

Farbdiskrimination und Farbpräferenz aus Endnutzerperspektive: Ein Vergleich zwischen phosphor-konvertierten LED-Leuchtmitteln und Halogenbeleuchtung

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von

Sara Königs
aus Schwalmtal

Düsseldorf, September 2020

aus dem Institut für Experimentelle Psychologie
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Gedruckt mit der Genehmigung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Berichtersteller:

1. Prof. Dr. Axel Buchner

2. Prof. Dr. Susanne Mayr

Tag der mündlichen Prüfung: 15.12.2020

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	4
Abstract	5
Einleitung	6
Experiment 1	18
Experiment 2	22
Experiment 3	25
Experiment 4	28
Experiment 5	32
Allgemeine Diskussion	35
Literatur	41
Einzelarbeiten.....	49
Erklärung über den Eigenanteil an den in der Dissertation enthaltenen Einzelarbeiten.....	103
Erklärung an Eides Statt	105

Zusammenfassung

Der technologische Fortschritt führt dazu, dass klassische Halogenlampen zunehmend durch Lampen basierend auf Licht emittierenden Dioden (LEDs) ersetzt werden. LED-Lampen bieten flexible Konstruktionsmöglichkeiten und können Objektfarben unterschiedlich wirken lassen, wodurch die Farbwiedergabeeigenschaften von LED-Lampen nicht nur aus Sicht der Lampenhersteller, sondern auch aus Endnutzerperspektive ein zentrales Anliegen werden. Für den Hausgebrauch werden häufig phosphor-konvertierte LED-Lampen eingesetzt, die in der vorliegenden Dissertation in Bezug auf die Farbwiedergabeaspekte Farbdiskrimination (Experimente 1 bis 3) und Farbpräferenz (Experimente 4 und 5) mit Halogenbeleuchtung verglichen wurden. Hierzu wurde eine LED-Lampe als prototypischer Vertreter phosphor-konvertierter LED-Lampen identifiziert. Die Ergebnisse zeigten konsistent, dass sich die Farbdiskrimination – gemessen mit der in einem Farbsortieretest erzielten Farbdiskriminationsleistung – unter der prototypischen LED-Lampe nicht von der Farbdiskrimination unter Halogenbeleuchtung unterschied. Dies zeigte sich auch bei einer Variation der Brenndauer der prototypischen LED-Lampe (5000 Stunden), von der angenommen wurde, dass sie die Phosphor-Komponenten der Lampe verändern und somit die Wirkung von Objektfarben unter der Lichtquelle beeinflussen könnte, sowie bei der spezifischen Betrachtung der Farbdiskrimination im Rotbereich, in dem LED-Lampen Farben häufig nicht optimal darstellen können. Anders als für die Farbdiskrimination zeigte sich für die mittels eines Fragebogens erhobene Farbpräferenz ein Vorteil der Halogenbeleuchtung gegenüber der prototypischen LED-Lampe. Dieser Vorteil verschwand jedoch bei dem Vergleich mit einer von zwei hinsichtlich ihrer Farbwiedergabeeigenschaften optimierten LED-Lampen. Eindeutige Unterschiede zwischen den beiden optimierten LED-Lampen, die erklären würden, warum nur eine dieser beiden Lampen gleichermaßen wie Halogenbeleuchtung präferiert wird und die andere weniger, sind aus Endnutzerperspektive nicht ersichtlich.

Abstract

Technological progress leads to the increasing replacement of classic halogen lamps with lamps based on light emitting diodes (LEDs). LED lamps provide flexible design opportunities and different appearances of object colours which highlights the importance of the colour rendition properties of LED lamps from a lighting manufacturers' perspective as well as from an end users' perspective. For household lighting conditions, phosphor-converted LED lamps are frequently used. In the present studies, colour discrimination (Experiments 1–3) and colour preference (Experiments 4 and 5) were compared under phosphor-converted LED lamps and halogen lighting. For this purpose, a prototypical phosphor-converted LED lamp was identified. The results for the colour discrimination—obtained as the colour discrimination performance in a colour discrimination test—did not differ between the prototypical LED lamp and halogen lighting. This was also observed with an increased burning duration of the prototypical LED lamp (5000 hours). An increased burning duration was assumed to impair the phosphor components of the LED lamp and thus to influence the appearance of object colours. Furthermore, there was no difference in the colour discrimination performance between the prototypical LED lamp and halogen lighting regarding red hues. Red was focused here because it is known that LED lamps frequently show deficits in this colour range. In contrast to the results of the colour discrimination task, preference rankings obtained with a questionnaire were superior for halogen lighting compared to the prototypical LED lamp. This preference vanished when halogen lighting was compared to one of two LED lamps optimised for high colour rendition. From an end users' perspective, there are no obvious differences between the two optimised LED lamps which could account for the fact that one of them is evaluated equally favourably as halogen lighting while the other is less preferred than halogen lighting.

Einleitung

Der Anteil des Sehsinns an der menschlichen Wahrnehmung beträgt etwa 80 % (Hung et al., 2015) und spielt somit in unserem Leben eine entscheidende Rolle. Ein wesentlicher Aspekt der visuellen Wahrnehmung ist die Perzeption von Farben. Farben tragen dazu bei, dass wir Objekte schneller erkennen (Gegenfurtner & Rieger, 2000; Wurm et al., 1993) und besser erinnern können (Spence et al., 2006; Wichmann et al., 2002), im Gegensatz zu Darstellungen in schwarz-weiß. Dabei kann das Erscheinungsbild von Farben durch die Art des Lichtes beeinflusst werden (Fairchild, 2013). Neben Tageslicht haben elektrische Lichtquellen einen maßgeblichen Anteil an dem in unserem modernen Alltag verfügbaren Licht. Elektrische Lichtquellen, die für den Hausgebrauch konzipiert sind, lassen sich primär in drei Lampentypen einteilen: Halogenlampen, Kompaktleuchtstofflampen und Lampen basierend auf Licht emittierenden Dioden (LED-Lampen; de Souza et al., 2019). LED-Lampen stellen die derzeit effizienteste Art der Lichtgenerierung für Haushaltszwecke dar (Pattison et al., 2018). Die Effizienz einer Lampe kann über die Lichtausbeute quantifiziert werden, die definiert ist als das Verhältnis von Lichtstrom zu Stromverbrauch (Boyce, 2014) gemessen in Lumen pro Watt (lm/W). Moderne LED-Lampen können mit stetig zunehmender Tendenz eine Lichtausbeute von über 160 lm/W erzielen (Pattison et al., 2018), wohingegen Halogenlampen lediglich eine Lichtausbeute von etwa 20 lm/W erreichen (Boyce, 2014). Auf dem globalen Markt für Haushaltsbeleuchtung machten LED-Lampen im Jahr 2018 einen Anteil von 40 % aus und es wird erwartet, dass dieser Anteil bis zum Jahr 2030 auf 80 % steigen wird (International Energy Agency, 2019). Die hohe Effizienz, die lange Lebensdauer sowie die vielfältigen Möglichkeiten der technischen Weiterentwicklung machen LED-Lampen zur Lichtquelle der Zukunft (Pust et al., 2015) und somit zum Hauptgegenstand der vorliegenden Arbeit.

Entscheidend für das Erscheinungsbild von Farben ist die spektrale Energieverteilung der sie beleuchtenden Lichtquelle. Die spektrale Energieverteilung ist definiert als die Intensität der elektromagnetischen Strahlung, die pro Wellenlänge im sichtbaren Bereich des

elektromagnetischen Spektrums zwischen 380 und 780 nm emittiert wird (Boyce, 2014). Für die Farbwahrnehmung ist die spektrale Energieverteilung der Lichtquelle insofern relevant, als diese determiniert, wieviel Energie in welchem Bereich von Wellenlängen auf das Objekt trifft. Von den Objekteigenschaften wiederum hängt ab, welcher Anteil der von der Lichtquelle bereitgestellten Energie pro Wellenlänge reflektiert oder absorbiert wird. Die im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums reflektierte Strahlung gelangt schließlich zum Auge des Betrachters, wird vom visuellen System verarbeitet und in einen Farbeindruck umgewandelt (Houser et al., 2016). Farbe ist demnach das perzeptuelle Korrelat der spektralen Komposition des Lichtes (Webster, 1996), welches das Auge erreicht. Dabei erzeugen kurze Wellenlängen (um 450 nm) einen blauen, mittlere Wellenlängen (um 530 nm) einen grünen und lange Wellenlängen (oberhalb von 620 nm) einen roten Farbeindruck (Houser et al., 2016). Zwar liegt der genaue Farbeindruck im Auge des Betrachters, jedoch wird dieser von den physikalischen Eigenschaften von Objekten und Lichtquellen mitbestimmt (Fairchild, 2013). Dabei hat die beleuchtende Lichtquelle einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Wahrnehmung von Objektfarben (Boyce & Stampfli, 2019; Huang et al., 2018).

Die spektralen Energieverteilungen von LED-Lampen sind aufgrund ihres Konstruktionsprinzips divers. LED-Lampen für den Hausgebrauch können entweder als phosphorkonvertierte LED-Lampen oder als Multi-Chip-LED-Lampen oder als eine Kombination aus beiden Ansätzen konzipiert sein (Crawford, 2009). Phosphorkonvertierte LED-Lampen emittieren Licht durch die Kombination eines LED-Chips und einer Phosphor-Ummantelung. Dabei wird ein Teil der von dem LED-Chip abgegebenen kurzwelligen Strahlung (typischerweise blau, violett oder ultraviolett) durch die Phosphor-Ummantelung in mittlere bis lange Wellenlängen konvertiert (Boyce, 2014). Multi-Chip-LED-Lampen erzeugen Licht durch die Kombination mehrerer verschiedenfarbiger LED-Chips mit schmalbandigen spektralen Energieverteilungen in einer Lampe, klassischerweise rot, grün und blau (RGB-LED; Hunt et al., 2011). Für den Hausgebrauch werden gegenwärtig primär phosphorkonvertierte LED-Lampen eingesetzt (Emetere et al., 2019; Pattison et al., 2018), weshalb diese auch in den hier

vorgestellten Experimenten verwendet worden sind. Zu Gunsten der Energieeffizienz, die zur Farbwiedergabe in einem inversen Verhältnis steht (Davis & Ohno, 2009), fällt die abgegebene Energie am langwelligen Ende der spektralen Energieverteilung bei modernen LED-Lampen häufig gering aus (vergleiche Abbildung 1), wodurch Objektfarben stumpf wirken können (Ohno, 2005).

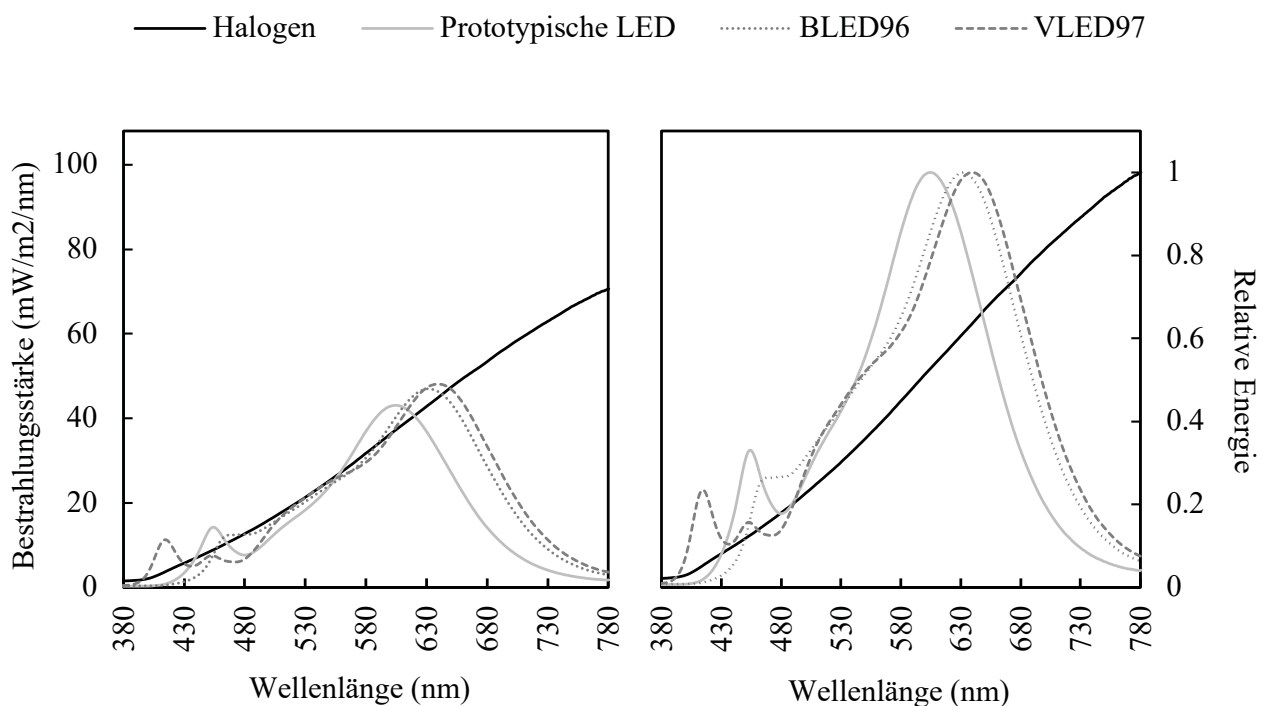


Abbildung 1. Bestrahlungsstärke (links) und relative Energie (rechts) der spektralen Energieverteilungen der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Halogenlampe (Experimente 1 bis 5), der prototypischen phosphor-konvertierten LED-Lampe (Experimente 1 bis 5) sowie der jeweils hinsichtlich ihrer Farbwiedergabeeigenschaften optimierten phosphor-konvertierten LED-Lampen BLED96 (Experiment 4) und VLED97 (Experiment 5).

Im Gegensatz zu LED-Lampen verfügen Halogenlampen über ein homogenes Konstruktionsprinzip und somit auch über homogene spektrale Energieverteilungen. Die Halogenlampe entspricht in ihrem Aufbau im Wesentlichen der klassischen Glühlampe. Beide emittieren Licht durch die Erhitzung eines Wolframdrahtglühfadens. Im Unterschied zu klassischen Glühlampen enthalten Halogenlampen darüber hinaus einen Zusatz aus Halogengas im Lampenkolben, welcher einen regenerativen Zyklus in Gang setzt (Wyszecki & Stiles,

1982). Dadurch werden die Lebensdauer der Lampe verlängert und die Lichtausbeute optimiert. Bei der Erhitzung des Wolframdrahtglühfadens wird Strahlung im gesamten Wellenlängenbereich des sichtbaren Spektrums abgegeben, so dass Halogen- und Glühlampen über eine kontinuierliche spektrale Energieverteilung (Guo & Houser, 2004) verfügen. Das exakte Spektrum hängt dabei von der Temperatur des Wolframdrahtglühfadens ab (Boyce, 2014).

Die Temperatur des Wolframdrahtglühfadens spiegelt sich in der Farbtemperatur in Kelvin (K) wider. Definiert wird die Farbtemperatur durch die Temperatur eines theoretischen Schwarzkörperstrahlers, der spektrale Emissionen ausschließlich in Form von Wärme abgibt (Boyce, 2014). Da die Farbtemperatur jedoch nur für Lichtquellen angegeben werden kann, deren spektrale Energieverteilungen derjenigen des Schwarzkörperstrahlers annähernd gleichen, was bei Halogenlampen der Fall ist, ist die Verwendung der korrelierten Farbtemperatur (CCT für englisch: *Correlated Colour Temperature*) gebräuchlicher. Die CCT ist definiert als die Temperatur desjenigen Schwarzkörperstrahlers, dessen wahrgenommene Farbe der Farbe des Lichts der jeweiligen Lampe am stärksten ähnelt (Wyszecki & Stiles, 1982). Dabei dient die CCT als Indikator dafür, ob das von einer nominell weißen Lichtquelle emittierte Licht eher „warm“ (gelblich; beispielsweise 2700 K) oder „kalt“ (bläulich; beispielsweise 17000 K) wirkt (Boyce, 2014). Mit steigender Temperatur verschiebt sich die spektrale Energieverteilung zunehmend von Strahlung im langwelligen zu Strahlung im kurzwelligen Bereich (Fairchild, 2013) und somit von warm zu kalt. Übliche Farbtemperaturen für Lichtquellen, die für den Hausgebrauch erhältlich sind, liegen zwischen 2700 K und 5000 K (Boyce, 2014). Je stärker der Wolframdrahtglühfaden in einer Halogenlampe erhitzt wird, desto kürzer ist seine Lebensdauer (Montoya et al., 2017). Entsprechend operieren Halogenlampen meist bei niedrigen Farbtemperaturen. Typischerweise liegt die CCT von Halogenlampen für den Hausgebrauch bei ungefähr 2700 K.

Die CCT liefert einen ersten groben Hinweis darüber, welchen Farbeindruck das Licht der zugehörigen Lichtquelle erzeugt. Jedoch liefert die CCT keine zuverlässigen Informationen über die Farbwiedergabeeigenschaften einer Lampe. Unter den Farbwiedergabeeigenschaften einer Lampe wird in der vorliegenden Arbeit der Einfluss der spektralen Energieverteilung einer spezifischen Lampe auf das Erscheinungsbild von Objektfarben verstanden (vergleiche Wei et al., 2015). Bei der Beurteilung der Farbwiedergabeeigenschaften einer Lampe sind mindestens drei entscheidende Aspekte zu berücksichtigen: Farbtreue, Farbdiskrimination und Farbpräferenz (Houser et al., 2013). Der Aspekt der Farbtreue wird traditionell durch den Farbwiedergabeindex $\text{CRI } R_a$ (CRI für englisch: *Colour Rendering Index*) abgebildet (Houser et al., 2013), wobei es sich um den bislang einzigen international anerkannten Farbwiedergabeindex handelt (Boyce & Stampfli, 2019). Der $\text{CRI } R_a$ beschreibt die mittlere Übereinstimmung des Erscheinungsbildes von acht schwach bis mittel gesättigten (englisch: *saturated*) Testfarben (R_1 bis R_8) unter einer bestimmten Lichtquelle (Testlichtquelle) im Vergleich zu einer Referenzlichtquelle (Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), 1995). Da die CCT einen Einfluss auf das Erscheinungsbild von Objektfarben haben kann (Houser et al., 2016; Huang et al., 2019; Pinto et al., 2008), wird sie bei der Wahl der Referenzlichtquelle berücksichtigt (Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), 1995). Bei Lichtquellen mit einer CCT unter 5000 K, was auf die meisten Lichtquellen für den Hausgebrauch zutrifft (Guo & Houser, 2004), dient ein Schwarzkörperstrahler mit vergleichbarer CCT als Referenz (Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), 1995). Der Maximalwert des $\text{CRI } R_a$ liegt bei 100 und wird dann erreicht, wenn die Testfarben unter der Testlichtquelle genauso wiedergegeben werden, wie es unter der Referenzlichtquelle der Fall ist. Mit zunehmendem Grad der Abweichung zwischen Test- und Referenzlichtquelle sinkt der Wert des $\text{CRI } R_a$. Aufgrund der ähnlichen spektralen Energieverteilungen von Schwarzkörperstrahlern und Halogenlampen erzielen Halogenlampen zumindest annähernd den maximalen $\text{CRI } R_a$ von 100. LED-Lampen erreichen hingegen häufig nur einen deutlich geringeren $\text{CRI } R_a$ von etwa 80

(Nardelli et al., 2017), was in der EU den gesetzlichen Mindestanforderungen entspricht (European Commission, 2009).

Seit seiner Einführung wurden zahlreiche Kritikpunkte am CRI R_a dokumentiert (siehe z. B. Davis & Ohno, 2005; Houser et al., 2016), die unter anderem beinhalten, dass die visuell wahrnehmbare Spanne von Objektfarben nicht adäquat abgedeckt wird. Dies hat bislang dazu geführt, dass diverse Indizes entwickelt wurden, die entweder als Ergänzung oder als Alternative zum CRI R_a konzipiert sind (für eine Übersicht siehe Houser et al., 2013). Im Zusammenhang mit Lampen, deren spektrale Energieverteilungen nur wenig Energie am langwelligeren Ende aufweisen, ist CRI R_9 als Index für gesättigtes Rot (Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), 1995) eine sinnvolle Ergänzung zum CRI R_a (Ohno, 2005). Eine zeitgemäße Alternative zum CRI R_a stellt der auf der ANSI/IES-TM-30-18-Methode basierende Farbtreuheit-Index R_f dar (Illuminating Engineering Society of North America, 2018), der an den von der CIE für Forschungszwecke vorgeschlagenen Farbtreuheit-Index (ebenfalls R_f) angepasst worden ist (Boyce & Stampfli, 2019). Für die Berechnung von R_f werden insgesamt 99 Testfarben verwendet, die das gesamte Farbspektrum abdecken, gesättigte Farben eingeschlossen (Illuminating Engineering Society of North America, 2018). In den USA ist R_f bereits als nationaler Standard anerkannt (Boyce & Stampfli, 2019; Illuminating Engineering Society of North America, 2018).

In Kombination mit R_f wird die Verwendung von R_g empfohlen, der ebenfalls auf der ANSI/IES-TM-30-18-Methode basiert (Illuminating Engineering Society of North America, 2018). R_g ist ein Gamut-Index, der den von einer Lichtquelle unter Berücksichtigung der Testfarben abgedeckten Farbraum (Gamut) quantifiziert. Er bildet ab, ob eine Lichtquelle die Buntheit (englisch: *chroma*) von Objektfarben im Vergleich zu einer Referenzlichtquelle verstärkt oder reduziert (Illuminating Engineering Society of North America, 2018). Verstärkt die Lichtquelle die Buntheit ($R_g > 100$), indiziert dies eine zunehmende Sättigung (englisch: *saturation*) der Objektfarben, wodurch diese zunehmend lebendiger wirken. Reduziert die

Lichtquelle die Buntheit ($R_g < 100$), indiziert dies eine abnehmende Sättigung der Objektfarben, wodurch diese zunehmend stumpfer wirken (David et al., 2015). Objektfarben, die besonders lebendig wirken, werden gegenüber stumpf wirkenden Objektfarben präferiert (Wei et al., 2014) – zumindest, sofern die Objektfarben nicht übersättigt sind (Wei & Houser, 2017). Entsprechend eignen sich Gamut-Indizes wie R_g als Prädiktoren für die Farbpräferenz (Feng et al., 2016; Feng et al., 2017; Royer, Wilkerson, et al., 2017; Teunissen et al., 2017; Wei & Houser, 2017; Wei et al., 2017). Dabei ist allerdings zu beachten, dass R_g einen Durchschnittswert über die in der ANSI/IES-TM-30-18-Methode enthaltenen Testfarben darstellt, so dass einzelne Farbbereiche damit nicht abgebildet werden können. Besonders wichtig in Bezug auf die Farbpräferenz ist das Ausmaß der Abdeckung des Rotbereiches (Royer, Wilkerson, et al., 2017; Teunissen et al., 2017; Wei et al., 2017). Für einzelne Farbbereiche lassen sich basierend auf der ANSI/IES TM-30-18 Methode separate numerische Schätzer bestimmen ($R_{cs,hi}$), welche die prozentualen Abweichungen in der Buntheit in einem bestimmten Farbbereich abbilden (Illuminating Engineering Society of North America, 2018). Für den Rotbereich relevant sind hier $R_{cs,h1}$ (Royer, Houser, et al., 2017; Royer, Wilkerson, et al., 2017) und $R_{cs,h16}$ (Esposito & Houser, 2018).

Obwohl der CRI R_a über Mängel verfügt und lediglich ein eindimensionaler Schätzer für die Farbtreue ist, weshalb er weder einen zuverlässigen Prädiktor für Farbdiskrimination (Boyce, 1976; Esposito & Houser, 2019; Rea & Freyssinier-Nova, 2008; Royer et al., 2012; Thornton, 1972) noch für Farbpräferenz (Baniya et al., 2015; Dangol et al., 2013; Islam et al., 2013; Jost-Boissard et al., 2009; Royer, Wilkerson, et al., 2017; Smet et al., 2011) darstellt, ist CRI R_a nach wie vor das einzige Maß für die Farbwiedergabeeigenschaften einer Lampe, welches herstellerseitig auf Leuchtmittelverpackungen angegeben wird und somit für den Endnutzer verfügbar ist (Rea et al., 2004). Teilweise ist CRI R_9 neben CRI R_a auf Leuchtmittelverpackungen zu finden. Aus diesem Grund wurden CRI R_a und CRI R_9 auch in der vorliegenden Arbeit berücksichtigt. Zusätzlich wurden Maße basierend auf der ANSI/IES-TM-30-18-Methode einbezogen, die besonders im Hinblick auf die Farbpräferenz wichtige Hinweise

liefern. Die mit einem Gossen-Mavospec-Base-Spektrometer (Gossen Foto- und Lichtmesstechnik GmbH, Nürnberg, Deutschland) gemessenen farbmtrischen Eigenschaften der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Leuchtmittel sind in Tabelle 1 dargestellt. Da der Fokus in der vorliegenden Arbeit auf empirischen Nutzertests für kommerziell erhältliche Leuchtmittel liegt, die für den Hausgebrauch konzipiert wurden, ist jedoch anzumerken, dass hier aufgrund der limitierten Anzahl verwendeter Lampentypen keine systematische Evaluierung der aus der spektralen Energieverteilung abgeleiteten Indizes vorgenommen werden konnte.

Tabelle 1: Farbmtrische Eigenschaften der in den Experimenten 1 bis 5 verwendeten Lampen.

Lampentyp	Experiment	CIE 13.3-1995 CRI		ANSI/IES TM-30-18				CCT (K)
		R_a	R_9	R_f	R_g	$R_{cs,h1}$	$R_{cs,h16}$	
Halogen	1 bis 5	100	99	99	99	0 %	0 %	2750
LED	1 bis 5	81	6	84	95	-12 %	-10 %	2697
BLED96	4	96	75	91	96	-3 %	-3 %	2722
VLED97	5	97	91	92	102	-1 %	-2 %	2605

Anmerkung: LED = prototypische phosphor-konvertierte LED-Lampe mit einem CRI R_a von 81, BLED96 = phosphor-konvertierte LED-Lampe mit einem blauen LED-Chip und einem CRI R_a von 96, VLED97 = phosphor-konvertierte LED-Lampe mit einem violetten LED-Chip und einem CRI R_a von 97, R_a = CIE Allgemeiner Farbwiedergabeindex, R_9 = CIE Spezieller Farbwiedergabeindex für gesättigtes Rot, R_f = IES Farbtreue-Index, R_g = IES Gamut-Index, $R_{cs,h1}$ und $R_{cs,h16}$ = IES Buntheit-Abweichung für Rotbereiche, CCT = korrelierte Farbtemperatur in Kelvin.

Neben der Farbtreue ist, wie oben bereits erwähnt, auch die Farbdiskrimination ein wichtiger Aspekt zur Beurteilung der Farbwiedergabeeigenschaften einer Lampe (Houser et al., 2013). Bezogen auf eine Lampe ist Farbdiskrimination definiert als die Fähigkeit der jeweiligen Lampe, kleinste Unterschiede in simultan dargebotenen Farbton-Nuancen für den Betrachter sichtbar zu machen (Thornton, 1972). Zur direkten Ermittlung der

Farbdiskrimination unter einer spezifischen Lampe werden häufig Tests eingesetzt, in denen die Testpersonen graduelle Farbabstufungen zwischen Farbproben erkennen müssen. Dabei dient die Farbdiskriminationsleistung der Testpersonen auf Gruppenebene als Indikator für die Farbdiskrimination unter der jeweiligen Lampe. Bisherige Befunde konnten zeigen, dass die Farbdiskriminationsleistung unter Halogenbeleuchtung besser ist als unter Kompaktleuchtstofflampen (Mayr et al., 2013) und RGB-LED Lampen (Mahler et al., 2009; Royer et al., 2012; Veitch et al., 2014). Unter komplexen LED-Clustern (bestehend aus diversen LED-Chip und Phosphor Kombinationen) kann die Farbdiskriminationsleistung jedoch mit Halogenbeleuchtung vergleichbar ausfallen (Veitch et al., 2014). Die Frage, ob sich die Farbdiskrimination unter für den Hausgebrauch konzipierten phosphor-konvertierten LED-Lampen von der Farbdiskrimination unter Halogenbeleuchtung unterscheidet und ob sich die entsprechenden Ergebnisse auch in der Farbpräferenz widerspiegeln, blieb bislang unbeantwortet und soll in der vorliegenden Arbeit eingehend betrachtet werden.

Der letzte Aspekt zur Beurteilung der Farbwiedergabeeigenschaften einer Lampe ist die Farbpräferenz (Houser et al., 2013). Die Farbpräferenz bezieht sich auf die Fähigkeit einer spezifischen Lampe, Objektfarben auf einer bestimmten Dimension in bevorzugter Weise darzustellen. Zu den betrachteten Dimensionen zählen neben der Präferenz oder auch Attraktivität im engeren Sinne (Smet et al., 2011), die Angenehmheit (Houser et al., 2013), die Natürlichkeit (Bodrogi et al., 2013) sowie die Lebendigkeit der Farben (Bodrogi et al., 2013; Houser et al., 2013). In den bisherigen Studien zur Farbpräferenz unter LED-Beleuchtung wurden vielfältige LED-Cluster bestehend aus diversen LED-Chip-Kombinationen eingesetzt (Dangol et al., 2013; Dangol et al., 2015; Islam et al., 2013; Jost-Boissard et al., 2015; Jost-Boissard et al., 2009; Royer, Wilkerson, et al., 2017; Teunissen et al., 2017). Aus den Ergebnissen dieser Studien lässt sich mehrheitlich entnehmen, dass das Vorhandensein von langwelligem Licht für Präferenzurteile vorteilhaft ist (Jost-Boissard et al., 2015; Jost-Boissard et al., 2009; Royer, Wilkerson, et al., 2017; Teunissen et al., 2017). Belastbare

Schlussfolgerungen für einzelne Lampentypen lassen sich aufgrund der Diversität der spektralen Energieverteilungen der untersuchten Beleuchtungsbedingungen nicht ableiten.

Auch die spektralen Energieverteilungen der für den Hausgebrauch konzipierten, kommerziell erhältlichen phosphor-konvertierten LED-Lampen können aufgrund unterschiedlicher spektraler Eigenschaften der verbauten Phosphor-Komponenten und LED-Chips divers sein. Entsprechend musste für die vorliegende Studie zunächst eine LED-Lampe identifiziert werden, die als prototypischer Vertreter der für den Hausgebrauch konzipierten, kommerziell erhältlichen phosphor-konvertierten LED-Lampen gelten kann. Erstens sollte die CCT der prototypischen LED-Lampe der CCT der als Referenz eingesetzten Halogenbeleuchtung bestmöglich entsprechen, die bei für Halogenlampen typischen 2700 K lag. Zweitens sollte die prototypische LED-Lampe einen CRI R_a von etwa 80 aufweisen, was charakteristisch ist für die meisten kommerziell für den Hausgebrauch erhältlichen LED-Lampen (Nardelli et al., 2017). Drittens und letztens sollte die spektrale Energieverteilung der prototypischen LED-Lampe der repräsentativen spektralen Energieverteilung für LED-basierte Lichtquellen mit 2700 K gemäß Kokka et al. (2018) entsprechen. Für die Quantifizierung der Übereinstimmung zwischen der spektralen Energieverteilung der prototypischen LED-Lampe und der repräsentativen spektralen Energieverteilung (Kokka et al., 2018) wurde ein Anpassungskoeffizient (GFC für englisch: *Goodness of Fit Coefficient*) berechnet (Romero et al., 1997). Der Wertebereich des GFC liegt zwischen 0 und 1, wobei 1 vollständige Übereinstimmung indiziert (Hernández-Andrés et al., 2001; Romero et al., 1997). Hier zeigte der $GFC = .999$ eine hohe Übereinstimmung.

In den Experimenten 1 bis 3 wurde die Farbdiskrimination unter der prototypischen LED-Lampe mit der Farbdiskrimination unter Halogenbeleuchtung verglichen. Installiert wurden die unterschiedlichen Lampentypen einzeln in gegen externe Lichteinflüsse abgeschirmten Kammern. Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 2 in Königs et al. (2019) dargestellt. Die Daten der Testpersonen wurden nur berücksichtigt, sofern sie über ein

normales Farbsehvermögen verfügten, was mit dem Ishihara-Test für Farbblindheit (Ishihara, 1972) verifiziert wurde. Zur Ermittlung der Farbdiskrimination wurde der Farnsworth-Munsell 100-Hue Test (im Folgenden Farbsortiertest; Farnsworth, 1957) verwendet. Der Farbsortiertest enthält insgesamt 85 Farbkappen verteilt auf vier Farbreihen. Zwischen den Farbkappen bestehen graduelle Unterschiede im Farbton und die Aufgabe der Testpersonen ist es, die Farbkappen entlang eines Farbgradienten in eine Reihenfolge zu bringen. Orientierung bieten dabei die fixierte Start- und Endkappe, die je Farbreihe vorgegeben sind. Vertauschungen der zu sortierenden Farbkappen werden als Fehler gewertet. Der Farbsortiertest beinhaltet eine rot-grüne, eine grün-blaue, eine blau-violette und eine violett-rote Farbreihe. Ursprünglich wurde der Farbsortiertest für die Verwendung unter einer standardisierten Testbeleuchtung (Illuminant C) konzipiert und diente dazu, Personen mit eingeschränkter Farbdiskriminationsfähigkeit zu identifizieren. Jedoch wurde der Farbsortiertest in der Vergangenheit bereits vielfach für den Vergleich der Farbdiskrimination unter verschiedenen Beleuchtungsquellen eingesetzt, wobei die Farbdiskriminationsleistung im Farbsortiertest als Indikator für die Farbdiskrimination diente (Boyce & Simons, 1977; Mayr et al., 2013; Rea & Freyssinier-Nova, 2008; Royer et al., 2012). Zu diesem Zweck wurde die Verwendung eines lampenspezifischen, adjustierten Fehlerwertes vorgeschlagen (Esposito, 2019; Esposito & Houser, 2019), der in den Experimenten 1 bis 3 für die Analyse der Daten verwendet worden ist. Zur Erleichterung der Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen älterer Studien wurde zusätzlich der originale Fehlerwert (Farnsworth, 1957) für die Analyse der Daten eingesetzt, der im Wesentlichen parallele Ergebnisse lieferte und daher in den Experimenten 1 bis 3 nicht gesondert berichtet wird.

Bei der originalen Verteilung der Farbkappen auf die vier Reihen im Farbsortiertest werden die roten und grünen Farbkappen innerhalb einer Reihe präsentiert. Aus klinischer Perspektive hat diese Anordnung den Nutzen, dass Personen mit einer verminderten Diskriminationsfähigkeit von roten und grünen Farben identifiziert werden können. Dies hat jedoch zur Folge, dass die roten Farbkappen über zwei Farbreihen verteilt sind: Die rot-grüne und

die violett-rote Farbreihe. Durch die Verteilung der roten Farbkappen auf zwei verschiedene Farbreihen können nicht alle roten Farbkappen direkt miteinander verglichen werden, wodurch die Anzahl der möglichen Vertauschungen innerhalb roter Farbtöne reduziert wird. Es besteht folglich die Möglichkeit, dass der Farbsortiertest mit der originalen Anordnung der Farbkappen nicht sensitiv für die Farbdiskriminationsleistung innerhalb roter Farbtöne ist. Die Erfassung der Farbdiskriminationsleistung innerhalb roter Farbtöne könnte besonders relevant sein bei Lichtquellen, die über keinen oder nur einen geringen Anteil elektromagnetischer Strahlung oberhalb von 620 nm verfügen und rote Farbtöne somit nicht optimal wiedergeben, wie es beispielsweise bei LED-Lampen der Fall sein kann (Ohno, 2005). Um dies zu prüfen wurde der Farbsortiertest für Experiment 3 modifiziert mit dem Ziel, den direkten Vergleich zwischen den roten Farbtönen zu ermöglichen. Hierzu wurde die Zuordnung der Farbkappen zu den Farbreihen so modifiziert, dass alle roten Farbkappen in einer Farbreihe, der roten Farbreihe präsentiert worden sind. Die Reihenfolge der Farbkappen wurde dabei nicht verändert.

Da Farbdiskrimination lediglich einen Aspekt der menschlichen Farbwahrnehmung abdeckt, wurde in den Experimenten 4 und 5 die subjektive Präferenz für Objektfarben unter verschiedenen Lampentypen näher untersucht. Dabei wurde auch der laufende technologische Fortschritt von für den Hausgebrauch konzipierten LED-Lampen berücksichtigt. Entsprechend wurde neben Halogenbeleuchtung und der prototypischen LED-Lampe je Experiment eine hinsichtlich der Farbwiedergabeeigenschaften verbesserte LED-Lampe betrachtet. Wie in den Experimenten 1 bis 3 wurde auch hier das Vorhandensein eines normalen Farbsehvermögens mit Hilfe des Ishihara-Tests für Farbblindheit (Ishihara, 1972) sichergestellt. Für einen direkten Vergleich wurden die drei Lampentypen in benachbarten Boxen installiert, die eine flache weiße Schale mit verschiedenen Gemüse- und Obstsorten enthielten. Der Versuchsaufbau ist Abbildung 2 in Königs et al. (2020b) zu entnehmen. Die Präferenzurteile wurden mit Hilfe eines Fragebogens auf den Dimensionen Angenehmheit der beleuchteten Szene, Natürlichkeit der Farben der beleuchteten Objekte (Gemüse und Obst)

sowie Kaufpräferenz für die jeweilige Lampe vorgenommen. Subjektive Präferenzurteile für die Lebendigkeit der Farben wurden nicht separat erfasst, da angenommen wurde, dass dieser Aspekt der Farbwiedergabeeigenschaften einer Lampe hinreichend durch R_g (siehe Tabelle 1) abgebildet wird.

Experiment 1

Das Aussehen von farbigen Objekten wird durch die Lichtquelle mitbestimmt (Fairchild, 2013). Die Lichtquelle kann somit auch einen Einfluss auf die Unterscheidbarkeit von Farbtönen haben. Dabei spielt neben dem Lampentyp auch die Beleuchtungsstärke eine Rolle. Bezogen auf den Lampentyp sollte die Farbdiskriminationsleistung in einem Farbsortieretest unterschiedlich ausfallen, sofern die Unterschiede in der spektralen Energieverteilung der miteinander verglichenen Leuchtmittel groß genug sind. In Experiment 1 wurde untersucht, ob sich die Farbdiskriminationsleistung unter einer prototypischen LED-Lampe (Osram LED Star Classic A, 8 W, Osram GmbH, Augsburg, Deutschland) von der Farbdiskriminationsleistung unter klassischer Halogenbeleuchtung (Osram Halogen Classic A, 57 W) unterscheidet. Dabei wurde zur Erfassung der Farbdiskriminationsleistung sowohl die Fehleranzahl in einem Farbsortieretest als auch die zur Sortierung benötigte Zeit betrachtet. Im Vergleich zur Halogenbeleuchtung weist die prototypische LED-Lampe kein kontinuierliches Spektrum auf, sondern einen schmalen Peak bei 455 nm und einen breiten Peak bei 604 nm (siehe Abbildung 1). Unter der Annahme, dass ein kontinuierliches Spektrum die optimalen Voraussetzungen bietet Objektfarben des gesamten Farbspektrums darzustellen, sollte die Farbdiskriminationsleistung unter der Halogenbeleuchtung besser ausfallen als unter der prototypischen LED-Lampe – zumindest sofern die Unterschiede der spektralen Energieverteilungen groß genug sind.

Für eine gute Farbdiskriminationsleistung ist ein ausreichendes Lichtniveau, welches üblicherweise als Beleuchtungsstärke (lx) gemessen in Lumen pro Quadratmeter angegeben

wird, unabdingbar. Die empfohlene Beleuchtungsstärke für den Farbsortiertest liegt nach Farnsworth (1957) bei 270 lx oder mehr. Beleuchtungsstärken, die unterhalb dieser Empfehlung liegen, können mit einer schlechteren Farbdiskriminationsleistung einhergehen (Bowman & Cole, 1980; Farnsworth, 1957; Knoblauch et al., 1987; Mayr et al., 2013). Zusätzlich zum Lampentyp wurde in Experiment 1 die Beleuchtungsstärke systematisch variiert, um einen möglichen Interaktionseffekt zwischen dem Lampentyp und der Beleuchtungsstärke identifizieren zu können. Analog zu Mayr et al. (2013) wurde sowohl für die Halogenbeleuchtung als auch für die prototypische LED-Lampe eine dunkle Bedingung mit einer Beleuchtungsstärke von 70 lx und eine helle Bedingung mit einer Beleuchtungsstärke von 800 lx realisiert. Unter der Annahme, dass die dunkle Bedingung mit 70 lx für die Farbdiskriminationsaufgabe eine suboptimale Beleuchtungsstärke bietet, sollte die Farbdiskriminationsleistung unabhängig von dem Lampentyp in der Bedingung mit einer Beleuchtungsstärke von 70 lx schlechter ausfallen als in der Bedingung mit einer Beleuchtungsstärke von 800 lx. Die deskriptiven Statistiken für die Fehleranzahl und für die zur Sortierung benötigte Zeit sind in Abbildung 2 dargestellt. Für alle im Folgenden berichteten Mehrfachvergleiche (auch in den Experimenten 3, 4 und 5) werden Bonferroni-Holm (Holm, 1979) korrigierte kritische Alpha-Niveaus in Klammern angegeben.

Die Ergebnisse zeigten keinen Unterschied in der Farbdiskriminationsleistung zwischen der Halogenbeleuchtung und der prototypischen LED-Lampe, weder im Hinblick auf die Fehleranzahl im Farbsortiertest [$F(1, 140) = 2.20, p = .14, \eta_p^2 = 0.02$], noch auf die zur Sortierung benötigte Zeit [$F(1, 139) = 0.03, p = .86, \eta_p^2 < 0.01$]. Wie erwartet zeigte sich jedoch eine bessere Farbdiskriminationsleistung bei einer Beleuchtungsstärke von 800 lx im Vergleich zu einer Beleuchtungsstärke von 70 lx, die sich sowohl in einer kleineren Fehleranzahl [$F(1, 140) = 8.51, p < .01, \eta_p^2 = 0.06$], als auch in einer kürzeren zur Sortierung benötigten Zeit [$F(1, 139) = 8.12, p < .01, \eta_p^2 = 0.06$] äußerte. Eine Interaktion zwischen dem Lampentyp und dem Level der Beleuchtungsstärke ergab sich weder für die Fehleranzahl im Farbsortiertest [$F(1,$

140) = 0.33, $p = .57$, $\eta_p^2 < 0.01$], noch für die zur Sortierung benötigte Zeit [$F(1, 139) = 2.46$, $p = .12$, $\eta_p^2 = 0.02$].

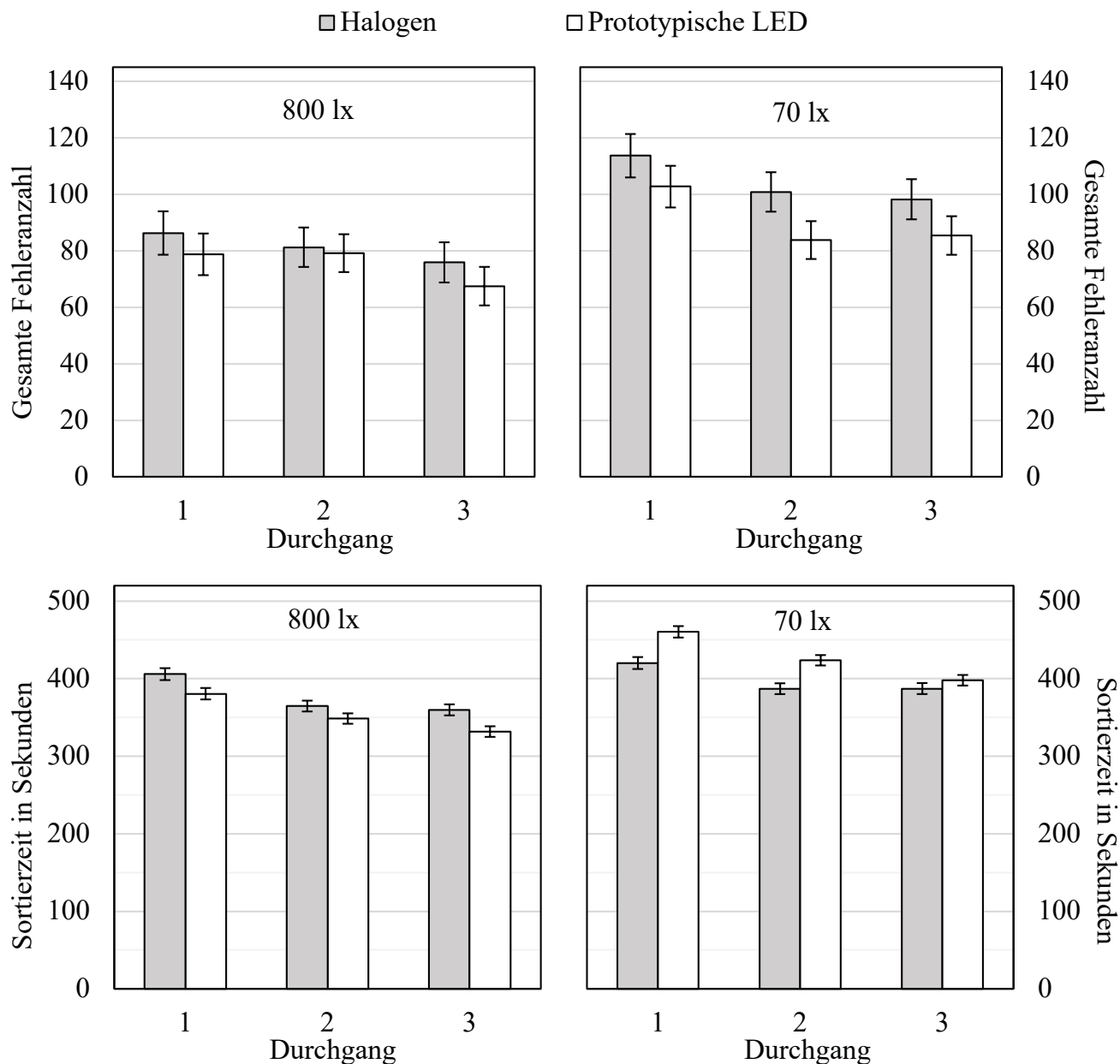


Abbildung 2. Gesamte Fehleranzahl (oben) und Sortierzeit (unten) im Farbsortiertest für die Halogenlampe mit einem CRI R_a von 100 und die prototypische phosphor-konvertierte LED-Lampe mit einem CRI R_a von 81 in Experiment 1 bei Beleuchtungsstärken von 800 lx (links) und 70 lx (rechts). Die Fehlerbalken repräsentieren die Standardfehler der Mittelwerte.

Darüber hinaus wurde in Experiment 1 untersucht, inwiefern Übungseffekte einen Einfluss auf die Farbdiskriminationsleistung haben können. Die bisherige Befundlage für das

Vorhandensein eines Übungseffektes im Farbsortiertest ist gemischt. Während einige Studien einen Übungseffekt nachweisen konnten (Farnsworth, 1957; Fine & Kobrick, 1980), fand sich in anderen Studien kein Übungseffekt (Anderson & Johnston, 2015; Boyce & Simons, 1977). Die belastbarsten Ergebnisse stammen in diesem Zusammenhang von Farnsworth (1957), da hier mit $N = 196$ Teilnehmenden die größte Stichprobe erhoben worden ist (alle anderen $N < 37$) und große Stichproben tendenziell den wahren Populationswert genauer abbilden als kleine Stichproben. Unabhängig davon, ob in den genannten Studien ein Übungseffekt im Farbsortiertest gefunden werden konnte oder nicht, wurde in keiner der genannten Studien untersucht, ob sich ein Übungseffekt auch über verschiedene Lampentypen und Beleuchtungsstärken hinweg zeigen lässt. Dies sollte in Experiment 1 zusätzlich untersucht werden. Zu diesem Zweck wurde der Farbsortiertest unter identischer Beleuchtungsbedingung je Testperson dreimal wiederholt. Sofern ein Übungseffekt bei dem Farbsortiertest eine Rolle spielt, sollten sich die Fehleranzahl sowie die zur Sortierung benötigte Zeit im Farbsortiertest mit zunehmender Wiederholung insgesamt reduzieren. Genau dies zeigte sich in einem signifikanten Haupteffekt für den Testdurchgang [Fehleranzahl: $F(2, 139) = 14.62, p < .01, \eta_p^2 = 0.17$; Zeit: $F(2, 138) = 31.06, p < .01, \eta_p^2 = 0.31$]. Vom ersten zum zweiten Durchgang nahmen sowohl die Fehleranzahl im Farbsortiertest [$F(1, 140) = 12.33, p < .01 (\alpha = .025), \eta_p^2 = 0.08$] als auch die zur Sortierung benötigte Zeit [$F(1, 139) = 53.19, p < .01 (\alpha = .025), \eta_p^2 = 0.28$] ab. Vom zweiten zum dritten Durchgang reduzierten sich die Fehleranzahl im Farbsortiertest [$F(1, 140) = 5.64, p < .05 (\alpha = .050), \eta_p^2 = 0.04$] und die zur Sortierung benötigte Zeit [$F(1, 139) = 9.73, p < .01 (\alpha = .050), \eta_p^2 = 0.07$] weiter. Es zeigten sich jedoch auch signifikante Interaktionen zwischen dem Testdurchgang und dem Lampentyp für die Zeit [$F(2, 138) = 3.14, p < .05, \eta_p^2 = .04$] sowie zwischen dem Testdurchgang und der Beleuchtungsstärke für die Fehleranzahl [$F(2, 139) = 4.23, p < .05, \eta_p^2 = 0.07$]. Letzteres impliziert, dass der Übungseffekt über verschiedene Lampentypen und Beleuchtungsstärken nicht gleichmäßig war.

Die Untersuchung der Farbdiskriminationsleistung zeigte, dass die Testpersonen die Farben im Farbsortiertest unter Halogenbeleuchtung und unter der prototypischen LED-Lampe gleich gut unterscheiden konnten. Folglich ist anzunehmen, dass die Abweichung in der spektralen Energieverteilung zwischen der prototypischen LED-Lampe und der Halogenbeleuchtung nicht groß genug ist, um die Diskriminierbarkeit von Farben zu beeinflussen. Was jedoch die Farbdiskriminationsleistung in dem Farbsortiertest beeinflusste, war die Beleuchtungsstärke. Hier zeigte sich hypothesenkonform, dass die Farbdiskriminationsleistung bei einer Beleuchtungsstärke von 800 lx unabhängig vom verwendeten Lampentyp besser war als bei einer Beleuchtungsstärke von 70 lx. Ebenso wurde die Farbdiskriminationsleistung durch die Häufigkeit der Durchführung des Farbsortiertests beeinflusst. Dabei zeigte sich ein Übungseffekt für den verwendeten Farbsortiertest über die drei Testdurchgänge. Der Rückgang in der Fehleranzahl und in der zur Sortierung benötigten Zeit war vom ersten zum zweiten Durchgang größer als vom zweiten zum dritten Durchgang, was sich mit den Befunden von Farnsworth (1957) deckt. Bei der Anwendung des Farbsortiertests sollte daher der Grad der Expertise auf Seiten der Testpersonen berücksichtigt werden. Andernfalls könnte es zu Ergebnisverzerrungen kommen. Dies ist besonders dann relevant, wenn orthogonal zum Testdurchgang weitere Variablen wie der Lampentyp oder die Beleuchtungsstärke variiert werden. Testpersonen, die bereits an Experiment 1 teilgenommen hatten, wurden daher von der Teilnahme an den Experimenten 2 und 3, in denen ebenfalls der Farbsortiertest eingesetzt worden ist, ausgeschlossen.

Experiment 2

Gegenüber herkömmlichen Halogenleuchtmitteln zeichnen sich LED-Lampen durch eine besonders lange Lebensdauer aus (Pust et al., 2015). Während die lichttechnischen Eigenschaften der in LED-Lampen verbauten Leuchtdioden über die Lebensdauer der Lampe in der Regel unverändert bleiben, können die Phosphor-Komponenten einem Alterungsprozess unterliegen. Mit zunehmender Brenndauer kann es so zu Veränderungen in der

spektralen Energieverteilung von phosphor-konvertierten LED-Lampen kommen, die sich in früheren Untersuchungen bei einer Brenndauer von 5000 Stunden sichtbar zeigten (Hunt, Quintero, & Carreras, 2011).

Ein möglicher Einfluss der Brenndauer der auch in Experiment 1 verwendeten prototypischen LED-Lampe auf die Farbdiskriminationsleistung sollte in Experiment 2 untersucht werden. Hierzu wurde die prototypische LED-Lampe vor dem Experiment einer kontinuierlichen Brenndauer von 5000 Stunden ausgesetzt (im Folgenden prototypische LED-alt). Die prototypische LED-alt sollte mit einer prototypischen LED-Lampe ohne Brenndauer vor dem Experiment (im Folgenden prototypische LED-neu) sowie mit Halogenbeleuchtung hinsichtlich der Farbdiskriminationsleistung verglichen werden. Sofern die Brenndauer Änderungen in der spektralen Energieverteilung der prototypischen LED-Lampe zur Folge hat, besteht die Möglichkeit, dass sich die Farbdiskriminationsleistung zwischen der prototypischen LED-neu und der prototypischen LED-alt signifikant voneinander unterscheidet. Wie in Experiment 1 sollte sich die Farbdiskriminationsleistung unter der prototypischen LED-neu nicht von der Farbdiskriminationsleistung unter Halogenbeleuchtung unterscheiden. Zur Erfassung der Farbdiskriminationsleistung wurde in Experiment 2 die Fehleranzahl im Farbsortiertest herangezogen. Anders als in Experiment 1 wurde jedoch nicht die gesamte Fehleranzahl im Farbsortiertest in die statistische Analyse mit einbezogen, sondern die partielle Fehleranzahl je Farbreihe. Dies ermöglicht eine differenziertere Betrachtung einzelner Farbbereiche. Die deskriptiven Statistiken hierzu sind in Abbildung 3 dargestellt.

Anders als aufgrund der bisherigen Forschungslage erwartet, zeigten die Messergebnisse nahezu identische Verläufe der spektralen Energieverteilungen der prototypischen LED-alt und der prototypischen LED-neu ($GFC = .999$ nach Romero et al., 1997). Um zu überprüfen, ob eventuell sogar sehr kleine Veränderungen der spektralen Energieverteilung einen Einfluss auf die Farbdiskriminationsleistung haben können, wurde zunächst die Farbdiskriminationsleistung unter der prototypischen LED-alt mit der Farbdiskriminationsleistung unter

der prototypischen LED-neu verglichen. Dabei zeigte sich kein Unterschied zwischen der prototypischen LED-alt und der prototypischen LED-neu [$F(1, 156) = 0.11, p = .74, \eta_p^2 < 0.01$]. Aus diesem Grund wurden die prototypische LED-alt und die prototypische LED-neu für die folgenden Analysen zu einer Bedingung (prototypische LED-Lampe) zusammengefasst und mit Halogenbeleuchtung verglichen. Wie in Experiment 1 zeigte sich kein Haupteffekt für den Lampentyp [$F(1, 236) = 0.07, p = .79, \eta_p^2 < 0.01$]. Für den zusätzlichen berücksichtigten Faktor Farbreihe zeigte sich jedoch ein signifikanter Haupteffekt im Farbsortiertest [$F(3, 234) = 196.71, p < .01, \eta_p^2 = 0.72$]. In der rot-grünen und der violett-roten Farbreihe war die Fehleranzahl vergleichbar und kleiner als in den übrigen Farbreihen (die detaillierten Ergebnisse sind zu finden in Königs et al., 2020a, Tabelle 3, Experiment 1).

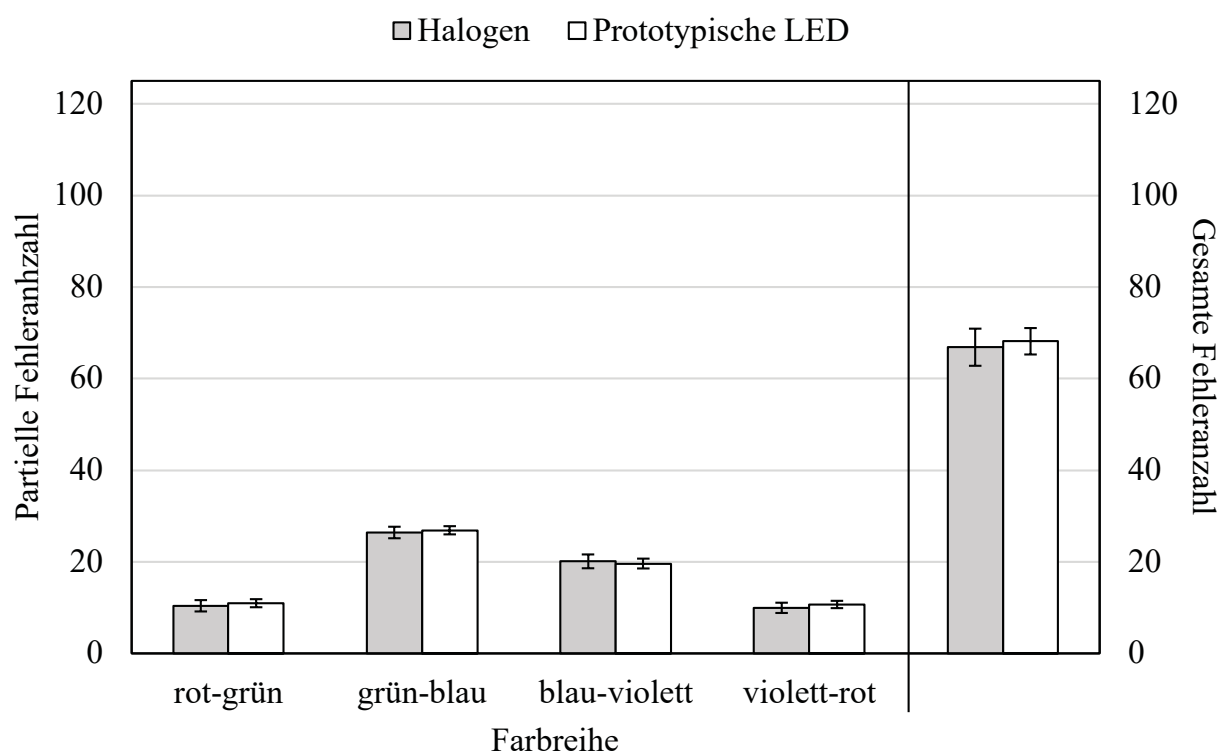


Abbildung 3. Partielle Fehleranzahl (links) und gesamte Fehleranzahl (rechts) im Farbsortiertest für die Halogenlampe mit einem CRI R_a von 100 und die prototypische phosphor-konvertierte LED-Lampe mit einem CRI R_a von 81 in Experiment 2. Zur besseren Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse sind die Farbreihen mit dem korrespondierenden Farbbereich bezeichnet. Die Fehlerbalken repräsentieren die Standardfehler der Mittelwerte.

Deckungsgleich mit den Ergebnissen aus Experiment 1 zeigte sich kein Unterschied in der Farbdiskriminationsleistung zwischen der prototypischen LED-Lampe und Halogenbeleuchtung. Anders als initial angenommen, beeinflusste auch die Brenndauer der prototypischen LED-Lampe dieses Ergebnis nicht. Mit zunehmender Brenndauer (bis 5000 Stunden) zeigte sich keine nennenswerte Veränderung in der spektralen Energieverteilung der prototypischen LED-Lampe. Dies legt den Schluss nahe, dass die in modernen LED-Lampen enthaltenen Phosphor-Komponenten tendenziell keinen gravierenden altersbedingten Veränderungsprozessen unterliegen, die den Verlauf der spektralen Energieverteilung beeinflussen würden.

Experiment 3

Der auffälligste Unterschied zwischen der Halogenbeleuchtung und der prototypischen LED-Lampe liegt im Bereich des langwelligen Lichtes (siehe Abbildung 1). Während bei Halogenbeleuchtung die Energie im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums zum langwelligen Ende hin kontinuierlich ansteigt, zeigt sich bei der prototypischen LED-Lampe abnehmende Energie im langwelligen Bereich oberhalb von 620 nm – ein Bereich der spektralen Energieverteilung, der für die Wahrnehmung von roten Farben entscheidend ist (Houser et al., 2016). Unterschiede in der Farbdiskriminationsleistung unter Halogenbeleuchtung und der prototypischen LED-Lampe sollten sich folglich vornehmlich bei der Unterscheidung von roten Farbton-Nuancen zeigen. Um dies zu erfassen, wurde der oben (vergleiche Seite 16-17) beschriebene modifizierte Farbsortiertest verwendet, von dem angenommen wurde, dass er besonders sensitiv für die Erfassung der Diskriminationsleistung innerhalb roter Farbtöne ist. Als Indikator für die höhere Sensitivität zur Erfassung der Diskrimination von roten Farbtönen wurde insgesamt eine höhere Fehleranzahl in der roten Farbreihe erwartet im Vergleich zu der Fehleranzahl der korrespondierenden Farbkappenspanne in Experiment 2. Diese Annahme wird durch die Beobachtung einer signifikant größeren Fehleranzahl in der roten Farbreihe des modifizierten Tests in Experiment 3 im Vergleich zu der Fehleranzahl

über die korrespondierende Farbkappenspanne im originalen Test in Experiment 2 unterstützt [$F(1, 299) = 18.75, p < .01, \eta_p^2 = 0.06$].

Wie in Experiment 2 wurde für die Beurteilung der Farbdiskriminationsleistung die Fehleranzahl im Farbsortiertest berücksichtigt. Ebenso wurde die partielle Fehleranzahl je Farbreihe in der statistischen Analyse betrachtet. Sofern die Farbdiskriminationsleistung von Rottönen durch die abnehmende Energie oberhalb von 620 nm beeinträchtigt wird, sollte die Fehleranzahl im Farbsortiertest unter der prototypischen LED-Lampe für die rote Farbreihe größer ausfallen als unter Halogenbeleuchtung.

Zur Überprüfung der Validität des modifizierten Tests wurde eine Kompaktleuchtstofflampe verwendet, für die bereits gezeigt werden konnte, dass sie im Hinblick auf die Farbdiskriminationsleistung zu signifikant schlechteren Ergebnissen führt als Halogenbeleuchtung (Mayr et al., 2013). Sofern der modifizierte Farbsortiertest generell geeignet ist, um die Farbdiskriminationsleistung zu erfassen, sollte die Fehleranzahl im Farbsortiertest unter der Kompaktleuchtstofflampe insgesamt größer ausfallen als unter Halogenbeleuchtung. Die deskriptiven Statistiken sind in Abbildung 4 dargestellt.

Die Ergebnisse zeigten einen signifikanten Haupteffekt für den Lampentyp [$F(2, 217) = 5.10, p < .01, \eta_p^2 = 0.05$]. Wie erwartet war die Fehleranzahl im Farbsortiertest unter der Kompaktleuchtstofflampe größer als unter Halogenbeleuchtung [$F(1, 142) = 5.24, p = .02$ ($\alpha = .025$), $\eta_p^2 = 0.04$]. Ebenso war die Fehleranzahl unter der Kompaktleuchtstofflampe größer als unter der prototypischen LED-Lampe [$F(1, 147) = 15.38, p < .01$ ($\alpha = .017$), $\eta_p^2 = 0.10$]. Wie in den Experimenten 1 und 2 zeigte sich auch mit dem hier verwendeten, modifizierten Farbsortiertest kein Unterschied zwischen der prototypischen LED-Lampe und Halogenbeleuchtung [$F(1, 145) = .17, p = .68$ ($\alpha = .050$), $\eta_p^2 < 0.01$], was darauf hindeutet, dass es auch bei der Diskrimination von Rottönen nicht zu einer Beeinträchtigung durch die Verwendung der prototypischen LED-Lampe kommt. Für die Farbreihe ergab sich ebenfalls ein

signifikanter Haupteffekt [$F(3, 215) = 299.75, p < .01, \eta_p^2 = 0.81$]. Alle Farbreihen unterschieden sich hinsichtlich der Fehleranzahl signifikant voneinander (die detaillierten Ergebnisse sind zu finden in Königs et al., 2020a, Tabelle 3, Experiment 2). Die Interaktion zwischen dem Lampentyp und der Farbreihe war ebenfalls signifikant [$F(6, 432) = 22.85, p < .01, \eta_p^2 = 0.24$]. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Fehleranzahl in der orange-grünen Farbreihe unter der Kompaktleuchtstofflampe größer war als unter der prototypischen LED-Lampe und der Halogenbeleuchtung. Limitiert durch die nur teilweise Übereinstimmung der Farbkappen in der hier verwendeten orange-grünen Farbreihe und der Farbkappen in der grün-blauen Farbreihe, repliziert dieses Ergebnis die Befunde von Mayr et al. (2013), die für die grün-blaue Farbreihe in der originalen Anordnung des Farbsortiertests eine größere Fehleranzahl unter der Kompaktleuchtstofflampe im Vergleich zu Halogenbeleuchtung fanden.

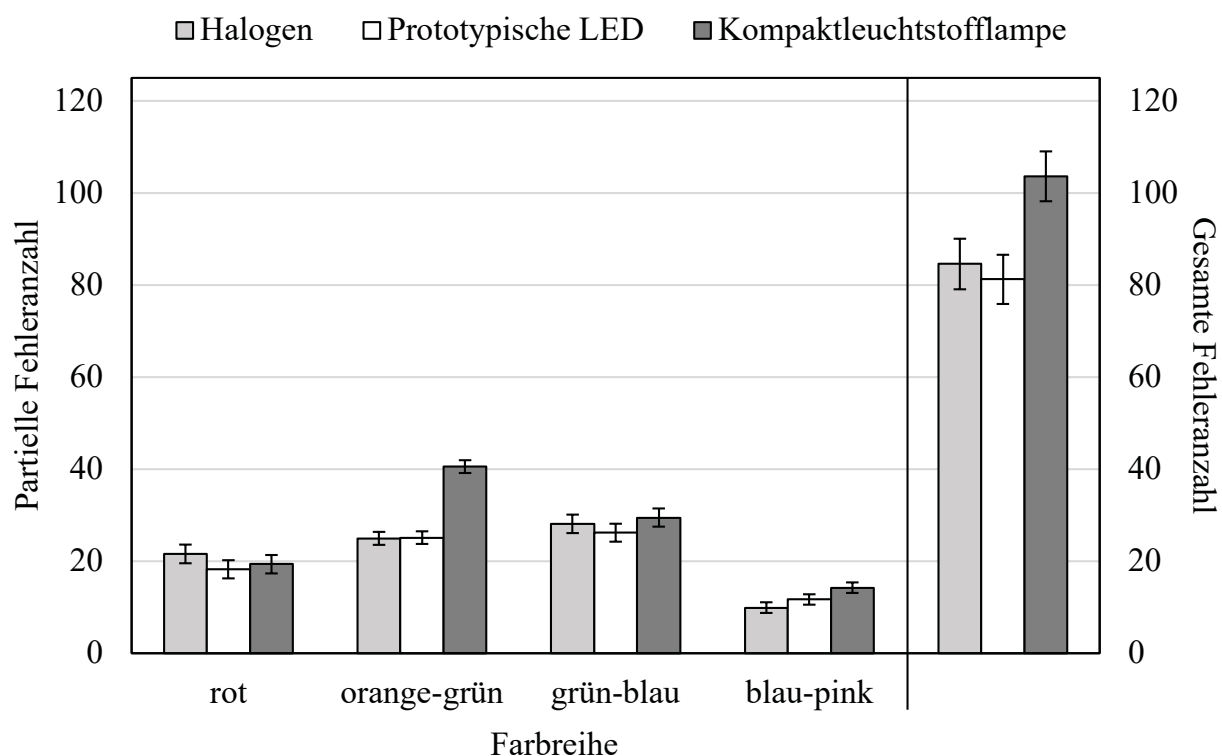


Abbildung 4. Partielle Fehleranzahl (links) und gesamte Fehleranzahl (rechts) im Farbsortiertest für die Halogenlampe mit einem CRI R_a von 100, die prototypische phosphor-konvertierte LED-Lampe mit einem CRI R_a von 81 und die Kompaktleuchtstofflampe mit einem CRI R_a von 81 in Experiment 3. Zur besseren Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse sind die Farbreihen mit dem korrespondierenden Farbbereich bezeichnet. Die Fehlerbalken repräsentieren die Standardfehler der Mittelwerte.

Die konsistente Beobachtung, dass die Farbdiskriminationsleistung unter der Halogenbeleuchtung und der prototypischen phosphor-konvertierten LED-Lampe auch unter Berücksichtigung der Brenndauer der Lampe und des Farbbereiches vergleichbar ist, schließt nicht aus, dass andere Aspekte der Farbwiedergabe, wie zum Beispiel die Farbpräferenz, sich unterscheiden können. Entsprechend wurden in den Experimenten 4 und 5 subjektive Präferenzurteile näher untersucht.

Experiment 4

Die Farbwiedergabeeigenschaften einer Lampe gelten neben dem Kaufpreis (Hicks & Theis, 2014) als kritisches Kriterium für die Nutzerakzeptanz (De Almeida et al., 2014; Huang et al., 2018). Da der Preis für moderne LED-Lampen tendenziell abnimmt (International Energy Agency, 2019), kann angenommen werden, dass in Zukunft die Farbwiedergabeeigenschaften für die Nutzerakzeptanz und somit auch die Kaufentscheidung zunehmend wichtiger werden. Besonders die Farbpräferenz wird als entscheidender Aspekt der Farbwiedergabeeigenschaften einer Lampe im Hinblick auf die Nutzerakzeptanz angenommen (Huang et al., 2018). Entsprechend wurde in Experiment 4 der Aspekt der Farbpräferenz näher untersucht. Der stetige Fortschritt in der Entwicklung von LED-Lampen machte es möglich, in Experiment 4 neben der prototypischen LED-Lampe und der Halogenbeleuchtung – wie sie bereits in den Experimenten 1 bis 3 eingesetzt wurden – eine weitere LED-Lampe aufzunehmen, die optimierte messbare Farbwiedergabeeigenschaften aufwies. Bei dieser optimierten LED handelte es sich ebenfalls um eine phosphor-konvertierte LED-Lampe mit einem blauen LED-Chip und einem CRI R_a von 96 (BLED96; MeLiTec LED Leuchtmittel, 11 W, MeLiTec GmbH, Ense, Deutschland). Eine Lampe mit einem CRI R_a von 96 sollte nach dem bisherigen Stand der Forschung vergleichbare Präferenzurteile erzielen wie eine Lampe mit einem CRI R_a von 100 (hier Halogenbeleuchtung), da Unterschiede in der Farbwiedergabe bei einem CRI $R_a > 95$ subjektiv kaum wahrgenommen werden (Houser et al., 2016). Entsprechend sollten sich die Präferenzurteile für die BLED96 und die Halogenbeleuchtung nicht

unterscheiden. Im Vergleich zu der prototypischen LED-Lampe ist die spektrale Energieverteilung der BLED96 in den langwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums verschoben (vergleiche Abbildung 1). Lichtquellen, die mehr Energie im langwelligen Bereich des Spektrums abgeben erzielten höhere Präferenzbewertungen als Lichtquellen bei denen dies nicht der Fall ist (Jost-Boissard et al., 2015; Jost-Boissard et al., 2009). Bezogen auf die hier verwendeten Lampentypen wurde folglich angenommen, dass sowohl die Halogenbeleuchtung als auch die hinsichtlich ihrer Farbwiedergabeeigenschaften optimierte BLED96 höhere Farbpräferenzbewertungen erhalten sollten als die prototypische LED-Lampe.

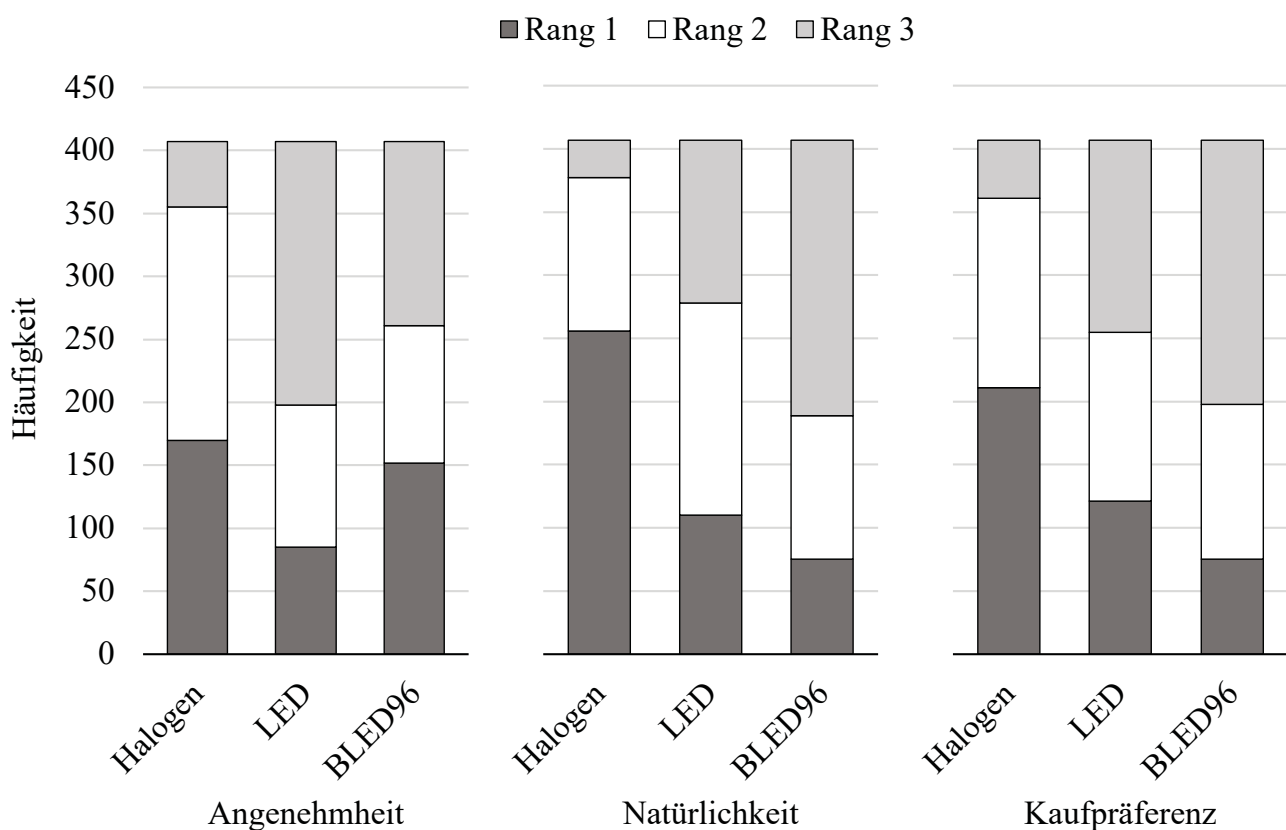


Abbildung 5. Häufigkeiten der Ränge (Rang 1 = bester, Rang 3 = schlechtester) für die in Experiment 4 genutzten Lampen bestehend aus einer Halogenlampe mit einem CRI R_a von 100, einer prototypischen phosphor-konvertierten LED-Lampe mit einem CRI R_a von 81 (LED) und einer phosphor-konvertierten LED-Lampe mit blauem LED-Chip und einem CRI R_a von 96 (BLED96).

Für einen direkten Vergleich wurden die Leuchtmittel nebeneinander in drei baugleichen Boxen präsentiert, in denen verschiedene Gemüse- und Obstsorten (Blaubeeren, grüne

Paprika, gelbe Paprika, Karotte und rote Paprika) platziert wurden. Mit Hilfe des verwendeten Fragebogens brachten die Testpersonen die Boxen auf den Dimensionen Angenehmheit, Natürlichkeit und Kaufpräferenz in eine Rangfolge. Relative Rangfolgen zeichnen sich im Vergleich zu absoluten numerischen Schätzern durch eine höhere Reliabilität aus (Lee et al., 2014) und wurden daher hier eingesetzt. Die Natürlichkeitsbewertung wurde für die präsentierten Gemüse- und Obstsorten einzeln vorgenommen. Basierend auf den Rangsummen der einzelnen Natürlichkeitsbewertungen (detaillierte Ergebnisse hierzu sind zu finden in Königs et al., 2020b, Experiment 1) wurde anschließend der durchschnittliche Rang für die Natürlichkeit berechnet mit dem Ziel, die Variabilität zu reduzieren und die Reliabilität des Messwertes somit zu erhöhen (Allan et al., 2019). Die Häufigkeiten der Ränge sind in Abbildung 5 dargestellt.

Die Ergebnisse zeigten einen signifikanten Unterschied auf der Dimension Angenehmheit [$\chi^2(2) = 71.62, p < .01$]. Gegenüber der prototypischen LED-Lampe wurde sowohl die Halogenbeleuchtung [$z = 8.82, p < .01 (\alpha = .017), r = .31$] als auch die BLED96 [$z = -4.24, p < .01 (\alpha = .025), r = -.15$] als angenehmer bewertet. Zudem erhielt die Halogenbeleuchtung einen höheren Rang auf der Dimension Angenehmheit als die BLED96 [$z = 4.33, p < .01 (\alpha = .050), r = .15$]. Der Rang für die Natürlichkeit unterschied sich ebenfalls zwischen den verwendeten Lampentypen [$\chi^2(2) = 180.56, p < .01$]. Hier erhielt die BLED96 sowohl im Vergleich zur Halogenbeleuchtung [$z = 12.29, p < .01 (\alpha = .017), r = .43$] als auch im Vergleich zur prototypischen LED-Lampe [$z = 4.25, p < .01 (\alpha = .050), r = .15$] einen niedrigeren Rang. Wie bei der Beurteilung der Angenehmheit, erhielt die Halogenbeleuchtung bei der Beurteilung der Natürlichkeit einen höheren Rang als die prototypische LED-Lampe [$z = 9.17, p < .01 (\alpha = .025), r = .32$]. Auch bezüglich der Kaufpräferenz zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen den verwendeten Lampentypen [$\chi^2(2) = 114.16, p < .01$]. Das Ergebnismuster war hier parallel zu dem Ergebnismuster für die Natürlichkeit. Die BLED96 erhielt sowohl im Vergleich zur Halogenbeleuchtung [$z = 10.27, p < .01 (\alpha = .017), r = .36$] als auch im Vergleich zur prototypischen LED-Lampe [$z = 3.81, p < .01 (\alpha = .050), r = .13$] einen

niedrigeren Rang auf der Dimension Kaufpräferenz. Die Halogenbeleuchtung erhielt einen höheren Rang als die prototypische LED-Lampe [$z = 7.23, p < .01 (\alpha = .025), r = .25$].

Erwartungskonform ergab sich für die Halogenbeleuchtung ein höherer Rang auf den drei erhobenen Dimensionen Angenehmheit, Natürlichkeit und Kaufpräferenz im Vergleich zu der prototypischen LED-Lampe. Konträr zu den Erwartungen, zeigte sich ein höherer Rang für die hinsichtlich ihrer Farbwiedergabeeigenschaften optimierte BLED96 im Vergleich zur prototypischen LED-Lampe jedoch lediglich auf der Dimension Angenehmheit. Auf den Dimensionen Natürlichkeit und Kaufpräferenz schnitt die prototypische LED-Lampe besser ab als die BLED96. Insgesamt liegt die BLED96 hinsichtlich der Farbpräferenz somit annähernd auf einem Level mit der prototypischen LED-Lampe beziehungsweise tendenziell etwas darunter. Die Annahme, dass die BLED96 im Vergleich zu der prototypischen LED-Lampe bessere Farbpräferenzbewertungen erhalten würde muss somit verworfen werden. Möglicherweise war die spektrale Energieverteilung der BLED96 im Vergleich zu der spektralen Energieverteilung der prototypischen LED-Lampe nicht weit genug in den langwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums verschoben (vergleiche Abbildung 1), um hinsichtlich der Farbpräferenz bevorzugt beurteilt zu werden. Die Beobachtung, dass sowohl die prototypische LED-Lampe als auch die BLED96 auf allen drei Dimensionen der Farbpräferenz einen niedrigeren Rang erhielt als die Halogenbeleuchtung könnte in Unterschieden in der spektralen Energieverteilung zwischen den Lampen begründet sein. Während beide verwendeten LED-Lampen abfallende spektrale Energieverteilungen am langwelligen Ende des sichtbaren Spektrums aufweisen, steigt die spektrale Energieverteilung bei der Halogenbeleuchtung in diesem Bereich stetig an. Hierzu passt auch, dass bei der Halogenbeleuchtung der gemessene Index für gesättigtes Rot R_9 mit 99 größer ausfällt als bei der prototypischen LED-Lampe und der BLED96, die lediglich einen R_9 von 6 beziehungsweise 75 aufweisen. Eine reduzierte Rotkomponente in der spektralen Energieverteilung der Lichtquelle kann zur Folge haben, dass farbige Objekte in der illuminierten Szene stumpf wirken (Ohno, 2005), wodurch die

Präferenz für die betreffende Lichtquelle abnimmt (Jost-Boissard et al., 2015; Jost-Boissard et al., 2009; Royer, Wilkerson, et al., 2017; Teunissen et al., 2017).

Experiment 5

Unter Berücksichtigung des laufenden technologischen Fortschritts in der Lampenentwicklung, wurde in Experiment 5 eine weitere, hinsichtlich ihrer Farbwiedergabeeigenschaften optimierte LED-Lampe eingesetzt. Bei der hier verwendeten Lampe handelte es sich um eine phosphor-konvertierte LED-Lampe mit einem violetten LED-Chip und einem CRI R_a von 97 (VLED97; Soraa Vivid A60, 11 W, Soraa Inc., Fremont (CA), United States). Neben der VLED97 wurden Halogenbeleuchtung und die prototypische LED-Lampe aus den Experimenten 1 bis 4 als Beleuchtungsbedingungen für die drei benachbarten, mit Gemüse und Obst (Blaubeeren, grüne Paprika, gelbe Paprika, Karotte und rote Paprika) bestückten Boxen eingesetzt. Wie in Experiment 4 wurde die Farbpräferenz für die Boxen auf den Dimensionen Angenehmheit, Natürlichkeit und Kaufpräferenz erhoben, wobei auch hier basierend auf den Rangsummen der einzelnen Natürlichkeitsbewertungen je Gemüse- und Obstsorte (detaillierte Ergebnisse hierzu sind zu finden in Königs et al., 2020b, Experiment 2) der durchschnittliche Rang für die Natürlichkeit berechnet wurde.

Da bereits die in Experiment 4 verwendete, hinsichtlich ihrer Farbwiedergabeeigenschaften optimierte BLED96 verglichen mit der prototypischen LED-Lampe einen höheren Rang auf der Dimension Angenehmheit erhielt, wurde die Hypothese aufgestellt, dass dies auch bei der VLED97 der Fall sein würde. Unklar blieb, ob sich ein höherer Rang für die VLED97 im Vergleich zur prototypischen LED-Lampe auch auf den Dimensionen Natürlichkeit und Kaufpräferenz zeigen würde. Von den in der vorliegenden Arbeit verwendeten LED-Lampen ist die Verschiebung der spektrale Energieverteilung in den langwelligen Bereich bei der VLED97 am stärksten ausgeprägt (vergleiche Abbildung 1). Unter der Prämisse, dass dies für Präferenzurteile vorteilhaft ist (Jost-Boissard et al., 2015; Jost-Boissard et al., 2009;

Royer, Wilkerson, et al., 2017; Teunissen et al., 2017) lassen sich zwei Hypothesen stützen. Erstens wurde angenommen, dass die VLED97 auch auf den Dimensionen Natürlichkeit und Kaufpräferenz einen höheren Rang erzielt als die prototypische LED-Lampe. Zweitens ist bei der VLED97 die Wahrscheinlichkeit am größten, dass sie bezüglich der Farbpräferenz mit Halogenbeleuchtung gleichzusetzen ist, was hier geprüft werden sollte. Sowohl für die VLED97 als auch für die Halogenbeleuchtung sollte die Farbpräferenz verglichen mit der prototypischen LED-Lampe somit insgesamt höher ausfallen. Die Häufigkeiten der Ränge sind in Abbildung 6 dargestellt.

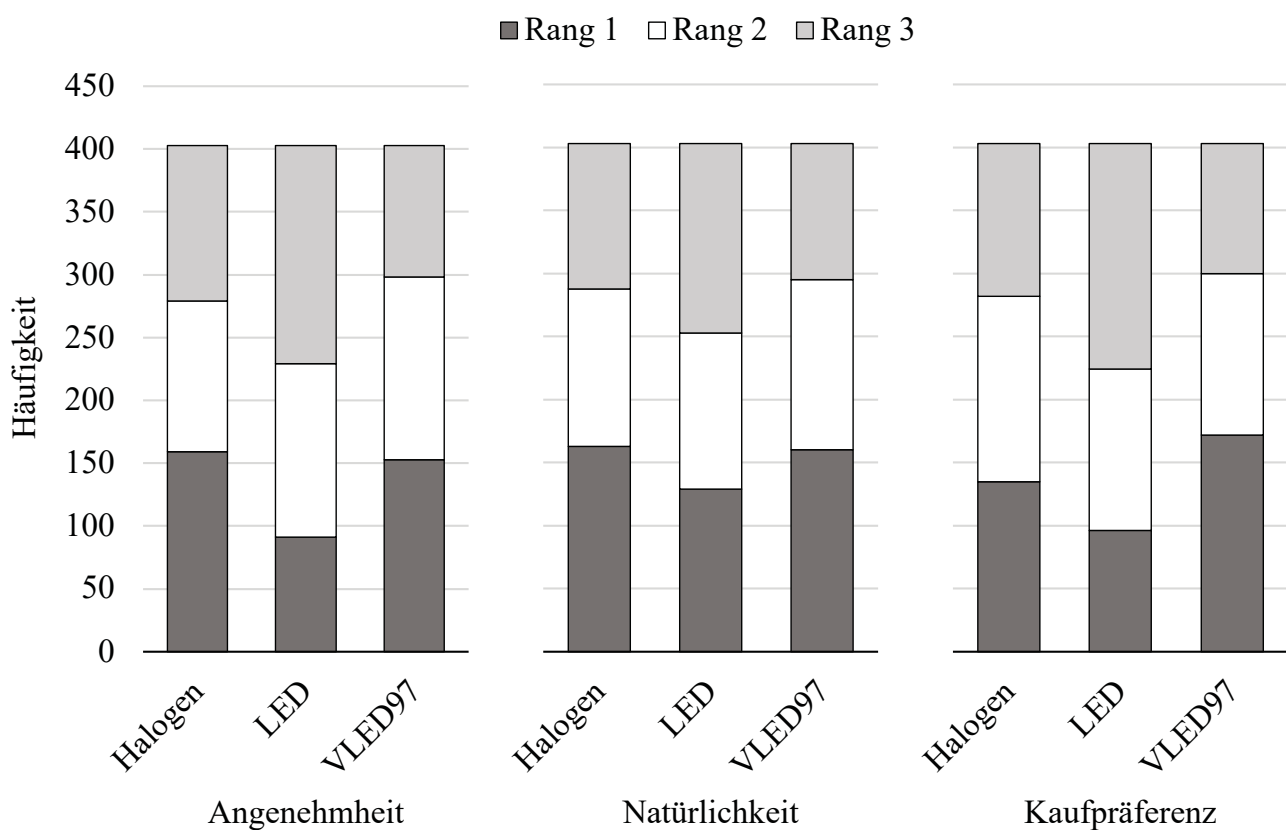


Abbildung 6. Häufigkeiten der Ränge (Rang 1 = bester, Rang 3 = schlechtester) für die in Experiment 5 genutzten Lampen bestehend aus einer Halogenlampe mit einem CRI R_a von 100, einer prototypischen phosphor-konvertierten LED-Lampe mit einem CRI R_a von 81 (LED) und einer phosphor-konvertierten LED-Lampe mit violetter LED-Chip und einem CRI R_a von 97 (VLED97).

Die Ergebnisse zeigten einen signifikanten Effekt des Lampentyps auf den Dimensionen Angenehmheit [$\chi^2(2) = 26.51, p < .01$], Natürlichkeit [$\chi^2(2) = 9.31, p = .01$] und

Kaufpräferenz [$\chi^2(2) = 28.99, p < .01$]. Dabei erhielt die VLED97 im Vergleich zu der prototypischen LED-Lampe einen höheren Rang auf allen drei Dimensionen [Angenehmheit: $z = -4.77, p < .01$ ($\alpha = .017$), $r = -.17$; Natürlichkeit: $z = -2.34, p = .02$ ($\alpha = .025$), $r = -.08$; Kaufpräferenz: $z = -5.27, p < .01$ ($\alpha = .017$), $r = -.19$]. Auch die Halogenlampe wurde auf allen drei Dimensionen der Farbpräferenz mit einem höheren Rang ausgezeichnet als die prototypische LED-Lampe [Angenehmheit: $z = 4.14, p < .01$ ($\alpha = .025$), $r = .15$; Natürlichkeit: $z = 2.96, p < .01$ ($\alpha = .017$), $r = .10$; Kaufpräferenz: $z = 3.27, p < .01$ ($\alpha = .025$), $r = .12$]. Besonders interessant ist der Befund, dass die VLED97 auf allen drei Dimensionen der Farbpräferenz einen vergleichbaren Rang erhielt wie die Halogenbeleuchtung [Angenehmheit: $z = -0.45, p = .65$ ($\alpha = .050$), $r = -.02$; Natürlichkeit: $z = 0.43, p = .67$ ($\alpha = .050$), $r = .01$; Kaufpräferenz: $z = -1.87, p = .06$ ($\alpha = .050$), $r = -.07$].

Die vergleichbaren Ränge auf allen drei Dimensionen der Farbpräferenz für die VLED97 und die Halogenbeleuchtung implizieren, dass moderne LED-Lampen hinsichtlich der Farbpräferenz potentiell an Halogenbeleuchtung heranreichen können. Dass dies jedoch nicht für alle für den Hausgebrauch verfügbaren LED-Lampen gelten kann, zeigen die niedrigeren Farbpräferenzbewertungen für die prototypische LED-Lampe im Vergleich zur VLED97. Ein möglicher Grund hierfür könnte darin liegen, dass die spektrale Energieverteilung der VLED97 weiter in den langwelligen Bereich hineinreicht als die der prototypischen LED, was mit einer erhöhten Farbpräferenz einhergeht. Darüber hinaus konnten in Experiment 5 die Ergebnisse aus Experiment 4 für die Farbpräferenz unter Halogenbeleuchtung und der prototypischen LED-Lampe repliziert werden. Auch hier zeigte sich ein höherer Rang auf den Dimensionen Angenehmheit, Natürlichkeit und Kaufpräferenz für die Halogenbeleuchtung im Vergleich zu der prototypischen LED-Lampe.

Allgemeine Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wurde die Farbwahrnehmung unter kommerziell erhältlichen, für den Hausgebrauch konzipierten LED-Lampen im Vergleich zu Halogenbeleuchtung betrachtet. Ausgangslage für die Annahme, dass zwischen LED-Lampen und Halogenbeleuchtung Unterschiede hinsichtlich der Farbwahrnehmung bestehen könnten, waren sichtbare Unterschiede in den spektralen Energieverteilungen (siehe Abbildung 1) sowie den daraus ableitbaren farbmtrischen Indizes (siehe Tabelle 1) dieser beiden Lampentypen. Die spektrale Energieverteilung einer Lichtquelle beeinflusst, wie Objektfarben unter der jeweiligen Lichtquelle wahrgenommen werden (Fairchild, 2013). Dabei wird angenommen, dass spektrale Energieverteilungen, welche kontinuierlich Energie im gesamten sichtbaren Bereich des Spektrums abgeben – wie es beispielsweise bei Tageslicht der Fall ist – Farben besonders gut wiedergeben können. Während Halogenbeleuchtung durch eine kontinuierliche spektrale Energieverteilung mit zunehmender Energie vom kurzwelligen zum langwelligen Ende des sichtbaren elektromagnetischen Spektrums charakterisiert werden kann, ist dies bei LED-Lampen nicht der Fall. Hinzu kommt, dass LED-Lampen, anders als Halogenlampen, nicht über ein einheitliches Konstruktionsprinzip verfügen, wodurch sie diverse spektrale Energieverteilungen aufweisen können. Die Diversität der spektralen Energieverteilungen von für den Hausgebrauch konzipierten LED-Lampen erschwert den direkten Vergleich mit Halogenbeleuchtung, da theoretisch unendliche Möglichkeiten für den Verlauf der spektralen Energieverteilungen von LED-Lampen bestehen. Um diesem Umstand zu begegnen, wurde für die vorliegende Arbeit eine LED-Lampe identifiziert, die als prototypischer Vertreter der derzeit kommerziell erhältlichen, für den Hausgebrauch konzipierten phosphorkonvertierten LED-Lampen gelten kann. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, Farbdiskrimination und Farbpräferenz zwischen der prototypischen LED-Lampe und Halogenbeleuchtung systematisch zu vergleichen. Unter Berücksichtigung des stetigen technologischen Fortschritts in der Entwicklung von LED-Lampen, wurden zudem zwei weitere, hinsichtlich ihrer Farbwiedergabeeigenschaften optimierte LED-Lampen mit der prototypischen LED-Lampe

und Halogenbeleuchtung verglichen. Hierbei wurde nur die Farbpräferenz experimentell erhoben, die aus Endnutzerperspektive als besonders wichtig eingestuft werden kann (Huang et al., 2018).

In den Experimenten 1 bis 3 konnte konsistent gezeigt werden, dass die Farbdiskrimination unter einer prototypischen, für den Hausgebrauch konzipierten phosphor-konvertierten LED-Lampe vergleichbar ausfiel wie die Farbdiskrimination unter Halogenbeleuchtung. Der sichtbare Unterschied in den spektralen Energieverteilungen der prototypischen LED-Lampe und der Halogenbeleuchtung (siehe Abbildung 1) hatte somit keinen Effekt auf die mittels eines Farbsortiertests gemessene Farbdiskriminationsleistung. Dies änderte sich auch nicht mit Variation der Brenndauer der prototypischen LED-Lampe (Experiment 2) oder Fokussierung auf die Farbdiskrimination innerhalb roter Farbtöne (Experiment 3). Anders als basierend auf bisheriger Forschung (Hunt et al., 2011) angenommen, zeigte sich, dass eine Brenndauer von 5000 Stunden die spektrale Energieverteilung der prototypischen LED-Lampe nicht merklich beeinflusste. Entsprechend blieb auch die Farbdiskriminationsleistung gemessen mit dem Farbsortiertest unverändert. Dies ist für sich genommen schon ein beachtliches Ergebnis, welches den rapiden Fortschritt in der Entwicklung von Lampen basierend auf LED-Technologie illustriert.

Ungeachtet der über die Brenndauer vorhandenen Stabilität der spektralen Energieverteilung, über welche die hier eingesetzte prototypische LED-Lampe verfügte, zeigte diese LED-Lampe gegenüber Halogenbeleuchtung reduzierte Energie am langwelligen Ende des sichtbaren elektromagnetischen Spektrums. Weil wiederholt gezeigt werden konnte, wie entscheidend das Vorhandensein von Energie im langwelligen Bereich des elektromagnetischen Spektrums für die Farbwiedergabe sein kann (Ohno, 2005), wurde die Farbdiskrimination innerhalb roter Farbtöne speziell getestet. Hierzu wurde der eingesetzte Farbsortiertest so modifiziert, dass alle roten Farbtöne für den direkten Vergleich in einer Farbreihe präsentiert wurden. Es zeigte sich jedoch auch im Hinblick auf rote Farbtöne, dass die

Farbdiskriminationsleistung im Farbsortiertest unter der prototypischen LED-Lampe mit der unter Halogenbeleuchtung vergleichbar war. Hieraus kann geschlussfolgert werden, dass die Unterschiede in den spektralen Energieverteilungen nicht mit Unterschieden in der Farbdiskrimination assoziiert sind. In der Summe zeigen die Ergebnisse zur Farbdiskrimination, dass bereits einfache phosphor-konvertierte LED-Lampen mit Farbwiedergabeeigenschaften, die knapp die gesetzlichen Mindestanforderungen von einem CRI $R_a \geq 80$ erfüllen (European Commission, 2009), Ergebnisse liefern, die mit Halogenbeleuchtung vergleichbar sind.

Darüber hinaus stützen die Ergebnisse aus den Experimenten 1 bis 3 die Beobachtung, dass der CRI R_a kein geeigneter Prädiktor für die Farbdiskrimination ist (Boyce, 1976; Guo & Houser, 2004; Rea & Freyssinier-Nova, 2008). Zwar konnte in Experiment 3 für eine Kompaktleuchtstofflampe mit einem CRI R_a von 81 eine signifikant schlechtere Farbdiskriminationsleistung im Farbsortiertest im Vergleich zu Halogenbeleuchtung mit einem CRI R_a von 100 gezeigt werden (siehe auch Mayr et al., 2013). Für die hier verwendete prototypische LED-Lampe mit einem zur Kompaktleuchtstofflampe identischen CRI R_a zeigte sich jedoch kein solcher Unterschied im Vergleich zu Halogenbeleuchtung. Wäre der CRI R_a ein geeigneter Prädiktor für Farbdiskrimination, müsste sich auch hier eine bessere Farbdiskriminationsleistung unter der Lichtquelle mit einem CRI R_a von 100 gegenüber der Lichtquelle mit einem CRI R_a von 81 zeigen.

Während sowohl Farbdiskrimination als auch Farbpräferenz wichtige Aspekte der Farbwiedergabe darstellen, ist aus Endnutzerperspektive besonders die Farbpräferenz von hoher Relevanz (Huang et al., 2018). So kann die Farbpräferenz neben dem Kaufpreis als wichtiges Kriterium bei der Kaufentscheidung für oder gegen eine bestimmte Lampe gelten. Entsprechend wurde in den Experimenten 4 und 5 die Farbpräferenz für die prototypische LED-Lampe im Vergleich zu Halogenbeleuchtung erfasst. Zusätzlich wurde unter Berücksichtigung des technologischen Fortschritts in der Entwicklung von LED-Lampen je Experiment eine weitere, hinsichtlich ihrer messbaren Farbwiedergabeeigenschaften optimierte LED-Lampe

eingesetzt. Dabei wurde besonders darauf geachtet, dass die beiden optimierten LED-Lampen größere Teile im langwelligen Bereich des elektromagnetischen Spektrums abdecken als die prototypische LED-Lampe, was mit einer höheren Farbpräferenz assoziiert ist (Jost-Boissard et al., 2015; Jost-Boissard et al., 2009; Royer, Wilkerson, et al., 2017; Teunissen et al., 2017).

Sowohl in Experiment 4 als auch in Experiment 5 zeigten sich höhere Ränge für die Farbpräferenz auf den Dimensionen Angenehmheit, Natürlichkeit und Kaufpräferenz unter Halogenbeleuchtung im Vergleich zur prototypischen LED-Lampe. Verglichen mit Halogenbeleuchtung zeigt die prototypische LED-Lampe für alle hier verwendeten Indizes niedrigere Werte (siehe Tabelle 1). Besonders aufschlussreich ist die ausgeprägte prozentuale Abweichung der Buntheit für $R_{cs,h1}$ und $R_{cs,h16}$, die beide die schlechteren Präferenzurteile für die prototypische LED-Lampe im Vergleich zu Halogenbeleuchtung adäquat abbilden. $R_{cs,h1}$ und $R_{cs,h16}$ sind zur Vorhersage der Farbpräferenz besonders dann geeignet, wenn vertraute Objekte betrachtet werden (Wei et al., 2017), was hier der Fall gewesen ist. Gegeben, dass für den Endnutzer lediglich der CRI R_a als Maß für die Farbwiedergabeeigenschaften einer Lampe verfügbar ist, könnte dieser für die Kaufentscheidung zwischen der prototypischen LED-Lampe und Halogenbeleuchtung herangezogen werden. Dies gilt jedoch nicht für alle untersuchten Lampen, wie die Unterschiede in der Farbpräferenz zwischen Halogenbeleuchtung und den beiden optimierten LED-Lampen zeigen.

Während die in Experiment 4 verwendete BLED96 insgesamt schlechtere Farbpräferenzbewertungen erzielte als Halogenbeleuchtung, erhielt die in Experiment 5 verwendete VLED97 mit Halogenbeleuchtung vergleichbare Farbpräferenzbewertungen. Diese divergierenden Ergebnisse lassen sich auf Grundlage der nahezu identischen Farbwiedergabeindizes von CRI $R_a = 96$ bei der BLED96 (Experiment 4) und CRI $R_a = 97$ bei der VLED97 (Experiment 5) nicht erklären. Ohne zusätzliche Anhaltspunkte können Endnutzer folglich keine fundierte Entscheidung darüber treffen, welche der beiden optimierten LED-Lampen die besseren

Eigenschaften in Bezug auf die Farbpräferenz bietet. Auch die initiale Annahme, dass sich Unterschiede in der Farbwiedergabe ab einem CRI $R_a > 95$ (Houser et al., 2016) im Allgemeinen nicht auf die Farbwahrnehmung auswirken, muss auf Basis der hier vorliegenden Daten verworfen werden. Andernfalls dürften sich relativ zu Halogenbeleuchtung keine Unterschiede in der Farbpräferenz für die beiden optimierten LED-Lampen zeigen.

Die Gründe für die Unterschiede in der Farbpräferenz unter der BLED96 und der VLED97 relativ zu Halogenbeleuchtung sind nicht offensichtlich. Ein Vergleich der spektralen Energieverteilungen zeigt, dass die VLED97 stärker in den langwelligen Bereich verschoben ist als die BLED96. Entsprechend zeigen sich auch Unterschiede in den aus der spektralen Energieverteilung abgeleiteten Indizes, wobei diejenigen für CRI R_9 und ANSI/IES TM-30-18 R_g besonders deutlich sind (siehe Tabelle 1). Sowohl CRI R_9 als auch R_g fallen für die BLED96 geringer aus als für die VLED97. Anders als bei dem Vergleich der prototypischen LED-Lampe mit Halogenbeleuchtung sind die Indizes für $R_{cs,h1}$ und $R_{cs,h16}$ zwischen der BLED96 und der VLED97 jedoch nahezu identisch. Folglich reflektieren $R_{cs,h1}$ und $R_{cs,h16}$ die geringere Farbpräferenz für die BLED96 verglichen mit der VLED97 nicht. Bezogen auf R_g fällt auf, dass die BLED96 mit der prototypischen LED-Lampe vergleichbar ist und die VLED97 eher mit Halogenbeleuchtung, wobei der R_g der VLED97 den R_g der Halogenbeleuchtung sogar leicht übertrifft. Basierend auf R_g scheint es entsprechend plausibel, dass die experimentell erhobene Farbpräferenz für die BLED96 und die prototypische LED-Lampe sowie die VLED97 und die Halogenbeleuchtung jeweils auf einem Niveau sind. Insgesamt lässt sich aus den Ergebnissen zur Farbpräferenz ableiten, dass von den hier verwendeten Indizes R_g die Unterschiede zwischen den in der vorliegenden Arbeit verwendeten Lampentypen am besten abbildet.

Grundsätzlich stellt die Quantifizierung der Farbwiedergabeeigenschaften einer Lampe anhand von aus dem Spektrum bestimmbar Indizes allerdings ein komplexes Phänomen dar, bei dem an Stelle einzelner Indizes immer das Gesamtbild betrachtet werden muss

(Illuminating Engineering Society of North America, 2018). Aus Endnutzerperspektive ist dies in den meisten Fällen jedoch nicht möglich. Dies hat im Wesentlichen zwei Gründe. Zum einen ist die Anzahl verfügbarer Informationen zur Quantifizierung der Farbwiedergabeeigenschaften einer Lampe, die auf Leuchtmittelverpackungen angegeben werden, in der Regel limitiert. Zum anderen fehlt Endnutzern für gewöhnlich die notwendige Expertise, um die Farbwiedergabeeigenschaften einer Lampe durch die Kombination diverser Indizes zu beurteilen. Für den Endnutzer gibt es demnach keine einfache Möglichkeit, diejenige Lichtquelle zu wählen, die am besten dazu geeignet ist, Farben in bevorzugter Weise darzustellen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für den Hausgebrauch weiträumig eingesetzte LED-Lampen, hier vertreten durch eine prototypische LED-Lampe, zwar in Bezug auf die Farbdiskrimination mit Halogenbeleuchtung vergleichbar sind, jedoch nicht in Bezug auf die Farbpräferenz. Berücksichtigt man jedoch den Fortschritt bei der Entwicklung von LED-Lampen, finden sich auch bezüglich der Farbpräferenz vergleichbare Ergebnisse zwischen hinsichtlich ihrer Farbwiedergabeeigenschaften optimierten LED-Lampen und Halogenbeleuchtung. LED-Lampen haben folglich das Potential, Halogenbeleuchtung sowohl im Hinblick auf die Farbdiskrimination als auch auf die Farbpräferenz adäquat zu ersetzen. Unter Berücksichtigung der Flexibilität bei der Konstruktion von LED-Lampen ist es sogar vorstellbar, dass LED-Lampen der Halogenbeleuchtung hinsichtlich Farbdiskrimination und Farbpräferenz in Zukunft überlegen sein werden.

Literatur

- Allan, A. C., Garcia-Hansen, V., Isoardi, G., & Smith, S. S. (2019). Subjective assessments of lighting quality: A measurement review. *Leukos*, 15(2-3), 115-126.
<https://doi.org/10.1080/15502724.2018.1531017>
- Anderson, A. J., & Johnston, A. W. (2015). Test/Retest and Inter-test Agreement of Color Aptitude Measures. *Color Research and Application*, 40(3), 224-231.
<https://doi.org/10.1002/col.21876>
- Baniya, R. R., Dangol, R., Bhusal, P., Wilm, A., Baur, E., Puolakka, M., & Halonen, L. (2015). User-acceptance studies for simplified light-emitting diode spectra. *Lighting Research and Technology*, 47(2), 177-191.
<https://doi.org/10.1177/1477153513515264>
- Bodrogi, P., Brückner, S., Khanh, T. Q., & Winkler, H. (2013). Visual assessment of light source color quality. *Color Research and Application*, 38(1), 4-13.
<https://doi.org/10.1002/col.20726>
- Bowman, K. J., & Cole, B. L. (1980). A recommendation for illumination of the Farnsworth-Munsell 100-hue test. *Optometry & Vision Science*, 57(11), 839-843.
<https://doi.org/10.1097/00006324-198011000-00010>
- Boyce, P. R. (1976). Illuminance, lamp type and performance on a colour discrimination task. *Lighting Research and Technology*, 8(4), 195-199.
<https://doi.org/10.1177/14771535760080040401>
- Boyce, P. R. (2014). *Human Factors in Lighting* (3rd ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/b16707>
- Boyce, P. R., & Simons, R. H. (1977). Hue discrimination and light sources. *Lighting Research and Technology*, 9(3), 125-140.
<https://doi.org/10.1177/096032717700900301>
- Boyce, P. R., & Stampfli, J. R. (2019). LRT Digest 3: New colour metrics and their use. *Lighting Research and Technology*, 51(5), 657-681.
<https://doi.org/10.1177/1477153519850006>

- Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). (1995). *Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources* (Technical Report No: 13.3). CIE.
- Crawford, M. H. (2009). LEDs for solid-state lighting: performance challenges and recent advances. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 15(4), 1028-1040. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2009.2013476>
- Dangol, R., Islam, M., Hyvärinen, M., Bhusal, P., Puolakka, M., & Halonen, L. (2013). Subjective preferences and colour quality metrics of LED light sources. *Lighting Research and Technology*, 45(6), 666-688. <https://doi.org/10.1177/1477153512471520>
- Dangol, R., Islam, M., Hyvärinen, M., Bhushal, P., Puolakka, M., & Halonen, L. (2015). User acceptance studies for LED office lighting: Preference, naturalness and colourfulness. *Lighting Research and Technology*, 47(1), 36-53. <https://doi.org/10.1177/1477153513514424>
- David, A., Fini, P. T., Houser, K. W., Ohno, Y., Royer, M. P., Smet, K., Wei, M., & Whitehead, L. (2015). Development of the IES method for evaluating the color rendition of light sources. *Optics Express*, 23(12), 15888-15906. <https://doi.org/10.1364/OE.23.015888>
- Davis, W., & Ohno, Y. (2005, September 14). *Toward an improved color rendering metric* Proceedings of SPIE 5941, Fifth International Conference on Solid State Lighting, San Diego, CA, United States. <https://doi.org/10.1117/12.615388>
- Davis, W., & Ohno, Y. (2009). Approaches to color rendering measurement. *Journal of Modern Optics*, 56(13), 1412-1419. <https://doi.org/10.1080/09500340903023733>
- De Almeida, A., Santos, B., Paolo, B., & Quicheron, M. (2014). Solid state lighting review– Potential and challenges in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 30-48. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.029>
- de Souza, D. F., da Silva, P. P. F., Fontenele, L. F. A., Barbosa, G. D., & de Oliveira Jesus, M. (2019). Efficiency, quality, and environmental impacts: A comparative study of residential artificial lighting. *Energy Reports*, 5, 409-424. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.03.009>

- Emetere, M. E., Abodunrin, J. T., Fayomi, O. O., & Iroham, C. O. (2019). Brief review on the physics of solid-state lighting device. *Journal of Physics: Conference Series*, 1378(2), 022038. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1378/2/022038>
- Esposito, T. (2019). An Adjusted Error Score Calculation for the Farnsworth-Munsell 100 Hue Test. *Leukos*, 15(2-3), 195-202. <https://doi.org/10.1080/15502724.2018.1514265>
- Esposito, T., & Houser, K. (2018). Models of colour quality over a wide range of spectral power distributions. *Lighting Research and Technology*, 51(3), 331-352. <https://doi.org/10.1177/1477153518765953>
- Esposito, T., & Houser, K. W. (2019). A new measure of colour discrimination for LEDs and other light sources. *Lighting Research and Technology*, 51(1), 5-23. <https://doi.org/10.1177/1477153517729200>
- European Commission. (2009). Commission Regulation (EC) No 244/2009. *Official Journal of the European Union*, 76, 3-16. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009R0244&from=DE>
- Fairchild, M. D. (2013). *Color Appearance Models*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118653128>
- Farnsworth, D. (1957). *The Farnsworth-Munsell 100-Hue test for the examination of color vision*. Munsell Color Company.
- Feng, X., Xu, W., Han, Q., & Zhang, S. (2016). LED light with enhanced color saturation and improved white light perception. *Optics Express*, 24(1), 573-585. <https://doi.org/10.1364/OE.24.000573>
- Feng, X., Xu, W., Han, Q., & Zhang, S. (2017). Colour-enhanced light emitting diode light with high gamut area for retail lighting. *Lighting Research and Technology*, 49(3), 329-342. <https://doi.org/10.1177/1477153515610621>
- Fine, B. J., & Koblrick, J. L. (1980). Field dependence, practice, and low illumination as related to the Farnsworth-Munsell 100-Hue Test. *Perceptual and Motor Skills*, 51, 1167-1177. <https://doi.org/10.2466/pms.1980.51.3f.1167>
- Gegenfurtner, K. R., & Rieger, J. (2000). Sensory and cognitive contributions of color to the recognition of natural scenes. *Current Biology*, 10(13), 805-808. [https://doi.org/10.1016/S0960-9822\(00\)00563-7](https://doi.org/10.1016/S0960-9822(00)00563-7)

- Guo, X., & Houser, K. W. (2004). A review of colour rendering indices and their application to commercial light sources. *Lighting Research and Technology*, 36(3), 183-199. <https://doi.org/10.1191/1365782804li112oa>
- Hernández-Andrés, J., Romero, J., & Lee, R. L. (2001). Colorimetric and spectroradiometric characteristics of narrow-field-of-view clear skylight in Granada, Spain. *Journal of the Optical Society of America A*, 18(2), 412-420. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.18.000412>
- Hicks, A. L., & Theis, T. L. (2014). Residential energy-efficient lighting adoption survey. *Energy Efficiency*, 7(2), 323-333. <https://doi.org/10.1007/s12053-013-9226-6>
- Holm, S. (1979). A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*, 6(2), 65-70. <https://www.jstor.org/stable/4615733>
- Houser, K. W., Mossman, M., Smet, K., & Whitehead, L. (2016). Tutorial: Color Rendering and Its Applications in Lighting. *Leukos*, 12(1-2), 7-26. <https://doi.org/10.1080/15502724.2014.989802>
- Houser, K. W., Wei, M., David, A., Krames, M. R., & Shen, X. S. (2013). Review of measures for light-source color rendition and considerations for a two-measure system for characterizing color rendition. *Optics Express*, 21(8), 10393-10411. <https://doi.org/10.1364/OE.21.010393>
- Huang, Z., Liu, Q., Liu, Y., Pointer, M., Luo, M., Wang, Q., & Wu, B. (2019). Best lighting for jeans, part 1: Optimising colour preference and colour discrimination with multiple correlated colour temperatures. *Lighting Research and Technology*, 51(8), 1208-1223. <https://doi.org/10.1177/1477153518816125>
- Huang, Z., Liu, Q., Westland, S., Pointer, M., Luo, M. R., & Xiao, K. (2018). Light dominates colour preference when correlated colour temperature differs. *Lighting Research and Technology*, 50(7), 995-1012. <https://doi.org/10.1177/1477153517713542>
- Hung, C.-C., Li, Y.-H., & Yang, P.-H. (2015). Application of the mechanism design to develop the RGB LEDs color mixing. *International Journal of Photoenergy*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/876364>

- Hunt, C. H., Quintero, J., & Carreras, J. (2011). Appearance Degradation and Chromatic Shift in Energy-Efficient Lighting Devices. *Color and Imaging Conference, 2011(1)*, 71-75. <https://www.ingentaconnect.com/content/ist/cic/2011/00002011/00000001/art00016>
- Illuminating Engineering Society of North America. (2018). *ANSI/IES TM-30-18. IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition* (IESNA, Ed.). IESNA.
- International Energy Agency. (2019). *Tracking Buildings*. IEA. Retrieved April 14 from <https://www.iea.org/reports/tracking-buildings/lighting#abstract>
- Ishihara, S. (1972). *Tests for Colour-Blindness*. Kanehara Shuppan Company.
- Islam, M., Dangol, R., Hyvärinen, M., Bhusal, P., Puolakka, M., & Halonen, L. (2013). User preferences for LED lighting in terms of light spectrum. *Lighting Research and Technology, 45(6)*, 641-665. <https://doi.org/10.1177/1477153513475913>
- Jost-Boissard, S., Avouac, P., & Fontoynt, M. (2015). Assessing the colour quality of LED sources: Naturalness, attractiveness, colourfulness and colour difference. *Lighting Research and Technology, 47(7)*, 769-794. <https://doi.org/10.1177/1477153514555882>
- Jost-Boissard, S., Fontoynt, M., & Blanc-Gonnet, J. (2009). Perceived lighting quality of LED sources for the presentation of fruit and vegetables. *Journal of Modern Optics, 56(13)*, 1420-1432. <https://doi.org/10.1080/09500340903056550>
- Knoblauch, K., Saunders, F., Kusuda, M., Hynes, R., Podgor, M., Higgins, K. E., & Demonasterio, F. M. (1987). Age and Illuminance Effects in the Farnsworth-Munsell 100-Hue Test. *Applied Optics, 26(8)*, 1441-1448. <https://doi.org/10.1364/AO.26.001441>
- Kokka, A., Poikonen, T., Blattner, P., Jost, S., Ferrero, A., Pulli, T., Ngo, M., Thorseth, A., Gerloff, T., Dekker, P., Stuker, F., Klej, A., Ludwig, K., Schneider, M., Reiners, T., & Ikonen, E. (2018). Development of white LED illuminants for colorimetry and recommendation of white LED reference spectrum for photometry. *Metrologia, 55(4)*, 526-534. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aacae7>
- Königs, S., Mayr, S., & Buchner, A. (2019). A common type of commercially available LED light source allows for colour discrimination performance at a level comparable to halogen lighting. *Ergonomics, 62(11)*, 1462-1473. <https://doi.org/10.1080/00140139.2019.1663940>

- Königs, S., Mayr, S., & Buchner, A. (2020a). Is red a special issue in the colour discrimination performance under phosphor-converted LED lighting? *Manuscript submitted for publication*.
- Königs, S., Mayr, S., & Buchner, A. (2020b). LED-based light sources optimised for high colour rendition from an end users' perspective. *Manuscript submitted for publication*.
- Lee, M. D., Steyvers, M., & Miller, B. (2014). A Cognitive Model for Aggregating People's Rankings. *PLoS ONE*, 9(5), e96431. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0096431>
- Mahler, E., Ezrati, J. J., & Viénot, F. (2009). Testing LED lighting for colour discrimination and colour rendering. *Color Research and Application*, 34(1), 8-17. <https://doi.org/10.1002/col.20459>
- Mayr, S., Köpper, M., & Buchner, A. (2013). Comparing colour discrimination and proofreading performance under compact fluorescent and halogen lamp lighting. *Ergonomics*, 56(9), 1418-1429. <https://doi.org/10.1080/00140139.2013.819940>
- Montoya, F. G., Peña-García, A., Juaidi, A., & Manzano-Agugliaro, F. (2017). Indoor lighting techniques: An overview of evolution and new trends for energy saving. *Energy and Buildings*, 140, 50-60. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.028>
- Nardelli, A., Deuschle, E., de Azevedo, L. D., Pessoa, J. L. N., & Ghisi, E. (2017). Assessment of Light Emitting Diodes technology for general lighting: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 368-379. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.002>
- Ohno, Y. (2005). Spectral design considerations for white LED color rendering. *Optical Engineering*, 44(11), 111302. <https://doi.org/10.1117/1.2130694>
- Pattison, P. M., Hansen, M., & Tsao, J. Y. (2018). LED lighting efficacy: Status and directions. *Comptes Rendus Physique*, 19(3), 134-145. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2017.10.013>
- Pinto, P. D., Linhares, J. M. M., & Nascimento, S. M. C. (2008). Correlated color temperature preferred by observers for illumination of artistic paintings. *Journal of the Optical Society of America A*, 25(3), 623-630. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.25.000623>

- Pust, P., Schmidt, P. J., & Schnick, W. (2015). A revolution in lighting. *Nature Materials*, 14(5), 454-458. <https://doi.org/10.1038/nmat4270>
- Rea, M., Deng, L., & Wolsey, R. (2004). *NLPIP Lighting Answers: Light Sources and Color*. Troy, NY: Rensselaer Polytechnic Institute, 8(1).
- Rea, M. S., & Freyssinier-Nova, J. P. (2008). Color rendering: A tale of two metrics. *Color Research and Application*, 33(3), 192-202. <https://doi.org/10.1002/col.20399>
- Romero, J., Garcia-Beltrán, A., & Hernández-Andrés, J. (1997). Linear bases for representation of natural and artificial illuminants. *Journal of the Optical Society of America A*, 14(5), 1007-1014. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.14.001007>
- Royer, M. P., Houser, K. W., & David, A. (2017). Chroma shift and gamut shape: going beyond average color fidelity and gamut area. *Leukos*, 14(3), 149-165. <https://doi.org/10.1080/15502724.2017.1372203>
- Royer, M. P., Houser, K. W., & Wilkerson, A. M. (2012). Color discrimination capability under highly structured spectra. *Color Research and Application*, 37(6), 441-449. <https://doi.org/10.1002/col.20702>
- Royer, M. P., Wilkerson, A., Wei, M., Houser, K. W., & Davis, R. (2017). Human perceptions of colour rendition vary with average fidelity, average gamut, and gamut shape. *Lighting Research and Technology*, 49(8), 966-991. <https://doi.org/10.1177/1477153516663615>
- Smet, K., Ryckaert, W. R., Pointer, M. R., Deconinck, G., & Hanselaer, P. (2011). Correlation between color quality metric predictions and visual appreciation of light sources. *Optics Express*, 19(9), 8151-8166. <https://doi.org/10.1364/OE.19.008151>
- Spence, I., Wong, P., Rusan, M., & Rastegar, N. (2006). How color enhances visual memory for natural scenes. *Psychological Science*, 17(1), 1-6. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2005.01656.x>
- Teunissen, C., van der Heijden, F. H. F. W., Poort, S. H. M., & De Beer, E. (2017). Characterising user preference for white LED light sources with CIE colour rendering index combined with a relative gamut area index. *Lighting Research and Technology*, 49(4), 461-480. <https://doi.org/10.1177/1477153515624484>
- Thornton, W. A. (1972). Color-discrimination index. *Journal of the Optical Society of America*, 62(2), 191-194. <https://doi.org/10.1364/JOSA.62.000191>

- Veitch, J. A., Whitehead, L. A., Mossman, M., & Pilditch, T. D. (2014). Chromaticity-matched but spectrally different light source effects on simple and complex color judgments. *Color Research and Application*, 39(3), 263-274. <https://doi.org/10.1002/col.21811>
- Webster, M. A. (1996). Human colour perception and its adaptation. *Network: Computation in Neural Systems*, 7(4), 587-634. https://doi.org/10.1088/0954-898X_7_4_002
- Wei, M., & Houser, K. W. (2017). Systematic changes in gamut size affect color preference. *Leukos*, 13(1), 23-32. <https://doi.org/10.1080/15502724.2016.1192402>
- Wei, M., Houser, K. W., Allen, G. R., & Beers, W. W. (2014). Color preference under LEDs with diminished yellow emission. *Leukos*, 10(3), 119-131. <https://doi.org/10.1080/15502724.2013.865212>
- Wei, M., Houser, K. W., David, A., & Krames, M. (2017). Colour gamut size and shape influence colour preference. *Lighting Research and Technology*, 49(8), 992-1014. <https://doi.org/doi.org/10.1177/1477153516651472>
- Wei, M., Houser, K. W., David, A., & Krames, M. R. (2015). Perceptual responses to LED illumination with colour rendering indices of 85 and 97. *Lighting Research and Technology*, 47(7), 810-827. <https://doi.org/10.1177/1477153514548089>
- Wichmann, F. A., Sharpe, L. T., & Gegenfurtner, K. R. (2002). The contributions of color to recognition memory for natural scenes. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 28(3), 509-520. <https://doi.org/10.1037//0278-7393.28.3.509>
- Wurm, L. H., Legge, G. E., Isenberg, L. M., & Luebker, A. (1993). Color improves object recognition in normal and low vision. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19(4), 899-911. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.19.4.899>
- Wyszecki, G., & Stiles, W. S. (1982). *Color Science* (2nd ed.). Wiley.

Einzelarbeiten

Experiment 1:

Königs, S., Mayr, S., & Buchner, A. (2019). A common type of commercially available LED light source allows for colour discrimination performance at a level comparable to halogen lighting. *Ergonomics*, 62(11), 1462-1473.

<https://doi.org/10.1080/00140139.2019.1663940>

Experimente 2 und 3:

Königs, S., Mayr, S., & Buchner, A. (2020a). Is red a special issue in the colour discrimination performance under phosphor-converted LED lighting? *Manuscript submitted for publication*.

Experimente 4 und 5:

Königs, S., Mayr, S., & Buchner, A. (2020b). LED-based light sources optimised for high colour rendition from an end users' perspective. *Ergonomics*.

<https://doi.org/10.1080/00140139.2020.1858187>



A common type of commercially available LED light source allows for colour discrimination performance at a level comparable to halogen lighting

Sara Königs, Susanne Mayr & Axel Buchner

To cite this article: Sara Königs, Susanne Mayr & Axel Buchner (2019) A common type of commercially available LED light source allows for colour discrimination performance at a level comparable to halogen lighting, *Ergonomics*, 62:11, 1462-1473, DOI: [10.1080/00140139.2019.1663940](https://doi.org/10.1080/00140139.2019.1663940)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/00140139.2019.1663940>



Accepted author version posted online: 04 Sep 2019.
Published online: 18 Sep 2019.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 31



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)

ARTICLE



A common type of commercially available LED light source allows for colour discrimination performance at a level comparable to halogen lighting

Sara Königs^a, Susanne Mayr^b and Axel Buchner^a

^aDepartment of Experimental Psychology, Heinrich Heine University Düsseldorf, Düsseldorf, Germany; ^bChair of Psychology and Human-Machine Interaction, University of Passau, Passau, Germany

ABSTRACT

As light sources based on light emitting diodes (LED) are increasingly used to replace classic tungsten-based light sources in household lighting applications, possible impairments of colour perception under those light sources due to a different spectral power distribution become a major concern. The Colour Rendering Index (CRI) which is the only measure available to the end user is controversial and does not represent a comprehensive measure of colour perception. Aspects of colour perception disregarded by the CRI such as colour discrimination have to be taken into account as well. Therefore, we evaluated colour discrimination performance under a commercially available phosphor-converted LED light source from a popular brand (OSRAM) in comparison to a classic tungsten-based halogen light source. Colour discrimination performance was not affected by the type of light source, indicating that the phosphor-converted LED light source enables colour discrimination performance comparable to that of halogen lighting despite being associated with a lower CRI.

Practitioner summary: Considering the increasing use of energy efficient light sources, we compared colour discrimination under a common type of phosphor-converted LED and under traditional halogen lighting. Colour discrimination performance was comparable in both lighting conditions, indicating that the phosphor-converted LED can replace halogen lighting without sacrificing colour discrimination for energy efficiency.

Abbreviations: LED: light emitting diode; CRI: colour rendering index; CCT: correlated colour temperature; CIE: commission internationale de l'éclairage; FMHT: Farnsworth-Munsell 100-Hue Test; lm: lumen; lx: lux, lumen/m²; W: watt; nm: nanometer; K: kelvin

ARTICLE HISTORY

Received 18 April 2018
Accepted 29 August 2019

KEYWORDS



Phosphor-converted LED; halogen lamp; colour discrimination; illuminance level

Introduction

Light sources based on light emitting diodes (LEDs) have become superior to other conventional light sources such as incandescent, halogen, or fluorescent lamps in terms of lifetime and efficiency (Chang et al. 2012). The efficiency of a light source is characterised by its luminous efficacy which is defined as the ratio of the luminous flux to the electrical power consumption (Boyce 2014), measured in lumens per watt (lm/W). Apart from luminous efficacy and lifetime, LED-based light sources differ from other conventional light sources in their spectral power distribution. The spectral power distribution reflects the intensity of emitted radiation at each wavelength (Houser et al. 2016). Radiation in the wavelength range from 380 to 780 nm (the visible spectrum) leads to a response of the human visual

system (Boyce 2014) and thus triggers the perception of colour; for normal observers short wavelengths appear as blue light, medium wavelengths as green light, and long wavelengths as red light (Houser et al. 2016).

While tungsten-based incandescent and halogen light sources emit radiation in the whole range of the visible spectrum and are, therefore, referred to as continuous (Guo and Houser 2004), LEDs per se do not. LEDs are known as narrowband light sources (Boyce 2014) emitting light in a small part of the visible spectrum. The sensation of white light can be achieved through the combination of different LEDs in one light source, most commonly in the primary colours red, green, and blue (RGB-LED), or through phosphor conversion (Hunt, Quintero, and Carreras 2011). In phosphor-converted LED light sources a single LED is used

CONTACT Sara Königs  sara.koenigs@hhu.de  Department of Experimental Psychology, Heinrich Heine University Düsseldorf, Universitätsstraße 1, 40225 Düsseldorf, Germany

This article has been republished with minor changes. These changes do not impact the academic content of the article.

© 2019 Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group

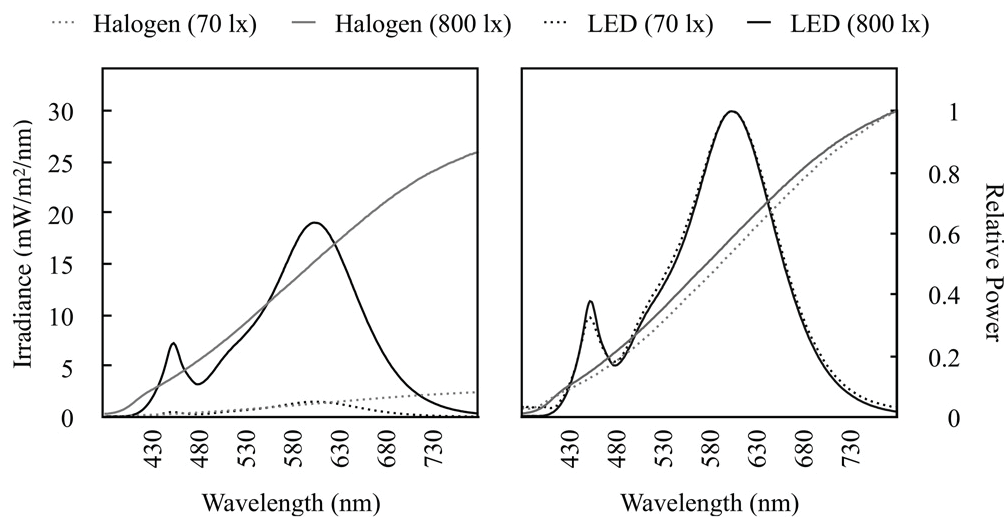


Figure 1. Spectral power distributions of the four lamp types used in our experiment expressed as irradiance (left) and relative power (right) for each nanometre in the visible spectrum.

together with a phosphor coating. The LED emits radiation in the ultraviolet or visible short wavelength part of the spectrum (Boyce 2014) and causes the phosphor to emit radiation at longer wavelengths (Crawford 2009; Hunt, Quintero, and Carreras 2011). The spectral power distribution of these phosphor-converted LED light sources typically comprises a narrow peak in the short wavelength range emitted by the LED and a much broader peak in the middle to long wavelength range emitted through phosphor conversion (Figure 1). The spectral power distribution may vary among different LED light sources because the LEDs may differ in the light they emit and because several types of phosphor coatings are available. Up to now, these phosphor-converted LED light sources are less expensive and more efficient than RGB-LED light sources (Pimputkar et al. 2009) which is why they are the most widely available option on the lighting market (Hunt, Quintero, and Carreras 2011). This is why we chose one type of these light sources from a popular brand (OSRAM) for the present study.

Depending on their spectral power distribution, white light sources can have a bluish or a yellowish to reddish appearance. To further specify this appearance either the colour temperature or the correlated colour temperature (CCT) can be used. Colour temperature (in kelvin, K) is determined by the temperature of a black body radiator whose spectral emission is characterised solely by its temperature (Boyce 2014). With an increasing temperature of the black body radiator the emitted energy increases and shifts towards shorter wavelengths (Fairchild 2013). Colour temperature can be applied to light sources which match (at least approximately) the radiation distribution properties of

the black body radiator, such as incandescent lamps (Wyszecki and Stiles 1982). However, the CCT is more commonly used because it can be applied to light sources with a radiation distribution different from that of a blackbody radiator, such as LED-based or fluorescent light sources. The CCT "is defined as the temperature of a blackbody radiator whose perceived color most closely resembles that of the given selective radiator at the same brightness and under specified viewing conditions" (Wyszecki and Stiles 1982, p. 225). In our experiment, the term selective radiator refers to the light sources under study.

Light sources with different CCTs can render the colour of an object differently which is why the CCT is taken into account in the calculation of the colour rendering index (CRI). The CRI, originally introduced in 1965 by the International Commission on Illumination (CIE), reflects the appearance of the colours of an object under a certain light source compared to a reference light source with a comparable CCT (CIE 1995). For light sources with a CCT below 5000 K, as is the case in most of the commercially available light sources (Guo and Houser 2004), the reference light source is a black body radiator of comparable CCT (CIE 1995). The maximum CRI score is 100, with 100 indicating complete accordance of the colour rendered by the reference light source with the colour rendered by a test light source. Values smaller than 100 indicate progressively less accordance. Eight medium-saturated test colours (R_1 – R_8) are considered in the calculation of the CRI. Single indices are calculated for each reference colour. The arithmetic mean of these indices represents the general CRI (alternatively referred to as R_a).

The CRI typically is the only measure describing the quality of colour perception under a light source

available to the end-user. One problem with this is that the CRI reflects only the colour shift under a certain light source in contrast to a reference light source and disregards other important aspects of colour rendering, such as visual appreciation (Smet et al. 2010) and colour discrimination performance (Thornton 1972; Rea and Freyssinier-Nova 2008; Royer, Houser, and Wilkerson 2012; Esposito and Houser 2019). It thus seemed important to measure how easily colours can be distinguished under a certain light source. Specifically, we assessed whether there is a difference in colour discrimination performance under a common type of commercially available phosphor-converted LED light source compared to the halogen light source which the LED-based light source is designed to replace.

For that purpose, we used the Farnsworth-Munsell 100-Hue Test (FMHT; Farnsworth 1957). The FMHT consists of 85 colour caps gradually changing in hue and covering the whole hue cycle. Participants have to sort the colour caps in consistent hue order. Transpositions of the colour caps are counted as errors. A high number of transpositions leads to a high total error score which indicates low colour discrimination performance.

Originally the FMHT was designed to assess an individual's colour discrimination performance under a specified test light source (Farnsworth 1957), but it has also been used to compare the colour discrimination performance under different lighting conditions (e.g. Boyce and Simons 1977; Rea and Freyssinier-Nova 2008; Royer, Houser, and Wilkerson 2012; Mayr, Köpper, and Buchner 2013; Esposito and Houser 2019). The recommended light level of the test light source – usually referred to as illuminance level measured in lumen per square metre – is 270 lx or more (Farnsworth 1957). Lower light levels lead to worse colour discrimination performance in the FMHT (Bowman and Cole 1980; Knoblauch et al. 1987; Rea and Freyssinier-Nova 2008; Mayr, Köpper, and Buchner 2013). Colour discrimination performance in the FMHT was found to be better under halogen lighting compared to compact fluorescent lighting (Mayr, Köpper, and Buchner 2013) and compared to RGB-LED lighting (Royer, Houser, and Wilkerson 2012).

What is currently unknown is whether there is a difference in colour discrimination performance under commercially available phosphor-converted LED light sources compared to halogen light sources. The purpose of the study reported here is to reduce this gap by comparing colour discrimination performance in the FMHT under a commercially available phosphor-

converted LED light source from a popular brand (OSRAM) to halogen lighting. For this comparison, we used the adjusted error score calculation originally suggested by Esposito and Houser (2019) and described in more detail by Esposito (2019) in addition to the original scoring method. The original scoring method is designed for a specified test light source that ensures the predefined order of the colour caps in the FMHT. Other light sources can potentially alter the order of the colour caps (Esposito and Houser 2019). When applied to the FMHT under a light source causing cap transpositions, the original scoring procedure measures both the effects of the illuminating light source and the individual's colour discrimination ability. The adjusted error score calculation differentiates between both measures. First, the influence of the light source on colour discrimination is quantified by calculating a source-specific error score. If a light source's spectral power distribution causes changes in the original order of the colour caps in the FMHT, the corresponding error score is assigned to the light source. Second, an adjusted error score for the colour discrimination performance under the respective light source is calculated. Transpositions of colour caps conducted by the participants that are induced by the light source are no longer counted as errors.

In addition to the light source variable we included an illuminance level variable to verify that our measurement procedure was appropriate for the purpose of measuring colour discrimination performance because it is well-known that colour discrimination performance differs as a function of illuminance level (Bowman and Cole 1980; Knoblauch et al. 1987; Rea and Freyssinier-Nova 2008; Mayr, Köpper, and Buchner 2013). We decided to use illuminance levels of 70 lx and 800 lx as in Mayr, Köpper, and Buchner (2013) and expected better performance in the high illuminance condition than in the low illuminance condition regardless of the lamp type used.

Additionally, we wanted to investigate the extent to which the FMHT error score changes due to test repetition and practice. Therefore, each participant conducted the FMHT three times under the same light source. The changes between the first, the second, and the third assessment served as the measure reflecting the possible practice effect.

Method

Participants

We collected the data of 153 participants. Due to failures in the recording of the FMHT results nine

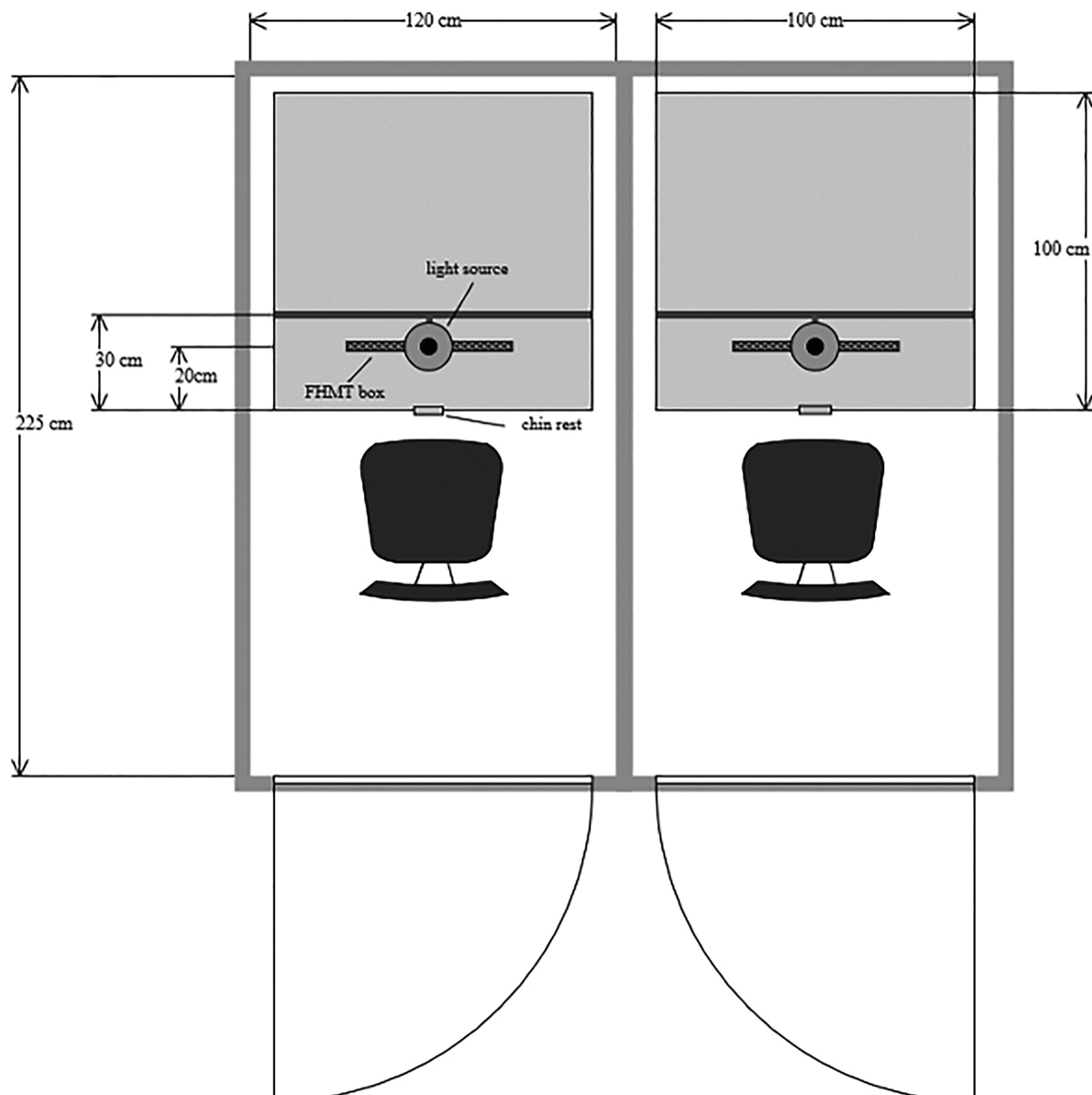


Figure 2. Depicted is the experimental setup of our study. Two identically built testing chambers were equipped with a table, a chair, a chin rest, a tripod for the attachment of the light source, one of the four light sources (halogen 800 lx, halogen 70 lx, phosphor-converted LED 800 lx, or phosphor-converted LED 70 lx) mounted within a metal lamp shade and the Farnsworth–Munsell 100-Hue Test placed directly under the light source.

participants had to be excluded from the analysis, resulting in a total of 144 participants (33 male) who were between 18 and 48 years old ($M = 23$; $SD = 4$). All participants reported to have normal or corrected-to-normal visual acuity and were screened for normal colour vision ability using Ishihara's Tests for Colour-Blindness (Ishihara 1972). Participants received monetary compensation or partial course credit for their participation.

Material

Apart from the light sources, the materials were the same as those used by Mayr, Köpper, and Buchner

(2013). Specifically, two identical testing chambers ($120 \times 225 \times 250$ cm width \times length \times height) were used (see Figure 2). The inner walls of the chambers were painted in a matte, light beige colour. Each chamber contained a table (100×100 cm) with a light grey surface and a height-adjustable office chair. A height-adjustable tripod with an E27 lamp socket covered with a metal lampshade with a white inner coating was placed on the tabletop and was used to install the different lamp types in the chambers. For the high illuminance condition (800 lx) we used a halogen lamp with 57 W input power (Osram Halogen Classic A, Osram GmbH, Augsburg, Germany) and an LED lamp with 8 W input power (Osram LED Star

Table 1. Measured colorimetric and photometric characteristics of the light sources used.

Light source	Mean illuminance (lx)	Colour rendering index (R_a)	Correlated colour temperature (K)	Chromaticity coordinates	Chromaticity coordinates
				1931 CIE 2° (x, y)	1976 CIE 2° (u', v')
Halogen high	799.83	99.27	2828	0.4512, 0.4111	0.2568, 0.5262
Halogen low	69.98	99.63	2760.67	0.4551, 0.4097	0.2598, 0.5263
LED high	801.31	80.27	2696.67	0.4596, 0.4098	0.2627, 0.5270
LED low	69.83	81.63	2771.67	0.4552, 0.4114	0.2592, 0.5270

Classic A). For the low illuminance condition (70 lx) we used a halogen lamp with 20 W input power (Osram Halogen Classic A) and an LED lamp with 4 W input power (Osram LED Star Classic P). All four light sources had similar CCTs. The CRI of the halogen light sources was nearly 100 whereas the CRI of the phosphor-converted LED light sources was about 80, comparable to the CRI of the halogen and compact fluorescent light sources used in prior studies (Royer, Houser, and Wilkerson 2012; Mayr, Köpper, and Buchner 2013). Spectral radiation and the colorimetric properties of the light sources were measured using a GL Spectis 5.0 touch optical spectrometer (GL Optic Lichtmesstechnik GmbH, Weilheim/Teck, Germany) in the range of 380 to 780 nm. The results of these measurements are depicted in Table 1 and Figure 1.

The lamp socket in a chamber contained one of the four light sources described in the previous paragraph. Lamp type (halogen vs. LED) and illuminance level (800 lx vs. 70 lx) differed between the two testing chambers. In each testing chamber, lamp types and illuminance levels were changed every second to fourth day so as to obtain approximately equal sample sizes in each condition at the end of the experiment. All participants run in a testing chamber during one day were tested in the same condition. To achieve the desired illuminance level of 800 lx on the tabletop in the high illuminance condition and of 70 lx in the low illuminance condition (see Table 1), the height of the lamp sockets was adjustable. After having been switched on for 45 minutes, the illuminance level on the tabletop perpendicular under the light sources was measured using a Gossen Mavolux 5032 B luxmeter (Gossen Foto- und Lichtmesstechnik GmbH, Nürnberg, Germany). If necessary the height of the lamps was adjusted so that the proper illuminance level in the respective condition was achieved.

To assess colour discrimination performance we used the FMHT. The FMHT consists of four boxes labelled A, B, C, and D. The colour caps in the boxes gradually change in hue from red to yellow-green in Box A, from yellow-green to blue-green in Box B, from blue-green to purple-blue in Box C, and from purple-

blue to red in Box D. Each box has two fixed anchor caps at either end which represent the starting and ending points. Box A has 22 unmounted colour caps while the other three boxes have 21 unmounted colour caps. The unmounted colour caps are removed from the boxes and shuffled. Participants' task is to place the colour caps in consistent hue order between the two fixed anchor caps. For error score calculation, the unmounted colour caps are consecutively numbered on their backsides, invisible to the participants. A cap specific error score is calculated for each cap. According to Farnsworth (1957), the cap specific error score is calculated by summing up the differences between the number of a specific cap and the numbers of both caps adjacent to it minus two. For a single box of the FMHT, the sum of the cap specific error scores represents the original partial error score. If all colour caps are ordered consecutively, the original partial error score for the corresponding box of the FMHT is zero. The sum of the original partial error scores represents the original total error score which is central to our statistical analyses. However, we also report the descriptive statistics for the original partial error scores.

For the calculation of the adjusted partial and the adjusted total error scores, the influence of the testing light source on the cap order has to be considered. By directly applying the error score calculation procedure described above to the cap transpositions caused by the light source, the source-specific error score is calculated (Esposito and Houser 2019). The total source-specific error score (R_d) is the sum of the source-specific error scores for each box of the FMHT ($R_{d,A}$, $R_{d,B}$, $R_{d,C}$, $R_{d,D}$). In the case of the light sources used in the present study, the source specific error score was $R_d = 8$ ($R_{d,A}=0$, $R_{d,B}=8$, $R_{d,C}=0$, $R_{d,D}=0$) for both halogen conditions and $R_d = 4$ ($R_{d,A}=0$, $R_{d,B}=4$, $R_{d,C}=0$, $R_{d,D}=0$) for both LED conditions. For the calculation of the individual's colour discrimination ability a place number is assigned to each cap, indicating the position of the cap in the corresponding box illuminated by the testing light source (Esposito 2019). The adjusted partial and adjusted total error scores are then calculated

as described above by using the place numbers instead of the numbers on the backsides of the caps.

Procedure

Participants were tested individually. They were asked to give their written informed consent before they could participate in the study. Next, the short version of Ishihara's Tests for Colour-Blindness with 11 plates (Ishihara 1972) was conducted to ensure that all participants had normal colour vision. The test was carried out in a room lit by daylight, as recommended (Ishihara 1972). The illuminance level in this room, measured on every second to the fourth day at different daytimes of the data collection period using a Gossen Mavolux 5032 B luxmeter (Gossen Foto- und Lichtmesstechnik GmbH, Nürnberg, Germany), was at least 320 lx ($M=493$, $SD=247$). Participants had to read the numbers on the coloured plates (plates 1–10) or to trace the winding line with their index finger (plate 11) without directly touching the plate. Participants' responses were recorded. Participants with fewer than 10 correct responses ($N=2$) were excluded from further participation and are not included in the sample described in the *Participants* section.

Subsequently, the participants were seated in one of the two testing chambers. An experimenter was present in the testing chamber to supervise the experiment. Participants adapted to the lighting condition for at least 5 minutes during which they filled out a data sheet with their demographic data and read the instructions for the FMHT. Before starting the FMHT, a photograph of the four boxes of the FMHT with colour caps displayed in consistent hue order was presented to the participants to illustrate their task, and any remaining questions were answered by the experimenter. Participants were asked to place their chin on the chin rest at a height of 42 cm above the table top. This ensured a constant viewing distance for each test trial and was required to prevent participants from bending over the table and, thus, blocking the experimentally manipulated light source. If necessary, the height of the chair was adjusted to guarantee a comfortable seating position during the colour sorting task. Subsequently, each participant conducted the FMHT three times with the same random order of the four boxes. The order of the boxes was randomised for every participant. The first box without caps except for its fixed anchor caps was placed under the light source on the table in front of the participants. Directly behind the box, the colour

caps pertaining to that box were presented in a freshly shuffled random order. Participants started to sort the colour caps into the first box of the FMHT, knowing that the experimenter would record the time needed to complete the sorting task. Participants could take as much time as they wanted to complete their task. For better temporal orientation they received an auditory cue from the experimenter whenever a period of 2 minutes was exceeded for the completion of a box. Once participants finished the first box, the next box was presented in front of them as described above. The procedure continued until the participants had sorted each box of the FMHT three times.

Design

The experiment comprised a mixed-factorial $2 \times 2 \times 3$ design with illuminance level (70 lx vs. 800 lx) and lamp type (halogen vs. LED) as between-subjects factors and test trial (1 vs. 2 vs. 3) as a within-subject factor. The dependent variables were the original total error score, the adjusted total error score, and the average processing time of the FMHT but we also report the mean original partial error scores, the mean adjusted partial error scores, and the partial processing times for all boxes separately. A multivariate approach was chosen for all general linear model within-subject comparisons (O'Brien and Kaiser 1985). For all statistical decisions, the level of α was set to 0.05.

Of primary interest was the comparison of the colour discrimination performance assessed with the FMHT under halogen lighting compared to the phosphor-converted LED light source under study. An *a priori* power analysis showed that in order to detect a lamp type effect of $f=0.25$ (a "medium" effect in terms of the conventions suggested by Cohen 1988) with desired levels of $\alpha=\beta=0.05$ and assuming a correlation of $\rho=0.5$ among the levels of the test trial variable, a sample size of $N=142$ was required (Faul et al. 2007). We were able to use data of $N=144$ participants for our analyses so that the power was even very slightly larger than what we had planned for. Partial eta squared (η^2) is reported as a measure of the sample effect size.

Results

The mean original partial and original total error scores of the FMHT are shown in Figure 3. A repeated measures MANOVA on the original total error scores with illuminance level and lamp type as the between-

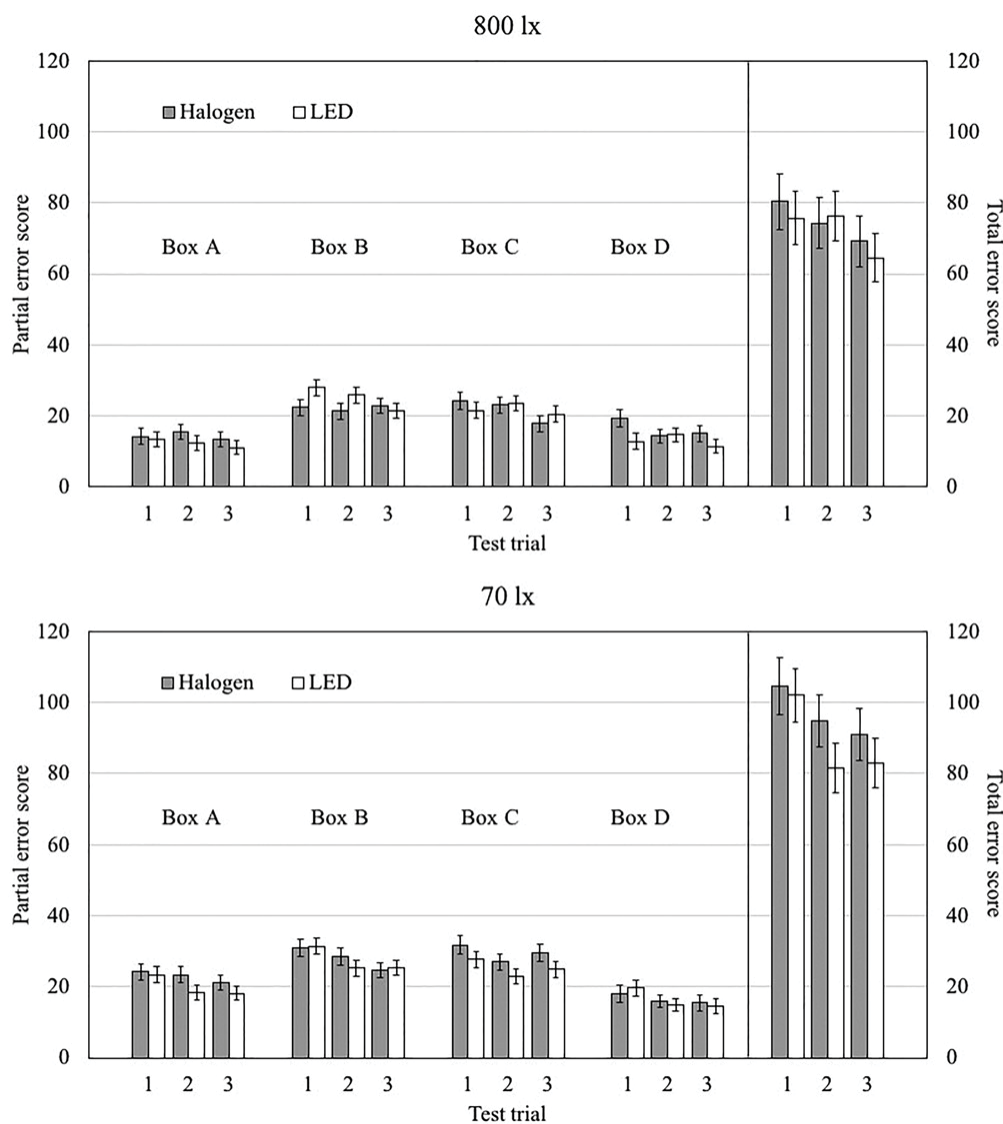


Figure 3. Partial error scores for Box A (red to yellow-green), Box B (yellow-green to blue-green), Box C (blue-green to purple-blue), Box D (purple-blue to red) and total error scores in the Farnsworth-Munsell 100-Hue Test for the first, second, and third test trial under halogen and LED light sources in the high illuminance condition (upper panel) and the low illuminance condition (lower panel). The error bars show the standard errors of the means.

subjects factors and test trial as the within-subject factor revealed a significant main effect of illuminance level, $F(1, 140) = 8.19$, $p < 0.01$, $\eta^2 = 0.06$, reflecting a lower error score in the colour discrimination task in the high illuminance condition compared to the low illuminance condition. This replicates earlier findings (Mayr, Köpper, and Buchner 2013) and serves as a validity check for the present study. Most interestingly, there was no significant main effect of lamp type, $F(1, 140) = 0.60$, $p = 0.44$, $\eta^2 < 0.01$, showing that colour discrimination performance did not vary as a function of whether the halogen or the phosphor-converted LED light sources were used. If anything, there is a slight descriptive advantage of the LED over the halogen light sources.

There was also a significant main effect of the test trial, $F(2, 139) = 14.62$, $p < 0.01$, $\eta^2 = 0.17$. Bonferroni-Holm (Holm 1979) corrected pairwise comparisons (critical alpha levels in brackets) showed that the error scores decreased continuously from the first test trial to the second test trial ($F(1, 140) = 12.33$, $p < 0.01$ [$\alpha = 0.025$], $\eta^2 = 0.08$) and from the second test trial to the third test trial ($F(1, 140) = 5.64$, $p < 0.05$ [$\alpha = 0.05$], $\eta^2 = 0.04$), showing that the FMHT is prone to practice effects. What is more, there was an interaction between test trial and illuminance level, $F(2, 139) = 3.27$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.05$, indicating that the practice effects in the error scores were not uniform across the levels of the illuminance level variable.

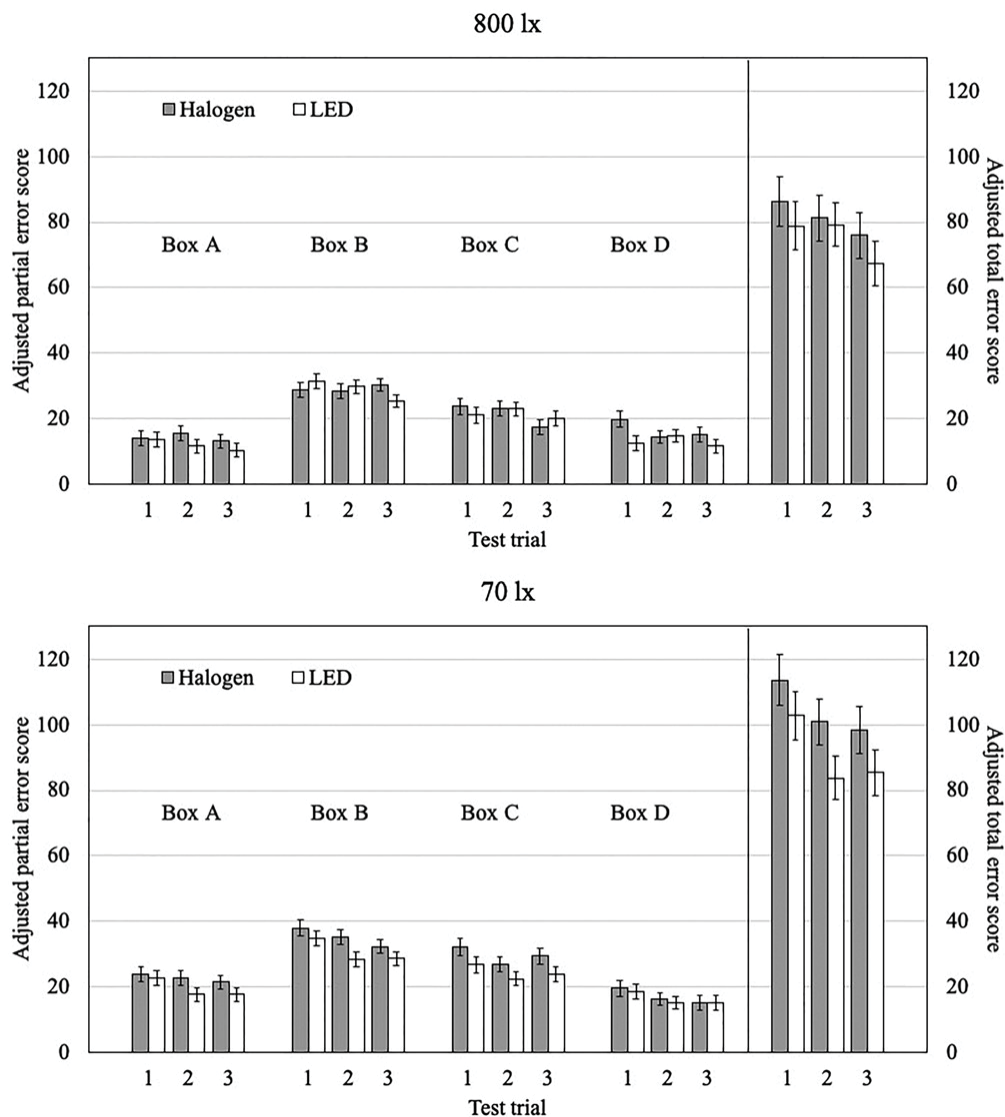


Figure 4. Adjusted partial error scores for Box A (red to yellow-green), Box B (yellow-green to blue-green), Box C (blue-green to purple-blue), Box D (purple-blue to red), and adjusted total error scores in the Farnsworth-Munsell 100-Hue Test for the first, second, and third test trial under halogen and LED light sources in the high illuminance condition (upper panel) and the low illuminance condition (lower panel). The error bars show the standard errors of the means.

None of the other possible interactions were significant ($F(1, 140) = 0.17, p = 0.68, \eta^2 < 0.01$ for the illuminance level by lamp type interaction; $F(2, 139) = 0.14, p = 0.87, \eta^2 < 0.01$ for the lamp type by test trial interaction; and $F(2, 139) = 1.79, p = 0.17, \eta^2 = 0.03$ for the triple interaction).

The mean adjusted partial and adjusted total error scores of the FMHT are shown in Figure 4. A repeated measures MANOVA on the adjusted total error scores with illuminance level and lamp type as the between subject factors and test trial as the within-subject factor yielded results that were parallel to those of the original total error scores ($F(1, 140) = 8.51, p < 0.01, \eta^2 = 0.06$ for the illuminance level variable; $F(1, 140) = 2.20, p = 0.14, \eta^2 = 0.02$ for the lamp type variable; $F(2, 139) = 13.40, p < 0.01, \eta^2 = 0.16$ for the test

trial variable; $F(2, 139) = 4.23, p < 0.05, \eta^2 = 0.06$ for the test trial by illuminance level interaction; $F(1, 140) = 0.33, p = 0.57, \eta^2 < 0.01$ for the illuminance level by lamp type interaction; $F(2, 139) = 0.05, p = 0.95, \eta^2 < 0.01$ for the lamp type by test trial interaction; and $F(2, 139) = 1.13, p = 0.33, \eta^2 = 0.02$ for the triple interaction).

The descriptive statistics for the processing times are depicted in Figure 5. Note that the processing time measurements were lost for one participant, as a consequence of which the following analyses are based on data of $N = 143$ participants. A repeated measures MANOVA on the total processing times revealed a significant main effect for illuminance level, $F(1, 139) = 8.12, p < 0.01, \eta^2 = 0.06$. Processing times were shorter in the high illuminance condition than in

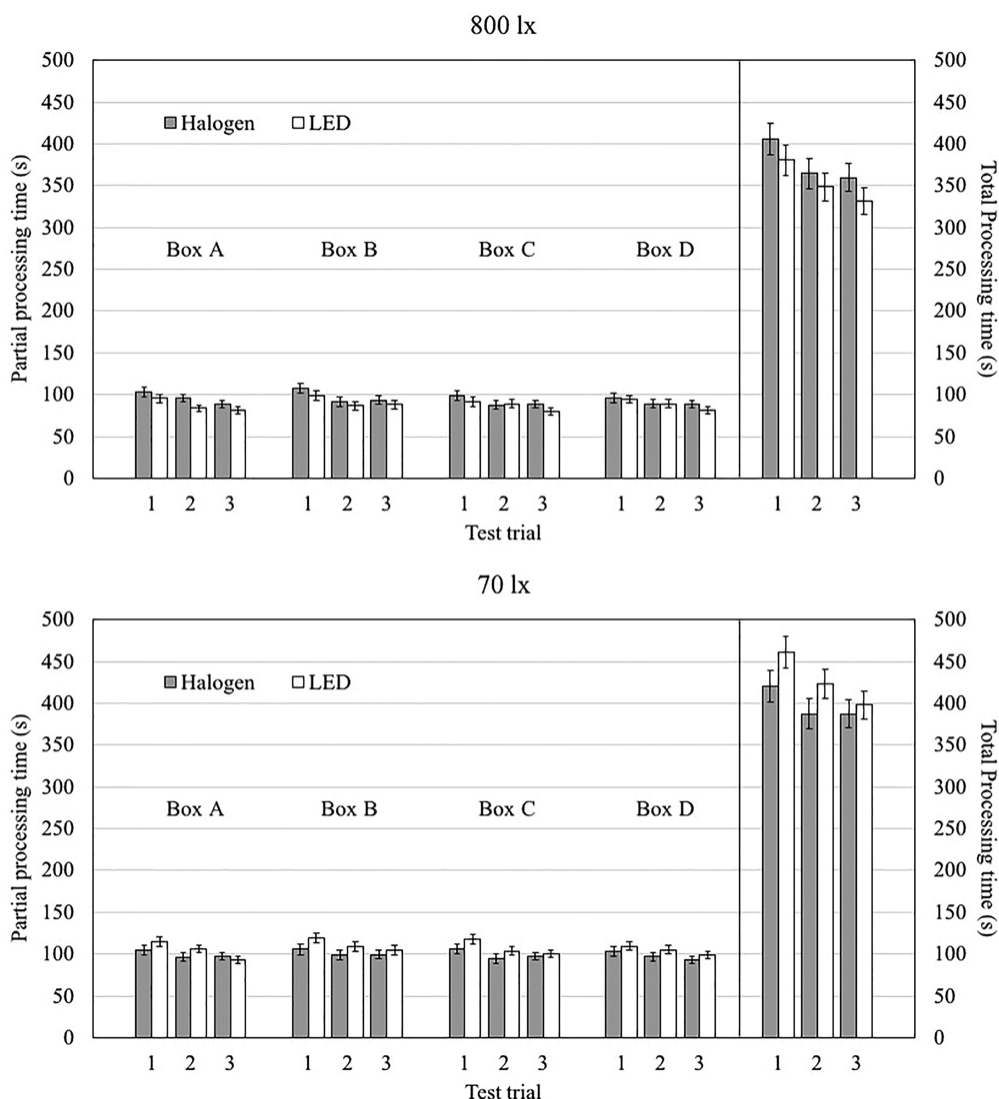


Figure 5. Partial processing times for Box A (red to yellow-green), Box B (yellow-green to blue-green), Box C (blue-green to purple-blue), Box D (purple-blue to red) and total processing times (in seconds) of the Farnsworth-Munsell 100-hue Test for the first, second, and third test trial under halogen and LED light sources in the high illuminance condition (upper panel) and the low illuminance condition (lower panel). The error bars show the standard errors of the means.

the low-illuminance condition. This is parallel to the results obtained for the total error scores. Critically for the present purposes, there was no significant effect of lamp type on the processing times, $F(1, 139) = 0.03$, $p = 0.86$, $\eta^2 < 0.01$. This is also in line with the results obtained for the total error scores and indicates that there is indeed no difference in colour discrimination performance between the examined halogen and phosphor-converted LED light sources.

The third aspect of the processing time results that is parallel to the results obtained for the total error scores is a significant effect of test trial, $F(2, 138) = 31.06$, $p < 0.01$, $\eta^2 = 0.31$. Processing times improved from the first test trial to the second test trial ($F(1, 139) = 53.19$, $p < 0.01$ [$\alpha = 0.025$], $\eta^2 = 0.28$) and from the second test trial to the third test trial ($F(1, 139) = 9.73$, $p < 0.01$ [$\alpha = 0.05$], $\eta^2 = 0.07$). Thus, the practice effects in the

FMHT are not only apparent in the error scores but also in the processing times. Further, there was an interaction between test trial and lamp type, $F(2, 138) = 3.14$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.04$, indicating that the practice effects in the processing times were not uniform across the levels of the lamp type variable.

None of the other possible interactions were significant ($F(1, 139) = 2.46$, $p = 0.12$, $\eta^2 = 0.02$ for the illuminance level by lamp type variable; $F(2, 138) = 0.5$, $p = 0.95$, $\eta^2 < 0.01$ for the illuminance level by test trial variable; and $F(2, 138) = 0.63$, $p = 0.53$, $\eta^2 < 0.01$ for the triple interaction).

Discussion

Replicating earlier results (Knoblauch et al. 1987; Rea and Freyssonier-Nova 2008; Mayr, Köpper, and Buchner

2013) colour discrimination performance was better in the high illuminance condition than in the low illuminance condition. This finding is by no means surprising given those earlier results, but it is nevertheless important. It demonstrates that the measurement procedure used in the present study was sensitive. In other words, without this expected difference between illuminance conditions, we would have to conclude that our measurement procedure was insensitive. A sensitive measurement procedure is, however, a prerequisite without which the central result of the present study would be difficult to interpret.

The central result is that colour discrimination performance was comparable under halogen lighting and the phosphor-converted LED lighting selected for the present study. This result was obtained using a relatively large sample size and thus with a high level of statistical power. The equivalence of colour discrimination performance observed here stands in marked contrast to the finding of reduced colour discrimination performance under compact fluorescent lighting relative to halogen lighting under circumstances that were basically identical to those of the current study (Mayr, Köpper, and Buchner 2013). Importantly, both the phosphor-converted LED lighting used here and the fluorescent lighting used by Mayr, Köpper, and Buchner (2013) had comparable CRI values of about 80, yet colour discrimination performance differed. The CRI thus does not appear to be a good predictor of colour discrimination performance which is in line with the results of prior studies (see for example Boyce 1976; Guo and Houser 2004; Rea and Freyssinier-Nova 2008). The difference between these two light sources is in the spectrum of the emitted radiation: The spectral power distribution of fluorescent lighting is characterised by narrowband peaks (compare Mayr, Köpper, and Buchner 2013) and is thus much more structured than that of the phosphor-converted LED light sources used here (see Figure 1 above). Interestingly, such narrowband peaks are also found in the spectral power distribution of typical RGB-LED light sources which have been shown to lead to reduced colour discrimination performance compared with halogen light sources (Szabó et al. 2007; Mahler, Ezrati, and Viénot 2009; Royer, Houser, and Wilkerson 2012). Thus, it seems that the presence of narrowband peaks in the spectral power distribution is a better predictor of impaired colour discrimination performance than the CRI. It should be noted, however, that the CRI of those RGB-LED light sources was very low with 22 (Mahler, Ezrati, and Viénot 2009), 23 (Royer, Houser, and Wilkerson 2012), and 38 (Szabó

et al. 2007). Thus, while the CRI is not totally uncorrelated with colour discrimination performance it does not seem to be suitable to predict the colour discrimination performance with sufficient sensitivity.

In addition to the RGB-LED light source, Mahler, Ezrati, and Viénot (2009) used two clusters combining phosphor converted LED light sources either with a red LED or with red, green, blue and amber LEDs so that both of these clusters covered the full visible spectrum. Parallel to the present results, colour discrimination performance under these light sources was comparable to performance under a halogen light source (Mahler, Ezrati, and Viénot 2009). Thus, unimpaired colour discrimination performance seems to depend on more or less evenly distributed light mixtures covering the full visible spectrum – or at least most of it – rather than just certain small sections of the visible spectrum. At this point it seems worth noting that the reason for comparing colour discrimination performance under halogen lighting and some other form of lighting here and presumably in the studies mentioned in the previous paragraph is that halogen (or incandescent) lighting has been the de facto standard household lighting for decades and thus represents the standard we are all used to. This does not mean that colour discrimination under halogen (or incandescent) lighting is necessarily optimal. It may well be that at some point a light source is identified which leads to colour discrimination performance that is even better than that under halogen (or incandescent) lighting.

There is conflicting evidence regarding a practice effect in the FMHT. Farnsworth (1957) reported a reduction of 30 % in the error score from the first to the second test, but only a slight reduction from the second to the third test. Similarly, Fine and Koblrick (1980) showed a continuing reduction in the FMHT error score over five consecutive test trials. In contrast, no practice effect was found in experienced participants who had conducted the FMHT at least once before compared to participants with no experience (Boyce and Simons 1977) and in a test-retest design (Anderson and Johnston 2015). One possible explanation of this pattern of results has to do with the sample sizes that were used. For instance, Farnsworth (1957) reported data of $N=196$ participants whereas there were as few as $N=9$ participants in the experiments reported by Boyce and Simons (1977). The results obtained with larger samples tend to be more accurate reflections of the true state in the population. We thus decided to investigate this issue using a relatively large sample. It turned out that the present

results reflect practice effects quite clearly, confirming the initial report by Farnsworth (1957) – including the fact that the practice effect was larger from the first to the second test trial than from the second to the third test trial – and strengthening the assumption that past failures to find practice effects in the FMHT were the results of small sample sizes. As a consequence, the effects of any manipulation that is confounded by practice cannot be interpreted uniquely. However, there is even more reason for caution because the practice effects observed in the present study affected not only the absolute performance level but were not uniform across the illuminance level (in the total error scores) and the lamp type variable (in the processing times). This is an important result because it suggests that practice effects in the FMHT may easily contaminate the effects of other variables that are manipulated orthogonally to the test trial variable such as luminance level or light source.

Conclusion

In sum, then, the present study demonstrates that a common type of phosphor-converted LED light source designed for household lighting can allow for colour discrimination performance comparable to classic halogen lighting. Thus, it appears that this phosphor-converted LED light source impairs only colour appearance (as indicated by a CRI of 80 relative to a CRI of 100 of the halogen light source) but not colour discrimination. This suggests that phosphor-converted LED light sources that share the properties of the LED light source used here may serve as a suitable and more energy efficient alternative to halogen lighting in tasks or environments requiring colour discrimination.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

References

- Anderson, A. J., and A. W. Johnston. 2015. "Test/Retest and Inter-Test Agreement of Color Aptitude Measures." *Color Research and Application* 40(3): 224–231. doi:10.1002/col.21876.
- Bowman, K. J., and B. L. Cole. 1980. "A Recommendation for Illumination of the Farnsworth-Munsell 100-Hue Test." *American Journal of Optometry and Physiological Optics* 57(11): 839–843.
- Boyce, P. R. 1976. "Illuminance, Lamp Type and Performance on a Colour Discrimination Task." *Lighting Research and Technology* 8(4): 195–199. doi:10.1177/14771535760080040401.
- Boyce, P. R. 2014. *Human Factors in Lighting*. 3rd ed. Baton Rouge, LA, USA: CRC Press.
- Boyce, P. R., and R. H. Simons. 1977. "Hue Discrimination and Light Sources." *Lighting Research and Technology* 9(3): 125–140. doi:10.1177/096032717700900301.
- Chang, M. H., D. Das, P. V. Varde, and M. Pecht. 2012. "Light Emitting Diodes Reliability Review." *Microelectronics Reliability* 52(5): 762–782. doi:10.1016/j.microrel.2011.07.063.
- CIE (Commission Internationale de l'Éclairage). 1995. *Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources*. Technical Report No. 13.3-1995. Vienna: CIE.
- Cohen, J. 1988. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. 2nd ed. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Crawford, M. H. 2009. "LEDs for Solid-State Lighting: Performance Challenges and Recent Advances." *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 15(4): 1028–1040. doi:10.1109/JSTQE.2009.2013476.
- Esposito, T. 2019. "An Adjusted Error Score Calculation for the Farnsworth-Munsell 100 Hue Test." *Leukos* 15(2–3): 195–202. doi:10.1080/15502724.2018.1514265.
- Esposito, T., and K. W. Houser. 2019. "A New Measure of Colour Discrimination for LEDs and Other Light Sources." *Lighting Research and Technology* 51(1): 5–23. doi:10.1177/1477153517729200.
- Fairchild, M. D. 2013. *Color Appearance Models*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Farnsworth, D. 1957. *The Farnsworth-Munsell 100-Hue Test for the Examination of Color Vision*. Baltimore, MD: Munsell Color Company.
- Faul, F., E. Erdfelder, A. G. Lang, and A. Buchner. 2007. "G*Power 3: A Flexible Statistical Power Analysis Program for the Social, Behavioral, and Biomedical Sciences." *Behavior Research Methods* 39(2): 175–191. doi:10.3758/BF03193146.
- Fine, B. J., and J. L. Koblrick. 1980. "Field Dependence, Practice, and Low Illumination as Related to the Farnsworth-Munsell 100-Hue Test." *Perceptual and Motor Skills* 51(3_suppl2): 1167–1177. doi:10.2466/pms.1980.51.3f.1167.
- Guo, X., and K. W. Houser. 2004. "A Review of Colour Rendering Indices and Their Application to Commercial Light Sources." *Lighting Research and Technology* 36(3): 183–199. doi:10.1191/1365782804li1120a.
- Holm, S. 1979. "A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure." *Scandinavian Journal of Statistics* 6: 65–70.
- Houser, K., M. Mossman, K. Smet, and L. Whitehead. 2016. "Tutorial: Color Rendering and Its Applications in Lighting." *Leukos* 12(1–2): 7–26. doi:10.1080/15502724.2014.989802.
- Hunt, C. H., J. Quintero, and J. Carreras. 2011. "Appearance Degradation and Chromatic Shift in Energy-Efficient Lighting Devices." *Color and Imaging Conference* 2011(1): 71–75.
- Ishihara, S. 1972. *Tests for Colour-Blindness*. Tokyo: Kanehara Shuppan Company.
- Knoblauch, K., F. Saunders, M. Kusuda, R. Hynes, M. Podgor, K. E. Higgins, and F. M. de Monasterio. 1987. "Age and

- Illuminance Effects in the Farnsworth-Munsell 100-Hue Test." *Applied Optics* 26(8): 1441–1448. doi:10.1364/AO.26.001441.
- Mahler, E., J. J. Ezrati, and F. Viénot. 2009. "Testing LED Lighting for Colour Discrimination and Colour Rendering." *Color Research and Application* 34(1): 8. doi:10.1002/col.20459.
- Mayr, S., M. Köpper, and A. Buchner. 2013. "Comparing Colour Discrimination and Proofreading Performance under Compact Fluorescent and Halogen Lamp Lighting." *Ergonomics* 56(9): 1418–1429. doi:10.1080/00140139.2013.819940.
- O'Brien, R. G., and M. K. Kaiser. 1985. "MANOVA Method for Analyzing Repeated Measures Designs: An Extensive Primer." *Psychological Bulletin* 97(2): 316–333. doi:10.1037/0033-2909.97.2.316.
- Pimputkar, S., J. S. Speck, S. P. DenBaars, and S. Nakamura. 2009. "Prospects for LED Lighting." *Nature Photonics* 3(4): 180–181. doi:10.1038/nphoton.2009.32.
- Rea, M. S., and J. P. Freyssinier-Nova. 2008. "Color Rendering: A Tale of Two Metrics." *Color Research and Application* 33(3): 192–202. doi:10.1002/col.20399.
- Royer, M. P., K. W. Houser, and A. M. Wilkerson. 2012. "Color Discrimination Capability under Highly Structured Spectra." *Color Research and Application* 37(6): 441–449. doi:10.1002/col.20702.
- Smet, K. A. G., W. R. Ryckaert, M. R. Pointer, G. Deconinck, and P. Hanselaer. 2010. "Memory Colours and Colour Quality Evaluation of Conventional and Solid-State Lamps." *Optics Express* 18(25): 26229–26244. doi:10.1364/OE.18.026229.
- Szabó, F., J. Schanda, P. Bodrogi, and E. Radkov. 2007. "A Comparative Study of New Solid State Light Sources." Proceedings of the 26th Session of the CIE. Beijing, China.
- Thornton, W. A. 1972. "Color-Discrimination Index." *Journal of the Optical Society of America* 62(2): 191–194.
- Wyszecki, G., and W. S. Stiles. 1982. *Color science*. Vol. 8. New York: Wiley.

Is red a special issue in the colour discrimination performance under phosphor-converted LED lighting?

Sara Königs^a

Susanne Mayr^b

Axel Buchner^a

^a Heinrich Heine University Düsseldorf, Germany

^b University of Passau, Germany

Running Head: Colour discrimination under phosphor-converted LED lighting

Number of words:

Corresponding Author:

Sara Königs

Institute of Experimental Psychology

Heinrich Heine University Düsseldorf

40225 Düsseldorf, Germany

E-Mail: sara.koenigs@hhu.de

Abstract

Technological advancements lead to the increasing replacement of classic tungsten-based light sources with more efficient alternatives, primarily based on light emitting diode (LED) technology. In contrast to halogen lighting, LED lamps are typically associated with a reduced energy towards the long-wavelength end of the visible spectrum, possibly affecting the discriminability of red colours. We conducted a user-centred study comparing colour discrimination performance under a common type of phosphor-converted LED lamp to halogen lighting. Colour discrimination performance did not differ between the phosphor-converted LED lamp and halogen lighting (Experiment 1) even when the colour discrimination test was modified to be more sensitive to the specific weaknesses of the phosphor-converted LED lamp in the long wavelength range of the visible spectrum (Experiment 2). This result is incompatible with the assumption that the reduced energy of phosphor-converted LED lamps towards the long-wavelength end of the visible spectrum may impair colour discrimination performance for red colours.

Keywords: colour discrimination; Farnsworth-Munsell 100-Hue Test; halogen; LED; lighting.

1. Introduction

Colour discrimination is an important aspect of colour rendition (Houser, et al. 2013) which is influenced by the lighting condition. Applying a frequently used test of colour discrimination, the Farnsworth-Munsell 100-Hue Test (FMHT; Farnsworth 1957), to common household light sources, better colour discrimination has previously been shown under halogen compared to compact fluorescent (Mayr, et al. 2013) and RGB-LED lighting (Royer, et al. 2012). Yet, colour discrimination did not seem to differ between halogen and phosphor-converted LED lighting (Königs, et al. 2019). Currently, phosphor-converted LED lamps are the most widely used type of LED light sources (Emetere, et al. 2019; Pattison, et al. 2018) which is why we focused on this type of light source in the present study.

The FMHT uses 85 colour caps presented in rows distributed across four separate trays: a red-green tray (from red to yellow-green), a green-blue tray (from yellow-green to blue-green), a blue-violet tray (from blue-green to violet-blue), and a violet-red tray (from violet-blue to red). From a clinical perspective, the assignment of some red and some green caps to one tray (the red-green tray) is useful to identify individuals suffering from red-green colour vision deficiencies which is one of the purposes of the FMHT (Farnsworth 1957). However, assigning some red caps to the red-green tray and other red caps to the violet-red tray may limit the number of possible errors within the range of red hues because not all red hues can potentially be confused with all other red hues but only with some of them. This may create a problem in some applications. Specifically, phosphor-converted LED lamps tend to emit relatively little energy at the long wavelength end of the visible spectrum (Figure 1) and, thus, render red colours poorly (Ohno 2005). This is indicated by a relatively low value of the colour rendering index R_9 (Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) 1995, see Table 1). Thus, the question arises, whether phosphor-converted LED lamps impair selectively the discriminability within the range of red colours for which the original FMHT may not be particularly sensitive.

To address this issue, we used two versions of the FMHT: the original version (Experiment 1) and a modified version (Experiment 2) to compare a phosphor-converted LED lamp with halogen lighting. In the modified version of the FMHT, we reassigned the colour caps to the four trays such that all red caps were presented in one tray (caps 75-11). This enabled a direct comparison of all red caps, thus increasing the chances for participants to produce colour discrimination errors within red hues. Therefore, we expected a larger error score for the caps contained in the red tray in

Experiment 2 compared to the corresponding caps (distributed over two trays) in Experiment 1. Moreover, if the discriminability of red colours suffered from the specific weaknesses of phosphor-converted LED lighting in the long wavelength end of the visible spectrum, more errors should be committed under the phosphor-converted LED lamp than under halogen lighting.

For validation purposes of the modified FMHT measurement in Experiment 2, we added a compact fluorescent lamp (CFL) which is known to impair colour discrimination relative to halogen lighting primarily with green colours (Mayr, et al. 2013). If the measurement procedure with the modified FMHT is valid, then the CFL associated impairment in color discrimination will be observed in Experiment 2 in a direct comparison with halogen lighting as well.

We also addressed ageing effects in phosphor-converted LED lamps. Specifically, a degradation of phosphor had been shown after 5,000 h of operation time, affecting the spectral power distribution and, thus, the light source's efficiency, CCT, and colour rendering (Hunt, et al. 2011). Hence, we planned to investigate colour discrimination under commercially available phosphor-converted LED lamps with 0 h and with 5,000 h of operation time (henceforth LED-new and LED-aged, respectively) in Experiment 1. However, as can be seen from Figure 1, the spectral power distributions of the LED-new and the LED-aged were rather similar which is itself a remarkable result given the state of technology just a few years earlier (Hunt, et al. 2011). To rule out that such subtle differences in the spectral power distribution cause a difference in colour discrimination performance, we conducted a preliminary analysis revealing no difference between the LED-new and the LED-aged condition, $F(1, 156) = 0.11, p = .74, \eta_p^2 < 0.01$. Therefore, we combined the LED-new and the LED-aged data into one group for the analyses described in the results section.

2. Materials and Methods

We collected data of 238 (54 male; age: 17-50 years, $M = 22, SD = 4.6$) and 220 (48 male; age: 16-46 years, $M = 23, SD = 4.4$) participants in Experiments 1 and 2, respectively. All participants signed a written informed consent and were screened for normal colour vision with the short form of the Ishihara's Tests for colour-blindness with 11 plates (Ishihara 1972). In both experiments, three different lighting conditions constituted the between-subjects factor. The lighting conditions were a halogen lamp and two phosphor-converted LEDs of the same type but with different operation times of zero hours (LED-new) and 5,000 hours (LED-aged) prior to the

experiment in Experiment 1. In Experiment 2, two of the lighting conditions were the same types of halogen and phosphor-converted LED-new lamps used in Experiment 1. The third lighting condition was a CFL of the type used in (Mayr, et al. 2013). The original FMHT (Experiment 1) and the modified FMHT (Experiment 2) were conducted in two identically build testing chambers which were shielded against light incidence from external light sources (Figure 2). The chambers were equipped with a table, a fixture for the lamps which were hidden in a metal lamp shade with a white inner coating, a chin rest (42 cm above the tabletop), and a height adjustable office chair. Participants had 5 minutes to adapt to the lighting conditions. During that period, participants filled out a demographic questionnaire and read the instructions for the FMHT. Then, participants sorted the colour caps of the FMHT. The trays were presented in random order. The error scores in the FMHT were calculated using an adjusted error score based on a lamp specific scoring procedure (Esposito 2019; Esposito and Houser 2019). Subsequently, participants rated the lighting conditions regarding preference, but these data are not relevant for the purpose of the present paper.

3. Results

To examine whether our modification of the FMHT increased the sensitivity of the FMHT in the red colour range, we conducted a 2×2 ANOVA with experiment (Experiment 1 vs. Experiment 2) and lamp type (LED vs. halogen) as between-subjects factors and the sum of the errors obtained with the red colour caps (caps 75-11) as dependent variable. This error score was indeed significantly larger in Experiment 2 than in Experiment 1, $F(1, 299) = 18.75, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.06$, indicating increased chances for participants to produce colour discrimination errors in the modified version of the FMHT compared to its original version. Contrary to our expectation, there was no effect of lamp type, $F(1, 299) = 1.14, p = 0.29, \eta_p^2 < 0.01$ and no interaction between both variables, $F(1, 299) = 0.69, p = 0.41, \eta_p^2 < 0.01$, indicating a comparable discriminability of red colours under halogen and LED lighting.

A repeated measures MANOVA with light sources as between-subjects factor and tray type as within-subject factor was used for the individual analyses of Experiments 1 and 2 (Table 2). Follow-up tests of significant results were conducted with Bonferroni-Holm (Holm 1979) corrected pairwise comparisons (Table 3). The descriptive statistics are shown in Figure 3. There was a significant effect of lamp type in Experiment 2 but not in Experiment 1. In Experiment 2, participants made significantly more errors under the CFL than under the LED and the halogen

lamps, whereas the error scores under the LED lamp and the halogen lamp did not differ. There was a significant effect of tray type in both Experiments 1 and 2. Finally, the interaction between tray type and lamp type was nonsignificant in Experiment 1, but significant in Experiment 2 due to the fact that the error score in the orange-green tray was higher under the CFL than under the halogen and the LED lamp. This closely matches the findings of Mayr et al. (2013). Note that the statistical results obtained with the adjusted scoring procedure proposed by Esposito and Houser (2019) were parallel to those obtained with the original scoring procedure according to Farnsworth (1957).

4. Discussion

First, it was possible to replicate earlier results showing that colour discrimination does not differ between a typical phosphor-converted LED lamp and halogen lighting (Experiments 1), even with a modified version of the FMHT that was more sensitive than the original version to the discrimination of red hues and thus to the supposed weakness of phosphor-converted LED lamps at the long-wavelength end of the visible spectrum (Experiment 2). This finding supports the results of a prior study showing no association between the degree of red saturation and colour discrimination performance using the original version of the FMHT (Esposito and Houser 2019). The LED lamps used in the present study emit very little spectral power at the long-wavelength end of the visible spectrum. We therefore had assumed that the perception of red objects under the phosphor-converted LED lamp should be degraded, possibly affecting the discriminability of red colours. This hypothesis must be rejected. Contrary to our assumption, colour discrimination in the red tray of the modified FMHT did not differ between the LED lamp and halogen lighting. Importantly, this non-difference cannot be attributed to the FMHT being an insensitive measurement instrument in that it clearly indicated impaired colour discrimination performance under a typical CFL (Experiment 2). Hence, we conclude that the LED lamps' small amounts of electromagnetic radiation at the long-wavelength end of the visible spectrum are sufficient to support colour discrimination at a level that is typical of a halogen lamp with comparatively large levels of radiation emitted in that section of the spectrum.

A limitation of the results obtained here could be the diversity of phosphor-converted LED light sources available on the lighting market. Whereas the spectral power distributions of halogen light sources are extremely similar among manufacturers, the spectral power distributions of phosphor-converted LED lamps vary. Therefore, Kokka *et al.* (2018) proposed eight reference

spectral power distributions for white LED sources with different CCTs incorporating the measured spectra of 1,516 LED products. A goodness-of-fit coefficient of $GFC = 0.999$ (Hernández-Andrés, et al. 2001; Romero, et al. 1997) indicated a high level of accordance between the spectral power distribution of the phosphor-converted LED used in our study and the proposed reference spectral power distribution of comparable CCT. Therefore, it seems highly likely that similar results will be obtained with other phosphor-converted LEDs of comparable CCT.

Second, the change in the spectral power distribution of the phosphor-converted LED light source after 5,000 hours of use was dramatically smaller than what we had anticipated based on prior results (Hunt, et al. 2011, compare Figure 1). At least for the type of LED lamp used here, phosphor degradation with increasing operation time does no longer seem to be an issue. Moreover, the small shifts observed in the spectral power distributions of our aged phosphor-converted LED lamps clearly did not affect colour discrimination performance which was basically identical to that observed under LEDs with zero hours of operation time prior to the experiment.

Taken together, the present results suggest that the advantages of typical phosphor-converted LED lamps in terms of energy efficiency and durability do not come at the cost of reduced colour discrimination. In particular, even the rather limited spectral emission in the long wavelength range of the phosphor-converted LED lamp seems to be sufficient for the discrimination of red hues.

Table 1. Colorimetric and photometric properties of the light sources used in Experiments 1 and 2.

Experiment 1									
Light source	Mean illuminance (lx)	CIE 13.3-1995		ANSI/IES TM-30-18		GAI	CCT (K)	CC (x, y)	PW (nm)
		R _a	R ₉	R _f	R _g				
Halogen	800.19	100	99	99	99	49	2750	0.4490, 0.4103	780
LED-new	801.13	81	4	84	95	45	2738	0.4539, 0.4045	603
LED-aged	800.63	81	3	84	95	45	2714	0.4568, 0.4068	603
Experiment 2									
Light source	Mean illuminance (lx)	CIE 13.3-1995		ANSI/IES TM-30-18		GAI	CCT (K)	CC (x, y)	PW (nm)
		R _a	R ₉	R _f	R _g				
Halogen	800.39	100	99	99	99	49	2750	0.4499, 0.4106	780
LED	799.35	81	8	84	95	45	2790	0.4513, 0.4064	603
Compact fluorescent	801.22	81	-3	77	100	40	2776	0.4630, 0.4264	612

Note: LED-new (LED with zero hours of operation time prior to the experiment) and LED-aged (LED with 5,000 hours of operation time prior to the experiment) were combined to one condition (LED) for the statistical analysis of the colour discrimination performance. FMHT = Farnsworth-Munsell 100-Hue Test, R_a = CIE General Colour Rendering Index, R₉ = CIE Special Colour Rendering Index for red, R_f = IES Fidelity Index, R_g = IES Gamut Index, GAI = Gamut Area Index, CCT = Correlated Colour Temperature, CC = Chromaticity Coordinates, PW = Peak wavelength.

Table 2. MANOVA results obtained in Experiments 1 and 2.

Experiment 1					
MANOVA	Error score				
	df_{Num}	df_{Den}	F	p	η_p^2
Lamp type	1	236	0.07	0.79	< 0.01
Tray type	3	234	196.71	< 0.01	0.72
Lamp type \times tray type	3	234	0.21	0.89	< 0.01
Experiment 2					
MANOVA	Error score				
	df_{Num}	df_{Den}	F	p	η_p^2
Lamp type	2	217	5.10	< 0.01	0.05
Tray type	3	215	299.75	< 0.01	0.81
Lamp type \times tray type	6	432	11.77	< 0.01	0.14

Note: df_{Num} = numerator degrees of freedom, df_{Den} = denominator degrees of freedom, η_p^2 = partial eta squared. Significant p -values are typeset in bold.

Table 3. Post-hoc pairwise comparisons of significant results obtained in Experiments 1 and 2.

Experiment 1						
Pairwise comparisons	Error score					
<i>Tray</i>	<i>df</i> _{Num}	<i>df</i> _{Den}	α	<i>F</i>	<i>p</i>	η_p^2
Red-green vs. green-blue	1	236	0.017	376.77	< 0.01	0.62
Red-green vs. blue-violet	1	236	0.013	108.95	< 0.01	0.32
Red-green vs. violet-red	1	236	0.050	0.25	0.62	< 0.01
Green-blue vs. blue-violet	1	236	0.025	64.96	< 0.01	0.22
Green-blue vs. violet-red	1	236	0.010	489.69	< 0.01	0.68
Blue-violet vs. violet-red	1	236	0.008	152.59	< 0.01	0.39
Experiment 2						
Pairwise comparisons	Error score					
<i>Lamp</i>	<i>df</i> _{Num}	<i>df</i> _{Den}	α	<i>F</i>	<i>p</i>	η_p^2
LED vs. halogen	1	145	0.050	0.17	0.68	< 0.01
LED vs. CFL	1	147	0.017	15.38	< 0.01	0.10
Halogen vs. CFL	1	142	0.025	5.24	0.02	0.04
<i>Tray</i>						
Red vs. orange-green	1	217	0.025	103.29	< 0.01	0.32
Red vs. green-blue	1	217	0.017	81.68	< 0.01	0.27
Red vs. blue-pink	1	217	0.013	75.38	< 0.01	0.26
Orange-green vs. green-blue	1	217	0.050	4.84	0.03	0.02
Orange-green vs. blue-pink	1	217	0.008	622.30	< 0.01	0.74
Green-blue vs. blue-pink	1	217	0.010	361.16	< 0.01	0.63

Note: df_{Num} = numerator degrees of freedom, df_{Den} = denominator degrees of freedom, α = Bonferroni-Holm (Holm 1979) corrected critical alpha level, η_p^2 = partial eta squared. Significant *p*-values are typeset in bold.

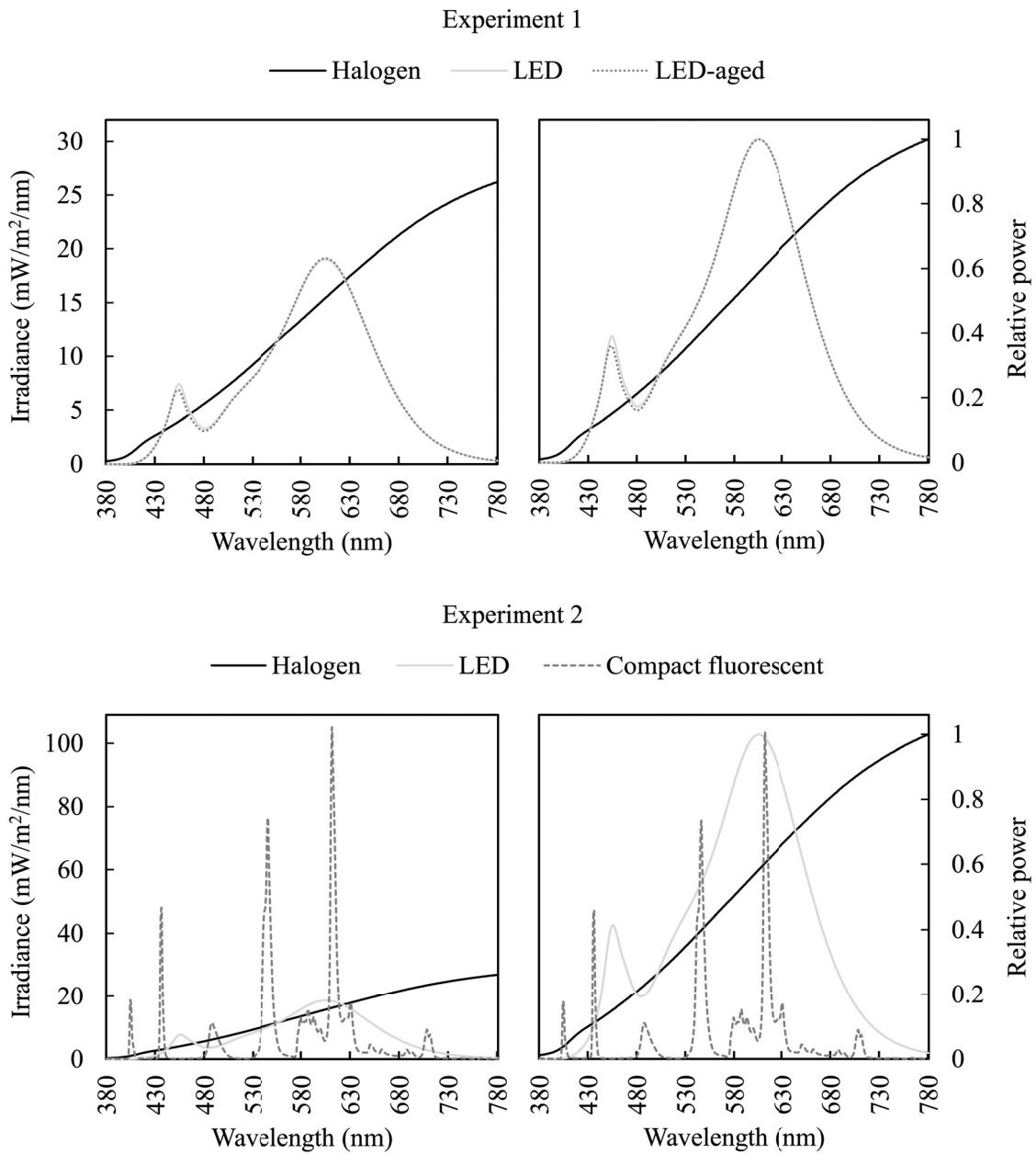


Figure 1. Irradiance (left) and relative spectral power distributions (right) of the lamps used in Experiment 1 (upper panel) and Experiment 2 (lower panel) as a function of wavelength in the visible spectrum. Halogen = halogen lamp with 57 W input power (Osram Halogen Classic A, Osram GmbH, Augsburg, Germany), LED = phosphor-converted LED with 8 W input power (Osram LED Star Classic A), LED-aged = phosphor-converted LED with 8 W input power and 5,000 hours of operation time (Osram LED Star Classic A), compact fluorescent = compact fluorescent lamp with 15 W input power (Osram Dulux Classic A).

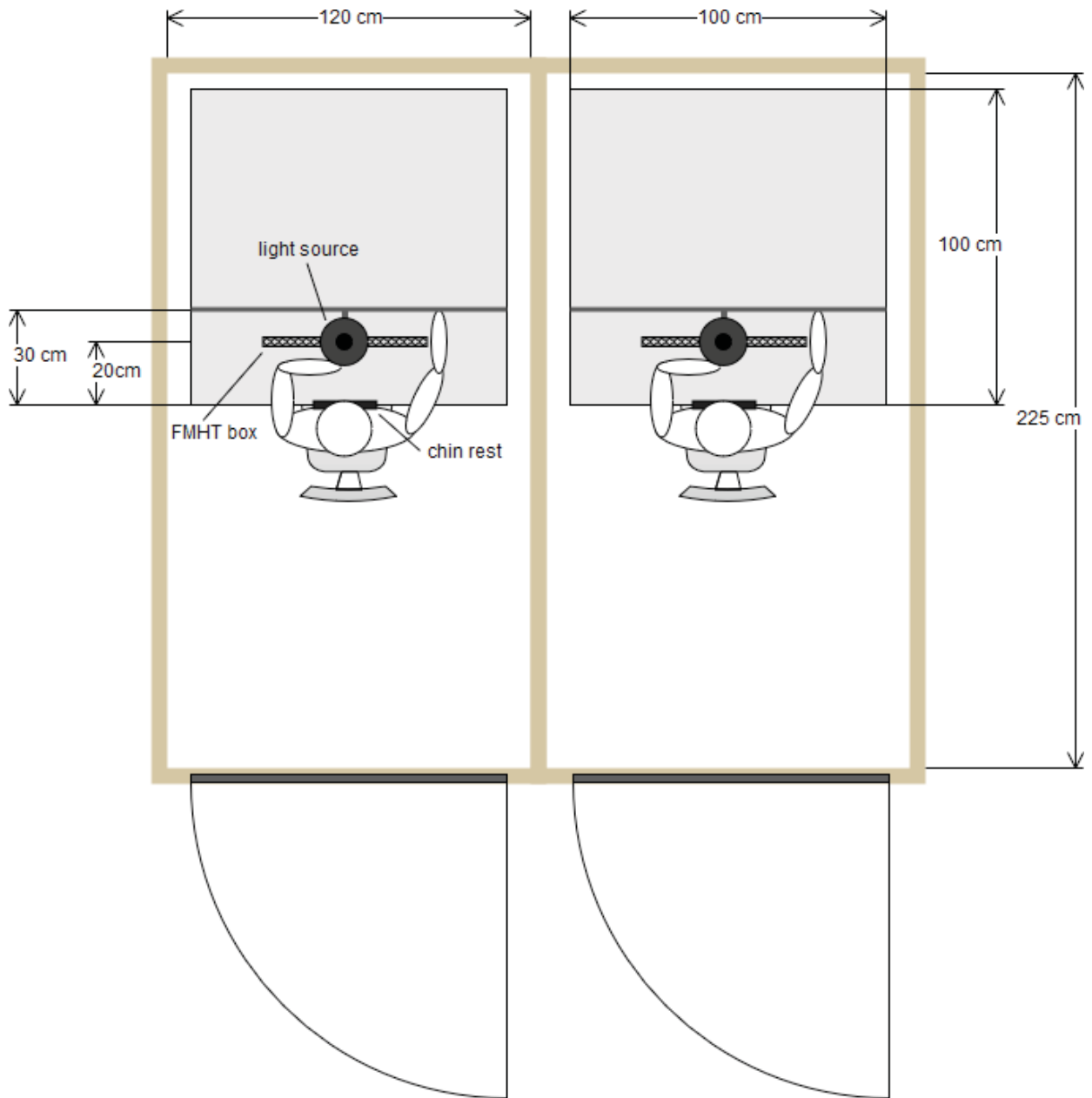


Figure 2. Experimental setup used in Experiments 1 and 2 for the Farnsworth-Munsell 100-Hue Test (FMHT). Each of the two identically built testing chambers contained a chair, a table, a chin rest, and a height adjustable tripod with a lamp socket covered with a metal lamp shade containing the light source. The FMHT was placed on the table directly under the light source in front of the participants.

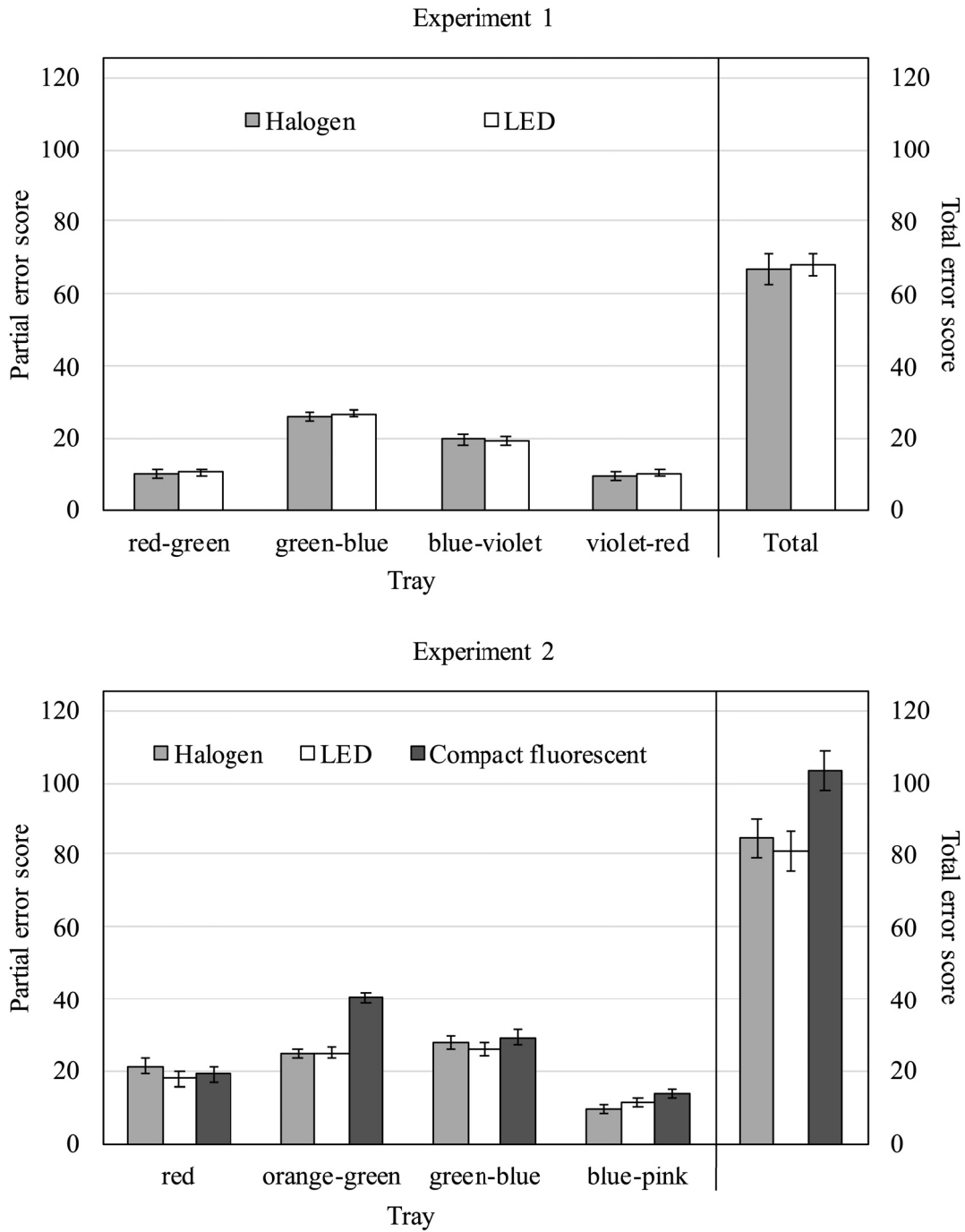


Figure 3. Partial error scores (left) and total error scores (right) in the Farnsworth-Munsell 100-Hue Test in Experiment 1 (upper panel) and Experiment 2 (lower panel). For simplicity, the trays are labelled with reference to the corresponding colour range. Halogen = halogen lamp with 57 W input power (Osram Halogen Classic A, Osram GmbH, Augsburg, Germany), LED = phosphor-converted LED with 8 W input power (Osram LED Star Classic A), compact fluorescent = compact fluorescent lamp with 15 W input power (Osram Dulux Classic A). The error bars represent the standard errors of the means.

Funding

This research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Declaration of conflicting interests

The Authors declare that there is no conflict of interest.

References

Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). 1995. Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources. Vienna: CIE. Technical Report 13.3.

Emetere ME, Abodunrin JT, Fayomi OO, Iroham CO. 2019. Brief review on the physics of solid-state lighting device. *Journal of Physics: Conference Series* 1378:022038. doi: 10.1088/1742-6596/1378/2/022038.

Esposito T. 2019. An Adjusted Error Score Calculation for the Farnsworth-Munsell 100 Hue Test. *Leukos* 15 (2-3):195-202. doi: 10.1080/15502724.2018.1514265.

Esposito T, Houser KW. 2019. A new measure of colour discrimination for LEDs and other light sources. *Lighting Research and Technology* 51 (1):5-23. doi: 10.1177/1477153517729200.

Farnsworth D. 1957. The Farnsworth-Munsell 100-Hue test for the examination of color vision. Baltimore (MD) (The Farnsworth-Munsell 100-Hue test for the examination of color vision): Munsell Color Company.

Hernández-Andrés J, Romero J, Lee RL. 2001. Colorimetric and spectroradiometric characteristics of narrow-field-of-view clear skylight in Granada, Spain. *JOSA A* 18 (2):412-420. doi: 10.1364/JOSAA.18.000412.

Holm S. 1979. A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scandinavian journal of statistics* 6 (2):65-70.

Houser KW, Wei M, David A, Krames MR, Shen XS. 2013. Review of measures for light-source color rendition and considerations for a two-measure system for characterizing color rendition. *Optics Express* 21 (8):10393-10411. doi: 10.1364/OE.21.010393.

Hunt CH, Quintero J, Carreras J. 2011. Appearance Degradation and Chromatic Shift in Energy-Efficient Lighting Devices. *Color and Imaging Conference 2011* (1):71-75.

Ishihara S. 1972. Tests for Colour-Blindness. Tokyo (Tests for Colour-Blindness): Kanehara Shuppan Company.

Kokka A, Poikonen T, Blattner P, Jost S, Ferrero A, Pulli T, Ngo M, Thorseth A, Gerloff T, Dekker P, Stuker F, Klej A, Ludwig K, Schneider M, Reiners T, Ikonen E. 2018. Development of white LED illuminants for colorimetry and recommendation of white LED reference spectrum for photometry. *Metrologia* 55 (4):526-534. doi: 10.1088/1681-7575/aacae7.

Königs S, Mayr S, Buchner A. 2019. A common type of commercially available LED light source allows for colour discrimination performance at a level comparable to halogen lighting. *Ergonomics* 62 (11):1462–1473. doi: 10.1080/00140139.2019.1663940.

Mayr S, Köpper M, Buchner A. 2013. Comparing colour discrimination and proofreading performance under compact fluorescent and halogen lamp lighting. *Ergonomics* 56 (9):1418-1429. doi: 10.1080/00140139.2013.819940.

Ohno Y. 2005. Spectral design considerations for white LED color rendering. *Opt Eng* 44 (11):111302-1-111302-9. doi: 10.1117/1.2130694.

Pattison PM, Hansen M, Tsao JY. 2018. LED lighting efficacy: Status and directions. *Comptes Rendus Physique* 19 (3):134-145. doi: 10.1016/j.crhy.2017.10.013.

Romero J, Garcia-Beltrán A, Hernández-Andrés J. 1997. Linear bases for representation of natural and artificial illuminants. *JOSA A* 14 (5):1007-1014. doi: 10.1364/JOSAA.14.001007.

Royer MP, Houser KW, Wilkerson AM. 2012. Color discrimination capability under highly structured spectra. *Color Res Appl* 37 (6):441-449. doi: 10.1002/col.20702.

LED-based light sources optimised for high colour rendition from an end users' perspective

Sara Königs¹

Susanne Mayr²

Axel Buchner¹

¹Heinrich Heine University Düsseldorf, Germany

²University of Passau, Germany

Running Head: LED lighting from an end users' perspective

Corresponding Author:

Sara Königs

Department of Experimental Psychology

Heinrich Heine University Düsseldorf

40225 Düsseldorf, Germany

E-Mail: sara.koenigs@hhu.de

Abstract

Light emitting diode (LED) technology is continuously developing, leading to the current transition from simple phosphor-converted LED lamps to LED lamps optimised for high colour rendition in residential lighting. To assess whether such optimised phosphor-converted LED lamps may fulfil the end users' needs better than simple phosphor-converted LED lamps we asked participants to rank two particular brands of phosphor-converted LED lamps optimised for high colour rendition, a typical simple phosphor-converted LED lamp and a halogen lamp for pleasantness, naturalness and purchase preference. The results of two experiments suggest that phosphor-converted LED lamps optimised for high colour rendition have the potential to outperform simple phosphor-converted LED lamps and even to measure up to traditional halogen lighting in terms of user preference. However, this is not the case for all phosphor-converted LED lamps optimised for high colour rendition. From the end users' perspective, unfortunately, it is currently difficult if not impossible to choose the LED light source that one would prefer most.

Practitioner Summary

Considering innovations in LED technology, we assessed the potential of LED lamps optimised for high colour rendition to outperform their predecessors regarding user preference. In one of two conditions, these optimised LED lamps outperformed a simple phosphor-converted LED lamp and measured up to halogen lighting.

Keywords

phosphor-converted LED; halogen lamp; preference; naturalness; end user acceptance.

Introduction

The global market share of LED-based light sources designed for residential lighting purposes reached 40 % in 2018, which was comparable to that of less-efficient fluorescent light sources. This share is expected to increase up to 80 % by 2030 (International Energy Agency 2019). Within this market share, a shift seems to be taking place from simple LED-based light sources primarily designed as more energy efficient replacements of other light sources to LED-based light sources designed for optimising the appearance of object colours. The question we tried to answer in the present study is whether these optimised LED-based light sources outperform simple LED-based light sources in terms of user preference and if so, whether an easy-to-use metric is currently available that consumers can use to choose a light source they will likely prefer over other light sources.

Not surprisingly, the acceptance of new lighting technologies partially depends on the purchase price (Kumar, Jain, and Bansal 2003; Hicks and Theis 2014). Apart from the price, properties such as energy efficiency, lifetime and colour rendition are considered important for end users' acceptance (De Almeida et al. 2014). Given that LED-based light sources by now outperform other household light sources in terms of energy efficiency and lifetime (Pust, Schmidt, and Schnick 2015), the remaining issue is colour rendition (Huang et al. 2018). Here we refer to colour rendition as the influence of the light source on the appearance of object colours (Wei et al. 2015). For colour rendition, the spectral power distribution of a light source is crucial. The spectral power distribution of a light source is defined as the intensity of electromagnetic radiation emitted at each wavelength in the visible wavelengths range between 380 and 780 nm (Boyce 2014). The appearance of object colours is a function of the spectral power distribution of the light source and the spectral reflectance function of the illuminated object (Houser et al. 2016). The spectral power incident on an object's surface is partially reflected by the object, leading to the perception of colour when reaching the observer's eye (Boyce 2014). The human visual system reacts to "short" (around 450 nm), "medium" (around 530 nm) and "long" wavelengths (above 620 nm) with sensations of blue, green and red, respectively (Houser et al. 2016).

The spectral power distributions of LED-based light sources are highly variable. LED-based light sources can be either constructed as phosphor-converted LED lamps or as multi-chip LED lamps or through a combination of both approaches (Crawford 2009). At this stage, the most widely used approach is phosphor conversion (Morgan Pattison, Hansen, and Tsao 2018; Emeter et al. 2019). Therefore, we focused on phosphor-converted LED lamps in the present study. Simply put,

phosphor-converted LED lamps use a single LED chip emitting short-wavelength radiation in combination with one or more phosphors that transform a portion of that radiation and emit it at longer wavelengths (Boyce 2014). LED lamps are referred to as “blue-pumped” or “violet-pumped” depending on how short the dominant wavelength of the radiation emitted by the LED chip is. There are several possible LED-chip and phosphor combinations which is why the spectral power distributions emitted by variants of LED-based light sources are diverse.

The complex information included in the spectral power distribution is commonly converged to a few single measures. Internationally used measures are the correlated colour temperature (CCT) and the colour rendering index (CRI; Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) 1995). While the CCT is used to describe the appearance of the light itself, shifting from “warm” (yellow-red) to “cold” (blue) as the CCT increases, the CRI is used to describe the appearance of object colours under a light source. The CRI R_a compares the rendition of eight test object colours illuminated by a test light source to a reference standard of the same CCT (Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) 1995). The higher the degree of accordance of the test object colours rendered by the test light source and the test object colours rendered by the reference standard, the higher is the CRI R_a , with a CRI R_a of 100 indicating complete accordance. Interestingly, several studies examining LED-based light sources have shown that CRI R_a is poorly correlated with visual appreciation (Narendran and Deng 2002; Bodrogi et al. 2004; Szabó et al. 2007; Jost-Boissard, Fontoynt, and Blanc-Gonnet 2009; Dangol et al. 2013; Baniya et al. 2015), colour discrimination performance (Königs, Mayr, and Buchner 2019) and subjective naturalness rankings (Dangol et al. 2013; Islam et al. 2013), suggesting that CRI R_a may not be an appropriate metric to predict end users' preference. Nonetheless, apart from the CCT, the CRI R_a is usually the only metric end users can refer to when choosing a light source, at least if they are no lighting experts.

In contrast to non-expert end users, whom we focus on in the present paper, lighting experts have various metrics at their disposal which, based on theoretical models, quantify multiple aspects of a light source. While these metrics enable a comprehensive model-based description of the light emitted by a light source, their suitability as predictors of end user preferences needs further empirical validation in the light of the availability of new LED-based light sources designed for optimising the appearance of object colours.

The purpose of the present study was to compare end user preferences for (1) a halogen lamp which served as the traditional household standard, (2) a typical simple phosphor-converted LED lamp and (3) each of two particular brands of phosphor-converted LED lamps optimised for high

colour rendition. Selecting a halogen lamp is straightforward because all halogen light sources have the same construction principle in that they operate through the heating of a tungsten filament and emit radiation throughout the whole visible wavelengths range (Guo and Houser 2004) with continuously increasing intensity towards the long end of the visible spectrum (Figure 1). Also, the CRI R_a of tungsten-based halogen light sources approximates 100. As a consequence, all halogen lamps sharing the same CCT can be thought of as representative examples of the same type of light source. Our halogen lamp had a CCT of 2700 K which is very typical for this type of light source.

Selecting a simple phosphor-converted LED lamp for the purpose of comparison is less straightforward because the features of a representative exemplar of this category are not obvious. We considered the following features to be crucial: First, the simple phosphor-converted LED lamp should have a CCT of 2700 K, corresponding to the CCT of the halogen lamp. Second, the simple phosphor-converted LED lamp should have a CRI R_a of about 80 which characterises the majority of the commercially available LED light sources (Nardelli et al. 2017). Third, the spectral power distribution of the simple phosphor-converted LED lamp should closely fit the representative spectral power distribution for LED-based light sources with a CCT of 2700 K proposed by Kokka et al. (2018). The goodness of fit coefficient (GFC) described in Romero et al. (1997) was used as a measure of the similarity between the representative spectral power distribution and the spectral power distribution of the simple phosphor-converted LED used in the present study (a blue-pumped LED lamp henceforth referred to as “BLED80”; for details see Table 1). The GFC ranges from 0 to 1 with 1 indicating perfect accordance (Romero, García-Beltrán, and Hernández-Andrés 1997; Hernández-Andrés, Romero, and Lee 2001). In our case a GFC = .999 indicated a high level of accordance.

In each of the two experiments of the present study, three light sources illuminated a set of natural objects comprising blueberries, a green pepper, a yellow pepper, a carrot and a red pepper. Participants ranked the light sources on three dimensions: pleasantness, naturalness and purchase preference. Both experiments included a halogen lamp and the BLED80 as a representative example of simple phosphor-converted LED lamps and one of two phosphor-converted LED lamps optimised for high colour rendition. In Experiment 1 the optimised LED lamp was a blue-pumped phosphor-converted LED lamp with a CRI R_a of 96 (henceforth BLED96; for details see Table 1). In Experiment 2 the optimised LED lamp was a violet-pumped phosphor-converted LED lamp with a CRI R_a of 97 (henceforth VLED97; for details see Table 1). Both the BLED96 and the VLED97 emit a larger amount of radiation at longer wavelengths than the BLED80 (Figure 1). A relatively

larger amount of radiation at longer wavelengths has already been found to be associated with higher preference ratings (Jost-Boissard, Fontoynt, and Blanc-Gonnet 2009; Jost-Boissard, Avouac, and Fontoynt 2015). Based on these results one would expect higher rankings for both the BLED96 and the VLED97 compared to the BLED80 in Experiments 1 and 2, respectively. In contrast, it was not clear whether BLED96 and the VLED97 would be equal in terms of preference rankings to the halogen lamp they are intended to replace in residential lighting. However, given that most people are not able to notice colour shifts with light sources having a CRI $R_a > 95$ (Houser et al. 2016) we decided to use as a starting point the assumption that both the BLED96 lamp and the VLED97 lamp would be ranked equal to the halogen lamp in Experiments 1 and 2, respectively.

Experiment 1

Method

Participants

We collected the data of 417 participants. All participants reported to have normal or corrected-to-normal visual acuity. The data of participants with less than 10 correct answers in the short version of the Ishihara's Test for Colour Blindness (Ishihara 1972) were excluded from the analysis ($N = 5$), as were the data of participants who had not filled out the questionnaire completely ($N = 4$) or who had participated twice ($N = 2$). The final sample consisted of 406 participants (84 male) between 18 and 42 years ($M = 23$, $SD = 4$). Participants received monetary compensation or partial course credit for their participation in the experiment.

Materials

The short version of the Ishihara's Test for Colour Blindness with 11 plates (Ishihara 1972) was used to ensure that all participants had normal colour vision ability. Normal colour vision ability is present in participants giving at least 10 correct answers (Ishihara 1972).

The lamps used for the different lighting conditions were (1) a halogen lamp with 57 W input power (Osram Halogen Classic A, Osram GmbH, Augsburg, Germany), (2) a simple blue-pumped phosphor-converted LED (BLED80) with 8 W input power (Osram LED Star Classic A) and (3) a blue-pumped phosphor-converted LED (BLED96) optimised for high colour rendition with 11 W input power (MeLiTec LED Leuchtmittel, MeLiTec GmbH, Ense, Germany). The lamps' colorimetric properties and the spectral power distributions were measured using a Gossen Mavospec Base spectrometer (Gossen Foto- und Lichtmesstechnik GmbH, Nürnberg, Germany)

and are depicted in Table 1 and Figure 1, respectively. On each day of the data acquisition period, we measured the illuminance level under each light source with a Gossen Mavolux 5032 B luxmeter (Gossen Foto- und Lichtmesstechnik GmbH, Nürnberg, Germany; Table 1). If necessary, we adjusted the height of the light sources (± 2 cm) to achieve equal illuminance levels under each light source. All measurements were conducted in the experimental setting used in this study and after the light sources had been switched on for 45 minutes.

The light sources were placed in a light-shielded chamber (Figure 2) equipped with a light grey table and a height adjustable office chair. Three wooden boxes with a pure white inner coating (RAL 9010) were placed on the table. The boxes were labelled A, B and C from left to right. Each box was 33 cm wide and 50 cm deep and contained a height adjustable E27 lamp socket at the top. The lamp sockets were covered with a metal lamp shade with a white inner coating. To avoid heat accumulation due to the installed light sources the boxes were open at the top. The assignment of the light sources to the boxes was counterbalanced and changed on every day of the data acquisition period to prevent order effects.

Inside the boxes was a platter containing natural objects, consisting of blueberries, a green pepper, a yellow pepper, a carrot and a red pepper. A paper-pencil questionnaire was used to assess user preference for the three light sources in terms of pleasantness, naturalness and purchase preference rankings.

Procedure

Participants were tested individually. After having read and signed an informed consent form participants performed the colour blindness test in an anteroom. Next, they entered the light-shielded chamber and filled out a data sheet with their demographic data (age and gender). Subsequently, the questionnaire was given to the participants for the ranking of the light sources. Participants were instructed to place the platter with the natural objects under each light source as often as they liked (but at least once). Participants then ranked the light sources according to the global pleasantness of the light, the overall naturalness of the colours of the objects on the platter and their purchase preference for the light source (in that order). Next, participants ranked the light sources according to the naturalness of the colour of each individual object presented on the platter. The sequence in which the individual objects were considered was randomised for each participant. Additionally, participants ranked the light sources with respect to the naturalness of the skin colour of their own hand and forearm (these data are not reported here). Participants were allowed to take

as much time as they needed to complete the task. They needed approximately 15 minutes on average.

Design

Experiment 1 comprised a repeated measures design with lighting condition (halogen vs. BLED80 vs. BLED96) as the within-subject factor. The dependent variables were the rankings of the lighting conditions. The rank data required a non-parametric approach. The global main effects were analysed using a Friedman test with α set to .05. Pairwise Wilcoxon signed rank tests were used for follow-up tests for which the family-wise nominal alpha level was maintained using the Bonferroni-Holm procedure (Holm 1979). The corrected critical α -levels are reported in brackets. We report r as a measure of effect size.

A sensitivity analysis was conducted using G*Power (Faul et al. 2007). The analysis was based on a parametric approach, corrected by the asymptotic relative efficiency of the Friedman test relative to its parametric equivalent. The analysis showed that with desired levels of $\alpha = \beta = .05$, $N = 406$ and a correlation among the levels of the repeated measures variable of $\rho = .30$, differences among the groups of at least $f = 0.09$ which corresponds to $r = .09$ (small effects as defined by Cohen 1988) could be detected.

Results

The descriptive results are depicted in Figure 3. The difference among the lighting conditions in the pleasantness ranking was statistically significant, $\chi^2(2) = 71.62, p < .001$. The halogen lamp appeared more pleasant than the BLED80 ($z = 8.82, p < .001 [\alpha = .017], r = .31$) and the BLED96 ($z = 4.33, p < .001 [\alpha = .050], r = .15$). The BLED96 appeared more pleasant than the BLED80 ($z = -4.24, p < .001 [\alpha = .025], r = -.15$). Given that measures obtained from single-item measures tend to be less stable than multiple-item measures (Allan et al. 2019), we calculated an average naturalness ranking based on the rank sums of all single-item naturalness rankings. The average naturalness ranking differed among the lighting conditions, $\chi^2(2) = 180.56, p < .001$. The object colours appeared more natural under the halogen lamp than under the BLED80 ($z = 9.17, p < .001 [\alpha = .025], r = .32$) and the BLED96 ($z = 12.29, p < .001 [\alpha = .017], r = .43$). The object colours appeared more natural under the BLED80 than under the BLED96 ($z = 4.25, p < .001 [\alpha = .050], r = .15$). The results for the purchase preference were similar in that there was a significant difference among the lighting conditions, $\chi^2(2) = 114.16, p < .001$, and participants indicated a higher purchase preference for the halogen lamp compared to the BLED80 ($z = 7.23, p < .001 [\alpha = .025], r = .25$).

and the BLED96 ($z = 10.27, p < .001 [\alpha = .017], r = .36$). The BLED80 was preferred to the BLED96 ($z = 3.81, p < .001 [\alpha = .050], r = .13$).

The naturalness rankings of the individual objects' colours are naturally more variable and less reliable than the aggregate naturalness ranking reported above but for completeness we report them nevertheless. The ranked naturalness of the colours differed among the light sources for the blueberries, $\chi^2(2) = 268.91, p < .001$, the green pepper, $\chi^2(2) = 81.37, p < .001$, the yellow pepper, $\chi^2(2) = 44.87, p < .001$, the carrot, $\chi^2(2) = 100.28, p < .001$, and the red pepper, $\chi^2(2) = 57.83, p < .001$. The pairwise comparisons involving the halogen lamp were relatively consistent in that the object colours appeared more natural under this light than under the BLED80 and the BLED96. In contrast, the rankings involving the BLED80 and the BLED96 were less consistent. Specifically, the colour of the blueberries appeared more natural under the halogen lamp than under the BLED80 ($z = -2.38, p = .017 [\alpha = .050], r = .10$) and the BLED96 ($z = -15.28, p < .001 [\alpha = .017], r = .49$). Also, the colour of the blueberries appeared more natural under the BLED80 than under the BLED96, ($z = -12.90, p < .001 [\alpha = .025], r = .41$). The colour of the green pepper appeared more natural under the halogen lamp than under the BLED80 ($z = -4.73, p < .001 [\alpha = .025], r = .18$) and the BLED96 ($z = -9.04, p < .001 [\alpha = .017], r = .31$). Also, the colour of the green pepper appeared more natural under the BLED80 than under the BLED96 ($z = -4.31, p < .001 [\alpha = .050], r = .14$). The colour of the yellow pepper appeared more natural under the halogen lamp than under the BLED80 ($z = -5.08, p < .001 [\alpha = .025], r = .20$) and the BLED96 ($z = -6.38, p < .001 [\alpha = .017], r = .23$). However, rankings of the BLED80 and the BLED96 did not differ ($z = -1.30, p = .20 [\alpha = .050], r = .05$). The colour of the carrot appeared more natural under the halogen lamp than under the BLED80 ($z = -9.99, p < .001 [\alpha = .017], r = .36$) and the BLED96 ($z = -4.10, p < .001 [\alpha = .050], r = .16$). Also, the colour of the carrot appeared more natural under the BLED96 than under the BLED80 ($z = 5.89, p < .001 [\alpha = .025], r = -.19$). The colour of the red pepper appeared more natural under the halogen lamp than under the BLED80 ($z = -5.64, p < .001 [\alpha = .025], r = .20$) and the BLED96 ($z = -7.29, p < .001 [\alpha = .017], r = .25$). However, the rankings of the BLED80 and the BLED96 did not differ ($z = -1.65, p = .099 [\alpha = .050], r = .05$).

Experiment 2

Method

Participants

We collected the data of 415 participants. All participants reported to have normal or corrected-to-normal visual acuity. The data of participants with less than 10 correct answers in the short version of the Ishihara's Test for Colour Blindness (Ishihara 1972) were excluded from the analysis ($N = 7$), as were the data of participants who had not filled out the questionnaire completely ($N = 6$). The final sample consisted of 402 participants (113 male) between 17 and 48 years ($M = 22$, $SD = 4$). Participants received monetary compensation or partial course credit for their participation in the experiment.

Materials

The materials were identical to those of Experiment 1 with the following exceptions. The ranking of the light sources according to the naturalness of one's own skin colour was dropped from the questionnaire. In that way we could make the task more convenient for the participants. Specifically, because it was no longer necessary for the participants to reach into the boxes with their hands and forearms, we could place three identical white platters with the same natural objects in the boxes. We randomly reassigned the platters to the boxes after every participant.

The BLED96 light source was replaced by a violet-pumped phosphor-converted LED (VLED97) optimised for high colour rendition with 11 W input power (Soraa Vivid A60, Soraa Inc., Fremont (CA), United States). The spectral radiation, the colorimetric properties and the illuminance level are shown in Table 1 and Figure 1.

Procedure

The procedure was the same as in Experiment 1.

Design

The design was identical to that of Experiment 1 and so were the results of the sensitivity analysis.

Results

The descriptive results are depicted in Figure 4. The difference among the lighting conditions for the pleasantness ranking was statistically significant, $\chi^2(2) = 26.51$, $p < .001$. The BLED80 appeared less pleasant than halogen lamp ($z = 4.14$, $p < .001$ [$\alpha = .025$], $r = .15$) and the VLED97 ($z = -4.77$, $p < .001$ [$\alpha = .017$], $r = -.17$), whereas the halogen lamp and the VLED97 did not differ ($z = -0.45$, $p = .654$ [$\alpha = .050$], $r = -.02$). The average naturalness ranking differed among the lighting

conditions, $\chi^2(2) = 9.31, p = .010$. The object colours appeared less natural under the BLED80 than under the halogen lamp ($z = 2.96, p = .003 [\alpha = .017], r = .10$) and the VLED97 ($z = -2.34, p = .019 [\alpha = .025], r = -.08$), whereas the rankings did not differ between the halogen lamp and the VLED97 ($z = 0.43, p = .671 [\alpha = .050], r = .01$). The results for the purchase preference were similar in that there was a significant difference among the lighting conditions, $\chi^2(2) = 28.99, p < .001$, and participants indicated a lower purchase preference for the BLED80 than for the halogen lamp ($z = 3.27, p = .001 [\alpha = .025], r = .12$) and the VLED97 ($z = -5.27, p < .001 [\alpha = .017], r = -.19$), whereas the purchase preference did not differ between the halogen lamp and the VLED97 ($z = -1.87, p = .061 [\alpha = .050], r = -.07$).

For completeness, the ranked naturalness of the individual objects' colours differed among the light sources for the blueberries, $\chi^2(2) = 11.74, p = .003$, the carrot, $\chi^2(2) = 21.08, p < .001$, and the red pepper, $\chi^2(2) = 14.27, p < .001$, but not for the green pepper, $\chi^2(2) = 2.54, p = .281$, and the yellow pepper, $\chi^2(2) = 2.00, p = .367$. The colour of the blueberries appeared more natural under VLED97 than under the halogen lamp ($z = -3.26, p = .001 [\alpha = .017], r = -.11$). The BLED80 differed neither from the halogen lamp ($z = -1.57, p = .116 [\alpha = .050], r = -.06$) nor from the VLED97 ($z = -1.94, p = .053 [\alpha = .025], r = -.07$). The colour of the carrot appeared more natural under the halogen lamp ($z = 4.39, p < .001 [\alpha = .017], r = .15$) and the VLED97 ($z = -3.03, p = .002 [\alpha = .025], r = -.07$) than under the BLED80. The rankings for the halogen lamp and the VLED97 did not differ ($z = 1.08, p = .279 [\alpha = .050], r = .04$). The colour of the red pepper appeared more natural under the halogen lamp than under the BLED80 ($z = 3.84, p < .001 [\alpha = .017], r = .14$) and the VLED97 ($z = 2.71, p = .007 [\alpha = .025], r = .10$). The rankings for the BLED80 and the VLED97 did not differ ($z = -0.56, p = .575 [\alpha = .050], r = -.02$).

Discussion

The results of Experiments 1 and 2 are highly consistent in showing that the halogen lamp was preferred to the simple phosphor-converted LED lamp (BLED80) on all dimensions that we assessed: pleasantness, naturalness and purchase preference. The high degree of consistency is not surprising given the large samples used here ($N = 406$ and $N = 402$ in Experiments 1 and 2, respectively). One could argue that the preference for the halogen lamp compared to the BLED80 is also not surprising given that the CRI R_a clearly favours the halogen lamp (with a CRI R_a of 100; Table 1) over the simple phosphor-converted LED lamp (with a CRI R_a of 81). However, the CRI R_a fails completely as a predictor of the user preference for the optimised blue-pumped phosphor-converted LED lamp with a CRI R_a of 96 (BLED96) and the optimised violet-pumped phosphor-

converted LED lamp with a very similar CRI R_a of 97 (VLED97). Whereas the user preference for the BLED96 was, by and large, at the level of the BLED80 and thus much worse than for the halogen lamp, the preference for the VLED97 was at the same level as the user preference for the halogen lamp and clearly above the level of the user preference for the BLED80 (see also Wei et al. 2015). Given these results we must reject our initial assumption – based on the idea that most people are not able to notice colour shifts with light sources having a CRI $R_a > 95$ (Houser et al. 2016) – that the BLED96 and the VLED97 lamps would be largely equivalent and ranked equal to the halogen lamp. Quite the contrary, whereas the BLED96 represents no improvement in terms of user preferences over the simple BLED80, the VLED97 is clearly at the level of the traditional household standard, halogen lamp.

There are two notable differences in between the BLED96 and the VLED97 lamps in terms of the measures provided in Table 1. The first difference is in the CRI R_9 , a special CRI index for the rendition of saturated red. The CRI R_9 is considered as an important metric complementing the CRI R_a . It is sensitive to the amount of radiation emitted in the long wavelength end of the visible spectrum which is important because a “lack of the red component shrinks the reproducible color gamut and makes the illuminated scene look dull” (Ohno 2005, , p. 3). In terms of the CRI R_9 , the BLED96 clearly is to be rated much lower than the VLED97. This leads to the prediction that objects look duller under the BLED96 than under the VLED97. The second difference between the the BLED96 and the VLED97 lamps is in the ANSI/IES TM-30-18 R_g (Table 1). This difference seems even more interesting. The ANSI/IES TM-30-18 R_g represents a state-of-the-art colour gamut measure and informs about whether, on average, a light source can be predicted to increase or decrease the chroma of objects compared to those objects under the reference illuminant (Illuminating Engineering Society of North America 2018). While an increase in chroma corresponds to a saturating shift ($R_g > 100$) which causes colours to appear more vivid, a decrease in chroma corresponds to a de-saturating shift ($R_g < 100$) which causes colours to appear duller (David et al. 2015). A numerical characterisation of gamut shape is provided by ANSI/IES TM-30-18 local chroma shifts for 16 hue angle bins (Royer, Houser, and David 2017). The local chroma shifts for the light sources used in the present study are shown in Figure 5. In terms of the ANSI/IES TM-30-18 R_g the BLED96 is at the level of the BLED80 and for both of these lamps we can predict that object colours should appear duller than under the reference illuminant (blackbody radiation in the present case of a CCT of 2700 K). In contrast, the VLED97 is even somewhat above the halogen lamp in terms of the ANSI/IES TM-30-18 R_g from which we can predict that object

colours should appear even somewhat more vivid under the VLED97 than under the halogen lamp. In essence, then, the measured CRI R_9 and ANSI/IES TM-30-18 allow deriving the prediction that object colours should appear (equally) dull under the BLED80 and the BLED96 and more vivid under the halogen lamp and the VLED97.

It is known that vivid colours are preferred to dull colours (Wei et al. 2014) at least as long the colours do not appear “oversaturated” (Wei and Houser 2017). In particular, the saturation of red object colours seems to be crucial in terms of user preference. Thus, light sources enhancing the saturation of red objects were shown to be preferred to light sources which did not (Wei et al. 2014; Royer et al. 2017; Teunissen et al. 2017; Wei and Houser 2017), especially in cases in which natural objects such as food items were evaluated (Wei and Houser 2017). Similarly, light sources emitting a relatively large amount of energy in the long wavelength range of the visible spectrum have been reported to receive higher attractiveness ratings compared to light sources which did not (Jost-Boissard, Fontoynt, and Blanc-Gonnet 2009; Jost-Boissard, Avouac, and Fontoynt 2015). Preference and attractiveness were found to measure the same construct in the sense that end users prefer what they find most attractive or vice versa (Smet et al. 2010).

In sum, then what this comes down to is that whereas the BLED96 may be a substantial improvement over the BLED80 in terms of colour fidelity as represented by the CRI R_a , this improvement in terms of the most established model-based colour fidelity measure does not affect end user preference. In contrast, while the VLED97 may not quite reach the halogen lamp in terms of colour fidelity, the fact that object colours appear slightly more vivid under the VLED97 than under the halogen lamp may be the component that leads to approximately equivalent user preference for the VLED and the halogen lamp. The big problem from end users' perspective is that they have no way of predicting which light source they will prefer given that usually only the CRI R_a is printed on the product packaging, if at all.

A possible limitation of the present study is that there was a small procedural difference between Experiments 1 and 2. In Experiment 1, participants placed one platter with natural objects under the different light sources as often as they liked but at least once. This was necessary because participants had the additional task of evaluating the colour of their skin (not reported here) based on the appearance of their hand and forearm. The additional task was dropped in Experiment 2 so that we could make the task somewhat more convenient for the participants by placing three equivalent platters with natural objects under the three different light sources. As a consequence, the involvement of memory and, hence, forgetting in Experiment 2 was minimal (rarely more than the

time it takes for a saccade to move from one box to another box unless participants looked at a different object in the room between two inspections of the platters in the boxes). In Experiment 1, memory and forgetting were likely somewhat more involved because it plausibly takes a second or two and thus longer than a saccade to move the platter from one box to another. However, there is reason to believe that this difference in the involvement of memory and forgetting did not affect the results of the present study. First, the preferences for the halogen lamp relative to the BLED80 were very consistent between experiments on all dimensions. Second, a stronger involvement of memory and forgetting would likely decrease any differences in user preferences among light sources, but if anything, the size of the differences in user preference between the halogen lamp and the BLED80 was larger in Experiment 1 than in Experiment 2, suggesting that the small procedural difference between experiments did not affect the results in any meaningful way.

Concluding Remarks

As the technical progress in solid-state lighting technology continues it seems quite possible that even more optimised LED-based light sources than the ones used in the present study will become available in the future. These may even exceed halogen lighting, the traditional household standard, in terms of user preference. While this is certainly an exciting development goal for modern lighting technology, it is currently not clear how end users would choose the light source they would prefer most. It seems that while adding additional model-based measures such as the ANSI/IES TM-30-18 R_g on the product packaging would be helpful in theory it may not be possible to educate end users enough so that they can make appropriate use of this additional information. In any case, the obvious conclusion from the results presented here and elsewhere (Narendran and Deng 2002; Bodrogi et al. 2004; Szabó et al. 2007; Jost-Boissard, Fontoyont, and Blanc-Gonnet 2009; Dangol et al. 2013; Islam et al. 2013; Baniya et al. 2015), is that for the purpose of choosing the most preferred light source among optimised LEDs the CRI R_a is useless and should be abandoned. In contrast, the assumption that the model-based ANSI/IES TM-30-18 R_g is a valid predictor of end user preference has been strengthened by the empirical evidence presented here. This information seems useful for lighting experts who, in contrast to non-expert end users, are familiar with this measure. Knowing that the ANSI/IES TM-30-18 R_g is based on a state-of-the-art colour appearance model (David et al., 2015) is good, but knowing that these theoretical advancements lead to improved predictions of end user preference is even better.

Table 1. Colorimetric and photometric properties of the light sources used in Experiments 1 and 2.

Light source	Experiment	Mean illuminance (lx)	CIE 13.3-1995 CRI		ANSI/IES TM-30-18		CCT (K)	CC (x, y)
			R_a	R_9	R_f	R_g		
Halogen	1 and 2	2200	100	99	99	99	2750	0.46, 0.41
BLED80	1 and 2	2200	81	6	84	95	2697	0.46, 0.41
BLED96	1	2200	96	75	91	96	2722	0.46, 0.42
VLED97	2	2200	97	91	92	102	2605	0.47, 0.42

Note: BLED80 = simple blue-pumped phosphor-converted LED with a CRI R_a of 80, BLED96 = blue-pumped phosphor-converted LED optimised for high colour rendition with a CRI R_a of 96, VLED97 = violet-pumped phosphor-converted LED optimised for high colour rendition with a CRI R_a of 97, R_a = CIE General Colour Rendering Index, R_9 = CIE Special Colour Rendering Index for red, R_f = IES Fidelity Index, R_g = IES Gamut Index, CCT = Correlated Colour Temperature, CC = Chromaticity Coordinates.

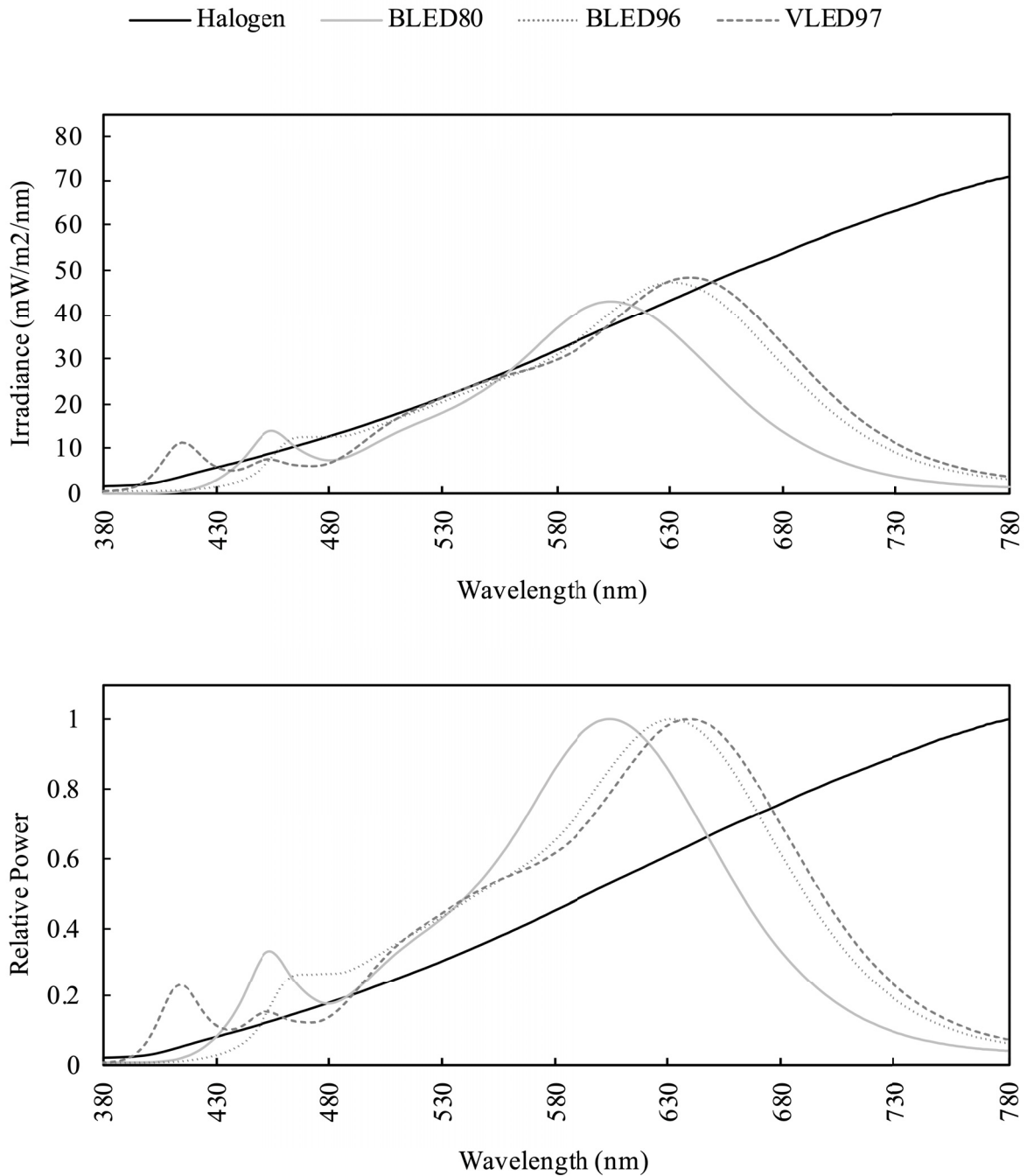


Figure 1. Irradiance (upper panel) and relative spectral power distributions (lower panel) of the halogen lamp (Experiments 1 and 2), the blue-pumped phosphor-converted LED lamp with a CRI R_a of 80 (BLED80; Experiments 1 and 2), the blue-pumped phosphor-converted LED lamp with a CRI R_a of 96 (BLED96; Experiment 1) and the violet-pumped phosphor-converted LED lamp with a CRI R_a of 97 (VLED97; Experiment 2).



Figure 2. Depicted is the experimental setup for the pleasantness, naturalness and purchase preference ranking of the light sources used in Experiment 1 (halogen, LED80, BLED96) and Experiment 2 (halogen, LED80, VLED97). Each light source was installed in one of three identically build adjacent boxes. The assignment of the light sources to the boxes was balanced and changed on every day of the data acquisition period. A portable white platter filled with natural objects (blueberries, green pepper, yellow pepper, carrot and red pepper) was placed under the light sources. Note that in Experiment 1 there was only one portable white platter with natural objects instead of three identical white platters as in Experiment 2.

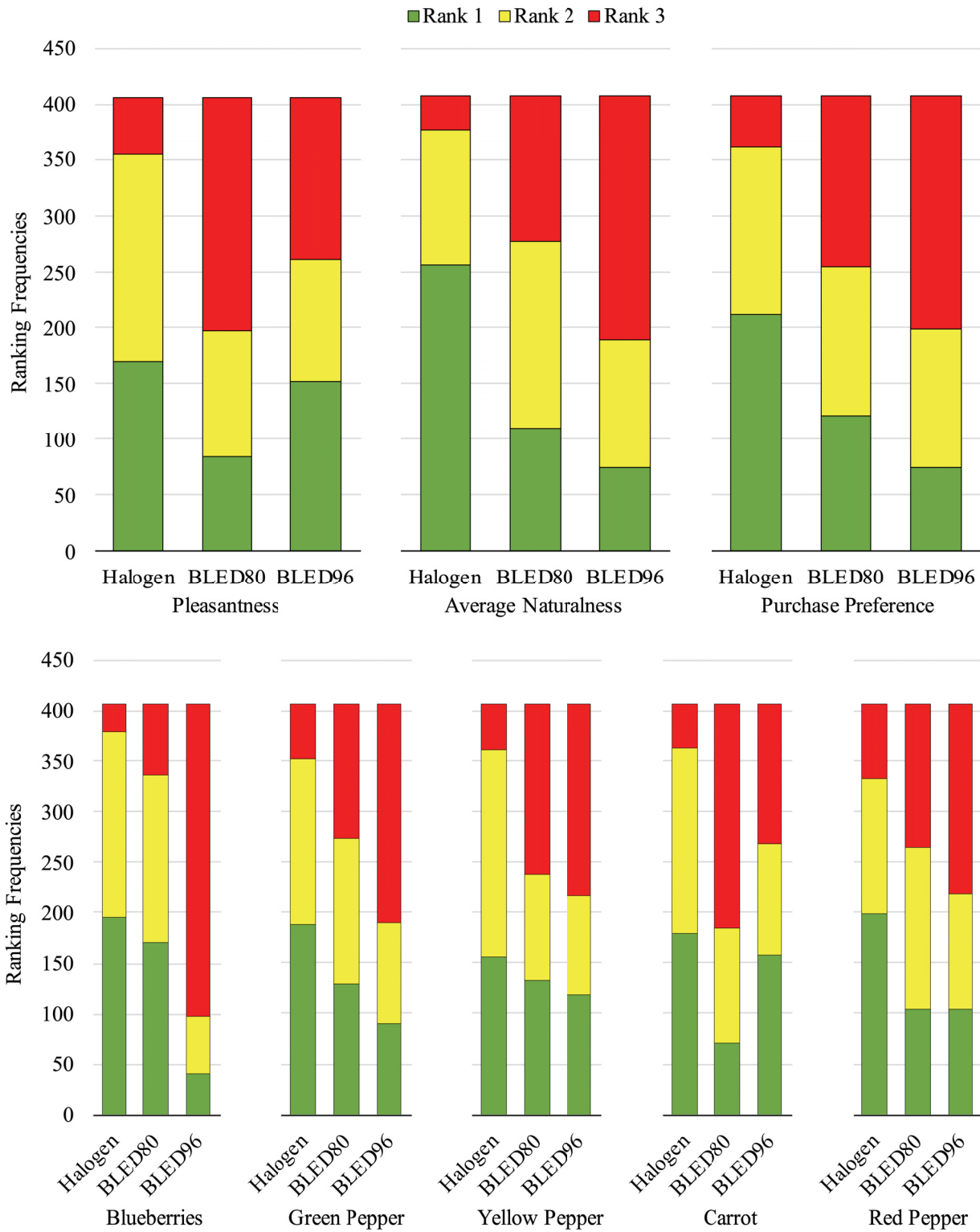


Figure 3. Ranking frequencies (Rank 1 = best, Rank 3 = worst) for the halogen lamp, the blue-pumped phosphor-converted LED lamp with a CRI R_a of 80 (BLED80) and the blue-pumped phosphor-converted LED lamp with a CRI R_a of 96 (BLED96) used in Experiment 1.

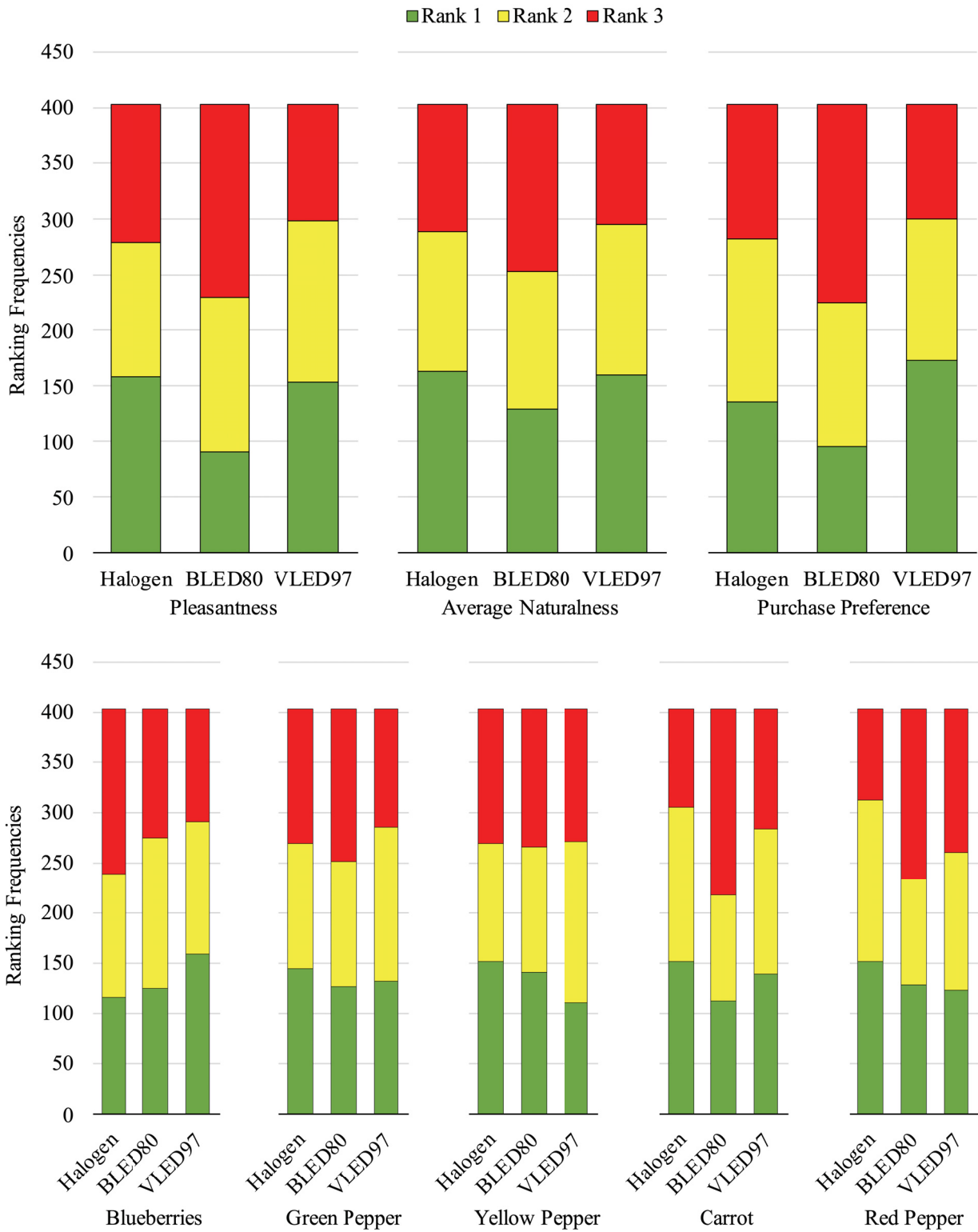


Figure 4. Ranking frequencies (Rank 1 = best, Rank 3 = worst) for the halogen lamp, the blue-pumped phosphor-converted LED lamp with a CRI R_a of 80 (BLED80) and the violet-pumped phosphor-converted LED lamp with a CRI R_a of 97 (VLED97) used in Experiment 2.

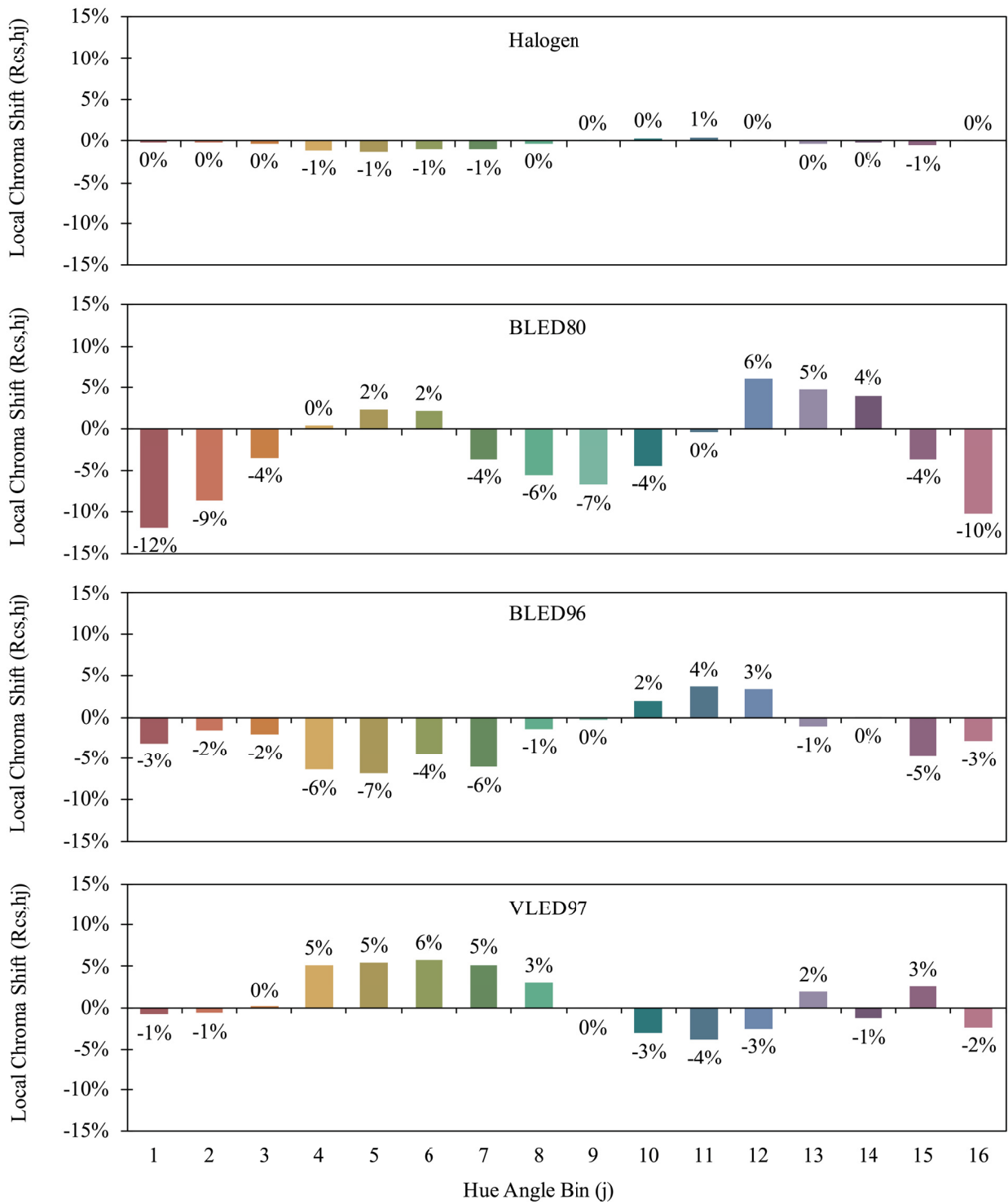


Figure 5. Local chroma shifts for the 16 hue angle bins in ANSI/IES TM-30-18 for the halogen lamp (Experiments 1 and 2), the blue-pumped phosphor-converted LED lamp with a CRI R_a of 80 (BLED80; Experiments 1 and 2), the blue-pumped phosphor-converted LED lamp with a CRI R_a of 96 (BLED96; Experiment 1) and the violet-pumped phosphor-converted LED lamp with a CRI R_a of 97 (VLED97; Experiment 2).

References

- Allan, A. C., V. Garcia-Hansen, G. Isoardi, and S. S. Smith. 2019. "Subjective assessments of lighting quality: A measurement review." *Leukos* 15 (2-3):115-126. doi: 10.1080/15502724.2018.1531017.
- Baniya, R. R., R. Dangol, P. Bhusal, A. Wilm, E. Baur, M. Puolakka, and L. Halonen. 2015. "User-acceptance studies for simplified light-emitting diode spectra." *Lighting Research and Technology* 47 (2):177-191. doi: 10.1177/1477153513515264.
- Bodrogi, P., P. Csuti, P. Hotváth, and J. Schanda. 2004. Why does the CIE colour rendering index fail for white RGB LED light sources? Paper presented at the CIE Expert Symposium on LED Light Sources: Physical Measurement and Visual and Photobiological Assessment.
- Boyce, P. R. 2014. *Human factors in lighting*. 3rd ed. Baton Rouge, LA, USA: CRC Press.
- Cohen, J. 1988. *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. 2nd ed. Hillsdale, NY, USA: Lawrence Erlbaum Associates.
- Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). 1995. "Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources." In. Vienna: CIE.
- Crawford, M. H. 2009. "LEDs for solid-state lighting: performance challenges and recent advances." *Ieee Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 15 (4):1028-1040. doi: 10.1109/JSTQE.2009.2013476.
- Dangol, R., M. Islam, M. Hyvärinen, P. Bhusal, M. Puolakka, and L. Halonen. 2013. "Subjective preferences and colour quality metrics of LED light sources." *Lighting Research and Technology* 45 (6):666-688. doi: 10.1177/1477153512471520.
- David, A., P. T. Fini, K. W. Houser, Y. Ohno, M. P. Royer, K. Smet, M. Wei, and L. Whitehead. 2015. "Development of the IES method for evaluating the color rendition of light sources." *Optics Express* 23 (12):15888-15906. doi: 10.1364/OE.23.015888.
- De Almeida, A., B. Santos, B. Paolo, and M. Quicheron. 2014. "Solid state lighting review—Potential and challenges in Europe." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 34:30-48. doi: 10.1016/j.rser.2014.02.029.
- Emetere, M. E., J. T. Abodunrin, O. O. Fayomi, and C. O. Iroham. 2019. "Brief review on the physics of solid-state lighting device." *Journal of Physics: Conference Series* 1378:022038. doi: 10.1088/1742-6596/1378/2/022038.
- Faul, F., E. Erdfelder, A. G. Lang, and A. Buchner. 2007. "G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences." *Behavior Research Methods* 39 (2):175-191. doi: 10.3758/Bf03193146.

- Guo, X., and K. W. Houser. 2004. "A review of colour rendering indices and their application to commercial light sources." *Lighting Research and Technology* 36 (3):183-199. doi: 10.1191/1365782804li112oa.
- Hernández-Andrés, J., J. Romero, and R. L. Lee. 2001. "Colorimetric and spectroradiometric characteristics of narrow-field-of-view clear skylight in Granada, Spain." *Journal of the Optical Society of America A* 18 (2):412-420. doi: 10.1364/JOSAA.18.000412.
- Hicks, A. L., and T. L. Theis. 2014. "Residential energy-efficient lighting adoption survey." *Energy Efficiency* 7 (2):323-333. doi: 10.1007/s12053-013-9226-6.
- Holm, S. 1979. "A simple sequentially rejective multiple test procedure." *Scandinavian journal of statistics* 6 (2):65-70.
- Houser, K. W., M. Mossman, K. Smet, and L. Whitehead. 2016. "Tutorial: Color Rendering and Its Applications in Lighting." *Leukos* 12 (1-2):7-26. doi: 10.1080/15502724.2014.989802.
- Huang, Z., Q. Liu, S. Westland, M. Pointer, M. R. Luo, and K. Xiao. 2018. "Light dominates colour preference when correlated colour temperature differs." *Lighting Research & Technology* 50 (7):995-1012. doi: 10.1177/1477153517713542.
- Illuminating Engineering Society of North America. 2018. ANSI/IES TM-30-18. IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition. New York: IESNA.
- International Energy Agency. 2020. "Tracking Buildings." IEA, Accessed April 14. <https://www.iea.org/reports/tracking-buildings/lighting#abstract>.
- Ishihara, S. 1972. *Tests for colour-blindness*. Tokyo: Kanehara Shuppan Company.
- Islam, M., R. Dangol, M. Hyvärinen, P. Bhusal, M. Puolakka, and L. Halonen. 2013. "User preferences for LED lighting in terms of light spectrum." *Lighting Research and Technology* 45 (6):641-665. doi: 10.1177/1477153513475913.
- Jost-Boissard, S., P. Avouac, and M. Fontoynt. 2015. "Assessing the colour quality of LED sources: Naturalness, attractiveness, colourfulness and colour difference." *Lighting Research and Technology* 47 (7):769-794. doi: 10.1177/1477153514555882.
- Jost-Boissard, S., M. Fontoynt, and J. Blanc-Gonnet. 2009. "Perceived lighting quality of LED sources for the presentation of fruit and vegetables." *Journal of Modern Optics* 56 (13):1420-1432. doi: 10.1080/09500340903056550.
- Kokka, A., T. Poikonen, P. Blattner, S. Jost, A. Ferrero, T. Pulli, M. Ngo, et al. 2018. "Development of white LED illuminants for colorimetry and recommendation of white LED reference spectrum for photometry." *Metrologia* 55 (4):526-534. doi: 10.1088/1681-7575/aacae7.

- Königs, S., S. Mayr, and A. Buchner. 2019. "A common type of commercially available LED light source allows for colour discrimination performance at a level comparable to halogen lighting." *Ergonomics* 62 (11):1462–1473. doi: 10.1080/00140139.2019.1663940.
- Kumar, A., S. K. Jain, and N. K. Bansal. 2003. "Disseminating energy-efficient technologies: a case study of compact fluorescent lamps (CFLs) in India." *Energy Policy* 31 (3):259-272. doi: 10.1016/S0301-4215(02)00038-1.
- Morgan Pattison, P., M. Hansen, and J. Y. Tsao. 2018. "LED lighting efficacy: Status and directions." *Comptes Rendus Physique* 19 (3):134-145. doi: 10.1016/j.crhy.2017.10.013.
- Nardelli, A., E. Deuschle, L. D. de Azevedo, J. L. N. Pessoa, and E. Ghisi. 2017. "Assessment of Light Emitting Diodes technology for general lighting: A critical review." *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 75:368-379. doi: 10.1016/j.rser.2016.11.002.
- Narendran, N., and L. Deng. 2002. Color rendering properties of LED light sources. Paper presented at the Proc. SPIE.
- Ohno, Y. 2005. "Spectral design considerations for white LED color rendering." *Optical Engineering* 44 (11):111302-111301-111302-111309. doi: 10.1117/1.2130694.
- Pust, P., P. J. Schmidt, and W. Schnick. 2015. "A revolution in lighting." *Nature materials* 14 (5):454-458. doi: 10.1038/nmat4270.
- Romero, J., A. García-Beltrán, and J. Hernández-Andrés. 1997. "Linear bases for representation of natural and artificial illuminants." *Journal of the Optical Society of America A* 14 (5):1007-1014. doi: 10.1364/JOSAA.14.001007.
- Royer, M. P., K. W. Houser, and A. David. 2017. "Chroma shift and gamut shape: going beyond average color fidelity and gamut area." *Leukos* 14 (3):149-165. doi: 10.1080/15502724.2017.1372203.
- Royer, M. P., A. Wilkerson, M. Wei, K. W. Houser, and R. Davis. 2017. "Human perceptions of colour rendition vary with average fidelity, average gamut, and gamut shape." *Lighting Research and Technology* 49 (8):966-991. doi: 10.1177/1477153516663615.
- Smet, K., W. R. Ryckaert, M. R. Pointer, G. Deconinck, and P. Hanselaer. 2010. "Memory colours and colour quality evaluation of conventional and solid-state lamps." *Optics Express* 18 (25):26229-26244. doi: 10.1364/OE.18.026229.
- Szabó, F., J. Schanda, P. Bodrogi, and E. Radkov. 2007. "A comparative study of new solid state light sources." In *CIE Session 2007*.
- Teunissen, C., F. H. F. W. van der Heijden, S. H. M. Poort, and E. De Beer. 2017. "Characterising user preference for white LED light sources with CIE colour rendering index combined with a

- relative gamut area index." *Lighting Research and Technology* 49 (4):461-480. doi: 10.1177/1477153515624484.
- Wei, M., and K. W. Houser. 2017. "Systematic changes in gamut size affect color preference." *Leukos* 13 (1):23-32. doi: 10.1080/15502724.2016.1192402.
- Wei, M., K. W. Houser, G. R. Allen, and W. W. Beers. 2014. "Color preference under LEDs with diminished yellow emission." *Leukos* 10 (3):119-131. doi: 10.1080/15502724.2013.865212.
- Wei, M., K. W. Houser, A. David, and M. R. Krames. 2015. "Perceptual responses to LED illumination with colour rendering indices of 85 and 97." *Lighting Research and Technology* 47 (7):810-827. doi: 10.1177/1477153514548089.

Erklärung über den Eigenanteil an den in der Dissertation enthaltenen Einzelarbeiten

Meine Dissertationsschrift umfasst drei Fachartikel mit insgesamt fünf Experimenten. Für jeden Fachartikel ist im Folgenden aufgeführt, welche Autorinnen und Autoren bei der Planung der Experimente, bei der Umsetzung der Experimente, bei der Datenauswertung und beim Verfassen der Manuskripte mitgearbeitet haben. Der überwiegende Teil der Arbeit lag jeweils bei der Erstautorin des Artikels.

Königs, S., Mayr, S., & Buchner, A. (2019). A common type of commercially available LED light source allows for colour discrimination performance at a level comparable to halogen lighting. *Ergonomics*, 62(11), 1462-1473. <https://doi.org/10.1080/00140139.2019.1663940>

Planung: Königs, S., Mayr, S., & Buchner, A.

Umsetzung: Königs, S., Mayr, S., & Buchner, A.

Auswertung: Königs, S., Mayr, S., & Buchner, A.

Manuskript: Königs, S., Mayr, S., & Buchner, A.

Königs, S., Mayr, S., & Buchner, A. (2020a). Is red a special issue in the colour discrimination performance under phosphor-converted LED lighting? *Manuscript submitted for publication*.

Planung: Königs, S., Mayr, S., & Buchner, A.

Umsetzung: Königs, S., Mayr, S., & Buchner, A.

Auswertung: Königs, S., Mayr, S., & Buchner, A.

Manuskript: Königs, S., Mayr, S., & Buchner, A.

Königs, S., Mayr, S., & Buchner, A. (2020b). LED-based light sources optimised for high colour rendition from an end users' perspective. *Manuscript submitted for publication.*

Planung: Königs, S., Mayr, S., & Buchner, A.

Umsetzung: Königs, S., Mayr, S., & Buchner, A.

Auswertung: Königs, S., Mayr, S., & Buchner, A.

Manuskript: Königs, S., Mayr, S., & Buchner, A.

Erklärung an Eides Statt

Hiermit versichere ich an Eides Statt, dass ich die Dissertation mit dem Titel „Farbdiskrimination und Farbpräferenz aus Endnutzerperspektive: Ein Vergleich zwischen phosphorkonvertierten LED-Leuchtmitteln und Halogenbeleuchtung“ selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe unter Beachtung der „Grundsätze zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf“ erstellt habe.

Ich versichere insbesondere:

- (1) Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt.
- (2) Alle wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Texten entnommenen Stellen habe ich als solche kenntlich gemacht; dies gilt für gedruckte Texte ebenso wie für elektronische Ressourcen.
- (3) Die Arbeit habe ich in der vorliegenden oder einer modifizierten Form noch nicht als Dissertation vorgelegt – sei es an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf oder an einer anderen Universität.

Datum: 29. September 2020

Name: Sara Königs

Unterschrift: