

# Altersverlust der Wachheitssteuerung durch Gelb- (580 nm), aber nicht durch Blaulicht (460 nm)

K. Gerstmeyer, S. Lehl, S. Bleich, J. Kornhuber

## Zusammenfassung

**Hintergrund:** Blaues Licht (460 nm) scheint schon bei geringerer Intensität als andere Farben die Wachheit zu beeinflussen. Da mit zunehmendem Alter eine Linsentrübung mit vermehrter Blaulichtabsorption häufiger wird, müsste es zutreffen, dass bei der Mehrheit der Erwachsenen die Steuerung der Wachheit unter Blaulicht weniger als bei Licht anderer Wellenlänge abnimmt.

**Methode:** Nachanalyse der Daten von zwei Feldexperimenten ( $n = 44$ ; 17–79 Jahre;  $n = 114$ , 15–82 Jahre). Der Einfluss von Blau (460 nm), Gelb (580 nm) sowie Licht weiterer Wellenlängen auf Wachheitsgrade wurde gemessen.

**Ergebnisse:** In beiden Studien korrelieren Alter und Wachheitsgrad bei Gelb und anderen Farben signifikant, aber nicht bei Blau.

**Schlussfolgerung:** Bei vielen Senioren wird wegen deren hoher Sensitivität von Blau die Wachheit und folglich kognitive Leistungsfähigkeit wie bei jüngeren Erwachsenen gesteuert. Diesen gegenüber sind Senioren hingegen bei Lichtquellen anderer Wellenlänge benachteiligt.

**Schlüsselwörter:** Wachheit, Blaulicht, Gelblicht, Katarakt, Senioren

## Summary

**Background:** Compared to other colors blue light with a wavelength of 460 nm seems to affect alertness at a much lower level of intensity. As lens opacities increase with age it would be expected that the alertness of seniors is less reduced by blue light than by light of other wavelengths.

**Methods:** Post-analysis of data from two field experiments ( $n = 44$ ; 17–79 years of age;  $n = 114$ , 15–82 years of age). In both studies the effect of blue (460 nm), yellow (580 nm), and additional colors upon alertness had been measured.

**Results:** In both experiments age and degree of alertness significantly correlate under yellow and further colors, not, however, under blue (by light and reflection of hued paper).

**Conclusion:** Although many seniors suffer from reduced transparency of the crystalline lens, due to their high sensitivity of blue (around 460 nm) their alertness and consequently cognitive performance is regulated like that of younger adults. In contrast to those, however, seniors are in disadvantage with light resources of different wave lengths.

**Keywords:** Alertness, blue light, yellow light, cataract, seniors

## Hintergrund und Fragestellung

Kürzlich gefundene retinale Ganglienzellen (ipRGCs, inner photoreception retinal ganglion cells) sind mit hoher Wahrscheinlichkeit die Rezeptoren eines nonvisuellen photosensiblen Systems, das speziell auf Blaulicht mit einer Wellenlänge um 460 nm reagiert [2, 3, 12, 16, 21].

Neben der Steuerung der circadianen Rhythmik konnte mehrfach durch psychophysische Untersuchungen belegt werden, dass Blaulicht dieser Wellenlänge günstige Wirkungen auf aktivitätseingeschränkte Senioren, auf Wach-/Schlafstörungen, auf Leistungs- und Befindensminderungen, auf psychiatrisch behandlungsbedürftige Depressionen sowie Symptome von Alzheimererkrankungen hat [9, 10].

Eigene Untersuchungen zeigen einen Einfluss von Blaulicht im Sekundenbereich auf das subjektiv beurteilte Wachheitsempfinden und die objektiv gemessene Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit auf [14]. Neueste Arbeiten mit bildgebenden Verfahren konnten dies qualitativ und quantitativ bestätigen [22, 23].

Die praktische Bedeutung dieser Ergebnisse kann darin liegen, die kognitive Leistungsbereitschaft und -fähigkeit von Menschen zielgerichtet mit Blaulicht rasch anzuheben, wo sie sonst anderen Beleuchtungsspektren ausgesetzt sind und zudem – oder deshalb – ein niedrigeres Wachheits- und geistiges Leistungsniveau als erwünscht haben [9, 10]. Denn dies hat Relevanz für die Funktionsfähigkeit der modernen Wissensgesellschaft, die auf der kognitiven Leistungsfähigkeit ihrer Bürger basiert [13, 17].

## Altersbezogene Lichteinwirkungen auf die Wachheit

Bei der Mehrheit der Erwachsenen treten altersbedingte Linsentrübungen auf [18, 20]. Parallel zum Transparenzverlust der Linse erfolgt eine vermehrte Absorption kurzwelliges Lichtes [1]. Eine senile Miosis sowie der bevorzugte Aufenthalt von Senioren in geschlossenen Räumen mindern zusätzlich das Ausmaß der retinalen Lichtexposition, sodass ein negativer Einfluss auf die Wachheitsregulierung vorstellbar ist [1, 4, 15, 16, 19, 22, 23].

Blau mit Wellenlängen um 460 nm wirkt im Vergleich zu Licht anderer Wellenlängen bereits bei geringer Intensität sehr anregend [5, 12, 19, 22, 23]. Somit könnte trotz einer möglicherweise subtotalen optischen Medientrübung die verbliebene Blautransmission noch ausreichen, um die wachheitsanregende Wirkung zu entfalten [1, 4, 16, 22, 23].

## Probanden und Methoden

### Untersuchungsdesigns und Messmethode

Für die sich erst jetzt ergebende Fragestellung einer altersabhängigen Steuerung der Wachheit durch Blaulicht liegen uns für eine statistische Nachanalyse Daten von zwei selbst durchgeführten Feldexperimenten vor [11, 14, 15]. Es handelt sich um offene kontrollierte longitudinale Studien an den Teilnehmern kostenloser öffentlicher Veranstaltungen der Medizinischen Fakultät der Universität Erlangen im Rahmen der BrainWeek im Jahre 2006 und 2007.

Vor und nach mehreren Farblichtexpositionen mit verschiedenen Wellenlängen sollten die Besucher den gegenwärtigen Wachheitsgrad anhand folgender Selbstbeurteilungsskala (= Alertometer) einschätzen: Ich fühle mich jetzt

1 = sehr schläfrig; 2 = schläfrig; 3 = entspannt, aber wach; 4 = voll wach; 5 = etwas angespannt; 6 = stark angespannt, 7 = panisch.

### **Versuchsannahmen**

Beide Versuche wurden an Personengruppen durchgeführt, deren Alter zwischen 15 und 82 Jahren stark streute, die aber zahlenmäßig große Teilgruppen von Senioren umfassten: Altersmediane 63,5 bzw. 51,0 Jahre. Es wird unterstellt, dass bei den Älteren – den bevölkerungsbasierten Prävalenzstudien folgend – Linsentrübungen häufiger und intensiver vorkamen. Sollte dies nicht zutreffen, würden die unten folgenden Hypothesen ohnehin statistisch widerlegt.

Unter den angeführten Voraussetzungen lässt sich für die Versuchsbedingung „monochromatisches Blaulicht der Wellenlänge 460 bis 480 nm“ gegenüber andersfarbigen Expositionen annehmen, dass die Wachheit des Durchschnitts der älteren Personen im Vergleich zu jüngeren Erwachsenen nicht so sehr davon beeinträchtigt ist, weil die Wachheit bereits von einer geringen Intensität jenes Blaulichts beeinflusst wird. Unter andersfarbigen Bedingungen müsste der Wachheitsunterschied zwischen Älteren und Jüngeren hingegen größer werden. Mit zunehmendem Alter müsste die Wahrscheinlichkeit zunehmen, dass Blau und andere Farben eine unterschiedliche Wirkung auf den Wachheitsgrad haben. Deshalb formulieren wir für beide Studien die folgende Versuchshypothese: Die Korrelation zwischen Alter und Wachheitsgrad ist unter dem Einfluss von Blau der Wellenlänge 460 bis 480 nm geringer als unter andersfarbigen Bedingungen.

### **Probandeninformation und Statistik**

Den Teilnehmern waren die Fragestellungen vor den Versuchen nicht mitgeteilt worden. Am Versuchsende wurden sie gebeten, ihre bearbeiteten Unterlagen für eine statistische Auswertung zur Verfügung zu stellen, weil daraus wissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen werden könnten. Bei der Ermittlung der Statistiken wurden nonparametrische gegenüber parametrischen Verfahren bevorzugt, weil sie geringere Ansprüche an die Dateneigenschaften und -verteilungen stellen. Für die Berechnungen fand das SPSS-System, Version 12, Anwendung.

## **Ergebnisse**

### **Blaulichtstudie**

Diese Studie umfasste 44 Probanden im Alter von 17 bis 79 Jahren (md = 63,5 Jahre; 39,6 % männl.). Die Teilnehmer wurden verschiedenen Beleuchtungsspektren ausgesetzt. Das Raumlicht war ein gelbliches Licht, bei dem man auf dem Sitzplatz der Zuhörer mitschreiben und Schriften lesen konnte. Für die anderen Beleuchtungen wurde der Hörsaal, ein fensterloser Innenraum, völlig abgedunkelt. Dann wurde er mit jeweils einer von drei Leuchtstoffröhren (Blau 460 nm, Gelb 580 nm,

Weiß) mit der Leistung von 18 Watt (1.400 Lumen) beleuchtet. Alle zwei Minuten fanden Beleuchtungswechsel in dieser Reihenfolge statt: Raumlicht (0''–20''), Gelblicht (580 nm; 2'0''–2'20''), Blaulicht (460 nm; 4'0''–4'20''), Weißlicht (6'0''–6'20''), Blaulicht (8'0''–8'20'') und schließlich wieder Gelblicht (10'0''–10'20'').

Nachdem diese Beleuchtungen je 20 Sekunden auf sie eingewirkt hatten, wurden die Teilnehmer gebeten, ihre subjektive Wachheit auf dem Alertometer einzuschätzen. Näheres zum Versuch steht andernorts [14].

### **Blaulichreflexionsstudie**

115 Probanden nahmen an der Studie teil. Ihr Alter lag zwischen 15 und 82 Jahren (Median 51,0 Jahre; 50,4 % männl.). Die Probanden erhielten je vier Blätter. Oben auf befand sich ein weißes Deckblatt (DIN A4, 80 g) für Angaben zur Person und zur Einschätzung des Wachheitsgrades. Darunter befanden sich in unterschiedlicher Reihenfolge drei „Farb“-Blätter (DIN A4, 120 g) in Blau (460 nm), Gelb (580 nm) und Grau. Jeder Proband erhielt eine Serie. Hier interessierte nur der Personenzustand nach Bearbeitung des Deckblattes und des ersten Folgeblattes. Alle Farbblätter enthielten mentale Aktivierungsübungen, deren Bearbeitung 120 s dauerte. Das weiße Raumlicht war relativ hell eingestellt, damit alle Teilnehmer ihre Vorlagen auf dem Platz gut sehen konnten. Unter diesen Umständen beurteilten die Teilnehmer (n = 115) die Lesbarkeit der Texte als sehr gut: 63,6 %; gut: 29,9 %; einigermaßen: 5,6 %; schlecht: 0,9 %.

### **Hypothesenprüfungen**

Tabelle 1 enthält die Rangkorrelationen zwischen Alter und Wachheitsgrad unter den verschiedenen Versuchsbedingungen der Blaulichtstudie. Zur Reliabilitätserhöhung und zur Vermeidung von Positionseffekten waren die beiden Messungen unter Blau- und Gelbexposition gemittelt worden. Unter Blaulicht korreliert der Wachheitsgrad mit dem Alter nicht signifikant, während diese Beziehungen unter den anderen Beleuchtungsbedingungen signifikant sind.

Der Determinationskoeffizient, der als Annäherung von  $r^2$ , wobei r dem Pearson-Korrelationskoeffizient entspricht, durch Quadrierung der Rangkorrelation ermittelt wurde, gibt einen Eindruck vom prozentualen Zusammenhang der Varianzen von Alter und Wachheit. Er beträgt unter Blaulicht deutlich weniger als die Beziehungsenge unter den anderen Bedingungen.

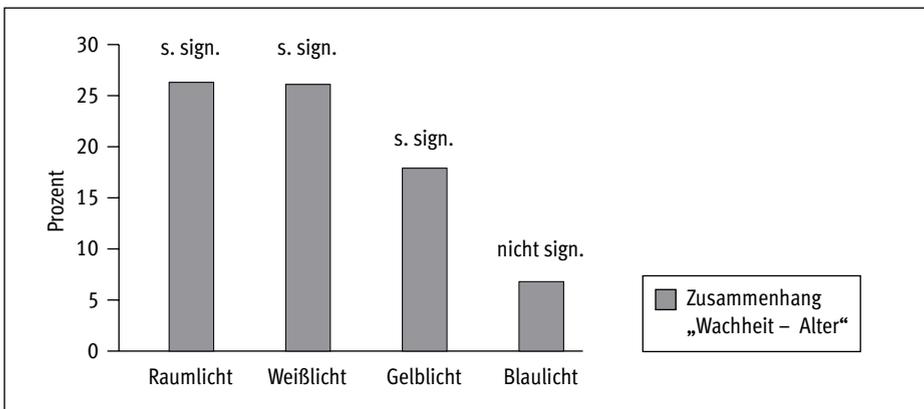
Bei der Blaulichtreflexionsstudie waren nicht wie beim vorherigen Feldexperiment die gleichen, sondern verschiedene Personen unter differierenden Farbexpositionen untersucht worden. Auch hier korrelieren bei der Gruppe unter dem Einfluss von Blau der Wellenlänge 460 nm Wachheitsgrad und Alter hypothesen gemäß geringer als bei den beiden anderen Gruppen (Tab. 2). Die Abbildung 2 verdeutlicht diese Unterschiede. So erweist sich hier der prozentuale Zusammenhang mit  $100 \times 0,369^2 = 13,6 \%$  bei Blau nur als etwa halb so groß wie bei Gelb mit  $100 \times 0,506^2 = 25,6 \%$ .

Die Probanden hatten das weiße Deckblatt für ein, zwei Minuten zur Bearbeitung vor sich liegen. Dann beurteilten sie ihre Wachheit. Diese Messergebnisse wurden

|  | Rangkorrelation<br>( $\rho$ ; 2-seitig) | Determinationskoeffizient<br>~ $\rho^2$ *** |
|--|---|---|
| <b>Alter (n = 42)</b>                          |   |   |
| Alter  |   |   |
| Geschlecht (m = 1; w = 2)                      | 0,025 (0,875)                           | 0,6   |
| Wachheitsgrad Raumlicht                        | 0,513° (0,001)                          | 26,3  |
| Wachheitsgrad Weißes Licht (18 W; 1.400 Lumen) | 0,511° (0,001**)                        | 26,1  |
| Wachheitsgrad Gelblicht* (18 W; 1.400 Lumen)   | 0,423° (0,005)                          | 17,9  |
| Wachheitsgrad Blaulicht* (18 W; 1.400 Lumen)   | 0,260 (0,097)                           | 6,8   |

**Tab. 1:** Zusammenhänge zwischen Alter und Wachheitsgrad unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen bei den 44 Probanden der Blaulichtstudie.

\* Mittelwert aus zwei Messungen, einer vor und einer nach der Weißlichtexposition; \*\* n = 44; \*\*\* mit 100 multipliziert, um einen Eindruck vom prozentualen Zusammenhang zu gewinnen; ° statistisch signifikant



**Abb. 1:** Gemeinsame Varianz (prozentualer Zusammenhang) von Wachheitsgrad und Alter bei 44 Personen (17 bis 75 Jahre) unter Beleuchtungen mit verschiedenen Wellenlängen

mit in die Analyse aufgenommen, weil die Farbe des Folgeblattes hindurchschimmerte und sich die Frage stellte, ob Blau bei dieser geringen Intensität bereits wirkte. Tatsächlich verhielten sich die Zusammenhänge zwischen Alter und Wachheit wie bei Blau.

### Begleituntersuchungen

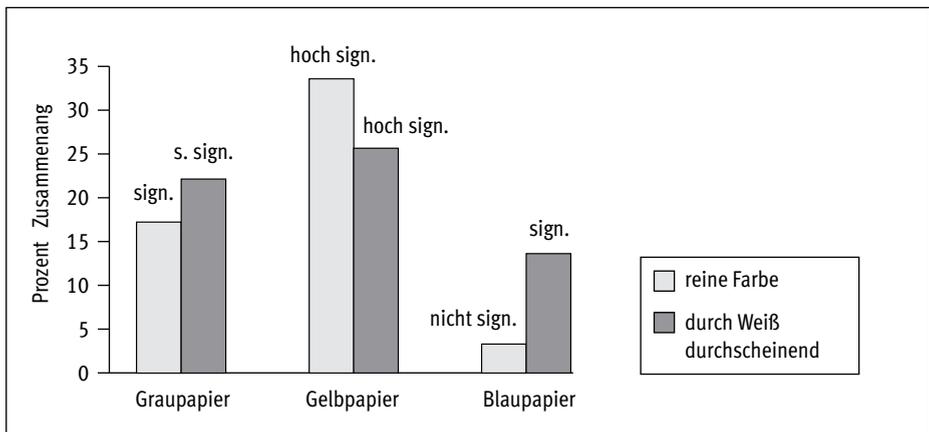
In der Blaulichtstudie korreliert das Geschlecht nicht mit dem Alter (Tab. 1). Auch bei einer Hauptkomponentenanalyse nach Hotelling mit Varimax-Rotation nach dem Kaiser-Kriterium gab es keine Hinweise, dass das Geschlecht als Confounder wirkt.

In der Blaulichtreflexionsstudie liegen die Korrelationen mit dem Geschlecht als möglichem Confounder ebenfalls jeweils um 0 (Tab. 2). Bei der Herauspartialisie-

|  | Korrelationen mit dem Alter    |                                     |                           |  |                           |  |                           |  |
|--|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|--|---------------------------|--|---------------------------|--|
|  | Blau, Gelb oder Grau (n = 114) | Gesamt: Kontrolle Alter, Lesbarkeit | Gruppe mit Blau (n = 41)* | Determinationskoeffizient ~ rho <sup>2</sup> * | Gruppe mit Gelb (n = 39)* | Determinationskoeffizient ~ rho <sup>2</sup> * | Gruppe mit Grau (n = 34)* | Determinationskoeffizient ~ rho <sup>2</sup> * |
| Geschlecht (m = 1; w = 2)                      | 0,015 (0,877)                  | -                                   | 0,069 (0,674)             |  | 0,026 (0,876)             |  | 0,109 (0,554)             |  |
| Lesbarkeit (zunehmende Punktzahl: ungünstiger) | 0,349° (0,000)                 | -                                   | 0,468° (0,003)            |  | 0,237 (0,158)             |  | 0,221 (0,231)             |  |
| Wachheitsgrad Weißpapier (Baseline)            | 0,319° (0,001)                 | 0,281° (0,005)                      | 0,183 (0,253)             | 3,3  | 0,579° (0,000)            | 33,5   | 0,415° (0,018)            | 17,2   |
| Wachheitsgrad Farbpapier                       | 0,402° (0,000)                 | 0,352° (0,000)                      | 0,369° (0,018)            | 13,6   | 0,506° (0,000)            | 25,6   | 0,470° (0,005)            | 22,1   |

**Tab. 2:** Rangkorrelationen zwischen Alter und Wachheitsgrad unter verschiedenen Farbbedingungen bei der Blaulichtreflexionsstudie. Es waren keine individuellen Höchstleistungen gefordert, sondern eine Arbeitsschwindigkeit, die Spaß machte.

° statistisch signifikant; \* mit 100 multipliziert, um einen Eindruck vom prozentualen Zusammenhang zu gewinnen.



**Abb. 2:** Gemeinsame Varianz (prozentualer Zusammenhang) von Wachheitsgrad und Alter bei 114 Personen (15 bis 82 Jahre) unter Reflexion einer beleuchteten Oberfläche

zung des Einflusses von Geschlecht und Lesbarkeit (Tab. 2, 3. Spalte), die allerdings nur mit Pearson-Korrelationen durchgeführt werden können, ergeben sich fast die gleichen Werte wie bei den Korrelationen 0. Ordnung in der zweiten Spalte, die obendrein Spearman-Rangkorrelationen sind.

## Diskussion

### Übereinstimmende Unabhängigkeit von Blau

Für das Blaulicht der Wellenlänge 460 nm hatte sich in unseren beiden Studien hypothesengemäß gezeigt, dass hier die Zusammenhänge zwischen Wachheitsgrad und Alter niedriger als bei anderen Farben einschließlich Grau und Weiß liegen. Die Wachheit des Durchschnitts der älteren Personen wird demnach mehr von anderen Farben als von diesem spezifischen Blau gesteuert, das den Wachheitsgrad schon bei relativ wenig Energie beeinflusst. Von der Wachheit hängen wiederum, wie andere Studien belegen, Emotionen und das Niveau kognitiver Leistungen ab [3, 10, 12, 14, 16, 23].

Die Ergebnisse weisen obendrein nach, dass die Auswirkungen von Farbe auf die Wachheit nicht an primäre Lichtquellen (wie elektrisches Licht) gebunden sind, sondern dass Reflexionen einer beleuchteten farbigen Oberfläche (DIN A4-Papiervorlage) bei einem für das Schreiben üblichen Abstand von ca. 30 cm ausreichen. Beide Untersuchungsbedingungen spiegeln somit tägliche Sehbedingungen wider.

Dass diese Ergebnisse durch mögliche Scheinvariablen wie Geschlecht oder Lesbarkeit der Vorlagen zustande kamen, ist, so weit sich diese kontrollieren ließen, nicht wahrscheinlich.

### Sonderstellung von Blau

Die hier nicht wiedergegebenen faktorenanalytischen Ergebnisse zur Blaulichtstudie, in der dieselben Personen unterschiedlichen Farbbedingungen unterworfen waren, zeigen, dass sich die Wachheitsreaktionen der Senioren auf die gelbliche Raumbeleuchtung und das Weißlicht ähnlich wie auf das monochromatische Gelb verhielten, während sie bei Blau anders waren. Dies überrascht bei Weißlicht, weil es das Frequenzspektrum 460 bis 480 nm mit umfasst. Studien von Figueiro et al. [7, 8] liefern allerdings die Erklärung, dass das Gelblicht das Blaulicht des hier interessierenden Frequenzbereiches in der Wirkung auf psychische Größen neutralisiert.

Im Wesentlichen lässt sich aus den vorgelegten Studienresultaten die Erkenntnis ziehen, dass Blau die Wachheit im Alter weniger als die anderen Farben bzw. Weiß und Grau steuert: Blau der Wellenlänge um 460 nm beeinflusst als direkte Beleuchtung sowie als Reflexion einer beleuchteten Oberfläche die Wachheit älterer Personen stärker, weil schon geringe Intensitäten zu deren Anhebung führen. Deshalb wirken sich Minderungen der Lichttransmission um viele Prozente bei Linsentrübungen unter Blau nicht stark aus. Dafür spricht, dass in der Blaulichtreflexionsstudie 2 das Durchscheinen von Blau durch das Weißpapier bereits die blautypischen Auswirkungen auf die Wachheit hatte. Wenn die Blauwirkungen hier sogar deutlicher als am Ende der folgenden zweiminütigen Auseinandersetzung mit dem darauffolgenden

Blaupapier waren, dann kann dies daran liegen, dass in dieser Zeit noch mentale Aktivierungen durch die absolvierten Übungen hinzukamen, welche die Farbwirkungen überlagerten und dadurch deren Eigenwirkung etwas verschleierten.

Das monochromatische Blau der Wellenlänge um 460 nm legt somit indirekt eine dominierende Reaktion der ipRGC nahe, die für diese Wellenlänge sensibel sind. Andererseits kann natürlich eine Antwort des visuellen Systems nicht ausgeschlossen werden, da ja die Probanden eine eindeutige Lichtwahrnehmung hatten. Auch spricht die unterschiedliche Zeitdauer der beobachteten Effekte (sofortige Reaktion innerhalb von Sekunden bei der Blaulichtstudie und protrahierte Reaktion nach Minuten bei der Blaulichtreflexionsstudie) für eine Interaktion beider Photorezeptionssysteme (visuell, nonvisuell) unterschiedlichen Ausmaßes. Untersuchungen mit bildgebenden Verfahren legen diesen Schluss nahe [22, 23].

## Schlussfolgerungen

Im Zeitbereich von wenigen Minuten haben Gelblicht und andere Farben auf die Wachheit von Senioren gegenüber der von jüngeren Erwachsenen geringere Wirkungen als Blaulicht der Wellenlängen 460 bis 480 nm. Diese Beeinträchtigung wirkt sich auf die Wachheit und die davon abhängige kognitive Leistungsfähigkeit der Senioren relativ wenig aus, weil diese psychischen Größen mehr vom Blau gesteuert werden.

Allerdings herrschen bei künstlichen Beleuchtungen, in der Dunkelheit und Dämmerung sowie bei Anstrichen von Innenräumen oder bei Arbeitspapieren und Büchern Gelb und andere Farben bzw. Grautöne bis hin zu Weiß vor. Wenn das Blau der o. a. Wellenlänge selten ist oder fehlt, unterbleiben stärkere Anregungen der Wachheit, unter denen Senioren dann besonders leiden. Im Interesse der Entfaltung einer kurz- und langfristig möglichst hohen kognitiven Leistungsfähigkeit müssten sie stärker als bisher Blaulichteinflüssen ausgesetzt werden. In Betracht kommen Blaulicht, Blaupapier, Blau in Overhead- und Beamer-Präsentationen sowie Filmen, blaue Ausstattung in Seminarräumen usw. In Betrieben, in denen ältere Arbeitnehmer ständig Kunstlicht ausgesetzt sind, könnte Blaulicht zu einer Chancengleichheit gegenüber den jüngeren Mitarbeitern führen, um das gleiche Niveau an kognitiver Leistungsfähigkeit zu entfalten.

Bevor derartige Umsetzungen in der Praxis vorgenommen werden, sind mögliche unerwünschte Folgen einer Blaulichtexposition aber noch zu klären, beispielsweise Auftreten von Ruhelosigkeit und Kopfschmerz sowie eine Gefährdung der Retina durch die energiereiche Strahlung.

## Literatur

1. BARKER FM, BRAINARD GC: The Direct Spectral Transmittance of the Excised Human Lens as a Function of age. (FDA 785345 0090 RA) U.S. Food and Drug Administration, Washington, DC 1991
2. BERSON DM, DUNN FA, TAKAO M: Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science* 2002;295:1070–1073
3. BRAINARD GC, HANIFIN JP: Photons, Clocks, and Consciousness. *J Biol Rhythms* 2005;20:314–325
4. BRAINARD GC, ROLLAG MD, HANIFIN JP: Photic regulation of melatonin in Broadhurst humans: ocular and neural signal transduction. *J Biol Rhythms* 1997;12:537–546
5. CAJOCHEN C, MUNCH M, KOBIALKA S ET AL.: High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light. *J Clin Endocrinol Metab* 2005;90:1311–1316
6. CATTELL RB: Theory of Fluid and Crystallized Intelligence: A Critical Experiment. *Educational Psychology* 1963;54:1–22
7. FIGUEIRO MG, BULLOUGH JD, BIERMAN A, REA MS: Demonstration of additivity failure in human circadian phototransduction. *Neuro Endocrinol Lett* 2005;26:493–498
8. FIGUEIRO MG, BULLOUGH JD, PARSONS RH, REA MS: Preliminary evidence for spectral opponency in the suppression of melatonin by light in humans. *Neuroreport* 2004;15:313–316
9. FIGUEIRO, MG, REA MS: LEDs: Improving the sleep quality of older adults. Proceedings of the CIE Midterm Meeting and International Lighting Congress. Leon, Spain, May 2005;18–21
10. FIGUEIRO MG, REA MS, EGGLESTON G: Light Therapy and Alzheimers's Disease. *Sleep Review: The Journal for Sleep Specialists* 2003;4:1–1
11. GERSTMAYER K, LEHRL S, JACOB JH ET AL.: Does blue-light optimize alertness and maximize cognitive efficiency? Zur Publikation vorbereitet
12. HATTAR S, LIAO HW, TAKAO M ET AL.: Melanopsin containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity. *Science* 2002;295:1065–1070
13. KUNCEL NR, HEZLETT SA, ONES DS: Academic performance, career potential, creativity, and job performance: Can one construct predict them all? *J Pers Soc Psychol [Special Section, Cognitive Abilities: 100 Years after Spearman (1904)]* 2004;86:148–161
14. LEHRL S, GERSTMAYER K, JACOB JH ET AL.: Blue light improves cognitive performance. *J Neural Transm* 2007;114(4):457–460
15. LEHRL S, GERSTMAYER K, JAKOB JH ET AL.: Does the colour blue promote cognitive performance in a pleasant state? Zur Publikation eingereicht bei *Neurosci Lett*
16. LOCKLEY SW, EVANS EE, SCHEER FA ET AL.: Short-wavelength sensitivity for the direct effects of light on alertness, vigilance, and the waking electroencephalogram in humans. *Sleep* 2006;29:161–168
17. LYNN R, VANHANEN T: IQ and the wealth of nations. Westport, CT: Praeger 2002
18. MITCHELL P, CUMMING RG, ATTEBO K, PANCHAPAKESAN J: Prevalence of cataract in Australia: the Blue Mountains eye study. *Ophthalmology* 1997;104:581–588
19. REVELL VL, ARENDT J, FOGG LF, SKENE DJ: Alerting effects of light are sensitive to very short wavelengths. *Neurosci Lett* 2006;399:96–100
20. TAN A, WANG J, ROCHTCHINA E, MITCHELL P: Comparison of age-specific cataract prevalence in two population-based surveys 6 years apart. *BMC ophthalmology* 2006;6:17

21. THAPAN K, ARENDT J, SKENE DJ: An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *J Physiol* 2001;15:261–267
22. VANDEWALLE G, GAIS S, SCHABUS M ET AL.: Wavelength-Dependent Modulation of Brain Responses to a Working Memory Task by Daytime Light Exposure. *Cerebral Cortex Advance Access published online on April 2, 2007a Cerebral Cortex*, DOI:10.1093/cercor/bhm007
23. VANDEWALLE G, SCHMIDT C, ALBOUY G ET AL.: Brain Responses to Violet, Blue, and Green Monochromatic Light Exposures in Humans: Prominent Role of Blue Light and the Brainstem. *PLoS ONE* 2007;2(11): e1247. doi:10.1371/journal.pone.0001247, p 1–10