Einfluss der Beobachtungsfeldgröße auf Farbabgleichversuche mit LED-Lichtquellen

Saskia Polster, Christoph Schierz
Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik
Prof.-Schmidt-Str. 26, D-98693 Ilmenau

1. Problemstellung

Grundlage für jede psychooptische Untersuchung, bei der Farbabgleiche vorgenommen werden, ist die Festlegung der Beobachtungsbedingungen und damit eines definierten Beobachterfeldes. Bisherige Untersuchungen beschränkten sich in der Regel auf Farbabgleichversuche bei einer bestimmten Beobachterfeldgröße. Aufgrund der unterschiedlichen verwendeten Spektren in den verschiedenen Untersuchungen konnten bisher kaum konkret die Auswirkungen der Beobachterfeldgröße verglichen werden.
Um zu ermitteln, wie stark die Wahl des Beobachterfeldes die Ergebnisse einer Untersuchung zu Metamerie-Effekten bei LED-Lichtquellen beeinflusst, wurden dieselben Referenz- und Testspektren mit unterschiedlichen Beobachterfeldgrößen untersucht.

2. Ziel

Es ist bekannt, dass der Farbeindruck einer farbigen Fläche abhängig von der Größe des betrachteten Beobachtungsfeldes ist. Ziel dieser Untersuchung ist es herauszufinden, bei welchen spektralen Zusammensetzungen zweier zu vergleichender LED-Spektren der Einfluss der Beobachterfeldgröße besonders stark zum Tragen kommt. Zudem soll ermittelt werden, wie gut in den bestehenden CIE-Farbräumen visuell gleich wahrgenommene LED-Lichtfarben unterschiedlicher Spektren auf einen Farbort abgebildet werden. Darüber hinaus soll festgestellt werden in welcher Größenordnung sich der Einfluss der Beobachterfeldgröße im Vergleich zur Farbortverschiebung durch schlechte Modellierung von LED-Spektren in den untersuchten Farbräumen veranschlagt. Mit schlechter Modellierung ist hier gemeint, dass in einem Farbraum visuell gleich wahrgenommene Spektren auf unterschiedliche Farbörter abgebildet werden, während Spektren mit gleichem berechneten Farbort unterschiedliche Farbeindrücke liefern.

3. Stand der Wissenschaft

Die CIE veröffentlichte 2006 in der CIE Schrift 170-1:2006 eine Rechenvorschrift zur Ermittlung von Sehzapfen-Grundfunktionen für ein Beobachterfeld zwischen 2° und 10°. Aus diesen lassen sich Spektralwertfunktionen für alle Sehfelder zwischen 2° und 10° berechnen. Diese wurden bisher noch nicht ausreichend in allen Feldgrößen und unter der Verwendung von LED-Lichtquellen getestet. Bisherige Untersuchungen /1//2/ zeigen, dass auch unter der Verwendung dieser neuen Grundfunktionen visuell abgeglichene LED- und breitbandige Lichtquellen mit definitionsgemäß metameren Spektren nicht auf denselben Farbort abgebildet werden. Die meisten bisherigen Untersuchungen wurden im 2°-Feld durchgeführt.

4. Forschungshypothesen

Es wird vermutet, dass der Einfluss der Beobachterfeldgröße beim Vergleich von zwei LED-Licht-Feldern abhängig von deren spektraler Zusammensetzung unterschiedlich stark hervortritt. Des Weiteren wird die Hypothese untersucht, dass dieser Effekt im Extremfall bei der Beleuchtung mit LED Lichtquellen stark unterschiedlicher Spektren so deutlich

hervortreten kann, dass es zu einem Invertierungseffekt kommt. Dies bedeutet, dass bei einer Änderung der Beobachterfeldgröße der Farbeindruck wechselt, sodass in einer Feldgröße die Testfläche grünlich wirkt während in einer anderen Feldgröße das Referenzfeld grünlich wahrgenommen wird.

5. Versuch

In Laboruntersuchungen wurden Abgleichtests in einem speziell für diese Zwecke angefertigten Abgleichstand durchgeführt. 13 Probanden nahmen an jeweils 7 Versuchsdurchläufen teil. In jedem der Versuchsdurchläufe wurden spektral unterschiedlich zusammengesetzte Referenz- und Testspektren dargeboten. Die unterschiedlichen Versuchssituationen sind Tabelle 1 zu entnehmen. Innerhalb eines Versuchsdurchlaufs nahm der Proband insgesamt 9 Abgleiche vor. Es wurde jeweils bei 3500K, 5000K und 6500K in einem 2°-, 5°- und 10°-Beobachterfeld abgeglichen. Alle teilnehmen den Probanden wurden vor den Versuchen negativ auf Farbfehlsichtigkeit geprüft. Die Probandengruppe bestand aus 7 männlichen und 6 weiblichen Probanden im Alter von 23 bis 45 Jahren.

5.1 Versuchsaufbau

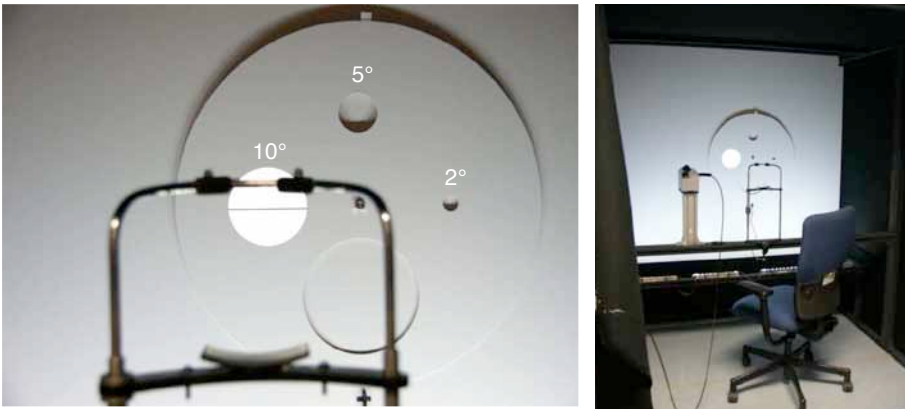

Abb. 1: Abgleichstand mit zweigeteiltem Bewertungsfeld und änderbaren Beobachterfeldausschnitten

Im Versuch wurde dem Probanden ein zweigeteiltes Beobachtungsfeld dargeboten. In einer Hälfte die Referenzlichtquelle, in der anderen die vom Probanden einzustellende Testlichtquelle. Die Felder waren jeweils homogen hinterleuchtet. Der maximale Farbunterschied innerhalb einer Bewertungsfläche betrug $\Delta E_{u'v'} < 0{,}001$. Die Leuchtdichte der Bewertungsflächen lag bei 145 cd/m². Referenzfeld und Testfeld konnten vertauscht werden um systematische Bewertungsfehler durch die Position des Test- und Referenzfeldes auszuschließen. Die helle Umgebungsfläche füllte das Gesichtsfeld komplett aus und wurde mit RGBW gemischtem LED-Licht der dem Versuchsdurchlauf entsprechenden Farbtemperatur ausgeleuchtet. Die Leuchtdichte der Umgebungsfläche betrug 70 cd/m² womit alle Versuche unter photopischen Sehbedingungen erfolgten.

5.2 Versuchsablauf

Die Probanden machten Abgleichversuche bei denen durch gezielte Steuerung der Testlichtquelle visuelle Gleichheit zwischen Testlichtfeld und Referenzlichtfeld hergestellt wur-

de. Ausgangssituation für jeden Abgleich war jeweils der messtechnisch an die Referenzlichtquelle angeglichene Farbort im CIE-Farbraum von 1976. Der Proband bewegte sich in zwei Dimensionen auf der Achse grün-rot und der Achse blau-gelb mit Hilfe von Richtungstasten. Realisiert wurde die Ansteuerung über einen Mischalgorithmus im CIE 1976 u'v'- Farbraum basierend auf den 2°-Spektralwertfun ktionen von 1931. Zudem konnte die Testperson die Helligkeit des Testfeldes wenn nötig visuell anpassen. Der Proband wurde angewiesen den visuell gleich empfundenen Farbort in jeder Richtung einmal zu verlassen bis er eine visuelle Differenz wahrnahm und dann wieder zum gewünschten Farbort zurückzukehren.

Nachdem der Proband das Testfeld im 5°-Beobachterfe ld auf die Referenz angeglichen hatte, beschrieb er verbal den Farbeindruck von Referenz- und Testfeld im 2°- und im 10°-Beobachterfeld.

Vor jedem Versuchsdurchlauf wurden die drei Einstellungen des Referenzlichtfeldes messtechnisch überprüft. Nach jedem Abgleich wurde die vom Probanden eingestellte Testfläche spektral mit einer TOP100-311 Optik (2mm Messfeld) an einem CAS140CT Array-Spektrometer (Instrument Systems GmbH, München) vermessen.

5.3 Untersuchte Spektren

Untersucht wurden zwei leuchtstoffkonvertierte kaltweiße LEDs desselben Typs, welche in Mischung mit RGB-LEDs bei farbmesstechnischem Abgleich stark unterschiedliche Farbeindrücke lieferten. Da aufgrund der Verschiebung des Blaupeaks ein jeweils leicht rötlicher und leicht grünlicher Farbeindruck der LED-Lichtfarbe entsteht, werden die beiden Testlichtfarben im folgenden TLr und TLg genannt. Um nicht nur einen direkten Vergleich der Spektren zueinander zu haben (vgl. V1 Tab. 1), sondern auch zu einer „Referenzlichtquelle" wurde mit einer 8LED-Lichtquelle ein möglichst kontinuierliches Spektrum geschaffen, mit welchem die spektralen Verteilungen des Planck'schen Strahlers, bzw. des Tageslichts bei 3500K, 5000K und 6500K im Bereich zwischen 450nm und 650nm nachgebildet wurden (vgl. V4/V5/V6 Tab. 1).

Versuchs-situation	Referenzlichtquelle	Testlichtquelle
V1	TLr RGBW	TLg RGBW
V2	TLr RGB	TLg RGB
V3	TLr RGBW + Cyan	TLg RGBW
V4	SW voll	TLg RGBW
V5	SW voll	TLr RGBW
V6	SW voll	TLr RGB
V7	SW ACB	TLr RGB

	2°	5°	10°
3500K	9 Abgleiche je Versuchs-situation		
5000K			
6500K			

Legende:

SW voll	LED Vollspektrum
SW ACB	RGB-Mischung ((R: λ_{Peak}=595nm, G: λ_{Peak}=497nm, B: λ_{Peak}=467nm)
TLr RGBW	RGBW- Mischung mit leuchtstoffkonvertierter weißer LED ($\lambda_{Peak\ blau}$=440nm)
TLr RGBW+C	RGBW- Mischung(siehe TLr RGBW) mit konstanter Cyan-Beimischung
TLg RGBW	RGBW- Mischung mit leuchtstoffkonvertierter weißer LED ($\lambda_{Peak\ blau}$=460nm)
TLr RGB	RGB Mischung (R: λ_{Peak}=642nm, G: λ_{Peak}=534nm, B: λ_{Peak}=447nm)
TLg RGB	RGB Mischung (R: λ_{Peak}=640nm, G: λ_{Peak}=525nm, B: λ_{Peak}=450nm)

Tab. 1: Überblick über Versuchssituationen V1-V7 und Versuchsparameter

In Versuchssituation V3 wurde die deutliche Lücke bei 480nm im Spektrum der Referenzlichtquelle TLr RGBW durch Beimischen des Spektrums einer Cyan-LED aufgefüllt und wiederum mit der Testlichtquelle TL RGBW verglichen.
Um die Abhängigkeit des Einflusses der Beobachterfeldgröße von der Spektralzusammensetzung der verglichenen Spektren abschätzen zu können, wurden in Versuchssituation V2 zwei RGB Spektren, mit geringer Abweichung im grünen Bereich, miteinander verglichen. Außerdem wurde ein „Worst-Case“-Szenario mit möglichst unterschiedlichen Spektren generiert, indem RGB-LEDs mit einer Amber-Cyan-Blau Mischung verglichen wurden.

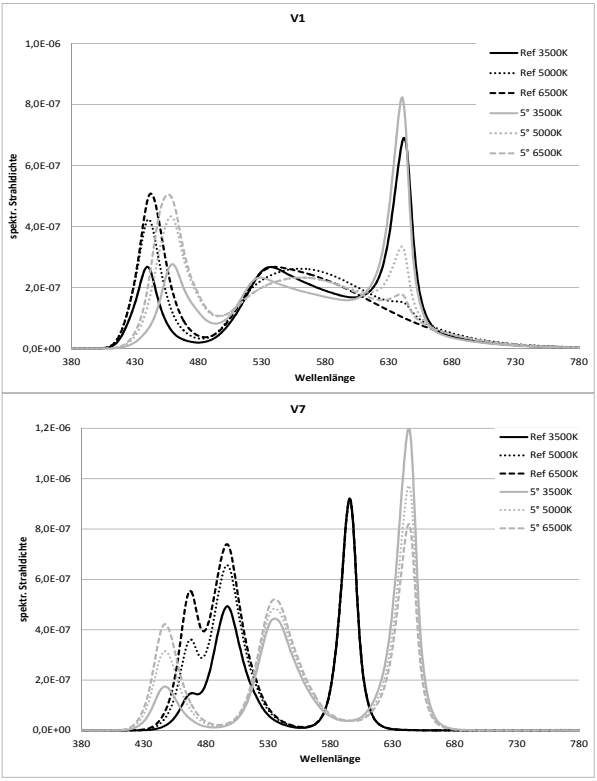

Abb. 2: Exemplarische Darstellung der Vergleichsspektren für Versuchssituation V1 und V7 bei 35000K, 5000K und 6500K

6. Ergebnisse

Aus den Spektren der Abgleiche wurden jeweils die Farbörter im u’v‘-Farbraum auf Basis der CIE-1931-, CIE-1964 und CIE-2006-Spektralwertfunktionen ermittelt. Zum einen wurden die $\Delta E_{u'v'(Ref)}$-Farbabstände zwischen den Mittelwerten der Probandenabgleiche und den Referenzspektren in den unterschiedlichen Systemen bewertet. Zum anderen wurden die Farbabstände $\Delta E_{u'v'(2°-10°)}$ zwischen den 2°-Feld-Abgleichen und 10°-Feld-Abgle ichen den visuellen Bewertungen gegenübergestellt.

Abhängig von der Versuchssituation weisen die Standardabweichungen der Ergebniscluster deutlich unterschiedliche Werte auf. Diese variieren zwischen 3*σ = 0,002 für Abgleiche bei Versuchssituation V2 mit Spektren geringer spektraler Unterschiede und 3*σ = 0,01 für Versuchssituation V7(siehe Abb. 3). Je größer die spektralen Unterschiede der zu vergleichenden Testlichtquellen sind, desto größer wird auch die Streuung und damit die Standardabweichung der Abgleichergebnisse. Dies ist auf die deutlichere Manifestierung individueller Unterschiede der Farbwahrnehmung der einzelnen Probanden zurückzuführen.

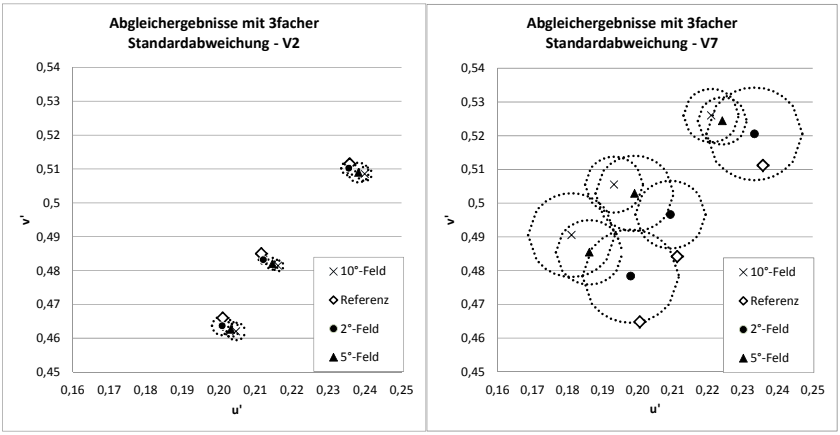

Abb. 3: Darstellung der Abgleichergebnisse mit 3facher Standardabweichung im u'v'-Farbraum (CIE-1931)

6.1 Farbabstand zur Referenz

Die unterschiedlichen Spektralwertfunktionen wurden für jeweils spezifische Beobachterfeldgrößen ermittelt. Daher wäre zu erwarten, dass die Farbabstände zwischen den abgeglichenen Test- und Referenzfeldern in den entsprechenden Systemen gleich Null werden. Beispielsweise sollten im Farbraum basierend auf den Spektralwertfunktionen von 1931 alle Abgleiche, welche unter einem 2°-Sehwinkel vor genommen werden auf denselben Farbort wie die Referenz abgebildet werden. Abb. 4 zeigt, dass dies nur in wenigen der Versuchssituationen tatsächlich der Fall ist. Größtenteils rutschen die Ergebnisse der modellierten Beobachterfeldgröße in den Bewertungssystemen näher an die Referenz als die Ergebnisse aus den anderen Abgleichen in anderen Beobachterfeldgrößen. Aus Abb.4 wird deutlich, dass die Farbabstände zur Referenz durch die Verwendung der CIE-2006-2°-Spektralwertfunktionen im Gegensatz zu denen von 1931 um mehr als die Hälfte reduziert werden können.
Je stärker sich die verglichenen Spektren in den Versuchssituationen voneinander unterscheiden, desto größer bleibt der Farbabstand zwischen Abgleichergebnis und Referenz. So bleibt auch bei Verwendung der neuen Spektralwertfunktionen ein maximaler Farbabstand von $\Delta E_{u'v'(Ref)}$=0,01 bestehen. Vergleicht man dies allerdings mit der Standardabweichung der Abgleichergebnisse (siehe oben), so stellt man fest, dass die Farbabstände der Abgleichergebnisse zur Referenz in derselben Größenordnung wie die 3fache Standardabweichung liegen. Die Metamerieeffekte beim Vergleich unterschiedlicher LED-Spektren werden demnach mit den CIE-2006-2°-Spektra lwertfunktionen gut modelliert.

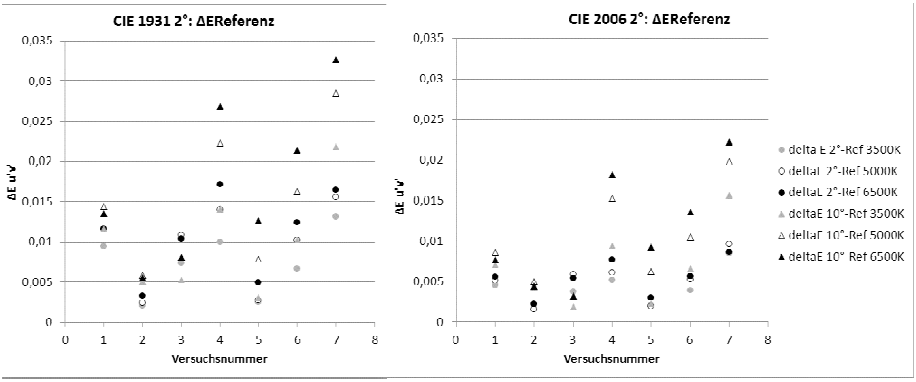

Abb. 4: Exemplarische Ergebnisse der Auswertung der Farbabstände $\Delta E_{u'v'(Ref)}$ der Abgleichwerte im 2° und 10° Feld zur Referenz, basierend auf den Spektralwertfunktionen von 1931 (links) und basierend auf den Spektralwertfunktionen ermittelt auf Grundlage der Sehzapfen-Grundfunktionen aus CIE170-1:2006 für das 2° Beobachterfeld (rechts)

6.2 Farbeindruck bei Beobachterfeldwechsel und Invertierungseffekt

Die wahrgenommene Farbdifferenz beim Wechsel zwischen 2°- und 10°-Beobachterfeld wurde zum einen messtechnisch ermittelt und zum anderen visuell bewertet. Trägt man die errechneten $\Delta E_{u'v'(2°-10°)}$ über alle Versuche (V1-V7) auf, so korrelieren diese Funktionen für alle verwendeten Spektralwertfunktionen (CIE-1931, CIE-1964, CIE-2006) signifikant (R=0,99). Diese Ergebnisse passen wiederum gut zu den subjektiven visuellen Bewertungen der Probanden.

Um die Signifikanz der Farbortverschiebung zwischen Farbabgleichen im 2°-, bzw. 10°-Feld und 5°-Feld beurteilen zu können, wurden für e ine Analyse dieser Verschiebung alle 5°-Abgleiche einer Versuchssituation auf den Nullpu nkt verschoben und dieser Verschiebevektor auch auf die 2°- und 10°-Abgleiche angewan dt (Abb. 5). Abb. 5 zeigt beispielhaft für Versuchssituation V3, V5 und V7 die Häufung der Abgleichergebnisse aller Probanden für die Farbverschiebung zwischen 2°- und 10°-Abgle ich. Es lässt sich deutlich erkennen, dass sich die 2°- und 10°-Abgleiche bei V7 eindeuti g voneinander trennen lassen, während die Abgleiche in V3 einen gemischten Cluster zeigen. Hier lässt sich keine eindeutige Zuordnung der Farbabgleiche erkennen. Bei V5 zeigt sich, dass bei 3500K keine Änderung der Farbwahrnehmung durch den Wechsel des Beobachterfeldes hervorgerufen wird, während die Abgleiche in den unterschiedlichen Feldgrößen bei den höheren Farbtemperaturen eindeutig zugeordnet werden können.

Bei den visuellen Bewertungen des 2°- und 10°-Felde s nach Abgleich im 5°-Beobachterfeld beschrieben die Probanden eindeutige Farbeffekte bei allen Versuchssituationen bis auf Versuchssituation V3. Abhängig von der spektralen Zusammensetzung der Referenzspektren und Testspektren kamen unterschiedlich stark ausgeprägte Farbeindrücke zustande. Wirkte die Referenzlichtquelle im 2°-Beobachterfeld grünlich, so wirkte im 10°-Beobachterfeld die Testlichtfläche grünlich ode r umgekehrt. Die Gegenfläche zur grünlichen Fläche wirkte für einige Probanden rötlich, andere Probanden beschrieben den Farbeindruck als weißlich. Allein Aufgrund der Beobachterfeldgröße wurde der Farbeindruck von Testfeld und Referenzfeld invertiert. Der stärkste Invertierungseffekt und damit auch der deutlichste Beobachterfeldgrößeneinfluss zeigte sich bei Versuchssituation V7. Abb. 6 veranschaulicht den Invertierungseffekt.

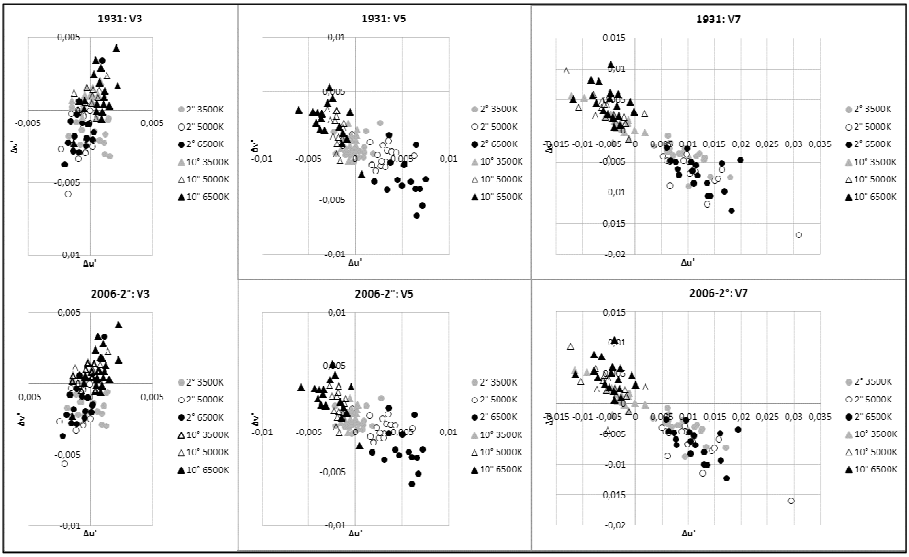

Abb. 5: Farbortverschiebungen der 2° und 10° Abglei che exemplarisch für Versuchssituationen V3, V5 und V7 dargestellt im u'v' Diagramm nach CIE-1931 (oben) und CIE-2006-2° (unten)

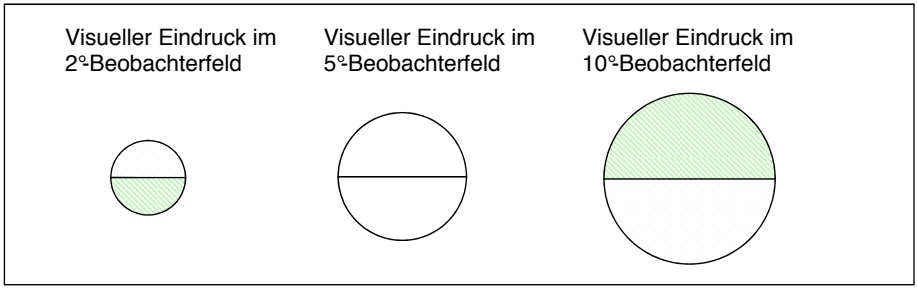

Abb. 6: Illustration des von den Probanden beschriebenen Invertierungseffekts (Schraffur stellt grünlich wahrgenommene Fläche dar)

7. Zusammenfassung und Diskussion

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass der Beobachterfeldgrößeneinfluss in allen Farbräumen basierend auf den unterschiedlichen bestehenden Spektralwertfunktionen gut modelliert wird. Mit den, in der CIE Schrift 170-1:2006 empfohlenen Spektralwertfunktionen können Metamerieeffekte bei definierter Beobachterfeldgröße für unterschiedlichste LED-Spektren gut modelliert werden. Abhängig von der spektralen Zusammensetzung ist die Streuung der individuellen Farbwahrnehmungen teils sehr groß. Dies macht eine genaue Bestimmung von Metamerie, bei einem Vergleich stark unterschiedlicher Spektren, für einen Normbeobachter sehr schwierig.

Zudem ist eine Definition metamerer Spektren nach diesen ersten Untersuchungen, abhängig von der Zusammensetzung des Spektrums, nur für definierte Beobachterfeldgrößen möglich. Aufgrund der deutlichen Verschiebungen der Farbwahrnehmung zwischen Betrachtung im 2° und im 10° Beobachterfeld muss fü r einige Anwendungen der LED-Beleuchtung besonderes Augenmerk auf die Spektralverteilung der verwendeten LEDs gelegt werden, um unerwünschte Farbeindrücke, zum Beispiel bei der Ausleuchtung großer homogener Flächen zu vermeiden. Hier muss die Abhängigkeit von der Beobachterfläche stärker berücksichtigt werden als bisher angenommen. Weitere Untersuchungen, welche die genauere Abhängigkeit des Beobachterfeldgrößeneinflusses von der spektralen Zusammensetzung der Vergleichsspektren zum Thema haben sollten folgen. Um dies genauer zu untersuchen und die verantwortlichen Wellenlängenbereiche exakt zu definieren, sollten weitere Testspektren mit gezielten Änderungen in kleinen Wellenlängenbereichen untersucht werden.

8. Literatur

/1/ Bieske K, Csuti P, Schanda J: *Colour appearance of metameric lights and possible colorimetric description.* CIE expert symposium on Visual Appearance, Paris, 2006

/2/ Csuti P, Schanda J, Petluri R, McGroddy K, Harbers G: *Improved color matching functions for better visual matching of LEDsources*. CIE 27th Session, Sun City/ZA, 2011