Ausrichtung und nicht rotationssymmetrischen Abstrahlung der Optiken anzugehen. Es wurde in Betracht gezogen, die Polynome der v' -Messwerte durch eine Symmetrisierung der jeweiligen linken und rechten Messwerte mittels Mittelwertbildung anzupassen. Durch die Berechnung des Durchschnitts der Farbwerte auf beiden Seiten sollte ein Ausgleich geschaffen werden, um die Auswirkungen der fehlenden Rotationssymmetrie zu minimieren. Dieser Ansatz zielte darauf ab, eine symmetrischere Verlaufskurve für die v' -Polynome zu erzeugen und somit eine präzisere Auswertung zu ermöglichen. Durch die Anwendung dieses Verfahrens sollte eine verbesserte Analyse und Vergleichbarkeit der Farbveränderungen zwischen den Zonen, unabhängig von potenziellen Asymmetrien im Lichtbild der Optiken, erreicht werden. Es ist jedoch zu beachten, dass dieser Verbesserungsvorschlag bisher noch nicht umgesetzt wurde, da noch nicht bekannt ist, ob dies die Messwerte beeinflusst oder verfälscht. Weitere Untersuchungen und Tests wären erforderlich, um die Auswirkungen dieser Symmetrisierungsmethode auf die Messergebnisse zu beurteilen.

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Bewertungsmethode besteht darin, Polynome 9. Grades für die einzelnen Zonen zu bilden, anstatt für alle Messpunkte ein einziges gemeinsames Polynom zu erzeugen. Dadurch können die Messwerte besser abgebildet werden.

Die Aufnahme mit der Kamera umfasste nicht den gesamten Bereich der Bewertungswand, wodurch in der Simulation eine grobe Abschätzung des verwendeten Bereichs basierend auf dem Kamerabild vorgenommen werden musste. Als Verbesserungsvorschlag für zukünftige Durchführungen könnte die Ausrichtung der Kamera so angepasst werden, dass die gesamte Breite der Wand auf der Aufnahme sichtbar ist. Dadurch wäre eine präzisere Erfassung des gesamten Bewertungsbereichs möglich.

Allgemein stellte sich als Herausforderung heraus, eine geeignete Referenzzone festzulegen, da sich die Werte innerhalb der Zonen verändern können. Es ist anzunehmen, dass weitere Untersuchungen und Methoden erforderlich sind, um eine geeignete Referenzzone zu bestimmen.

Als Verbesserungsvorschlag könnte von den Probanden erfragt werden, in welcher Zone sie einen Farbwechsel wahrnehmen und ob dieser von gelb nach blau oder umgekehrt erfolgt. Diese zusätzlichen Informationen könnten dazu beitragen, die Bewertung zu präzisieren.

Insgesamt liefert der durchgeführte Versuch wichtige Erkenntnisse und zeigt Möglichkeiten zur Verbesserung der Methodik auf, um zuverlässigere Bewertungen von Optiken vorzunehmen. Weitere Untersuchungen und Experimente sind erforderlich, um die Ergebnisse zu verifizieren und das Verständnis der Zusammenhänge zwischen Leuchtdichte, Abstrahlwinkel und Farbabstand weiter zu vertiefen.

7 References

- [1] Rotscholl, I. und Neumann, C. „Die Farbtemperatur in der Lichttechnik.“ https://www.tu-ilmenau.de/fileadmin/Bereiche/MB/lichttechnik/Lux_junior/2015/Rotscholl_Lux_junior_2015.pdf (Zugriff am: 4. Juli 2023).