

# STEUERKONZEPTE FÜR DYNAMISCHE BELEUCHTUNGSSYSTEME: VARIATION DES BELEUCHTUNGSNIVEAUS

Bieske, K., Dommaschk, A.

Technische Universität Ilmenau/ Fachgebiet Lichttechnik, Ilmenau, Deutschland

Karin.Bieske@tu-ilmenau.de

## ABSTRACT

Neben der Variation der Lichtfarbe ist die Änderung des Beleuchtungsniveaus ein wesentlicher Parameter dynamischer Beleuchtungssysteme. In früheren Arbeiten wurde bereits die Variation der Lichtfarbe untersucht und Empfehlungen für die Steuerung abgeleitet [1]. In diesem Beitrag wird auf Untersuchungen zur Änderung der Beleuchtungsstärke eingegangen. In Probandenversuchen wurden Schwellen- und Toleranzwerte für die sprunghafte Änderung der Beleuchtungsstärke im Bereich zwischen  $E = 300 \text{ lx}$  und  $E = 1000 \text{ lx}$  für eine mit LED-Leuchten ausgestattete Bürosituation in einem Versuchsraum bestimmt. Betrachtet wurde der Einfluss von Lichtfarbe, Variationsrichtung und Ausgangsbeleuchtungsniveau. Der Schwellenwert für die Wahrnehmung von relativen Beleuchtungsstärkeänderungen liegt bei Werten von  $\Delta E/E_{\text{Ausgangswert}} < 5 \%$ . Änderungen von  $\Delta E/E_{\text{Ausgangswert}} = 15 \%$  bis  $20 \%$  wurden von den Probanden noch toleriert. Die Wahrnehmung von Änderungen der Beleuchtungsstärke ist unabhängig von der Lichtfarbe im Bereich zwischen  $CCT = 3000 \text{ K}$  und  $CCT = 6000 \text{ K}$  und wird nicht von der Variationsrichtung und der Ausgangsbeleuchtungsstärke beeinflusst. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden Lichtszenarien als Kombination von Änderungen in Beleuchtungsstärke und Lichtfarbe entwickelt und mit Versuchspersonen getestet. Als angenehm wurden Änderungen beider Parameter im Bereich der Wahrnehmungsschwelle bewertet.

Schlagwörter: Dynamische Beleuchtung, Variation der Beleuchtungsstärke

## 1 FORSCHUNGSGEGENSTAND

Die Entwicklung von LED (Licht emittierende Dioden) bietet Möglichkeiten für die Umsetzung neuer Beleuchtungskonzepte. Vor dem Hintergrund chronobiologischer Lichtwirkungen und energieeffizienter Beleuchtung in Verbindung mit Tageslicht kann es sinnvoll sein, Beleuchtungssysteme in verschiedenen Lichtfarben und variabel bezüglich Lichtstrom und Lichtverteilung auszulegen. Dynamische Beleuchtungssysteme sind zeitlich veränderlich hinsichtlich Beleuchtungsniveau, örtlicher und spektraler Lichtverteilung (Lichtfarbe). In früheren Untersuchungen wurden Anforderungen an die situative Änderung der Lichtfarbe untersucht und

Empfehlungen erarbeitet [1]. Nicht betrachtet wurde bisher in diesem Zusammenhang die Veränderung der Beleuchtungsstärke. Dabei steht die Frage der Änderung von einer Beleuchtungsstärke zu einer anderen und nicht die Variation im Tagesverlauf im Vordergrund. Für die Ableitung von Anforderungen für Steuerstrategien sind folgende Arbeitsschritte erforderlich:

- Festlegung des Dynamikbereichs für Beleuchtungsstärke und Lichtfarbe
- Bestimmung von Schwellen- und Toleranzwerten für sprunghafte Änderungen der Beleuchtungsstärke und Untersuchung der Einflussgrößen
- Untersuchung dynamischer Veränderungen

## **2 STAND DER WISSENSCHAFT UND FORSCHUNGSHYPOTHESEN**

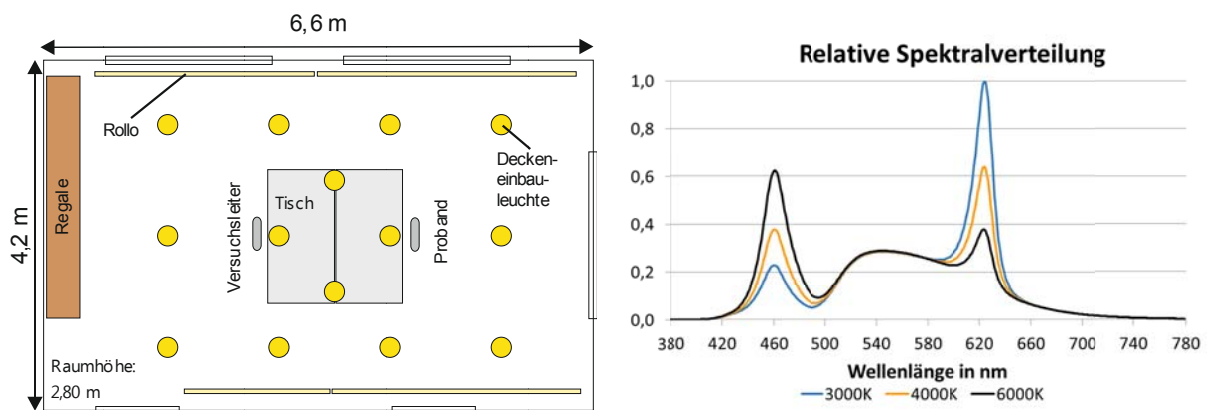
Für die Entwicklung von Steuerstrategien für dynamische Beleuchtungssysteme ist zu klären, ob es eine Verkopplung von Parametern gibt und damit die Veränderung eines Parameters abhängig von einem anderen Parameter ist oder ob die Änderungen unabhängig voneinander erfolgen können. Bezüglich des Zusammenhangs zwischen Beleuchtungsstärke und bevorzugter Lichtfarbe sind in der Literatur widersprüchliche Aussagen zu finden. Nach KRUTHOF besteht ein Zusammenhang. Danach werden warme Lichtfarben bei niedrigen Beleuchtungsstärken und kalte Lichtfarben bei hohen Beleuchtungsstärken bevorzugt [2]. Andere Untersuchungen kommen zu dem Ergebnis, dass die bevorzugte Beleuchtungsstärke unabhängig von der Lichtfarbe ist [3] bis [6]. BIESKE zeigt bei Untersuchungen an einer Versuchskabine, dass es keinen signifikanten Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke und bevorzugter Lichtfarbe gibt [1]. Diese Ergebnisse konnten in späteren Untersuchungen für eine Bürosituation in einem Versuchsraum bestätigt werden [7]. Für die Wahrnehmung von Lichtfarbenunterschieden wurde der Einfluss der Beleuchtungsstärke auf die Schwellen- und Toleranzwerte für die sprunghafte Änderung untersucht [1]. Für Beleuchtungsstärken zwischen  $E = 300 \text{ lx}$  und  $E = 1000 \text{ lx}$  konnte kein Einfluss auf die Empfindung von Farbveränderungen weißer Lichtfarben festgestellt werden. Das führt zur umgekehrten Hypothese, dass die Empfindung von Änderungen in der Beleuchtungsstärke nicht von der Lichtfarbe beeinflusst wird.

Die Anpassung des Auges an unterschiedliche Beleuchtungsniveaus ist mit Adaptationsvorgängen verbunden. Dabei sind unterschiedliche Mechanismen beteiligt, die verschiedene Anpassungszeiten benötigen. Der Übergang von einem höheren zu einem niedrigeren Beleuchtungsniveau dauert länger als umgekehrt [8]. Es kann angenommen werden, dass die Variationsrichtung und das Ausgangsbeleuchtungsniveau einen möglichen Einfluss auf die Empfindung von Änderungen in der Beleuchtungsstärke haben. Je größer der Reizunterschied ist und je schneller Änderungen erfolgen, umso größer ist der Einfluss zu vermuten. Eine Begrenzung des Variationsumfangs für einen Änderungszyklus kann daher sinnvoll sein.

## **3 METHODE UND VERSUCHSDESIGN**

Die Untersuchungen erfolgten in einem Versuchsraum der Größe 6,60 m x 4,2 m x 2,4 m, der eine Bürosituation simuliert. Tageslicht wurde über Jalousien ausgeschlossen. Verwendet wurden 14 Zumtobel LED Panos Infinity Turnable White Leuchten, die in eine Rasterdecke eingebaut wurden. Beleuchtungsniveau und Lichtfarbe sind über ein DALI-Protokoll mit dem Emotion

Touchpanel variierbar. Die Anordnung der Leuchten erfolgte auf der Grundlage einer DIALUX-Simulation so, dass eine Beleuchtungsstärke von mindestens  $E = 1000 \text{ lx}$  auf der Tischfläche realisiert werden konnte. Orientiert wurde sich dabei an gängigen Empfehlungen und normativen Vorgaben [9],[10]. Systembedingt lässt sich die Lichtfarbe zwischen  $CCT = 2700 \text{ K}$  und  $CCT = 6500 \text{ K}$  ändern und sind Einstellungen für die Beleuchtungsstärken zwischen 1 % und 100 % möglich, wobei die Änderung logarithmisch erfolgt. Abbildung 1 zeigt eine Skizze des Versuchsraums mit der Leuchtenanordnung.



**Abbildung 1: Skizze des Versuchsraums (links), die Kreise symbolisieren die Leuchtenanordnung und relative spektrale Verteilung für verschiedene Lichtfarben (rechts)**

Die Untersuchungen erfolgten in zwei Versuchsreihen. In der ersten Versuchsreihe wurde die sprunghafte Änderung der Beleuchtungsstärke  $\Delta E$  untersucht. Gegenstand der zweiten Versuchsreihe waren Beleuchtungsszenarien, in denen sich die Lichtfarbe und die Beleuchtungsstärke veränderten. Die Zeit zwischen den Wechseln der einzelnen Lichtsituationen (Haltezeit  $t$ ) betrug dabei  $t = 1 \text{ s}$  und bestimmte damit die Änderungsgeschwindigkeit für die Variation der Lichtfarbe und der Beleuchtungsstärke. In Anschluss an die Versuche aus [1] wurde zunächst die Variation der Lichtfarbe bei konstanter Beleuchtungsstärke  $E = 1000 \text{ lx}$  untersucht. Die Lichtfarbe änderte sich dabei in Anlehnung an Gleichung (1):

$$(1) \quad \Delta CCT = 6,0 \cdot 10^{-7} \cdot CCT^{2,231} \quad [1]$$

Zwischen  $CCT = 2700 \text{ K}$  und  $CCT = 6500 \text{ K}$  wurden 54 Schritte realisiert, wobei die Schrittweite  $\Delta CCT$  nach Gleichung 1 für niedrige ähnlichste Farbtemperaturen kleiner war als für höhere ähnlichste Farbtemperaturen. Die mittlere Änderungsgeschwindigkeit für die Variation der Lichtfarbe betrug  $\bar{v}_{\Delta CCT} = 70 \text{ K/s}$ . In weiteren Tests änderten sich Lichtfarbe und die Beleuchtungsstärke zeitgleich. Für die Änderung der Beleuchtungsstärke wurden die kleinstmöglichen Schrittweiten des Systems von  $\Delta E \approx 5 \%$  verwendet. Damit ergibt sich bei 54 Schritte eine mittlere Änderungsgeschwindigkeit für die Variation der Beleuchtungsstärke von  $\bar{v}_{\Delta E} = 13 \text{ lx/s}$ . Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Versuchsparameter.

Tabelle 1: Versuchsparameter der Versuchsreihe 1 (links) und der Versuchsreihe 2 (rechts)

Versuchsreihe	1. Sprunghafte Änderung $\Delta E$	2. Dynamik																								
<b>Probanden</b>	22 Probanden, je 11 Frauen und Männer, 31 ± 11 Jahre, getestet auf Farbtüchtigkeit und Kontrastsehen (Farblegetest nach Lanthony [11] und Vistech Contrast Sensitivity Test [12])	10 Probanden, je 5 Frauen und Männer, 30 ± 6,5 Jahre, getestet auf Farbtüchtigkeit und Kontrastsehen (Farblegetest nach Lanthony [11] und Vistech Contrast Sensitivity Test [12])																								
<b>Parameter</b>	<p>Lichtfarbe CCT: 3000 K, 4000 K, 6000 K                      Richtung/ Ausgangsbeleuchtungsstärke:  <math>E = 300 \text{ lx} \rightarrow E = 500 \text{ lx}</math>,  <math>E = 500 \text{ lx} \rightarrow E = 300 \text{ lx}</math>  <math>E = 500 \text{ lx} \rightarrow E = 1000 \text{ lx}</math>  <math>E = 1000 \text{ lx} \rightarrow E = 500 \text{ lx}</math>,  <math>E = 300 \text{ lx} \rightarrow E = 1000 \text{ lx}</math>  <math>E = 1000 \text{ lx} \rightarrow E = 1000 \text{ lx}</math></p> <p>Die Sprünge <math>\Delta E</math> wurden in zufälliger Reihenfolge gezeigt und bewertet, wobei jede Situation dreimal dargeboten wurde. Je nach Versuchsdurchlauf wurden 11 bis 26 unterschiedliche Sprünge <math>\Delta E</math> gezeigt. Nach jedem Sprung erfolgte die Rückkehr in das Ausgangsniveau zur Aufrechterhaltung der Adaptation.</p>	<p>Lichtfarbe CCT:  <math>CCT = 2700 \text{ K} \rightarrow CCT = 6500 \text{ K}</math>,  <math>CCT = 6500 \text{ K} \rightarrow CCT = 2700 \text{ K}</math>  <math>\Delta CCT = 6,0 \cdot 10^{-7} \cdot CCT^{2,231}</math>                      Beleuchtungsstärke <math>E</math>:  <math>E = 300 \text{ lx} \rightarrow 1000 \text{ lx}</math>  <math>E = 1000 \text{ lx} \rightarrow 300 \text{ lx}</math>  <math>\Delta E \approx 5 \%</math>                      Haltezeit <math>t: t = 1 \text{ s}</math></p> <p>Versuchsreihen:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>VR 1</th> <th>VR 2</th> <th>VR 3</th> <th>VR 4</th> <th>VR 5</th> <th>VR 6</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2700K → 6500K Glg. 1 &amp; E=1000lx</td> <td>6500K → 2700K Glg. 1 &amp; E=1000lx</td> <td>2700K → 6500K Glg. 1 &amp; 1000lx → 300lx ΔE -5%</td> <td>6500K → 2700K Glg. 1 &amp; 1000lx → 300lx ΔE -5%</td> <td>2700K → 6500K Glg. 1 &amp; 300lx → 1000lx ΔE +5%</td> <td>6500K → 2700K Glg. 1 &amp; 300lx → 1000lx ΔE +5%</td> </tr> </tbody> </table>	VR 1	VR 2	VR 3	VR 4	VR 5	VR 6	2700K → 6500K Glg. 1 & E=1000lx	6500K → 2700K Glg. 1 & E=1000lx	2700K → 6500K Glg. 1 & 1000lx → 300lx ΔE -5%	6500K → 2700K Glg. 1 & 1000lx → 300lx ΔE -5%	2700K → 6500K Glg. 1 & 300lx → 1000lx ΔE +5%	6500K → 2700K Glg. 1 & 300lx → 1000lx ΔE +5%												
VR 1	VR 2	VR 3	VR 4	VR 5	VR 6																					
2700K → 6500K Glg. 1 & E=1000lx	6500K → 2700K Glg. 1 & E=1000lx	2700K → 6500K Glg. 1 & 1000lx → 300lx ΔE -5%	6500K → 2700K Glg. 1 & 1000lx → 300lx ΔE -5%	2700K → 6500K Glg. 1 & 300lx → 1000lx ΔE +5%	6500K → 2700K Glg. 1 & 300lx → 1000lx ΔE +5%																					
<b>Bewertungs- skala</b>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>nicht wahrnehmbar</td> <td>gerade wahrnehmbar</td> <td>sicher wahrnehmbar</td> <td>zunehmend störend</td> <td>störend</td> <td>zunehmend unerträglich</td> <td>unerträglich</td> </tr> </tbody> </table>	1	2	3	4	5	6	7	nicht wahrnehmbar	gerade wahrnehmbar	sicher wahrnehmbar	zunehmend störend	störend	zunehmend unerträglich	unerträglich	<table border="1"> <thead> <tr> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>angenehm</td> <td>vorwiegend angenehm</td> <td>neutral</td> <td>zunehmend störend</td> <td>störend</td> </tr> </tbody> </table>	1	2	3	4	5	angenehm	vorwiegend angenehm	neutral	zunehmend störend	störend
1	2	3	4	5	6	7																				
nicht wahrnehmbar	gerade wahrnehmbar	sicher wahrnehmbar	zunehmend störend	störend	zunehmend unerträglich	unerträglich																				
1	2	3	4	5																						
angenehm	vorwiegend angenehm	neutral	zunehmend störend	störend																						

## 4 ERGEBNISSE

### 4.1 EINFLUSS DER LICHTFARBE

Nach WEBER hängt die Wahrnehmung eines Reizunterschiedes vom Absolutwert ab [13]. Daher wurden für die Bewertungen relative Werte  $\Delta E/E_{\text{Ausgangswert}}$  betrachtet. Abbildung 2 zeigt beispielhaft die Bewertung der Änderung der Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit von der ähnlichsten Farbtemperatur CCT für die Variation von  $E = 300 \text{ lx}$  (links) und von  $E = 500 \text{ lx}$  (rechts). Dabei konnte kein signifikanter Einfluss der Lichtfarbe zwischen  $CCT = 3000 \text{ K}$  und  $CCT = 6000 \text{ K}$  nachgewiesen werden. Dieses Resultat steht in Analogie zu den Ergebnissen von BIESKE in [1]: Die subjektive Empfindung von Lichtfarbenunterschieden im Bereich von  $E = 300 \text{ lx}$  bis  $E = 1000 \text{ lx}$  wird nicht durch die Beleuchtungsstärke beeinflusst. Damit sind lichtfarbenunabhängige Steuerung für Veränderungen der Beleuchtungsstärke möglich.

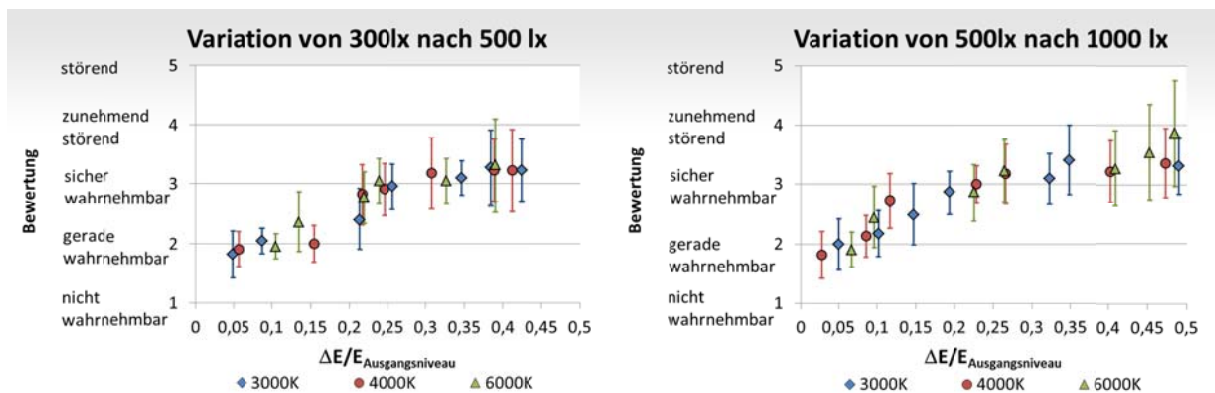


Abbildung 2: Bewertung der Änderung der Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit von der Lichtfarbe (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung)

#### 4.2 EINFLUSS DER VARIATIONSRICHTUNG UND DES AUSGANGSBELEUCHTUNGSNIVEAU

Aufgrund der Unabhängigkeit von der Lichtfarbe wurden für die weiteren Auswertungen die Daten zusammengefasst. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Variationsrichtung für die Bewertung der relativen Änderung des Beleuchtungsniveaus keine Bedeutung hat. Damit ist eine richtungsunabhängige Steuerung des Beleuchtungsniveaus möglich.

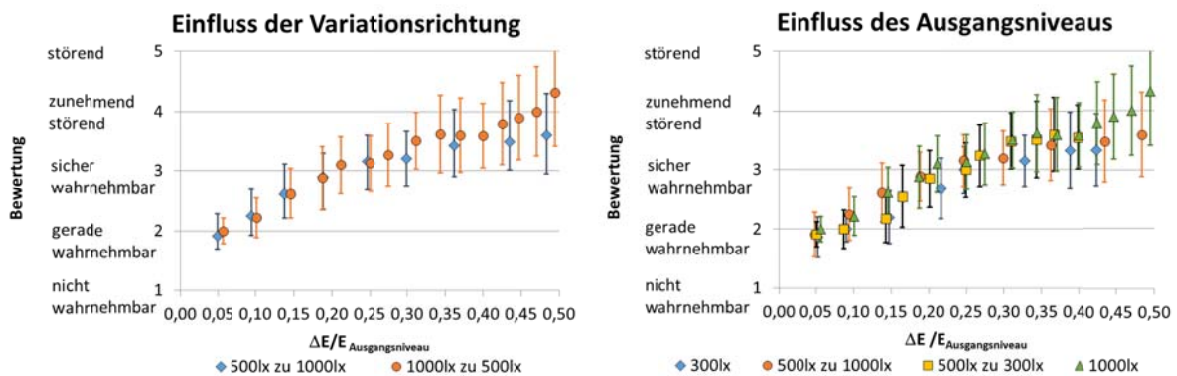


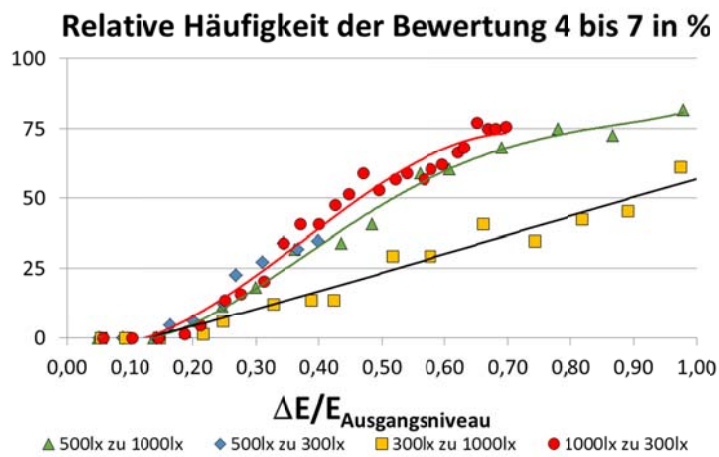
Abbildung 3: Einfluss der Variationsrichtung (links) und Einfluss der Ausgangsbeleuchtungsstärke (rechts), (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung)

Wird der Einfluss der Ausgangsbeleuchtungsstärke betrachtet (Abbildung 3 rechts) ist eine starke Überlappung der Bewertungsbereiche für die einzelnen Beleuchtungsstärken erkennbar. Es kann davon ausgegangen werden, dass im Bereich zwischen  $E = 300$  lx und  $E = 1000$  lx der Einfluss des Ausgangswerts gering ist.

#### 4.3 BESTIMMUNG VON SCHWELLEN- UND TOLERANZWERTEN

Werden alle Versuchsreihen betrachtet, ergibt sich, dass bereits die kleinsten mit dem Versuchsbeleuchtungssystem darbietbaren Änderungen der Beleuchtungsstärke für die Mehrheit der Probanden gerade wahrnehmbar sind ( $\Delta E/E_{\text{Ausgangswert}} = 3\%$  bis  $5\%$ ). Die mittlere Bewer-

tung liegen bei  $\geq 1,82 \pm 0,4$  in einem Wertebereich von 1 (*nicht wahrnehmbar*) bis 3 (*deutlich wahrnehmbar*). Entsprechend liegt der Schwellenwert bei Werten kleiner  $\Delta E/E_{\text{Ausgangswert}} = 5\%$  Änderung der Beleuchtungsstärke. Für die Bestimmung der Toleranzwerte wurden kritische Bewertungen zwischen 4 (*zunehmend störend*) und 7 (*nicht akzeptabel*) betrachtet. Hierfür wurden die kumulierten Häufigkeiten in Abhängigkeit von den dargebotenen relativen Änderungen der Beleuchtungsstärke für die einzelnen Versuchsreihen ermittelt. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis.

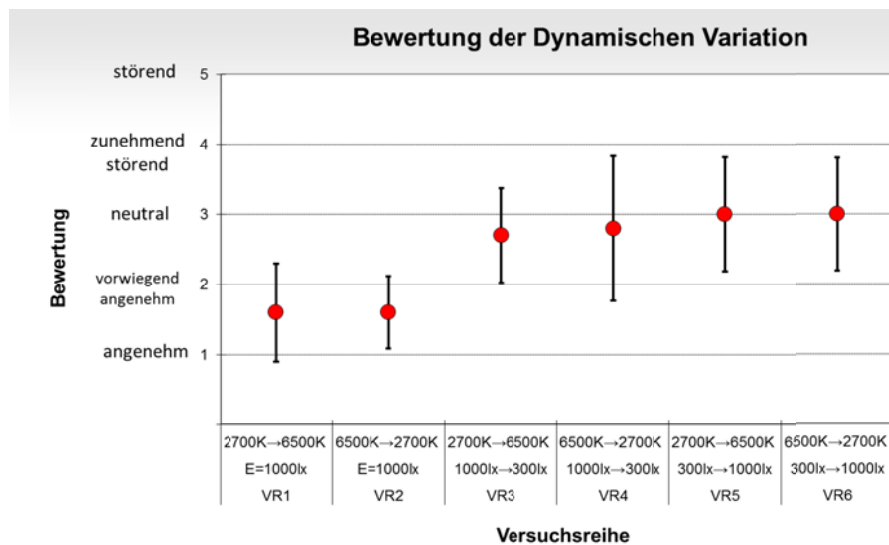


**Abbildung 4: Relative Häufigkeit der Bewertungen zwischen 4 (zunehmend störend) und 7 (unzumutbar) in Abhängigkeit von der relativen Änderung der Beleuchtungsstärke**

Änderungen zwischen  $\Delta E/E_{\text{Ausgangswert}} = 15\%$  bis  $20\%$  bewerteten die Probanden zunehmend störend. Um störende Effekte zu vermeiden, ergibt sich ein Toleranzwert für sprunghafte Änderungen des Beleuchtungsniveaus von  $\Delta E/E_{\text{Ausgangswert}} = 15\%$ . Zu erkennen ist auch, dass die Versuchsreihen ähnlich bewertet werden. Die Variation  $E = 300\text{ lx}$  zu  $E = 1000\text{ lx}$  wurde jedoch weniger kritisch beurteilt. Das kann damit zusammenhängen, dass in dieser Versuchsreihe die Veränderung in Richtung der präferierten höheren Beleuchtungsstärke erfolgt, da das Beleuchtungsniveau von  $E = 300\text{ lx}$  zum Teil als zu dunkel für die Bürosituation empfunden wurde.

#### 4.4 DYNAMISCHE UNTERSUCHUNGEN

DOMMASCHK [14] testete die in [1] erarbeiteten Vorgabewerte für die Steuerung der Lichtfarbe für einen realen Raum und bestätigte die Ergebnisse von BIESKE [1]. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen der Untersuchungen zur sprunghaften Variation der Beleuchtungsstärke und unter Einbeziehung der Steuerungsvorgaben für die Variation der Lichtfarbe von Bieske [1] wurden Lichtszenenabläufe entworfen. Dabei wurde die Lichtfarbe zwischen  $CCT = 2700\text{ K}$  und  $CCT = 6500\text{ K}$  variiert und die Beleuchtungsstärke zwischen  $E = 300\text{ lx}$  und  $E = 1000\text{ lx}$  verändert. Die Parameter sind in Tabelle 1 rechts zu entnehmen. Abbildung 5 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse.



**Abbildung 5: Bewertung der dynamischen Versuchsreihen aus Tabelle 1, rechts (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung)**

Wird die Lichtfarbe bei konstantem Beleuchtungsniveau variiert, liegen die Bewertungen der Probanden im Mittel bei 1,6 zwischen *angenehm* und *vorwiegend angenehm*. Grundsätzlich werden die dargebotenen Schrittweiten, die sich an den Schwellwerten orientieren, für die Änderung der Lichtfarbe akzeptiert. Die Ergebnisse früherer Untersuchungen [1] wurden damit für einen realen Raum bestätigt. Im Vergleich zu den Resultaten aus [1] wären eine geringere Änderungsgeschwindigkeit oder eine Begrenzung des Variationsumfangs zu empfehlen, um Probleme, die sich aus der Farbadaptation ergeben können, zu vermeiden. BIESKE schlägt im Bereich zwischen  $CCT = 3000\text{ K}$  und  $CCT = 8000\text{ K}$  eine mittlere Änderungsgeschwindigkeit von  $\bar{v}_{\Delta CCT} = 12\text{ K/s}$  vor.

Werden die Änderung der Lichtfarbe und die Änderung der Beleuchtungsstärke miteinander kombiniert, steigt die mittlere Bewertung der Probanden im Mittel auf 2,7 bis 3. Das bedeutet, dass die zeitgleiche Änderungen beider Parameter zu kritischeren Bewertungen führen. Änderungen der Lichtverhältnisse ziehen immer Adaptationsvorgänge nach sich. Es ist zu erwarten, dass sie in der Kombination von Parametern kritischer sind. Der Einfluss der Änderungsgeschwindigkeit ist in diesem Zusammenhang entscheidend. Auch erscheint eine Begrenzung des Variationsumfangs für einen Zyklus sinnvoll. Dies ist in weiterführenden Untersuchungen zu klären.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG

Aus den in den Untersuchungen gewonnen Erkenntnissen lassen sich Steuerstrategien begründen, wie Übergänge zwischen Beleuchtungsniveaus bei dynamischen Beleuchtungssystemen ausgelegt werden können. Letztlich entscheiden die konkrete Anwendung, und die Berücksichtigung chronobiologische Lichtwirkungen über die Wahl der Parameter und die zeitliche Auslegung.

## LITERATUR

- [1] Bieske, K., (2010) Über die Wahrnehmung von Lichtfarbenänderungen zur Entwicklung dynamischer Beleuchtungssysteme, Tönning, Lübeck und Marburg: Der Andere Verlag, 143 Seiten
- [2] Kruithof, A. A., (1941) Röhrenlampen mit Leuchtstoffen für Allgemeine Beleuchtungszwecke, *Philips' Technische Rundschau*, 6 (3), 65-96
- [3] Bodmann, H. W., (1963) Kriterien für optimale Beleuchtungsniveaus, *Lichttechnik*, 15 (1), 24-26
- [4] Boyce, P. R., Cuttle, C., (1990) Effect of correlated colour temperature on the perception of interior and colour discrimination performance, *Lighting Research & Technology*, 22 (1), 19-36
- [5] Han, S., Boyce, P., (2003) Illuminance, CCT, décor and the Kruithof curve, In: *Proceedings - 25<sup>th</sup> Session of the CIE San Diego (USA)*, 3 - 178ff
- [6] Schwarzer, K., Gottsche, J., Jellinghaus, S., (2006) Was will der Nutzer? Teil 2: Nutzerbefragung, Ergebnisse und Diskussion. *Licht*, 58 (9): 862-867
- [7] Spira, S., (2013) Untersuchung von Lichtfarbenpräferenz und Einfluss des Raumes auf die Farbwiedergabe, Ilmenau: Projektarbeit TU Ilmenau
- [8] Boyton, R. M., (1967) Visibility losses caused by sudden luminance changes, *CIE-Proc.*, Washington, 1-12
- [9] DIN (Deutsches Institut für Normung), (2011), Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten in Innenräumen, DIN EN 12464 Teil 1: 2011, Berlin: Beuth Verlag
- [10] Technischen Regeln für Arbeitsstätten ASR, (2011), Beleuchtung, A3.4: 2011
- [11] Lanthony, P., (1978) The Desaturated Panel D-15, *Dokumenta Ophthalmologica*, 46(1), 185-189
- [12] Ginsburg, A. P., (1984) A New Contrast Sensitivity Vision Test Chart, *American Journal of Optometry & Physiological Optics*, 61(6), 403-407
- [13] Gescheider, G. A., (1985) *Psychophysics*, London: Lawrence Erlbaum Associates, 2nd Edition
- [14] Dommaschk, A., (2014) Untersuchungen zur Variation von Lichtfarbe und Beleuchtungsniveau bei farbdynamischer Beleuchtung, Ilmenau: Diplomarbeit TU Ilmenau

## DANKSAGUNG

Diese Forschungsarbeit wurde mit finanzieller Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Forschungsprojekts UNILED (Förderkennzeichen: 13N10751) durchgeführt.

