

Teknisk rapport EyeComfort1

Nuförtiden är ljuskvalitet en viktig del av all belysning. Generellt avser ljuskvalitet de visuella aspekterna av belysningen och hur den beror på och interagerar med människor och omgivningen. LEDifiering ger oss ändlösa möjligheter att variera rumslig, spektral och temporär ljuskvalitet. Det tvingar oss att utvärdera ljuskvalitet på ett nytt sätt. Signify optimerar ständigt sina produkter genom att samla en djupgående förståelse för användarnas behov, kunskap om belysningsanvändning och vetenskapliga insikter. Signify, en global ledare inom belysningslösningar, saluför sina LED-lampor och LED-armaturer under det välkända varumärket Philips.

Signify har skapat varumärket EyeComfort baserat på följande kriterier: flimmer, stroboskopeffekter, fotobiologisk säkerhet, bländning, ljusreglering, inställningsmöjligheter, färgåtergivning och hörbart ljud.

Vårt sortiment med LED-lampor och LED-armaturer utvärderas baserat på dessa kriterier. Denna tekniska rapport förklarar dessa kriterier och således vikten av att optimera belysningen.

Vetenskaplig bakgrund

Philips LED-belysning EyeComfort från Signify uppfyller förutnämnda kriterier:

1. *Flimmer och stroboskopeffekter*

Flimmer och stroboskopeffekter är temporär ljusartefakter ("TLA"). TLA definieras som en förändrad visuell uppfattning som orsakas av ljusstimulans, luminans eller spektralfördelning, vilket varierar över tid för en mänsklig betraktare i en specifik miljö. Flimmer är uppfattningen av visuell ostadighet som orsakas av ljusstimulans, luminans eller spektralfördelning, vilket varierar över tid för en statisk betraktare i en statisk miljö. Med andra ord är det en störande, snabb förändring av belysningen i rummen.

Stroboskopeffekten skiljer sig från flimmer och definieras som en förändring av rörelseuppfattningen som orsakas av ljusstimulans, luminans eller spektralfördelning, vilket varierar över tid för en statisk betraktare i en icke-statisk miljö. Med andra ord resulterar stroboskopeffekten i onaturliga avbrott i kontinuerliga rörelser.

En av fördelarna med LED-lampor är att de snabbt reagerar på variationer i ingångssignalen. Därför återskapar de på ett naturligt sätt sådana variationer i ljusflödet, vilket potentiellt leder till TLA-artefakter för individer som befinner sig i det upplysta utrymmet. Variationerna kan komma från olika källor, däribland: störningar i nätströmmen, interaktioner med styrsystem (t.ex. dimrar), störningar i ingångssignalen från externa källor (t.ex. en mikrovågsugn) och inbyggda variationer från det elektroniska driftdonet. Det finns metoder för att undvika variationer i LED-lampors ljusflöde och samtidigt minska synligheten för oönskade TLA-artefakter. Dessa metoder påverkar däremot kostnaden

1 EyeComfort white paper may be amended by Signify as (additional) information becomes available to us in various areas, including Product Development, Research, Standards & Regulations.

PHILIPS

och effektiviteten och kräver mer utrymme, samtidigt som de sänker livslängden för LED-produkter oavsett arkitektur.

Fram tills nyligen användes olika mått, t.ex. flimmerindex (FI) och moduleringsdjup, för att mäta synligheten för flimmer och stroboskopeffekten. Inget av dessa mått lämpar sig för att förutse vad människor faktiskt uppfattar eller upplever. Hur väl flimmer och stroboskopeffekter syns påverkas av moduleringsdjup, frekvens, vågform och arbetscykel, och dessa mått tar inte hänsyn till alla dessa parametrar. Därför har vetenskapliga modeller tagits fram baserat på det mänskliga synsystemet, alltså den del av nervsystemet och gör det möjligt för oss att se. Ett mer tillförlitligt TLA-mått för flimmer är P_{st}^{LM} , och för stroboskopeffekten finns SVM [1,2]. Dessa mått rekommenderas av Lighting Europe [3] och NEMA [4] och används vid utvärderingen av Philips LED-belysning EyeComfort från Signify. Fortsatta förbättringar av TLA-mått undersöks i nuläget.

Den vanliga definitionen av den absoluta synlighetströskeln är punkten där betraktaren kan upptäcka det uppfattade 50 % av tiden [2]. Det innebär att personen inte riktigt vet huruvida han/hon ser flimmereffekten eller inte och väljer att svara "Jag ser 50 % av tiden". Det innebär inte att betraktaren är säker på att den ser flimmer 50 % av tiden och är säker på att den inte gör det resterande 50 %. Utan i stället är 50 % nivån där beslutet om huruvida man ser fenomenet eller inte är högst osäkert. Mot bakgrund av informationen ovan definieras kravet för inget synligt flimmer som $P_{st}^{LM} \leq 1,0$, baserat på IEC 61000-4-15 **Error! Reference source not found.** och NEMA 77-2017 **Error! Reference source not found.** Mätning av P_{st}^{LM} sker enligt IEC TR 61547-1, utgåva 2 **Error! Reference source not found.**

Varför ska man bry sig om flimmer och stroboskopeffekten?

Belysningsprodukter som uppvisar flimmer eller stroboskopeffekten uppfattas som belysning av lägre kvalitet [5-14]. TLA-artefakter är inte bara ett irriterande fenomen, utan påverkar även ögats komfort, den allmänna komforten och synen. Mer specifikt kan synliga TLA-artefakter göra det svårare att utföra synuppgifter, orsaka obehag för ögonen (trötta ögon), ge huvudvärk, ansträngda ögon och irritation. Studier visar att synligt flimmer i vissa fall kan utlösa epileptiska anfall [5-14]. Med detta i åtanke har Philips LED-produkter i EyeComfort-serien från Signify utformats för att minimera förekomsten av synligt flimmer och stroboskopeffekten.

2. Fotobiologisk säkerhet

Risken med blått ljus

Blått ljus kan orsaka fotokemisk skada på näthinnan som beror på spektralkompositionen, intensiteten och exponeringstiden för ögat. Internationella elektrotekniska kommissionen (IEC) har tagit fram en standard för att mäta fotobiologisk säkerhet [16]. Källorna klassificeras i fyra riskgrupper (0 = ingen risk, 3 = hög risk).

Riskgrupp 0: Lampan utgör ingen fotobiologisk risk

Riskgrupp 1: Ingen fotobiologisk risk under normala beteendebegränsningar

Riskgrupp 2: Utgör ingen risk på grund av blinkning vid starkt ljus eller termiskt obehag

Riskgrupp 3: Farligt även vid mycket kort exponering

En vanlig missuppfattning i media är att LED-belysning innehåller en större mängd blå våglängder och därför utgör en större risk för skador relaterade till blått ljus. Detta har undersökts och mätts noggrant

PHILIPS

av Global Lighting Association, som har jämfört spektralinnehåll i olika belysningstekniker med förutnämnda standard, tillsammans med bidrag från många olika forskare [15].

De viktigaste vetenskapliga upptäckterna är [15]:

- Med avseende på risken med blått ljus skiljer sig inte LED-lampor från konventionella tekniker såsom glödlampor och lysrörsbelysning. Andelen blått ljus i LED-belysning skiljer sig inte från andelen i andra tekniker med samma färgtemperatur.
- En jämförelse av LED-eftermonteringsprodukter med de konventionella produkter som de är avsedda att ersätta visar att risknivåerna är ungefär samma och ligger väl inom det ofarliga intervallet.
- LED-källor (lampor eller system) och armaturer som hamnar i riskgrupp 0 eller 1 enligt definitionen av IEC kan användas av konsumenter.

Ultraviolett

LED-baserade ljuskällor för konsumenter innehåller ingen energi från UV-delen av spektrumet och är därför inte skadliga för människor med högre känslighet för UV-ljus.

Infraröd

Till skillnad från glödlampor och halogenlampor utstrålar LED-lampor knappt något infrarött ljus (IR) alls. För LED-ljuskällor för konsumenter finns det ingen risk eftersom IR-strålningen inte är tillräckligt stark.

Optisk säkerhet omfattas av internationella standarder och riktlinjer [16,17]. Philips LED-produkter i serien EyeComfort från Signify hamnar alla i riskgrupp 0 eller 1 (RG0/RG1), vilket innebär att användning av dessa LED-produkter inte utgör någon fotobiologisk risk under normala beteendebegränsningar eller att lampan inte utgör någon fotobiologisk risk.

3. Bländning

Bländning är en de faktorer som gör människor mest missnöjda när det gäller behaglig belysning. Bländning kan delas in i funktionsnedsättande bländning och obehagsbländning. Funktionsnedsättande bländning avser försämrad syn som orsakas av en bländningskälla i synfältet. Obehagsbländning definieras som känslan av obehag som orsakas av starka ljuskällor. Känslan av obehag beror på många parametrar, till exempel källans luminans, källans ytstorlek, källans position i synfältet, bakgrundsbelysning, typ av aktivitet och hur länge man exponeras för en stark ljuskälla. I flera år har forskare försökt mäta mängden visuellt obehag. Mätning av bländning för inomhusarbetsplatser (yrkesmässiga miljöer) sker vanligtvis med hjälp av UGR-måttet (Unified Glare Rating). Måttet baseras på genomsnittliga luminansnivåer som beräknas från en intensitetsfördelning för fjärrfält. I LED-belysningslösningar ses ofta icke-enhetliga eller pixlade avslutsfönster med hög luminanskontrast. Studier har visat att pixlade avslutsfönster med samma genomsnittliga luminans som enhetliga avslutsfönster (och därmed samma UGR-värde) medför högre obehagsbländning [19-35]. Det innebär att nuvarande UGR inte alltid lämpar sig för användning med icke-enhetliga avslutafönster.

Undersökning av tillämplighet eller förbättrande av nuvarande UGR och alternativa sätt att förutse obehagsbländning är ett omfattande forskningsområde. När man förbättrar nuvarande UGR försöker man huvudsakligen korrigera positionsindex i UGR-formeln för att ta hänsyn till synvinkeln, korrigera genomsnittlig luminans, korrigera betraktad ljusyta och göra allmänna korrigeringar genom att lägga till

PHILIPS

ytterligare en åtgärd för att uttrycka luminanskontrasten inom bländningskällan [36-44]. Förslag på alternativa metoder att beskriva bländning baseras på att man skapar en modell av näthinnans receptiva fält i det mänskliga synsystemet (HVS) och tillämpar den modellen på luminanskartor över rummet för att åtgärda obehagsbländning [34]. Det senaste tillvägagångssättet är identiskt med TLA-mätningarna som också går ut på att man skapar en modell av det mänskliga synsystemet.

För konsumentlampor finns det i nuläget inget mått för att mäta bländning. Vidare beror uppfattad bländning från en ljuskälla även på tillämpningen. En oskyddad ljuskälla som hänger över bordet nära betraktaren och i ögonhöjd bländar mer än vad samma ljuskälla gör om den sitter i en lampskärm som står i ett hörn av rummet. Generellt orsakas bländning av en kombination av hög luminans, hög kontrast och källans storlek. Åtgärder mot bländning ska minst göra något av följande: minska luminansen, minska kontrasten eller minska källans storlek. I Philips Signify-sortiment med LED-belysning skiljer man på lampor med och utan bländskydd. En lampa med bländskydd innehåller diffusionsmaterial och/eller har en pixlad del längst upp på lampan, vilket gör att den uppfattas som mindre bländande jämfört med lampor utan bländskydd av samma ljusflöde och samma bakgrundsanpassning. Det finns i nuläget inget bra mått på bländning för ljuskällor och detta är något som det kommer att forskas mer på i framtiden.

4. Dimning

LED-produkters ljusregleringsfunktion definieras som möjligheten att ändra ljusstyrkan efter egna önskemål. Med LED-produkters ljusregleringsfunktion kan du skapa perfekt stämningsbelysning eller arbetsbelysning oavsett omgivning. Det kan finnas flera olika anledningar till att man vill reglera artificiell belysning. För det första vill man kunna ändra stämningen i ett rum (mörk och mysig eller ljus och energigivande). För det andra kan ljusregleringsfunktionen ge olika ljusflödesnivåer under dagens lopp, baserat på olika aktiviteter eller beroende på ljuset som kommer utifrån. På kvällen kanske du till exempel vill sänka ljusnivåerna för att minska kontrasten mellan den mörka omgivningen och LED-lampan, för att minska den potentiella bländningen. Slutligen används ljusregleringsfunktionen för att spara energi.

Bristfällig implementering av ljusregleringsfunktionen kan orsaka visst obehag eller oönskade effekter, till exempel synligt flimmar på låga ljusregleringsnivåer, ryckiga övergångar och höga lägsta ljusnivåer. Dessa problem beror på LED-driftdonskretsen, variationer i nätspänningens styrka, nätanslutna belastningar och dimmerinteraktion. Smart elektronikdesign löser problemet med djup ljusreglering som hämmar upprepande och/eller oregelbundna synliga variationer av ljusnivån.

De reglerbara produkterna i Philips EyeComfort-produktsortiment med LED-belysning från Signify möjliggör stegvis ljusregleringar i förinställningar (SceneSwitch) eller kontinuerligt över hela intensitetsintervallet.

5. Inställbar

Inställbar LED-belysning kan definieras i tre olika kategorier:

1. Varm ljusreglering: möjligheten att efterlikna ljuset från glödlampor (t.ex. CCT-droppar på 2 700–2 200 K vid ljusreglering)
2. Inställbart vitt ljus: möjligheten att ändra belysningens vita ton (t.ex. 2 700–6 500 K)

PHILIPS

3. Inställbar färg: möjligheten att ändra belysningens färg (RGB)

Ljusreglering av en glödlampa ger en annan belysningsupplevelse än ljusreglering av vanliga vita LED-lampor. På grund av tekniken som används blir en glödspiral mindre varm under ljusreglering och kommer därför att utstråla ett mer rödaktigt vitt ljus (lägre färgtemperatur). Samtidigt ändras inte LED-chippets färg under ljusreglering. Därför ger glödlampan både varierad intensitet och färgtemperatur, medan LED-lampan endast ger varierad intensitet och färgtemperaturen förblir densamma.

Människor uppskattar den varma inställningen på låga ljusnivåer för att skapa trevliga och mysiga stämningar [45], men detta kan skilja sig från region till region. Vissa av Philips LED-lampor i EyeComfort-serien från Signify har ljusregleringsfunktionen WarmGlow. Genom att kombinera två olika LED-lampor (2 200 K och 2 700 K) kan en glödlampeliknande ljusreglering uppnås. WarmGlow-funktionen finns i två varianter. SceneSwitch med fasta inställningar och jämn WarmGlow med ljusreglering över hela intervallet. (2 700–2 200 K).

Förutom den stämningsfulla effekten har ljusregleringsfunktion kombinerad med ett CCT-byte även fördelar när det gäller människors dygnsrytm. Vår biologiska klocka säger åt oss när vi ska vakna och när vi ska somna. Belysningens intensitet och verkningspektrum är en av parametrarna som styr dessa reaktioner [46]. Högintensiv belysning som innehåller mycket blått ljus får oss att känna oss vakna och på alerten, medan lågintensiv belysning med liten mängd blått ljus gör att kroppen utsöndrar sömnhormonet melatonin, vilket gör oss trötta. Forskning har visat att stark belysning med högt innehåll av blått ljus rekommenderas på morgonen för att göra det lättare att vakna, men ska undvikas på kvällen eftersom den hämmar melatoninproduktionen och gör det svårare att somna. Dimmade och varma CCT-miljöer på kvällen är optimala för en ostörd biologisk rytm [46].

Philips LED-lampor EyeComfort från Signify med ljusregleringsfunktionen WarmGlow ger både en stämningsfulla atmosfär och är bra för människors dygnsrytm.

6. Färgåtergivning

Färgkvalitet har att göra med hur användare vill uppfatta belysning i en viss tillämpning. Färgkvaliteten för vita ljuskällor påverkar utseendet för utrymmen, föremål och människor. Dålig färgkvalitet kan minska korrekt återgivning av upplysta utrymmen, föremål och människor och göra det svårare att skilja på objekt visuellt. Till exempel kan hudtoner, växter och livsmedel framstå som glanslösa och undermåttade under belysning med låg färgåtergivning och/eller låg färgmättnad.

Färgåtergivning för en vit ljuskälla definieras som effekten av en ljuskälla på föremåls färgutseende, genom att medvetet eller undermedvetet jämför deras färgutseende under en referensljuskälla [47]. Allmänna färgåtergivningsindexet (CRI-Ra) används för att mäta och specificera en vit ljuskällas färgåtergivningsförmåga, baserat på en uppsättning av åtta måttligt mättade testfärgprover (TCS) specifika för allmänna färgåtergivningsindex CIE 1974. Ett CRI på 100 innebär att färgåtergivningen under testkällan är likvärdig med färgåtergivningen under referenskällan (då referenskällan är en glödlampa för CCT:er <5 000 K)

Användares preferenser är inte alltid direkt kopplade till CRI-värdet. Det är inte alltid så att man vill ha en högre CRI-källa. Färgmättnad (intensitet), i synnerhet röd mättnad, spelar också en viktig roll när det gäller människor preferenser [48,49,50]. Människor föredrar generellt en viss övermättnad, eftersom

PHILIPS

föremåls färger då blir intensivare. Preferenser när det gäller hudtoners utseende är olika, även mellan kulturer.

Det är viktigt att man hittar rätt balans mellan färgöverensstämmelse (CRI) och färgmättnad för en specifik tillämpning. Philips LED-belysning EyeComfort från Signify är avsedd att förbättra färgdifferentieringen och estetiken genom användning av LED-lampor med bra färgkvalitet.

7. Ljud

LED-lampor kan avge ett hörbart brummande ljud, i synnerhet när de används på låga ljusregleringsnivåer. Den spänning och ström som genereras kan skapa mekanisk resonans i komponenterna. Ljudet kan uppfattas som irriterande och obehagligt. Därför har Energy Star upprättat krav gällande nivåer för hörbart ljud.

Enligt Energy Star-kraven gällande hörbart ljud ska lampor inte avge ljud högre än 24 dBA vid ett avstånd på en meter [51]. Detta tröskelvärde är tillräckligt strikt för lampor i ett helt tyst vardagsrum (ca 20 dBA) eller lampor som befinner sig nära människor (läslampa, sänglampa). Alla Philips LED-produkter i EyeComfort-serien från Signify tar hänsyn till de publicerade bestämmelserna.

Referenser:

- [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.
- [3] 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_aui=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, "Photoc- 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., BUDDEMEIJER-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] Seuntjens, 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 FHFV, 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.
- [52] IEC TR 61547-1:2017, Equipment for general lighting purposes – EMC immunity requirements – Part 1: An objective voltage fluctuation immunity test method, edition 2.
- [53] IEC 61000-4-15, Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-15: Testing and measurement techniques. Flickermeter. Functional and design specifications.
- [54] NEMA 77-2017, Temporal Light Artifacts: Test Methods and Guidance for Acceptance Criteria