

Weiß? Minimierung der sichtbaren Farbtönigkeit bei verschiedenen Lichtfarben und Adaptationszuständen

Tralau, B., Zumtobel Lighting GmbH; Schierz, Ch., Technische Universität Ilmenau

Problemstellung und Forschungsfragen

Farbtemperaturvernderliche Leuchten werden oftmals durch die Mischung zweier Lichtfarben hinter einem Diffusor realisiert. Auf Grund der additiven Farbmischung beider Lichtquellen kommt es in der Normfarbtafel zu einer Abweichung vom Planckschen Kurvenzug, was oftmals mit einer sichtbaren Farbtönigkeit einhergeht. Da zudem die Variation entlang des Planckschen Kurvenzugs für verschiedene Lichtquellen wie z.B. der LED nicht wahrnehmungsgetreu weiß ist, stellt sich die Frage in welchem Farbbereich idealerweise die Farbtemperatur verändert werden sollte, um eine Sichtbarkeit einer Grün- und Violett-Farbtönung zu minimieren und so die Nutzerakzeptanz bei der Kombination verschiedener Lichtquellen zu maximieren.

Stand der Wissenschaft/Technik

Untersuchungen von *REA 2013* haben gezeigt, dass Farbörter mit weniger sichtbarer Farbtönigkeit für warmweiße Lichtfarben unterhalb des Planckschen Kurvenzugs liegen, im tageslichtweien Bereich aber darüber.

Forschungshypothesen

Zur Optimierung des Variationsbereiches der Farbtemperatur bei Leuchten, sowie deren Kombination untereinander ist die Definition eines Farbbereiches mit minimal sichtbarer Farbtönigkeit bei verschiedenen Farbtemperaturen und Adaptationszuständen notwendig. Eine sichtbare Farbtönigkeit, vor allem bei der Kombination mehrerer Leuchten, führt zu einer geringeren Akzeptanz in der Praxis.

Versuchsaufbau

Für die Untersuchungsreihe wurden fünf Boxen auf Blickhhe in einem Laborraum aufgestellt. Die Boxen sind jeweils mit einer in der Farbtemperatur, im Farbort und im Lichtspektrum variablen LED Beleuchtung ausgestattet. Die Umgebungsbeleuchtung ist ebenfalls in der Farbtemperatur variabel. Für verschiedene Lichtfarben und Adaptationszustnde wird jeweils die Farbtönigkeit von rein weiß bis stark grün oder violett bestimmt.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Die Ergebnisse zeigen ähnlich wie in den Untersuchungen von *REA* Abweichungen von Plank für warmweiße Farbtemperaturen, wenn auch mit nicht so starker Ausprägung. Für tageslichtweie Lichtfarben konnte eine Abweichung nicht nachgewiesen werden. Generell ist die Sichtbarkeit einer Farbtönung abhängig vom Adaptationszustand und führt bei Variation der Lichtfarbe zu einer verminderten Akzeptanz.

Weiß? Minimierung der sichtbaren Farbtönigkeit bei verschiedenen Lichtfarben und Adaptationszuständen

Tralau, B., Zumtobel Lighting GmbH; Schweizerstr. 30, 6850 Dornbirn, AT
Schierz, Ch., TU Ilmenau, FG Lichttechnik; Prof.-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau, DE

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie zeigt in welchem Farbbereich idealerweise die Farbtemperatur variiert werden sollte, so dass die sichtbare Grün- oder Violett-Farbtönigkeit der Lichtquelle minimiert wird und damit die Nutzerakzeptanz von farbtemperaturdynamischer Beleuchtung steigt.

1 Problemstellung und Forschungsfragen

Farbtemperaturveränderliche Leuchten werden oftmals durch die Mischung zweier Lichtfarben hinter einem Diffusor realisiert. Auf Grund der additiven Farbmischung beider Lichtquellen kommt es in der Normfarbtafel zu einer Abweichung vom Planckschen Kurvenzug, was oftmals mit einer sichtbaren Farbtönigkeit einhergeht. Da zudem die Variation entlang des Planckschen Kurvenzugs für verschiedene Lichtquellen wie z.B. der LED nicht wahrnehmungsgetreu weiß ist, stellt sich die Frage in welchem Farbbereich idealerweise die Farbtemperatur verändert werden sollte, um die Sichtbarkeit einer Grün- oder Purpur-Farbtönung zu minimieren und so die Nutzerakzeptanz bei der Kombination verschiedener Lichtquellen zu maximieren.

2 Stand der Wissenschaft

Untersuchungen von REA 2013 /1/ haben gezeigt, dass Farbörter mit geringer sichtbarer Farbtönigkeit für warmweiße Lichtfarben unterhalb des Planckschen Kurvenzugs liegen, im tageslichtweißen Bereich aber darüber (siehe Abb.1).

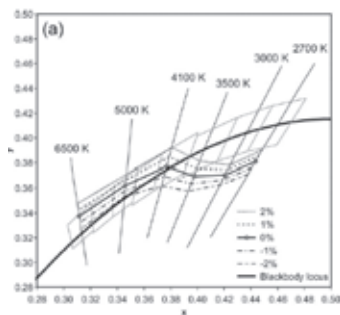


Abb. 1: Ergebnis der Untersuchung von REA 2013 in der CIE 1931 Normfarbtafel. Angaben in Prozent bezeichnen den wahrgenommenen Buntanteil.

3 Forschungshypothesen

Zur Optimierung des Variationsbereiches der Farbtemperatur bei Leuchten, sowie deren Kombination untereinander ist die Definition eines Farbbereiches mit minimal sichtbarer Farbtönigkeit bei verschiedenen Farbtemperaturen und Adaptationszuständen notwendig. Eine sichtbare Farbtönigkeit, vor allem bei der Kombination mehrerer Leuchten, führt zu einer geringeren Akzeptanz in der Praxis.

4 Methodik

4.1 Versuchsaufbau

Für die Untersuchungsreihe wurden fünf Boxen auf Blickhöhe in einem Laborraum aufgestellt (Abb. 2). Die Boxen haben eine Grundfläche von 60x60cm und sind 60cm hoch.



Abb. 2: Aufbau des Laborraumes

Die Boxen sind jeweils mit einer in der Farbtemperatur, im Farbort und im Lichtspektrum variablen LED Beleuchtung von TeleLumen (USA) ausgestattet. Die Beleuchtung ist hinter eine 30cm hohen Blende versteckt und leuchtet die Box durch einen zusätzlichen Diffusor gleichmäßig aus. Die Umgebungsbeleuchtung ist ebenfalls in der Farbtemperatur variabel, so dass unterschiedliche Adaptationszustände realisiert werden können.

4.2 Versuchspersonen

An der Untersuchung nahmen 19 Versuchspersonen im Alter von 25-56 Jahren teil. Davon waren 15 männlich und 4 weiblich. Neben einer Einweisung in den Versuchsablauf wurden in einer Voruntersuchung persönliche Daten aufgenommen, sowie die Eignung der Person (z.B. auf Farbtüchtigkeit) geprüft. Auch die bevorzugte Lichtfarbe am Arbeitsplatz wurde erfragt.

4.3 Durchführung

Die Studie gliedert sich in fünf Untersuchungsreihen.

In der 1. Untersuchungsreihe wurden 7 Farborte entlang der Judtschen Geraden sechs Mal (3-mal ohne Hintergrundbeleuchtung, 3-mal mit Hintergrundbeleuchtung in der gleichen ähnlichsten Farbtemperatur) in unterschiedlicher Reihenfolge in den Boxen dargeboten. Der Durchgang wurde für die 4 ähnlichsten Farbtemperaturen 3000K, 4000K, 5000K und 6000K wiederholt. Die Probanden beurteilten jeweils, welche Box am ehesten Weiß erscheint und sortierten die anderen Boxen nach Grad ihrer Farbtönung.

Die 2. Untersuchungsreihe galt der Verifizierung der Ersten, nur wurden die Farborte diesmal nacheinander in einer Box dargeboten. Die Probanden stufen unmittelbar nach dem Umschalten, sowie nach 45 Sekunden Adaptationszeit den Grad der Farbtonung auf einer Skala von 0 („rein Weiß“) bis 100 („reiner Farbton“) ein.

Die Farbörter für die 4 ähnlichsten Farbtemperaturen aus den ersten beiden Untersuchungsreihen, die jeweils als ‚reinstes Weiß‘ bezeichnet wurden, wurden in der 3. Untersuchungsreihe mehrfach in unterschiedlicher Reihenfolge, mit und ohne Hintergrundbeleuchtung in den jeweiligen Farbtemperaturen den Probanden dargeboten. Die Versuchspersonen beurteilten erneut, welche Box am ehesten Weiß erscheint und welchen Grad der Farbtonung die anderen Boxen hatten.

Für die Farbtemperaturen, bei denen das ‚reinste Weiß‘ nach Probandenurteil vom Planckschen Kurvenzug abweicht, wurden in der 4. Untersuchungsreihe auf dem Planckschen Kurvenzug die ähnlichsten Farben gesucht. Dafür wurde eine Box mit dem Farbort des ‚reinsten Weiß‘ beleuchtet, die Lichtfarbe der benachbarten Box wurde auf Planck in 150K Farbtemperatur-Schritten variiert. Die Versuchspersonen beurteilten, bei welchem Farbort sich die beiden Boxen am Ähnlichsten sind.

In der 5. Untersuchungsreihe wurde der Bereich rund um das ‚reinste Weiß‘ aus Untersuchungsreihe 3 gesucht, bei dem gerade noch keine Farbtonung sichtbar ist. Dafür wurde der Farbort in einer Schrittweite von $\Delta xy=0,05$ in 4 Achsrichtungen variiert. Die Probanden beurteilten, ab wann eine sichtbare Farbtonung auftrat.

5 Ergebnisse

5.1 Wahrnehmung und Akzeptanz von Farbtonungen bei verschiedenen Lichtfarben

Die Untersuchungsreihen 1 und 2 zeigen für 3000K und 4000K eine Abweichung des Farbortes mit der geringsten Farbtonung vom Planckschen Kurvenzug.

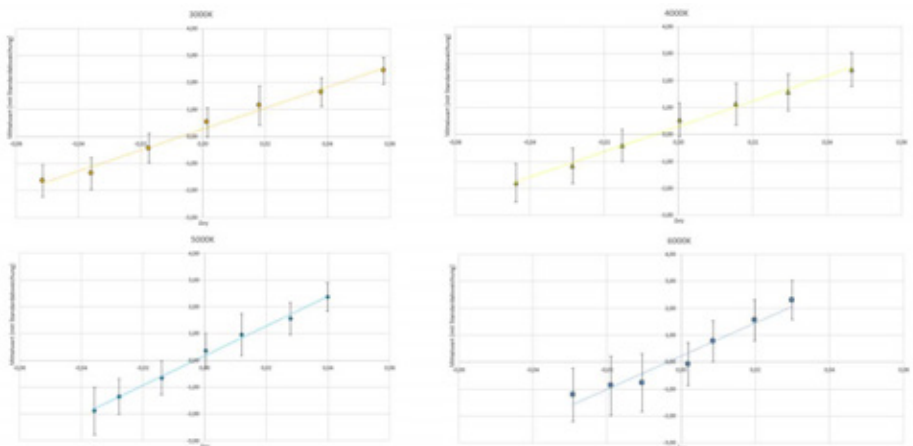


Abb. 3: Die Diagramme zeigen die Mittelwerte der subjektiven Bewertung und ihre Streuung in Relation zum xy-Farbabstand vom Planckschen Kurvenzug

Die Farborte liegen, wie Abb.3 und Abb.4 zeigen, für eine Bewertung von 0 leicht unterhalb von Planck (3000K: $\Delta xy = -0,01$; 4000K: $\Delta xy = -0,009$). Der Abstand entspricht von der Größe her ungefähr einem 3-fachen MacAdam-Abstand (nicht wahrnehmungsgetreu gleichabständig). Bei 5000K und 6000K liegt der Farbort mit der geringsten sichtbaren Farbtonung nahezu auf dem Planckschen Kurvenzug (5000K: $\Delta xy = -0,003$; 6000K: $\Delta xy = -0,0008$).

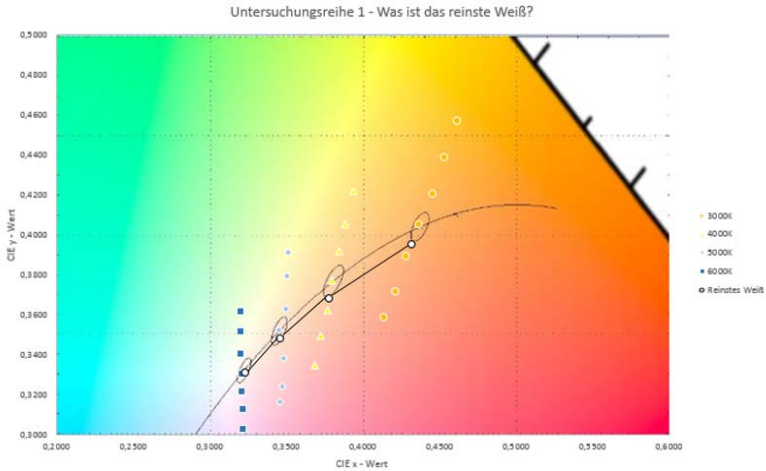


Abb. 4: Die Grafik zeigt für die vier untersuchten Farbtemperaturen (7 Farborte entlang der Juddschen Geraden - farbige Punkte mit weißem Rand) die Lage der Farborte, die als reinstes Weiß gewählt wurden (weiße Kreise mit schwarzem Rand). Zusätzlich sind der Plancksche Kurvenzug und 3-Step MacAdam-Ellipsen für die untersuchten Farbtemperaturen dargestellt

In der 3. Untersuchungsreihe wurde beim direkten gegenseitigen Vergleich der vier als ‚reinstes Weiß‘ beurteilten Farborte derjenige mit der ähnlichsten Farbtemperatur 5000K als am Häufigsten im 1. Rang der geringsten sichtbaren Farbtonung gesehen (siehe Abb. 5.).

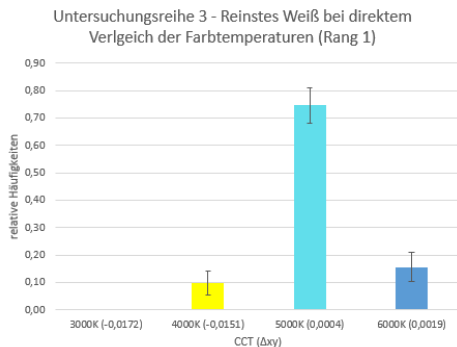


Abb. 5: Häufigkeit der Nennung ‚reinstes Weiß‘ (Rang 1) der Farbtonung für die 4 ähnlichsten Farbtemperaturen im Vergleich zueinander

5.2 Minimierung des Bereiches der sichtbaren Farbtonung für weißes Licht

Aus der Untersuchungsreihe 5 lässt sich der Bereich ableiten in dem noch keine sichtbare Farbtonung wahrgenommen wird. Die Untersuchungsreihe wurde für die ähnlichste Farbtemperatur 5000K durchgeführt, da diese sich aus Untersuchungsreihe 3 als der Farbort der geringsten Farbtonigkeit ergeben hat.

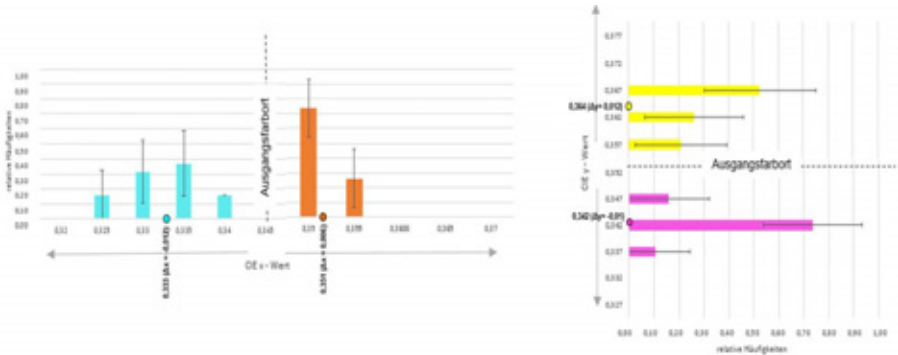


Abb. 6: Die Balkendiagramme zeigen für die untersuchten Farbabstände die Häufigkeit, dass noch keine Farbtonigkeit wahrgenommen wurde für die Farbtemperatur 5000K in x- (links) und y-Richtung (rechts). Das gewichtete Mittel ist jeweils als farbiger Punkt dargestellt.

Abbildung 6 zeigt die relativen Häufigkeiten und die Vertrauensintervalle für die dargebotenen Farborte in alle 4 Variationsrichtungen. Stellt man das Ergebnis als gewichtetes Mittel in der xy-Farbtabelle dar, ergibt sich annähernd eine Ellipse (siehe Abb. 7).

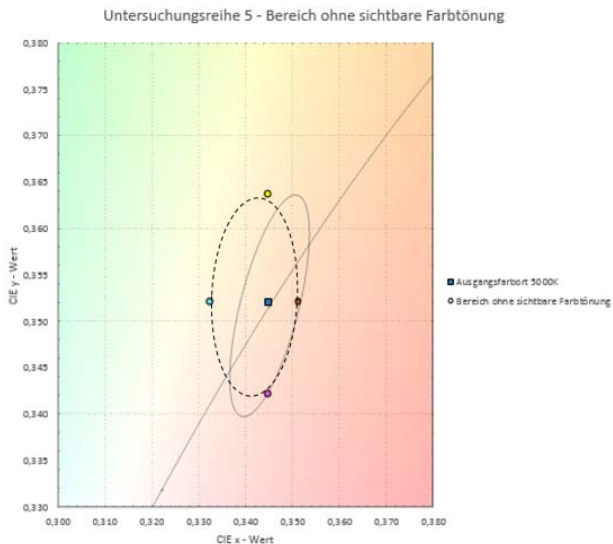


Abb. 7: Das Diagramm zeigt ausgehend für den Farbort 5000K auf Planck die MacAdam 5-Step Ellipse (durchgezogene Linie) und die aus der Untersuchungsreihe resultierende Ellipse (gestrichelt) dargestellt

5.3 Bestimmung der auf dem Planckschen Kurvenzug liegenden ähnlichsten Farbtemperatur für den idealen Weißpunkt

Die Farborte der geringsten Farbtönigkeit bei 3000K und 4000K lag leicht unterhalb des Planckschen Kurvenzuges. Für sie wurde in der Untersuchungsreihe 4 der ähnlichste Farbort auf dem Planckschen Kurvenzug liegend gesucht. Abbildung 8 zeigt die relativen Häufigkeiten und die Vertrauensintervalle der von den Versuchspersonen genannten ähnlichsten Farbe auf dem Planckschen Kurvenzug.

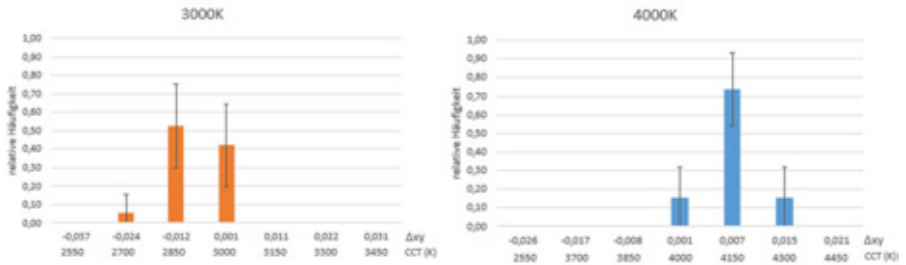


Abb. 8: Die Balkendiagramme stellen die relativen Häufigkeiten der mit den als ‚reinstes Weiß‘ am ähnlichsten wahrgenommenen Farben auf dem Planckschen Kurvenzug dar.

Das Äquivalent des Farbortes der geringsten Farbtönigkeit für die ähnlichste Farbtemperatur von 4000K liegt auf Planck bei 4150K ($\Delta xy=0,007$). Verbindet man die Punkte mit einer Geraden ergibt sich eine leichte Drehung gegenüber der Juddschen Geraden, wie bisher bekannt. Bei der ähnlichsten Farbtemperatur von 3000K ist das Ergebnis nicht eindeutig. Die häufigsten Nennungen lagen im Bereich von 2850K und 3000K auf dem Planckschen Kurvenzug. Eine feinere Auflösung der Schrittweiten würde hier Aufschluss bringen. Die Daten werden in Zukunft noch weiter ausgewertet und die Abweichungen auf Signifikanz geprüft.

6 Diskussion und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen ähnlich wie in den Untersuchungen von REA Abweichungen von Plank für warmweiße Farbtemperaturen, wenn auch mit nicht so starker Ausprägung. Für tageslichtweiße Lichtfarben konnte eine Abweichung nicht nachgewiesen werden. Als ‚reinstes Weiß‘ wurde der Farbort von 5000K auf dem Planckschen Kurvenzug empfunden. Falls in der Praxis keine sichtbare Farbtonung gewünscht ist, sollte der Farbort nicht von dem Bereich $x=0,333-0,351$ und $y=0,342-0,64$ abweichen.

In wie weit die Sichtbarkeit der Farbtonung vom Adaptationszustand abhängt und wann es zu einer Verminderung der Akzeptanz kommt muss in weiteren Auswertungen und Untersuchungen geprüft werden.

/1/ Rea, M., „Value Metrics for better lighting“, SPIE Press, Bellingham, Washington, USA (2013)