

KOMBINATION UNTERSCHIEDLICHER LICHTFARBEN IM RAUM: FARBIGE SCHATTEN

Bieske, K., Fiebig, T.

Technische Universität Ilmenau/ Fachgebiet Lichttechnik, Ilmenau, Deutschland
Karin.Bieske@tu-ilmenau.de

ABSTRACT

Werden unterschiedliche Beleuchtungssysteme gleichzeitig in einem Raum verwendet, die in ihrer Lichtfarbe variieren, können Lichtfarbenunterschiede zwischen Leuchten und zwischen Arbeitsbereichen auftreten. Je nach Ansteuerung und Anordnung der Leuchten im Raum kann dies zur Ausbildung farbiger Schatten führen, die sich störend im Arbeitsbereich bemerkbar machen können. Um Aussagen zu Schwellen- und Toleranzwerten für farbige Schatten ableiten zu können, erfolgten Untersuchungen in einem Versuchsraum. In einem ersten Schritt wurden systematische Messungen an einem Schattenobjekt zur Ausbildung von Farbunterschieden in Abhängigkeit von Lichtfarbenunterschieden zwischen den Leuchten und dem Leuchtenabstand durchgeführt. Für ausgewählte Lichtszenen erfolgten Bewertungen durch Probanden an einem Schattenobjekt und für Objekte in einer Büroszene sowie für Lichtfarbenunterschiede zwischen den Leuchten. Die Untersuchungen fanden mit 21 Probanden statt. Dabei wurde die Lichtfarbe der Leuchten zwischen $CCT = 2700$ K und $CCT = 7500$ K bei einem Beleuchtungsniveau auf der Bewertungsfläche von $E = 725$ lx variiert. Als Referenz diente eine Lichtfarbe mit einer ähnlichsten Lichtfarben von $CCT = 5100$ K. Es zeigte sich, dass Lichtfarbenunterschiede zwischen Leuchten kritischer bewertet wurden als farbige Schatten an Objekten. Werden ähnliche Lichtfarben innerhalb eines Arbeitsbereichs verwendet, sind störende Effekte vermeidbar.

Schlagwörter: Kombination von Lichtfarben, Farbige Schatten

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 Lichtvertei-

lung auszulegen. Werden Leuchten mit variablen Lichtfarben innerhalb eines Raumes installiert, können Unterschiede in der Lichtfarbe zwischen den Leuchten und zwischen Arbeitsbereichen auftreten. Je nach Ansteuerung und Anordnung der Leuchten im Raum kann dies zur Ausbildung farbiger Schatten führen, die sich störend im Arbeitsbereich bemerkbar machen können. Kenntnisse darüber, welche Unterschiede bei farbigen Schatten und bei Lichtfarbenunterschieden zwischen Leuchten erkennbar sind und wann störende Effekte auftreten sind wichtig für die lichttechnische Gestaltung innerhalb von Raumbereichen, für die Wahl der Lichtfarbe in angrenzenden Räumlichkeiten und für die Auslegung von farbdynamischen Beleuchtungssystemen.

2 STAND DER WISSENSCHAFT

MARKYTAN führte Untersuchungen zur Kombination von Lichtfarben im Arbeitsbereich durch [1],[2]. Betrachtet wurde eine Mehrkomponentenbeleuchtung an einem Büroarbeitsplatz. Parameter waren neben der Teilflächengröße und dem erforderlichen Beleuchtungsniveau die Lichtfarbenkombination. Bei der Untersuchung wurden verschiedene Lichtfarben im Arbeitsbereich (CCT : 2700 K, 3000 K, 4000 K) mit unterschiedlichen Lichtfarben der raumbezogenen Beleuchtung (CCT : 3000 K, 4000 K und 6500 K) kombiniert und bei Beleuchtungsniveaus von $E = 600$ lx und $E = 1500$ lx hinsichtlich ihrer Akzeptanz verglichen. 20 Probanden bewerteten die dargebotenen Lichtszenen. Im Ergebnis zeigte sich, dass im Arbeitsbereich neutralweiße Lichtfarben besser akzeptiert werden als warmweiße Lichtfarben und dass unabhängig vom Beleuchtungsniveau keine großen Unterschiede in der Lichtfarbe zwischen arbeitsplatzbezogener und raumbezogener Beleuchtung gewünscht werden. Die Kombination (2700 K/6500 K) wird im Vergleich zu anderen Kombinationen aufgrund der hohen Farbkontraste durch die Probanden deutlich negativer bewertet.

LUCKNER und BEYER untersuchten in einem Laborraum die Kombination von Lichtfarben zwischen Leuchten und die Ausbildung von farbigen Schatten an einem Schattenobjekt [3],[4]. Dazu wurden Leuchten mit neutralweißen und farbigen Leuchtstofflampen bestückt und schrittweise in der Lichtfarbe bei konstantem Beleuchtungsniveau ($L = 9300$ cd/m²) variiert. Ausgehend von einer Lichtfarbe von $CCT = 4000$ K wurde sie in Richtung Rot, Grün und Blau verändert. 25 Probanden bewerteten sowohl die Lichtfarbenunterschiede zwischen Leuchten als auch die Ausbildung farbiger Schatten. Im Ergebnis dieser Untersuchung zeigte sich, dass farbige Schatten kritischer bewertet wurden, als der Lichtfarbenunterschied zwischen den Leuchten. Lichtfarbenunterschiede zwischen Leuchten wurden je nach Variationsrichtung von den Probanden bei Medianwerten von $\Delta u'v' = 0,0016$ (Richtung grün), $\Delta u'v' = 0,0024$ (Richtung rot) und $\Delta u'v' = 0,0041$ (Richtung blau) gerade erkannt. Toleranzwerte lagen bei Medianwerten von $\Delta u'v' = 0,0090$ (Richtung grün), $\Delta u'v' = 0,0198$ (Richtung rot) und $\Delta u'v' = 0,0302$ (Richtung blau).

BIESKE variierte in ihren Untersuchungen die Lichtfarbe entlang des Planckschen Kurvenzuges und bestimmte Schwellen- und Toleranzwerte für die Wahrnehmung von Lichtfarbenunterschieden für sprunghafte Lichtfarbenänderungen [5]. Dabei zeigte sich keine Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke im Bereich von $E = 300$ lx bis $E = 1000$ lx, jedoch wurden die Ergebnisse

von der Ausgangslichtfarbe beeinflusst. Mit steigender Farbtemperatur nahmen auch die Schwellen- und Toleranzwerte $\Delta u'v'$ zu. Diese Untersuchungen zeigen auch, dass Variationen entlang der Juddschen Geraden im Vergleich zu Variationen entlang des Planckschen Kurvenzuges zu kritischeren Bewertungen führen.

3 METHODE UND VERSUCHSDESIGN

Die Untersuchungen wurden in einem Laborraum der Größe 6,60 m x 4,2 m x 2,4 m mit neutraler Raumgestaltung durchgeführt. Die Reflexionsgrade von Wänden, Boden und Decke betragen $\rho_{Wand} = 0,7$, $\rho_{Boden} = 0,1$, $\rho_{Decke} = 0,7$. Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung des Versuchsraums und die Anordnung der Leuchten. Fünf Reihen mit je drei Leuchten sind in einer Rasterdecke integriert. Es wurden Leuchten der Firma Philips SmartForm TBS473 mit einer leuchtenden Fläche von 55,5 cm x 55,5 cm verwendet. Sie sind für sechs T5 Leuchtstofflampen ausgelegt und verfügen über elektronische Vorschaltgeräte mit DALI-Schnittstelle. Die Abschlusscheibe ist in OLC-Microlinsenoptik ausgelegt, die die Lichtmischung realisiert. Verwendet wurden je Leuchte zwei Lampen Phillips Master T5 HO 827 24 W und vier Lampen Phillips Master T5 HO Activiva Natural 24 W. Für die Ansteuerung wurde die DALI X TouchBox der Firma Tridonic eingesetzt. Über die Definition von Gruppen und Szenen wurden Helligkeit und Lichtfarbe der Leuchten für die Versuchsszenen definiert. Für die Untersuchung mit Versuchspersonen wurden je zwei Leuchtenreihen zu einer Gruppe zusammengefasst. Mit der Leuchtengruppe 1 wurden ähnlichste Farbtemperaturen von $CCT = 2700\text{ K}$ bis $CCT = 5100\text{ K}$ realisiert. Leuchtengruppe 2 ermöglichte Einstellungen mit ähnlichsten Farbtemperaturen von $CCT = 5100\text{ K}$ bis $CCT = 7500\text{ K}$. Um hohe ähnlichste Farbtemperaturen CCT zu realisieren, wurden die Leuchten der Leuchtengruppe 2 zusätzlich mit blauen Filtern (LEE 203) versehen. Das Beleuchtungsniveau im Untersuchungsbereich betrug konstant $E = 725\text{ lx}$. Abbildung 1 (rechts) gibt einen Überblick über die realisierten Versuchsszenen und deren Lichtfarben.

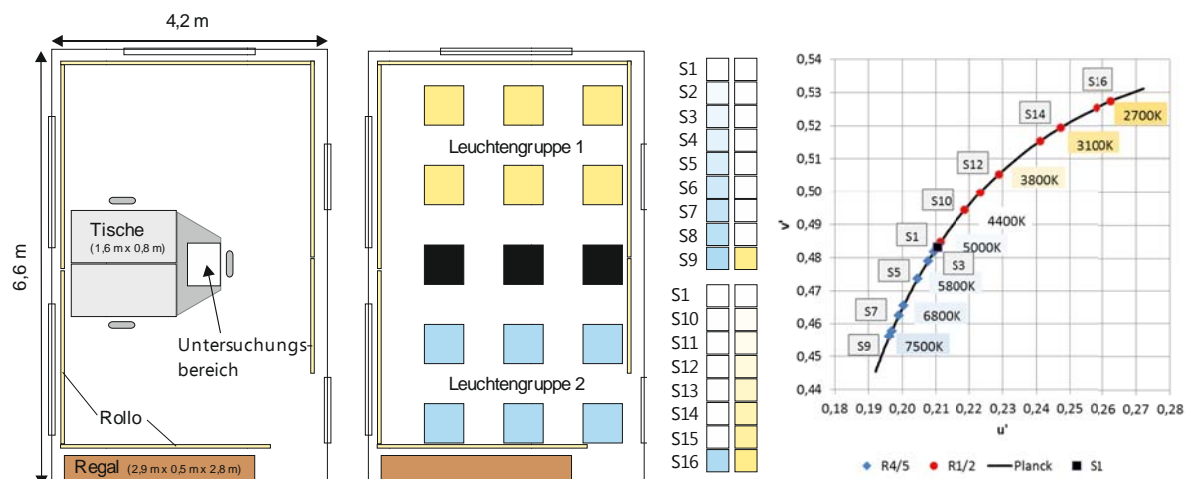


Abbildung 1: Skizze des Versuchsraums und der Leuchtenanordnung (links) und schematische Darstellung und Lichtfarben der Versuchsszenen S1 bis S16 (rechts)

Für die einzelnen Versuchsszenen S1 bis S16 wurden die lichttechnischen und farbmetrischen Parameter für die farbigen Schatten an den Objekten und für Lichtfarbenunterschiede zwischen den Leuchten bestimmt. Abbildung 2 zeigt das Messprinzip. Gemessen wurde spektral mit dem Spektralradiometer Specbos 1211 [6] und ortsauflöst mit der Leuchtdichtemesskamera LMKcolor 4-98 [7].

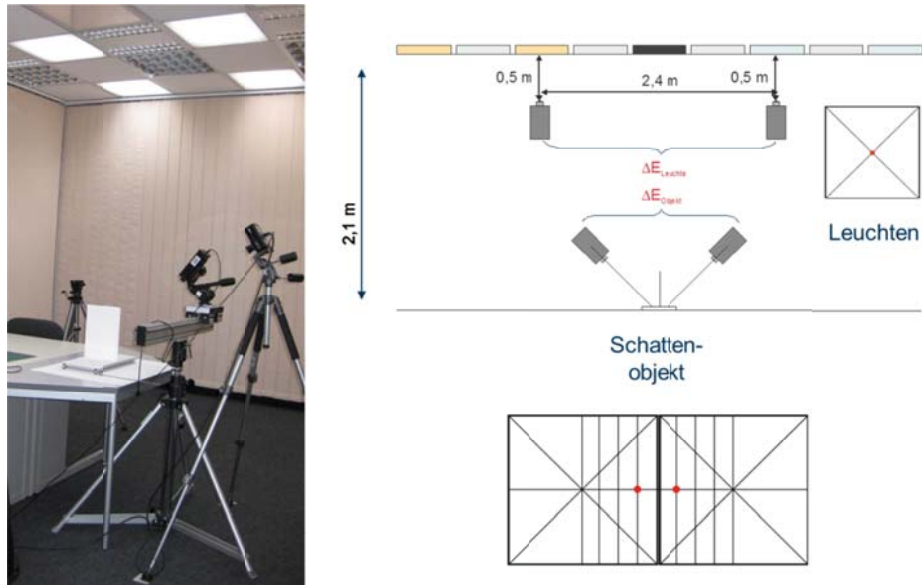


Abbildung 2: Darstellung des Messaufbaus im Versuchsraum zur Erfassung der Lichtfarbenunterschiede zwischen Leuchten und der Farbunterschiede auf dem Schattenobjekt

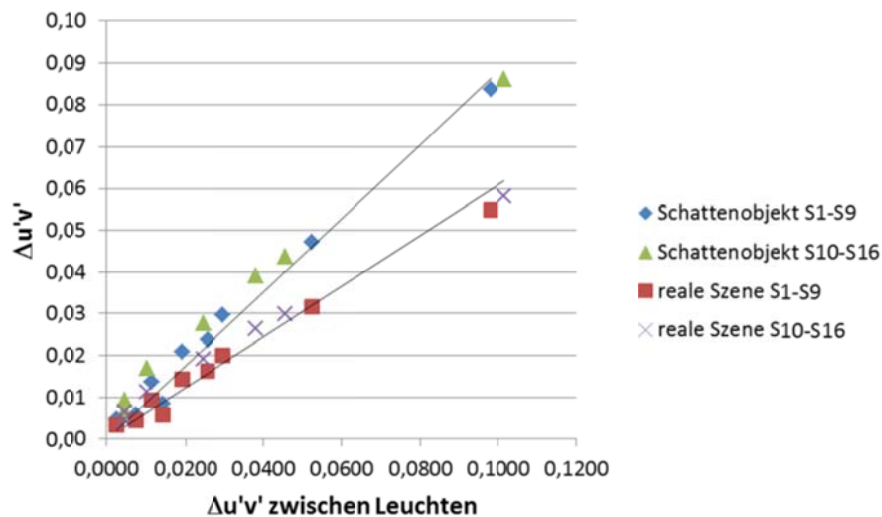


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Lichtfarbenunterschied zwischen den Leuchten und den gemessenen Farbunterschieden $\Delta u'v'$ auf dem Schattenobjekt und in der untersuchten realen Büroszene

Aus den Messdaten wurde der Farbunterschied $\Delta u'v'$ zwischen Leuchten der Leuchtengruppe 1 und Leuchtengruppe 2 beziehungsweise zwischen den Schatten links und rechts von Objekten nach Gleichung (1) berechnet:

$$(1) \quad \Delta u'v' = \sqrt{(u'_1 - u'_2)^2 + (v'_1 - v'_2)^2}$$

Abbildung 3 zeigt den Zusammenhang zwischen Lichtfarbenunterschied zwischen den Leuchten und den gemessenen Farbunterschieden $\Delta u'v'$ auf dem Schattenobjekt und in der untersuchten realen Büroszene.

Die Versuchsszenen wurden in den Untersuchungen 21 farbtüchtige Probanden (davon 10 Frauen, Alter: 20 bis 56 Jahre, $\bar{\Delta} 34 \pm 12$ Jahre) in randomisierter Reihenfolge dargeboten. Die Testpersonen bewerteten in einem ersten Durchgang farbige Schatten an einem Schattenobjekt, in einer zweiten Versuchsreihe farbige Schatten an realen Objekten für eine Bürosituation und abschließend die Lichtfarbenunterschiede zwischen den Leuchten. Abbildung 4 gibt einen Überblick über die verwendeten Versuchsobjekte.



Abbildung 4: Überblick über die verwendeten Versuchsobjekte in den einzelnen Versuchsdurchgängen

Für jede Versuchssituation wurden drei Bewertungen abgegeben. Die Kriterien für die Bewertung von farbigen Schatten und Lichtfarbenunterschieden waren:

0	1	2	3
keine gesehen	gerade erkannt	deutlich erkennbar, jedoch nicht störend	störend empfunden

4 ERGEBNISSE

Abbildung 5 fasst die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchung zusammen. Dargestellt sind die subjektiven Bewertungen der 21 Probanden für farbige Schatten am Schattenobjekt sowie

für Objekte in einer Bürossituation und für wahrgenommene Lichtfarbenunterschiede zwischen den Leuchten in Abhängigkeit vom Lichtfarbenunterschied zwischen den Leuchten $\Delta u'v'$.

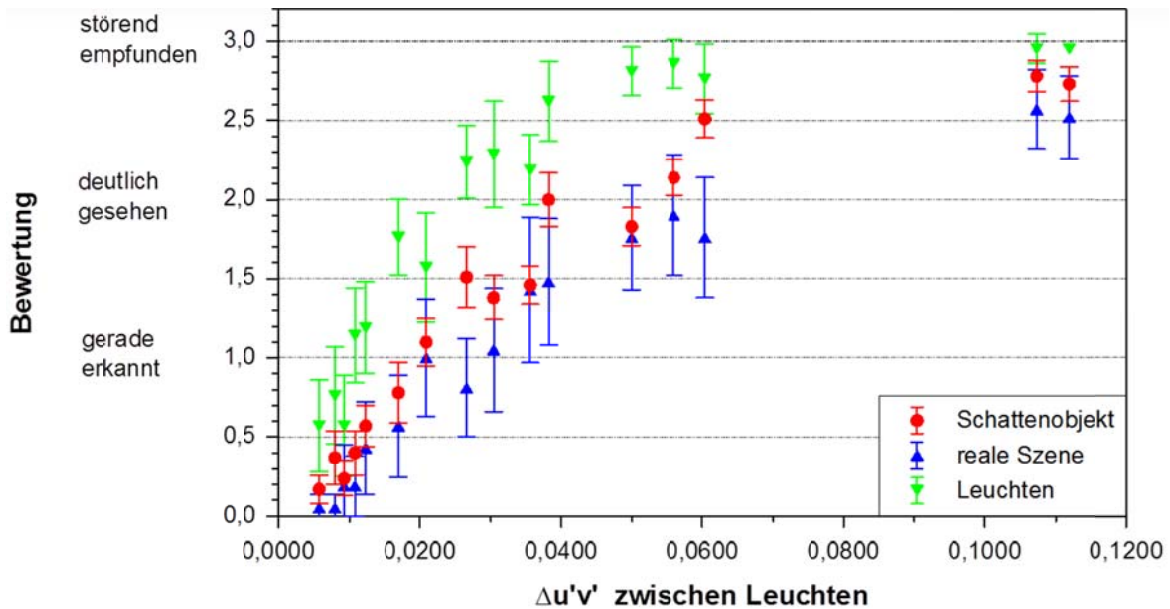


Abbildung 5: Subjektive Bewertung für farbige Schatten am Schattenobjekt, für Objekte in einer Bürossituation und für den Lichtfarbenunterschied zwischen den Leuchten (Mittelwert \pm Standardabweichung)

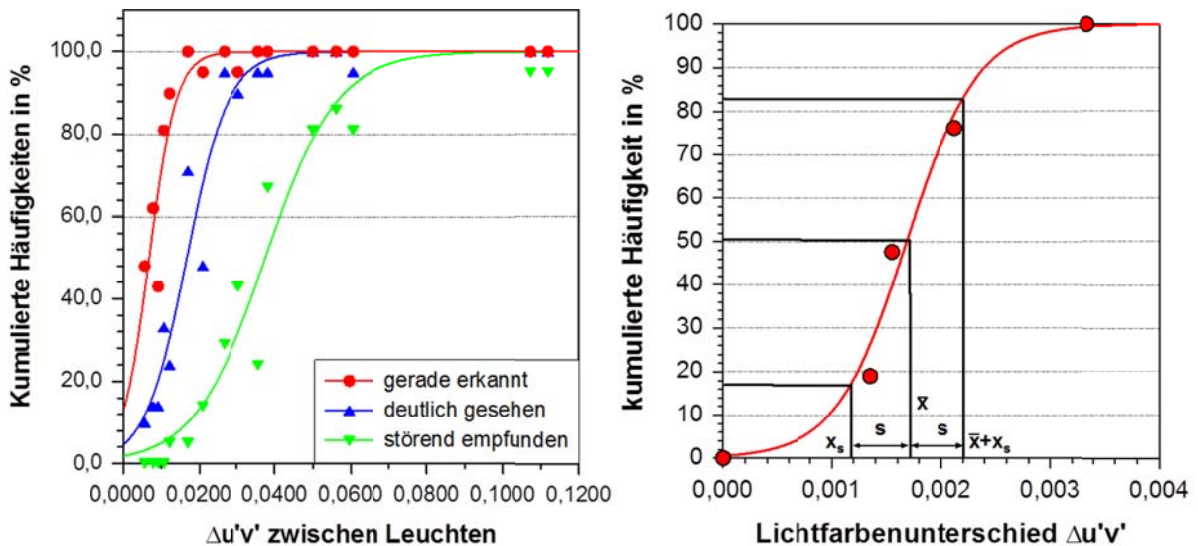


Abbildung 6: Kumulierte Häufigkeit für die Bewertung des Lichtfarbenunterschieds zwischen Leuchten für die Kriterien *gerade erkannt* (Bewertung ≥ 1) *deutlich gesehen* (Bewertung ≥ 2) und *störnd empfunden* (Bewertung = 3) (links) und Prinzip der Methode zur Datenbestimmung (rechts)

Danach wird der Lichtfarbenunterschied zwischen Leuchten in einem Raum kritischer bewertet als die Ausbildung farbiger Schatten an Objekten. In realen Situationen sind farbige Schatten weniger auffällig als am Schattenobjekt, das mit seiner Höhe von 20 cm einen deutlicheren Schattenwurf auf seiner homogenen weißen Oberfläche verursacht als typische Gebrauchsgegenstände in einer Bürosituation.

Für die weitere Auswertung wurden die kumulierte Häufigkeitsverteilung für die verschiedenen Versuchsreihen und Kriterien ermittelt. Daraus erfolgte für die logistische Funktion nach Gleichung (2) die Berechnung der Parameter a und b durch eine nichtlineare Regression (Abbildung 6). Mit diesen Parametern kann der Mittelwert \bar{x} und die Standardabweichung s bestimmt werden (Gleichungen 3 und 4).

$$(2) \quad f(x) = \frac{100}{1+e^{-\frac{a-x}{b}}} \quad (3) \quad f(\bar{x}) = \frac{100}{1+e^{-\frac{a-\bar{x}}{b}}} = 50 \quad (4) \quad f(x_s) = \frac{100}{1+e^{-\frac{a-x_s}{b}}} = \frac{1}{6} \cdot 100$$

folgt $\bar{x} = a$ folgt $s = |\bar{x} - x_s| = b \cdot \ln 5$

Die Ergebnisse der nichtlinearen Regression sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Schwellen- und Toleranzwerte (Mittelwerte \pm Standardabweichung)

Kriterium/ $\Delta u'v'$	zwischen Leuchten	am Schattenobjekt	an realen Objekten
<i>gerade gesehen</i>	0,0069 +/- 0,0023	0,0114 +/- 0,0026	0,0128 +/- 0,0034
<i>deutlich erkannt</i>	0,0167 +/- 0,0036	0,0275 +/- 0,0050	0,0235 +/- 0,0048
<i>störend empfunden</i>	0,0375 +/- 0,0062	0,0514 +/- 0,0015	0,0589 +/- 0,0103

Für die Beleuchtungssituation im Versuchsraum wurden ausgehend von einer ähnlichsten Farbtemperatur von $CCT = 5100$ K im Mittel Lichtfarbenunterschiede mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von $\Delta CCT = 300$ K *gerade erkannt*, Unterschiede von $\Delta CCT = 700$ K *deutlich gesehen* und von $\Delta CCT = 1600$ K *störend empfunden*.

5 DISKUSSION UND ZUSAMMENFASSUNG

Im Vergleich zur Schattenbildung an dem in der Untersuchung verwendeten Schattenobjekt sind farbige Schatten an realen Objekten weniger auffällig, da diese maßgeblich durch die Objekthöhe beeinflusst werden. In der durchgeführten Untersuchung wurde von einem Worst-Case-Szenario ausgegangen, in dem sich die Lichtfarben zweigeteilt im Raum unterscheiden und sich der Beobachter im Bereich des sprunghaften Übergangs befindet. Es ist zu erwarten, dass in einer realen Umgebung die Allgemeinbeleuchtung Bezug zum Arbeitsbereich hat und die Arbeitsfläche selbst eher inhomogen bezüglich Leuchtdichte und Farbe ist. Es ist zu vermuten, dass farbige Schatten dadurch weniger auffällig sind. Außerdem ist zu erwarten, dass durch Tageslicht die Lichtfarbe im Arbeitsbereich zusätzlich beeinflusst wird und Übergänge der Lichtfarbe nicht sprunghaft erfolgen.

Nach BIESKE werden Schwellen- und Toleranzwerte maßgeblich von der Ausgangslichtfarbe beeinflusst [5]. Das mag eine der Ursachen dafür sein, dass im Vergleich zur Untersuchung von

LUCKNER bei CCT = 4000 K größere Schwellen- und Toleranzwerte bestimmt wurden [3]. Außerdem erfolgte die Variation der Lichtfarbe in der in diesem Beitrag dargestellten Untersuchung orientiert am Verlauf der Planckschen Kurve. Nach BIESKE sind diese Lichtfarbenänderungen weniger kritisch als Variationen in Richtung oberhalb oder unterhalb des Planckschen Kurvenzuges [3]. Die in der Untersuchung verwendeten Leuchten wiesen auf der leuchtenden Fläche Inhomogenitäten auf, die durch die Anordnung der Lampen und die nicht perfekte Lichtmischung bedingt sind. Die Erkennung von Unterschieden wird dadurch erschwert.

Farbige Schatten sollten in der Praxis keine Störungen verursachen, da Lichtfarbenunterschiede zwischen den Leuchten kritischer bewertet werden. Werden ähnliche Lichtfarben im Arbeitsbereich verwendet, können störende Einflüsse vermieden werden.

QUELLEN

- [1] Markytan, A., (2001) Untersuchungen der Mehrkomponenten-Beleuchtung am Bildschirmarbeitsplatz, Ilmenau: Forschungsbericht TU Ilmenau,
- [2] Markytan, A., (2007) Untersuchungen zur flächenbezogenen Beleuchtung in Büroräumen, Tönning, Lübeck und Marburg: Der Andere Verlag, 163 Seiten
- [3] Luckner, H., (2006) Zulässige Farbtoleranzen zwischen Leuchten, Ilmenau: Projektarbeit TU Ilmenau
- [4] Beyer, E., (2006) Lichtfarbenübergänge und farbige Schatten, Ilmenau: Projektarbeit TU Ilmenau
- [5] Bieske, K., (2010) Über die Wahrnehmung von Lichtfarbenänderungen zur Entwicklung dynamischer Beleuchtungssysteme, Tönning, Lübeck und Marburg: Der Andere Verlag, 143 Seiten
- [6] Spebos 1211 Datenblatt. abrufbar online unter http://www.jeti.com/cms/images/jeti_com/down/data_sheets/instruments/scb1211.pdf, zuletzt aufgerufen Juni 2014
- [7] TechnoTeam, LMK color Produktinformationen, abrufbar online unter http://www.technoteam.de/produktuebersicht/lmk/produkte/index_ger.html zuletzt aufgerufen Juni 2014

DANKSAGUNG

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

