

Werkverlichting: Visuele en biologische effecten

Ir. W.J.M. van Bommel

Ir. G.J. van den Beld

April 2004

Philips Lighting, Nederland

PHILIPS

Auteurs

Ir. W. J. M. van Bommel en Ir. G. J. van den Beld

De twee auteurs, met een universitaire graad in respectievelijk natuurkunde en elektrotechniek, werken sinds het begin van de jaren 1970 bij Philips Lighting. Sindsdien zijn zij betrokken geweest bij fundamenteel onderzoek van verlichtingstoepassingen in uiteenlopende toepassingsgebieden, terwijl ze een aantal verschillende posities bekleedden binnen de onderneming. Daarnaast zijn ze actief betrokken bij het werk van het Comité International de l'Éclairage (CIE) en bij de Technische Commissie 'Licht en Verlichting' van het Comité Européen de Normalisation (CEN TC 169). Ook hebben ze lezingen gegeven voor tal van nationale en internationale congressen. Artikelen van hun hand zijn gepubliceerd in vele gerenommeerde vakbladen op verlichtingsgebied.

Wout van Bommel is onlangs voor de periode 2003-2007 gekozen tot president van het CIE.

Gerrit van den Beld is de Nederlandse vertegenwoordiger van CIE Division 6: 'Fotobiologie en Fotochemie' en is bestuurslid van de Nederlandse Stichting 'Verlichting en Gezondheid' die streeft naar een bredere medisch-wetenschappelijke kennis van de invloed van licht op de mens.

'Werkverlichting: visuele en biologische effecten' (april 2004) is een geactualiseerde en uitgebreide versie van het eerdere artikel 'Industriële verlichting en productiviteit' van dezelfde auteurs (augustus 2002). Het artikel beschrijft de uitkomst van het meest recente onderzoek over de invloed van verlichting op gezondheid en welzijn. Voor meer details over verlichting en productiviteit in de industrie wordt u verwezen naar pagina 6 - 8 van het artikel van augustus 2002.

Inhoud

Samenvatting

Inleiding

Drie soorten fotoreceptoren in het oog

Verlichting en visuele effecten

Visuele prestaties

Visuele omgeving

Zichtgerelateerde kwaliteitsaspecten van verlichtingsinstallaties

Verlichting en biologische effecten

Licht en lichaamsritmes

Verlichting, waakzaamheid, stemming en stress

Gezondheidsgerelateerde kwaliteitsaspecten van verlichtingsinstallaties

Conclusie

Werkverlichting:

Visuele en biologische effecten

Samenvatting

De ontdekking in 2002 van een nieuwe fotoreceptorcel in het oog maakt het gemakkelijker te begrijpen welke biologische effecten licht kan hebben op de mens. De spectrale gevoeligheid van het nieuw ontdekte celtype is inmiddels onderzocht en daaruit is gebleken dat blauwachtig licht biologisch een groter activerend effect heeft dan roodachtig licht.

Er is veel onderzoek gedaan naar de effecten op gezondheid, welzijn en alertheid van mensen die werken onder verschillende verlichtingsomstandigheden. De resultaten daarvan, die zijn samengevat in deze publicatie, tonen aan dat goede verlichting inderdaad belangrijke positieve effecten heeft, niet alleen visueel maar ook biologisch. Uit het onderzoek naar de biologische effecten van licht blijkt duidelijk dat de ontwerprichtlijnen voor goede en gezonde verlichting in zekere mate afwijken van de conventioneel gebruikte regels. Zo blijkt het voordelen te hebben om zowel het niveau als de kleur van het licht regelbaar te maken. Niet alleen het licht op de visuele taak, maar ook het licht dat het oog bereikt, bepaalt de algemene kwaliteit van de verlichting.

In een werkomgeving zijn de voordelen in termen van gezondheid en welzijn niet alleen belangrijk voor de medewerkers zelf, maar zij leiden ook tot hogere werkprestaties, minder fouten, betere veiligheid en minder verzuim. Een voorbeeld uit de industriële omgeving toont aan dat een verhoging van het lichtniveau van 300 naar 500 lux de totale productiviteit gemakkelijk met 8 procent kan verhogen.

INLEIDING

De visuele effecten van verlichting worden al meer dan 500 jaar onderzocht. Leonardo da Vinci (1452-1519) beschreef al ideeën over 'straatverlichting'. Christiaan Huygens (1629-1695) formuleerde de golftheorie van licht, terwijl Sir Isaac Newton (1642-1727) de deeltjestheorie van het licht ontwikkelde. Johann Wolfgang Goethe (1749-1832) analyseerde de kleureffecten en -aspecten van verlichting. Na de introductie van gaslicht en elektrisch licht in de vroege tot midden jaren 1800 richt het onderzoek naar de visuele verlichtingseffecten zich meer en meer op praktische verlichtingstoepassingen. Wat het mechanisme van visuele effecten betreft, beschreef de Nederlander Antony van Leeuwenhoek al in 1722 de aanwezigheid van 'staaf- en kegelcellen' in het netvlies. Hun bestaan werd in 1834 door de Duitser Gottfried Treviranus bevestigd in de vorm van 'lichtgevoelige fotoreceptoren'. Deze ontdekking leidde tot een beter begrip van veel visuele verlichtingseffecten die al eerder beschreven waren. Een van de gevolgen daarvan was dat er concreter onderzoek kon worden gedaan naar de visuele effecten van verlichting, waardoor het mogelijk werd effectievere verlichtingsinstallaties te ontwerpen.

Gedurende meer dan 150 jaar beschouwden wetenschappers de staafjes en kegels als de enige fotoreceptorcellen in het oog. Historisch gezien is het dan ook een sensatie dat David Berson et al. [1] van de Brown University (USA) in 2002 een nieuw, derde type fotoreceptor ontdekten in het netvlies van zoogdieren. Deze nieuwe fotoreceptor blijkt de 'ontbrekende schakel' in het beschrijven van biologische effecten die bestuurd worden door licht en donker. Dat verlichting belangrijke biologische effecten heeft, bleek de afgelopen 25 jaar al uit grootschalige biologische en medisch-wetenschappelijke onderzoeken. Die hebben aangetoond dat de effecten van goede verlichting veel verder reiken dan alleen de visuele effecten zelf: in biologisch opzicht heeft goede verlichting een positieve invloed op gezondheid, welzijn, alertheid en zelfs op de slaapkwaliteit [2], [3], [4], [5]. Dit alles betekent dat het dringend nodig is de parameters te herzien waarmee goede verlichting kan worden beschreven.

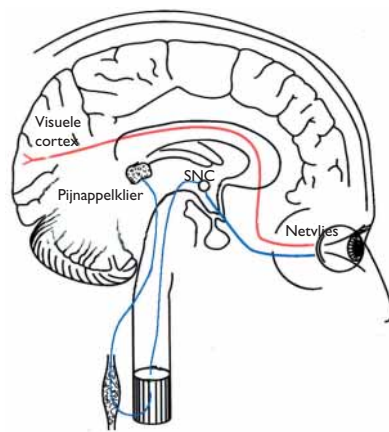
Op basis van de drie fotoreceptoren in het oog beschrijft dit artikel eerst het mechanisme van de visuele en biologische effecten. We behandelen achtereenvolgens verlichting en visuele effecten, en verlichting en biologische effecten. Het eerste deel wordt afgesloten met een samenvatting van de 'zichtgerelateerde' aspecten van verlichtingskwaliteit en het tweede met een discussie over de 'gezondheidsgerelateerde' aspecten ervan.

DRIE SOORTEN FOTORECEPTOREN IN HET OOG

De fotoreceptorcellen in het netvlies van het oog - de kegels en staafjes - regelen de visuele effecten. Als er licht valt op deze cellen vindt er een complexe chemische reactie plaats. Daarbij wordt een chemische stof gevormd (rhodopsin) die elektrische pulsen veroorzaakt in de zenuw die de fotoreceptorcellen verbindt met de achterzijde van de hersenen (visuele cortex). In de visuele cortex van de hersenen worden de elektrische pulsen geïnterpreteerd als 'beeld'.

Figuur 1 toont de zenuwverbinding tussen de kegels en staafjes in het oog en de visuele cortex van de hersenen.

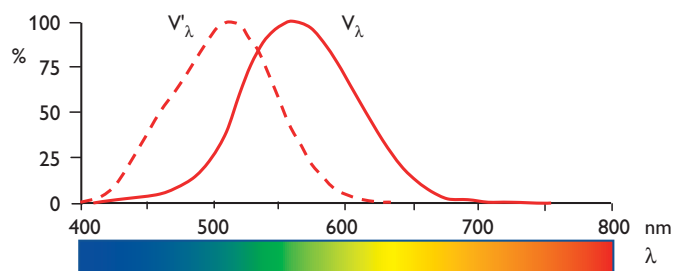
Fig.1 Visuele en biologische banen in de hersenen. In rood de zenuwverbinding tussen de kegels en staafjes in het netvlies en de visuele cortex; in blauw de verbinding tussen de nieuw ontdekte fotoreceptorcellen in het netvlies en de suprachiasmatische kern (SNC) en de pijnappelklier.



De staafjes werken in situaties met zeer weinig licht (scotopisch zicht) en laten geen waarneming van kleur toe. Het kegelsysteem is verantwoordelijk voor detailscherpte en kleurwaarneming. De kegels spelen dan ook de belangrijkste rol in situaties met binnenverlichting.

De gevoeligheid van de kegel- en staafjessystemen varieert met de golflengte van het licht, en dus met de kleur ervan. Dit is te zien in Figuur 2, waarin de spectrale ooggevoeligheidskrommen voor het kegelsysteem (V_λ) en voor het staafjessysteem (V'_λ) zijn gegeven. Op de V_λ -kromme voor het kegelsysteem zijn alle verlichtingseenheden zoals lumen, lux en candela gebaseerd. Dit wordt het fotopische systeem genoemd. Uit de V_λ -kromme is te zien dat het oog niet erg gevoelig is voor extreem blauw en extreem rood licht en dat het zijn maximale gevoeligheid heeft voor groengeel licht.

Fig.2 Spectrale ooggevoeligheidskrommen, V_λ voor het kegelsysteem (fotopisch zicht, getrokken lijn) en V'_λ voor het staafjessysteem (stippelijijn).

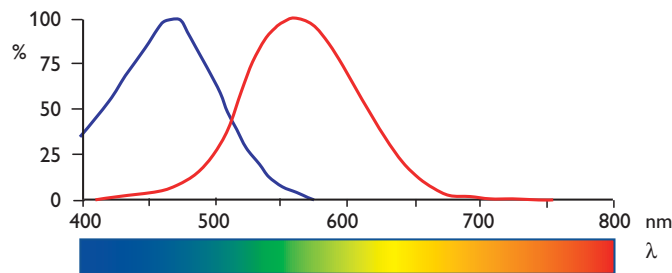


In dit verband is het goed zich te realiseren dat verschillende lichtkleuren verkregen kunnen worden door verschillende mengsels van golflengten. Ook wit licht bestaat uit zo'n mengsel. Het (visuele) rendement van een lichtbron wordt dan ook in hoge mate bepaald door de gevoeligheid van het oog voor de golflengten die in het geproduceerde licht aanwezig zijn.

Het nieuwe type fotoreceptorcel in het netvlies van het oog dat in 2002 werd ontdekt door David Berson et al. [1] regelt de biologische effecten¹. Het licht dat deze cellen bereikt, veroorzaakt een complexe chemische reactie (in dit geval met het fotopigment melanopsine [6]), waarbij eveneens elektrische pulsen ontstaan. Deze cellen hebben hun 'eigen' zenuwverbindingen naar, onder andere, locaties in de hersenen die de suprachiasmatische kern (SNC) worden genoemd – dit is de biologische klok van de hersenen – en de pijnappelklier. Figuur 1 toont de zenuwverbinding tussen de nieuw ontdekte fotoreceptorcellen in het oog en deze plaatsen in de hersenen.

De gevoeligheid van de nieuwe fotoreceptorcel varieert vanzelfsprekend ook met de verschillende golflengten van licht, en dus met verschillende lichtkleuren. Op basis van de biologische factor 'melatonine-onderdrukking' slaagde Brainard [7] er al in de spectrale 'biologische actie'-kromme² te bepalen. Deze kromme is weergegeven in Figuur 3, samen met de visuele ooggevoeligheidskromme van de kegels.

Fig. 3 Spectrale biologische-actiekromme (gebaseerd op melatonine-onderdrukking) in blauw (bron: Brainard [7]), en de visuele ooggevoeligheidskromme in rood.



Een vergelijking van de twee krommen maakt onmiddellijk duidelijk dat de biologische gevoeligheid voor verschillende golflengten van licht behoorlijk afwijkt van de visuele gevoeligheid. De maximale visuele gevoeligheid ligt immers in het gebied van de geelgroene golflengte, terwijl de maximale biologische gevoeligheid in het blauwe gebied van het spectrum ligt. Deze constatering is belangrijk voor de specificatie van gezonde verlichting.

¹ Waarschijnlijk spelen de staafjes en kegels hierin ook een bepaalde rol.

² Zoals verderop in dit artikel besproken zal worden, is onderdrukking van het hormoon melatonine een van de biologische effecten van licht. Tal van andere biologische factoren die ook door licht geregeld worden, hebben waarschijnlijk een actiespectrum dat vergelijkbaar is met deze melatonine-onderdrukking.

VERLICHTING EN VISUELE EFFECTEN

Visuele prestaties

Werkverlichting omvat een grote reeks verschillende werkomgevingen en taken: van kantoren en kleine werkplaatsen tot enorme fabriekshallen; van lezen, schrijven en computerwerk tot fijn precisiewerk of zware industriële taken.

De verlichting moet altijd van voldoende kwaliteit zijn om de visuele prestaties te garanderen die nodig zijn voor de betrokken taken. De werkelijke visuele prestaties van een persoon hangen echter niet alleen af van de verlichtingskwaliteit maar ook van zijn of haar eigen 'zichtcapaciteiten'. Leeftijd is daarin een belangrijk criterium want de verlichtingsbehoefte neemt toe naarmate men ouder wordt. Figuur 4 geeft de relatieve hoeveelheid licht die nodig is voor het lezen van een goed gedrukt boek als functie van de leeftijd.

Dit onderzoek is uitgevoerd met testpersonen die, als dat nodig was, de juiste leesbril droegen. Uit deze kromme blijkt duidelijk dat de leeftijd een buitengewoon ernstige invloed heeft. Een van de vele oorzaken van dit leeftijdseffect is de afnemende doorlatendheid van de ouder wordende ooglenzen: deze vergeelt geleidelijk (zie Figuur 5). Deze afname betekent dat de lens steeds minder licht doorlaat naarmate hij ouder wordt. Ook betekent het dat steeds minder blauw licht wordt doorgelaten. Het oudere oog ziet dus een minder blauwe wereld.

Fig. 4 Relatie tussen leeftijd en de relatieve hoeveelheid licht die nodig is voor het lezen van goed drukwerk (bron: Fortuin [8]).

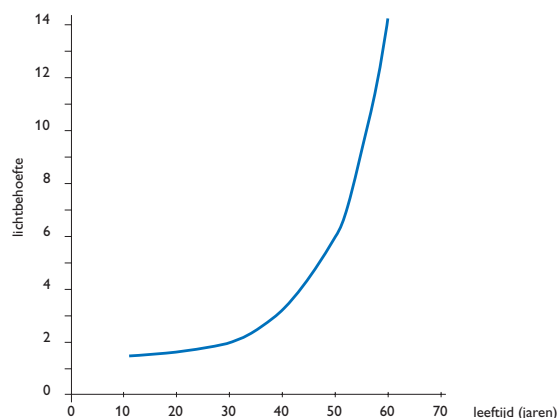
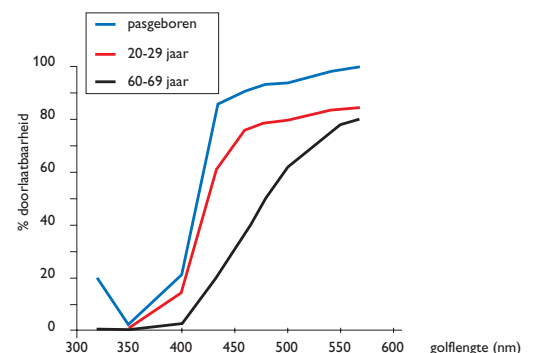
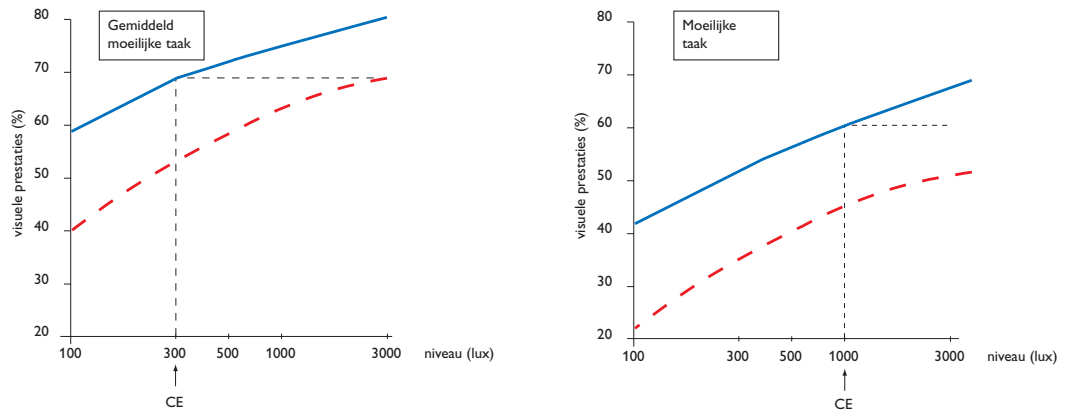


Fig. 5 Doorlatendheid van de lens voor verschillende leeftijdscategorieën. De waarden zijn uitgedrukt als een percentage van het 560 nm-punt voor pasgeborenen (bron: aangepast uit Brainard et al. [9]).



Figuur 6 illustreert de vele resultaten van onderzoeken naar de invloed van de verlichtingskwaliteit op de visuele prestatie. De krommen beschrijven de relatieve visuele prestatie als functie van het verlichtingsniveau voor visuele taken met verschillende moeilijkheidsgraden: links voor een gemiddeld moeilijke taak (bijv. kantoorwerk of algemeen machinewerk in een industriële omgeving) en rechts voor een moeilijke taak (bijv. kleurinspectie of fijn assemblagewerk). Bij alle taken neemt de visuele prestatie duidelijk toe bij een hogere verlichtingskwaliteit – in dit geval het verlichtingsniveau. In de grafiek zijn ook de vereiste verlichtingsniveaus (EN) aangeduid voor industriële omgevingen zoals die in veel gevallen worden gespecificeerd in de Europese Norm voor de verlichting van werkplekken [10].

Fig. 6 Relatie tussen relatieve visuele prestaties (in %) en verlichtingsniveau (in lux). Getrokken blauwe lijn: jonge personen; onderbroken rode lijn: oudere personen (bron: CIE [11]). EN: verlichtingsniveaus gespecificeerd in de Europese Norm.



Uit de grafiek blijkt dat de eisen volgens de Europese Norm in feite zijn afgestemd op jongere personen. De visuele prestatie van oudere medewerkers ligt echter aanzienlijk lager. Gelukkig is voor de gemiddeld moeilijke taak volledige compensatie mogelijk met een hoger verlichtingsniveau. Op momenten dat er onvoldoende daglicht is, vraagt het realiseren van de hogere verlichtingsniveaus voor oudere medewerkers in de praktijk om regelbare verlichting boven de verlichting die wordt voorgeschreven door de 'EN-standaard'.

Natuurlijk leiden betere visuele prestaties op hun beurt tot betere werkprestaties bij langdurige werkzaamheden, en dat uit zich in een hogere opbrengst en een lager aantal fouten. Maar de mate waarin de verlichtingskwaliteit zorgt voor betere werkprestaties hangt uiteraard ook af van de visuele eisen die de betrokken taak stelt. Een taak waarvoor het belangrijk is goed te kunnen zien, zal meer profiteren van goede zichtcondities dan een taak met minder zware visuele eisen.

Visuele omgeving

Naast een effect op de visuele prestaties kan verlichting ook een belangrijke invloed hebben op de sfeer en de visuele indruk van de werkplek. Een correct ontworpen werkomgeving kan een stimulerend effect hebben op de mensen die er werken [12]. Tegenwoordig heeft men dan ook veel meer aandacht voor de indeling en het interieurontwerp van de werkplek. Goede verlichting kan de vormgeving van een interieur versterken, terwijl slechte verlichting het effect ervan kan verminderen of zelfs te niet doen.

Een belangrijk aspect in dit verband is de helderheid van de oppervlakken die de fysieke grenzen van de ruimte vormen, zoals wanden, vloeren en plafond. De helderheid van deze oppervlakken bepaalt in hoge mate hoe de totale ruimte wordt ervaren. Een andere factor is het vermijden van verblinding en ongewenste lichtreflecties. Verblinding is de sensatie die ontstaat als er binnen het visuele veld helderheidsniveaus optreden die aanzienlijk hoger zijn dan die waarop de ogen zich hebben geadapteerd. Doordat de aanpassingsmogelijkheden van het oog beperkt zijn, kunnen abrupte helderheidsverschillen leiden tot lagere visuele prestaties en tot visuele stress en ongemak.

Daarnaast verdienen ook de kleureigenschappen van het licht veel aandacht. De verlichting moet het mogelijk maken de ‘echte’ kleuren te zien. Het is vooral belangrijk dat de menselijke huid in de juiste kleur wordt gezien, want verlichting waaronder de huid er bleek en ongezond uitziet, leidt vaak tot klachten. Verder speelt ook de kleurindruk van het licht zelf een rol bij het scheppen van sfeer in de ruimte. Dit kan zelfs een emotionele invloed hebben. Een enigszins blauwachtig wit licht geeft bijvoorbeeld een koele indruk die vaak wordt ervaren als zakelijk, terwijl roodachtig wit licht een warme indruk geeft met een gezellige en ontspannende sfeer.

Een laatste belangrijke factor die de kwaliteit van de werkomgeving bepaalt, is de toetreding van daglicht in het interieur. In de meeste gevallen valt het daglicht gelukkig minstens enkele uren per dag in het gebouw, waar het bijdraagt aan het totale verlichtingsniveau. Daglicht verbetert echter niet alleen de visuele prestaties door verhoging van het verlichtingsniveau, maar draagt – mits goed geregeld (bijv. door goed ontworpen ramen en zonwering) – door zijn dynamisch variërende intensiteit en kleur ook bij aan een goede stimulerende werkomgeving. De dynamische veranderingen in het daglicht hebben namelijk een positieve invloed op stemming en stimulatie. Een uitgebreid onderzoek onder kantooromstandigheden toonde aan dat mensen er de voorkeur aan geven dat het normale daglicht in hun kantoor wordt aangevuld met kunstlicht: gemiddeld 800 lux boven de heersende daglichtbijdrage [13].

Zichtgerelateerde kwaliteitsaspecten van verlichtingsinstallaties

Tal van (inter)nationale aanbevelingen en normen specificeren cijfers voor de verlichtingskwaliteit voor de meeste van de hierboven genoemde visuele kwaliteitsaspecten en voor een grote reeks interieurs en activiteiten. Tabel 1 geeft de visuele kwaliteitsaspecten en de belangrijkste parameters zoals die voor elk aspect worden genoemd in de Europese Norm voor de verlichting van werkplekken.

Merk op dat de kleurimpressie van het licht zelf niet is gespecificeerd in de Europese Norm. Dat komt doordat de kleurimpressie voorsnog wordt gezien als een psychologische en esthetische kwestie en dus afhankelijk is van smaak.

Tabel 1 Visuele kwaliteitsaspecten van verlichtingsinstallaties met hun kwaliteitsparameters zoals gespecificeerd in de Europese Norm voor de verlichting van werkplekken [10].

Visueel kwaliteitsaspect	Kwaliteitsparameter
Verlichtingsniveau	Gemiddeld niveau verlichtingssterkte, E_{av}
Ruimtelijke verdeling	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Gelijkmatigheid: } E_{min} / E_{av} \\ \text{Verblindingsbeperking: UGR} \end{array} \right.$
Kleurweergave	R_a

Om te illustreren welke kwaliteit vereist is in verschillende situaties, geven de Tabellen 2 en 3 de waarden die de Europese Norm voorschrijft voor kantoren en voor industriële omgevingen (chemische, kunststoffen- en rubberindustrie)³. Deze waarden voldoen voor de meerderheid van de medewerkers aan de eisen die worden gesteld aan de visuele prestaties en het visuele comfort van werkplekken. We hebben echter al eerder besproken dat het leeftijdseffect zoveel invloed heeft dat er boven de 'EN Standaard verlichting' regelbare verlichting vereist is als het daglicht niet de hogere verlichtingsniveaus kan realiseren die vereist zijn voor het oudere oog.

Tabel 2 Verlichtingsbehoefte voor kantoren (bron: EN 12 464 [10]).

3 Kantoren					
Ref. no.	Soort interieur, taak of activiteit	\bar{E}_m	UGR _L	R _a	Opmerkingen
3.1	Archiveren, kopiëren, enz.	300	19	80	
3.2	Schrijven, typen, lezen, gegevensverwerking	500	19	80	Beeldschermwerk: zie bepaling 4.11.
3.3	Technisch tekenen	750	16	80	
3.4	CAD-werkstations	500	19	80	Beeldschermwerk: zie bepaling 4.11.
3.5	Conferentie- en vergaderruimten	500	19	80	Verlichting moet regelbaar zijn.
3.6	Receptiebalie	300	22	80	
3.7	Archieven	200	25	80	

Tabel 3 Verlichtingsbehoefte voor de chemische, kunststoffen- en rubberindustrie (bron: EN 12 464 [10]).

2.5 Chemische, kunststoffen- en rubberindustrie					
Ref. no.	Soort interieur, taak of activiteit	\bar{E}_m	UGR _L	R _a	Opmerkingen
2.5.1	Op afstand bediende procesinstallaties	50	-	20	Veiligheidskleuren moeten herkenbaar zijn.
2.5.2	Procesinstallaties met beperkte handmatige interventie	150	28	40	
2.5.3	Constant bemande werkplekken in procesinstallaties	300	25	80	
2.5.4	Precisie-meetkamers, laboratoria	500	19	80	
2.5.5	Farmaceutische productie	500	22	80	
2.5.6	Bandenproductie	500	22	80	
2.5.7	Kleurinspectie	1000	16	90	T _{CP} ≥ 4000 K.
2.5.8	Snijden, afwerken, inspectie	750	19	80	

³ De gespecificeerde waarden voor de gemiddelde verlichtingssterkte zijn 'gehandhaafde verlichtingssterkten', d.w.z. minimale waarden die voor de gemiddelde verlichtingssterkte op het gespecificeerde oppervlak nooit overschreden mogen worden. De waarde die wordt gespecificeerd voor gelijkmatigheid op de taak is altijd hetzelfde: $E_{min} / E_{av} \geq 0,7$.

VERLICHTING EN BIOLOGISCHE EFFECTEN

Het heilzame effect van (dag)licht is al van oudsher bekend; voorbeelden daarvan zijn de heliotherapie en de behandeling van kwalen door het lichaam bloot te stellen aan zonnestralen. Lichttherapie tegen gezondheidsproblemen was populair tot de jaren 1930, daarna leidde de introductie van penicilline ertoe dat geneesmiddelen de leidende rol overnamen. Dankzij de resultaten van biologisch en medisch onderzoek is men in de laatste 20 tot 30 jaar licht weer steeds meer gaan waarderen als belangrijke bijdrage aan gezondheid en welzijn.

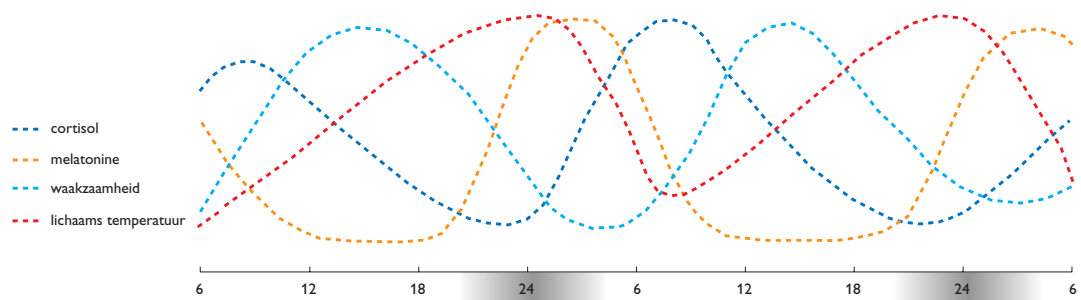
Normaal beschouwen we het oog alleen als een orgaan om mee te zien. Dankzij de recente ontdekking van de nieuwe fotoreceptorcellen in het oog en hun zenuwverbindingen naar de hersenen begrijpen we nu echter ook hoe het licht een groot aantal biochemische processen in het menselijk lichaam regelt en bestuurt.

De belangrijkste bevindingen hebben betrekking op de besturing van de biologische klok en op de regeling van enkele belangrijke hormonen via regelmatige licht/donker-ritmes. Dit betekent dat verlichting een belangrijke invloed heeft op gezondheid, welzijn en alertheid.

Licht en lichaamsritmes

Via de nieuw gevonden fotoreceptorcellen en hun afzonderlijke zenuwverbinding stuurt het licht signalen naar onze biologische klok. Op basis daarvan regelt deze de circadiaanse (dagelijkse) en circannuale (jaarlijkse, seizoensgebonden) ritmes van een grote verscheidenheid aan lichaamsprocessen. Figuur 7 toont als voorbeeld enkele typische menselijke ritmes: lichaamstemperatuur, alertheid en de hormonen cortisol en melatonine.

Fig.7 Dubbele plot (2 x 24 uur) van typische dagelijkse ritmes van lichaamstemperatuur, melatonine, cortisol en waakzaamheid in mensen voor een natuurlijke 24-uurs licht/donker-cyclus.



De hormonen cortisol ('stresshormoon') en melatonine ('slaaphormoon') spelen een belangrijk rol in de regeling van waakzaamheid en slaap. Cortisol verhoogt onder meer de bloedsuiker om het lichaam energie te geven en versterkt het immuunsysteem. Als het cortisolniveau echter gedurende een te lange periode te hoog blijft, raakt het systeem uitgeput en inefficiënt. Het cortisolniveau neemt 's ochtends toe om het lichaam voor te bereiden voor de activiteiten van de komende dag. In de loop van de heldere dag blijft het op een voldoende hoog niveau om rond middernacht uiteindelijk terug te vallen naar een minimum. Het niveau van het slaaphormoon melatonine daalt gedurende de ochtend en beperkt de slaperigheid.

Normaal stijgt het niveau weer als het donker wordt om een gezonde slaap mogelijk te maken (ook al doordat cortisol dan op zijn minimumniveau is). Voor een goede gezondheid is het van belang dat deze ritmes niet teveel verstoord worden. Als er wel een verstoring optreedt, dan kan helder licht in de ochtend helpen het normale ritme weer te herstellen.

In een natuurlijke situatie synchroniseert het licht, en vooral het ochtendlicht, de interne lichaamsklok met de 24-uurs licht/donker-cyclus van de aarde. Zonder deze regelmatige cyclus zou de interne klok een vrije looptijd hebben met, voor mensen, een gemiddelde periode van circa 24 uur en 15 tot 30 minuten.

Daardoor zouden de niveaus van onze lichaamstemperatuur, cortisol en melatonine van dag tot dag steeds verder afwijken van de niveaus die worden ingesteld door de kloktijd van onze omgeving [14].

Een langdurige 'disharmonie' door de afwezigheid van een 'normaal' licht/donker-ritme veroorzaakt een verkeerd ritme van waakzaamheid en slaap, wat uiteindelijk kan leiden tot waakzaamheid tijdens de donkere uren en slaap tijdens de heldere uren. Dezelfde symptomen, en in feite om dezelfde reden, vinden we bij de 'jet lag' na een reis door verschillende tijdzones [15]. En ook mensen die in wisselende diensten werken, ervaren dezelfde symptomen gedurende enkele dagen na elke ploegenwisseling, wederom om dezelfde reden [16].

Verlichting, waakzaamheid, stemming en stress

Er is al veel onderzoek gedaan waarin gezondheid, welzijn en waakzaamheid of alertheid worden vergeleken bij mensen die werken onder verschillende verlichtingsomstandigheden. In deze publicatie behandelen we daarvan een typerend, maar beperkt aantal.

Küller en Wetterberg [17] bestudeerden de activiteit van de hersenen (EEG) bij mensen in een laboratorium dat eruit zag als een kantoor: een met een betrekkelijk hoog verlichtingsniveau (1700 lux) en een met betrekkelijk laag verlichtingsniveau (450 lux). De EEG's vertonen een uitgesproken verschil: het hogere verlichtingsniveau resulteert in minder deltagolven (de delta-activiteit van het EEG is een indicatie voor slaperigheid), wat betekent dat helder licht een attentieverhogende invloed heeft op het centrale zenuwstelsel (zie Figuur 8).

Tal van onderzoeken naar de effecten van licht op alertheid en stemming zijn uitgevoerd onder nachtploegomstandigheden omdat daar de sterkste effecten verwacht werden. Figuur 9 toont het effect van twee verlichtingsregimes op de alertheid van ploegenwerkers als functie van de gewerkte tijd [15]. Bij beide regimes neemt de alertheid gedurende de nacht af, maar het regime met veel licht resulteert altijd in een significant hoger prikkelniveau en dus een betere alertheid en stemming.

Fig. 8 Delta-activiteit in het EEG van kantoorwerkers onder verlichtingsniveaus van 450 lux en 1700 lux (bron: Küller en Wetterberg [17]).

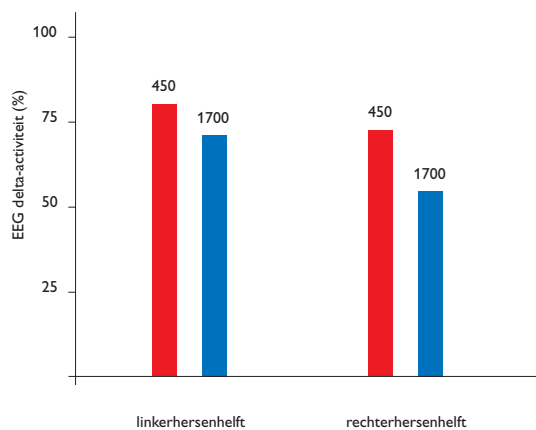
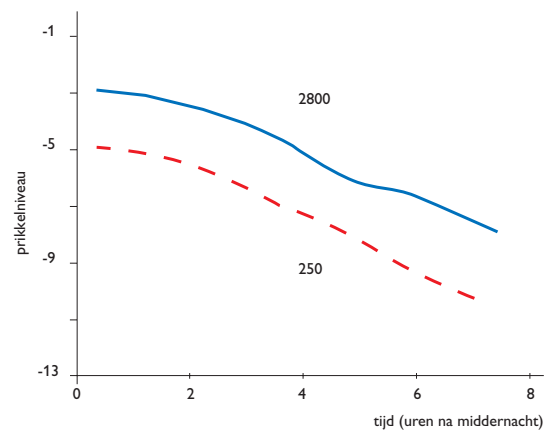
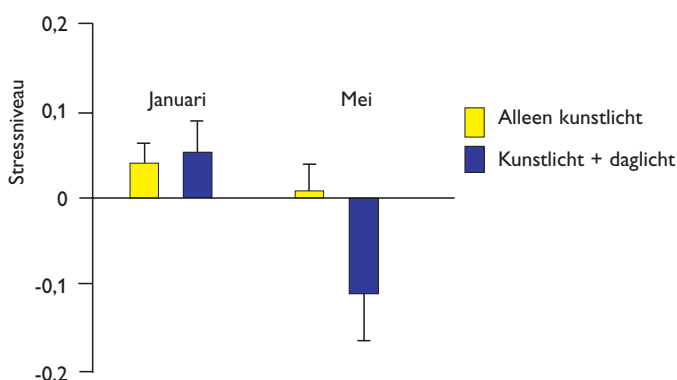


Fig. 9 Waakzaamheid en stemming uitgedrukt als prikkelniveau voor verlichtingsniveaus van 250 lux en 2800 lux, als functie van gewerkte uren na middernacht (bron: Boyce et al [18]).



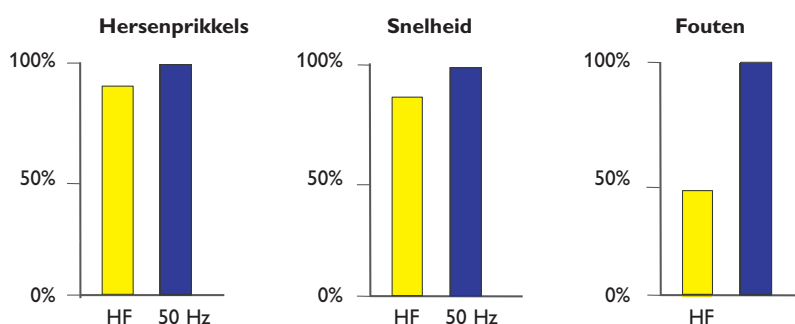
Andere studies tonen aan dat het gebruik van hogere verlichtingsniveaus ter bestrijding van vermoeidheid erin resulteert dat de proefpersonen inderdaad langer alert blijven [19], [20], [21]. Studies van stressniveaus en klachten bij mensen die binnen werken, zijn uitgevoerd door een groep mensen die enkel onder kunstlicht werken te vergelijken met een groep die werkt onder een combinatie van kunstlicht en daglicht [22]. Zoals te zien is in Figuur 10 is er in januari, als de daglichttoetreding onvoldoende is om een wezenlijke bijdrage te leveren aan het verlichtingsniveau, nauwelijks enig verschil tussen de twee groepen. Maar in mei, als het daglicht werkelijk een bijdrage levert, heeft de groep die van het daglicht profiteert aanzienlijk minder stressklachten. Een andere studie toont aan dat helder kunstlicht in interieurs in de winter een positief effect heeft op stemming en vitaliteit [23].

Fig. 10 Niveaus van stressklachten (met statistische spreiding) in een groep mensen die werken ofwel onder enkel kunstlicht of onder een combinatie van kunstlicht en daglicht (bron: Kerkhof [23]).



Sommige mensen – maar niet veel – krijgen hoofdpijn van de rimpeling in het licht die wordt veroorzaakt door de 50 Hz voeding van fluorescentielampen met magnetische voorschakelapparaten. Fluorescentielampen die werken met moderne hoogfrequente elektronische VSA's hebben een frequentie van circa 30 kHz en knipperen of rimpelen daardoor niet zichtbaar. Een vergelijkend onderzoek toonde aan dat er inderdaad significant minder hoofdpijn optreedt bij toepassing van elektronische VSA's [24]. Küller en Laike [25] hebben de EEG's gemeten van personen die werkten in een kantooromgeving onder respectievelijk magnetische (50 Hz) en hoogfrequente fluorescentieverlichting. Tegelijk hebben ze ook de snelheid en het aantal fouten gemeten tijdens het corrigeren van drukproeven. Figuur 11 laat zien dat de reciproque waarde van de alfa-activiteit van het EEG, en daardoor van de hersenprikkel ('stress'), hoger is bij 50 Hz-verlichting. De werksnelheid is enigszins hoger, maar het aantal fouten is dramatisch hoger (meer dan verdubbeld). Dit gecombineerde effect betekent dat het, voor zowel welzijn als productiviteit, verstandig is de hersenprikkel of stress te verminderen door gebruik te maken van hoogfrequente fluorescentieverlichting in plaats van magnetische 50 Hz-verlichting.

Fig. 11 Hersenprikkel gemeten als de reciproque waarde van de alfa-activiteit van EEG's van personen in kantoren onder 50 Hz en onder hoogfrequente HF (30 kHz) fluorescentieverlichting. De werksnelheid en fouten bij het corrigeren van een drukproef zijn ook weergegeven (grafiek aangepast uit: Küller en Laike [25]). Doelgroep: hoge gevoeligheid voor knipperend licht.



Gezondheidsgerelateerde kwaliteitsaspecten van verlichtingsinstallaties

Om te kunnen komen tot werkelijk 'goede en gezonde' verlichtingsinstallaties, moeten de hiervoor besproken visuele-kwaliteitsaspecten van verlichtingsinstallaties (d.w.z. verlichtingsniveau, ruimtelijke verdeling van licht en kleurweergave) worden verfijnd en uitgebreid.

Het biologische effect van licht wordt niet direct bepaald door de verlichtingssterkte op het werkvlak, maar door het licht dat het oog bereikt. Er wordt nu onderzoek gedaan om vast te stellen hoe we rekening kunnen houden met dit verschil tussen 'visueel verlichtingsniveau op de taak' en 'biologische verlichtingsniveaus' [26]⁴.

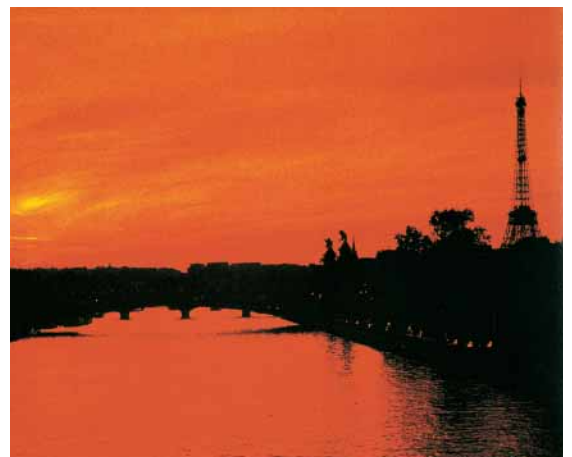
We hebben aangetoond dat het verlichtingsniveau regelbaar moet zijn, vooral vanwege de effecten op ouder wordende ogen.

Daglicht heeft door zijn natuur een dynamische intensiteit. Er bestaan aanwijzingen dat variabele verlichtingsomstandigheden een positief effect hebben op het activeringsniveau van mensen in een kantooromgeving [28]. Als het onvoldoende mogelijk is te profiteren van de dynamiek van de daglichtintensiteit kan dynamisch kunstlicht voordelen bieden.

Twee volledig nieuwe aspecten hebben betrekking op tijdstip en tijdsduur van de verlichting. Visueel gezien is licht vanzelfsprekend alleen vereist als en zolang men 'kijkt'. Maar biologisch gezien is ook het tijdstip waarop het licht (of de duisternis) wordt ontvangen van essentieel belang, zoals duidelijk blijkt uit de ritmefrafiek van Figuur 7.

We hebben ons altijd gerealiseerd dat de kleur van licht zelf een emotionele betekenis heeft en dus belangrijk is voor de sfeer van een ruimte. Maar nu begrijpen we dat het spectrum en dus de kleur van licht ook een belangrijke biologische betekenis heeft. Zoals is aangetoond in het hoofdstuk over de nieuwe fotoreceptorcel, heeft blauwachtig, koel licht biologisch gezien een groter effect dan warmer gekleurd roodachtig licht (Figuur 3). De daglichtsituaties van de foto's in Figuur 12 roepen niet alleen een verschillend emotioneel gevoel op maar hebben ook een verschillend biologisch effect.

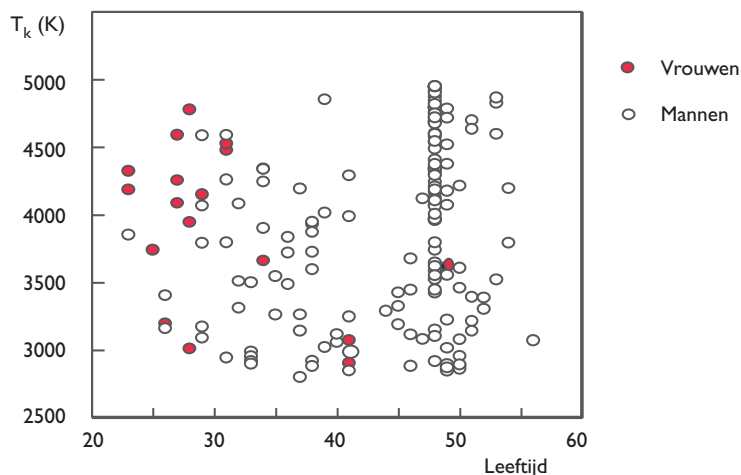
Fig. 12 Omgevingskleur vroeg in de ochtend en vroeg in de avond in Parijs.



⁴ Zeer recent onderzoek toont aan dat licht op het bovenste en onderste deel van het netvlies een verschillend belang heeft voor zover het betrekking heeft op het biologische effect [27]. Dit wekt de indruk dat ook de ruimtelijke verdeling van licht belangrijk is gezien vanuit het oogpunt van 'gezondheid'.

Het blauwachtige ochtendlicht heeft biologisch een activerend (opwekkend) effect, terwijl de rode licht in de vroege avond een ontspannend effect heeft. In een werkomgeving zijn zowel activerende als ontspannende momenten nodig. De kleur en het verlichtingsniveau van de kunstmatige verlichting kunnen samen bijdragen aan het scheppen van deze momenten. Onderzoeken naar de voorkeurskleur van licht in een kantooromgeving hebben aangetoond dat er in dit opzicht geen vast patroon bestaat in de voorkeur van individuen: iedereen heeft zijn eigen persoonlijke voorkeur (Figuur 13).

Fig. 13 Kleurvoorkeur van kunstlicht in een kantoor met (daglicht) vensters, uitgedrukt als gecorreleerde kleurtemperatuur van het licht T_k voor verschillende leeftijden en voor mannen en vrouwen (bron: Tenner [29]).



Tabel 4 geeft een samenvatting van de zicht- (uit Tabel 1) en gezondheids-gerelateerde aspecten van verlichtingskwaliteit die samen bepalend zijn voor 'goede en gezonde' verlichting.

Tabel 4 Zicht- en gezondheidsgerelateerde kwaliteitsaspecten van verlichtingsinstallaties.

Aspecten van verlichtingskwaliteit	
Zichtgerelateerd	Gezondheidsgerelateerd
(Regelbaar) verlichtingsniveau op de taak Ruimtelijke verdeling Kleurweergave	(Regelbaar) verlichtingsniveau in het oog Ruimtelijke verdeling (Regelbare) lichtkleur Tijdstip Tijdsduur

CONCLUSIE

Dankzij de recente ontdekking van een nieuwe fotoreceptor in het oog begrijpen we nu veel beter waarom goede werkverlichting, rekening houdend met zowel de visuele als de biologische effecten (d.w.z. gezondheid, welzijn en waakzaamheid), zo'n belangrijke voordelen biedt. Naast een betere gezondheid en welzijn van de medewerkers zelf leidt goede verlichting ook tot betere werkprestaties (snelheid), minder fouten en uitval, betere veiligheid, minder ongevallen en minder verzuim. Het totale effect van dit alles is: hogere productiviteit.

Voor een industriële omgeving (gemiddeld moeilijke visuele taak) onderzochten we hoeveel de productiviteit mogelijk in totaal zou kunnen toenemen door een beter verlichtingsniveau [30].

Tabel 5 geeft een samenvatting van de resultaten.

Tabel 5 Productiviteitstoename in de metaalverwerkende industrie met een gemiddeld moeilijke visuele taak als gecombineerd effect van toegenomen werkprestaties, beperking van fouten/uitval en afname van ongevallen (bron: Van Bommel et al. [30]).

Verbetering van verlichtingsniveau	Productiviteitstoename
Van 300 tot 500 lux	8 %
Van 300 tot 2000 lux	20 %

Om deze resultaten te bevestigen voeren we nu in praktijksituaties productiviteitsonderzoeken uit in een aantal industriële omgevingen waar de verlichting onlangs is gerenoveerd. We realiseren ons terdege dat de biologische component bijdraagt aan de productiviteitstoename en geloven dan ook dat soortgelijke toenamecijfers ook mogelijk zijn in een kantooromgeving. Wij geloven dat deze productiviteitsvoordelen nog indrukwekkender zullen worden als ons advies voor flexibele en regelbare verlichtingsniveaus en kleuren in praktijk wordt gebracht.

REFERENTIES

- [1] Berson, D.M., Dunn, F.A., Motoharu Takao; 'Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock', *Science*, February 8; (2002).
- [2] van den Beld, G.J., 'Licht und Gesundheit', *Licht 2002 Tagung*, Maastricht, (2002).
- [3] van den Beld, G.J., 'Healthy lighting, recommendations for workers', *Symposium healthy lighting at work and at home*, University of Technology Eindhoven, (2002).
- [4] Veith, J.A., 'Principles of healthy lighting: Highlights of CIE TC 6-11's forthcoming report', *Fifth International LRO lighting research symposium, Orlando, (2002)*.
- [5] NSVV Aanbeveling: "Licht en gezondheid voor werkenden", ISBN 90-76549-19-2, Haarlem (2003)
- [6] Berson, D.M.; 'Melanopsin and phototransduction by retinal ganglion cells', *Fifth International LRO lighting research symposium, Orlando, (2002)*.
- [7] Brainard, G.C., 'Photoreception for regulation of melatonin and the circadian system in humans', *Fifth International LRO lighting research symposium, Orlando, (2002)*.
- [8] Fortuin, G. J., 'Visual power and visibility', *Philips Research Report 6*, (1951).
- [9] Brainard, G.C. et al. 'Action spectrum for melatonin regulation in humans: Evidence for a novel circadian photoreceptor', *Journal of Neuroscience* (2001).

- [10] European Standard EN 12464, 'Lighting of workplaces', (Comité Européen de Normalisation, CEN), (2003).
- [11] CIE Publication 29.2: 'Guide on interior lighting', (1986).
- [12] Clements-Croome, D., et al., 'An assessment of the influence of the indoor environment on the productivity of occupants in offices', *Design, constructions and operations of healthy buildings*, ASHRAE, (1998).
- [13] Begemann, S.H.A., et al., 'Daylight, artificial light and people in an office environment, overview of visual and biological responses', *International Journal of Industrial Ergonomics*, (1997).
- [14] Czeisler, C.A., et al., 'Stability, precision and near-24-hour period of the human circadian pacemaker', *Science* 284, 2177-2281, (1999).
- [15] Boulos, Z., et al., 'Light treatment for sleep disorders', Consensus Report VII Jet lag. *Journal of biological rhythms*, Vol.10, (1995).
- [16] Akerstedt, T., 'Adjustment of physiological circadian rhythms and the sleep-wake cycle to shiftwork', *Hours of work*, Wiley, (1985).
- [17] Küller, R., Wetterberg, L., 'Melatonin, cortisol, EEG, ECG and subjective comfort in healthy humans: impact of two fluorescent lamp types at two light intensities', *Lighting Research and Technology*, (1993).
- [18] Boyce, P.R., et al., 'Lighting the graveyard-shift: the influence of a daylight-simulating skylight on the task performance and mood of night-shift workers', *Lighting Research and Technology*, (1997).
- [19] Daurat, A., et al., 'Bright light affects alertness and performance rhythms during a 24-hour constant routine', *Physics and behaviour*, (1993).
- [20] Grunberger, J., et al., 'The effect of biologically-active light on the noopsyche and thymopsyche on psycho-physiological variables in healthy volunteers', *Int. J. of Psychophysiology*, (1993).
- [21] Tops, M., et al., 'The effect of the length of continuous presence on the preferred illuminances in offices', *Proceedings CIBSE Conference*, (1998).
- [22] Kerkhof, G.A., 'Licht en prestatie', *Proceedings. Symposium Licht en Gezondheid, Amsterdam*, (1999).
- [23] Partonen, T., et al., 'Bright light improves vitality and alleviates distress in healthy people', *Journal of Affective disorders*, (2000).
- [24] Wilkens, A.J., Nimmo-Smith, I., Slater, A., Bedocs, L., 'Fluorescent lighting, headaches and eyestrain', *Lighting Research and Technology*, (1989).
- [25] Küller, R., Laike, T., 'The impact of flicker from fluorescent lighting on well-being, performance and physiological arousal', *Ergonomics*, (1998).
- [26] Aries, M.B.C., Begemann, S.H.A., Zonneveldt, L., Tenner, A.D., 'Retinal illuminance from vertical daylight openings in office spaces', *Right Light* 5, Nice, (2002).
- [27] Glickman, G., Hanifin, J.P., Rollag, M.D., Wang, J., Cooper, H., Brainard, G.C., 'Inferior retinal light exposure is more effective than superior retinal exposure in suppressing melatonin in humans', *Journal of biological rhythms*, (2003).
- [28] Vallenduuk, V., 'The effect of variable lighting on mood and performance in an office environment', graduation report, Eindhoven University of Technology, (1999).
- [29] Tenner, A.D., Unpublished data from research reported in: Begemann, S.H.A., Beld, G.J. van den, Tenner, A.D., 'Daylight, artificial light and people in an office environment, overview of visual and biological responses', *International Journal of Industrial Ergonomics*, 20 (3), 231-239, (1997).
- [30] van Bommel, W.J.M., van den Beld, G.J., van Ooyen, M.H. F., 'Industrielle Beleuchtung und Produktivität', *Licht 2002 Tagung, Maastricht*, (2002).

