

Untersuchung der Duv-Präferenz in Abhängigkeit von korrelierter Farbtemperatur (CCT), Farbgamut und betrachteten Objekten

Elisabeth Kemmler, M.Sc., Paul Myland, M.Sc., Julian Klages, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet für Adaptive Lichttechnische Systeme und Visuelle Verarbeitung, Hochschulstraße 4a, 64289 Darmstadt

Kurzfassung

Der Weißpunkt einer im Innenraum verwendeten LED-Lichtquelle hat einen entscheidenden Einfluss darauf, ob Menschen die Beleuchtung akzeptieren oder nicht. Daher wurden in den letzten Jahren vermehrt Präferenzuntersuchungen zum Weißpunkt durchgeführt, um die Innenraumbeleuchtung mit LED zu optimieren. Die Studienergebnisse zeigten, dass die Testpersonen bei verschiedenen CCTs negative Duv-Werte präferieren. Allerdings wurde bei diesen Studien weder eine Einordnung in einen bestimmten Kontext vorgenommen, noch die Auswahl vorhandener und beleuchteter, farbiger Objekte begründet. Deshalb wurde im Rahmen einer eigenen Probandenstudie untersucht, welchen Einfluss die korrelierte Farbtemperatur, der Farbgamut und die betrachteten Objekte auf den präferierten Duv-Wert und somit Weißpunkt haben. Die Untersuchung ergab, dass für die CCT 4000 K Duv-Werte zwischen -0,0045 und -0,0015, also nahe des Planck'schen Kurvenzugs, präferiert wurden. Farbige Objekte hatten keinen signifikanten Einfluss auf die Präferenz. Der Einfluss des Farbgamuts konnte nicht vollständig geklärt werden.

Index Terms: Innenraumbeleuchtung, Weißpunkt, CCT, Duv, Präferenz



1 Motivation

Aus der neueren Literatur des 21. Jahrhunderts ist bekannt, dass die Farbqualität einer qualitativ hochwertigen Beleuchtung einen entscheidenden Einfluss auf die Nutzerakzeptanz hat [1]. Vor allem die Qualität des wahrgenommenen Weißtones der Lichtquelle spielt dabei eine wichtige Rolle [1]. Ist die Qualität des Weißtons in einem Raum nicht akzeptabel (z.B., weil das Weiß einen stark sichtbaren Grünstich hat), wird dadurch grundsätzlich die visuelle Akzeptanz aller anderen Farbqualitätsaspekte verhindert [1]. Deshalb ist es wichtig bei der Innenraumbeleuchtung mit LED darauf zu achten, welcher Weißpunkt für welche Anwendung gewählt wird.

Der Weißpunkt einer weißen LED-Lichtquelle kann mithilfe der korrelierten Farbtemperatur CCT und dem sogenannten Duv vollständig und auf intuitive Weise beschrieben werden [2]. Der Duv-Wert gibt dabei die Lage des Farbortes in Bezug auf den Planck'schen Kurvenzug an [2]. Bei einem negativen Duv-Wert ist der Weißpunkt in Richtung Purpurlinie verschoben [3]. Bei einem positiven Duv-Wert liegt eine Verschiebung des Weißpunkts ins Gelb-Grünliche vor [3].

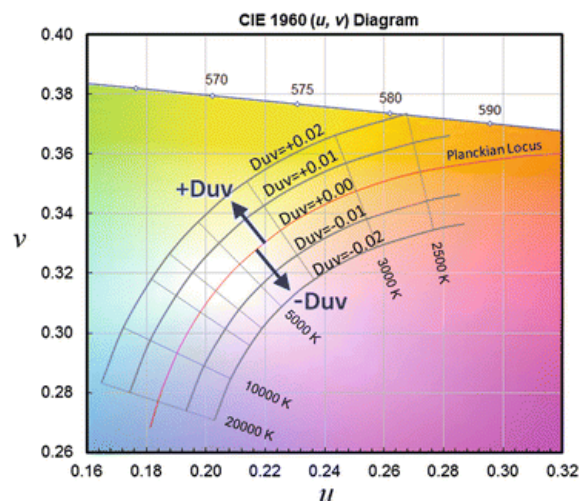


Abbildung 1: Visualisierung von Duv-Skalen in Bezug auf den Planck'schen Kurvenzug in der u-v-Farbtabelle [3]

In den letzten Jahren haben verschiedene Forschungsgruppen Untersuchungen zur Weißpunktpräferenz durchgeführt. Das Ziel dieser Studien war es, den von Probanden präferierten Duv-Wert für eine oder mehrere bestimmte CCTs zu ermitteln. Die Ergebnisse der Studien sind jedoch zu hinterfragen, da weder eine Einordnung in einen bestimmten Kontext vorgenommen noch die Auswahl vorhandener und beleuchteter, farbiger Objekte begründet wurde. Vor diesem Hintergrund wurde in einer eigenen Probandenstudie untersucht, inwiefern die korrelierte Farbtemperatur, der Farbgamut und die betrachteten Objekte einen Einfluss auf den präferierten Duv-Wert und somit auf den präferierten Weißpunkt haben.

2 Methodik

2.1 Studienaufbau

Die Probandenstudie wurde in einem Labor des Fachgebiets für Adaptive Lichttechnische Systeme und Visuelle Verarbeitung an der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt. Der weißgestrichene Raum hat eine Größe von 3.07 m x 3.00 m x 2.53 m (Länge x Breite x Höhe) und war auf 22° C klimatisiert. Für den Versuch mussten die Testpersonen auf einem Stuhl in der Raummitte Platz nehmen und die Wand vor sich betrachten. An dieser Wand wurden im Laufe der Studie verschiedenfarbige Testfarbtafeln befestigt. Mithilfe der Testfarbtafeln sollte ursprünglich der Einfluss vorhandener farbiger Objekte sowie der Einfluss des Farbgamuts auf die Duv-Präferenz untersucht werden. Allerdings zeigte eine Vorversuchsmessung, dass die durch eine Duv-Änderung wahrgenommene Sättigungsänderung ΔE_{ab} deutlich geringer war als der wahrgenommene Helligkeitsunterschied ΔE_j . Deshalb wurde entschieden, zum einen Testfarbtafeln zu verwenden, deren Helligkeitskomponente sich bei einer Duv-Änderung stark verändert, und zum anderen Testfarbtafeln zu verwenden, deren Helligkeitskomponente sich bei einer Duv-Änderung kaum verändert. Außerdem wurde beschlossen, die Duv-Präferenz zum Vergleich nur für eine weiße Fläche also ohne (farbige) Testobjekte zu bestimmen. Somit wurde die Duv-Präferenz in drei verschiedenen Szenarien untersucht: 1. Keine Testobjekte an der Wand, 2. Farbsamples mit hoher Helligkeitsveränderung an der Wand, 3. Farbsamples mit niedriger Helligkeitsveränderung an der Wand (s. Abbildung 2).

Als Lichtquelle wurde ein LED-System mit sechs einzeln ansteuerbaren Kanälen (Rot, Grün, Blau, Amber, Cyan und Lime) verwendet. Die Beleuchtungsstärke E wurde auf 300 lx eingestellt, was einem Richtwert für Museumsbeleuchtung entspricht. Für die Weißpunkte wurde eine konstante CCT von 4000 K (neutralweiß) gewählt und die Duv-Werte wurden zwischen -0,024 und +0,024 in 0,003 großen Schritten variiert.

2.2 Studienablauf

Zu Beginn der Studie wurden die Probanden auf Farbfehlsichtigkeit geprüft. Anschließend wurden sie in den Laborraum geführt, wo sie sich 5 Minuten lang auf einen Weißpunkt adaptieren mussten. Dabei war es zufällig, ob dieser Weißpunkt a) CCT = 4000 K & $D_{uv} = -0,024$ oder b) CCT = 4000 K & $D_{uv} = +0,024$ war. Nach der Adaptationszeit wurde die Duv-Präferenz mithilfe des adaptiven Staircase-Verfahrens ermittelt. Als Nächstes wurde der andere Weißpunkt (b oder a) als Startweißpunkt an der Lichtquelle eingestellt. Nach 2 weiteren Minuten Adaptationszeit wurde die Duv-Präferenz erneut mit dem adaptiven Staircase-Verfahren bestimmt. Danach mussten sich die Probanden 2 Minuten auf den Weißpunkt CCT = 4000 K & $D_{uv} = 0$ adaptieren und schließlich ihren bevorzugten Duv-Wert über die Herstellungsmethode selbst einstellen.

Dieser Ablauf wurde für alle drei Szenarien wiederholt. Der einzige Unterschied war, dass die Adaptationszeit vor Beginn des ersten adaptiven Staircase-Verfahrens in Szenario 2 und Szenario 3 jeweils nur 2 statt 5 Minuten betrug.



Abbildung 2: Die verschiedenen Szenarien der Probandenstudie mit unterschiedlichen Testobjekten [4]

3 Ergebnisse

3.1 Probanden

Insgesamt nahmen 24 Personen – 8 Frauen und 16 Männer – an der Studie teil. Das Alter der Testpersonen lag zwischen 22 und 40 Jahren ($M = 27,42$; $SD = 4,3$). Alle Probanden verfügten über eine normale Farbsehfähigkeit.

3.2 Duv-Präferenz

Die Duv-Präferenz der einzelnen Probanden wurde für die Messreihen, bei denen das adaptive Staircase-Verfahren angewandt wurde, aus den Duv-Werten an den Umkehrpunkten berechnet. Für die Messreihen, bei denen die Herstellungsmethode zum Einsatz kam, war keine zusätzliche Berechnung erforderlich. Hier wurden die Duv-Werte als Ergebnis berücksichtigt, welche die Probanden selbst eingestellt haben.

Die bevorzugten Duv-Werte aller Probanden sind nach den drei Szenarien getrennt in Abbildung 3 und Tabelle 1 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Minimalwerte in allen drei Szenarien gleich sind. Dasselbe gilt für die Maximalwerte. Allerdings handelt es sich dabei in den Szenarien 2 und 3 um Ausreißer. Die eigentliche Streuung ist im Vergleich zu Szenario 1 wesentlich geringer, wie man anhand der Länge und Position der Boxplot-Whisker sehen kann. Auch der Interquartilsabstand, in dem sich die mittleren 50 % der Daten befinden, ist in Szenario 1 größer als in den Szenarien 2 und 3. Dennoch liegen alle drei Mediane innerhalb aller Boxgrenzen aller drei Boxplots. Außerdem handelt es sich bei allen drei Medianen um negative Duv-Werte. In Szenario 1 beträgt der Median $D_{uv} = -0.003$, in Szenario 2 $D_{uv} = -0.0015$ und in Szenario 3 $D_{uv} = -0.0045$. Ein durchgeführter Hypothesentest hat ergeben, dass es zwischen den Bewertungen der drei betrachteten Szenarien keine signifikanten Unterschiede gibt.

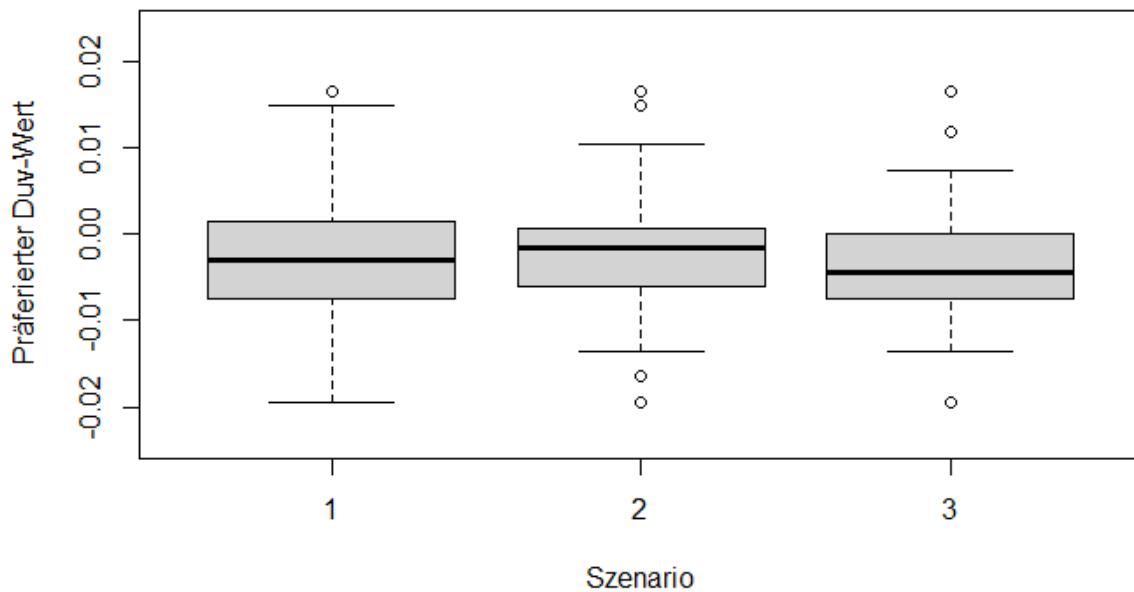


Abbildung 3: Boxplots der präferierten Duv-Werte bei 4000 K in den drei verschiedenen Szenarien (1. Keine Testobjekte an der Wand, 2. Farbsamples mit hoher Helligkeitsveränderung an der Wand, 3. Farbsamples mit niedriger Helligkeitsveränderung an der Wand) [4]

Tabelle 1: Duv-Präferenz aller Probanden bei 4000 K in den drei verschiedenen Szenarien (1. Keine Testobjekte an der Wand, 2. Farbsamples mit hoher Helligkeitsveränderung an der Wand, 3. Farbsamples mit niedriger Helligkeitsveränderung an der Wand) [4]

Szenario	Minimum (0%)	Unteres Quartil (25 %)	Median (50 %)	Oberes Quartil (75 %)	Maximum (100 %)
1	-0.0195	-0.0075	-0.0030	+0.0015	+0.0165
2	-0.0195	-0.0060	-0.0015	-0.0003	+0.0165
3	-0.0195	-0.0075	-0.0045	0	+0.0165

4 Diskussion

Da es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Szenarien ohne und mit farbigen Testobjekten gibt, ist davon auszugehen, dass die Duv-Präferenz in erster Linie vom wahrgenommenen Weißton abhängt und nicht von der Farberscheinung vorhandener farbiger Objekte. Zudem kann die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Szenarien 2 und 3 so interpretiert werden, dass auch die Helligkeitsänderung keinen signifikanten Einfluss auf die Duv-Präferenz gehabt hat. Die Testobjektwahl lässt keinen

Rückschluss auf einen möglichen Einfluss des Farbgamuts auf die Duv-Präferenz zu. Deshalb ist eine weitere Studie mit besser ausgewählten Testobjekten notwendig, um diesbezüglich eine fundierte Aussage treffen zu können. Da die Untersuchung für eine CCT (4000 K) im neutralweißen Bereich durchgeführt wurde, war die Annahme vor Studienbeginn, dass die präferierten Duv-Werte in der Nähe des Planck'schen Kurvenzug liegen. Diese Hypothese wurde die Studienergebnisse bestätigt. Die am weitesten vom Planck'schen Kurvenzug entfernte Interquartilsabstandsgrenze lag bei $D_{uv} = -0.0075$. Aufgrund der Resultate anderer Studien ist davon auszugehen, dass sich dieser Wert für CCTs im warm- oder kaltweißen Bereich verändert. Dieser Unterschied wird aller Voraussicht aber nicht zu groß sein, da ein Duv-Wert von $\pm 0,01$ bereits einem deutlich verfärbten Weißpunkt entspricht.

5 Fazit

Im Rahmen einer Probandenstudie wurde untersucht, inwiefern die korrelierte Farbtemperatur, der Farbgamut und vorhandene farbige Objekte einen Einfluss auf die Duv-Präferenz und somit auf die Weißpunktpräferenz haben.

Die Duv-Präferenz wurde in einem Labor bei einer Beleuchtungsstärke von 300 lux und einer CCT von 4000 K für drei verschiedene Szenarien ermittelt: 1. Keine Testobjekte an der Wand, 2. Farbsamples mit hoher Helligkeitsveränderung an der Wand, 3. Farbsamples mit niedriger Helligkeitsveränderung an der Wand. Dabei sind sowohl das adaptive Staircase-Verfahren als auch die Herstellungsmethode als Datenerhebungsverfahren zum Einsatz gekommen. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Testpersonen Weißpunkte mit leicht negativen Duv-Werten bevorzugen. In Szenario 1 liegt der präferierte Duv-Wert bei $D_{uv} = -0,003$, in Szenario 2 bei $D_{uv} = -0,0015$ und in Szenario 3 bei $D_{uv} = -0,0045$. Damit wurde experimentell bestätigt, dass die bevorzugten Duv-Werte für neutralweiße CCTs nahe des Planck'schen Kurvenzugs liegen. Es bestehen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Ergebnissen der drei Szenarien, was zu der Schlussfolgerung führt, dass die Duv-Präferenz in erster Linie vom wahrgenommenen Weißton der Wand abhängt und nicht von vorhandenen farbigen Testobjekten. Der Einfluss des Farbgamuts konnte aufgrund der Testobjektauswahl nicht geklärt werden, so dass eine weitere Untersuchung erforderlich ist.

6 Referenzen

- [1] T. Q. Khanh, P. Bodrogi und Q. V. Trinh, *Color quality of semiconductor and conventional light sources*, Weinheim: Wiley-VCH, 2017.
- [2] Y. Ohno, „Practical Use and Calculation of CCT and Duv,“ *LEUKOS*, pp. 47-55, 2014.

- [3] Y. Ohno, „Color Quality,“ in *Solid State Lighting Reliability Part 2. Components to Systems*, Cham: Springer International Publishing, 2018, p. 179–199.
- [4] E. Kemmler, *Präferenzuntersuchung des Weißpunktes (Duv) in Abhängigkeit der Farbtemperatur, des Farbgamut und der betrachteten Objekte*, Darmstadt, Hessen: Technische Universität Darmstadt, 2022.