

Einfluss des alternden Auges auf biologische Lichtwirkungen

Herr Univ.-Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz, TU Ilmenau

Einführung

Die demografische Altersentwicklung macht es absehbar, dass in Zukunft immer mehr ältere Personen im Arbeitsleben tätig sein werden. So waren 1985 die 21-jährigen und 2005 die 41-jährigen Personen die häufigste Altersgruppe im Erwerbsalter. 2050 werden es gemäß den Prognosen des Statistischen Bundesamts Deutschland die 62-jährigen sein. 33% der Bevölkerung wird dann älter als 65 sein (1985: 15%; 2005: 19%). Für Empfehlungen zur Beleuchtung am Arbeitsplatz wie auch in der Freizeit muss daher das Alter in zunehmendem Masse berücksichtigt werden. In diesem Beitrag werden die so genannten biologischen bzw. nichtvisuellen Lichtwirkungen in ihrer Altersabhängigkeit diskutiert. Es handelt sich dabei um durch Licht zusätzlich zur visuellen Wahrnehmung über das Auge bewirkte Veränderungen von Physiologie und Verhalten. Als Beispiele genannt seien die Unterdrückung der Melatoninproduktion der Zirbeldrüse durch Licht in der Nacht, die Anpassung der inneren biologischen Uhr (circadiane Rhythmik) an den äußeren Helligkeitswechsel von Tag und Nacht, sowie die aktivierende Wirkung von Licht. Es hat sich gezeigt, dass nichtvisuelle Wirkungen vorwiegend durch den kurzwelligen „blauen“ Bereich der Lichtspektren angeregt werden. Dies ist der Spektralbereich, der mit zunehmendem Alter infolge Vergilbung und Trübung der Augenlinse stark beeinträchtigt wird. Die Veränderungen der Wirksamkeit mit dem Alter sollen in diesem Beitrag für nichtvisuelle Wirkungen und zum Vergleich auch für visuelle Wirkungen mit unterschiedlichen Lichtquellen quantifiziert werden.

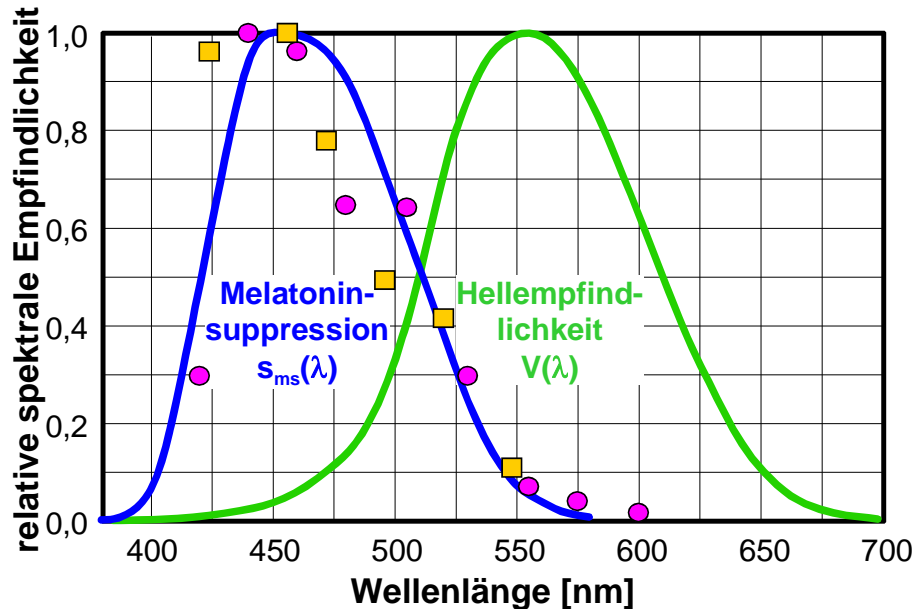
Spektrale Empfindlichkeit des Auges

Die spektrale Empfindlichkeit der Melatonin-Suppression zeigte sich gegenüber der bekannten spektralen Hellempfindlichkeit $V(\lambda)$ ins Blaue verschoben (Abb. 1). Zudem konnte gezeigt werden, dass eine ähnliche spektrale Empfindlichkeit auch für die zeitliche Stabilisierung der biologischen Uhr [12] und für die Steigerung des subjektiven und physiologischen Wachheitsgrades gelten muss [2]. Allerdings sind für diese beiden nichtvisuellen Lichtwirkungen noch keine vollständigen Kurven der Spektralempfindlichkeit bekannt. Daher stützen sich die spektralen Empfindlichkeiten für nichtvisuelle Wirkungen bislang auf diejenige der Melatonin-Suppression.

In der Lichttechnik und der Lampenindustrie gelangte in den letzten Jahren diese auf neu entdeckte Rezeptoren beruhende Spektralempfindlichkeit in den Fokus des Interesses. So wurde vorgeschlagen, die Verschiebung hin zum blauen Ende des Spektrums mit Hilfe eines Korrekturfaktors – einem so genannten Wirkungsfaktor – in der Photometrie zu berücksichtigen [4]. In Entwicklung und auf dem Markt befinden sich bereits Messgeräte, mit dieser Spektralempfindlichkeit [6][7]. 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. 1) 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).

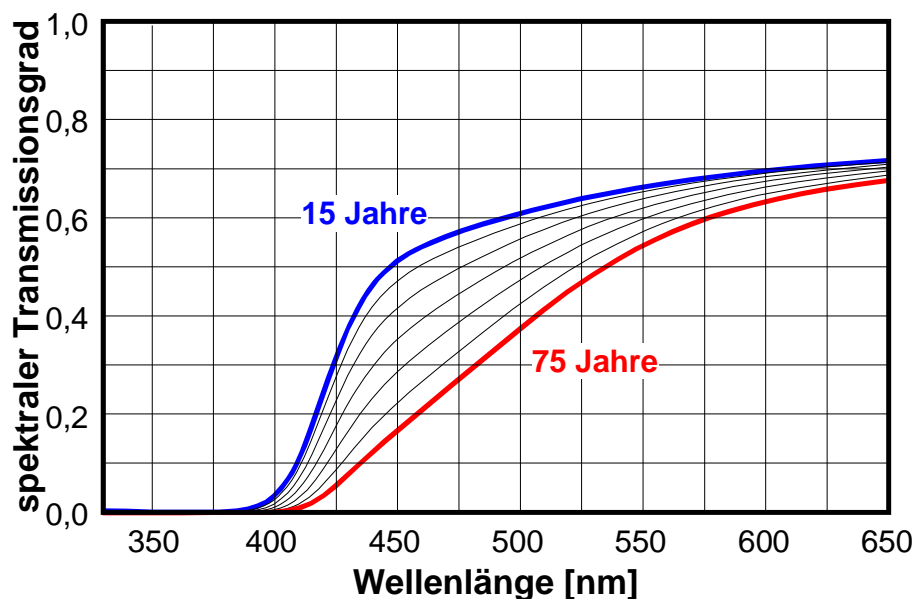
Abb. 1:
Spektrale Empfindlichkeit für Melatonin-Suppression $s_{ms}(\lambda)$ (nach Gall [4]), im Vergleich zur spektralen Hellempfindlichkeit $V(\lambda)$. Die Kreise entsprechen den Messdaten von Brainard et al. [1], die Quadrate denjenigen von Thapan et al. [9].



Wissenschaftliche Erkenntnisse deuten darauf hin, dass dies bei nichtvisuellen Wirkungen nur in erster Näherung gilt [3], 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 [13], was ebenfalls einer einfachen spektralen Integration widerspricht.

Spektrale Transmission des Auges

Abb. 2:
Spektraler, altersabhängiger Transmissionsgrad $\tau_{age}(\lambda)$ des Auges (berechnet nach [10]). 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 tageslichtweiße.



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, was sich teilweise durch den spektralen Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ des Auges beschreiben lässt (Abb. 2). Die Augenlinse erleidet mit zunehmendem Alter eine Gelbfärbung. Dies ist im spektralen Transmissionsgrad des Auges am Abfall im kurzwelligen Bereich des Spektrums zu erkennen.

Wie im vorangehenden Kapitel gezeigt, ist die spektrale Empfindlichkeit für nichtvisuelle Lichtwirkungen zwischen 430 und 460 nm, also im blauen Spektralbereich maximal (vgl. Abb. 1), 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.

Berechnung von altersabhängigen Korrekturfaktoren

Die Altersabhängigkeit der visuellen Wirkung von Licht kann dadurch quantifiziert werden, dass man die üblichen photometrischen Größen wie Beleuchtungsstärke oder Leuchtdichte mit einem altersabhängigen Korrekturfaktor $w_{\text{vis,age}}$ versieht. Die entsprechende Gleichung lautet:

$$w_{\text{vis,age}} = \frac{\int_{380}^{780} S_{\lambda}(\lambda) \cdot \frac{\tau_{\text{age}}(\lambda)}{\tau_{\text{vis}}(\lambda)} \cdot V^*(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{380}^{780} S_{\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad /1/$$

Dabei ist $S_{\lambda}(\lambda)$ das Lichtspektrum, beschrieben als spektrale strahlungsphysikalische Größe (z.B. spektrale Bestrahlungsstärke oder spektrale Strahldichte), $\tau_{\text{age}}(\lambda)$ der altersabhängige spektrale Transmissionsgrad des Auges (nach [10], siehe Abb. 2) und $V^*(\lambda)$ bzw. $V(\lambda)$ die spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion (siehe Abb. 1). Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass $V(\lambda)$ bereits eine spektrale Transmission $\tau_{\text{vis}}(\lambda)$ des Auges für ein bestimmtes Alter enthält. Durch diese Transmission wird daher im Zähler dividiert.

Welche Werte $\tau_{\text{vis}}(\lambda)$ hat bzw. für welches Alter die spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$ gilt, lässt sich leider nicht feststellen. Als die CIE 1924 $V(\lambda)$ festlegte, wurde der Altersabhängigkeit keine Aufmerksamkeit geschenkt [11]. Die Daten des für die Altersabhängigkeit kritischen Bereichs von 400 bis 490 nm stammen ursprünglich von Hartman [5], der über seine Versuchspersonen nur Folgendes aussagt: „In this series of visibility observations, measurements were made by twenty different individuals, all of whom were trained laboratory observers.“ Es ist zudem seit langem bekannt, dass die Werte in diesem Spektralbereich zu klein ausgefallen sind und es gab mehrere Versuche, eine korrigierte $V(\lambda)$ -Funktion zu entwickeln. Die neusten und bislang wohl besten Daten liefern Sharpe et al. [8] mit einer $V^*(\lambda)$ genannten Funktion für ein Alter von 33 Jahren. Es wäre nun sinnvoll, in Formel /1/ generell diese Funktion statt $V(\lambda)$ zu verwenden, sowie $\tau_{\text{vis}}(\lambda) = \tau_{33}(\lambda)$ zu setzen.

Leider wird heute in der Photometrie aber immer noch die Funktion $V(\lambda)$ vorausgesetzt, so dass ein Korrekturfaktor $w_{\text{vis,age}}$ auch für diese Funktion berechnet werden muss. Daher wird hier vorgeschlagen, in /1/ nur im Zähler $V^*(\lambda)$ zu verwenden, im Nenner aber weiterhin $V(\lambda)$

zu belassen. Dadurch korrigiert der Faktor $w_{\text{vis,age}}$ auch gleich die Abweichungen, hervorgerufen durch die fehlerhafte spektrale Hellempfindlichkeit $V(\lambda)$ ¹.

Die Altersabhängigkeit der nichtvisuellen Wirkung von Licht soll nun in analoger Weise mit einem Korrekturfaktor $w_{\text{nonvis,age}}$ quantifiziert werden:

$$w_{\text{nonvis,age}} = \frac{\int_{380}^{780} S_{\lambda}(\lambda) \cdot \frac{\tau_{\text{age}}(\lambda)}{\tau_{\text{nonvis}}(\lambda)} \cdot s_{\text{ms}}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{380}^{780} S_{\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad /2/$$

Hier wird anstelle von $V^*(\lambda)$ die spektrale Empfindlichkeit für Melatonin-Suppression $s_{\text{ms}}(\lambda)$ nach Gall [4] eingesetzt (siehe Abb. 1). Auch hier muss berücksichtigt werden, dass diese Funktion bereits einen spektralen Transmissionsgrad $\tau_{\text{nonvis}}(\lambda)$ enthält, durch den im Zähler von Formel /2/ dividiert werden muss. Das Alter der Versuchspersonen bei Brainard et al. [1] betrug im Mittel 24,5 Jahre; bei Thapan et al. [9] war es 27 Jahre. Da $s_{\text{ms}}(\lambda)$ hauptsächlich den Datenpunkten von Brainard et al. folgt, wird hier ein Alter von 25 Jahren vorausgesetzt: $\tau_{\text{nonvis}}(\lambda) = \tau_{25}(\lambda)$. Für 25-jährige Personen entspricht damit $w_{\text{nonvis,age}}$ dem bereits erwähnten Wirkungsfaktor $a_{\text{sm,v}}$, welcher von Gall [4] wie folgt definiert wurde:

$$a_{\text{sm,v}} = \frac{\int_{380}^{580} S_{\lambda}(\lambda) \cdot s_{\text{ms}}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{380}^{780} S_{\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad /3/$$

Mit den Formeln /1/ und /2/ berechnete Korrekturfaktoren $w_{\text{vis,age}}$ und $w_{\text{nonvis,age}}$ wurden für verschiedene Altersgruppen und Normlichtarten der CIE berechnet und in Abb. 3 dargestellt. Die Integration erfolgte über eine Summation mit 5 nm-Intervallen.

Diskussion

Die Werte von $w_{\text{nonvis,age}}$ fallen im Allgemeinen geringer aus als diejenigen von $w_{\text{vis,age}}$, da die Fläche unter der Kurve $s_{\text{ms}}(\lambda)$ kleiner ist als unter $V^*(\lambda)$. Will man dies vermeiden, könnten die Faktoren noch zusätzlich normiert werden, so dass sie z.B. für ein energiegleiches Spektrum und ein Alter von 25 gleich 1 werden. Dadurch verliert man aber den Zusammenhang mit der Praxis der Lichtmessung und mit dem Wirkungsfaktor, der bereits einige Verbreitung gefunden hat.

Es ist in Abb. 3 deutlich zu erkennen, dass der Korrekturfaktor für nichtvisuelle Wirkungen mit zunehmender ähnlichster Farbtemperatur T_n ansteigt; für visuelle Wirkungen ist dies nicht der Fall. Allerdings zeigt der Vergleich zwischen den Spektren mit $T_n = 5000$ K (CIE D50, F10 und F8), dass die Farbtemperatur nicht allein die nichtvisuelle Wirksamkeit bestimmt. Die Leuchtstofflampenspektren ergeben bis zu 19% geringere Werte als das Tageslicht.

¹ Die Korrektur dieser Abweichungen bedeutet eine Erhöhungen um 3,7% für Glühlampenlicht CIE A und um 5,5% für das Tageslichtspektrum CIE D80.

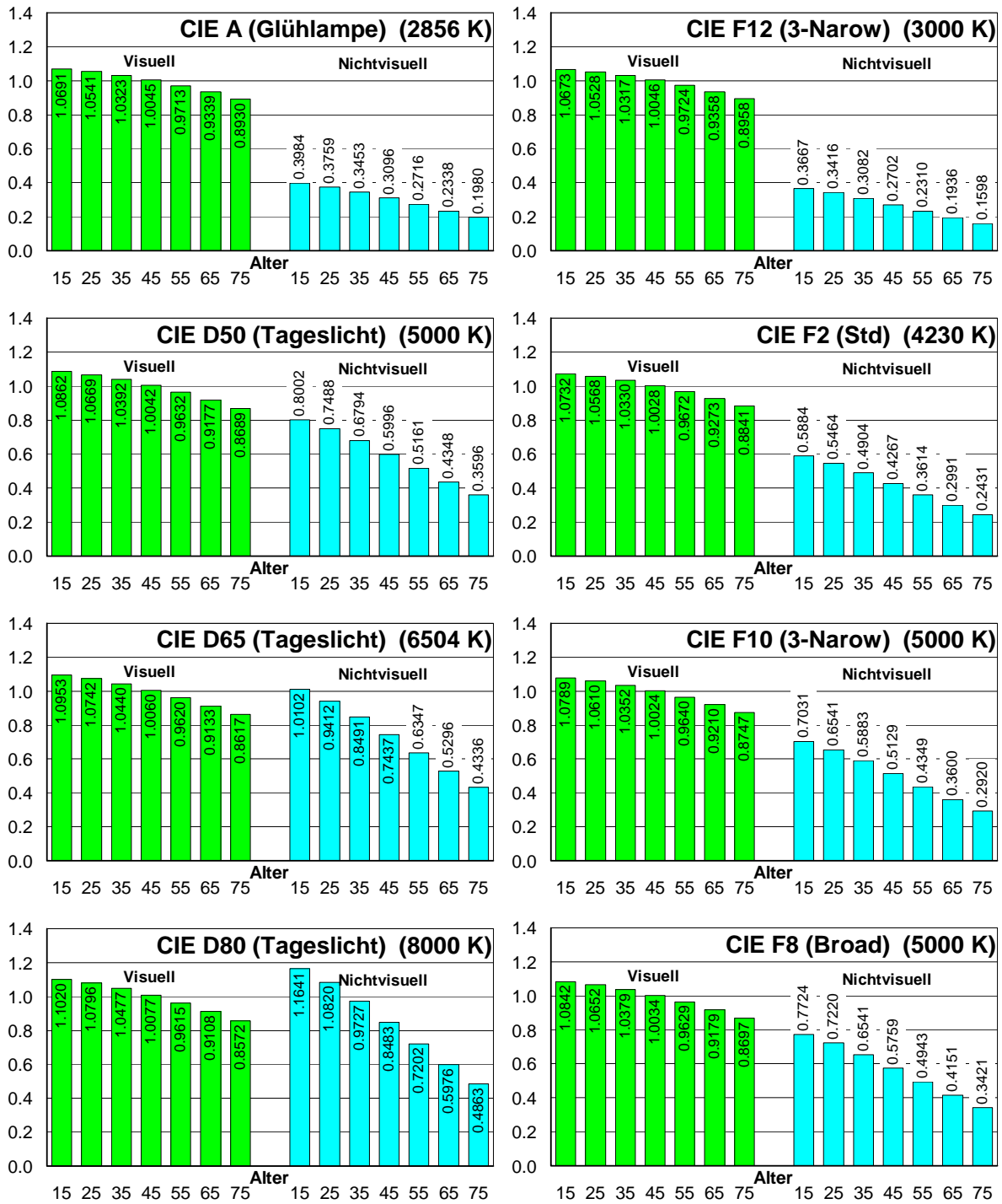


Abb. 3: Altersabhängige Korrekturfaktoren w von Licht unterschiedlicher Quellen für die visuelle Helligkeitswahrnehmung (Balken links) und für nichtvisuelle Melatonin-Suppression in der Nacht (Balken rechts). Die Balken rechts für nichtvisuelle Wirkungen bei 25-Jährigen entsprechen dem Wirkungsfaktor $a_{ms,v}$ der entsprechenden Lichtquelle.

Die Altersabhängigkeit ist bei den nichtvisuellen Wirkungen deutlicher ausgeprägt: Vom Alter 15 bis 75 reduzieren sie sich auf 50% bei der Glühlampe, bzw. auf 42% beim Tageslicht CIE D80. Bei den visuellen Wirkungen sinken die entsprechenden Werte auf 84% bzw. 78%. Für die nichtvisuellen Lichtwirkungen kann man daher von einem verdoppelten Lichtbedarf innerhalb dieser Altersspanne ausgehen. Bei den visuellen Wirkungen ist jedoch zu beachten, dass nicht nur der Transmissionsgrad der Augenmedien und damit die Netzhaut-Beleuch-

tungsstärke, sondern auch die übertragene Informationsmenge mit dem Alter geringer wird (z.B. durch Kontrastminderung, reduzierte Sehschärfe). Daher wird von älteren Personen oft eine höhere zusätzliche Lichtintensität benötigt als die 20 bis 30%, die sich auf Grund der Linsenalterung ergeben.

In dieser Arbeit wurden die Auswirkungen der Alterung der Augenmedien berücksichtigt. Es ist aber durchaus denkbar, dass auch bei den nichtvisuellen Lichtwirkungen zusätzliche Alterungserscheinungen auftreten können. Zum Beispiel könnte eine Reduktion der Anzahl oder der Sensitivität der Rezeptoren mit dem Alter vorliegen oder die nachgelagerte neuronale Verarbeitung verändert sich altersabhängig.

Danksagung

Ein Dank richtet sich an Herrn Dr. Ir. Luc Schlangen von Philips Lighting in Eindhoven, für die Diskussion zur Festlegung einer richtigen und sinnvollen Berechnungsmethode für die Korrekturfaktoren.

Literatur

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Gall, D.: Die Messung circadianer Strahlungsgrößen. Tagung Licht und Gesundheit 26. – 27.2.2004 Berlin (2004).
- [5] Hartman L.W.: The visibility of radiation in the blue end of the visible spectrum. *Astrophysical Journal* V47 (1918) P83-95.
- [6] 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.
- [7] 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).
- [8] Sharpe L.T., Stockman A., Jagla W., Jägle H.: A luminous efficiency function, $V^*(\lambda)$, for daylight adaptation. *Journal of Vision* V5 (2005) P948-968.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Viikari M., Eloholma M., Halonen L.: 80 years of $V(\lambda)$ use: a review. *Light & Engineering* V13 N4 (2005) P24-36.
- [12] 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.
- [13] Zeitzer J.M., Kronauer R.E., Czeisler C.A.: Photopic transduction implicated in human circadian entrainment. *Neurosci. Lett.* V232 (1997) P135-138.

Univ.-Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz
TU Ilmenau / Fachgebiet Lichttechnik
Postfach 100 565
98684 Ilmenau

christoph.schierz@tu-ilmenau.de