

EyeComfort whitepaper¹

Vandaag de dag is lichtkwaliteit een belangrijk element dat het verschil maakt op verlichtingsgebied. In het algemeen duidt lichtkwaliteit op de visuele aspecten van licht, en op zijn invloed op en interactie met mensen en het milieu. Het toenemend gebruik van LED's biedt ons eindeloze mogelijkheden om ons te onderscheiden op het gebied van ruimtelijke, spectrale en tijdelijke lichtkwaliteit. Het dwingt ons tot een herziening van onze traditionele manier om lichtkwaliteit te beoordelen. Signify optimaliseert voortdurend haar producten door een diepgaand begrip van gebruikersbehoeften te combineren met kennis van verlichtingstoepassingen en wetenschappelijke inzichten. Signify, de wereldwijde marktleider in verlichting, brengt haar LED-lampen en LED-armaturen op de markt onder het welbekende Philips-merk.

Signify heeft het handelsmerk EyeComfort geïntroduceerd op basis van de volgende geselecteerde criteria: knipperen, stroboscopische effecten, fotobiologische veiligheid, verblinding, dimmen, instelbaarheid, kleurweergave en hoorbaar geluid.

Ons productenassortiment LED-lampen en LED-armaturen is aan de hand van de criteria beoordeeld. Deze whitepaper geeft een verklaring van deze criteria en vervolgens van het belang van het optimaliseren van verlichting.

Wetenschappelijke achtergrond

De Philips EyeComfort LED's van Signify omvatten de volgende hierboven genoemde criteria:

1. *Knipper- en stroboscoopeffecten*

Knipper- en stroboscoopeffecten zijn tijdelijke lichtverschijnselen (Temporal Light Artifacts – TLA's). TLA's zijn gedefinieerd als een verandering in de visuele perceptie, veroorzaakt door een lichtprikkel, de helderheid of de spectrale verdeling, die gedurende de tijd fluctueren voor een menselijke waarnemer in een gespecificeerde omgeving. Knipperen is de waarneming van een visuele onregelmatigheid, veroorzaakt door een lichtprikkel, de helderheid of de spectrale verdeling, die gedurende de tijd fluctueert voor een statische waarnemer in een statische omgeving. Met andere woorden, het is een storende, snelle fluctuatie van het licht in de kamer.

Het stroboscopische effect verschilt van knipperen en wordt gedefinieerd als een verandering in bewegingswaarneming, veroorzaakt door een lichtprikkel, de helderheid of de spectrale verdeling, die gedurende de tijd fluctueert voor een statische waarnemer in een niet-statische omgeving. Met andere woorden, het stroboscopische effect resulteert in een onnatuurlijke onderbreking van een continue beweging.

Een eigenschap van LED's is de snelle respons op variaties in het ingangssignaal. Daardoor reproduceren ze deze fluctuaties op een betrouwbare manier in de lichtopbrengst, wat TLA's kan veroorzaken voor personen in de verlichte ruimte. De fluctuaties kunnen afkomstig zijn uit diverse bronnen, waaronder:

¹ Deze EyeComfort whitepaper kan door Signify worden aangepast indien (aanvullende) informatie voor ons beschikbaar komt op diverse gebieden, waaronder productontwikkeling, onderzoek, standaards en richtlijnen.

PHILIPS

storingen in de netspanning, interacties met regelaars (bijv. dimmers), storingen op hetingangssignaal door externe bronnen (bijv. magnetronoven), en door het ontwerp veroorzaakte fluctuaties van de elektronische driver. Er zijn methoden bekend om fluctuaties in de lichtopbrengst van LED's te onderdrukken en tegelijk de zichtbaarheid van ongewenste TLA's te verminderen. Deze methoden vereisen echter compromissen aan kosten en rendement en vragen bovendien om meer fysieke ruimte, terwijl ze ook nog eens de levensduur verkorten van LED-producten met welke architectuur dan ook.

Tot voor kort werden diverse maatstaven, zoals Flicker Index (FI) en Modulatiediepte, gebruikt om de zichtbaarheid van knipper- en stroboscoopeffecten vast te stellen. Geen van deze maatstaven is geschikt om te voorspellen wat mensen werkelijk waarnemen of ervaren. De zichtbaarheid van knipper- en stroboscoopeffecten wordt beïnvloed door modulatie diepte, frequentie, golfvorm en arbeidscyclus, en deze maatstaven houden geen rekening met al deze parameters. Daarom zijn er wetenschappelijke modellen ontwikkeld op basis van het Human Visual System, duidend op de visuele waarneming van mensen, het deel van het zenuwstelsel dat ons in staat stelt te zien. Een beter betrouwbare TLA-maatstaf voor knippen is P_{st}^{LM} , en voor stroboscoopeffecten SVM [1,2]. Deze maatstaven worden ondersteund door Lighting Europe [3] en NEMA [4] en worden gebruikt bij het beoordelen van Philips EyeComfort LED-verlichting van Signify. Voortdurende verbeteringen aan TLA -maatstaven zijn op dit moment in onderzoek.

De gebruikelijke definitie voor de drempel van absolute zichtbaarheid is het punt waar de waarnemer het beeld 50% van de tijd kan detecteren [2]. Dit betekent dat een persoon er niet zeker van is of hij het knippereffect wel of niet ziet en ervoor kiest te reageren met "Ik zie het 50% van de tijd". Het is niet zo dat de waarnemer duidelijk de indruk heeft dat hij het knippen 50% van de tijd wel ziet en een duidelijke indruk dat hij het de andere 50% niet ziet. Eerder is het zo dat 50% het niveau is waarop de beslissing over wel of niet zien op toeval berust.

Gezien het voorgaande is de eis voor geen zichtbaar knippereffect gedefinieerd als $P_{st}^{LM} \leq 1,0$ en gebaseerd op IEC 61000-4-15 [53] en NEMA 77-2017[54]. De meting van P_{st}^{LM} wordt verricht in overeenstemming met IEC TR 61547-1, uitgave 2 [52].

Waarom moeten we ons bekommeren om knipper- en stroboscoopeffecten?

Verlichtingsproducten die een knipper- en stroboscoopeffect vertonen, worden beschouwd als verlichting van mindere kwaliteit [5-14]. TLA's zijn niet alleen hinderlijk voor mensen maar hebben ook invloed op het oogcomfort, het algehele comfort en visuele prestaties. Meer in het bijzonder kunnen zichtbare TLA's afbreuk doen aan de prestaties bij visuele taken, ongemak voor de ogen veroorzaken (vermoeide ogen), het optreden van hoofdpijn en overbelasting van de ogen versterken, en hinder veroorzaken. Onderzoeken tonen aan dat zichtbare knippereffecten in bepaalde gevallen kunnen leiden tot epileptische aanvallen [5-14]. Met dit in gedachten zijn de Philips EyeComfort LED-producten van Signify ontworpen om zichtbare knipper- en stroboscoopeffecten te minimaliseren.

2. Fotobiologische veiligheid

Blauwlichtgevaar

Het blauwlichtgevaar is een fotochemische beschadiging van de retina en is afhankelijk van de spectrale samenstelling, intensiteit en blootstellingstijd van het oog. De International Electrotechnical Commission

PHILIPS

(IEC) heeft een standaard ontwikkeld voor het beoordelen van fotobiologische veiligheid [16]. De bronnen zijn onderverdeeld in 4 risicogroepen (0 = geen risico, 3 = hoog risico).

Risicogroep 0: De lamp vormt geen fotobiologisch gevaar

Risicogroep 1: Geen fotobiologisch gevaar onder normale gedragsbeperkingen

Risicogroep 2: Vormt geen gevaar dankzij een afkerige respons op helder licht of thermisch ongemak

Risicogroep 3: Gevaarlijk, zelfs bij kortstondige blootstelling

Een wijdverbreid misverstand in de media is het idee dat LED-verlichting hogere aandelen blauwe golflengten bevat en daardoor eerder het blauwlichtgevaar zal veroorzaken. Dit is grondig onderzocht en gemeten door de Global Lighting Association, waarbij de spectrale inhoud van verschillende verlichtingstechnologieën en de hierboven genoemde standaard werden vergeleken, samen met de input van een groot aantal wetenschappers [15].

De belangrijkste wetenschappelijke bevindingen zijn [15]:

- Met betrekking tot het blauwlichtgevaar verschillen LED-lampen niet van conventionele technologieën zoals gloeilampen en fluorescentielampen. Het aandeel blauw in LED-verlichting is niet anders dan dat in andere technologieën bij dezelfde kleurtemperatuur.
- Een vergelijking van LED retrofitproducten met de conventionele producten die zij beoogd zijn te vervangen, toont aan dat de risiconiveaus ongeveer gelijk zijn en ruim binnen het risicoloze bereik vallen.
- LED-lichtbronnen (lampen of systemen) en -armaturen die in Risicogroep 0 of 1 vallen zoals gedefinieerd door IEC kunnen gebruikt worden door consumenten.

Ultraviolet

Op LED gebaseerde lichtbronnen voor gebruik door consumenten bevatten geen enkele energie in het UV-deel van het spectrum en zijn daarom niet schadelijk voor mensen met een hogere gevoeligheid voor UV-licht.

Infrarood

In tegenstelling tot gloeilampen en halogeenlampen stralen LED's nauwelijks enig infrarood (IR) uit. LED-lichtbronnen voor consumenten vormen geen risico, want de IR-straling is niet krachtig genoeg.

Optische veiligheid wordt is onderworpen aan internationale standaards en richtlijnen [16,17]. Philips EyeComfort LED-producten van Signify zijn alle geclassificeerd in Risicogroep 0 of 1 (RG0 / RG1). Dit betekent dat het gebruik van deze LED-producten geen fotobiologisch gevaar oplevert onder normale gedragsbeperkingen, ofwel dat de lamp geen fotobiologisch gevaar vormt.

3. Verblinding

Verblinding is een van de belangrijkste oorzaken van ontevredenheid met betrekking tot comfortabele verlichting. Verblinding kan worden onderverdeeld in belemmerende verblinding en onprettige verblinding. Belemmerende verblinding heeft betrekking op vermindering van visuele prestaties die wordt veroorzaakt door een lichtbron in het gezichtsveld. Onprettige verblinding wordt gedefinieerd als een gevoel van ongemak dat wordt veroorzaakt door heldere lichtbronnen. Het gevoel van ongemak hangt af van diverse parameters zoals de helderheid van de lichtbron, de ruimte waarin de lichtbron zich

PHILIPS

bevindt, de positie van de lichtbron in het gezichtsveld, de omstandigheden van de achtergrondverlichting, het type activiteit en de blootstellingsduur aan een heldere lichtbron. Jarenlang hebben onderzoekers geprobeerd de mate van visueel ongemak te kwantificeren. De beoordeling van verblinding voor werkplekken binnenshuis (professionele omgeving) wordt gewoonlijk uitgevoerd met de UGR-meting (Unified Glare Rating). Deze meting is gebaseerd op gemiddelde helderheidsniveaus die worden berekend uit een brede intensiteitsverdeling. In LED-verlichtingsoplossingen komen vaak niet-gelijkmatige of korrelige uittredevensters voor met grote helderheidscontrasten. Onderzoeken hebben aangetoond dat korrelige uittredevensters met dezelfde gemiddelde helderheid als gelijkmatige uittredevensters (en dus met dezelfde UGR-waarde) resulteren in een hogere mate van onprettige verblinding [19-35]. Dit betekent dat de huidige UGR niet altijd geschikt is voor gebruik met niet-gelijkmatige uittredevensters.

Onderzoeken van de toepasbaarheid of verbetering van de huidige UGR en zoeken naar alternatieve manieren om onprettige verblinding te voorspellen, is een belangrijk onderwerp voor wetenschappelijk onderzoek. Verbeteringen aan de huidige UGR zijn voornamelijk gericht op het corrigeren van de positie-index in de UGR-formule ten einde rekening te houden met de afhankelijkheid van de zichthoek, corrigeren van de gemiddelde helderheid, een correctie van het waargenomen verlichte oppervlak, en een algemene correctie door het toevoegen van een extra mogelijkheid om het helderheidscontrast binnen de verblindingsbron te compenseren [36-44]. Suggesties voor alternatieve methoden om verblinding te beschrijven, zijn gebaseerd op het modelleren van de receptievelden van de retina in het Human Visual System (HVS) en het toepassen van dit model op helderheidsplattegronden van de kamer om onprettige verblinding te kunnen beoordelen [34]. Deze laatste benadering is gelijk aan de TLA-metingen die ook zijn gebaseerd op modellering van het menselijke zichtsysteem.

Voor consumentenlampen is op dit moment geen verblindingsmeting beschikbaar voor het kwantificeren van verblinding. Bovendien hangt de waargenomen verblinding door een lamp ook af van de toepassing. Een blote lamp boven de tafel dicht bij de waarnemer en op ooghoogte zal meer verblindend zijn dan dezelfde lamp onder een lampenkap in de hoek van de kamer. In het algemeen wordt verblinding veroorzaakt door een combinatie van hoge helderheid, hoog contrast en afmetingen van de lichtbron. Anti-verblindingsmaatregelen dienen ten minste één van deze oorzaken aan te pakken: verlagen van de helderheid, verminderen van het contrast of reduceren van het formaat van de lichtbron. In het Philips LED-verlichtingsassortiment van Signify wordt onderscheid gemaakt tussen lampen met en zonder verblindingsregeling. Een lamp met verblindingsregeling bevat diffusermaterialen en/of een korrelige laag op de bovenkant van de lamp en wordt minder verblindend waargenomen in vergelijking met lampen zonder verblindingsregeling bij dezelfde lichtstroom en dezelfde aanpassing aan de achtergrond. Een goede maatstaf voor verblinding door lampen is op dit moment niet beschikbaar en is onderwerp van toekomstig onderzoek.

4. Dimmen

De dimfunctie van LED-producten is gedefinieerd als de mogelijkheid om de intensiteit van het licht te veranderen in overeenstemming met uw eigen voorkeur. De dimfunctie van LED-producten stelt u in staat in elke omgeving de perfecte sfeer of taakverlichting te creëren. Mensen willen kunstlicht om verschillende redenen dimmen. Ten eerste willen ze de mogelijkheid hebben om de ambiance van de omgeving te veranderen (gedimd en gezellig, helder en opwekkend). Ten tweede kan de dimfunctie

PHILIPS

gedurende de dag een lichtstroom met verschillende niveaus leveren, gebaseerd op verschillende activiteiten of afhankelijk van de lichtniveaus buiten. 's Avonds zou u de lichtniveaus bijvoorbeeld willen verlagen om het contrast te verminderen tussen de donkere omgeving en het LED licht, ten einde mogelijke verblinding te beperken. Ten slotte wordt de dimfunctie gebruikt voor energiebesparing.

Een slechte toepassing van de dimfunctie kan leiden tot ongemak of ongewenste effecten zoals zichtbaar knippen bij diep dimmen, ongelijkmatige overgangen en hoge minimale lichtniveaus. Deze problemen zijn afkomstig van het LED-drivercircuit, variaties in de amplitude van de netspanning, belastingen die op de netspanning zijn aangesloten en interactie van dimmers. Een slim ontwerp van de elektronica lost het probleem van diep dimmen op door herhalende en/of onregelmatige zichtbare variaties in het lichtniveau te onderdrukken.

De dimbare producten in het Philips EyeComfort LED-assortiment van Signify bieden stapsgewijs dimmen met vooraf ingestelde waarden (SceneSwitch) of traploos dimmen over het hele intensiteitsbereik.

5. Instelbaar

Instelbare LED-verlichting kan worden onderverdeeld in drie categorieën:

1. Warm dimmen: de mogelijkheid het gedrag van gloeilampen na te bootsen (bijv. de CCT daalt van 2700 K naar 2200 K tijdens dimmen)
2. Instelbaar wit: de mogelijkheid om de witte tint van het licht te veranderen (bijv. tussen 2700 K en 6500 K)
3. Instelbare kleur: de mogelijkheid om de kleur van de verlichting te veranderen (RGB)

Dimmen van een gloeilamp geeft een andere lichtbeleving dan het dimmen van normale witte LED-lampen. Door de toegepaste technologie wordt de spiraal van een gloeilamp minder heet tijdens dimmen en daardoor straalt hij meer roodachtig licht uit (lagere kleurtemperatuur). De kleur van een LED-module verandert daarentegen niet tijdens dimmen. Een gloeilamp geeft u dus een variatie van zowel intensiteit als kleurtemperatuur, terwijl een LED alleen een intensiteitsvariatie biedt waarbij de kleurtemperatuur gelijk blijft.

Mensen waarderen de warme instelling bij lage lichtniveau voor het creëren van een leuke en gezellige sfeer [45], maar dit kan per regio verschillen. Sommige Philips EyeComfort LED's van Signify bieden de WarmGlow dimfunctie. Door het combineren van twee verschillende LED's (2200 K en 2700 K) kan het dimgedrag van een gloeilamp nagebootst worden. De WarmGlow-functie is verkrijgbaar in twee variaties. SceneSwitch met vaste instellingen en soepel WarmGlow dimmen over het hele bereik. (2700 K tot 2200 K).

Naast het sfeereffect heeft een dimfunctie gecombineerd met een CCT-verandering ook voordelen voor het circadiaanse ritme van mensen. Onze biologische klok zegt ons wanneer we in slaap moeten vallen en wakker worden. De intensiteit en het actieve spectrum van licht vormen een van de parameters die deze respons regelen [46]. Licht met hoge intensiteit dat veel blauw bevat, zorgt ervoor dat we ons wakker en alert voelen, terwijl licht met lage intensiteit en weinig blauw de aanmaak van het slaaphormoon melatonine activeert, wat ons slaperig maakt. Onderzoek heeft aangetoond dat heldere verlichting met een sterke blauwe component wordt geadviseerd in de ochtend om het wakker worden

PHILIPS

te ondersteunen. 's Avonds moet het echter vermeden worden, want het onderdrukt de melatonineproductie en maakt het moeilijker in slaap te vallen. Gedimde omgevingen met een warme CCT zijn 's avonds ideaal voor een ongestoord biologische ritme [46].

De Philips EyeComfort LED's met WarmGlow dimfunctie van Signify ondersteunen zowel de sfeerfunctie als het circadiaanse ritme van mensen.

6. Kleurweergave

Kleurkwaliteit heeft betrekking op de voorkeuren en waardering voor de wijze waarop verlichting door gebruikers wordt waargenomen in een gegeven toepassing. De kleurkwaliteit van witte lichtbronnen beïnvloedt hoe ruimten, voorwerpen en mensen eruitzien. Een slechte kleurkwaliteit kan het visuele onderscheid en een nauwkeurige weergave van verlichte ruimten, voorwerpen en mensen verminderen. Zo kunnen menselijke huidtinten, planten en voedingsmiddelen er dof en onverzadigd uitzien onder verlichting met een lage kleurweergave en/of een lage kleurverzadiging.

De kleurweergave van een witte lichtbron is gedefinieerd als het effect van een lichtbron op de kleurimpressie van voorwerpen, door bewuste of onbewuste vergelijking van hun kleurimpressie onder een referentielichtbron [47]. De algemene kleurweergave-index (CRI-Ra) wordt gebruikt voor het meten en specificeren van de mogelijkheden van een witte lichtbron om kleur weer te geven, gebaseerd op een set van acht door CIE 1974 gespecificeerde kleurmonsters met gemiddelde verzadiging. Een CRI van 100 betekent dat de weergave van kleuren onder de testlichtbron gelijk is in vergelijking met de weergave van kleuren onder de referentielichtbron (waarbij de referentie een gloeilamp is voor CCT's <5000 K)

De voorkeur van gebruikers is echter niet altijd rechtsreeks gekoppeld aan de CRI-waarde. Een bron met hogere CRI wordt niet altijd hoger gewaardeerd. Kleurverzadiging (levendigheid), en met name rode verzadiging, speelt ook een belangrijke rol bij de voorkeur [48,49,50]. Enige mate van oververzadiging wordt in het algemeen door mensen gewaardeerd, doordat voorwerpen er dan kleurrijker uitzien. De voorkeur voor de weergave van huidtinten is verschillend, ook tussen verschillende culturen.

Het is belangrijk voor een specifieke toepassing de juiste balans te vinden tussen kleurbetrouwbaarheid (CRI) en kleurverzadiging. De Philips EyeComfort LED's van Signify zijn erop gericht het kleurenonderscheid te verbeteren en de esthetica te versterken door LED's te gebruiken met goede eigenschappen ten aanzien van kleurkwaliteit.

7. Geluid

LED's kunnen een hoorbaar geluid veroorzaken, vooral als ze worden gebruikt op diepe dimniveaus. De spanningen en stroomsterkten die geproduceerd worden, kunnen leiden tot mechanische resonanties in de componenten. De geluid kan als zeer storend en hinderlijk worden ervaren. Daarom heeft Energy Star eisen aan hoorbare geluidsniveaus geïntroduceerd.

Volgens de eisen van Energy Star aan hoorbaar geluid mogen lampen geen geluid produceren van meer dan 24 dBA op 1 meter afstand [51]. Deze drempel is niet streng genoeg voor lampen in een volledig stille woonkamer (ongeveer 20 dBA) of lampen die zich dicht bij mensen bevinden (leeslamp, bedlamp). Alle Philips EyeComfort LED-producten van Signify houden rekening met de gepubliceerde richtlijnen.

Referenties:

- [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_au_=i5VMrMH4n4J8p7jb
- [5] WILKINS, A., VEITCH, J., LEHMAN, B. 2010. LED Lighting Flicker and Potential Health Concerns: IEEE Standard PAR1789 Update. Tijdens het 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., 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.

PHILIPS

- [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 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.
- [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