

Grundlagenuntersuchung zur Farbdynamik

Karin Bieske, Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik

1 EINLEITUNG

Dynamische Beleuchtungskonzepte erlauben die zeitliche Variation des Beleuchtungsniveaus und der spektralen und räumliche Lichtverteilung. Durch die Dynamisierung der Beleuchtung sind Auswirkungen sowohl auf die visuelle Wahrnehmung als auch auf biologische Prozesse und die emotionale Lichtwirkung zu erwarten. Der Entwurf von Steuerstrategien setzt grundlegende Kenntnisse über die quantitative und qualitative Wirkung des Lichtes im Hinblick auf das Beleuchtungsniveau und die Lichtfarbe, deren zeitliche Modulation und das Farberscheinungsbild voraus. Derzeit gibt es kaum gesicherte Erkenntnisse für die Entwicklung von Steuerstrategien. Inhalt dieses Beitrags sind visuelle Untersuchungen zur zeitlichen Änderung der Lichtfarbe. Schwerpunkte sind dabei der Einfluss des Beleuchtungsniveaus, der Farbabstände bei sprunghaften Farbwechseln, des Weges der Lichtfarbenänderung im Farbraum und Betrachtungen zu die zeitlichen Grenzen der Lichtfarbensteuerung.

2 VERSUCHSAUFBAU UND METHODIK

Die Untersuchungen fanden in einem Lichtsimulator statt, dessen Grundfläche eine Größe von 80 x 130 cm² hat und in dem als Lichtquellen sechs symmetrisch angeordnete RGB-Leuchtstofflampen verwendet wurden (Abbildung 2). Hierfür wurde der Aufbau und ein Steueralgorithmus entworfen und umgesetzt, der es erlaubt, in einem bestimmten Rahmen frei einstellbare, sehr gut reproduzierbare und stabile Kennwerte für das Beleuchtungsniveau, die Lichtfarbe, den Farbort und die zeitliche Modulation zu realisieren. Damit waren Parameterstudien unter definierten Bedingungen zu verschiedenen Aspekten möglich.

Probanden bewerteten die dargebotenen sprunghaften Farbwechsel auf der Arbeitsfläche anhand einer vorgegebenen Bewertungsskala von nicht wahrnehmbar bis unerträglich (Abbildung 1).

1	2	3	4	5	6	7
nicht wahrnehmbar	gerade wahrnehmbar	sicher wahrnehmbar	zunehmend störend	störend	zunehmend unerträglich	unerträglich

Abbildung 1: Skala zur Bewertung der Empfindung



Abbildung 2: Aufbau und Einsatz des Lichtsimulators

3 UNTERSUCHUNGEN

3.1 Wahrnehmung dynamischer Lichtfarbenveränderungen

Die Darbietung von Farbsprüngen erfolgte randomisiert mit nahezu äquidistanter Schrittwerte mit Sprungweiten von $\Delta u'v' = 0,0025$ bis $\Delta u'v' = 0,01$ mit einer Stufung von $\Delta u'v' = 0,0005$. Für die Untersuchungen wurde die Lichtfarbe im Bereich zwischen 3000 K und 8000 K variiert, wobei beide Änderungsrichtungen in die Untersuchungen einbezogen wurden. Dabei wurden identische Farbwechsel in umgekehrter Reihenfolge dargeboten. Um eine Beeinflussung der Farbadaptation auf die Ausgangslichtfarbe während der Testreihen möglichst gering zu halten, wurden die Haltezeiten zwischen den Farbwechseln mit konstant $t = 3$ s vorgegeben. Die Variation der Lichtfarbe erfolgte zunächst entlang des Planckschen Kurvenzuges.

Eine erste Versuchsreihe wurde mit 10 Probanden im Alter von 20 bis 59 Jahren durchgeführt. Die Untersuchungen zeigten, dass es keinen einfachen Bezug zwischen dem Farbabstand der Sprünge und der Empfindung gibt. Große Farbabstände führen nicht in jedem Fall zu hohen Werten in der Bewertung (Abbildung 3). Über alle Farbabstände und für beide Änderungsrichtungen zeigten sich nahezu identische Kurvenverläufe (Abbildung 4). Je weiter man sich von der Start-Farbvalenz entfernt, desto störender wurden Änderungen empfunden. Es ist sehr wahrscheinlich, dass Farbumstimmungsprozesse Einfluss auf die Bewertung der Lichtfarbenveränderung haben.

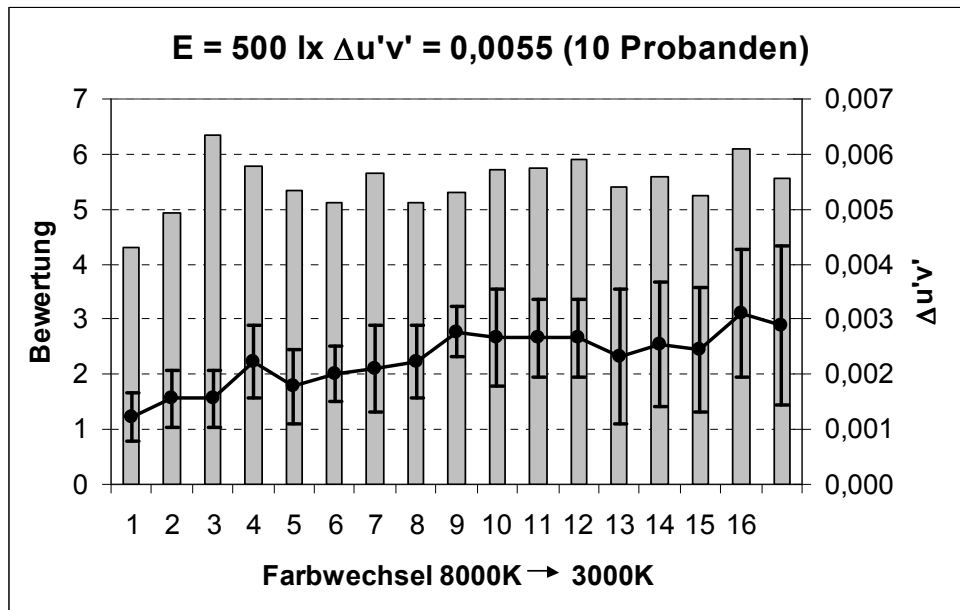


Abbildung 3: Mittlere Bewertung (Mittelwert +/- 1 Standardabweichung nach Abbildung 1) und Farbabweichung der Sprünge

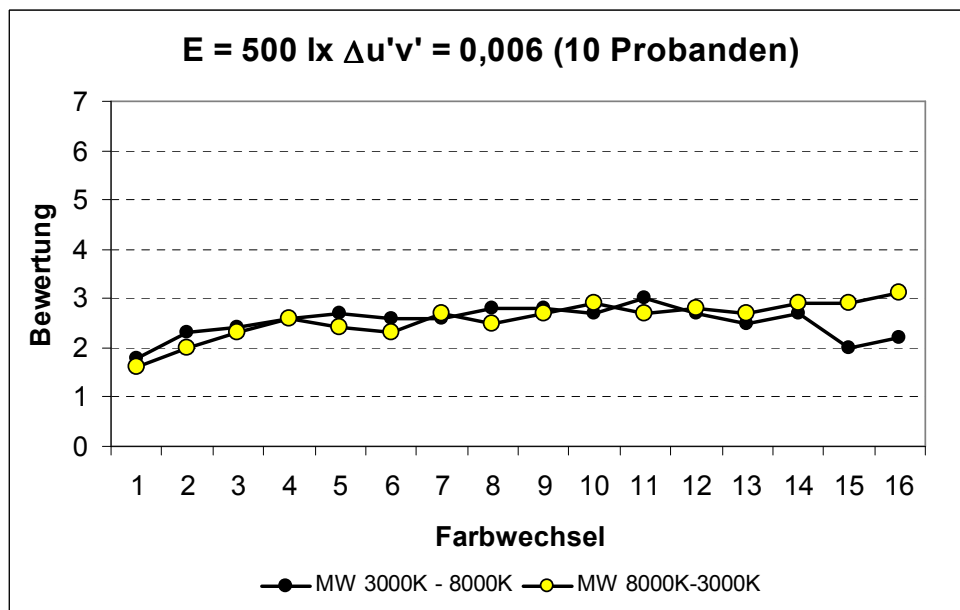


Abbildung 4: Mittlere Bewertung (nach Abbildung 1) für beide Änderungsrichtungen der Lichtfarbe

3.2 Einfluss des Beleuchtungsniveaus

Die Untersuchungen wurden für die Beleuchtungsniveaus von 300 lx, 500 lx und 1000 lx durchgeführt. Abbildung 5 stellt die mittleren Bewertungen der Probanden für die gleiche Lichtfarbenvariationsfolge für unterschiedliche Beleuchtungsniveaus beispielhaft dar. Für alle untersuchten Sprungweiten zeigten sich nahezu identische Bewertungsverläufe [Kalt05]. Die statistische Überprüfung ergab, dass die Beleuchtungsstärke keinen signifikanten Einfluss auf die Farb-

empfindung hat und bestätigte damit die Ergebnisse der Untersuchung zur Lichtfarbenpräferenz und zur Wahrnehmung von Lichtfarbensprüngen (siehe Beitrag Wahrnehmung von Farbunterschieden) [Bies05], [Bies06].

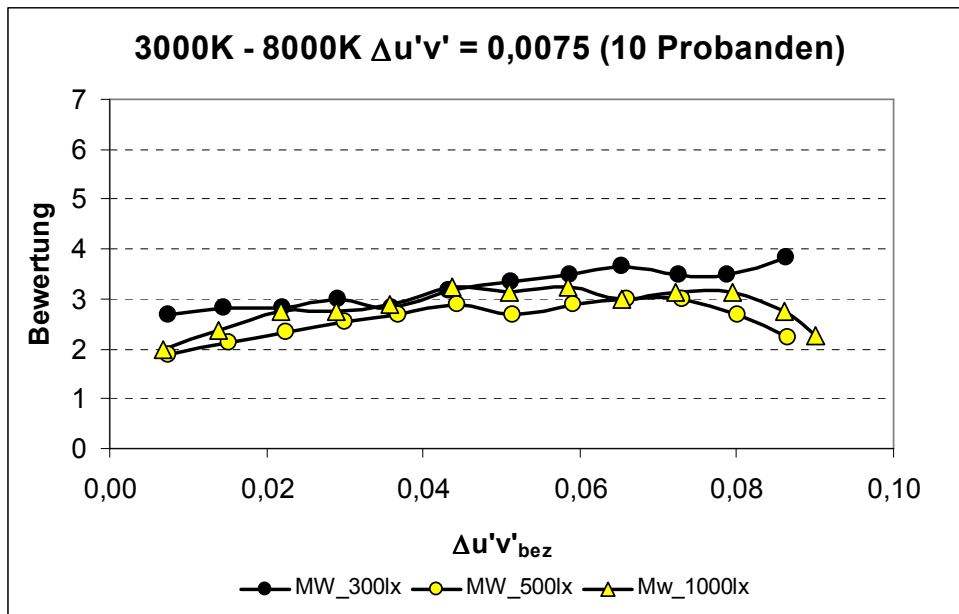


Abbildung 5: Mittlere Bewertungen (nach Abbildung 1) bei verschiedenen Beleuchtungsniveaus bezogen auf den Start-Farbtort

3.3 Einfluss des Sprungweite

In Abbildung 6 sind die mittleren Bewertungen über alle Beleuchtungsniveaus und Variationsrichtungen zusammengefasst.

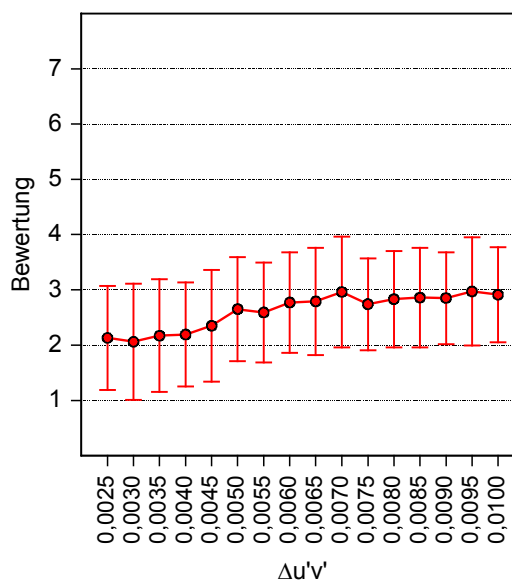


Abbildung 6: Mittlere Bewertung (Mittelwert +/- 1 Standardabweichung nach Abbildung 1) in Abhängigkeit von Sprungweite $\Delta u'v'$

Aus den Untersuchungen ergab sich eine mittlere Erkennbarkeitsschwelle unterhalb von $\Delta u'v' = 0,0025$. Der Übergang zu einem störenden Eindruck lag im Bereich von $0,0045 < \Delta u'v' < 0,0055$.

3.4 Einfluss des Variationsweges

Um Aussagen über mögliche Variationswege ableiten zu können, wurde der Einfluss des Weges bei der Lichtfarbenvariation zwischen 3000 K und 8000 K untersucht. Die Variation entlang des Planckschen Kurvenzugs wurde mit der Variation entlang einer linearen Verbindung und entlang eines Polygons, das sich an die Funktion der +/- 5 Schwellenwert-Einheiten nach DIN 5033-8 [DIN82] anschmiegt, verglichen (Abbildung 7). Basierend auf den Ergebnissen der Variation entlang des Planckschen Kurvenzuges und zur Lichtfarbenpräferenz, bei der sich kein Einfluss des Beleuchtungsniveaus zeigte, wurde für diese Untersuchungen das Beleuchtungsniveau auf 500 lx festgelegt. Die Haltezeit zwischen den Farbwechseln betrug 3 s und wurde für einen weiteren Test auf 0,1 s verkürzt. An der Untersuchung nahmen 20 Probanden teil [Bies05], [Bies06].

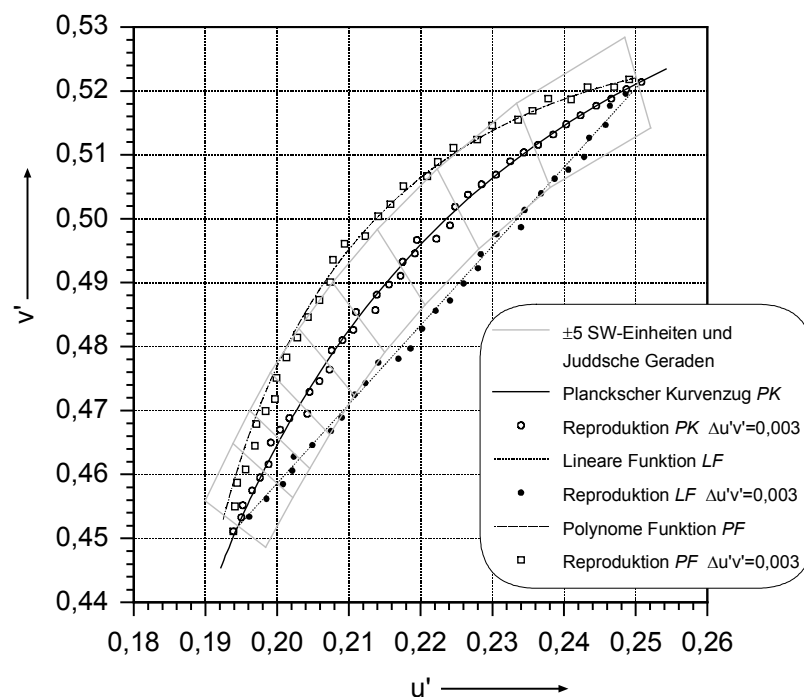


Abbildung 7: Wege zur Variation der Lichtfarbe

Die mittlere Bewertung der Farbsprünge für die verschiedenen Wege der Lichtfarbenvariation verlaufen sehr ähnlich, unabhängig von der Variationsrichtung. Innerhalb der +/- 5 Schwellenwert-Einheiten um den Planckschen Kurvenzug ist der Gesamtverlauf der Lichtfarbenvariation bei einer Haltezeit von 3 s demnach für die Beurteilung sprunghafter Farbwechsel nicht ent-

scheidend (Abbildung 8). Im Sinne der Vergleichbarkeit wurden die Farbabstände der Sprünge auf den Start-Farbot bezogen.

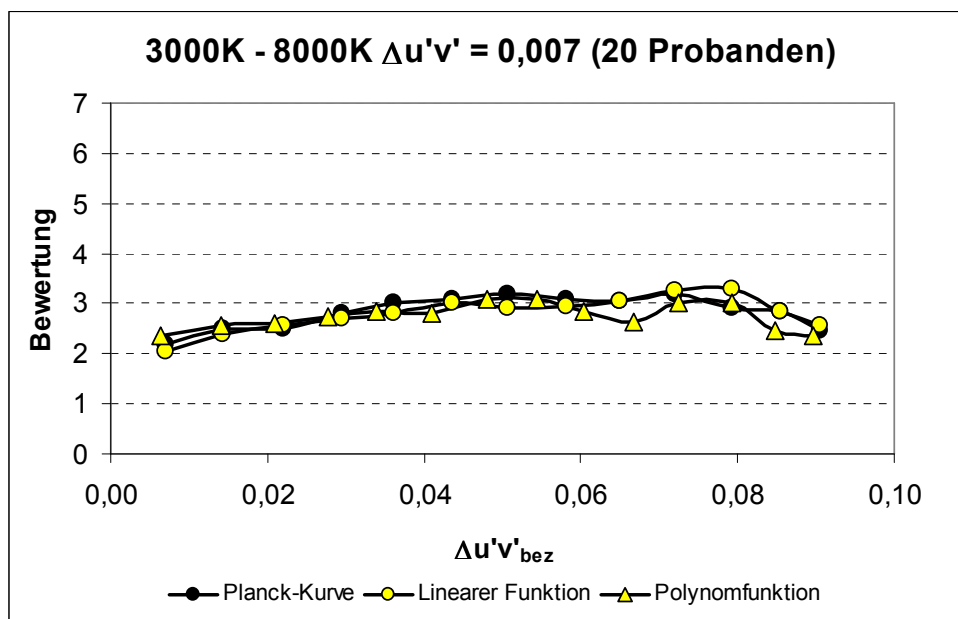


Abbildung 8: Vergleich der mittleren Bewertungen für verschiedene Wege der Lichtfarbenvariation (Haltezeit: 3 s) bezogen auf den Start-Farbot

Bei den Versuchen zeigte sich, dass die Probanden bei einer Haltezeit der Sprünge von $t = 3$ s nur eine unsichere Aussage bezüglich einer Unterscheidung der verschiedenen Variationsarten treffen konnten. Für längere Gesamtzeiten bei der Variation ist anzunehmen, dass die Differenzierung auf Grund der nachlaufenden Farbumstimmung unmöglich ist. Durch Verkürzung der Haltezeit wurde getestet, ob eine Abgrenzung der Farbnuanzen bei der Variation entlang des Polygons (PF) und auf der linearen Verbindung (LF) möglich ist. Abbildung 9 (links) zeigt die identifizierten Farbigkeiten.

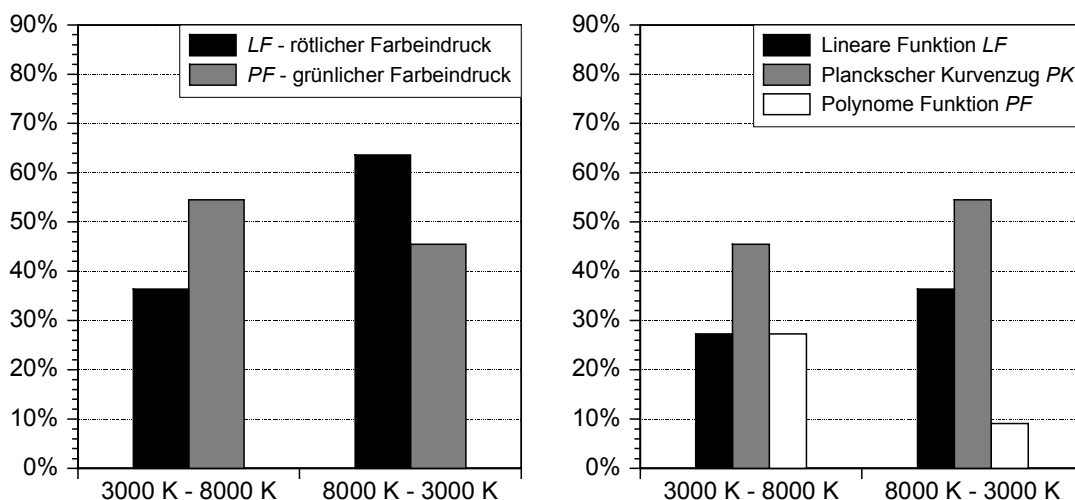


Abbildung 9: Identifizierte Farbigkeit (links) und bevorzugte Variation (rechts)

Bei kurzen Haltezeiten zeigte sich, dass die Farbigkeit des Gesamtverlaufs erfasst wird. In diesem Fall wurde die Variation über dem Planckschen Kurvenzug eindeutig bevorzugt, wie in Abbildung 9 (rechts) zu sehen ist [Kalt05].

Bei der Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Beleuchtungsniveau und Lichtfarbe (siehe Beitrag Wahrnehmung von Farbunterschieden) wurde nicht nur die bevorzugte Lichtfarbe, sondern auch die 2. und 3. Wahl abgefragt. Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede für die 2. und 3. Wahl, sodass aus den Ergebnissen der Untersuchungen keine Vorzugsrichtung für die Variation der Lichtfarbe abgeleitet werden kann. Für die gewählte Lichtfarbe ergab sich für die 2. und 3. Wahl unabhängig vom Beleuchtungsniveau ein Bereich zwischen 4000 K bis 4400 K für die Mittelwerte und ein Bereich von 3000 K bis 6500 K für die Extremwerte (Abbildung 10).

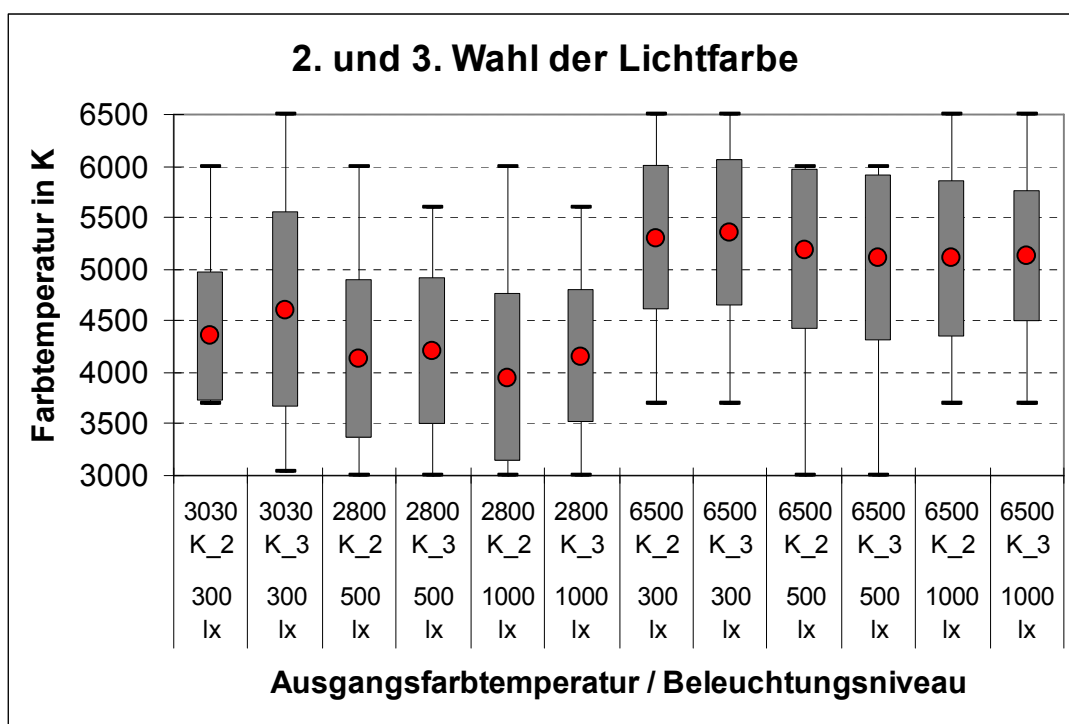


Abbildung 10: Ergebnisse der 2. und 3. Wahl für die Lichtfarbe (Minimalwert, Mittelwert mit ± 1 Standardabweichung, Maximalwert)

Ausgehend von den Adaptationsbedingungen werden eher Lichtfarben akzeptiert, die nicht zu große Unterschiede aufweisen. Dies ist wichtig für die lichttechnische Gestaltung innerhalb von Raumbereichen und die Wahl für angrenzende Räumlichkeiten, wie auch aus den Arbeiten von Gall / Vandahl [Gall96] hervorgeht.

3.5 Einfluss des zeitlichen Verlaufs

Die Empfindung der Variation der Lichtfarbe wird von den Probanden sehr unterschiedlich wahrgenommen. Beispielgebend sind Bewertungsverläufe dreier Probanden in Abbildung 11

gezeigt. Während Proband P7 keine der Lichtfarbensprünge angeben kann, variiert die Bewertung bei Proband P1 zwischen *gerade* und *sicher wahrnehmbar* und von Proband P2 wird die Änderungen um so störender empfunden wurden, je weiter man sich von der Start-Farbvalenz entfernt. Hier wirkt sich die nachlaufende Farbumstimmung bei der Variation der Lichtfarbe um $\Delta\text{CCT} = 5000 \text{ K}$ innerhalb kürzester Zeit ($\sim 3 \text{ min}$) negativ aus.

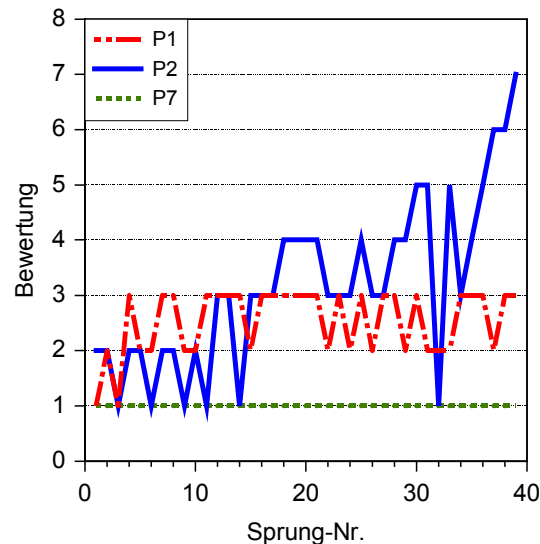


Abbildung 11: Verlauf der Bewertung der Farbwechsel am Beispiel von drei Probanden für die Lichtfarbenvariation 8000 K zu 3000 K bei einer Sprungweite von $\Delta u'v' = 0,0025$ bei $E = 500 \text{ lx}$

Langsamere Farbveränderungen und eine Einschränkung des Dynamikbereichs können hier Abhilfe schaffen. Eine Begrenzung des Lichtfarbenvariationsbereichs auf $\Delta\text{CCT} = 2000 \text{ K}$ zeigt, dass negative Bewertung deutlich seltener auftreten. Ähnliche Effekte wurden bei einer Vervielfachung der Haltezeit zwischen den Sprungwechseln beobachtet.

3.6 Einfluss auf die Änderung der Farbwiedergabe

Eine Änderung der Lichtfarbe bedeutet eine Änderung in der spektralen Verteilung der Lichtquelle, was die Farbwiedergabeeigenschaften beeinflussen kann. Besonders dann, wenn schmalbandige Lichtquellen, wie farbige LEDs, für die Lichtfarbenvariation eingesetzt werden, kann es zu Widersprüchen zwischen der bisherige Kennzeichnung mittels CIE-Farbwiedergabeindex und subjektiver Bewertung kommen. Erste Hinweise finden sich in den Arbeiten von Schierz [Schi93] zu diskontinuierlich-spektralen Lampen und von Narendran [Nare02] und Tarczali [Tarc01], die Untersuchungen mit LEDs durchführten haben.

Jungnitsch [Jun06a], [Jun06b] führte Versuche mit Lichtquellen mit kontinuierlichen und diskontinuierlichen Spektralverteilungen bei Farbtemperaturen von 3000 K und 6500 K durch. Simultan, im haploskopischen Direktvergleich wurden unterschiedliche Spektralverteilungen bei identischem Beleuchtungsniveau ($E = 500 \text{ lx}$) und übereinstimmendem Farbort bezüglich

Unterschieden in der Farbwahrnehmung an 28 Testfarben (CIE-Farbproben und Macbeth-Color-Checker) untersucht. 20 Probanden bewerteten die Merkmale „Helligkeit“, „Farbsättigung“, „Farbtemperatur“, „Farbempfinden“, „Farberinnerung“ und „Farbunterschied“. Die Bewertungen wurden zu einem Subjektiven Bewertungsindex (SBI) zusammengefasst und auf den Wertebereich des CIE-Farbwiedergabe-Index abgebildet. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 12.

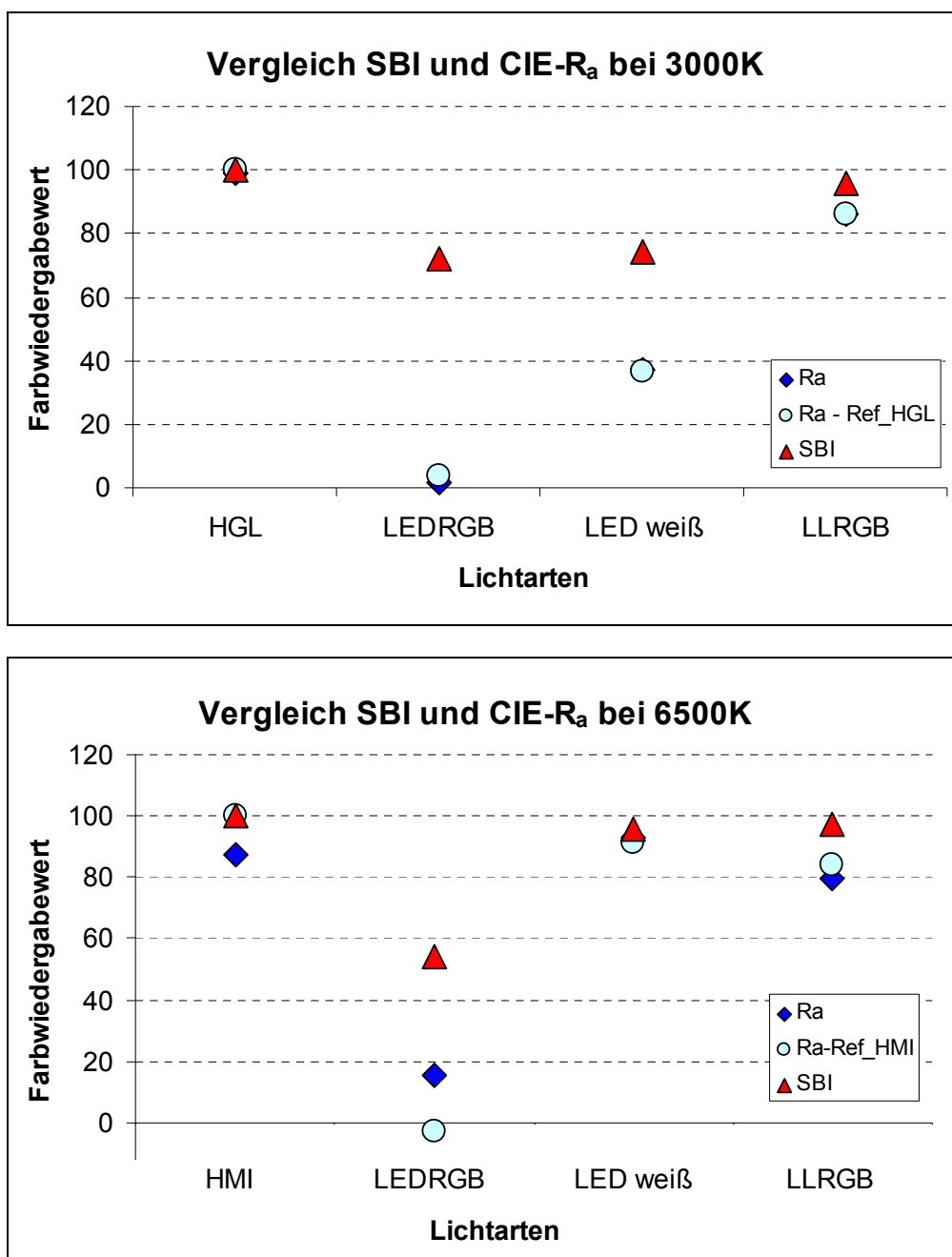


Abbildung 12: Vergleich des Subjektiven Bewertungsindex SBI mit dem CIE-Farbwiedergabeindex Ra für den Vergleich der Farbwiedergabe unter einer Halogenleuchte (HGL) und einer HMI-Lampe im Vergleich zu LED-Beleuchtung und Leuchtstofflampen (LL) (20 Probanden)

Es zeigte sich, dass die Güte der Farbwiedergabe bei diskontinuierlichen Spektren im Mittel schlechter bewertet wurde, als bei Beleuchtung durch Lichtquellen mit einer kontinuierlichen

Spektralverteilung. Wesentlich größere Unterschiede zeigten sich in den berechneten CIE-Farbwiedergabe-Indizes, so dass es Diskrepanzen zwischen der Berechnung aus den Spektraldaten zur subjektiven Bewertung gibt. Entsprechend muss die Anwendbarkeit der Bewertung der Farbwiedergabe nach dem CIE-Farbwiedergabe-Index für Lichtquellen mit diskreten Spektren, überdacht werden, und es sind weiterführende Untersuchungen zu dieser Problematik notwendig.

4. Zusammenfassung

Basierend auf den gewonnenen Ergebnissen werden folgende Empfehlungen für dynamische Beleuchtungssysteme abgeleitet:

- Variationen der Lichtfarbe können unterhalb der Erkennbarkeitsschwelle bei der Hybridlampe sprunghaft erfolgen.
- Ein signifikanter Einfluss der Beleuchtungsstärke auf die subjektive Empfindung von Farbveränderungen konnte nicht nachgewiesen werden. Damit sind beleuchtungsstärke-unabhängige Steuerungsprinzipien möglich.
- Im Bereich zwischen 4000 K und 8000 K kann der Gesamtverlauf der Lichtfarbenvariation innerhalb der +/- 5 Schwellenwert-Einheiten um den Planckschen Kurvenzug erfolgen. Für niedrige Farbtemperaturen sind die Grenzen enger zu wählen.
- Um die Farbumstimmung zu berücksichtigen, sollte die zeitliche Variation der Lichtfarbe langsam erfolgen und einen Farbtemperaturunterschied von 1500 K nicht überschreiten.
- Es sind weiterführende Untersuchungen zur subjektiven Bewertung der Farbwiedergabeeigenschaften von Lampen mit unterschiedlichen Spektralverteilungen notwendig. Ziel ist, ein Bewertungssystem, das mit der subjektiven Bewertung der Farbwiedergabeeigenschaften übereinstimmt, zu konzipieren.

Die vorgestellten Ergebnisse geben erste orientierende Anhaltspunkte für Dynamikbereiche und Schwell- und Toleranzwerte bei der Variation der Lichtfarbe, die sich an der visuellen Wahrnehmung orientieren. Antworten darauf, wie die Parameter Lichtfarbe, Beleuchtungsstärke, Lichtverteilung zeitlich über den Tagesverlauf zu variieren sind, können damit nicht gegeben werden. Dazu sind weiterführende Arbeiten notwendig, die auch die biologische Lichtwirkung mit betrachten. Hier fehlen gesicherte Erkenntnisse, die Ansätze für sinnvolle Steuerkonzepte liefern. Dann wird eine neue Qualität in der Beleuchtungstechnik möglich, die sowohl den Erfordernissen des Sehkomforts als auch photobiologischen Aspekten Rechnung trägt.

4 LITERATUR

- [KALT05] KALTENBACH, A.: *Demonstratorentwicklung einer circadianen Beleuchtungssteuerung und Untersuchung zur Farbwahrnehmung von Lichtfarbenänderungen.*, Diplomarbeit TU Ilmenau, 2005
- [Bies05] BIESKE, K.; KALTENBACH, A.: *Untersuchungen zur Wahrnehmung von Farbunterschieden.* Lux junior 2005, 23. bis 25.09.2005 Dörnfeld/Ilm
- [Bies06] BIESKE, K.; WOLF, S.; NOLTE, R.: *Wahrnehmung von Farbunterschieden von Licht- und Körperfarben,* Licht 2006, 10. bis 13.09.2006 Bern
- [DIN82] DIN 5033 Teil 8: *Farbmessung - Messbedingungen für Lichtquellen.* Beuth Verlag Berlin, April 1982
- [Gall96] GALL, D.; VANDAHL, C.: *Einzelplatzbeleuchtung und Allgemeinbeleuchtung am Arbeitsplatz,* Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz: Forschung Fb 753, 1996
- [Schi93] Schierz, Ch.: *Wirkung von Linienspektren auf die Akkomodation des Auges.* Dissertation ETH Zürich, 1993
- [Nare02] Narendran, N.; Deng, L.: *Color Rendering Properties of LED Light Sources.* Proceedings of SPIE Vol. 4776 (2002), S. 61ff
- [Tarc01] Tarczali, T. et al: *Colour Rendering Properties of LED Sources.* 2. LED-Symposium, 2001
- [Jun06a] JUNGNITSCH, K.: *Subjektive Bewertung der Farbwiedergabeeigenschaften von Lampen mit unterschiedlichen Spektren.* Diplomarbeit Technische Universität Ilmenau 2006
- [Jun06b] JUNGNITSCH, K.; BIESKE, K.; VANDAHL, C.: *Subjektive Untersuchungen zur Farbwiedergabe in Abhängigkeit vom Lampenspektrum.* Licht 2006, 10. bis 13. September 2006 Bern

Autor:

Dipl.-Ing. Karin Bieske
Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
Fachgebiet Lichttechnik
Postfach 10 06 65
98684 Ilmenau

Mail: Karin.Bieske@TU-Ilmenau.de