

## EyeComfort white paper<sup>1</sup>

Lichtqualität ist heute ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal in der Beleuchtung. Im Allgemeinen bezieht sich die Lichtqualität auf die visuellen Aspekte des Lichts und seine Abhängigkeiten von und die Interaktion mit Menschen und Umwelt. Die LED-Beleuchtung gibt uns unendliche Möglichkeiten zur Differenzierung in räumlicher, spektraler und zeitlicher Lichtqualität. Sie zwingt uns, unsere traditionelle Art der Bewertung der Lichtqualität zu überdenken. Philips Lighting optimiert seine Produkte kontinuierlich, indem es ein tiefgehendes Verständnis für die Bedürfnisse der Nutzer, das Wissen über Lichtenwendungen und wissenschaftliche Erkenntnisse zusammenbringt.

Wir haben die Marke EyeComfort auf der Grundlage der folgenden ausgewählten Parameter entwickelt: Flimmern, Stroboskopeffekt, photobiologische Sicherheit, Blendung, Dimmen, Abstimbarkeit, Farbwiedergabe und hörbares Rauschen.

Anhand dieser Parameter wird unser Produktportfolio an LED-Lampen und LED-Leuchten bewertet. Dieses Whitepaper erläutert diese Parameter und damit die Bedeutung der Optimierung der Beleuchtung.

### Wissenschaftlicher Hintergrund

Philips EyeComfort LED beinhaltet die oben genannten Parameter:

#### 1. *Flimmern- und Stroboskopeffekt*

Flimmern und Stroboskopeffekt sind temporäre Lichtartefakte ("TLAs"). TLAs sind definiert als Veränderungen in der visuellen Wahrnehmung, die durch einen Lichtreiz, die Leuchtdichte oder die spektrale Verteilung, die mit der Zeit für einen menschlichen Betrachter in einer bestimmten Umgebung schwankt, hervorgerufen werden. Flimmern ist die Wahrnehmung von visueller Unsicherheit durch einen Lichtreiz, die mit der Zeit schwankende Leuchtdichte oder spektrale Verteilung für einen statischen Beobachter in einer statischen Umgebung. Mit anderen Worten, es ist eine störende schnelle Schwankung des Lichts im Raum.

Der stroboskopische Effekt ist anders als das Flimmern und wird definiert als die Veränderung der Bewegungswahrnehmung, die durch einen Lichtreiz, die Leuchtdichte oder spektrale Verteilung, die mit der Zeit schwankt, für einen statischen Beobachter in einer nicht-statischen Umgebung hervorgerufen wird. Mit anderen Worten, der Stroboskopeffekt kann die Bewegung von sich schnell bewegenden Objekten "einfrieren", indem er sie für eine sehr kurze Zeit sichtbar macht.

Eine Eigenschaft von LEDs ist die schnelle Reaktion auf Schwankungen im Eingangssignal. Daher reproduzieren sie diese Schwankungen in der Lichtausbeute originalgetreu, was zu TLAs für Personen im beleuchteten Raum führen kann. Die Schwankungen können von verschiedenen Quellen kommen, wie z.B.: Störungen am Netz, Wechselwirkungen mit Steuerungen (z.B. Dimmer), Störungen am Eingangssignal von externen Quellen (z.B. Mikrowelle) und eingeplante Schwankungen durch den

---

<sup>1</sup> Dieses EyeComfort Whitepaper kann durch Philips Lighting abgeändert werden, sofern uns neue Informationen verfügbar aus z.B: den Bereichen Produktentwicklung, Forschung sowie sonstigen Regulationen.

elektronischen Treiber. Es sind Methoden bekannt, um Schwankungen in der Lichtleistung von LEDs zu unterdrücken und gleichzeitig die Sichtbarkeit unerwünschter TLAs zu verringern. Diese Methoden erfordern jedoch Kompromisse bei Kosten und Effizienz und benötigen mehr Platz, während die Lebensdauer jeder LED-Produktarchitektur verringert wird.

Bis vor kurzem wurden verschiedene Metriken verwendet, um die Sichtbarkeit des Flimmerns und des Stroboskopeffekts zu beurteilen, wie z.B. Modulationstiefe und Flimmerindex. Keine dieser Metriken ist geeignet, um vorherzusagen, was Menschen tatsächlich wahrnehmen oder erleben. Flimmer- und Stroboskopeffekt-Sichtbarkeit werden durch Modulationstiefe, Frequenz, Wellenform und Tastverhältnis beeinflusst, und diese Metriken berücksichtigen diese Parameter nicht. Daher wurden wissenschaftliche Modelle entwickelt, die sich auf die visuelle Wahrnehmung des Menschen beziehen, die der Teil des Nervensystems ist, der es uns erlaubt zu sehen. Eine robustere TLA-Metrik für Flimmern ist PstLM und für den Stroboskopeffekt SVM[1,2]. Diese Metriken werden von Lighting Europe[3] und NEMA[4] unterstützt und werden bei der Bewertung der Philips EyeComfort LED-Beleuchtung verwendet.

### *Warum sollten wir uns um Flimmern und den Stroboskopeffekt kümmern?*

Beleuchtungsprodukte, die Flimmern oder den Stroboskopeffekt aufweisen, gelten als minderwertige Beleuchtung[5-14]. TLAs sind nicht nur ärgerlich für den Menschen, sondern haben auch Auswirkungen auf das Stresslevel der Augen, das allgemeine Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit. Genauer gesagt, können sichtbare TLAs die Leistung unserer Wahrnehmung reduzieren, Augenbeschwerden verursachen (Ermüdung der Augen), das Auftreten von Kopfschmerzen begünstigen und visuelle Irritationen verursachen. Studien zeigen, dass das sichtbare Flimmern in bestimmten Fällen epileptische Anfälle auslösen kann[5-14]. In diesem Sinne wurden die Philips Lighting EyeComfort LED-Produkte entwickelt, um das sichtbare Flimmern und den Stroboskopeffekt zu minimieren.

## *2. Photobiologische Sicherheit*

### *Blaulichtgefahr*

Die Blaulichtgefahr ist eine photochemische Schädigung der Netzhaut und hängt von der spektralen Zusammensetzung, der Intensität und der Zeit der Einwirkung auf das Auge ab. Die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) hat einen Standard zur Bewertung der photobiologischen Sicherheit entwickelt[16]. Die Quellen werden in 4 Risikogruppen eingeteilt (0 = kein Risiko, 3 = hohes Risiko).

Risikogruppe 0: Die Lampe stellt keine photobiologische Gefahr dar.

Risikogruppe 1: Keine photobiologische Gefährdung bei normaler Verwendung

Risikogruppe 2: Keine Gefährdung durch Abneigung gegen helles Licht oder thermische Unannehmlichkeiten.

Risikogruppe 3: Gefährlich auch bei kurzzeitiger Exposition

Ein häufiges Missverständnis in den Medien ist die Vorstellung, dass LED-Beleuchtung höhere Anteile an blauen Wellenlängen enthält und daher eher eine Gefahr für blaues Licht darstellt. Dies wurde von der Global Lighting Association gründlich erforscht und gemessen, indem der spektrale Gehalt verschiedener Lichttechnologien und des oben genannten Standards zusammen mit dem Input vieler Wissenschaftler verglichen wurde[15].

Die wichtigsten wissenschaftlichen Erkenntnisse sind:

Hinsichtlich der Blaulichtgefahr unterscheiden sich LED-Lampen nicht von herkömmlichen Technologien wie Glüh- und Leuchtstofflampen. Der Anteil an Blau in der LED-Beleuchtung unterscheidet sich nicht von dem Anteil in anderen Technologien bei gleicher Farbtemperatur.

Ein Vergleich der LED-Retrofit-Produkte mit den herkömmlichen Produkten, die sie ersetzen sollen, zeigt, dass die Risiken sehr ähnlich und im unkritischen Bereich liegen.

LED-Quellen (Lampen oder Systeme) und Leuchten, die in die Risikogruppe 0 oder 1 nach IEC fallen, können von Verbrauchern verwendet werden.

#### *Ultraviolett*

LED-basierte Lichtquellen für Verbraucher enthalten keine Energie im UV-Bereich und sind daher für Menschen mit einer höheren Empfindlichkeit gegenüber UV-Licht unbedenklich.

#### *Infrarot*

Im Gegensatz zu Glühlampen und Halogen geben LEDs kaum Infrarot (IR) ab. Für Consumer-LED-Lichtquellen besteht kein Risiko, da die IR-Strahlung nicht stark genug ist.

Die optische Sicherheit wird durch internationale Normen und Richtlinien geregelt[16,17]. Philips EyeComfort LED-Produkte sind alle in die Risikogruppe 0 oder 1 (RG0 / RG1) eingestuft, was bedeutet, dass die Verwendung dieser LED-Produkte bei normalem Nutzungsverhalten keine photobiologische Gefahr darstellt und die Lampe selbst keine photobiologische Gefahr darstellt.

### *3. Blendung*

Blendung ist einer der bedeutendsten Unzufriedenheitsfaktoren in Bezug auf eine komfortable Beleuchtung. Blendung kann in behindernde Blendung und unangenehme Blendung unterteilt werden. Behindernde Blendung bezieht sich auf die Verringerung der Sehleistung, die durch eine Blendquelle im Sichtfeld verursacht wird. Unbequeme Blendung ist definiert als das Gefühl von Unbehagen durch helle Lichtquellen. Das Gefühl des Unbehagens hängt von vielen Parametern wie der Leuchtdichte der Quelle, dem Bereich der Quelle, der Position der Quelle im Sichtfeld, den Lichtverhältnissen im Hintergrund, der Art der Aktivität und der Dauer der Exposition gegenüber einer hellen Quelle ab. Seit Jahren versuchen die Forscher, das Ausmaß der Sehbehinderung zu quantifizieren. Die Bewertung der Blendung für Arbeitsplätze in Innenräumen (professionelles Umfeld) erfolgt in der Regel mit Hilfe der UGR-Metrik (Unified Glare Rating). Diese Metrik basiert auf durchschnittlichen Leuchtdichten, die aus einer Fernfeldstärkeverteilung berechnet werden. In LED-Beleuchtungslösungen sehen wir oft ungleichmäßige oder pixelige Austrittsfenster mit hohen Leuchtdichtekontrasten. Studien haben gezeigt, dass pixelige Austrittsfenster mit der gleichen mittleren Leuchtdichte wie gleichmäßige Austrittsfenster (und damit

dem gleichen UGR-Wert) zu einer höheren Blendung führen[19-35]. Dies bedeutet, dass der aktuelle UGR nicht immer für die Verwendung mit uneinheitlichen Austrittsfenstern geeignet ist.

Die Untersuchung der Anwendbarkeit oder Verbesserung der aktuellen UGR und die Erforschung alternativer Möglichkeiten zur Vorhersage der Blendung von Unbehagen ist ein bedeutendes Forschungsthema. Verbesserungen am aktuellen UGR zielen vor allem auf eine Korrektur des Positionsindex in der UGR-Formel zur Berücksichtigung der Blickwinkelabhängigkeit, eine Korrektur der mittleren Leuchtdichte, eine Korrektur der beobachteten Leuchtfläche und eine allgemeine Korrektur durch Hinzufügen eines zusätzlichen Abschnitts zur Darstellung des Leuchtdichtekontrastes innerhalb der Blendquelle (36-44). Vorschläge für alternative Methoden zur Beschreibung von Blendung basieren auf der Modellierung der retinalen Aufnahmefelder des menschlichen Sehsystems (HVS) und der Anwendung dieses Modells auf Leuchtdichtekarten des Raumes zur Beurteilung von unangenehmer Blendung[34]. Der letzte Ansatz ist identisch mit den TLA-Metriken, die ebenfalls auf der Modellierung des menschlichen Sehsystems basieren.

Für Verbraucherlampen gibt es derzeit keine Blendungsmetrik zur Quantifizierung der Blendung. Außerdem hängt die wahrgenommene Blendung einer Glühbirne auch von der Anwendung ab. Eine frei hängende Glühbirne über dem Tisch in der Nähe des Betrachters und in Augenhöhe ist greller als die gleiche Glühbirne in einem Lampenschirm in der Ecke des Raumes. Im Allgemeinen wird Blendung durch eine Kombination aus hoher Leuchtdichte, hohem Kontrast und Quellengröße verursacht. Blendschutzmaßnahmen sollten zumindest eine dieser Ursachen adressieren: Verringerung der Leuchtdichte, Verringerung des Kontrasts oder Verringerung der Quellengröße. Im Philips LED-Beleuchtungsportfolio unterscheiden wir Lampen mit und ohne Blendungsbegrenzung. Eine Lampe mit Blendungsbegrenzung enthält diffuse Materialien und/oder eine pixelige Oberfläche auf der Lampe und wird im Vergleich zu Lampen ohne Blendungsbegrenzung bei gleichem Lichtstrom und gleicher Hintergrundanpassung als weniger grell wahrgenommen. Eine gute Blendungsmessung für Glühbirnen ist derzeit nicht verfügbar und ein Forschungsthema für die Zukunft.

#### *4. Dimmbarkeit*

Die Dimmfunktion von LED-Produkten ist definiert als die Möglichkeit, die Lichtintensität nach eigenen Wünschen zu verändern. Die Dimmfunktion der LED-Produkte ermöglicht es, in jeder Umgebung das perfekte Ambiente oder die perfekte Arbeitsplatzbeleuchtung zu schaffen. Die Menschen wollen das künstliche Licht aus mehreren Gründen dimmen. Erstens wollen sie die Fähigkeit, das Ambiente der Umgebung zu verändern (dämmrig und gemütlich, hell und anregend). Zum anderen kann die Dimmung über den Tag verteilt, je nach Aktivität oder in Abhängigkeit von der Außenhelligkeit, unterschiedliche Lichtstärken liefern. Am Abend können Sie z.B. die Lichtverhältnisse dimmen, um den Kontrast zwischen der dunklen Umgebung und dem LED-Licht zu reduzieren, um mögliche Blendung zu reduzieren. Schließlich wird die Dimmfunktion zur Energieeinsparung genutzt.

Eine schlechte Implementierung der Dimmfunktion kann zu Unannehmlichkeiten oder unerwünschten Effekten wie sichtbarem Flackern bei tiefen Dimmstufen, unruhigen Übergängen und hohen Mindestlichtstärken führen. Diese Probleme entstehen durch die LED-Treiberschaltung, Schwankungen der Netzspannungsamplitude, Netzanschlusswerte und Dimmerinteraktion. Intelligentes

Elektronikdesign löst das Problem bei tiefen Dimmstufen und unterdrückt wiederholende und/oder unregelmäßige sichtbare Helligkeitsschwankungen.

Die dimmbaren Produkte der Philips EyeComfort LED-Reihe bieten stufenweises Dimmen in Presets (SceneSwitch) oder stufenlos über den gesamten Intensitätsbereich.

### 5. *Einstellbare Farbtemperatur*

Einstellbare Farbtemperaturen können in drei Kategorien definiert werden:

1. Warmes Dimmen: Fähigkeit zur Nachahmung des Glühverhaltens (z.B. Farbverläufe von 2700K-2200K beim Dimmen)
2. Einstellbares Weiß: Möglichkeit, den Weißton einer Leuchte zu ändern (z.B. 2700K - 6500K)
3. Einstellbare Farbe: Möglichkeit, die Farbe der Beleuchtung zu ändern (RGB)

Das Dimmen einer Glühbirne bietet ein anderes Lichtelebnis als das Dimmen herkömmlicher weißer LED-Leuchten. Durch die verwendete Technologie wird eine Glühwendel beim Dimmen weniger heiß und gibt daher mehr rötlichweißes Licht ab (niedrigere Farbtemperatur). Im Gegensatz dazu ändert sich die Farbe der LED beim Dimmen nicht. Die Glühlampe gibt Ihnen also sowohl eine Intensitäts- als auch eine Farbtemperaturvariation, während die LED nur eine Intensitätsvariation liefert und die Farbtemperatur gleichbleibt.

Die Menschen schätzen die warme Umgebung bei schwachen Lichtverhältnissen, um eine angenehme und gemütliche Atmosphäre zu schaffen[45], aber das kann je nach Region unterschiedlich sein. Einige Philips EyeComfort LEDs bieten die WarmGlow-Dimmfunktion. Durch die Kombination von zwei verschiedenen LEDs (2200K und 2700K) kann ein glühendes Dimmverhalten nachgeahmt werden. Die WarmGlow-Funktion gibt es in zwei Varianten. SceneSwitch mit fester Einstellung und stufenlosem WarmGlow-Dimmen über den gesamten Bereich. (2700K-2200K).

Neben dem Ambiente-Effekt hat eine Dimmung in Kombination mit einem Farbtemperaturwechsel auch Vorteile hinsichtlich des zirkadianen Rhythmus der Menschen. Unsere biologische Uhr sagt uns, wann wir aufwachen und wann wir einschlafen sollen. Die Intensität und das Wirkungsspektrum des Lichts ist einer der Parameter, die diese Reaktionen steuern[46]. Hochintensives Licht, das viel Blau enthält, macht uns wach und aufmerksam, während Licht mit geringer Intensität und geringer Menge Blau die Freisetzung des Schlafhormons Melatonin auslöst, das uns schläfrig macht. Untersuchungen haben gezeigt, dass helle Beleuchtung mit einem starken Blauanteil morgens das Aufwachen unterstützt und abends vermieden werden sollte, da sie die Melatoninproduktion unterdrückt und das Einschlafen erschwert. Gedimmte und warme Farbtemperatur-Umgebungen am Abend sind ideal für einen ungestörten biologischen Rhythmus[46].

Philips EyeComfort LEDs mit WarmGlow-Dimmfunktion unterstützen sowohl die Ambiente-Funktion als auch den circadianen Rhythmus des Menschen.

## 6. Farbwiedergabe

Die Farbqualität bezieht sich auf die Vorliebe und Wertschätzung der Nutzer für die Wahrnehmung von Licht in einer bestimmten Anwendung. Die Farbqualität weißer Lichtquellen beeinflusst den Raum, die Objekte und das menschliche Erscheinungsbild. Eine schlechte Farbqualität kann die visuelle Unterscheidung und die genaue Wiedergabe von beleuchteten Räumen, Objekten oder Personen reduzieren. Zum Beispiel können menschliche Hauttöne, Pflanzen und Lebensmittel unter Beleuchtung mit geringer Farbwiedergabe und/oder geringer Farbsättigung matt oder ungesättigt erscheinen.

Die Farbwiedergabe einer weißen Lichtquelle ist definiert als die Wirkung eines Leuchtmittels auf das Farbbild von Objekten durch bewussten oder unbewussten Vergleich mit ihrem Farbbild unter einer Referenzlichtart[47]. Der allgemeine Farbwiedergabeindex (CRI-Ra) wird verwendet, um die Farbwiedergabefähigkeit einer weißen Lichtquelle zu messen und festzulegen, basierend auf einem Satz von acht spezifischen CIE 1974, mäßig gesättigten Testfarbproben (TCS). Ein RA-Wert von 100 bedeutet, dass die Wiedergabe von Farben unter der Testquelle gleich ist im Vergleich zur Wiedergabe von Farben unter der Referenzquelle (Referenz ist bei einer Farbwiedergabe <5000K die Glühlampe).

Die Präferenz der Benutzer ist nicht immer direkt an den RA-Wert gekoppelt. Eine Quelle mit höherem RA-Wert wird nicht immer bevorzugt. Die Farbsättigung (Lebendigkeit), insbesondere die Rot-Sättigung, spielt ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Präferenz[48,49,50]. Eine gewisse Übersättigung wird im Allgemeinen von den Menschen bevorzugt, da die Objekte bunter aussehen. Die Vorliebe für das Aussehen der Hautfarbe ist unterschiedlich, auch zwischen den Kulturen.

Es ist wichtig, die richtige Balance zwischen Farbtreue (RA-Wert) und Farbsättigung für eine bestimmte Anwendung zu finden. Mit Philips EyeComfort LED wollen wir die Farbdifferenzierung und Ästhetik durch den Einsatz von LEDs mit guten Farbqualitätseigenschaften verbessern.

## 7. Lärm

LEDs können unter hörbarem Rauschen leiden, insbesondere beim Einsatz bei tiefen Dimmstufen. Die erzeugten Spannungen und Ströme können mechanische Resonanzen in den Bauteilen erzeugen. Dieses Geräusch kann als sehr störend und unangenehm empfunden werden. Aus diesem Grund hat Energy-Star Anforderungen an den Geräuschpegel gestellt.

Gemäß den Energy-Star-Anforderungen für hörbare Geräusche dürfen Lampen keine Geräusche über 24 dBA in 1 Meter Entfernung (51) abgeben. Diese Schwelle ist nicht streng genug für Lampen in einem völlig leisen Wohnzimmer (ca. 20 dBA) oder Lampen in der Nähe von Personen (Leselicht, Nachttischlampe). Alle Philips EyeComfort LED-Produkte berücksichtigen die veröffentlichten Vorschriften.

Literaturhinweise:

- [1] Małgorzata Perz, Dragan Sekulovski, Ingrid Vogels & Ingrid Heynderickx (2017): Quantifying the Visibility of Periodic Flicker, LEUKOS, DOI: 10.1080/15502724.2016.1269607
- [2] IEC CIE TN 006:2016, Visual Aspects of Time-Modulated Lighting Systems – Definitions and Measurement Models, September 2016: [http://files.cie.co.at/883\\_CIE\\_TN\\_006-2016.pdf](http://files.cie.co.at/883_CIE_TN_006-2016.pdf).
- [3] [https://www.lightingeurope.org/images/publications/position-papers/LightingEurope\\_-\\_position\\_paper\\_-\\_flicker\\_and\\_stroboscopic\\_effect\\_-\\_final.pdf](https://www.lightingeurope.org/images/publications/position-papers/LightingEurope_-_position_paper_-_flicker_and_stroboscopic_effect_-_final.pdf)
- [4] [http://www.nema.org/Standards/Pages/Temporal-Light-Artifacts-Flicker-and-Stroboscopic-Effects.aspx?sm\\_au=i5VMrMH4n4J8p7jb](http://www.nema.org/Standards/Pages/Temporal-Light-Artifacts-Flicker-and-Stroboscopic-Effects.aspx?sm_au=i5VMrMH4n4J8p7jb)
- [5] WILKINS, A., VEITCH, J., LEHMAN, B. 2010. LED Lighting Flicker and Potential Health Concerns: IEEE Standard PAR1789 Update. In 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 171–78.
- [6] Jaen, M., J. Sandoval, E. Colombo, and T. Troscianko, "Office workers visual performance and temporal modulation of fluorescent lighting," LEUKOS, vol. 1, pp. 27–46, 2005.
- [7] Veitch, J. A., and S. L. McColl, "Modulation of fluorescent light: Flicker rate and light source effects on visual performance and visual comfort," Lighting Research and Technology, vol. 27, p. 243, 1995.
- [8] Wilkins, A.J., Nimmo-Smith, I.M., Slater, A. and Bedocs, L. (1989) Fluorescent lighting, headaches and eye-strain. Lighting Research and Technology, 21(1), 11-18.
- [9] Arnold Wilkins, Brad Lehman. Biological effects and health hazards from flicker, including flicker that is too rapid to see. 2/15/10, IEEE Standard P1789. <http://grouper.ieee.org/groups/1789>.
- [10] J. D. Bullough, K. S. Hickcox, T. R. Klein and N. Narendran, "Effects of flicker characteristics from solid-state lighting on detection, acceptability and comfort," Lighting Research and Technology, vol. 43, p. 337–348, 2011
- [11] Harding, G. F. A., and P. Jeavons, Photosensitive Epilepsy. London: Mac Keith Press, 1994.
- [12] Binnie, C. D., R. A. de Korte, and T. Wisman, "Fluorescent lighting and epilepsy," Epilepsia, vol. 20, pp. 725–727, 1979.
- [13] Harding, G. F. A., and P. F. Harding, "Photosensitive epilepsy and image safety," Applied Ergonomics, 16 Oct. 2008.
- [14] Fisher, R. S., G. F. A. Harding, G. Erba, G. L. Barkley, and A. Wilkins, "Photic- and pattern-induced seizures: A review for the Epilepsy Foundation of America working group," Epilepsia, vol. 46, pp. 1426–1441, Sep. 2005.
- [15] Global Lighting Association: Optical and Photobiological Safety of LED, CFLs and Other High Efficiency General Lighting Sources
- [16] IEC 62471:2006, Photobiological safety of lamps and lamp systems
- [17] IEC TR 62778, Application of IEC 62471 for the assessment of blue light hazard to light sources
- [19] EBERBACH, K. (1974). Der Einfluss der Leuchtdichtestruktur von Lichtquellen auf die Blendempfindung. Lichttechnik 6, p. 283–286.
- [20] WATERS, C.E., MISTRICK, R.G., BERNECKER, C.A. (1995): Discomfort Glare from Sources of Nonuniform Luminance. In: Journal of the Illuminating Engineering Society 24 (2), p. 73–85.
- [21] KASAHARA, T., AIZAWA, D., IRIKURA, T., MORIYAMA, T., TODA, M., IWAMOTO, M. (2006): Discomfort Glare Caused by White LED Light Source. In: Journal of Light and Visual Environment 30 (2), p. 49–57.
- [22] TAKAHASHI, H., IRIKURA, T., MORIYAMA, T., TODA, M., IWAMOTO, M. (2007): Discomfort glare and annoyance caused by white LED lamps Proceedings of the 26th Session of the CIE, Beijing, China, p. D1-80–D1-83
- [23] LEE, CH.-M., KIM, H., CHOI, D.-S. (2007): A Study on the Estimation of Discomfort Glare for LED Luminaires. In: CIE (Hg.): Proceedings of the 26th Session of the CIE, Beijing, China, p. D3-33–D3-36

- [24] JUNG, S.-G., CHO, Y.-I., KIM, H. (2009): A Study of UGR for Non-Uniform Luminance Source. Proceedings of Lux Europa 2009, Istanbul, Turkey, p. 553–558.
- [25] KIM, W., Kim, J.T. (2010): The scope of the glare light source of the window with non-uniform luminance distribution, Proceedings of 3rd International Symposium on Sustainable Healthy Buildings, Seoul, Korea, p. 253–271
- [26] TASHIRO T., KIMURA-MINODA, T., KOHKO, S., ISHIKAWA, T., AYAMA, M. (2011): Discomfort Glare Evaluation to White LEDs with Different Spatial Arrangement. Proceedings of the 27th Session of the CIE, Sun City, South Africa, p. 583–588.
- [27] BULLOUGH, J.D. (2011): Luminance versus luminous intensity as metric for discomfort glare. SAE International, DOI: 10.4271/2011-01-0111.
- [28] BULLOUGH, J.D., SWEATER HICKCOX, K. (2012): Interactions among light source luminance, illuminance and size on discomfort glare. SAE International, DOI: 10.4271/201201-0269
- [29] HARA, N., HASEGAWA, S. (2012): Study on Discomfort Glare Rating on the Luminaire with LED Array. In: Journal of Illuminating Engineering Institute Japan 96 (2), p. 81–88.
- [30] ERDEM, L., TRAMPERT, K., NEUMANN, C. (2012): Evaluation of Discomfort Glare from LED lighting systems. Proceedings of Balkan Light 2012, Belgrade, p. 213–220.
- [31] AYAMA, M., TASHIRO, T., KAWANOBE, S., KIMURA-MINODA, T., KOHKO, S., ISHIKAWA, T. (2013): Discomfort glare of white LED sources of different spatial arrangements, Proceedings of the CIE Centenary Conference, Paris, France, p. 119–122
- [32] GEERDINCK, L.M., VAN GHELUWE, J.R., VISSENBERG, M.C.J.M. (2014): Discomfort glare perception of non-uniform light sources in an office setting, Journal of Environmental Psychology, 39, p. 5–13
- [33] FUNKE, C., SCHIERZ, CH. (2015): Extension of the Unified Glare Rating Formula for NonUniform LED Luminaires. Proceedings of 28th session of the CIE, Manchester, UK, p. 1471– 1480
- [34] DONNERS, M.A.H., VISSENBERG, M.C.J.M., GEERDINCK, L.M., VAN DEN BROEK-COOLS, J.H.F., BUDEMEIJER-LOCK, A. (2015): A psychophysical model of discomfort glare in both outdoor and indoor applications. Proceedings of 28th Session of the CIE, Manchester, UK, p. 1602–1611
- [35] YANG, Y., LUO, M.R., MA, S.N. (2016): Assessing glare. Part 2: Modifying Unified Glare Rating for uniform and non-uniform LED luminaires. Lighting Research & Technology, 2016
- [36] TAKAHASHI, H., KOBAYASHI, Y, ONDA, S., IRIKURA, T. (2007): Position Index for the Matrix Light Source. In: Journal of Light and Visual Environment 31 (3), p. 128–133.
- [37] HARA, N. (2016): Visual characteristics for evaluating the discomfort glare – relationship between the position, size, array of the LED chips, and BCD on the discomfort glare. Proceedings of CIE 2016 “Lighting Quality and Energy Efficiency”, Melbourne, Australia, p. 704–707.
- [38] YANG, Y., MA, S.N., LOU, M.R., LIU, X.Y. (2015): Discomfort glare by non-uniform white LED matrices. Proceedings of the 28th Session of the CIE, Manchester, UK, p. 393–399.
- [39] CHEN, M.K, CHOU, C.J., CHEN H.S. (2016): Assessment of glare rating from non-uniform light sources. Proceedings of CIE 2016 “Lighting Quality and Energy Efficiency”, Melbourne, Australia, p. 697–703.
- [40] TASHIRO T., KIMURA-MINODA, T., KOHKO, S., ISHIKAWA, T., AYAMA, M. (2011): Discomfort Glare Evaluation to White LEDs with Different Spatial Arrangement. Proceedings of the 27th Session of the CIE, Sun City, South Africa, p. 583–588.
- [41] SCHEIR, G.H., HANSELAER, P., BRACKE, P., DECONINCK, G., RYCKAERT, W.R. (2015): Calculation of the Unified Glare Rating based on luminance maps for uniform and non-uniform light sources. Building and Environment 84 (2015), p. 60–67.
- [42] ŠKODA, J., SUMEC, S., BAXANT, P., KRBAL, M., PARMA, M. (2015): Measurement of discomfort glare through luminance analyser, Proceedings of the 28th Session of the CIE, Manchester, UK, p. 1373–1381.

- [43] KOGA, S., HIGASHI, H., KOTANI, T. (2013): The development of evaluation for discomfort glare in LED lighting of indoor work place. The modification of G-classification using luminance distribution of luminous parts, Proceedings of the CIE Centenary Conference, Paris, France, p. 657–662.
- [44] YANG, Y., MA, S.N., LUO, M.R. (2016): Glare model for non-uniform white LED luminaires. Proceedings of CIE 2016 “Lighting Quality and Energy Efficiency”, Melbourne, Australia, p. 451–456.
- [45] Seuntiens, P.J.H. & Vogels, Ingrid. (2008). Atmosphere creation: The relation between atmosphere and light characteristics. Proceedings from the 6th Conference on Design and Emotion 2008.
- [46] Brainard GC, Hanifin JP, Greeson JM, Byrne B, Glickman G, Gerner E, Rollag MD. Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. *J Neurosci.* 2001;21:6405–6412.
- [47] CIE 013.3-1995 - Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources
- [48] Teunissen C, van der Heijden FHF, Poort SHM, de Beer E. Characterising user preference for white LED light sources with CIE color rendering index combined with a relative gamut area index. *Lighting Research and Technology* 2017; 49: 461–480.
- [49] Royer, MP, Wilkerson, A, Wei, M, Houser, K, Davis, R. Human perceptions of color rendition vary with average fidelity, average gamut, and gamut shape. *Lighting Research and Technology* 2017; 49: 992–1014.
- [50] Tang, X & Teunissen, Kees. The appreciation of LED-based white light sources by Dutch and Chinese people in three application areas. *Lighting Research & Technology* (2018)
- [51] Energy Star, *Energy Star Program Requirements for Lamps (light bulbs), Eligibility criteria version 1.1.*