

# Entwicklung eines Robustheitsmaßes für die Wahrnehmung von LEDs

Nicole Stubenrauch, Christoph Schierz, TU Ilmenau

n.stubenrauch@online.de

## Zusammenfassung

Metamere Spektren sind Spektren, die trotz unterschiedlicher spektraler Verteilung in einem ausgewählten Farbsystem identische Farbörter haben. Ein spezifiziertes Farbsystem beinhaltet jedoch nur ein spezifiziertes Tripel von Spektralwertfunktionen. Eine Metamerie kann also nicht einheitlich für Probanden verschiedener Altersklassen und Beobachterfeldgrößen existieren. In dieser Arbeit wird eine Probandenstudie beschrieben, die in ihrer Auswertung berechnete Indexe, bzw. Robustheitsmaße überprüfen kann. Außerdem kann mit den ermittelten Daten für jeden Fall untersucht werden, für welche Spektralwertfunktionen Berechnung und Wahrnehmung am besten übereinstimmen.

## 1 Einleitung und Motivation

Die Spektren von weißen LEDs unterscheiden sich durch die verwendete blaue LED und den Leuchtstoff teilweise deutlich. Dadurch können metamere Spektren sehr verschieden sein. Die Berechnung der identischen Farbörter erfolgt mit Spektralwertfunktionen (color matching functions - CMF). Diese CMF sollen die Farbwahrnehmung eines durchschnittlichen Beobachters wiedergeben und wurden schon in vielen Studien untersucht. Die CIE hat 2006 neue CMF herausgegeben, welche Unterscheidungen für die Feldgröße (2° und 10°) sowie das Beobachteralter (20-80 Jahre) ermöglichen [1].

Schaut man sich an, wie stark sich die CMF für junge und alte Probanden sowie für die verschiedenen Feldgrößen unterscheiden, so ist es nicht verwunderlich, dass rechnerisch metamere Spektren i.A. als farblich deutlich unterschiedlich wahrgenommen werden, da die Metamerie schließlich nur für eine CMF ermittelt werden kann. Für andere Altersklassen von Beobachtern und andere Beobachtungsbedingungen ist die Metamerie somit nicht gegeben.

Die Unterschiede zwischen den Altersgruppen und den Feldwinkeln sind vom Spektrum der Lichtquelle abhängig. So gibt es Spektren, bei welchen die Wahrnehmung robust gegenüber Veränderungen des Probandenalters oder der Feldgröße ist, genauso wie Spektren, bei denen die Wahrnehmung sehr sensibel auf bereits geringe Veränderungen reagiert. In dieser Studie soll ermittelt werden, welchen

© 2019 by the authors. – Licensee Technische Universität Ilmenau, Deutschland.



This is an **Open Access** article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike-4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).  
(<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

Einfluss die verschiedenen Wellenlängenbereiche auf die Robustheit gegenüber Veränderungen haben.

Des Weiteren ist zu überprüfen, welche der derzeit genutzten CMF die Wahrnehmung der Probanden am besten widerspiegeln. Dazu sind die Farbörter von Test- und Referenzlichtquelle mit den unterschiedlichen, altersangepassten Funktionen zu berechnen und für jeden Probanden sowie für Probandengruppen und für jede Beobachterfeldgröße die ideale CMF zu ermitteln.

Bemerkung: Alle hier dargestellten Diagramme sowie Erklärungen beziehen sich auf die Spektralwertfunktionen der CIE 2006 10°, bzw. 2°, jeweils entsprechend der aktuellen Anwendung.

## 2 Forschungshypothesen

- Die Spektralwertfunktionen unterschiedlicher Altersgruppen unterscheiden sich signifikant voneinander.
- Die Spektralwertfunktionen unterschiedlicher Beobachterfeldgrößen unterscheiden sich signifikant voneinander.
- Der Einfluss des Alters tritt beim Vergleich von LED-Lichtfeldern abhängig vom Spektrum unterschiedlich stark hervor. Für jedes Spektrum kann ein Index für die Abhängigkeit vom Alter rechnerisch vorhergesagt werden.
- Der Einfluss der Beobachterfeldgröße tritt beim Vergleich von LED-Lichtfeldern abhängig vom Spektrum unterschiedlich stark hervor. Für jedes Spektrum kann ein Index für die Abhängigkeit von der Beobachterfeldgröße rechnerisch vorhergesagt werden.

## 3 Versuchsdesign

### 3.1 Versuchsaufbau

Zur Untersuchung wurde eine Abmusterungsbox entworfen, welche eine Vielzahl an Variationen an Testzeichen und Umfeldern erlaubt (Abb. 1) [3].

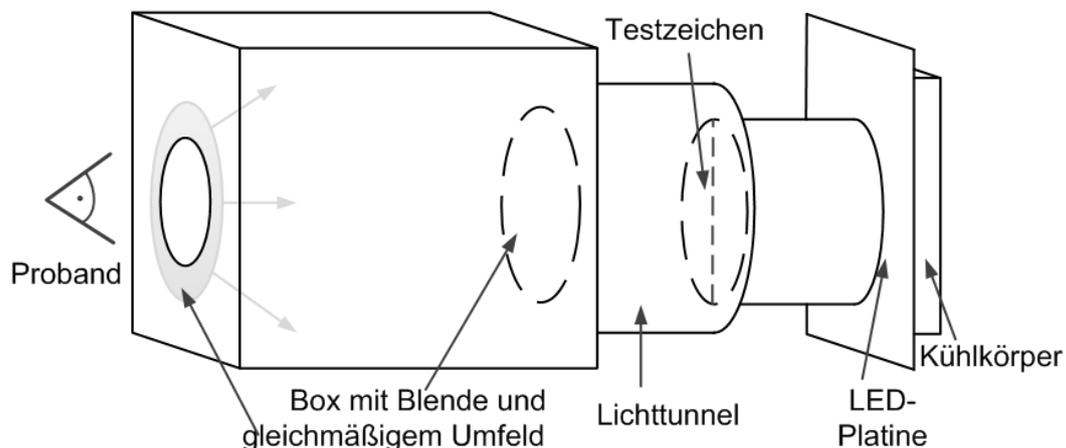


Abb. 1: Versuchsaufbau zur Bewertung von Farbunterschieden

Der Proband sitzt auf einem höhenverstellbaren Stuhl vor der Box (L: 1,37 m; B: 0,66 m, H: 0,66 m). Der Kopf ist mit Hilfe einer Kinn-Kopf-Stütze fixiert. Die Betrachtung des runden, vertikal geteilten Testzeichens erfolgt monokular. Beim Blick in die Box ist das Testzeichen etwa 1 m entfernt. Mit Hilfe einer Blende 0,3 m vor dem Testzeichen kann dessen sichtbare Größe auf 2° oder 10° eingestellt werden, wobei bei einer Betrachtung des 10°-Feldes das 2°-Feld zusätzlich abgedunkelt ist.

### 3.2 Spektren

Die LED-Platine im Versuchsaufbau ist, genau wie der Mischzylinder und das Testzeichen, zweigeteilt. Auf jeder befinden sich sechs verschiedene, farbige LEDs (dominante Wellenlängen von 451 nm, 477 nm, 498 nm, 527 nm, 633 nm, und 660 nm) sowie drei weiße LED-Typen unterschiedlicher ähnlichster Farbtemperatur (2700 K, 4100 K, 6560 K). Durch diese verschiedenen LEDs kann ein großer Farbumfang aufgespannt (Abb. 2) und eine Vielzahl an Spektralverteilungen realisiert werden.

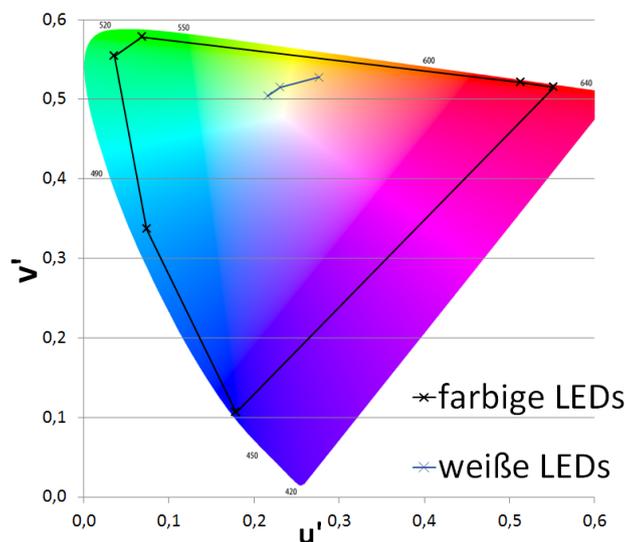


Abb. 2: Gamut, welcher mit den verwendeten LEDs aufgespannt wird

Für die Umfeldbeleuchtung wurden die weißen LEDs genutzt, welche auch auf der Platine verbaut sind. Die Umfeldbeleuchtung wurde bestmöglich an die Lichtfarbe des Testzeichens angepasst.

Für die Versuche wurden acht verschiedene Spektren ausgewählt, welche auf den Farbort eines Planckschen Strahlers bei 4000 K (CIE 2006 10°, bzw. 2°) eingestellt waren. Bei den Testspektren handelt es sich um verschiedene RGB- sowie RGBW-Kombinationen, die sich teilweise nur in einer Komponente unterscheiden oder, durch die Beteiligung einer weißen LED, in ihrer spektralen Homogenität.

Als Referenzen wurden zwei Kombinationen der neun LED gewählt, dabei ist eine Referenz möglichst ähnlich zu Planck (RP) und die andere zu einer weißen, leuchtstoffkonvertierten LED (RW). In Abb. 3 sind die zehn Spektren zu sehen.

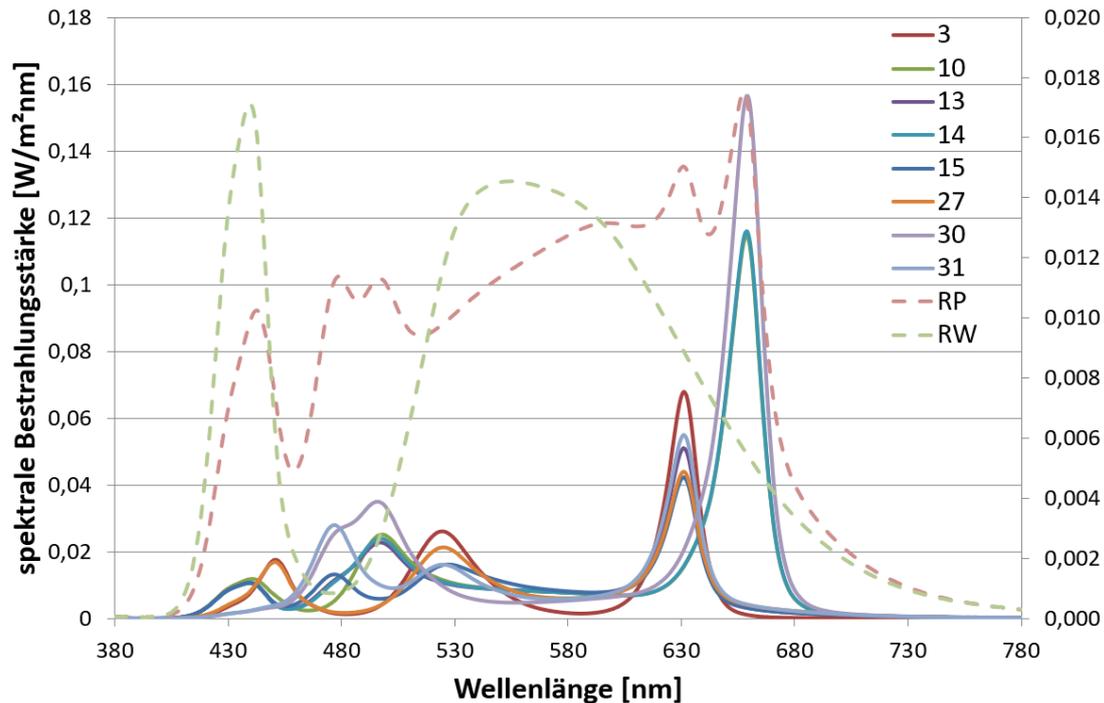


Abb. 3: Spektren der acht ausgewählten Kombinationen mit zwei Referenzen. Die beiden Referenzen beziehen sich auf die sekundäre Achse.

#### 4 Durchführung der Versuche

Während eines Versuchsdurchlaufes bleibt eine Testzeichenhälfte als Referenz konstant, die zweite wird innerhalb eines Rasters (Abb. 4) leicht variiert. Aufgabe des Probanden ist es, die beiden Hälften des Testzeichens auf Gleichheit zu bewerten.

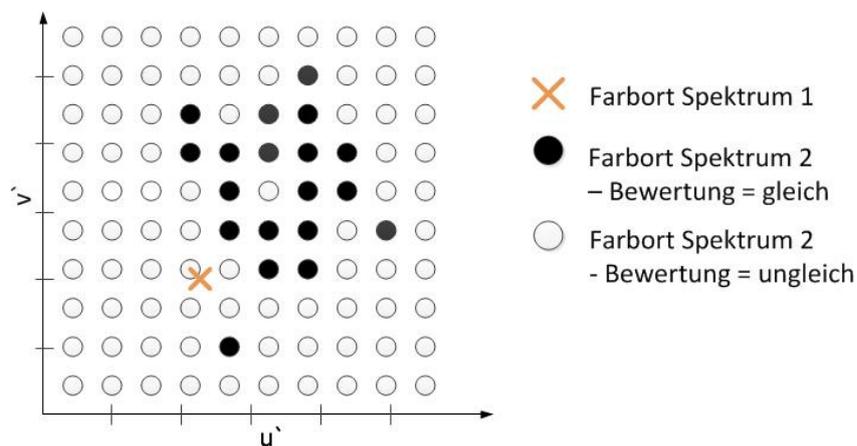


Abb. 4: Raster der abzufragenden Farbörter

Durchgeführt wurden die Versuche mit Probanden beider Geschlechter im Alter zwischen 27 und 69, bei jeweils zwei Beobachterfeldgrößen. Zusätzlich zu den acht Testspektren mit jeweils zwei Referenzen wurden die Nullhypothesen getestet. Die jeweilige Referenz befindet sich somit auf beiden Testzeichenhälften. Mit diesem

Versuch kann zusätzlich eine Anbindung an die Versuche von MACADAM [6] und KRAMER [4, 5] erfolgen.

Da die als gleich bewerteten Farbörter zwischen den Probanden bei den meisten Untersuchungen deutlich weiter auseinander liegen als die mittleren Streuungen der „Gleich“ Antworten war es nicht möglich bei allen Probanden die gleichen Punkte abzufragen. Daher war es nötig, mit den Probanden erst die Position eines geeigneten Gitters zu ermitteln. Das untersuchte Gitter musste im Anschluss ggf. erweitert werden, wenn noch nicht der gesamte gleich beurteilte Bereich umfasst wurde. In Abb. 5 ist ein typischer Versuchsdurchlauf dargestellt.

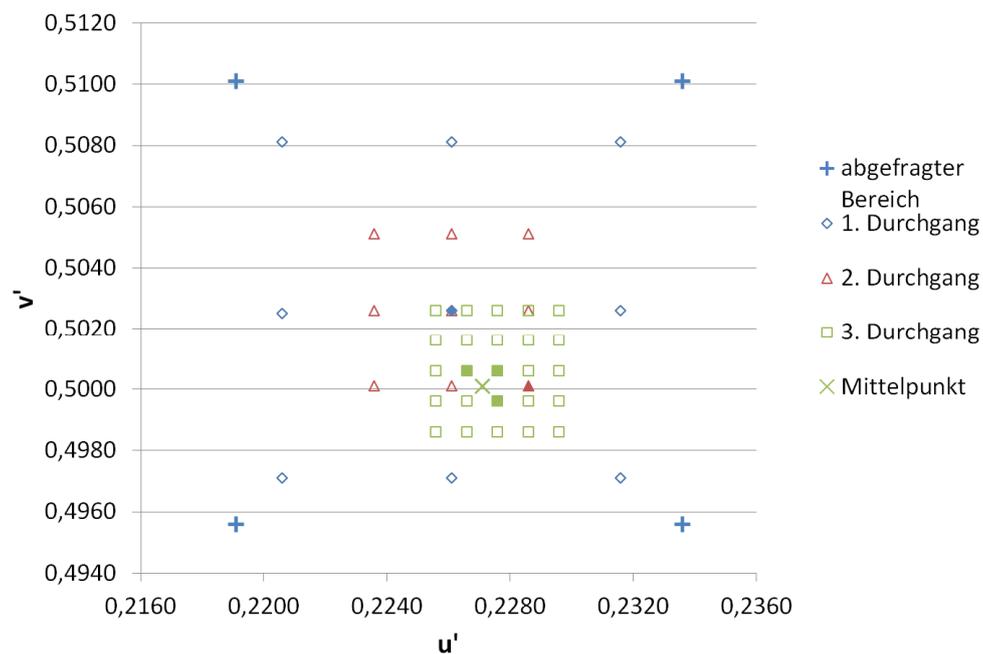


Abb.5: Methodik bei der Vorstudie am Beispiel: In zwei Durchgängen wurde der passende Ort für das abzufragende Gitter gesucht, welches in einem dritten Durchgang abgefragt wurde. Die gefüllten Kästchen geben dabei "Gleich" Antworten an. Hier dargestellt ist die Abfrage von Kombination 15 - Referenz RW – Gesichtsfeld 10° - Proband 3 im Farbsystem CIE2006 10°

## 5 Erste Auswertung der Versuche

### 5.1 Probandenkollektiv

An der Probandenstudie haben vier Probanden teilgenommen. Eine Übersicht ist in Tab. 1 dargestellt.

Tab. 1: Übersicht der 4 Probanden der Versuche

Nummer	Geschlecht	Alter	Auge
1	w	69	rechts
2	m	58	links
3	w	29	rechts
4	m	27	links

Aufgrund von Versuchsaufbau und Methodik war es sehr schwierig Probanden für die Durchführung der Versuche zu finden. Problematisch war häufig das Finden eines geeigneten Ortes für das endgültige Gitter. Dazu war es nötig dargestellte Farbunterschiede im ersten und zweiten Durchgang zu bewerten, um sich langsam dem perfekten Untersuchungsort und -umfang anzunähern. Diese Bewertung verschiedenster Farbunterschiede nach ihrer Größe gelang nicht allen möglichen Probanden und erschwerte somit die Probandensuche.

Die Versuche wurden in Sessions von max. 2 h Dauer durchgeführt. Wie viele Gitter in der Zeit bewertet wurden, hängt stark vom Probanden ab. Insgesamt benötigten die Probanden für die 10°-Versuche 7 h bis 13 h. Die 2°-Versuche sind noch nicht bei allen Probanden abgeschlossen. Es wurde jedoch schnell deutlich, dass sie anstrengender sind und mehrere, dafür kürzere Sessions nötig waren. Die Probanden wurden im Kollegen- und engen Familienkreis gefunden.

Wie zuvor erwähnt, werden die Versuche monokular absolviert, um Fehler durch Unterschiede zwischen den Augen auszuschließen. Die Auswahl des Auges erfolgte durch eine Untersuchung mit dem Flimmerphotometer am Fachgebiet Lichttechnik. Dabei wurde bei den jungen Probanden das jeweils klarere und bei den älteren Probanden das vergilbtere Auge gewählt.

## 5.2 Bestätigung durch gleiche Spektren (10°-Feld)

Eine Besonderheit dieser Studie, im Vergleich zu vielen anderen, ist der spektrale Unterschied zwischen den beiden Testzeichenhälften. MACADAM, KRAMER und viele andere führten Untersuchungen mit Spektren durch, die auf beiden Testzeichenhälften nahezu identisch waren und auf gleichen Grundvalenzen aufgebaut waren. Dies wurde hier anhand der beiden Referenzen nachgestellt. In Abb. 6 ist das Ergebnis am Beispiel RW, 10°-Beobachterfeld dargestellt.

Man kann gut erkennen, dass es nur geringe Unterschiede zwischen den Probanden gibt und die Referenz in jedem Fall innerhalb der Standardabweichung liegt. Die Standardabweichung kann dabei mit der Ellipsengröße bei KRAMER verglichen werden. Dieser ermittelte in seinen Untersuchungen für 4000K eine Ellipse mit einem flächengleichen Radius von  $r_m = 0,0008$  (in CIE 2006 10°) [7]. Die hier ermittelte mittlere Standardabweichung liegt bei  $du'v'_{CIE2006\ 10^\circ} = 0,0012$  und ist somit nur leicht höher.

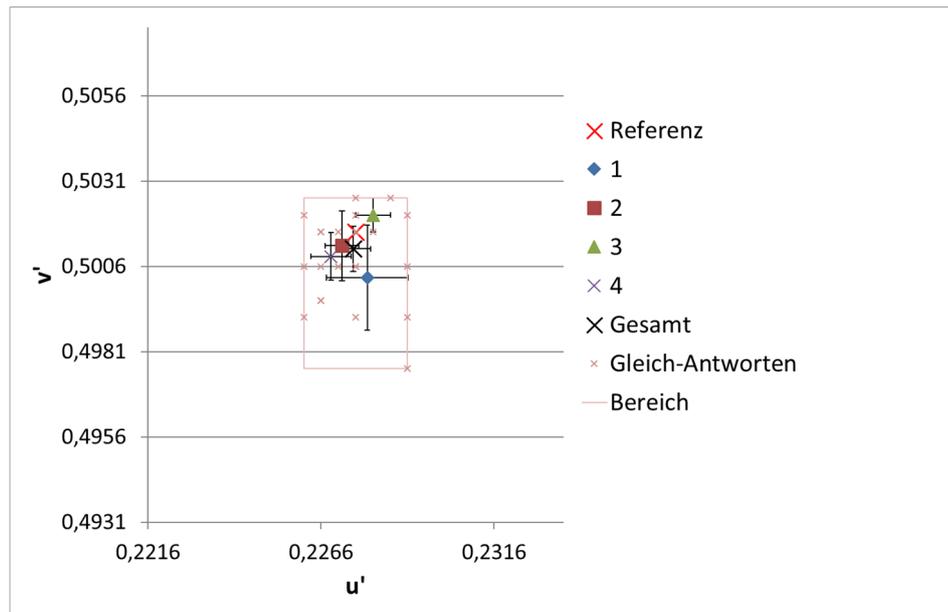


Abb.6: Überprüfung gleicher Spektren anhand der Referenz RW als Testgitter. Aufgetragen sind jeweils die Mittelpunkte der Gleich-Antworten der vier Probanden sowie der Gesamtmittelpunkt der Untersuchungen. Um einen Eindruck zu bekommen, wie groß die Ergebnisse streuen, sind außerdem die Koordinaten der Gleich-Antworten markiert und mit einem Rahmen die Maximal- und Minimalwerte eingegrenzt.

### 5.3 Auswertung an einem Beispielspektrum

Die Auswertung soll im Folgenden an einem Beispielspektrum erfolgen. Dazu wurde Kombination 3 (vgl. Abb. 3) ausgewählt.

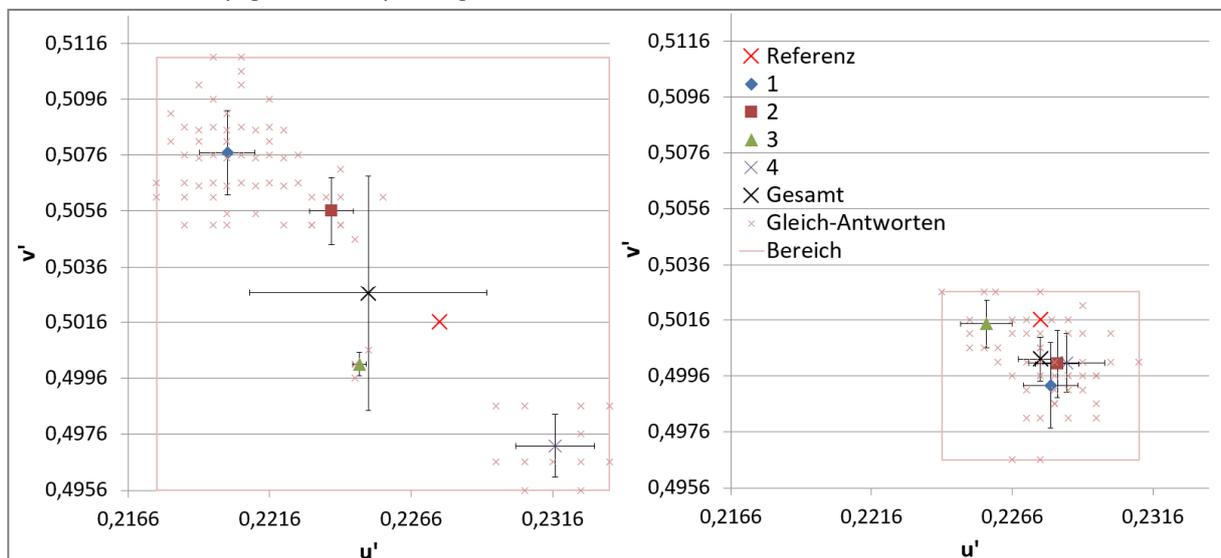


Abb.7: Ergebnisse der Studie für Kombination 3, 10°-Feld, Referenz RW (links) sowie Referenz RP (rechts).

In Abb. 7 sind die Ergebnisse für ein 10°-Feld dargestellt. Aufgetragen sind die Ergebnisse aller vier Probanden sowie der Gesamtmittelpunkt samt Streuung für beide Referenzen. Man kann gut erkennen, dass es große Unterschiede zwischen den

Ergebnissen beider Referenzen gibt. Für die Referenz RW sieht man einen Verlauf der Einzelmittelpunkte von oben links nach unten rechts mit absteigendem Probandenalter. Dieser Trend ist auch bei vielen anderen Beispielen zu erkennen und gut mithilfe der Vergilbung der Linse zu erklären. Für die Referenz RP ist dies jedoch nicht zu erkennen, die Lage der Einzelmittelpunkte im Vergleich zum Gesamtmittelpunkt hat sich deutlich verändert. Die Standardabweichungen der einzelnen Mittelpunkte hat sich genau wie die Abweichung des Gesamtmittelpunktes verkleinert. Bei keinem der 8 individuellen Fälle, ist der Farbort der Referenz innerhalb der Standardabweichung.

#### 5.4 Notwendige Gittergrößen der 10°-Versuche

Im Laufe der Versuche mussten die Gitter regelmäßig erweitert werden, um alle möglichen Gleich-Antworten der Probanden finden zu können. Dabei ergaben sich die Abmessungen der Gitter wie in Tab. 2 aufgelistet.

Tab. 2: Abmessungen der erstellten Gitter für die Versuche im 10°-Beobachtungsfeld

	u'min	u'max	v'min	v'max	Spalten	Zeilen
<b>Gitter3</b>	0,2166	0,2336	0,4956	0,5126	35	35
<b>Gitter10</b>	0,2166	0,2336	0,4956	0,5106	35	31
<b>Gitter13</b>	0,2166	0,2336	0,4956	0,5116	35	33
<b>Gitter14</b>	0,2191	0,2336	0,4956	0,5101	30	30
<b>Gitter15</b>	0,2191	0,2336	0,4956	0,5101	30	30
<b>Gitter27</b>	0,2191	0,2336	0,4931	0,5101	30	35
<b>Gitter30</b>	0,2116	0,2386	0,4881	0,5176	55	60
<b>Gitter31</b>	0,2191	0,2386	0,4881	0,5126	40	50
<b>RP</b>	0,2216	0,2336	0,4956	0,5076	25	25
<b>RW</b>	0,2216	0,2336	0,4931	0,5076	25	30

Der Abstand von  $du'v'_{CIE2006\ 10^\circ} = 0,0005$  ist für alle Gitter konstant. Für andere Probanden würden weitere Erweiterungen sehr wahrscheinlich nötig sein. Vor allem, wenn die Probanden deutlich älter oder jünger sind. Bei den Gittern 10 und 13 wurde das Gitter bis an seine Grenzen ausgenutzt. Eine zusätzliche Erweiterung ist mit den aktuell genutzten LEDs und dem Helligkeitsniveau von  $800 \frac{cd}{m^2}$  nicht möglich. Anhand der Gitterabmessungen sieht man schnell, dass die Unterschiede zwischen den Probanden bei Gitter RP sehr klein und bei Gitter 30 und 31 sehr groß sind.

Bedenkt man die mittlere Standardabweichung von  $du'v'_{CIE2006\ 10^\circ} = 0,0013$  (über alle 10°-Versuche) bei der benötigten Gittergröße so wird deutlich, dass das Abfragen des gesamten Gitters nicht möglich ist.

Für die 10°-Versuche sind die Standardabweichungen der vier Probanden vergleichbar, bei den 2°-Versuchen ist diese jedoch für die beiden älteren Probanden deutlich größer als bei den jüngeren.

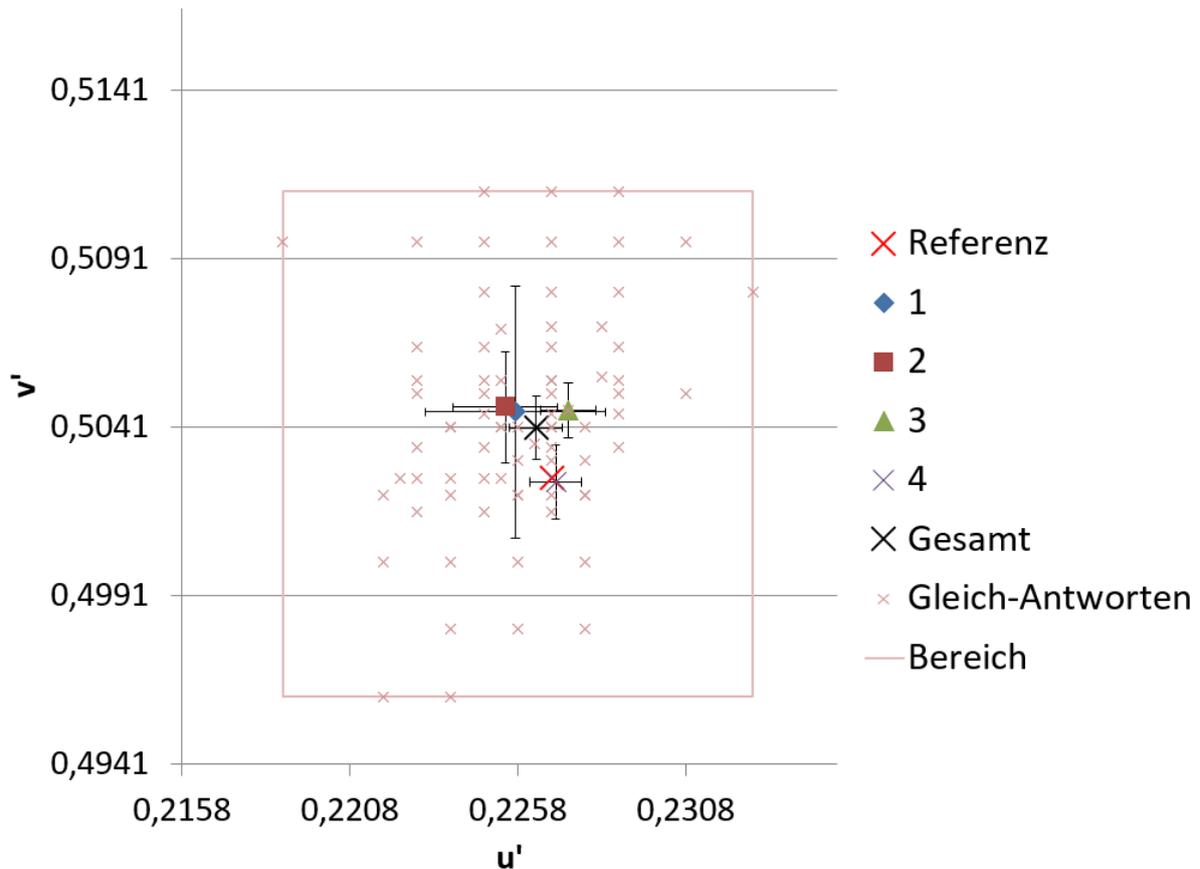


Abb. 8: Auswertung erster Ergebnisse im 2° Beobachterfeld für die Kombination 15

## 6 Ausblick

In dieser Studie wurden von Probanden verschiedener Altersklassen Schwellwerte bei der Bewertung unterschiedlicher Spektren im Test- und Referenzfeld ermittelt. Bisher wurden die Ergebnisse lediglich gesichtet und die Validität der Methodik wurde geprüft.

Mit Hilfe der ermittelten Daten können rechnerisch zu ermittelnden Indexe, bzw. Robustheitsmaße, erstellt werden, welche die Robustheit eines einzelnen Spektrums gegenüber Veränderungen der Feldgröße und des Probandenalters beschreiben.

Außerdem kann für jeden Probanden und jeden Test eine ideale Spektralwertfunktion ermittelt werden. Aus diesen Daten können dann gute CMF für die einzelnen Probanden, Beobachtungsbedingungen oder Spektren ermittelt werden.

## 7 Quellen

- [1] CIE: Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes – Part 1. Technical Report CIE 170-1:2006. Vienna: CIE Central Bureau; 2006
- [2] CIE: Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes – Part 2. Technical Report CIE 170-2:2015. Vienna: CIE Central Bureau; 2015
- [3] HAAG, S.; HARTWIG, U. M.: Aufbau einer Untersuchungskabine zur Abmusterung von Lichtfarben. Projektseminar, Ilmenau, 2015
- [4] KRAMER, G.: Farbdiskrimination: Ein empirischer Ansatz für die Gruppierung weißer LEDs. PhD Thesis, Ilmenau, Germany, 2014
- [5] KRAMER, G.; SCHIERZ, C.: Colour Discrimination Subject to Illuminant and Colour Transition. Colour Research and Application, Volume 41, Number 5, October 2016
- [6] MACADAM, DL.: Visual sensitivities to colour differences in daylight. J Opt Soc Am 1942: 32:247-274
- [7] STUBENRAUCH, N.; BIESKE, K.; KOLMER, J.; SCHIERZ, C.: Evaluation of colour differences from LEDs in new colour systems. In SLG – Schweizer Licht Gesellschaft (Hrsg.): LICHT 2018