

Zur Photometrie nichtvisueller Lichtwirkungen

Prof. Dr. Christoph Schierz

TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, Postfach 100 565, 98684 Ilmenau
christoph.schierz@tu-ilmenau.de

1 Einleitung

Bisherige Beleuchtungsplanung und -bewertung beruht auf den Jahrzehnte alten Erfahrungen der Photometrie. Den Größen wie Beleuchtungsstärke in Lux oder Leuchtdichte in cd/m^2 liegt die Überlegung zugrunde, dass das Sichtbarmachen von Objekten die Hauptaufgabe natürlicher oder künstlicher Beleuchtung ist. So simuliert ein Luxmeter die spektrale Empfindlichkeit der Netzhaut für ein 2-Grad-Gesichtsfeld am Ort der Netzhautgrube (Fovea), der Stelle schärfsten Sehens. Ein Leuchtdichte-Photometer simuliert zusätzlich die optischen Eigenschaften des Auges für Abbildungen an diese Stelle.

In den letzten Jahren wurden in zunehmendem Maße auch in der Lichttechnik unspezifische biologische Lichtwirkungen diskutiert. Diese werden nicht durch den für das Sehen verantwortlichen spezifischen neuronalen Pfad übertragen (NIF: Non-Image-Forming). Solche nichtvisuelle Lichtwirkungen verlangen daher nach neuen Messmethoden. Messtechnisch neu auszulegen sind sowohl die spektrale, die räumliche als auch die zeitliche Integration des Lichts. Dafür muss bekannt sein, welche spektralen Empfindlichkeiten die zuständigen Rezeptoren besitzen, wie sich deren Signale über die Netzhaut summieren und welches deren Adaptationsverhalten bei zeitlichen Änderungen ist.

2 Zur spektralen Integration

Folgende Faktoren sind bestimmend für die spektrale Integration:

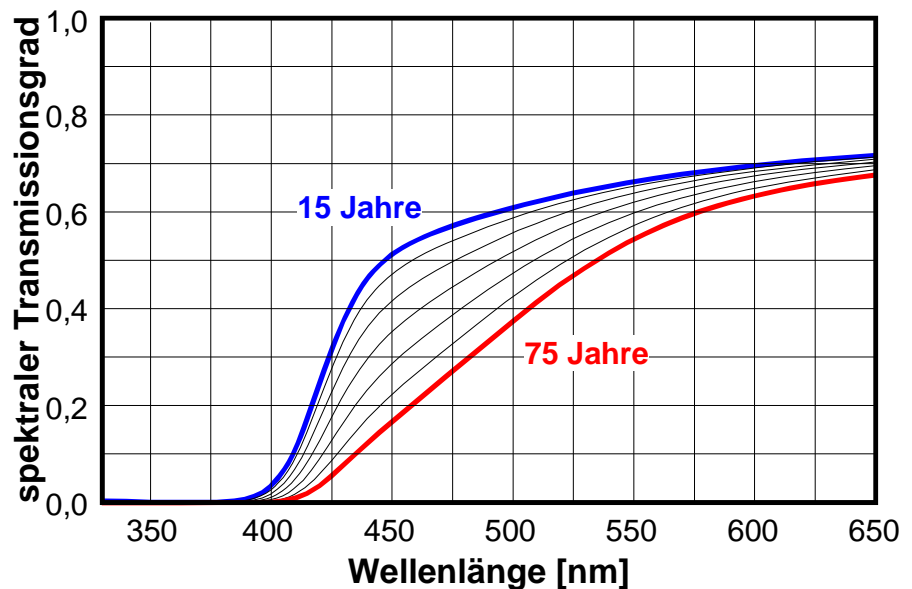
- Der spektrale Transmissionsgrad der Augenmedien, insbesondere der Augenlinse.
- Das Alter der Person, welches die spektrale Transmission verändert.
- Der spektrale Absorptionsgrad der relevanten Photopigmente.
- Die Wirkung anderer Photorezeptoren (Zapfen, Stäbchen) auf nichtvisuelle Effekte.

2.2 Spektrale Transmission des Auges

Eine Lichtwirkung entsteht, wenn Photonen von einem Molekül absorbiert werden – im diskutierten Fall von einem Photopigment. Dazu muss es zuerst, ohne absorbiert zu werden, durch die Augenmedien gelangen. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist abhängig von der Wellenlänge (Abb. 1).

Die Augenlinse erleidet mit zunehmendem Alter eine Gelbfärbung. Dies ist auch im spektralen Transmissionsgrad des Auges durch einen Abfall im blauen Bereich des Spektrums zu erkennen.

Abb. 1:
Spektraler Transmissionsgrad des Auges, in Abhängigkeit des Alters (berechnet nach [2]). Bereits in jungen Jahren gehen über 30% des Lichts in den Augenmedien, insbesondere in der Augenlinse verloren. Da die Kurven gegen das Blaue nach unten geneigt sind, ist der Transmissionsgrad generell für warmweiße Lichtquellen höher als für tagelichtweiße.



Wie im nächsten Kapitel gezeigt wird, ist die spektrale Empfindlichkeit für nichtvisuelle Lichtwirkungen zwischen 430 und 460 nm, also im blauen Spektralbereich maximal (vgl. Abb. 2), gerade da, wo die Transmission besonders stark mit dem Alter reduziert wird. Ältere Menschen benötigen daher für nichtvisuelle Lichtwirkungen mehr Intensität als jüngere und auch mehr, als man mit konventionellen photometrischen Messungen erwarten würde.

2.3 Spektrale Empfindlichkeit der Rezeptoren

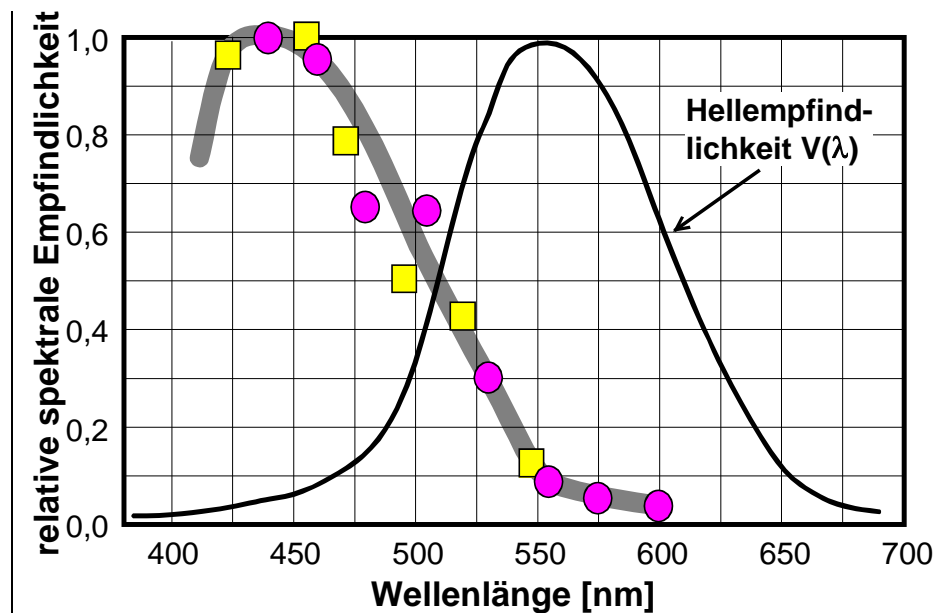
Die spektrale Empfindlichkeit der Melatonin-Suppression zeigte sich gegenüber der bekannten spektralen Hellempfindlichkeit $V(\lambda)$ ins Blaue verschoben (Abb. 2). Zudem konnte gezeigt werden, dass eine ähnliche spektrale Empfindlichkeit auch für die zeitliche Stabilisierung der biologischen Uhr [16] und für die Steigerung des subjektiven und physiologischen Wachheitsgrades gelten muss [17]. Allerdings sind für diese weiteren nichtvisuellen Lichtwirkungen noch keine vollständigen Kurven der Spektralempfindlichkeit bekannt.

Bei der Lichttechnik und der Lampenindustrie gelangte als erstes diese auf neuen Rezeptoren beruhenden Spektralempfindlichkeiten in den Fokus des Interesses. So wurde vorgeschlagen, die Verschiebung der spektralen Empfindlichkeit mit Hilfe eines Korrekturfaktors in der Photometrie zu berücksichtigen [11]. In Entwicklung und auf dem Markt befinden sich bereits Messgeräte, welche diese berücksichtigen [9][10]. Laufende Normungsarbeiten haben zum Ziel, eine neue spektrale Empfindlichkeitsfunktion für die nichtvisuellen Lichtwirkungen zu tabellieren, um von Lampenherstellern neu entwickelte Lampen, welche im blauen Spektralbereich stärker abstrahlen, charakterisieren zu können.

Es darf aber nicht übersehen werden, dass die Datenlage noch relativ spärlich ist. Die publizierten 14 Datenpunkte (Abb. 2) weisen um 500 nm eine relativ große Unsicherheit auf. Zudem setzt die Integration eines Lichtspektrums, gewichtet mit einer spektralen

Empfindlichkeitsfunktion voraus, dass sich die Gesamtwirkung additiv aus den Einzelwirkungen monochromatischer Strahlung zusammensetzt (Gesetz nach Abney).

Abb. 2:
Spektrale Empfindlichkeit für Melatonin-Suppression, im Vergleich zur spektralen Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ [14][15].



Wissenschaftliche Erkenntnisse deuten darauf hin, dass dies bei nichtvisuellen Wirkungen nur in erster Näherung gilt [5], da Zapfen (oder auch Stäbchen) einen zusätzlichen Einfluss zu nehmen scheinen. Dies kann auch auf Grund von Tierversuchen bis jetzt nicht ausgeschlossen werden. In einer andern Studie wurde die circadiane Rhythmik mit rotem Licht (95% der Energie oberhalb von 600 nm) gleich gut verschoben wie mit weißem Licht [21], was ebenfalls einer einfachen spektralen Integration widerspricht.

3 Zur räumlichen Integration

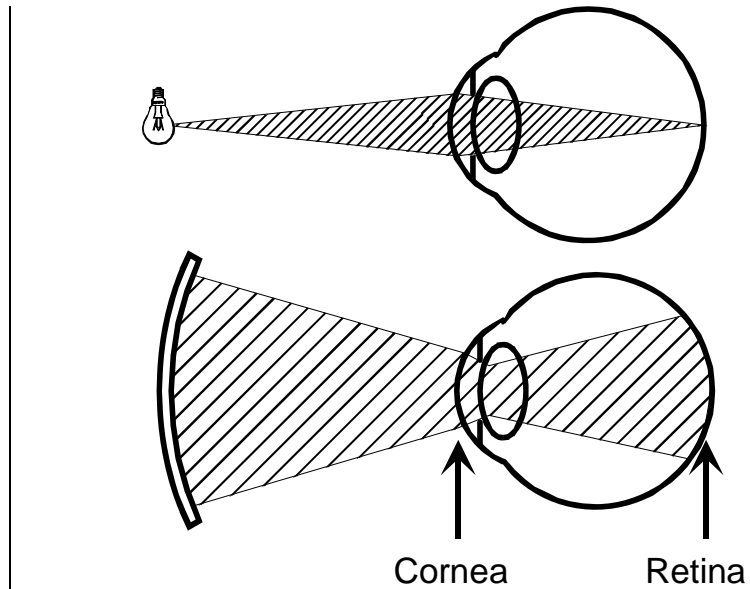
Folgende Faktoren sind bestimmend für die räumliche Integration:

- Die optische Abbildungsvergrößerung des Auges in Abhängigkeit des Netzhautortes.
- Die Transmissionsgrade der okulären Medien, abhängig von den verschiedenen optischen Weglängen und vom Alter der Person.
- Die Dichteverteilung der relevanten Rezeptoren auf der Netzhaut.
- Die Größe der relevanten Rezeptoren in Abhängigkeit des Netzhautortes.
- Die Empfindlichkeit der relevanten Rezeptoren in Abhängigkeit des Netzhautortes.
- Die Art der Summation über die beiden Augen.

3.1 Abbildende Eigenschaften des Auges

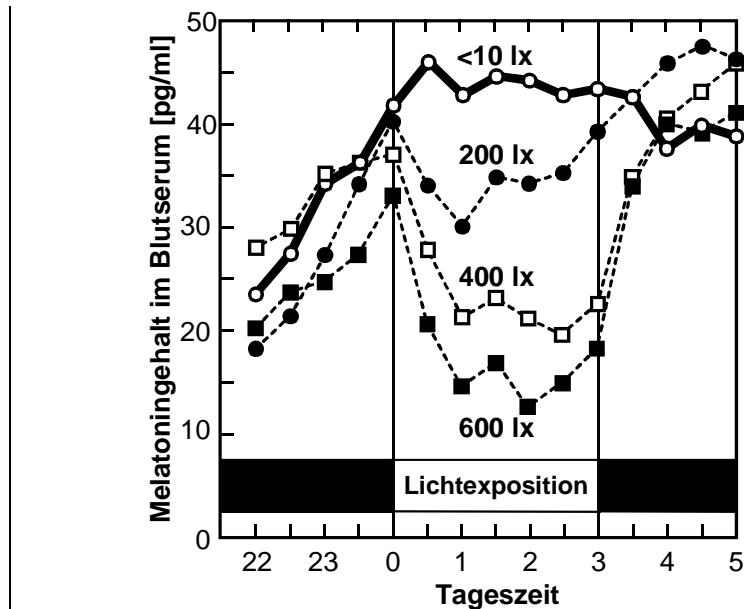
Eine Schwierigkeit liegt in der Forschungspraxis begründet, als Maß für die Lichtintensität die vertikale Beleuchtungsstärke an der Hornhaut (Cornea) des Auges zu verwenden.

Abb. 3:
Unterschiedliche Beleuchtungssituationen, welche gleiche Hornhaut-Beleuchtungsstärken, aber unterschiedliche Netzhaut-Beleuchtungsstärken erzeugen.



Dies führt zu uneindeutigen, wenn nicht gar falschen Angaben der Wirkungsstärke. Eine 5 cm große, 50'000 cd/m² helle Glühlampe in 1 m Entfernung erzeugt dieselbe Beleuchtungsstärke von 100 lx auf der Hornhaut, wie eine großflächige Lichtquelle mit weniger als 50 cd/m². Man geht also implizit davon aus, dass intensives, auf eine Stelle der Netzhaut (Retina) fokussiertes Licht dieselbe Wirkung hat, wie entsprechend weniger intensives, aber über die ganze Netzhaut verteiltes Licht (Abb. 3 und 4).

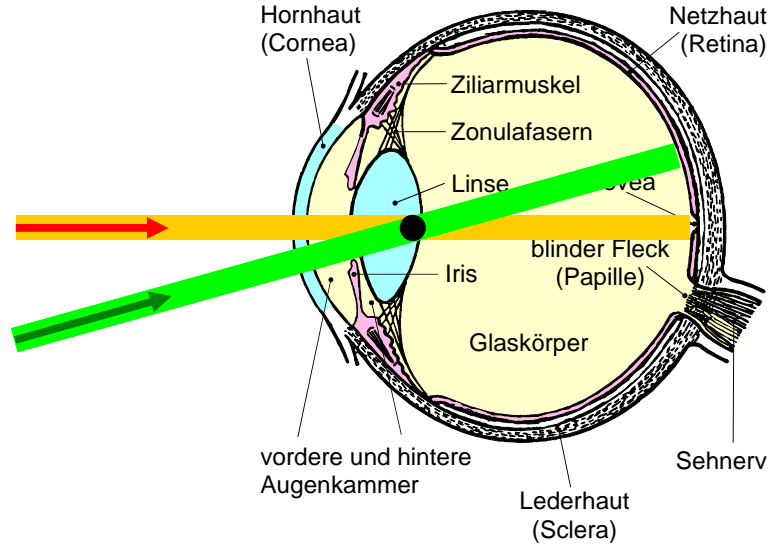
Abb. 4:
Unterdrückung der Melatonin-Produktion durch Licht in der Nacht. Zeitlicher Verlauf der Melatonin-Suppression während dreistündiger Lichtexposition unterschiedlicher Hornhaut-Beleuchtungsstärke (nach [13]). Die Beleuchtungsstärke wurde mit Hilfe der Distanz der Lichtquelle eingestellt. Die Netzhaut-Beleuchtungsstärke blieb somit konstant, nur die Bildgröße der Lichtquelle auf der Netzhaut variierte.



Für eine adäquate Beurteilung der Lichtintensität müßte nicht die Hornhaut-Beleuchtungsstärke sondern diejenige auf jeder Netzhautstelle bekannt sein. Letztere ist proportional zur Leuchtdichte (bzw. Strahldichte) des vom Auge abgebildeten Objekts, z.B.

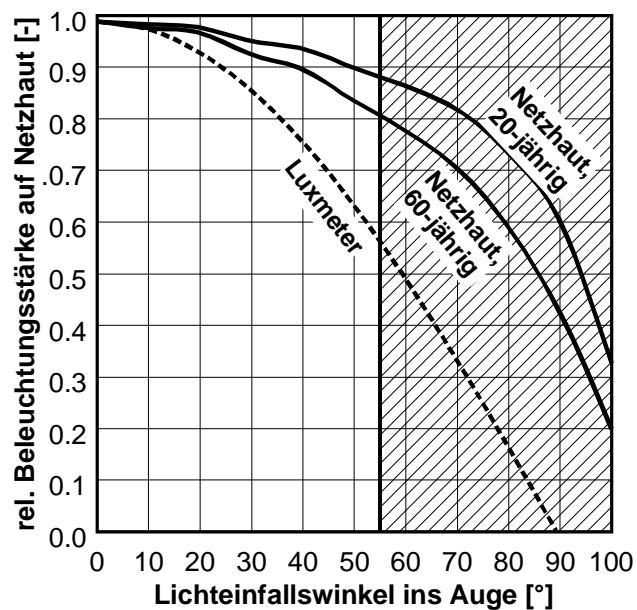
einer Lichtquelle. Viele Arbeiten erläutern die Lichtbedingungen im Experiment nicht im Detail. Dadurch lässt sich die Leuchtdichteverteilung und die Verteilung der Netzhautbeleuchtungsstärke nicht mehr rekonstruieren.

Abb. 5:
Da, anders als in der Photometrie vorausgesetzt, auch die periphere Netzhaut nichtvisuelle Lichtwirkungen anregt, ist zu berücksichtigen, dass Lichtstrahlen mit unterschiedlichen Einfallswinkeln auch unterschiedliche Weglängen und Auftreffwinkel aufweisen. Als Faustregel gilt: der Auftreffwinkel ist halb so groß, wie der Einfallswinkel. In der Optik ist die Auswirkung solcher Effekte unter dem Begriff „Randlichtabfall“ bekannt.



Die optischen Eigenschaften des Auges haben zur Folge, dass Lichtstrahlen mit unterschiedlichen Einfallswinkeln (Abb. 5), unterschiedlich hohe Beleuchtungsstärken auf der Netzhaut erzeugen (Stichworte dazu sind: Asphärische Hornhaut, Vignettierung durch Pupille, variierende optische Weglängen und damit der Lichtabsorptionen, Krümmung der Netzhaut). Es resultiert eine Schwächung der Beleuchtungsstärke auf der Rezeptorfläche mit zunehmendem Einfallswinkel. Diese fällt aber nicht so stark aus, wie sie ein kosinus-korrigiertes Luxmeter vornimmt (Fig. 6).

Abb. 6:
Durch die Optik bestimmte Richtcharakteristik des menschlichen Auges und diejenige von kosinus-korrigierten Luxmetern (nach [8] für 2 mm Augenpupille, altersabhängige Lichtabsorption zusätzlich berücksichtigt). Die weitgehend unbekannt lokalen Sensitivitäten jeder Netzhautstelle sind nicht berücksichtigt. Im schraffierten Bereich mit Winkeln > 55 Grad wird das Auge vertikal und gegen die Nase abgeschirmt. Licht aus diesem Winkelbereich gelangt nur von der Schläfenseite her in jeweils ein Auge.

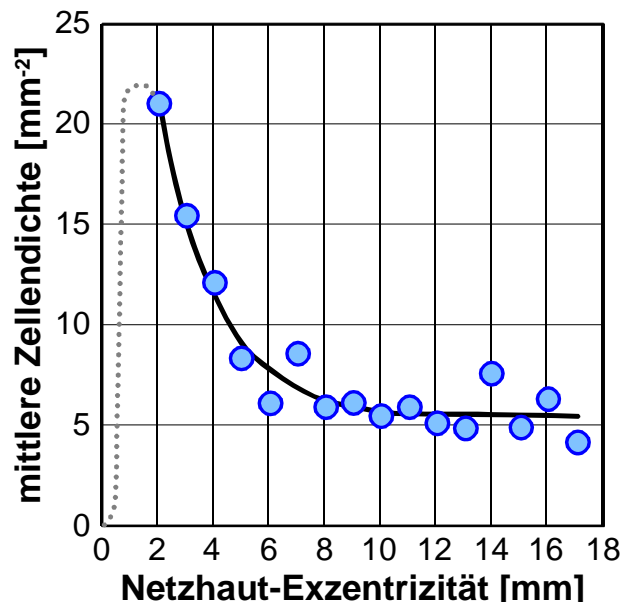


Selbstverständlich bleibt das Auge unter natürlichen Bedingungen nicht fixiert. Ständige Augenbewegungen „verschmieren“ die Richtcharakteristik. Dabei spielt auch die zeitliche Trägheit der Übertragungskette eine Rolle. Erstaunlicherweise gibt es zur arbeitsplatzbezogenen Häufigkeitsverteilung von Blickrichtungen kaum Literatur (für erste Untersuchungen siehe [3]). Auch für Blendung und Helligkeitsadaptation wären Untersuchungen zur Blickverteilung in vertikaler Richtung und zum Einfluss von Fenstern von besonderem Interesse. Ein weiterer moderierender Faktoren für nichtvisuelle Lichtwirkungen ist die mit der Adaptationsleuchtdichte variierende Pupillengröße. Letztere wirkt als Regler für Helligkeitsänderungen kompensierend [6].

3.2 Sensitivitäten der Netzhautstellen

Weitgehend offen sind die Sensitivitäten der Netzhautstellen für nichtvisuelle Lichtwirkungen. Die ganze Netzhaut scheint beteiligt zu sein, wobei die Fovea – anders als bei spezifischen Lichtwirkungen – keine hervorragende Rolle spielt (Abb. 7). Vergleicht man die Zellendichte mit derjenigen von Sehzapfen oder Stäbchen, fällt auf, dass sie um Größenordnungen kleiner ausfällt. So stehen in der Peripherie den 5 bis 20 nichtvisuell wirksamen Zellen rund 100'000 bis 150'000 Stäbchen und immerhin noch 5000 Zapfen pro mm^2 gegenüber [4]. Oder anders formuliert: Innerhalb eines in der Photometrie üblichen, 2° großen Kreises befinden sich in der Peripherie des Gesichtsfelds nur etwa 1 bis 6 nichtvisuelle Rezeptoren, in der Fovea keine.

Abb. 7:
Mittlere Zellendichte der für nichtvisuelle Lichtwirkungen (speziell Melatonin-Suppression) verantwortlichen Ganglienzellen in der Netzhaut bei Makaken-Affen (nach [1]). Bei der Exzentrizität Null befindet sich die Fovea. Sie enthält praktisch keine dieser Zellen. Wenn das Makaken-Auge die gleichen Abmessungen hätte, wie das menschliche Auge, entsprächen einer Exzentrizität von 12 mm auf der Netzhaut einem Sehwinkel von 40° . Damit ist die Peripherie des Gesichtsfeldes besonders wirksam, da sie eine größere Fläche aufweist als die Fovea-nahen Bereiche bei 2 bis 4 mm Exzentrizität.



Mit der Verteilung der Rezeptoren auf der Netzhaut ist noch nicht geklärt, wieviel jeder Rezeptor zum wirksamen Summensignal beiträgt. Es gibt erste Hinweise, dass dies uneinheitlich sein könnte. Licht das von oben ins Auge fällt, unterdrückt die Melatonin-

Produktion wirksamer als Licht von unten [12]. Demnach ist die Netzhaut 23 Grad unterhalb der Fovea sensitiver als 23 Grad oberhalb. 30 Grad von der Seite einfallendes Licht zeigte sich von schläfenseitig (temporal) kommend wirksamer als von nasenseitig (nasal) kommend [18]. Hier wirkt aber normalerweise das zweite Auge teilweise kompensierend. Für schläfenseitige Einfallswinkel > 55 Grad ist dies aber nicht mehr der Fall, weil die Nase das andere Auge abdeckt (Schraffur in Abb. 6). Für Melatonin-Suppression sind zwei Augen wirksamer als eines allein [20]. Von den visuellen Lichtwirkungen her gesehen ist dies nicht selbstverständlich: Einäugig erscheint die Umwelt nicht dunkler als zweiäugig.

Auch die Lichttherapie von SAD-Patienten wirkt dann, wenn nicht direkt auf die Lichtquelle geblickt wird. Die periphere Retina erscheint hier also ebenfalls als bedeutsam. Dennoch sieht es derzeit auf Grund der unterschiedlich wirksamen Intensitätsbereiche und der vermutlich anderen spektralen Empfindlichkeit so aus, dass diese Lichtwirkung anders zu behandeln ist.

4 Zur zeitlichen Integration

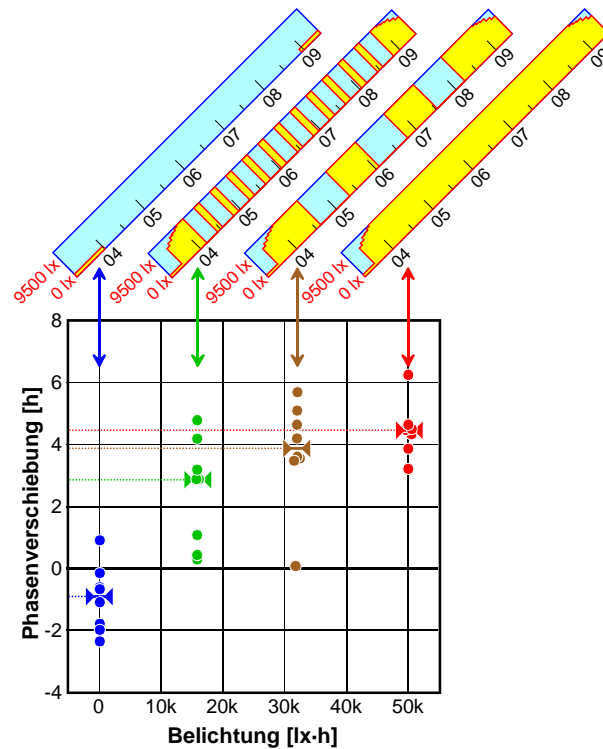
Mit zeitlich veränderlichem Licht stellt sich die Frage, wie schnell die chemischen, physiologischen oder informationsverarbeitenden Prozesse einer Lichtänderung folgen können. Sind die Prozesse langsamer, hinkt die Wirkung der Ursache hinterher und man spricht von Adaptationsvorgängen. Nur während des unadaptierten Zustands unterscheidet sich die dynamische von der statischen Lichtwirkung. So reagiert die Helladaptation auf Intensitätssprünge schneller als die Dunkeladaptation und das Auge ist damit nicht auf mittlere, sondern auf hohe Leuchtdichten adaptiert.

Wie in Kap. 3 gezeigt wurde, sind jeweils nur wenige nichtvisuell wirksame Photorezeptoren pro Raumwinkel beteiligt. Werden diese durch eine hohe, kleinflächige und damit lokal begrenzte Lichtquelle bestrahlt, laufen sie Gefahr, in Sättigung zu gehen und damit weniger zum Gesamtsignal beizutragen als man es aufgrund der Leuchtdichte erwarten würde. Diese Problematik stellt sich beim normalen Sehvorgang nicht, da die visuelle Information ortsspezifisch bleibt und (vermutlich) nicht zu einem Summensignal verarbeitet wird. Üblicherweise gelangen neuronale Zellen nur kurzzeitig in Sättigung und passen sich danach durch Adaptation an die neue Situation an. Daher ist ein möglicherweise vorhandenes Adaptationsverhalten der nichtvisuell wirksamen Rezeptoren zu berücksichtigen. Es ist aber bisher noch wenig untersucht worden.

Es zeigte sich in einer Arbeit [7], dass die Wirkung der Beleuchtung auf die biologische Uhr kaum beeinträchtigt wird, wenn sie zwischendurch für ein beträchtliches Zeitintervall ausgeschaltet wird. Bei gleicher Belichtung ($I \times t$) wirkt zeitlich veränderliches Licht somit stärker als statisches (Abb. 8). Sind hingegen die Lichtänderungen langsamer als die verarbeitenden Prozesse, ist der Organismus zu jedem Zeitpunkt an die Lichtsituation angepasst.

Abb. 8:

Intermittierendes Licht verschiebt die circadiane Rhythmik deutlich effektiver als kontinuierliches Licht. Abwechslungsweise wurde für 5,3 min Licht mit 9500 lx ein- und für 19,7 min wieder ausgeschaltet. Dies ergibt für eine Dauer von 5 h eine Belichtung von 11'000 Lux-Stunden. Das sind 23% gegenüber kontinuierlichem Licht mit 47'500 Lux-Stunden. Die Wirkung betrug aber 71% derjenigen mit Dauerbelichtung. Dies kann als Adaptationseffekt gedeutet werden: Licht zu Beginn der Exposition ist wirksamer als später. Durch zwischenzeitliches Abschalten regeneriert das System und wird wieder empfindlicher.



5 Diskussion

Selbstverständlich ist es bereits heute möglich, ein Messgerät zu entwickeln, welches einzelne Aspekte der genannten Lichtwirkungen erfasst. Dies ist etwa bezüglich der spektralen Empfindlichkeit bereits erfolgt, obwohl noch keine international anerkannten Tabellenwerte dafür existieren. Problematisch erscheint die Verwendung von Beleuchtungs- bzw. Bestrahlungsstärken an der Hornhaut, ohne sich dabei Rechenschaft darüber abzulegen, dass unterschiedliche Lichtverteilungen im Raum auf der Hornhaut zwar ein (physikalisches) Summensignal erzeugen, dieses aber durch die Optik des Auges wieder als Lichtverteilung auf der Netzhaut aufgeteilt wird. Richtungsabhängige optische Eigenschaften des Auges, inhomogen verteilte Netzhautempfindlichkeiten und durch helle Lichtquellen übersteuerte, eventuell adaptierende Rezeptoren verlangen eine orts aufgelöste Vorverarbeitung (z. B. Gewichtung oder Transformation), bevor ein der Physiologie nachempfundenes Summensignal gebildet wird. Eine orts aufgelöste Leuchtdichtemessung, zusammen mit orts aufgelösten Korrekturfaktoren für die spektrale Verschiebung, bieten einen ersten flexiblen Schritt in diese Richtung. Angesichts der Tatsache, dass einerseits bei guten photometrischen Messgeräten sehr viel Wert auf exakte Anpassung an die Richtungsempfindlichkeit und an die spektrale Empfindlichkeit gelegt wird und andererseits die messtechnisch relevanten Informationen über nichtvisuelle Lichtwirkungen noch spärlich sind, wird deren Photometrie die Lichttechnik noch längere Zeit in Entwicklung, Forschung und Standardisierung beschäftigen.

6 Literatur

- [1] Dacey D.M., Liao H.-W., Peterson B.B., Robinson F.R., Smith V.C., Pokorny J., Yau K.-W., Gamlin P.D.: Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal colour and irradiance and project to the LGN. *Nature* V433 (17. Feb. 2005) P749-754.
- [2] Van de Kraatz J., van Norren D.: Optical density of the aging human ocular media in the visible and the UV. *J. Opt. Soc. Am. A*, V24 N7 (July 2007) P1842-1857.
- [3] Hubalek S., Schierz Ch.: Photometrical Situation and Eye Movements at VDU Work Stations. Proceedings of the 26th Session of the CIE, Beijing, China (04.07.2007 - 11.07.2007), Vol. 2 (2007) Page D6-58f.
- [4] Curcio C.A., Sloan K.R., Kalina R.E., Hendrickson A.E.: Human photoreceptor topography. *The Journal of Comparative Neurology*, V292 (1990) P497-523.
- [5] Figueiro M.G., Bullough J.D., Parsons R.H., Rea M.S.: Preliminary evidence for spectral opponency in the suppression of melatonin by light in humans. *NeuroReport* V15 (2004) P313-316.
- [6] Gaddy J.R., Ruberg F.L., Brainard G.C., Rollag M.D.: Pupillary modulation of light-induced melatonin suppression. *Biologic effects of Light 1993*. W. de Gruyter, Berlin (1994) P159-168.
- [7] Rimmer D.W., Boivin D.B., Shanahan T.L., Kronauer R.E. et al.: Dynamic resetting of the human circadian pacemaker by intermittent bright light. *Am. J. Physiol. Regulatory Integrative Comp. Physiol.* V279 (2000) P: R1574-R1579.
- [8] Kooijman A.C.: Light distribution on the retina of a wide-angle theoretical eye. *J. Opt. Soc. Am.* V73 N11 (1983) P1544-1550.
- [9] Hubalek S., Zöschg D., Schierz C.: Ambulant recording of light for vision and non-visual biological effects. *Lighting Res. Technol.* V38 N4 (2006) P314-324.
- [10] Piazena H., Kockott D., Sippel R.: Measurement of circadian effective radiation of natural and artificial sources. 2nd CIE Expert Symposium on "Lighting and Health in Ottawa (2006).
- [11] Gall, D.: Die Messung circadianer Strahlungsgrößen. *Tagung Licht und Gesundheit 26. – 27.2.2004 Berlin (2004).*
- [12] Lasko T.A., Kripke D.F., Elliot J.A.: Melatonin suppression by illumination of upper and lower visual fields. *J. Biol. Rhythms* V14 N2 (1999) P122-125.
- [13] McIntyre I.M., Norman T.R., Burrows G.D., Armstrong S.M.: Quantal melatonin suppression by exposure to low intensity light in man. *Life Sciences* V45 N4 (1989) P327-332.
- [14] Brainard G.C., Hanifin J.P., Greeson J.M., Byrne B. et al.: Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. *J. Neurosci.* V21 N16 (2001) P6405-6412.
- [15] Thapan K., Arendt J., Skene D.J.: An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *J. Physiol.* V535.1 (2001) P261-267.
- [16] Warman V. L., Dijk D.-J., Guy R. Warman G.R., Arendt J., Skene D.J.: Phase advancing human circadian rhythms with short wavelength light. *Neuroscience Letters* V342 (2003) P37-40.
- [17] Cajochen Ch., Münch M., Kobiacka S., Kräuchi K., Steiner R., Oelhafen P., Orgül S., Wirz-Justice A.: High Sensitivity of Human Melatonin, Alertness, Thermoregulation, and Heart Rate to Short Wavelength Light. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, V90 N3 (2005) P1311-1316.
- [18] Visser E.K., Beersma D.G.M., Daan S.: Melatonin suppression by light in humans is maximal when the nasal part of the retina is illuminated. *J. Biol. Rhythms* V14 N2 (1999) P116-121.
- [19] Ruge M., Gordijn M.C.M., Beersma D.G.M., de Vries B., Daan S.: Nasal versus temporal illumination of the human retina: Effects on core body temperature, melatonin, and circadian phase. *J. Biol. Rhythms* V20 N1 (2005) P60-70.
- [20] Wang J.Y., Hanifin J.P., Rollag M.D., Brainard G.C.: Ocular regulation of the human pineal gland: The significance of total retinal exposure for melatonin suppression. *Biologic Effects of Light 1998*, Kluwer Boston (1999) P367-373.
- [21] Zeitzer J.M., Kronauer R.E., Czeisler C.A.: Photopic transduction implicated in human circadian entrainment. *Neurosci. Lett.* V232 (1997) P135-138.