

Op prestatie van gebruikers

Invloed van daglicht in de gebouwde omgeving

Werknemers, studenten en leerlingen besteden een aanzienlijk deel van hun tijd in gebouwen, waar de fysieke en fysieke omstandigheden van invloed zijn op hun welzijn, hun werkprestaties of leerresultaten en indirect op de prestaties van het bedrijf of de onderwijsinstelling. Significante correlaties tussen prestaties en diverse binnenmilieu-aspecten zoals temperatuur, luchtkwaliteit, akoestiek en verlichting zijn al gedemonstreerd. Blootstelling aan licht op de juiste tijd en plaats is een effectief instrument voor het verbeteren van prestaties, concentratie en tevredenheid van leerlingen, studenten en medewerkers. De hoeveelheid en kwaliteit van het licht waaraan men wordt blootgesteld speelt een belangrijke rol. Door deze te optimaliseren op een visueel comfortabele wijze zal de alertheid en de cognitieve prestaties in leer- en werkomgeving verbeteren.

M.B.C. (Myriam) Aries, M.P.J. (Mariëlle) Aarts, A.L.P (Alexander) Rosemann; Building Lighting group, Technische Universiteit Eindhoven, Nederland

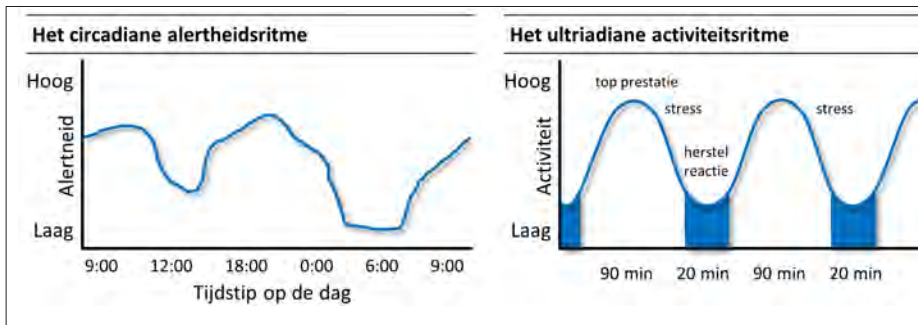
Onderzoek heeft significante correlaties laten zien tussen cognitieve prestatie en diverse binnenmilieu-aspecten zoals temperatuur, luchtkwaliteit, akoestiek en verlichting. Een aanzienlijk deel van de tijd waarin werknemers, scholieren en studenten moeten presteren, bevinden ze zich in gebouwen. De omstandigheden in die gebouwen zijn van invloed op hun welzijn, hun werkprestaties of leerresultaten en indirect op de prestaties van het bedrijf of onderwijsinstelling. Blootstelling aan licht op de juiste tijd en plaats is een effectief instrument voor het verbeteren van (cognitieve) prestaties, concentratie, en tevredenheid van leerlingen, studenten en medewerkers. Goede en comfortabele verlichting op de taak en in de omgeving is essentieel voor optimale pres-

taties, gezondheid en welzijn; in het bijzonder met het oog op een steeds ouder wordende werkpopulatie (Bommel et al., 2002; Aarts et al., 2015).

Het leveren van een optimale prestaties in een werk- of leeromgeving wordt vaak aangeduid als 'productiviteit'. Een algemene definitie van productiviteit is een 'gemiddelde maat voor de efficiëntie van de productie'. Voor een leeromgeving kan de efficiëntie van de productie worden gemeten aan de hand van prestaties van leerlingen na een testmoment, aangegeven door middel van een cijfer. Een verhoging van het cijfer kan een toename van de productie aangeven. De hoeveelheid geproduceerde rapporten kan een indicatie voor de productiviteit in de werkomgeving zijn,

maar aangezien het salaris van de werknemer het totale budget van het arbeidsproces domineert, wordt productie-efficiëntie vaker uitgedrukt in geld.

Hoe kan blootstelling aan (dag)licht bijdragen aan het verhogen van de productie-efficiëntie van mensen? Licht is van essentieel belang voor zowel het zien als voor de gezondheid. Als er licht op het menselijk oog valt, worden signalen naar de hersenen gestuurd die zorgen dat beelden worden gevormd: de beeldende of visuele fotoreceptie. Niet-beeldende fotoreceptie regelt de invloed van licht op het circadiane ritme en stimuleert daarnaast delen van de hersenen die rechtstreeks van invloed zijn op aspecten zoals cognitieve functies of operationele capaciteit.



-Figuur 1- Voorbeelden van ritmiek voor alertheid en activiteit bij mensen

Als mensen licht op hun oog krijgen, wordt dit via twee verschillende wegen door de hersenen verwerkt. Drie soorten fotoreceptorcellen in het menselijk oog – staafjes, kegels en lichtgevoelige ganglioncellen (intrinsically photosensitive retinal ganglion cell (ipRGCs)) – sturen de lichtprikkels rechtstreeks naar de Laterale Geniculate Nucleus (LGN). De LGN combineert de signalen ontvangen van het linker- en rechteroog. Het activeert het zien en de visuele waarneming, waardoor ervaring van en interactie met de omringende visuele omgeving ontstaat. Daarnaast sturen de lichtgevoelige ganglioncellen, in samenspel met de kegeltjes, signalen naar de Supra-Chiasmatische Nucleus (SCN), die verantwoordelijk is voor de menselijke chronobiologie en het reguleren van ultradiane (<24), circadiane (~ 24) en infradiane (> 24 uur) ritmes. Figuur 1 laat twee voorbeelden van ritmiek bij mensen zien: een circadiaan ritme gerelateerd aan de menselijke alertheid en een ultradiane ritme gerelateerd aan menselijke activiteit.

Veel studies zijn gewijd aan de invloed van daglicht op prestaties, welzijn en gezondheid van mensen, met name in de kantooromgeving. Uit de study van bijvoorbeeld Figueiro et al. (2002) bleek dat werknemers in raamloze kantoren statistisch significant meer tijd besteden aan het praten met anderen, en minder tijd werken aan hun computer vergeleken met werknemers in kantoren met ramen. Uit een groot veldonderzoek in tien Nederlandse kantoren bleek dat uitzicht, beoordeeld als aantrekkelijk, gunstig is voor gebouwgebruikers doordat het fysiek en psychisch discomfort vermindert (Aries et al., 2010). De resultaten lieten eveneens zien dat een verminderd discomfort op het werk de kwaliteit van de slaap verbetert, wat aangeeft dat fysieke omstandigheden op het werk ook het leven thuis kunnen beïnvloeden. Studies van Cheung et al. (2013) en Boubekri et al. (2014) laten een sterke relatie zien tussen de blootstelling aan daglicht op het werk en de door kantoormedewerkers (zelfgerapporteerde) slaapkwaliteit, activiteit en algehele kwaliteit van het leven. In vergelijking met werknemers in kantoren zonder ramen,

ontvingen diegenen met ramen een 173 procent hogere lichtblootstelling tijdens de werkuren. In een ziekenhuisomgeving onderzochten Zadeh et al. (2014) de fysiologische en psychologische effecten van ramen en daglicht op verpleegkundigen. Zij vonden een statistisch significante verlaging van de gemiddelde bloeddruk en aan slaperigheid- en stemminggerelateerd gedrag bij meer ramen en daglicht. Echter, een verlaging van hartfrequentie en slaperigheid zelf was niet significant.

De gunstige invloed van daglicht is niet geheel verwonderlijk aangezien de mens onder invloed van daglicht en de licht-donker cyclus is geëvolueerd. Twee studies hebben geëxperimenteerd met mensen die tijdelijk leefden onder volledig natuurlijk daglicht, zonder enige invloed van kunstlicht. Piosczyk et al., (2014) bestudeerde het slaappgedrag van vijf volwassenen gedurende 2,5 maand. De resultaten lieten zien dat deelnemers een gemiddelde fase-verschuiving van -2 uur bij het in slaap vallen en bij het wakker worden van ongeveer een -0,5 uur hadden, wat leidde tot een verlenging van de geschatte slaaptijd met 1,5 uur. De resultaten zijn een aanvulling op een eerder uitgevoerde studie door Wright et al. (2013) waarin het circadiane ritme is gemeten van acht volwassenen voor én na twee weken kunstlichtloos kamperen in de Rocky Mountains (USA). De deelnemers lieten ook een gemiddelde faseverschuiving in het endogene melatonineritme zien van ongeveer twee uur. Hun slaapduur veranderde echter niet. Hoewel de experimenten werden uitgevoerd met een klein aantal volwassenen zijn het de eerste studies die laten zien dat slaapperelateerde en circadiane patronen, en misschien zelfs slaapkwaliteit, beïnvloed worden als gevolg van daglichtblootstelling (Sharkey en Van Reen, 2014). Licht, maar ook duisternis, is vereist om een stabiel circadiaan ritme te behouden, mede om herstelprocessen tijdens slaap mogelijk te maken (Veitch, 2004).

■ DAGLICHT ONDERSTEUNEND GEBOUWONTWERP

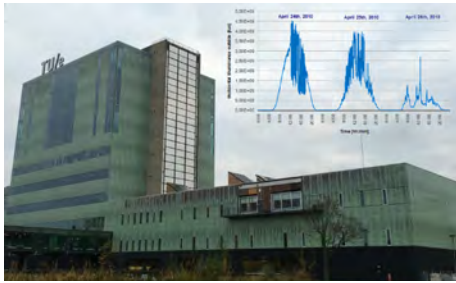
Daglicht heeft een aantal unieke eigenschap-

pen. Daglicht is in staat hoge tot zeer hoge lichtniveaus (uitgedrukt in verlichtingssterkte) te realiseren, biedt een uitstekende kleurweergave en een uitzicht van een daglichtopening in een gebouw biedt de gebruiker meestal informatie over de tijd van de dag en het weer. Ondanks deze positieve eigenschappen daalt de behoefte aan daglicht flink wanneer de lichtbron thermisch of visueel discomfort veroorzaakt. Tevens wordt uitschakelen van de kunstverlichting in het geval van voldoende daglicht niet waargenomen. Deze twee waarnemingen hebben geleid tot de suggestie dat de kwaliteit van het daglicht over het algemeen niet superieur is, maar de eigenschappen van kunstverlichting beperkt zijn (Boyce, 2014).

Het grootste verschil tussen het daglicht en de momenteel beschikbare kunstlichtsystemen is dat het daglicht variatie en stimulatie biedt als gevolg van de dynamiek in hoeveelheid, lichtrichting, en spectrale samenstelling, variërend in tijd van milliseconden tot maanden. Zoals eerder gezegd, de mens is geëvolueerd onder invloed van natuurlijke dag-, maand- en jaarritmen en heeft een verscheidenheid aan fysiologische responsen ontwikkeld als reactie op verschillende eigenschappen van daglicht (Aries et al., 2015). Daglicht was de belangrijkste lichtbron totdat kunstlicht betrouwbaar en betaalbaar werd. Sinds de introductie van elektrisch licht brengt een groot deel van de bevolking het grootste deel van de tijd binnenshuis door. De verstedelijking van huidige maatschappij zorgt ervoor dat mensen in de westerse wereld 80-90% van hun tijd binnen besteden en daardoor een sterk verminderde blootstelling aan daglicht hebben. Gebouwen verschillen sterk van natuurlijke milieus omdat in gebouwen mensen worden omringd door muren, vloeren en plafonds. De daglichtopening is de enige toegang tot de natuurlijke lichtbron en dit maakt het erg belangrijk om te overwegen hoe het licht de kamer binnenkomt en hoe de kwaliteit van het invallende licht is.

■ DYNAMISCH DAGLICHT

Aan de hand van continue daglichtmetingen, uitgevoerd binnen de Building Lighting groep aan de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e), wordt steeds meer inzicht verkregen in de dynamiek van natuurlijk licht. Data omtrent het gedrag van daglicht in ruimtes worden verzameld in testruimten in het Building Physics en Services (BPS) laboratorium (figuur 2, zie volgende pagina). Gegevens over het daglicht buiten komen van een meetstation met o.a. verlichtingssterktesensoren en fotospectrometers op het dak van het laboratoriumgebouw. Experimenten zijn met name gericht op onderzoek naar de daglichtdynamiek in 1)

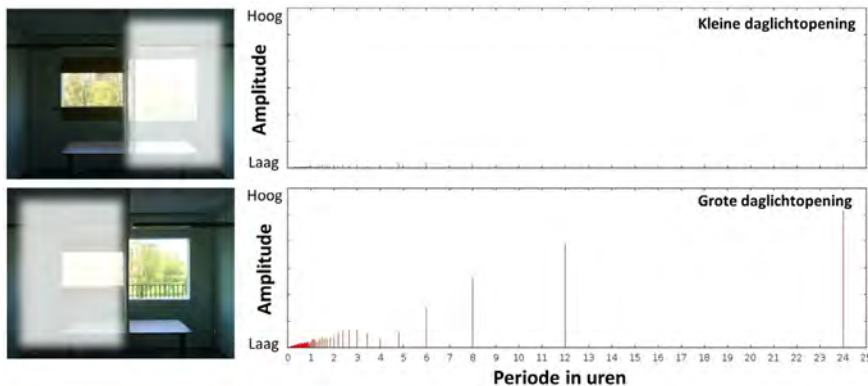


-Figuur 2- Testgevel van het TU/e-BPS laboratorium in de laagbouw van het Vertigo gebouw met in de inzet een voorbeeld van de verscheidenheid in lichthoeveelheid (horizontale verlichtingssterkte) door daglicht voor drie opeenvolgende dagen

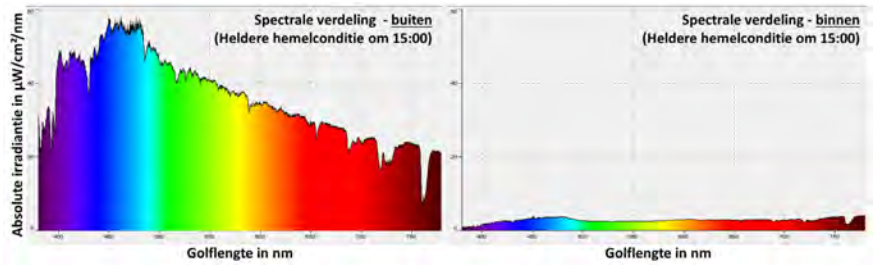
hoeveelheid, 2) spectrale samenstelling en 3) lichtrichting.

DAGLICHTHOEVEELHEID

Daglicht is in staat om hoge tot zeer hoge lichtniveaus te bereiken, variërend van een verlichtingssterkte van ongeveer 5.000 lx horizontaal op een bewolkte winterdag tot 120.000 lx op een zonnige zomerdag. Deze hoeveelheden zijn zeker niet statisch, maar variëren continu. Het menselijk oog kan zich aanpassen aan zeer hoge en zeer lage lichtniveaus door middel van de verschillen in gevoeligheid van de staafjes, de kegels en de lichtgevoelige ganglioncellen. De twee systemen in de menselijke hersenen vragen een verschillende lichtinput vragen. Het niet-beelende systeem vereist meer licht dan het beeldvormend (visuele) systeem en ook de invloed van timing, spectrale samenstelling en blootstellingsgeschiedenis is anders. Er zijn verschillende manieren om schommelingen of frequenties in een tijdreeks van daglichtdata te bestuderen. Veranderingen in verlichtingssterkten zijn geanalyseerd door gebruik te maken van Fast Fourier Transformation (FFT) (Aries en Zonneveldt, 2011). Om de verschillende frequenties van daglicht dat een ruimte binnenkomt te



-Figuur 3- Fourier analyse uitgevoerd op verlichtingssterkte data (gemiddelde over 13 dagen, binnen) voor een kleine en grote daglichtopening



-Figuur 4- Daglichtspectrum buiten (links) en binnen (rechts) voor een ruimte bij een heldere hemel conditie in de middag (15:00 uur)

kwantificeren en kwalificeren, zijn metingen uitgevoerd in een ruimte met een west oriëntatie. Deze gevel is uitgerust met twee daglichtopeningen van 1.20 * 1.20 m², voorzien van dubbele beglazing (HR++- kwaliteit). De grootte van de linker daglichtopening is hierbij verminderd met 45%. Gedurende twee weken zijn gegevens verzameld waarna een FFT werd uitgevoerd op deze gegevens. Figuur 3 laat het amplitudepatroon zien voor twee verschillende daglichtopeningconfiguraties (klein en groot) voor data verzameld over een periode van 13 dagen. De amplitudes in een kamer met een kleine daglichtopening zijn vele malen lager en zelfs nauwelijks detecteerbaar in vergelijking met een kamer met een grote opening. Absolute variaties in lichthoeveelheid in een ruimte in vergelijking met buiten worden meestal verminderd met één of twee ordegrottes (Aries en Rosemann, 2015).

SPECTRALE SAMENSTELLING

De staafjes, kegels en lichtgevoelige ganglioncellen hebben een verschillende spectrale gevoeligheid, variërend in piekgolflengte van 420 nm tot 580 nm. Alle golflengten in het bereik van ongeveer 380 nm tot 780 nm zijn aanwezig in daglicht en is derhalve afgestemd op de totale spectrale ooggevoeligheid. Echter, wanneer mensen tijd doorbrengen in een werk- of leeromgeving, zal niet alleen de hoeveelheid licht verminderen, maar ook de kwaliteit van het licht worden beïnvloed. In een veldstudie is de spectrale verdeling van

het daglicht zowel binnen als buiten bepaald met behulp van van een 1:10 schaalmodel. Drie verschillende hemelcondities (heldere hemel, bewolkte hemel, en semi-bewolkte hemel) zijn op verschillende tijden (9:00, 11:00, 13:00, 15:00 en 17:00) gemeten. Waarden voor vier piekgolflengten vertegenwoordigden de 'circadiane' ($\lambda = 480$ nm), scotopische ($\lambda = 507$ nm), mesopische ($\lambda = 528$ nm) en fotopische ($\lambda = 555$ nm) spectrale ooggevoeligheden (Rea et al., 2010). en zijn gebruikt om de spectrale samenstelling buiten en binnen met elkaar te vergelijken. De resultaten lieten zien dat, op bijvoorbeeld een heldere dag in de namiddag, de gemeten spectrale energieverdeling (in $\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$) voor de fotopische representatie binnen gereduceerd was tot ongeveer 35% van het buitenniveau. Voor de 'circadiane' representatie was de reductie van 17%, zie figuur 4.

RICHTING VAN LICHTINVAL

De locatie van de staafjes en kegeltjes in het menselijk netvlies zijn vrijwel cirkelsymmetrisch verdeeld. De kegeltjesdichtheid piekt in de fovea, terwijl de staafjes daar in principe afwezig zijn en juist rond de fovea liggen. Uit onderzoek, uitgevoerd op de retina van een rat en een makaak-aapje, als representatie van zoogdieren, bleek dat de lichtgevoelige ganglioncellen voornamelijk in het bovenste deel van het netvlies liggen en schaars zijn in de fovea (Dacey et al, 2005; Galindo-Romero et al., 2013). Studies met mensen, die het effect van blootstelling aan licht van verschillende gebieden van het netvlies en het effect op melatonine onderdrukking hebben onderzocht, laten dit beeld minder duidelijk zien (bijvoorbeeld Glickman et al, 2003; Rüger et al, 2005).

In een werk- of leeromgeving zijn vaak vele mensen in een ruimte bij elkaar. Discomfort van één enkele persoon kan de licht blootstelling voor alle aanwezigen bepalen. Het kan het (hoge) lichtniveau en de voorkeursrichting van het licht nodig voor het stimuleren van de niet-beeldvormende lichtgevoelige cellen vaak zelfs drastisch beperken. Om het daglicht te kwantificeren en kwalificeren dat beschikbaar is vanuit verschillende delen van het gezichtsveld zijn laboratoriumexperimenten

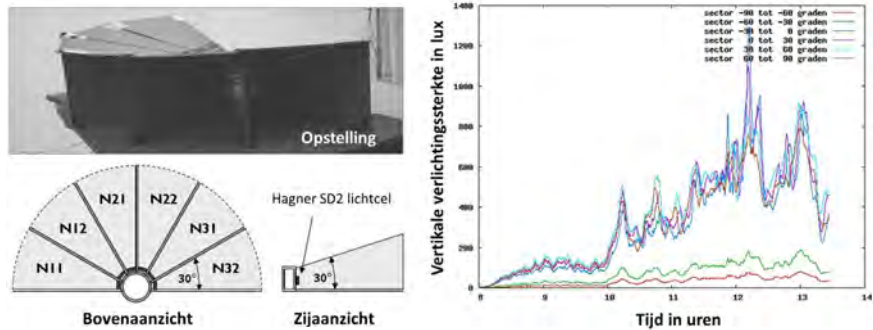
uitgevoerd. Het gezichtsveld is horizontaal in zes gelijke delen verdeeld (zie figuur 4), elk met een opening van 30° horizontaal bij 30° verticaal, en per deel is de verlichtingssterkte gemeten (Zonneveldt en Aries, 2009). De opstelling had een nagenoeg onbelemmerd uitzicht naar buiten (west-oriëntatie). Figuur 5 laat de waarden voor de zes kijkrichtingen voor een situatie op een bewolkte dag zien. Het is duidelijk dat er significante verschillen tussen de kijkrichtingen zijn. Dit geldt met name voor twee delen met een openingshoek tussen -90 tot -60 graden (rode lijn) en -60 tot -30 graden (groene lijn). Vervolgonderzoek richt zich op het horizontale en het verticale vlak, waardoor input voor zowel comfort als prestatie-eisen gecombineerd kunnen worden.

DAGLICHTGEBRUIK

Hoewel al statistisch significante resultaten zijn gevonden in verschillende laboratorium- en veldstudies, blijft in deze studies steeds de bijdrage en het effect van kunstverlichting of de hoeveelheid daglicht die mensen hebben ontvangen buiten de werk- of leeromgeving onzeker. Echter, omdat mensen een aanzienlijke tijd doorbrengen in een gebouw en kunstverlichting nog niet kan voldoen aan de kwaliteit van het daglicht m.b.t. hoeveelheid, spectrale samenstelling en invalrichting, blijft het doel om gebouwen te ontwerpen met ruimten die maximaal gebruik maken van daglicht, daarbij bijgestaan door systemen die adequaat in spelen op het veranderende daglicht om visueel comfort te kunnen garanderen. Dit betekent dat de daglichtopening of zelfs complete gevels moeten kunnen reageren buitenomstandigheden. Mogelijke relaties tussen buitenomstandigheden, met inbegrip van hun frequenties en amplituden, en menselijke ritmes zijn van belang om gebouwen en gebouwbeheersystemen te ontwerpen op basis van natuurlijke frequenties. Wanneer de verlichtingssituatie en natuurlijk ritmes van mensen in evenwicht zijn, zal de efficiëntie van hun productie, gemeten in productieoutput, salaris of schoolprestaties, waarschijnlijk significant verbeteren.

REFERENTIES

- Aarts, M.P.J., Aries, M.B.C., Straathof, J., Hoof, J. Van, (2015), Dynamic lighting systems in psychogeriatric care facilities in the Netherlands: a quantitative and qualitative analysis of stakeholders' responses and applied technology. *Indoor and Built Environment*, 24(5), 617-630
- Aries, M.B.C., Veitch, J.A., Newsham, G.R., (2010), Windows, view, and office characteristics predict physical and psychological discomfort, *Journal of Environmental*



-Figuur 5- Proefopstelling, inclusief een schematisch boven- en zijaanzicht (links); Verlichtingssterkte gemeten in zes kijkrichtingen op een bewolkte dag (rechts)

- Psychology, 30(4): 533-541
- Aries, M.B.C., Zonneveldt, L. (2011), Daylight variations in a moderate climate as input for lighting controls, *Proceedings 4th Velux Daylight Symposium*, Lausanne, Switzerland
- Aries, M.B.C., Aarts, M.P.J., Hoof, J. van, (2015), Daylight and health: a review of the evidence and consequences for the built environment, *Lighting Research and Technology*, 47(1):6-27
- Aries, M.B.C., Rosemann, A.L.P., (2015), Dynamic daylight and input for intelligent (day)lighting control, *Proceedings 28th CIE Session*, Manchester, UK, pp. 1099-1103
- Boyce, P.R., (2014), Human factors in Lighting, 3rd Edition, CRC Press, 681 pages
- Boubekri, M., Cheung, I.N., Reid, K.J., Wang, C.H., Zee, P.C., (2014), Impact of windows and daylight exposure on overall health and sleep quality of office workers: a case-control pilot study, *Journal of Clinical Sleep Medicine*, 10(6):603-11
- Dacey, D.M., Liao, H.W., Peterson, B.B., Robinson, F.R., Smith, V.C., Pokorny, J., Yau, K.W., Gamlin, P.D., (2005), Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal colour and irradiance and project to the LGN, *Nature*, 433: 749-754
- Figueiro, M.G., Rea, M.S., Stevens, R.G., Rea, A.C., (2002), Daylight and productivity - a possible link to circadian regulation, *Proceedings of the Fifth International LRO Lighting Research Symposium*, Electric Power Research Institute: Palo Alto, CA
- Galindo-Romero, C., Jiménez-López, M., García-Ayuso, D., Salinas-Navarro, M., Nadal-Nicolás, F.M., Agudo-Barriuso, M., Villegas-Pérez, M.P., Avilés-Trigueros, M., Vidal-Sanz, M., (2013), Number and spatial distribution of intrinsically photosensitive retinal ganglion cells in the adult albino rat, *Experimental Eye Research*, Volume 108: 84-93
- Glickman, G., Hanifin, J.P., Rollag, M.D., Wang, J., Cooper, H.M., Brainard, G.C., (2003), Inferior retinal light exposure is more effective than superior retinal exposure in suppressing melatonin in humans. *Biological Rhythms J.*, 18(1): 71-9
- Piosczyk, H., Landmann, N., Holz, J., Feige, B., Riemann, D., Nissen, C., Voderholzer, U., (2014), Prolonged Sleep under Stone Age Conditions, *Journal of Clinical Sleep Medicine*, 10(7):719-722
- Rea, M.S., Figueiro, M.G., Bierman, A., Bullough, J.D., (2010), Circadian light, *Journal of Circadian Rhythms*, Vol 8, article 2
- Rüger, M., Gordijn, M.C.M., Beersma, D.G.M., de Vries, B., Daan, S., 2005, Nasal versus Temporal Illumination of the Human Retina: Effects on Core Body Temperature, Melatonin, and Circadian Phase. *Biological Rhythms J.*, 20(1): 60-70
- Sharkey, K.M., Van Reen, E., (2014), The 'Realities' of our Modern Light-Dark Cycle, *Journal of Clinical Sleep Medicine*, 10(7):723-724
- Veitch, J.A., (2004), Principles of Healthy Lighting: Highlights of IE TC6-11's Forthcoming Report Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, number 1009370
- Wright, J., McHill, A., Birks, B., Griffin, B., Rusterholz, T., Chinoy, E., (2013), Entrainment of the Human Circadian Clock to the Natural Light-Dark Cycle, *Current Biology*, 23(16):1554-1558
- Zadeh, R.S., Shepley, M.M., Williams, G., Chung, S.S., (2014), The impact of windows and daylight on acute-care nurses' physiological, psychological, and behavioral health, *Health Environments Research & Design Journal*, 7(4):35-61
- Zonneveldt, L., Aries, M.B.C., (2009), Development of a Daylight Discomfort Detector for control of shading, *Proceedings CIBAT International Scientific*, Lausanne, Switzerland