

Dynamische Beleuchtungssysteme - Zeitliche Variation der Lichtfarbe

Karin Bieske, Christoph Schierz

Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik

D-98693 Ilmenau

1 Hintergrund

In den letzten Jahren sind neue Erkenntnisse zur gesundheitlichen Wirkung des Lichts bekannt geworden, die wesentlich über die spektrale Zusammensetzung der Beleuchtung und damit über die Lichtfarbe beeinflusst wird. Darüber hinaus verdichten sich die Forderungen nach einer dynamischen Gestaltung der Beleuchtung und zwar nicht nur in Verbindung mit Energieeinsparungen und Tageslichtnutzung, den Anforderungen nach Individualität, Flexibilität und Wandelbarkeit, sondern auch unter dem Gesichtspunkt der biologischen Wirkung des Lichts.

Dynamische Beleuchtungssysteme erlauben die zeitliche und örtliche Veränderung ihrer lichttechnischen und farbmtrischen Parameter. Eine Steuerung oder Regelung von Beleuchtungsniveau, spektraler Zusammensetzung (Lichtfarbe) und örtlicher Lichtverteilung ist gezielt möglich. Damit haben dynamische Beleuchtungssysteme das Potential, zukünftig sowohl den visuellen Anforderungen als auch den biologischen Lichtbedürfnissen gerecht zu werden.

Die technischen Voraussetzungen zur Realisierung dynamischer Beleuchtungssysteme sind heute gegeben, jedoch fehlen fundiert begründete Steuerstrategien, nach denen die Variation der Lichtfarbe realisiert werden kann.

In früheren Veröffentlichungen wurde bereits die Wahrnehmung von Lichtfarbenänderungen bei sprunghaften Änderungen der Lichtfarbe thematisiert [1],[2]. Mit Hilfe der ermittelten Schwellen- und Toleranzwerte lassen sich Vorgaben für die situative Änderung der Lichtfarbe ableiten. Aussagen zum Dynamikumfang und zum Zeitverhalten von kontinuierlichen Lichtfarbenänderungen sind auf dieser Basis jedoch nicht möglich, da zeitliche Prozesse nicht berücksichtigt werden. Untersuchungen zu dynamischen Lichtfarbenänderungen, die Inhalt dieser Veröffentlichung sind, sollen daher Aufschluss darüber geben, in welchem Umfang, mit welchem zeitlichen Verlauf und auf welchem Wege Lichtfarbenänderungen sinnvoll sind. Zeitliche Veränderungen der Lichtfarbe sind mit Farbumstimmungsprozessen verbunden, so dass diese bei der Ableitung von Steuerkonzepten berücksichtigt werden müssen.

2 Untersuchungen

In Laboruntersuchungen wurde ein speziell ausgelegter Lichtfarbensimulator verwendet, mit dem es möglich ist, definierte Beleuchtungsszenarien bezüglich Beleuchtungsstärke, Lichtfarbe und zeitlichen Steuerung von Lichtfarbenänderungen zu realisieren (Abb. 1).

Untersucht wurde der Einfluss folgender Parameter:

- Beleuchtungsniveau E (300 lx, 500 lx, 1000 lx) $\equiv L$ (84 cd/m², 141 cd/m², 282 cd/m²) auf der Bewertungsfläche (Grundfläche des Simulators)
- Sprungweite $\Delta u'v'$ der Lichtfarbenvariation zwischen 3000 K und 8000 K in äquidistanten Schritten von $\Delta u'v' = 0,0025$ bis $\Delta u'v' = 0,0100$ mit einer Stufung von $\Delta u'v' = 0,0005$
- Dauer der Farbumstimmung

- Variationsrichtung (von niedrigen zu hohen Ähnlichsten Farbtemperaturen und umgekehrt)
- Haltezeit t_h zwischen den Lichtfarbenwechseln ($t_h = 0,2$ s, $t_h = 4,5$ s, $t_h = 13$ s)
Sie beinhaltet auch die Zeit, die für den sprunghaften Lichtfarbenwechsel benötigt wird. Nach 120 ms sind nach einem sprunghaften Lichtfarbenwechsel die Beleuchtungsverhältnisse innerhalb des Simulators wieder stabil.
- Dynamikumfang (zwischen 3000 K und 8000 K und in kleineren Umfängen)
- Variationsweg (entlang des Planckschen Kurvenzugs, mit der einer linearen Verbindung zwischen $CCT = 3000$ K und $CCT = 8000$ K und der eines Polynoms, das sich an die Funktion der +5 Schwellenwert-Einheiten gemäß DIN 5033 Teil 8 anschmiegt)

Probanden bewerteten die Lichtfarbenwechsel zwischen nicht erkennbar bis unerträglich nach der in Tab. 1 dargestellten Bewertungsskala. Ergänzt wurden Betrachtungen zur Dauer der Farbumstimmung anhand subjektiver Probandenurteile.

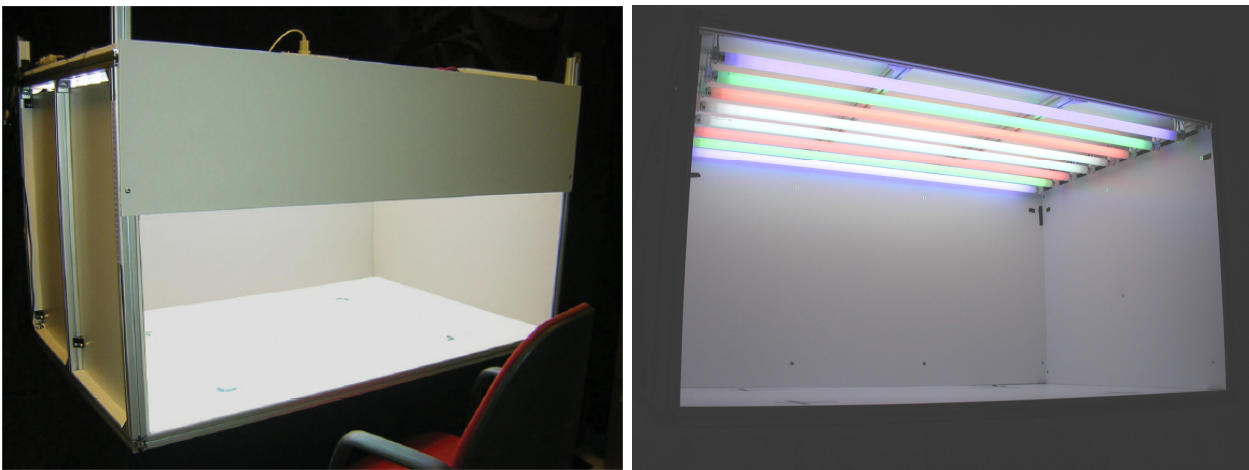


Abb. 1: Lichtsimulator

Größe: 1,3 m x 0,8 m x 0,8 m, Lichtquellen: RGB-Leuchtstofflampen (je 2 von 60, 66 und 67 T8 mit 36 W), Steuerung: über DALI-Protokoll

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

Tab. 1: Skala zur Beurteilung der Empfindung der Lichtfarbenwechsel

Die Bestimmung des Farbunterschieds erfolgte für jeden Lichtfarbensprung in der UCS- $u'v'$ -Farbtafel, die sich zur Beschreibung von Lichtfarben etabliert hat, nach Gleichung 1 bei konstantem Beleuchtungsniveau ($L = \text{konst}$). Als Bezug diente dabei jeweils die Ausgangslichtfarbe der Versuchssituation, da sie bestimmend für die chromatische Adaptation des Beobachters ist.

Gleichung 1:

$$\Delta u'v' = \sqrt{(u'_2 - u'_1)^2 + (v'_2 - v'_1)^2}$$

mit u'_1, v'_1 Bezugslichtfarbe
 u'_2, v'_2 bewertete Lichtfarbe

3 Ergebnisse

Die Variation der Lichtfarbe wird von den Probanden sehr unterschiedlich wahrgenommen. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass es keinen einfachen Zusammenhang zwischen der subjektiven Bewertung der Lichtfarbenänderung und der Sprungweite bei dynamischen Lichtfarbenänderungen gibt. Trotz nahezu äquidistanter Sprungweiten $\Delta u'v'$ für die Lichtfarbenänderung wurden die Lichtfarbenänderungen umso störender empfunden, je weiter die Lichtfarbe von der Startlichtfarbe entfernt ist. Abb. 2 verdeutlicht dies an einem Beispiel.

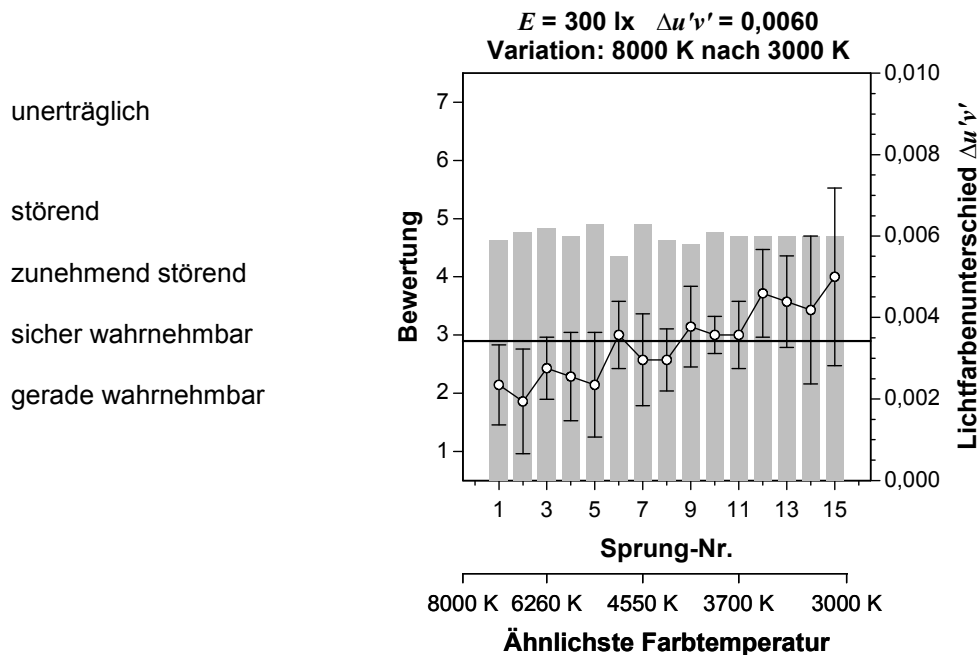


Abb. 2: Beispiel für die mittlere Bewertung der Probanden, Variation entlang des Planckschen Kurvenzugs, Variationsrichtung $CCT = 8000 \text{ K}$ nach $CCT = 3000 \text{ K}$, Sprungweite $\Delta u'v' = 0,0060$, Beleuchtungsstärke $E = 300 \text{ lx}$, Haltezeit $t_h = 4,5 \text{ s}$, Bewertung nach Tab. 1, die Balken zeigen die Farbabstände der jeweiligen Sprünge, als waagerechte Linie ist der Mittelwert aller Bewertungen dargestellt (Mittelwert und ± 1 Standardabweichung, 10 Probanden)

Die subjektiv unterschiedliche Empfindung der Lichtfarbenänderung spiegelt sich auch in der deutlichen Zunahme der Streuung der Bewertung wider. Im Mittel wurde diese Versuchsreihe von den Probanden mit einem Wert von 2,9 bewertet. Wie im Diagramm ersichtlich, traten bei diesem Mittelwert bereits störende Empfindungen auf. Zur Vermeidung störender Einflüsse sollte der Mittelwert der Bewertung nicht größer als 2,5 sein bei gleichbleibenden Untersuchungsbedingungen.

3.1 Einfluss des Beleuchtungsniveaus

Abb. 3 stellt die mittleren Bewertungen der Probanden für die gleiche Lichtfarbenvariationsfolge für unterschiedliche Beleuchtungsniveaus beispielhaft dar.

Für alle untersuchten Sprungweiten und für beide Variationsrichtungen (3000 K nach 8000 K und umgekehrt) zeigen sich für die untersuchten Beleuchtungsstärken nahezu identische Bewertungsverläufe. Die statistische Überprüfung ergab, dass die Beleuchtungsstärke im Bereich zwischen $E = 300 \text{ lx}$ bis $E = 1000 \text{ lx}$ keinen signifikanten Einfluss auf die Bewertung der Lichtfarbenänderung hat. Damit ist im Bereich zwischen $E = 300 \text{ lx}$ bis $E = 1000 \text{ lx}$ eine vom Beleuchtungsniveau unabhängige Steuerung möglich.

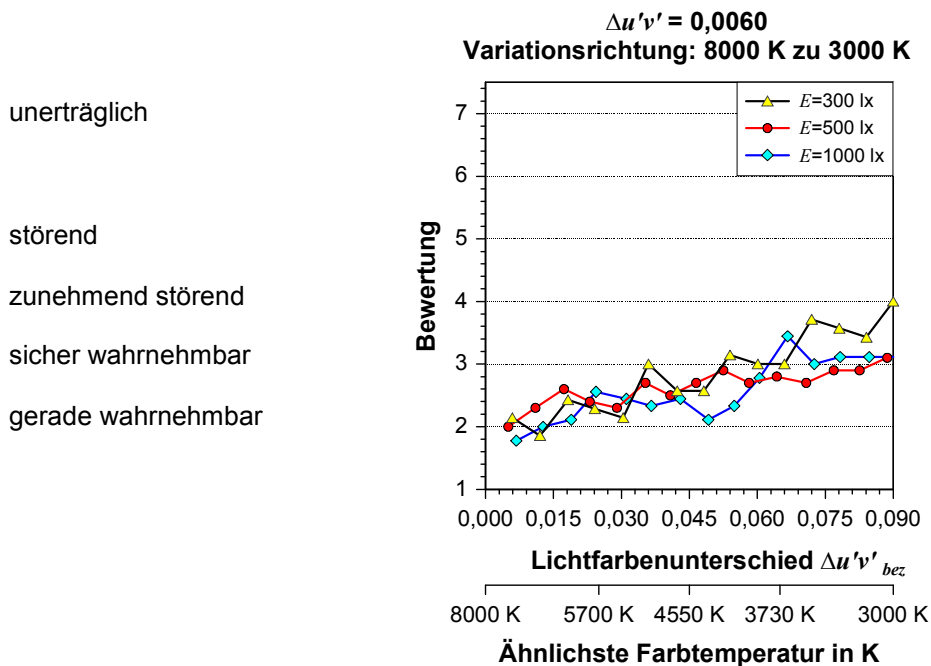


Abb. 3: Bewertungen dynamischer Lichtfarbenänderungen bei verschiedenen Beleuchtungsniveaus, Variation entlang des Planckschen Kurvenzugs, Variationsrichtung $CCT = 8000\text{ K}$ zu $CCT = 3000\text{ K}$, Sprungweite $\Delta u'v' = 0,0060$, Haltezeit $t_h = 4,5\text{ s}$, Bewertung nach Tab. 1, $\Delta u'v'_{bez}$: Lichtfarbenunterschied bezogen auf die Ausgangslichtfarbe (Mittelwert, 10 Probanden)

3.2 Einfluss der Sprungweite

In Abb. 4 sind die Mittelwerte und Mediane der Bewertungen der Untersuchung entlang des Planckschen Kurvenzuges für die jeweiligen Sprungweiten über alle Beleuchtungsniveaus, Variationsrichtungen und Probanden zusammengefasst dargestellt.

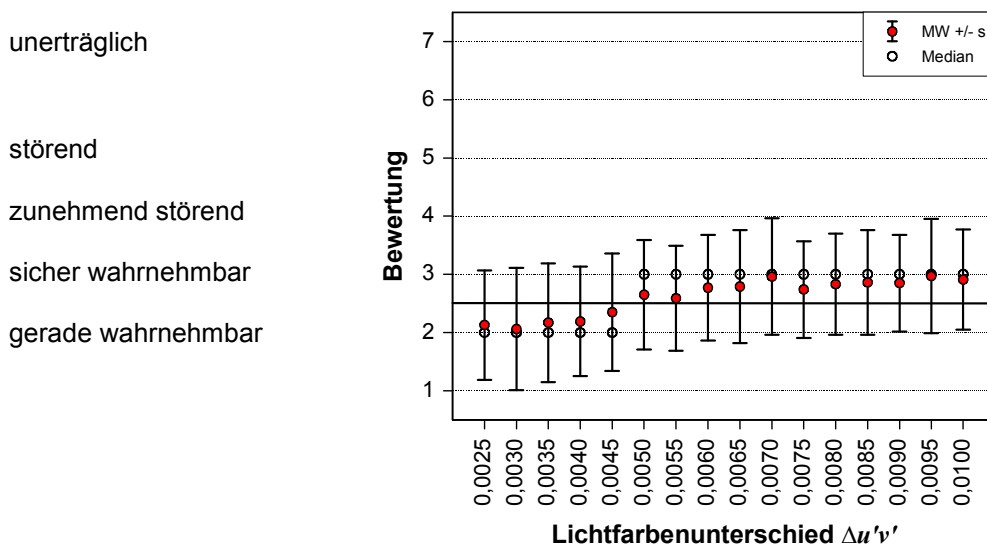


Abb. 4: Bewertung dynamischer Lichtfarbenänderungen entlang des Planckschen Kurvenzuges in Abhängigkeit von Sprungweite $\Delta u'v'$, Daten zusammengefasst über alle Beleuchtungsstärken und beide Variationsrichtungen, Haltezeit $t_h = 4,5\text{ s}$, Bewertung nach Tab. 1 (Mittelwert, und ± 1 Standardabweichung und Median, 10 Probanden)

Da der Mittelwert der Bewertung bei einer Sprungweite $\Delta u'v' = 0,0025$ größer als 2 ist, liegt die Erkennbarkeitsschwelle für Lichtfarbenunterschiede bei dynamischen sprunghaften Lichtfarbenwechseln unterhalb von $\Delta u'v' = 0,0025$. Das Ansteigen von Mittelwert und Median von den Bewertungsstufen 2 auf 3 kennzeichnet den Bereich von $0,0045 \leq \Delta u'v' \leq 0,0050$, ab dem mit einer störenden Empfindung bei sprunghaften Lichtfarbenwechseln zu rechnen ist. Demnach sind kleine Sprungweiten $\Delta u'v' \leq 0,0045$ für die Steuerung der Lichtfarbe zu bevorzugen.

3.3 Dauer der Farbumstimmung

Zur Abschätzung des Einflusses zeitlicher Prozesse bei dynamischen Lichtfarbenänderungen wurden für 15 Probanden in 8 Durchgängen die Dauer für die Farbumstimmung t_{adapt} gemessen. Es wurde die Zeit bestimmt, die benötigt wird, bis nach einem sprunghaften Wechsel der Lichtfarbe zwischen $CCT = 3000\text{ K}$ und $CCT = 8000\text{ K}$ bei konstantem Beleuchtungsniveau ($E = 500\text{ lx}$ mit $L = 141\text{ cd/m}^2$) keine Änderung der Lichtfarbe auf der Bewertungsfläche des Lichtfarbensimulators mehr wahrgenommen werden kann. Die Ergebnisse sind in Abb. 5 dargestellt.

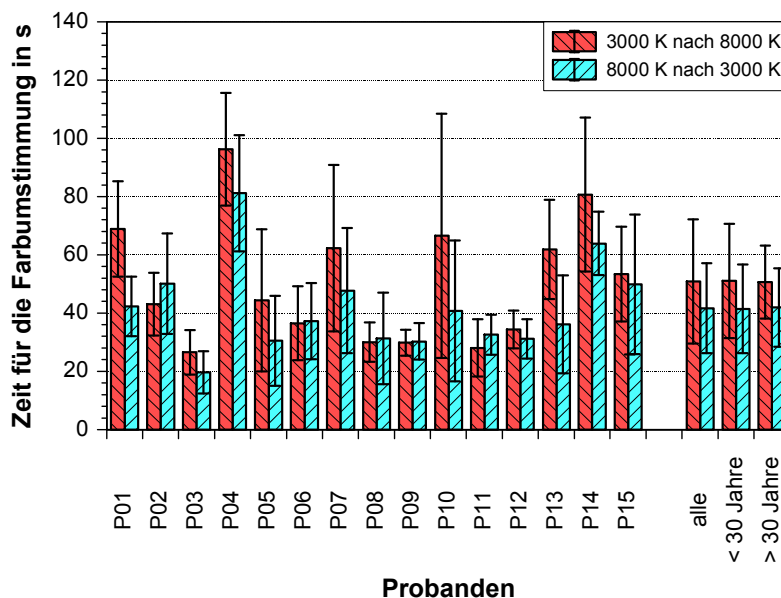


Abb. 5: Zeit für die Farbumstimmung nach sprunghafter Lichtfarbenänderung, Mittelwert und ± 1 Standardabweichung, 15 Probanden, gemittelt über 8 Durchgänge

Die Dauer der Farbumstimmung liegt im Mittel zwischen $t_{adapt} = 20\text{ s}$ und $t_{adapt} = 100\text{ s}$, weist jedoch große Unterschiede zwischen den Probanden auf und streut zum Teil erheblich. Als Orientierung kann eine notwendige Dauer von etwa $t_{adapt} = 60\text{ s}$ für die Farbumstimmung bei einem sprunghaften Lichtfarbenwechsel zwischen $CCT = 3000\text{ K}$ und $CCT = 8000\text{ K}$ angenommen werden. Zwischen den Variationsrichtungen sind keine signifikanten Unterschiede nachweisbar.

Ein Vergleich nach Altersgruppen zeigte ebenfalls keine Unterschiede. Dazu wurde die Dauer für die Farbumstimmung von Probanden, die jünger als 30 Jahre sind (8 Probanden, Durchschnittsalter: 24 Jahre), mit der Dauer der Farbumstimmung der älteren Probanden (7 Probanden, Durchschnittsalter: 43 Jahre) verglichen.

In der Untersuchung von FAIRCHILD und RENIFF [3] werden Adaptationszeiten von $t_{adapt} = 80\text{ s}$ bis $t_{adapt} = 100\text{ s}$ für den Prozess der Farbumstimmung von $CCT = 3000\text{ K}$ nach $CCT = 6500\text{ K}$ unabhängig von der Variationsrichtung angegeben. Die Änderung der Lichtfarbe erfolgte bei einer konstanten Leuchtdichte von $L = 25\text{ cd/m}^2$. Die Ergebnisse von

FAIRCHILD und RENIFF stimmen gut mit früheren Untersuchungen von FAIRCHILD [4] und den Erkenntnissen von AREND [5] überein. Die Ergebnisse gelten für mesopische Sehbedingungen. FAIRCHILD und RENIFF äußern jedoch die Vermutung, dass auch bei photopischen Sehbedingungen mit ähnlichen Adaptationszeiten zu rechnen ist [3].

3.4 Einfluss der Variationsrichtung

Aufgrund der Unabhängigkeit vom Beleuchtungsniveau wurden die Versuchsdaten über alle Beleuchtungsstärken zusammengefasst und in Abhängigkeit von der Variationsrichtung betrachtet. Dabei wurde bei der Variation der Lichtfarbe mit einer äquidistanten Sprungweite $\Delta u'v'$ beobachtet, dass Lichtfarbensprünge im Bereich warmer Lichtfarben kritischer bewertet werden als bei höheren Farbtemperaturen (Abb. 6 links). Diese Ergebnisse decken sich mit den Resultaten der Untersuchung der Schwellen- und Toleranzwerte für die Erkennung von Lichtfarbenunterschieden bei der sprunghaften Variation der Lichtfarbe. Dabei zeigten sich für niedrigere Ähnlichste Farbtemperaturen geringere Schwellen und Toleranzwerte und damit höhere Empfindlichkeiten (Abb. 6 rechts). Das bedeutet für äquidistante Sprungweite $\Delta u'v'$ eine zunehmend kritischere Bewertung bei Änderung der Lichtfarbe von $CCT = 8000\text{ K}$ zu $CCT = 3000\text{ K}$. Durch eine Verringerung der Sprungweite für warme Lichtfarben lassen sich störende Wahrnehmungen vermeiden.

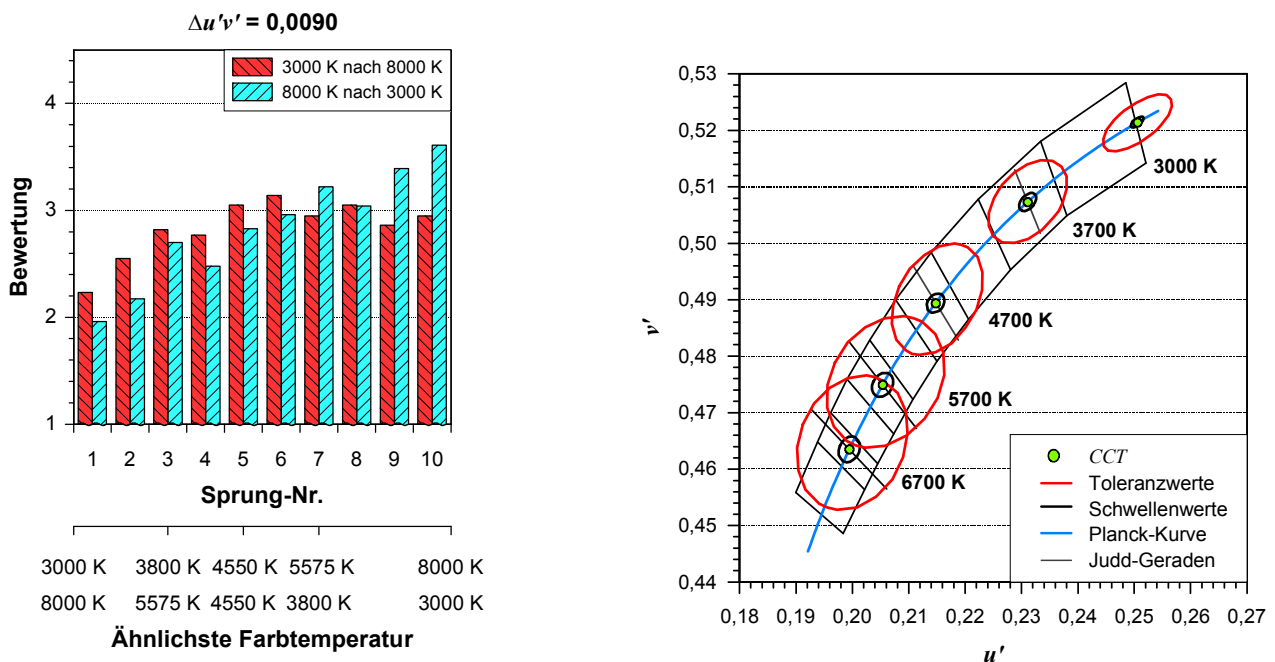


Abb. 6: Einfluss der Variationsrichtung auf den Mittelwert der Bewertung sprunghafter Lichtfarbenänderungen, Sprungweite $\Delta u'v' = 0,009$, Haltezeit $t_h = 4,5\text{ s}$, Bewertung nach Tab. 1, Mittelwerte, 10 Probanden (links) und Einfluss der Ähnlichsten Farbtemperatur auf die Schwellen- und Toleranzwerte für die Wahrnehmung von Lichtfarbenunterschieden bei sprunghafter Änderung der Lichtfarbe (rechts)

3.5 Einfluss des Variationsweges

Verglichen wurde die Variation der Lichtfarbe zwischen $CCT = 3000\text{ K}$ und $CCT = 8000\text{ K}$ entlang des Planckschen Kurvenzuges (PK) mit der entlang einer linearen Verbindung (LF) zwischen der Farborten und einer Polynomfunktion (PF). Dabei wurde zwischen langsamen und schnellen Lichtfarbenwechseln unterschieden. Abb. 7 zeigt beispielhaft die Ergebnisse für eine Versuchsreihe. Um die Werte vergleichen zu können, wurden die Lichtfarbenabstände der Sprünge auf die Ausgangslichtfarbe $\Delta u'v_{bez}$ bezogen.

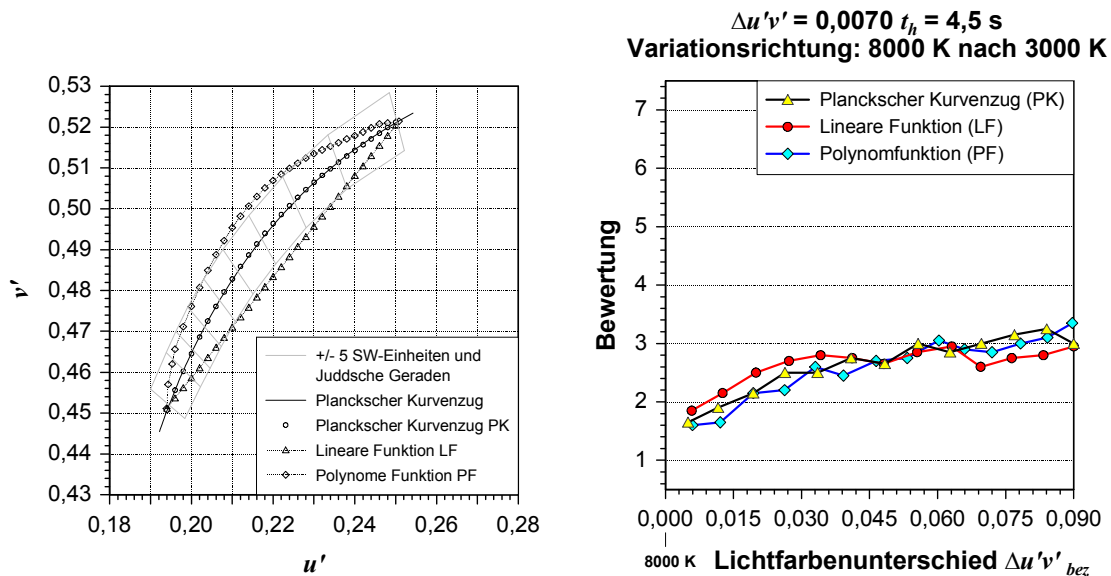


Abb. 7: Wege bei der Untersuchung zur dynamischen Variation der Lichtfarbe (links) und Vergleich der Mittelwerte der Bewertungen für verschiedene Wege der Lichtfarbenvariation, Variationsrichtung von 8000 K nach 3000 K, Sprungweite $\Delta u'v' = 0,0070$, Beleuchtungsstärke $E = 500 \text{ lx}$, Haltezeit $t_h = 4,5 \text{ s}$, Bewertung nach Tab. 1 (20 Probanden) (rechts)

Es zeigte sich eine sehr hohe Übereinstimmung für die mittleren Bewertungen der Lichtfarbenänderung der verschiedenen Wege. Die Kurvenverläufe waren unabhängig von der Variationsrichtung und der Sprungweite für die untersuchten Verläufe nahezu identisch. Demnach ist der Gesamtverlauf der Lichtfarbenvariation innerhalb der ± 5 Schwellenwert-Einheiten um den Planckschen Kurvenzug für die untersuchten Variationswege bei einer Haltezeit von $t_h = 4,5 \text{ s}$ für die Beurteilung sprunghafter Lichtfarbenwechsel nicht entscheidend. Für längere Gesamtzeiten der Lichtfarbenvariation sind aufgrund der nachlaufenden Farbumstimmung keine anderen Ergebnisse zu erwarten.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde durch eine Verkürzung der Haltezeit ($t_h = 0,2 \text{ s}$) getestet, ob sich Farbnuancen bei der Variation der Lichtfarbe entlang des Polynoms (PF) und auf der linearen Verbindung (LF) abgrenzen lassen. Abweichungen der Lichtfarbe deutlich oberhalb des Planckschen Kurvenzugs können zu einem grünlichen, Abweichungen deutlich unterhalb des Planckschen Kurvenzugs zu einem purpurfarbenen Farbeindruck führen. Die Variation der Lichtfarbe zwischen $CCT = 3000 \text{ K}$ und $CCT = 8000 \text{ K}$ benötigte für diese Versuche eine Zeit von etwa $t = 20 \text{ s}$.

Es zeigte sich, dass die Farbigkeit des Gesamtverlaufs bei schnellen Lichtfarbenwechseln von den Probanden spontan benannt wurde und damit sehr deutlich erkennbar ist. Die farbigen Nuancen wurden teilweise störend wahrgenommen und führten beim Vergleich der verschiedenen Variationswege dazu, dass für schnelle Änderungen der Lichtfarbe die Variation entlang des Planckschen Kurvenzugs eindeutig bevorzugt wird (Abb. 8).

Sollen schnelle Lichtfarbenübergänge bei dynamischen Beleuchtungssystemen realisiert werden, sollte die Variation der Lichtfarbe möglichst dem Verlauf des Planckschen Kurvenzugs folgen.

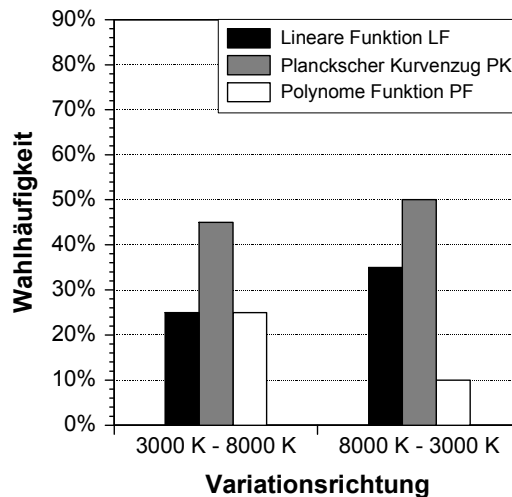


Abb. 8: Häufigkeit des bevorzugten Variationsweges, $E = 500 \text{ lx}$, $t_h = 0,2 \text{ s}$ (20 Probanden)

3.6 Einfluss von Haltezeit und Dynamikumfng

Um kritische Bewertungen bei der dynamischen Lichtfarbenänderung zu vermeiden, können neben der Begrenzung der Sprungweite zwei Strategien verfolgt werden:

- Verlängerung der Haltezeiten zwischen den sprunghaften Lichtfarbenwechseln
- Begrenzung des Dynamikumfngs für die Lichtfarbenänderung

Im Rahmen der Versuchsreihe 5 wurden $t_h = 4,5 \text{ s}$ und $t_h = 13,5 \text{ s}$ für eine Sprungweite von $\Delta u'v' = 0,0025$ untersucht. Die Durchgänge benötigten für die Änderung der Lichtfarbe zwischen $CCT = 3000 \text{ K}$ und $CCT = 8000 \text{ K}$ eine Zeit von etwa $t = 3 \text{ min}$ bzw. $t = 9 \text{ min}$.

Die Ergebnisse zeigten, dass eine Verdreifachung der Haltezeiten zwischen den Lichtfarbenwechseln im Mittel zu einer niedrigeren Bewertung und damit zu einer positiveren Einschätzung durch die Probanden führt (Abb. 9).

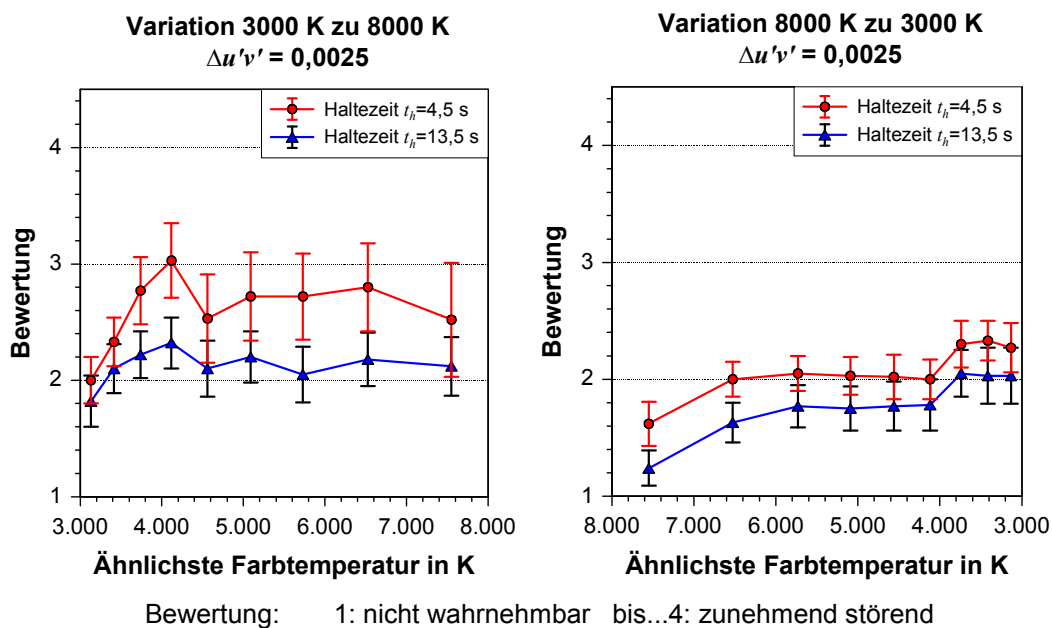


Abb. 9: Einfluss verlängerter Haltezeiten zwischen den Lichtfarbenwechseln auf die Bewertung, Variation entlang des Planckschen Kurvenzugs, $E = 500 \text{ lx}$, Bewertung nach Tab. 1 (Mittelwert und Konfidenzintervall für jeweils 4 Bewertungen, 15 Probanden)

Dieser Effekt ist besonders bei der Variationsrichtung von $CCT = 3000\text{ K}$ nach $CCT = 8000\text{ K}$ zu beobachten. Demnach sind langsame Wechsel für die Variation der Lichtfarbe zu bevorzugen.

In weiteren Versuchen wurde der Variationsumfang dadurch begrenzt, dass jeweils nach einem Lichtfarbenunterschied von $\Delta u'v' = 0,0195$ Pausenzeiten von etwa $t_{\text{pause}} = 1\text{ min}$ in den Ablauf der Variation der Lichtfarbe zwischen $CCT = 3000\text{ K}$ und $CCT = 8000\text{ K}$ integriert wurden. Zwischen den Pausen bei ähnlichsten Farbtemperaturen von $CCT = 3500\text{ K}$, $CCT = 4100\text{ K}$, $CCT = 5000\text{ K}$ und $CCT = 6300\text{ K}$ wurde die Lichtfarbe in äquidistanten Schritten von $\Delta u'v' = 0,0030$ mit einer Haltezeit von $t_h = 4,5\text{ s}$ variiert. Die Gesamtzeit je Lichtfarbenvariation verlängerte sich dadurch von etwa $t = 2\text{ min}$ auf $t = 6\text{ min}$. Der Einfluss der nachlaufenden Farbumstimmung auf die Bewertung lässt sich durch die Pausenzeiten minimieren, da damit Farbumstimmungsprozesse im Wesentlichen abgeschlossen sind. Die Untersuchung erfolgte für fünf ausgewählte besonders empfindliche und kritische Probanden. Die Ergebnisse sind in Abb. 10 dargestellt. Deutlich erkennbar ist, dass die Pausenzeiten die mittlere Bewertung der Probanden verringern und dass störende Effekte, die bei der Variation der Lichtfarbe ohne Pausenzeiten beobachtet wurden, vermieden werden können. Zu erkennen ist auch die Abhängigkeit von der Variationsrichtung. Bei der Lichtfarbenvariation von $CCT = 3000\text{ K}$ nach $CCT = 8000\text{ K}$ nehmen die Bewertungsunterschiede innerhalb der Phase der kontinuierlichen Variation der Lichtfarbe mit steigender Farbtemperatur ab, während sich die Bewertungsunterschiede in der Gegenrichtung vergrößern. Es ist zu vermuten, dass eine je nach Farbtemperatur unterschiedliche Empfindlichkeit gegenüber Lichtfarbenänderungen für diese Effekte verantwortlich ist. Die Wirkung der Pausenzeiten auf zeitliche Prozesse könnte sich anhand der geringeren Bewertung nach der Pause im Vergleich zur Bewertung am Ende der vorherigen Lichtfarbenvariationsphase interpretieren lassen. Für abschließende Schlussfolgerungen ist das Probandenkollektiv zu gering, so dass weiterführende Untersuchungen notwendig sind.

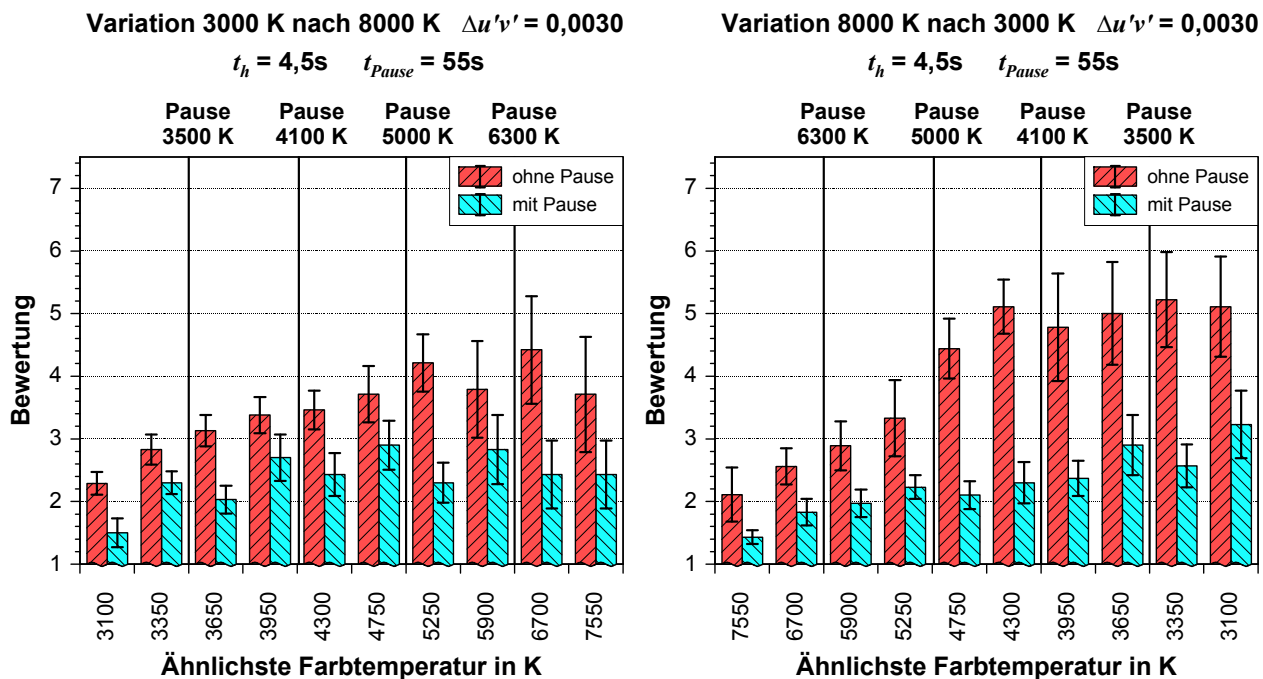
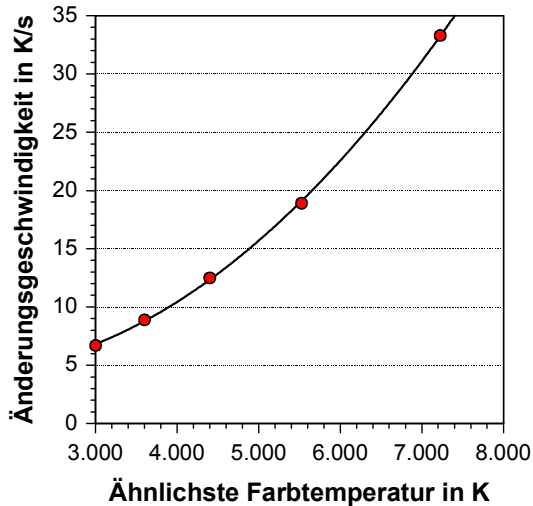


Abb. 10: Einfluss eines verringerten Dynamikumfangs auf die mittlere Bewertung von Lichtfarbenunterschieden, Mittelwert und Konfidenzintervall, 5 Probanden, Sprungweite von $\Delta u'v' = 0,0030$ bei $E = 500\text{ lx}$

Aus den Untersuchungsergebnissen ist eine Abschätzung für die Geschwindigkeit der Lichtfarbenänderung möglich. Ein Lichtfarbumfang von $\Delta u'v' = 0,0210$ (entspricht einer

Lichtfarbenvariation von $CCT = 3000$ K nach $CCT = 3600$ K oder von $CCT = 6000$ K nach $CCT = 8000$ K) wird bei einer Schrittweite von $\Delta u'v' = 0,0030$ in einer Zeit von $t = 27$ s durchlaufen. Unter Einbeziehung der Pausenzeit von etwa $t_{Pause} = 60$ s beträgt die Gesamtzeit je Intervall etwa $t = 90$ s. Damit ergeben sich je nach Farbtemperatur unterschiedliche Änderungsgeschwindigkeiten. Diese sind exemplarisch in (Abb. 11) dargestellt.



CCT in K	$\Delta u'v'$	ΔCCT in K	$\bar{v}_{\Delta CCT} = \frac{\Delta CCT}{t}$ in K/s mit $t = 90$ s
3000	0,0210	600	6,7
3600	0,0210	800	8,9
4400	0,0210	1125	12,5
5525	0,0210	1700	18,9
Mittelwert			12 K/s

Abb. 11: Lichtfarbenänderungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Farbtemperatur, in der nebenstehenden Tabelle sind beispielhaft mittlere Geschwindigkeiten für die Lichtfarbenvariation angegeben

Für eine mittlere Änderungsgeschwindigkeit von $\bar{v}_{\Delta CCT} = 12$ K/s beträgt die Gesamtzeit für die Lichtfarbenänderung zwischen $CCT = 3000$ K und $CCT = 8000$ K $t = 7$ min. Dies kann als Orientierung für die Lichtfarbensteuerung dienen.

4 Zusammenfassung

Die Untersuchungsergebnisse zur dynamischen Lichtfarbenvariation zeigen:

- Die Bewertung der Lichtfarbenänderungen ist unabhängig vom Beleuchtungsniveau.
- Die Bewertung der Lichtfarbenänderungen wird wesentlich durch die Sprungweite beeinflusst. (Schwellenwerte liegen unterhalb der Sprungweiten von $\Delta u'v' = 0,0025$, Toleranzgrenzen bei $\Delta u'v' = 0,0045$).
- Die Variation von hohen zu niederen Farbtemperaturen ist kritischer als in die Gegenrichtung.
- Der Variationsweg kann innerhalb eines Toleranzbereichs um den Planckschen Kurvenzug beliebig gewählt werden, wobei bei schnellen Lichtfarbenänderungen der Plancksche Kurvenzug als Variationsweg bevorzugt wird.
- Längere Haltezeiten beeinflussen die Bewertung kaum, wenn die Variation der Lichtfarbe nicht zu schnell und in kleinen Schrittweiten erfolgt.
- Durch die Begrenzung des Dynamikumfangs kann die Bewertung der Lichtfarbenänderung wesentlich verbessert werden.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen können Steueralgorithmen für adaptive Beleuchtungssysteme unter dem Gesichtspunkt der visuellen Wahrnehmung von Lichtfarbenunterschieden entworfen werden. Außerdem sind Übergänge zwischen Lichtfarbensituationen begründbar. Da in den durchgeführten Untersuchungen weder die Dynamik in Beleuchtungsniveau und Lichtrichtung noch der zeitliche Ablauf der Lichtfarbenvariation berücksichtigt wurden, sind weiterführende Arbeiten unerlässlich.

Literatur

- [1] BIESKE K, WOLF S, NOLTE R:
Wahrnehmung von Farbunterschieden von Licht- und Körperfarben.
LICHT 2006: 17. Gemeinschaftstagungen von SLG, LiTG, LTG, nsv
(11.-13.9.2006), Bern/ Schweiz, 2006, S. 65, Tagungs-CD
- [2] BIESKE K:
Wahrnehmung von Farbunterschieden von Licht- und Körperfarben.
LiTG-Tagung Licht und Lebensqualität (19.-20.4.2007), Lüneburg, 2007, Tagungs-
CD
- [3] FAIRCHILD MD, RENIFF L: *Time course of chromatic adaptation for color-appearance judgments.* Journal of the Optical Society of America 1995, **12** (5): 824-833
- [4] FAIRCHILD MD, LENNIE P: *Chromatic adaptation to natural and incandescent illuminants.* Vision Research 1992; **32**: 2077-2085
- [5] AREND LE: *How much does illuminant color affect unattributed colors?* Journal of the Optical Society of America 1993; **10**: 2134-2147