

# Licht für die ältere Bevölkerung – Physiologische Grundlagen und ihre Konsequenzen

Univ.-Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz

TU Ilmenau, Fakultät Maschinenbau, FG Lichttechnik, PF 100565, 98684 Ilmenau

christoph.schierz@tu-ilmenau.de

## 1. Einleitung

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 werden 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.

Es ist allgemein bekannt, dass das Sehvermögen auf verschiedenen Ebenen mit zunehmendem Alter abnimmt. So verlangt sogar die Norm EN 12464-1: „Der geforderte Wartungswert der Beleuchtungsstärke sollte erhöht werden, wenn das Sehvermögen der arbeitenden Person unter dem Durchschnitt liegt“. Die Anwendungspraxis zeigt aber ein anderes Bild: Beleuchtungsstärken werden an die unterste erlaubte Grenze gedrückt, Wartungsfaktoren unpraktikabel hoch angesetzt und auch die zunehmende Blendempfindlichkeit älterer Personen findet wenig ausdrückliche Berücksichtigung. Ziel dieses Beitrags ist es, die Lichtbedürfnisse älterer Personen in der Übersicht darzustellen, verbunden mit einem Plädoyer, diese einer unbedachten Energie- oder Kosteneffizienz überzuordnen.

## 2. Visuelle Lichtwirkungen: Sehleistung

Die Sehleistung ist neben dem visuellen Komfort eine der wichtigsten Größen, welche den Normen wie etwa EN 12464 für die Arbeitsplatzbeleuchtung oder EN 13201 für die Straßenbeleuchtung zu Grunde liegen. In Untersuchungen wird die Sehleistung durch die *Sehschärfe*, die *Kontrastempfindlichkeit* und die *Detektionsgeschwindigkeit* oder Kombinationen davon operationalisiert.

Die Sehschärfe ist das Vermögen des Auges, zwei Punkte in einer bestimmten Entfernung noch getrennt wahrnehmen zu können. Sie wird mit dem Kehrwert des Seh winkels (in Winkelminuten), bei dem das zu prüfende Auge zwei Punkte gerade noch getrennt wahrnimmt, beschrieben und heißt Visus. Ein normalsichtiges Auge kann zwei Punkte unter dem Winkel von einer Bogenminute ( $1'$ ) bei guten Sehverhältnissen noch unterscheiden (Visus = 1). Ein Visus von 0,8 gilt gerade noch als ausreichendes Auflösungsvermögen. Die Kontrastempfindlichkeit ist der Kehrwert des Schwellenkontrasts und hängt unter anderem vom Alter und von der Beleuchtung ab. Beim Schwellenkontrast wird ein Sehobjekt mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% gerade wahrgenommen.

Die Untersuchungen zur Sehschärfe und zum Schwellenkontrast lassen sich für definierte schwierige Sehaufgaben am Arbeitsplatz sehr gut in Form von Empfehlungen in die Praxis umsetzen. Um daraus Normwerte für allgemeine Sehaufgaben abzuleiten, die nicht im Voraus bekannt oder nicht genau definiert sind, werden jedoch Praxis- bzw. Sicherheitsfaktoren benötigt, denen ein nationaler oder heute z. T. auch internationaler Konsens zu Grunde liegt. Der Zusammenhang mit den ursprünglichen Sehleistungsuntersuchungen wird damit verschleiert /1/.

### 3. Nichtvisuelle Lichtwirkungen

Neben den visuellen, bildübertragenden Lichtwirkungen werden auch so genannte nichtvisuelle bzw. biologische oder energetische Lichtwirkungen in ihrer Altersabhängigkeit diskutiert. Es handelt sich dabei um durch Licht 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.

Für die nichtvisuellen Lichtwirkungen wird im Folgenden nur die Alterung der Augenmedien berücksichtigt. Es ist aber durchaus denkbar, dass 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. Darüber ist bis heute kaum etwas bekannt.

#### 3.1 Spektrale Empfindlichkeiten 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 /16/ und für die Steigerung des subjektiven und physiologischen Wachheitsgrades gelten muss /3/. Allerdings sind für diese beiden nichtvisuellen Lichtwirkungen noch keine vollständigen Kurven der Spektralempfindlichkeit bekannt. Daher stützen sich die spektralen Empfindlichkeiten für nichtvisuelle Lichtwirkungen bislang auf diejenige der Melatonin-Suppression.

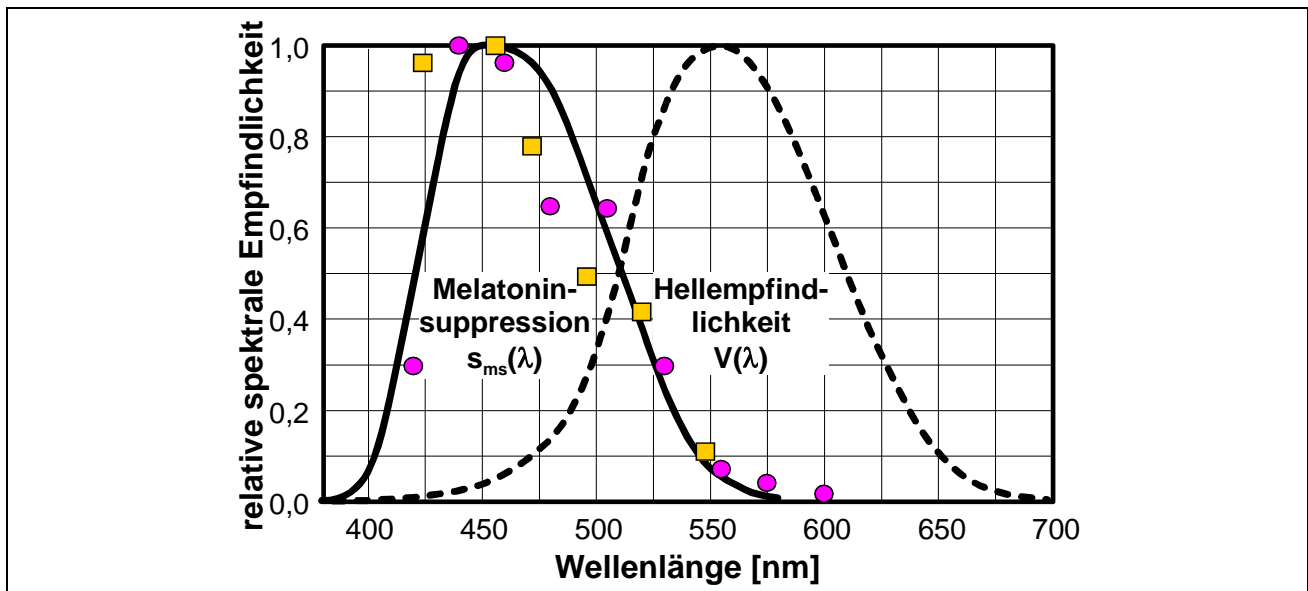


Abb. 1: Spektrale Empfindlichkeit für Melatonin-Suppression  $s_{ms}(\lambda)$  (nach Gall /8/), im Vergleich zur spektralen Hellempfindlichkeit  $V(\lambda)$ . Die Kreise entsprechen den Messdaten von Brainard et al. /2/, die Quadrate denjenigen von Thapan et al. /13/.

In der Lichttechnik und der Lampenindustrie gelangte in den letzten Jahren diese auf neu entdeckte Rezeptoren beruhende Spektralempfindlichkeit  $s_{ms}(\lambda)$  in den Fokus des Interesses. So wurde vorgeschlagen, die Verschiebung hin zum blauen Ende des Spektrums mit Hilfe eines so genannten Wirkungsfaktors  $a_{ms,v}$  in der Photometrie zu berücksichtigen /8/. Er wird wie folgt ermittelt:

$$a_{ms,v} = \frac{\int_{380}^{580} S_{\lambda}(\lambda) \cdot s_{ms}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{380}^{780} S_{\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (1)$$

Dabei ist  $S_{\lambda}(\lambda)$  das Lichtspektrum, beschrieben als spektrale strahlungsphysikalische Größe (z.B. spektrale Bestrahlungsstärke oder spektrale Strahldichte) und  $V(\lambda)$  die spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion. Der Wirkungsfaktor multipliziert mit z.B. der Beleuchtungsstärke oder der Leuchtdichte stellt ein Maß für die nichtvisuelle Lichtwirkung dar. In Entwicklung und auf dem Markt befinden sich bereits Messgeräte mit der Spektralempfindlichkeit  $s_{ms}(\lambda)$  /9//10/. Laufende Normungsarbeiten (DIN FNL 27) haben zum Ziel, diese Funktion 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). Wissenschaftliche Erkenntnisse deuten darauf hin, dass dies bei nichtvisuellen Wirkungen nur in erster Näherung gilt /7/, da Zapfen (oder auch Stäbchen) einen zusätzlichen Einfluss zu nehmen scheinen. Das Problem der fehlenden Additivität ist auch bei den visuellen Wirkungen bekannt und wird in der Praxis der Photometrie in Kauf genommen.

#### 4. Altersbedingte Veränderungen des Auges

Mit zunehmendem Alter verändern sich die Funktionalität der Augen und das Verhalten, mit meist negativen Folgen für die Sehleistung und die biologischen Lichtwirkungen:

- a) Reduktion des Transmissionsgrades der Augenmedien
- b) Gelbverfärbung der Augenlinse
- c) Zunahme der Lichtstreuzentren in den Augenmedien
- d) Abnahme des Akkommodationsbreite (Alterssichtigkeit)
- e) Abnahme der Funktionsfähigkeit der Netzhaut
- f) Verkleinerung der Pupillenweite
- g) Verändertes Freizeitverhalten auf Grund zunehmender Immobilität

Die Punkte a) und b) werden im folgenden Kapitel 4.1 diskutiert, der Punkt c) in Kap. 4.2 und die Punkte d) und e) in Kap. 4.3.

Die Verkleinerung der Pupillenweite hat zwar zur Folge dass bei 65-jährigen im Vergleich zu 25-jährigen rund 40% weniger Licht ins Auge gelangt /17/. Andererseits werden aber die Schärfentiefe des Auges größer und die Auswirkungen der optischen Fehler geringer, wodurch sich die Sehschärfe und damit die Sehleistung erhöht. Die altersbedingte Pupillenreduktion reduziert somit die nichtvisuellen Lichtwirkungen, während bei den visuellen Wirkungen je nach Umständen eine Verbesserung oder eine Verschlechterung möglich ist.

Das veränderte Freizeitverhalten in Form geringerer Mobilität kann zur Folge haben, dass ältere Personen weniger oft ins Freie und damit ans Tageslicht gelangen. Das ist insbesondere in Alten- und Pflegeheimen zu beobachten. Die negative Folge fehlenden Lichts sind vielfältig und betreffen via die nichtvisuellen Lichtwirkungen sowohl den affektiven Zustand als auch die Schlafeffizienz /11/.

#### 4.1 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, 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.

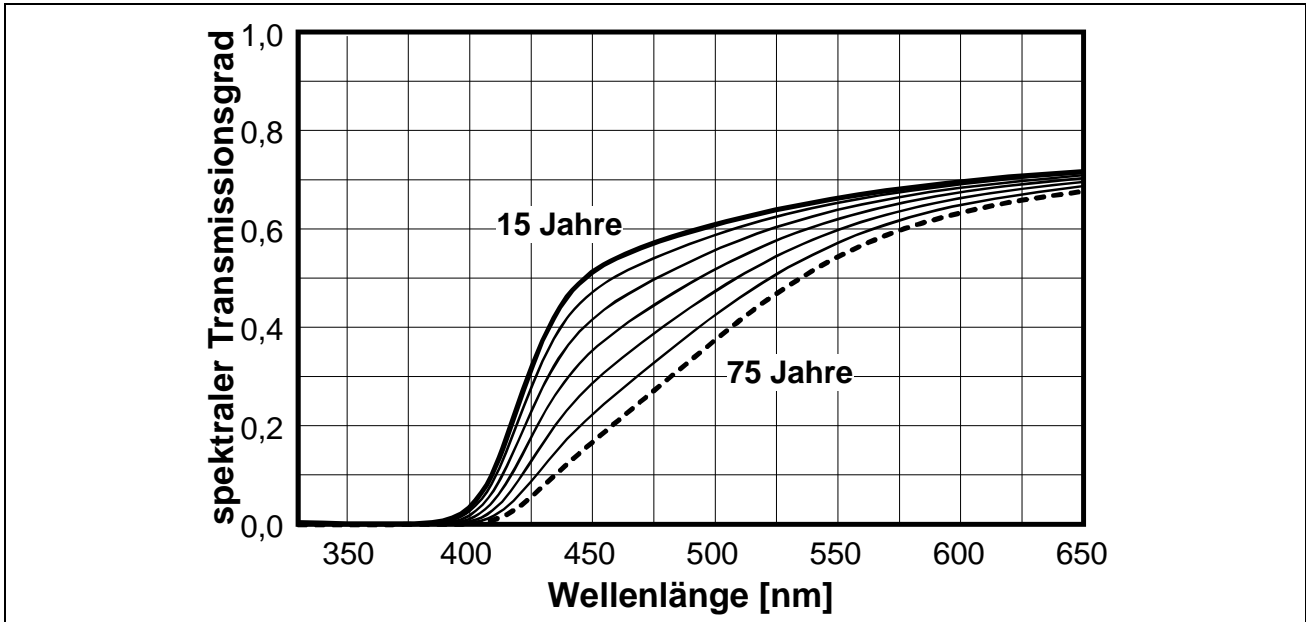


Abb. 2: Spektraler, altersabhängiger Transmissionsgrad  $\tau_{\text{age}}(\lambda)$  des Auges (berechnet nach /14/). Bereits in jungen Jahren gehen über 30% des Lichts in den Augenmedien, insbesondere in der Augenlinse verloren. Da die Kurven gegen das Blaue nach unten geneigt sind, ist der Transmissionsgrad generell für warmweiße Lichtquellen höher als für tageslichtweiße.

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 die nichtvisuellen Lichtwirkungen mehr Intensität als jüngere und auch mehr, als konventionelle photometrische Messungen erwarten lassen.

#### 4.2 Streulicht im Auge

Die Augenlinse ist aus Proteinlamellen aufgebaut. Kleine Unregelmäßigkeiten im Aufbau bewirken eine Streuung des Lichtes. Den selben Effekt bewirken kolloidal gelöste Makromoleküle, die sich im Glaskörper befinden. Das Streulicht überlagert sich dem Netzhautbild – bei starker Lichtintensität spricht man von physiologischer Blendung. Die Trübungen der Augenoptik nehmen durch Einwanderung roter Blutkörperchen (= Erythrozyten) und die Zunahme der Streuzentren im Alter zu. Dadurch werden ältere Personen für Blendung empfindlicher. Das beeinträchtigt sowohl die Sehleistung als auch den Sehkomfort.

#### 4.3 Auflösungsvermögen des Auges

Die Sehschärfe nimmt mit zunehmendem Alter ab (Abb. 3): Zum einen wird der Distanzbereich innerhalb dessen fokussiert werden kann (= Akkommodationsbreite) durch die Alterssichtigkeit geringer. Diese Abnahme kann durch eine Brille behoben werden. Zum anderen fallen im Laufe des Lebens aber auch Rezeptoren der Netzhaut aus, wodurch die Rezeptordichte und mit ihr die Sehschärfe abnimmt. Dies, wie auch die mit dem Alter zunehmenden Trübungen des Auges lassen sich nicht durch Brillen korrigieren.

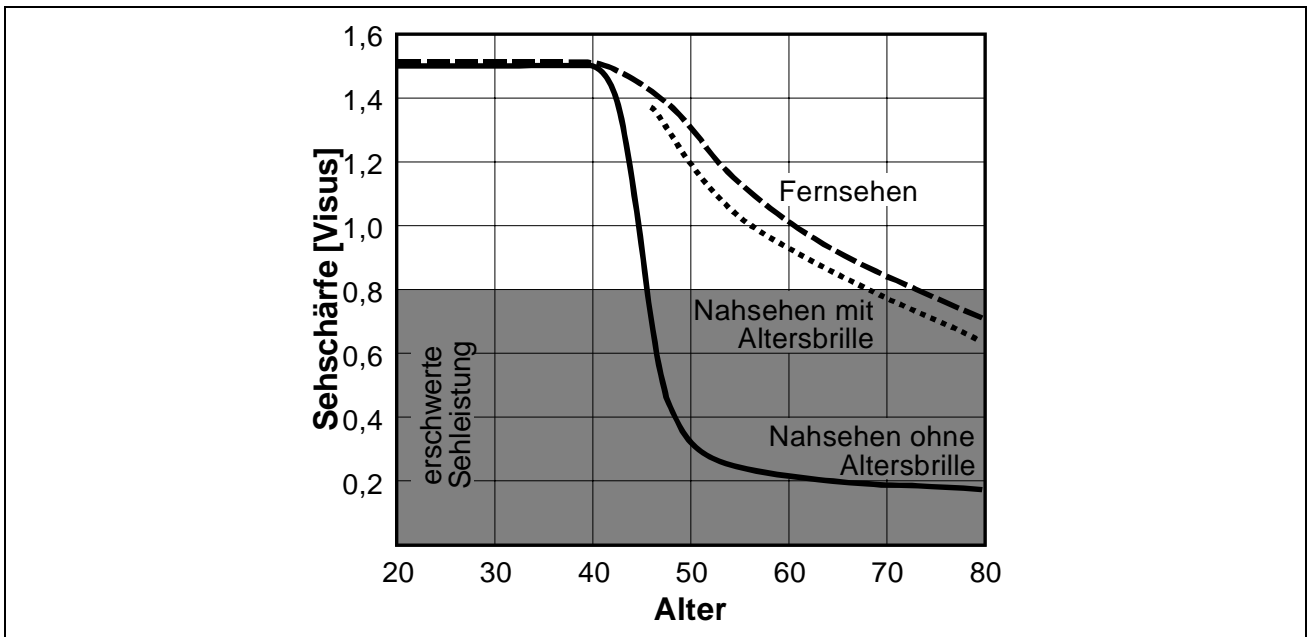


Abb. 3: Abnahme der Sehschärfe mit dem Alter mit und ohne Brillenkorrekturen. Das Nahsehen wird ohne Altersbrille nach dem 45. Lebensjahr zunehmend schlechter. Mit einer Sehschärfe unter 0,8 (grauer Bereich) ist das Sehen erschwert. Auch mit einer gut angepassten Altersbrille reduziert sich die Sehschärfe mit dem Alter und unterschreitet im Mittel ab etwa 68 Jahren die Grenze von 0,8.

## 5. Konsequenzen für die Beleuchtungsplanung

Die Schwächung der Lichtwirkung mit dem Alter kann dadurch quantifiziert werden, dass man die üblichen photometrischen Größen wie Beleuchtungsstärke oder Leuchtdichte mit einem altersabhängigen Schwächungsfaktor  $w_{\text{age}}$  versieht. D. h., für eine Person mit dem Alter „age“ beträgt z. B. die tatsächlich wirksame Beleuchtungsstärke  $E_{\text{age}} = E \cdot w_{\text{age}}$ . Will man diesen Verlust kompensieren, müssen vorgeschriebene photometrische Mindestwerte (z. B. Wartungswerte der Beleuchtungsstärke nach EN 12464-1) mit dem Kompensationsfaktor  $1/w_{\text{age}}$  multipliziert und dadurch dem Alter entsprechend erhöht werden. Über das Ausmaß der Kompensationen durch mehr oder weniger Licht geben die folgenden Kapitel Auskunft.

### 5.1 Berücksichtigung der reduzierten Transmission der Augenmedien

Berücksichtigt man nur den mit dem Alter sinkenden Transmissionsgrad der Augemedien, lautet die Gleichung für den Schwächungsfaktor der visuellen Wirkungen  $w_{\text{vis,age}}$ :

$$w_{\text{vis,age}} = k_{25} \cdot \frac{\int_{380}^{780} S_{\lambda}(\lambda) \cdot \frac{\tau_{\text{age}}(\lambda)}{\tau_{\text{vis}}(\lambda)} \cdot V^*(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{380}^{780} S_{\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (2)$$

Dabei ist  $\tau_{\text{age}}(\lambda)$  der altersabhängige spektrale Transmissionsgrad des Auges (nach /14/, siehe Abb. 2) und  $V^*(\lambda)$  bzw.  $V(\lambda)$  die spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion (siehe Abb. 1).  $k_{25}$  ist ein Normierungsfaktor, der bewirkt, dass  $w_{\text{vis,age}}$  für 25-jährige gleich 1 wird. 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 mehr feststellen, da die CIE 1924 das Alter der Testpersonen nicht berücksichtigt und publiziert hat /15/.

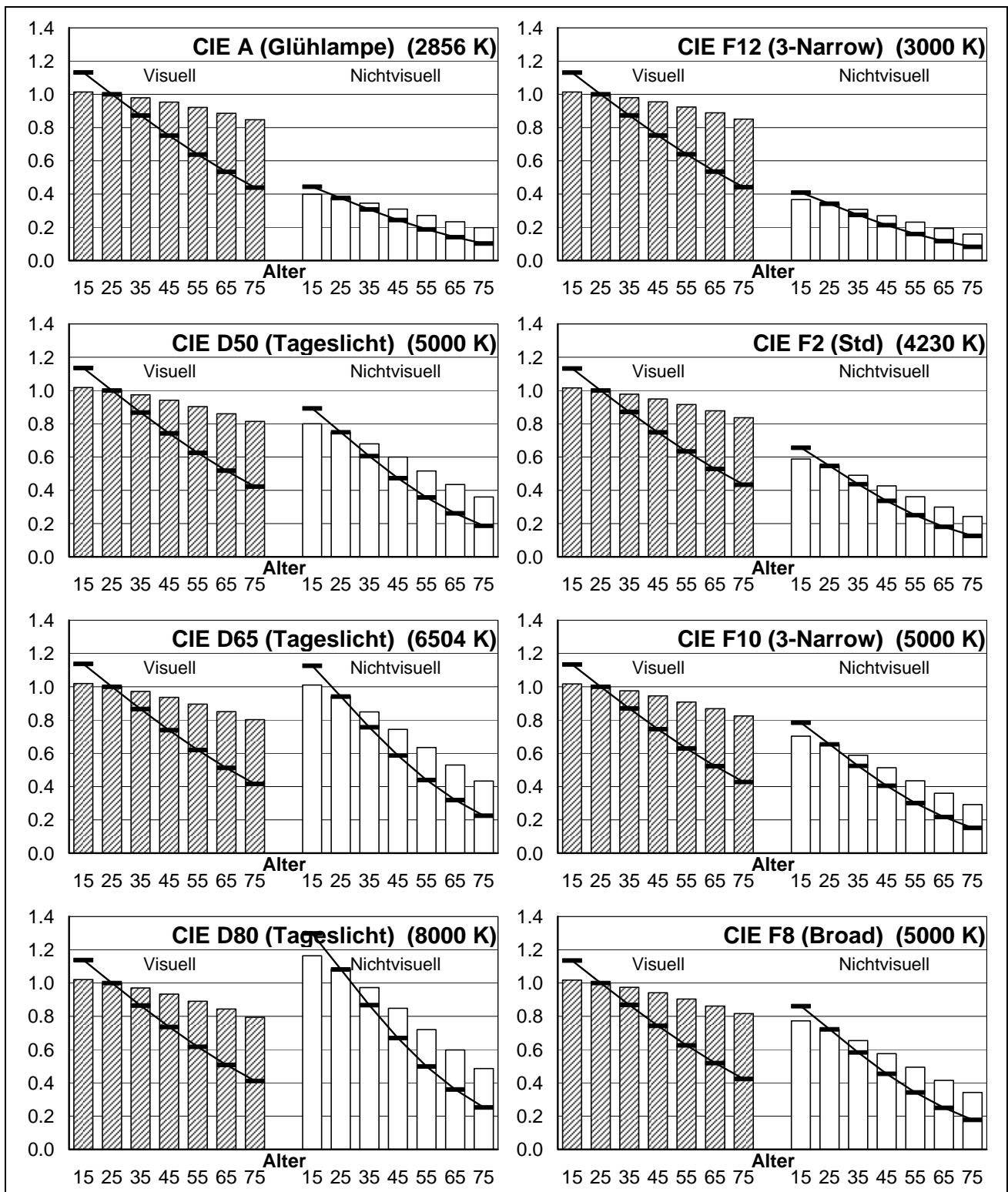


Abb. 4: Altersabhängige Schwächungsfaktoren  $w$  von Licht unterschiedlicher Quellen für die visuelle Helligkeitswahrnehmung (Balken links, nach Gl. (2)) und für nichtvisuelle Melatonin-Suppression in der Nacht (Balken rechts, nach Gl. (3)), ohne Berücksichtigung der Pupillenveränderung. Wird die Pupille zusätzlich berücksichtigt, ergeben sich Werte gemäß den horizontalen Balken. In Klammern ist die ähnlichste Farbtemperatur angegeben.

Es ist zudem seit langem bekannt, dass die Werte von  $V(\lambda)$  im unteren Spektralbereich zu klein ausgefallen sind und es gab mehrere Versuche, dies zu korrigieren. Die neusten und bislang wohl besten Daten liefern Sharpe et al. /12/ mit einer  $V^*(\lambda)$  genannten Funktion für ein Alter von 33 Jahren. Es wäre nun sinnvoll, in Gleichung (2) generell diese Funktion statt  $V(\lambda)$  zu verwenden, sowie  $\tau_{\text{vis}}(\lambda) = \tau_{33}(\lambda)$  zu setzen. Leider wird heute in der Photo-

metrie aber immer noch die Funktion  $V(\lambda)$  vorausgesetzt, so dass ein Schwächungsfaktor  $w_{vis,age}$  auch für diese Funktion berechnet werden muss. Daher wird hier vorgeschlagen, in (2) nur im Zähler  $V^*(\lambda)$  zu verwenden, im Nenner aber weiterhin  $V(\lambda)$  zu belassen. Dadurch korrigiert der Faktor  $w_{vis,age}$  nicht nur die Veränderung mit dem Alter sondern auch gleich die Fehler von  $V(\lambda)$ <sup>1</sup>.

Die Altersabhängigkeit der nichtvisuellen Wirkung von Licht kann nun in analoger Weise mit einem Schwächungsfaktor  $w_{nonvis,age}$  quantifiziert werden:

$$w_{nonvis,age} = \frac{\int_{380}^{580} S_{\lambda}(\lambda) \cdot \frac{\tau_{age}(\lambda)}{\tau_{ms}(\lambda)} \cdot s_{ms}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{380}^{780} S_{\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (3)$$

Hier wird anstelle von  $V^*(\lambda)$  die spektrale Empfindlichkeit für Melatonin-Suppression  $s_{ms}(\lambda)$  nach Gall /8/ eingesetzt (siehe Abb. 1). Auch hier muss berücksichtigt werden, dass diese Funktion bereits einen spektralen Transmissionsgrad  $\tau_{ms}(\lambda)$  enthält, durch den im Zähler von Gleichung (3) dividiert werden muss. Das Alter der Versuchspersonen bei Brainard et al. /2/ betrug im Mittel 24,5 Jahre; bei Thapan et al. /13/ war es 27 Jahre. Da  $s_{ms}(\lambda)$  hauptsächlich den Datenpunkten von Brainard et al. folgt, wird hier ein Alter von 25 Jahren vorausgesetzt:  $\tau_{ms}(\lambda) = \tau_{25}(\lambda)$ . Damit ist anders als in Gleichung (2) auch kein Normierungsfaktor  $k_{25}$  erforderlich und der Schwächungsfaktor wird für 25-jährige Personen gleich dem Wirkungsfaktor gemäß Gleichung (1):  $w_{nonvis,age} = a_{ms,v}$ .

Mit den Gleichungen (2) und (3) berechnete Schwächungsfaktoren  $w_{vis,age}$  und  $w_{nonvis,age}$  wurden für verschiedene Altersgruppen und Normlichtarten der CIE berechnet und in Abb. 4 dargestellt. Die Integration erfolgte über eine Summation mit 5 nm-Intervallen. Die Werte von  $w_{nonvis,age}$  fallen im Allgemeinen geringer aus als diejenigen von  $w_{vis,age}$ , da die Fläche unter der Kurve  $s_{ms}(\lambda)$  kleiner ist als unter  $V^*(\lambda)$ .

Tab. 1: Reduktion der Beleuchtungsstärke auf der Netzhaut während der Altersspanne von 25 bis 65 Jahren, jeweils ohne und mit Berücksichtigung der altersbedingten Verengung der Pupille für zwei extreme Lichtspektren.

	Altersbedingte Pupillenverengung berücksichtigt?	Visuelle Lichtwirkung	Nichtvisuelle Lichtwirkung
Glühlampe CIE A	Nein	89%	62%
	Ja	53%	37%
Tageslicht CIE D80	Nein	84%	55%
	Ja	51%	33%

Es ist in Abb. 4 deutlich zu erkennen, dass der Schwächungsfaktor 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 bei gleicher Farbtemperatur bis zu 20% geringere Werte als das Tageslichtspektrum. Die Altersabhängigkeit ist bei den nichtvisuellen Wirkungen ausgeprägter (siehe Abb. 4 und Tab. 1) und es bedarf nach einer Altersspanne von 25 bis 65 Jahren den dreifachen Wert der nichtvisuell-spektral bewerteten Strahlungsgröße.

<sup>1</sup> Die Korrektur dieser Fehler bedeutet eine Erhöhungen um 3,7% für Glühlampenlicht CIE A und um 5,5% für das Tageslichtspektrum CIE D80. Bei spektral schmalbandigen Lichtquellen um 405 nm beträgt die Abweichung mehr als einen Faktor 6 (allerdings ist für solche schmalbandige, farbige Lichtquellen die konventionelle Photometrie mit  $V(\lambda)$  oder auch  $V^*(\lambda)$  ohnehin nicht anwendbar).

## 5.2 Berücksichtigung reduzierter Kontrastempfindlichkeit und Sehschärfe

In Kap. 5.1 wurde ersichtlich, dass die Reduktion des Transmissionsgrades der Augenmedien mit dem Alter zwar bei den nichtvisuellen Lichtwirkungen bedeutend sein kann, bei den visuellen Wirkungen den Verlust der Sehleistung aber nicht allein erklärt. Soll nicht nur die Beleuchtungsstärke auf der Retina erhalten bleiben, sondern auch die Kontrastempfindlichkeit oder sogar die Sehschärfe, muss mit einem größeren zusätzlichen Lichtbedarf gerechnet werden (Abb. 5). Es ist sogar fraglich, ob eine alleinige Erhöhung der Beleuchtungsstärke für eine Kompensation des Alterseinflusses überhaupt ausreicht.

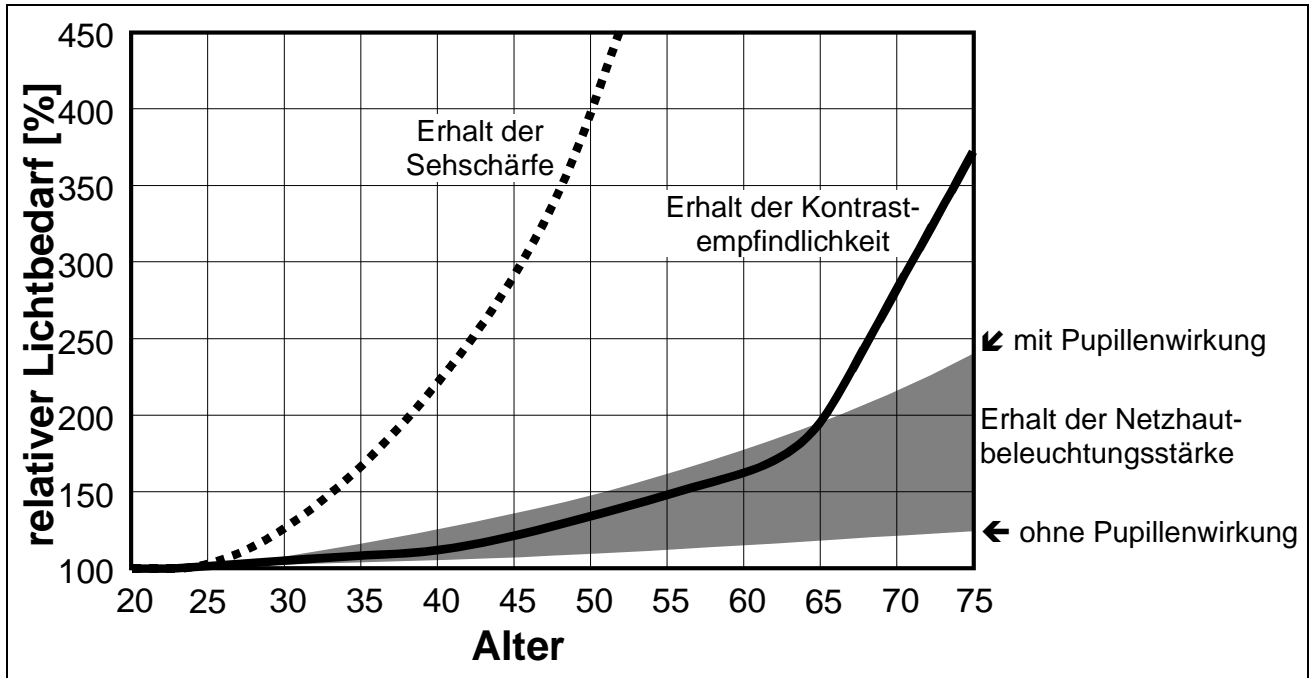


Abb. 5: Erforderlicher relativer Lichtbedarf, um mit zunehmendem Alter unterschiedliche Zielgrößen auf dem Niveau von 25-jährigen zu halten. Graue Fläche: Erhalt der Beleuchtungsstärke auf der Netzhaut durch Kompensation der altersbedingten Transmissionsverluste, mit und ohne Berücksichtigung der Pupillenverengung im Alter. Soll die Kontrastempfindlichkeit (Visibility) erhalten bleiben, ist mit 65 Jahren im Vergleich zu 25-jährigen eine Verdoppelung der Beleuchtungsstärken erforderlich. Eine Bewahrung der Sehschärfe ist mit höheren Beleuchtungsstärken allein nicht möglich, da die sehr großen Werte auch Blendung verursachen. (Berechnet nach /4/ für die Sehschärfe, nach /5/ für die Kontrastempfindlichkeit und nach Gleichung (2) für die Netzhautbeleuchtungsstärke.)

## 5.3 Berücksichtigung der Blendempfindlichkeit

Das das Netzhautbild überlagernde, im Auge erzeugte Streulicht kann nach der Stiles-Holladay-Formel als so genannte äquivalente Schleierleuchtdichte  $L_{s\ eq}$  aus der Blendbeleuchtungsstärke  $E_{bl}$  am Auge, dem Blendwinkel  $\Theta$  (zwischen  $1^\circ$  bis  $30^\circ$ ) und dem Alter  $A$  beschrieben werden /6/ (siehe dort auch Formeln für Blendwinkel von  $0,1^\circ$  bis  $100^\circ$ ):

$$L_{s\ eq} = \left(1 + \frac{A}{70}\right)^4 \cdot \frac{E_{bl}}{\Theta^2} \quad (4)$$

Damit verringert sich der Kontrast  $C$  zwischen einem Sehobjekt mit Leuchtdichte  $L_O$  in einem Umfeld mit Leuchtdichte  $L_U$  gemäß folgender Gleichung:

$$C = \frac{|L_U - L_O|}{L_U + L_{s\ eq}} = \frac{\left|1 - \frac{L_O}{L_U}\right|}{1 + \frac{L_{s\ eq}}{L_U}} \quad (5)$$



Wenn das Verhältnis  $L_O / L_U$  wie bei reflektierenden Sehaufgaben unabhängig von Änderungen der Beleuchtungsstärke ist, treten die Umfeldleuchtdichte und die äquivalente Schleierleuchtdichte direkt in Konkurrenz: Je höher die Schleierleuchtdichte, desto geringer und je höher die Umfeldleuchtdichte desto größer wird der Kontrast.

Für ältere Personen kann man nun versuchen, durch geschickte Wahl der Leuchtdichte-Verteilung bzw. der Lichtrichtungen die Umfeldleuchtdichte gemäß den zuvor diskutierten Anforderungen zu erhöhen und die Blendbeleuchtungsstärke  $E_{bl}$  am Auge so zu verringern, dass die altersbedingte Zunahme des Streulichts kompensiert und damit die Schleierleuchtdichte  $L_{s\ eq}$  konstant gehalten wird (Abb. 6).

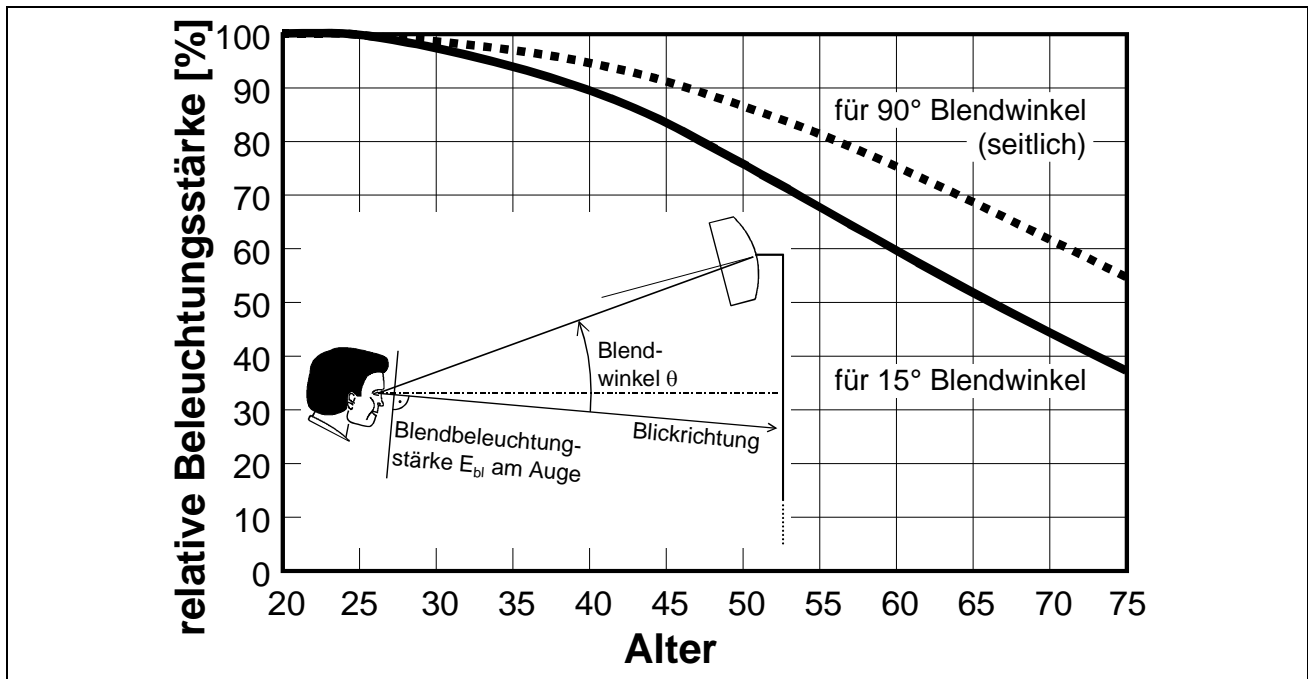


Abb. 6: Erforderliche relative Blendbeleuchtungsstärke  $E_{bl}$  am Auge bei gegebenem Blendwinkel, um mit zunehmendem Alter die äquivalente Schleierleuchtdichte wie im Alter von 25 Jahren zu halten (berechnet nach /6/). Beispiel: Die Beleuchtungsstärke am Auge einer 60-jährigen Person muss auf 60% vermindert werden, damit physiologische Blendung gleich stark auftritt wie bei 25-jährigen. Die Lichtreduktion mit dem Alter ist vom Blendwinkel abhängig. Blendquellen, welche unter einem Winkel von ca. 15° zur Blicklinie erscheinen, ergeben die größte Altersabhängigkeit (das heißt aber nicht die größte Blendwirkung, welche gemäß Gl. (4) mit abnehmendem Winkel stetig ansteigt). Nicht berücksichtigt ist, dass ältere Personen meist eine Brille tragen, die zusätzliche Blendwirkungen auslösen kann.

## 6. Diskussion

Für die visuellen Wirkungen können viele der genannten Veränderungen mit dem Alter durch größere Leuchtdichten bzw. Beleuchtungsstärken auf den Sehaufgaben kompensiert werden. Die erhöhte Blendempfindlichkeit hingegen verlangt nach einer Reduktion der Beleuchtungsstärke am Auge. Für die nichtvisuellen Wirkungen wiederum werden höhere Leuchtdichten im Gesichtsfeld benötigt. Diese auf den ersten Blick widersprüchlichen Anforderungen können nur erfüllt werden, wenn man in einer Lichtplanung für die ältere Bevölkerung nicht nur das allgemeine Beleuchtungsniveau berücksichtigt, sondern auch örtlich und zeitlich differenziert: Licht auf der Sehaufgabe ist von Licht am Auge zu unterscheiden; nichtvisuelle Lichtwirkungen dürfen nicht dauernd über den ganzen Tag aktiviert werden. Das bedeutet, dass für ältere Personen noch mehr als für jüngere eine individuell einstellbare und der jeweiligen Tätigkeit und Tageszeit anpassbare Beleuchtung vorzusehen ist. Dies kann von einer einfachen verstellbaren Tischleuchte bis zu dynamisierten Lichtsteuerungsanlagen reichen.

Generell stellen die physiologischen Veränderungen des Sehorgans für ältere Personen eine zunehmende Behinderung beim Sehen von Objekten, der Wahrnehmung von Farben und der Steuerung des Wach-Schlaf-Rhythmus' dar. Durch die diskutierten Maßnahmen bei der Beleuchtung, könnten viele dieser Veränderungen teilweise oder ganz kompensiert werden. Einige der derzeitigen Vorgaben zur Planung von energieeffizienten Beleuchtungsanlagen laufen aber genau in die umgekehrte Richtung. Ältere Personen werden dadurch daran gehindert, in angemessener Weise am Arbeitsleben und am gesellschaftlichen Leben teilnehmen zu können. Vorschriften, welche Energie- und damit Lichteinsparungen an falscher Stelle verlangen, erhöhen nicht nur die sozialen Kosten, sondern stellen damit auch eine Diskriminierung der älteren Bevölkerung dar, welche eigentlich gemäß der europäischen Charta der Menschenrechte verboten ist.

## 7. Literatur

- /1/ Boyce P. R.: Illuminance selection based on visual performance – and other fairy stories. Proceedings of the Annual Conference of the Illuminating Engineering Society of North America IESNA, New York, NY (July 29-31, 1995).
- /2/ 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.
- /3/ 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.
- /4/ CIE: Guidelines for Accessibility – Visibility and lighting Guidelines for Older Persons and Persons with Disabilities. Draft No. 4 (2007).
- /5/ CIE: An analytical model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance. CIE Publ. No. 19/2.1 (1981).
- /6/ CIE: CIE equations for disability glare. CIE Publ. No. 146 in: CIE collection on glare (2002).
- /7/ 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.
- /8/ Gall, D.: Die Messung circadianer Strahlungsgrößen. Tagung Licht und Gesundheit 26. – 27.2.2004 Berlin (2004).
- /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/ Riemersma-van der Lek R.F., Swaab D.F., Twisk J., Hol E.M., Hoogendijk W.J. G., Van Someren E.J.W.: Effect of Bright Light and Melatonin on Cognitive and Noncognitive Function in Elderly Residents of Group Care Facilities. *JAMA* V299 N22 (2008) P2642-2655.
- /12/ 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.
- /13/ 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.
- /14/ 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.
- /15/ Viikari M., Eloholma M., Halonen L.: 80 years of  $V(\lambda)$  use: a review. *Light & Engineering* V13 N4 (2005) P24-36.
- /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/ Winn B., Whitaker D., Elliott D.B., Phillips N.J.: Factors Affecting Light-Adapted Pupil Size in Normal Human Subjects. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* V35 (1994) P1132-1137.