

Einfluss der Anordnung von strukturierten LED-Leuchten auf die Lesbarkeit von bedruckten Papieren und Tablet-PCs

Funke, C.¹, Vandahl, C.¹, Dingeldein, K.-U.², Junghans, B.², Schierz, Ch.¹

¹ TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, Prof.-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau, D

² Zumtobel Lighting GmbH, Schweizer Str. 30, 6851 Dornbirn, AT

Problemstellung und Forschungsfragen

Bei Büroarbeitsplätzen spielt die Kontrastwiedergabe eine wichtige Rolle. Zur Beschreibung der Kontrastwiedergabe wurde in den 80er Jahren das CRF-Verfahren (Contrast Rendering Factor) entwickelt. Seitdem haben sich sowohl Sehaufgaben als auch technische Messmittel verändert, sodass eine Erneuerung des CRF-Verfahrens angestrebt wird. Mittels Leuchtdichtemesskameras (LMK) ist es mittlerweile möglich, auch CRF-Werte orts aufgelöst zu messen. Dafür wird ein hinreichend großer Reflexionsstandard benötigt, welcher die heute typischen Sehaufgaben am Arbeitsplatz repräsentiert.

Stand der Wissenschaft/Technik

In bisherigen Arbeiten der Autoren wurde bereits ein geeigneter Reflexionsstandard geschaffen und mit den Eigenschaften heutiger Sehaufgaben (Kopierpapier, Zeitschriften, Tablets) verglichen. Der neue Standard muss durch Probandenversuche validiert werden.

Forschungshypothesen

- Die CRF-Werte mit dem neuen Reflexionsstandard und der LMK korrelieren mit den wahrgenommenen Kontrasten am Büroarbeitsplatz, da sich die Reflexionseigenschaften des neuen Standards mit denen des Brüel & Kjaer-Standards decken.
- Bei hochglänzenden Tablets werden LED-Leuchten mit hohen Kontrasten innerhalb der Leuchte störender als Leuchten mit homogener Leuchtdichtestruktur beurteilt, bei bedruckten Papieren sind beide durch die diffusen Anteile des Papiers gleich störend.
- Pendel- und Stehleuchten mit hohen Kontrasten werden bei hochglänzenden Tablets störender als entsprechende Deckenleuchten wahrgenommen, da sie sich näher an der Reflexionsoberfläche befinden.

Versuchsaufbau

Die Versuche wurden in einem büroähnlichen Raum mit 11 handelsüblichen Decken-, Pendel- und Stehleuchten bei 500 lx, 650 lx und 1000 lx mit 30 Probanden durchgeführt. Dabei wurden bisherige Arbeiten [Jentsch et al. in Licht-Forschung 1984] berücksichtigt.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Im Wesentlichen konnten alle drei Hypothesen bei allen Beleuchtungsstärken in Übereinstimmung mit [CIE-Schrift 19.2; Jentsch 1984] bestätigt werden. Bei bedrucktem Kopierpapier wurde die Lesbarkeit fast unabhängig vom gemessenen CRF-Wert beurteilt. Bei Zeitschriftenpapier und Tablets ist das erneuerte CRF-Verfahren jedoch gut geeignet zur Beurteilung der Lesbarkeit in Innenräumen mit strukturierten LED-Leuchten.

Impact of the arrangement of non-uniform LED luminaires on the readability on printed papers and tablets

Funke, C.¹, Vandahl, C.¹, Dingeldein, K.-U.², Junghans, B.², Schierz, Ch.¹

¹ TU Ilmenau, Lighting Engineering Group, Prof.-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau, D

² Zumtobel Lighting GmbH, Schweizer Str. 30, 6851 Dornbirn, AT

Research issue

At office work places, contrast rendering plays an important role. In order to describe the contrast rendering, in the 1980s the CRF procedure (contrast rendering factor) was developed. Since then, the visual tasks as well as the measurement equipment have changed. Hence, renewal of the CRF procedure is aimed. Using imaging luminance measurement devices (ILMD), meanwhile it is possible to measure CRF values spatially resolved. For that, a sufficient sized reflection standard is necessary, which represents today's typical visual tasks.

State of science/technology

In previous works of the authors already developed a suitable reflection standard and it compared with the properties of current visual tasks (copy paper, journals and tablets). The new standard yet has to be validated within psychometric studies.

Research hypotheses

- The CRF values measured with the new reflection standard and ILMD correlate well with the perceived contrasts at an office work place, because the reflection characteristics of the new standard match with those of the Brüel & Kjaer-Standard.
- On glossy tablets, highly non-uniform LED luminaires are judged more disturbing than uniform luminaires. On printed papers, both luminaire types are perceived equally disturbing because of the diffuse structure of the paper.
- Highly non-uniform pendant and free-standing luminaires are perceived more disturbing on glossy tablets than corresponding ceiling luminaires, because they are located more closely to the reflection surface.

Experimental setup

The tests were conducted by 31 subjects in an office-like test room with 11 commercially available ceiling, pendant and free-standing luminaires. The horizontal illuminance has been kept constant at 500 lx, 650 lx and 1000 lx respectively. For the study concept, previous studies [Jentsch et al. in Licht-Forschung 1984] were considered.

Results in comparison with previous findings

Basically, all three research hypotheses were verified at all horizontal illuminances in agreement with [CIE-report 19.2; Jentsch 1984]. On printed copy paper, the readability was nearly independent from the measured CRF-value. In contrast, on journal papers and tablets the new CRF procedure is appropriate to predict the readability in indoor environments with non-uniform LED luminaires.

Einfluss der Anordnung von strukturierten LED-Leuchten auf die Lesbarkeit von bedruckten Papieren und Tablet-PCs

Funke, C.¹, Vandahl, C.¹, Dingeldein, K.-U.², Junghans, B.², Schierz, Ch.¹

¹ TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, Prof.-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau, D

² Zumtobel Lighting GmbH, Schweizer Str. 30, 6851 Dornbirn, AT

Zusammenfassung

Bei Büroarbeitsplätzen spielt die Kontrastwiedergabe eine wichtige Rolle. Zur Beschreibung der Kontrastwiedergabe wurde in den 80er Jahren das CRF-Verfahren (Contrast Rendering Factor) entwickelt. Mittels Leuchtdichtemesskameras (LMK) ist es mittlerweile möglich, CRF-Werte ortsaufgelöst zu messen. Dafür wird ein hinreichend großer Reflexionsstandard benötigt, welcher die heute typischen Sehaufgaben am Arbeitsplatz (z. B. Kopierpapier, Zeitschriften, Tablets) repräsentiert. Ein solcher Standard wurde in vorangegangenen Arbeiten geschaffen. Im vorliegenden Beitrag wurde der neue Standard mittels Probandenstudien validiert. Dabei wurden insbesondere für Zeitschriften und Tablet-PCs eine gute Korrelation von Lesbarkeitsurteilen und gemessenen CRF-Werten beobachtet. Bei bedrucktem Kopierpapier waren die Lesbarkeitsurteile fast unabhängig von den ermittelten CRF-Werten.

1 Einführung – Der Kontrastwiedergabefaktor CRF

Der Einsatz von gerichtetem Licht hat nicht nur Vorteile: Die Kontrastwiedergabe z. B. auf glänzenden Materialien (Zeitschriften, Tablett-PCs, Smartphones, Computerausdrucken) kann in bestimmten Beleuchtungssituationen deutlich reduziert sein (vgl. Abb. 1). Daher ist es notwendig, diese Behinderung des Sehvorgangs messtechnisch zu erfassen und zu bewerten. Der Kontrast wird aus den Leuchtdichten von Sehdetail L_o und dessen unmittelbarer Umgebung L_u bestimmt:

$$C = \frac{L_o - L_u}{L_u} \quad (1)$$

Abhängig von der Lichteinfallrichtung auf die Sehaufgabe kann der Kontrast unterschiedlich wiedergegeben werden. Zur Beschreibung der Kontrastwiedergabe wurde in der LiTG-Publikation Nr. 13 [1] mit dem Kontrastwiedergabefaktor CRF ein Gütemerkmal angegeben:

$$CRF = \frac{C}{C_o} \quad (2)$$

In dieser Gleichung ist C der Kontrast der Sehaufgabe bei der aktuellen Beleuchtung und C_o der Kontrast bei einer diffusen Beleuchtung. Der CRF-Wert korreliert gut mit der empfundenen Kontrastwahrnehmung bei verschiedenen Beleuchtungssituationen [2].

2 Ziel der Untersuchung

Die bisherige Bewertungsmethode für Kontrastwiedergabe soll für LED-Beleuchtungsanlagen und moderne Sehaufgaben angepasst und in der Praxis eingeführt werden. In früheren Untersuchungen [3; 4] konnte gezeigt werden, dass das CRF-Verfahren auch mit einer LMK anstatt des Brüel & Kjaer-Leuchtdichte-Messgeräts durch-

geführt werden kann. Um den gesamten Bereich mit einem Bild messen zu können, benötigt man jedoch einen ausreichend großen Reflexionsstandard, mit welchem man die Kontrastwiedergabe für verschiedene Sehaufgaben ableiten kann. Derartige Reflexionsnormale sind derzeit nicht am Markt verfügbar, wurden jedoch in früheren Untersuchungen [5; 6; 7] hergestellt (vgl. Abb. 2).



Abb. 1: Kontrastminderung (Foto: I. Herzog)

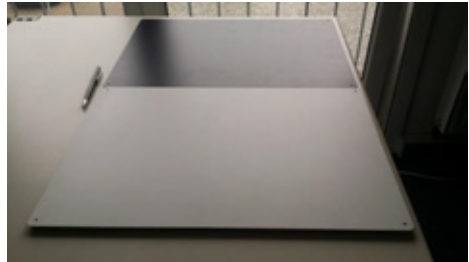


Abb. 2: Foto des neuen Reflexionsstandards

Es fanden bereits einige Vorarbeiten zur Auswahl und Validierung neuer Reflexionsnormale für das neue Messverfahren statt. Die eigentliche neue Messmethodik mittels Leuchtdichtemesskamera wurde aber noch nicht untersucht, ebenfalls sind neue Grenzwerte für die Anwendung der neuen CRF-Werte noch nicht ermittelt worden. Die Validierung der Messmethodik sowie die Bestimmung der CRF-Grenzwerte wurden deshalb im Rahmen einer Probandenstudie durchgeführt.

3 Eigenschaften des neuen Reflexionsstandards

Die Schaffung eines neuen Reflexionsstandards ist für die einheitliche Bewertung der Kontrastwiedergabe entscheidend. An den neuen Reflexionsstandard (bestehend aus einem weißen und einem schwarzen Reflexionsnormal) wurden verschiedene praktische und messtechnische Anforderungen gestellt [8; 9]. Die hergestellten neuen Reflexionsnormale (vgl. Abb. 2) wurden in zahlreichen Messungen mit dem Brüel & Kjaer-Reflexionsstandard und anderen typischen Sehaufgaben verglichen. Darunter waren neben handelsüblichem Kopierpapier auch hochglänzende Papiere. Außerdem wurden die Leuchtdichtefaktoren und CRF-Werte für ein Smartphone (maximale Helligkeit und Bildschirm dunkel) aufgezeichnet. Der neue Reflexionsstandard ist zwar etwas matter als der Brüel & Kjaer-Standard, jedoch decken sich die CRF-Werte sehr gut und liegen zwischen dem matten Kopierpapier und den hochglänzenden Proben [7]. Der neue Reflexionsstandard kann gemäß [5] folgendermaßen hergestellt werden: Als Trägermaterial dient ein eloxiertes Aluminiumblech. Dieses wird für den weißen Standard mit RAL 9016 Ascodurlack 620 und für den schwarzen mit RAL 9005 Ascodurlack 620 der Fa. Schoch AG beschichtet. Das Mischungsverhältnis des Härters 620 zum Lack beträgt jeweils 1:4. Es wurde keine forcierte Trocknung, sondern lediglich Lufttrocknung eingesetzt.

4 Untersuchungskonzept und -ablauf

In der Probandenuntersuchung wurde das neue Messverfahren mit dem großflächigen Reflexionsstandard hinsichtlich seiner Eignung zur Beschreibung der Lesbarkeit bei verschiedenen Beleuchtungssituationen und Sehaufgaben evaluiert. Dafür wurden folgende Forschungshypothesen formuliert:

- Die CRF-Werte mit dem neuen Reflexionsstandard und der Leuchtdichtemesskamera korrelieren mit den wahrgenommenen Kontrasten am Büroarbeitsplatz, da sich die Reflexionseigenschaften des neuen Standards mit denen des B&K-Standards decken.
- Bei hochglänzenden Tablets werden LED-Leuchten mit hohen Leuchtdichtekontrasten innerhalb der Leuchte störender als Leuchten mit homogener Leuchtdichtestruktur beurteilt, bei bedruckten Papieren sind beide durch die diffusen Anteile des Papiers gleich störend.
- Pendel- und Stehleuchten mit hohen Leuchtdichtekontrasten werden bei hochglänzenden Tablets störender als entsprechende Deckenleuchten wahrgenommen, da sie sich näher an der Reflexionsoberfläche befinden.

Um diese Hypothesen zu überprüfen, wurden während des Tests die Leuchtenanzahl, die Lichteinfallrichtung, die Leuchtenleuchtdichtestruktur, die Leuchtenart und Art der Sehaufgabe variiert. Die Untersuchungen wurden in einem büroähnlichen Untersuchungsraum (6,6 m x 3,5 m, Höhe 2,8 m) durchgeführt. Der Raum wurde mit handelsüblichen Leuchten ausgestattet, die einzeln über DALI angesteuert wurden. Alle Leuchten hatten eine ähnlichste Farbtemperatur von 4000 K und einen Farbwiedergabeindex $R_a \geq 80$. Der Versuchsraum war farbneutral ausgestattet mit bürotypischen Reflexionsgraden an Fußboden, Decke und Wänden. Im Versuchsraum befanden sich neun Arbeitsplätze mit Monitor und Tastatur, an denen die Probanden die Bewertungen abgaben (vgl. Abb. 3 und 4).



Abb. 3: Arbeitsplatz des Probanden



Abb. 4: Foto des Versuchsraums

Während eines Untersuchungstermins befand sich ein Proband im Raum. Nachdem der Proband an einem Arbeitsplatz eine definierte Anzahl von Lichtsituationen bewertet hatte, setzte er sich an einen anderen, zufälligen Arbeitsplatz. Während eines Untersuchungstermins wurde die mittlere horizontale Beleuchtungsstärke auf dem bewertenden Arbeitsplatz mit jeweils 500 lx, 650 lx und 1000 lx konstant gehalten. An den restlichen Arbeitsplätzen wurde eine mittlere horizontale Beleuchtungsstärke von 250 lx, 400 lx und 500 lx eingestellt, damit der restliche Raum nicht vollkommen dunkel erscheint. An jedem der neun Arbeitsplätze wurden die definierten Lichtsituationen in zufälliger Reihenfolge jeweils dreimal präsentiert, damit jede Lichtsituation bei jeder Sehaufgabe genau einmal vorhanden war. Die drei Sehaufgaben waren Kopierpapier, Zeitschriftenpapier sowie Tablet-PC. Auf den Sehaufgaben waren Ausschnitte aus wissenschaftlich-technischen Zeitschriften aufgebracht, die sowohl Text als auch Bilder und Diagramme enthielten. Zur Bewertung einer Lichtsituation hatten die Probanden 60 Sekunden Zeit. Nach Ablauf der Zeit mussten Sie folgende Fragen Skala beantworten:

1. Wie beurteilen Sie die Helligkeit der Arbeitsfläche?

2. Wie beurteilen Sie die Lesbarkeit unter Berücksichtigung des Glanzes?
3. Wie beurteilen Sie die Störung durch die Lichtquellen beim Betrachten des Monitors?

Die Fragen und die Bewertungsskala wurden in leicht abgewandelter Form aus der Untersuchung von JENTSCH ET AL. [2] entnommen. Die Helligkeit und Lesbarkeit wurden mit einer neunstufigen Skala (1 = unzureichend...9 = ausgezeichnet) bewertet. Die Störung (Blendung) durch die Beleuchtungsskala wurde analog bisheriger Blendungsstudien anhand einer siebenstufigen Söllner-Skala bewertet. Vor der eigentlichen Untersuchung wurden immer eine Einweisung und ein kurzer Vortest durchgeführt. Ein Untersuchungsdurchlauf mit Vortest und dreimal 25 Lichtsituationen dauerte so ca. 90 Minuten (inkl. Pause). Insgesamt nahmen 31 Probanden (14 Frauen, 17 Männer) an dem Versuch teil. Davon waren fünf Mitarbeiter am Fachgebiet Lichttechnik der TU Ilmenau (Alter 26 bis 48 Jahre). Die verbleibenden 26 Probanden waren lichttechnisch ungeübt und wiesen eine Altersstruktur von 21 bis 34 Jahren auf (Mittelwert 25,1 Jahre). 14 Probanden trugen eine Brille und zwei Probanden trugen Kontaktlinsen während der Untersuchung. Alle Probanden hatten eine Sehschärfe mit einem Visus von mindestens 0,8.

5 Ergebnisse

Vor dem Probandenversuch wurden für jede Lichtkonfiguration bei allen Helligkeitsstufen die CRF-Werte mit dem neuen Reflexionsstandard und mit dem Brüel & Kjaer-Gerät ermittelt (vgl. Abb. 11). Die CRF-Werte wurden mit einer LMK 5 der Fa. TechnoTeam mit 8-mm-Objektiv gemessen, die auf dem in [5; 8] beschriebenen Aufbau angebracht wurde.

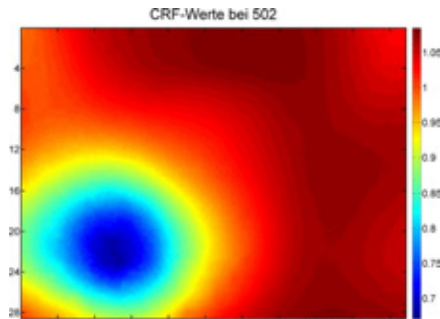


Abb. 5: CRF-Bild mit LMK für gesamte Größe des Reflexionsstandards für Konf. 2 bei 500 lx

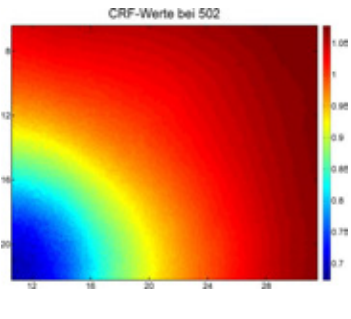


Abb. 6: CRF-Bild mit LMK für Tablet-Größe für Konfiguration 2 bei 500 lx (20x15 cm)

In Abb. 7 wird deutlich, dass das Lesbarkeitsurteil vor allem durch den mittleren CRF-Wert, die Sehaufgabe und die Beleuchtungsstärke beeinflusst wird. Während bei bedrucktem Kopierpapier die Lesbarkeit fast unabhängig vom CRF-Wert bewertet wurde, spielt dieser bei glänzenden Proben eine wichtige Rolle. Dabei wurde die Lesbarkeit bei zunehmendem Glanzgrad schlechter bewertet. Während bei einer Beleuchtungsstärke von 500 lx die Lesbarkeitsbewertungen tendenziell am besten ausfielen, kann für 650 lx und 1000 lx keine klare Aussage getroffen werden. Erkennbar ist jedoch, dass bei Kopierpapier und Zeitschriftenpapier die Lesbarkeit bei 1000 lx tendenziell besser bewertet wurde als bei 650 lx. Beim Tablet wurde die Lesbarkeit bei beiden Beleuchtungsstärken ungefähr gleich bewertet, wobei hier die Streuung nach wie vor recht hoch ist. Die Ursachen für die Streuungen und die Rangfolge der Beleuchtungsstärkelevels sind zum aktuellen Zeitpunkt

unklar. Jedoch bestätigen die bisherigen Beobachtungen bereits die Hypothese 1 – zumindest für Zeitschriftenpapier und Tablet korrelieren die CRF-Werte gut mit den Lesbarkeitsurteilen.

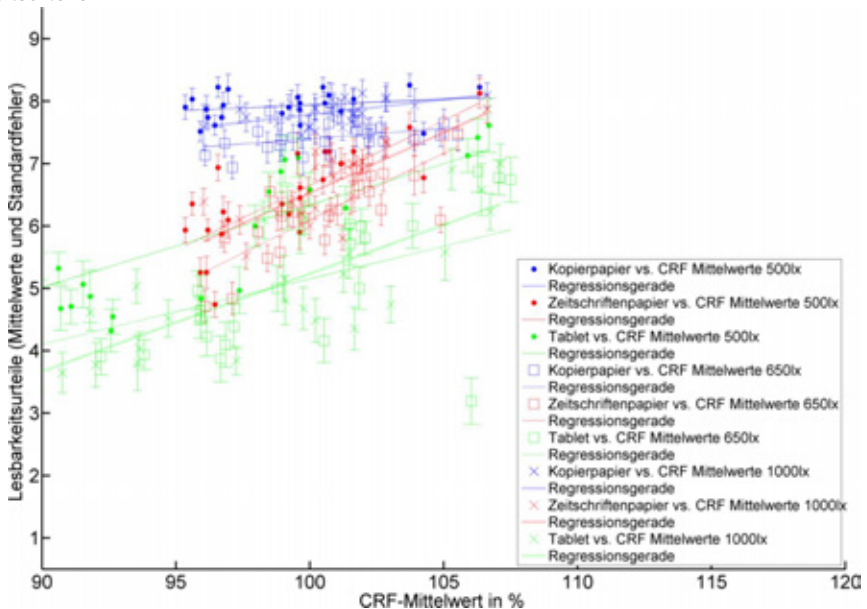


Abb. 7: CRF-Mittelwerte im Vergleich zur den Lesbarkeitsurteilen der Probanden bei verschiedenen horizontalen Beleuchtungsstärken, CRF-Mittelwerte bei Tablet für relevante Displaygröße

Für die Überprüfung der Forschungshypothesen 2 und 3 sind in Abb. 8 die Boxplots der Lesbarkeitsurteile bei verschiedenen strukturierten Leuchten an der gleichen Position dargestellt. Da jede Leuchte bzw. Leuchtengruppe die gleiche Beleuchtungsstärke am bewerteten Arbeitsplatz erzeugt hat, kann hier also direkt die Lesbarkeit mit der Leuchtdichtestruktur verglichen werden. Daraus wird ersichtlich, dass die Leuchtdichtestruktur bei Kopierpapier keinen Einfluss auf die Lesbarkeit hat, bei Tablets die Lesbarkeit für kontrastreiche Leuchten jedoch signifikant schlechter bewertet wurde. Bei Zeitschriftenpapier ergibt sich ein gemischtes Bild bei Betrachtung aller Leuchtenanzahlen und -positionen, mit der Tendenz, dass die Leuchtdichtestruktur auch hier nur einen sehr geringen Effekt auf die Lesbarkeit hat.* Somit konnte Forschungshypothese 2 bestätigt werden. Bei weiterer Betrachtung von strukturierten Leuchten wurde deutlich, dass insbesondere die Leuchten mit hohen Leuchtdichtekontrasten eher schlecht hinsichtlich Lesbarkeit bewertet wurden und dass strukturierte Stehleuchten eine schlechtere Lesbarkeit aufweisen als entsprechende Deckeneinbauleuchten.* Damit konnte auch Forschungshypothese 3 bestätigt werden.
*(Aus Platzgründen kann dies an dieser Stelle nicht dargestellt werden.)

Da die Lesbarkeit auf glänzenden bedruckten Papieren und Tablet-PCs bei gleicher horizontaler Beleuchtungsstärke vor allem durch die mittleren CRF-Werte beeinflusst wird, sollten bei der Lichtplanung möglichst keine Leuchten im Bereich von 15° bis 35° frontal zur Normalen der Arbeitsfläche positioniert und ggf. die Leuchtenanordnung mit dem neuen CRF-Verfahren überprüft werden. Falls in einem Raum häufig Tablet-PCs eingesetzt werden, sollte der Lichtplaner vorab die Leuchtenleuchtdichtestruktur berücksichtigen.

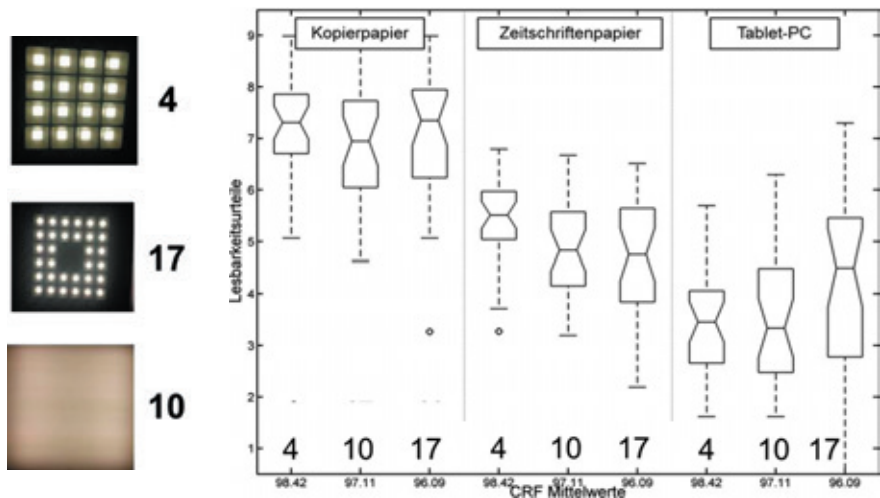


Abb. 8: Vergleich der Lesbarkeitsurteile der Probanden bei verschiedenen Leuchtdichtestrukturen bei 650 lx. Zur Vergleichbarkeit mit CRF-Mittelwerten – beim Tablet für relevante Displaygröße.

Diese Forschungsarbeit wurde mit finanzieller Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Forschungsprojekts UNILED2 (Förderkennzeichen: 13N13395) durchgeführt. Die Autoren bedanken sich herzlich beim BMBF für die Unterstützung.

Literatur

- [1] Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (Hrsg.) (1991): „Der Kontrastwiedergabefaktor CRF - ein Gütemerkmal der Innenraumbeleuchtung“. Berlin: LiTG Publ. 13.
- [2] Jentsch, Jürgen; Schmits, Paul W.; Stolzenberg, Klaus (1984): „Subjektive Bewertung von Beleuchtungsanlagen und Kontrastwiedergabe“. Teil 2. Licht-Forschung 6 (2), S. 87–91.
- [3] Wolf, Stefan; Löffler, Karin; Gall, Dietrich (1996): „Ermittlung von CRF-Werten mittels bildaufgelöster Leuchtdichtemessung“. Tagungsband der Licht 96, Leipzig.
- [4] Junghans, Bert (2012): CRF – „Wiederbelebung eines Messverfahrens“. Vortrag bei der 22. Mitgliederversammlung des Vereins zu Förderung des Fachgebiets Lichttechnik an der TU Ilmenau am 19. Oktober 2012 in Ilmenau.
- [5] Zumtobel (Hrsg.) (2013): „CRF Messung mit Leuchtdichtekamera“. Unternehmensinterne Dokumentation. Dornbirn 2013.
- [6] Deter, Michael (2015): „Experimentelle Untersuchungen zur Erneuerung des CRF-Verfahrens“. Masterarbeit am Fachgebiet Lichttechnik der TU Ilmenau.
- [7] Funke, Carsten et al. (2015): „Renewal of the contrast rendering factor procedure to describe reflected glare in indoor applications“. 28th Session of the CIE, Manchester, 2015 Proceedings, Vol.1, Part 2, S. 1481-1486.
- [8] Deter, Michael; Hupe, Christoph; Skoczowsky, Robert (2014): „Bestimmung eines CRF-Reflexionsnormals“. Projektseminar am FG Lichttechnik der TU Ilmenau.
- [9] Funke, Carsten et al. (2014): „Bestimmung eines Reflexionsnormals für Kontrastwiedergabe-Messungen“. LICHT 2014, Poster-Präsentation, Den Haag 2014.