

# Entwicklung eines dynamischen Lichtkonzepts zur Gesundheits- und Leistungsförderung

Oliver STEFANI

*Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation  
Nobelstrasse 12, D-70569 Stuttgart*

**Kurzfassung:** Heutige Bürobeleuchtung ist oft nur statisch. Das manuelle Dimmen ist zwar meist möglich aber nur selten lässt sich z.B. die Farbtemperatur ändern. Unter natürlichen Bedingungen ändern sich aber die Lichtfarbe, Lichtrichtung und Intensität ständig. Dazu gehören auch wetterbedingte Lichtwechsel wie sie durch Wolken hervorgerufen werden können. Studien zu dynamischem Licht in Bürsumgebungen haben gezeigt, dass bereits leichte Änderungen positive Auswirkungen auf das Wohlbefinden des Menschen haben. Ziel dieser Arbeit ist es, ein dynamisches Lichtsystem zu entwickeln, welches auf die Lichtbedürfnisse seiner Nutzer eingeht. Die Nachbildung von natürlichen Lichtwechseln soll so optimiert werden, dass die positiven Lichtwirkungen auf den Menschen auch beim Kunstlicht nutzbar gemacht werden können.

**Schlüsselwörter:** Licht, Dynamik, Natur, Gesundheit, Wohlbefinden, Büro

## 1. Stand der Technik und Defizite

Viele Menschen gehen einer Tätigkeit nach, die in Innenräumen stattfindet und verbringen daher den überwiegenden Teil eines Tages nicht unter freiem Himmel. Die Evolutionsbiologie zeigt aber, dass unser Sehapparat und unsere Wahrnehmung auf die natürlichen Lichtbedingungen angepasst sind. Kunstlicht entspricht in vielerlei Hinsicht nicht dem natürlichen Licht: Weder Intensität & Spektrum noch Dynamik des natürlichen Lichts werden mit Kunstlicht an Arbeitsplätzen im Innenraum realisiert. Die Entdeckung, dass ein Teil der Ganglienzellen in der Netzhaut des menschlichen Auges direkt lichtempfindlich sind und ein bisher beim Menschen unbekanntes Photopigment enthalten, welches besonders empfindlich auf Licht im blauen Bereich reagiert (Brainard et al. 2001; Thapan et al. 2001, Berson et al. 2002 Hattar et al. 2002) führte in den folgenden Jahren auch zum Nachweis, dass über das Auge vermittelte nicht-visuelle Effekte, Einflüsse auf die Physiologie (z.B. die innere Uhr), Gesundheit, Schlafqualität und kognitive Leistung haben (Viola 2008; Vandevall 2013; Cajochen 2007; Chellappa 2013; Stefani, Cajochen 2010). Wie diese Photorezeptoren mit den eigentlichen Sehzellen (Zapfen und Stäbchen) interagieren ist noch nicht vollständig geklärt. Die im folgenden dargestellten Eigenschaften des natürlichen Lichts werden auf ihre Wirkung auf den Menschen betrachtet und mit künstlicher Beleuchtung verglichen:

### 1.1 Intensität

Natürliches Tageslicht hat am Tag eine ca. hundertfach höhere Intensität als die 500-Lux- Normbeleuchtung - in der Nacht ist es bis zu tausendfach niedriger. Zu

wenig Licht am Tag und zuviel Licht in der Nacht destabilisiert unser circadianes System und kann zu Depressionen führen (Rosenthal et al. 1984 & 1985, Terman et al. 1995). Helles Licht kann auch akut die Aufmerksamkeit erhöhen (Cajochen et al. 2000; Phipps-Nelson et al. 2003; Rüter et al. 2006; Zeitzer et al. 2000) und akut die kognitive Leistungsfähigkeit verbessern (Badia et al. 1991; Campbell & Dawson, 1990; Chellappa et al. 2011; Lockley et al. 2006).

## 1.2 Spektrum

Das Sonnenspektrum ist kontinuierlich und weist kaum Lücken auf. Es enthält am Tage einen hohen Blauanteil. Durch den höheren Blauanteil ist dieses auch biologisch anregend, indem es z.B. Melatonin unterdrückt (Brainard 2001; Thapan 2001). Dass bereits die geringen spektralen Unterschiede von zwei verschiedenen Bildschirmen unterschiedliche Wirkung auf die Melatoninsuppression und die Leistungsfähigkeit haben, wurde von Cajochen (Cajochen et al. 2011) gezeigt. Kunstlicht unterscheidet sich von natürlichem Licht im Spektrum meist sehr deutlich. Am gebräuchlichsten sind Energiesparlampen, Glühbirnen und LED. Energiesparlampen und Leuchtstoffröhren haben Prinzip bedingt ein Bandenspektrum mit Spitzen bei Blau, Grün und Gelb-Orange. Das Spektrum der Glühbirne hat zwar ein kontinuierliches Spektrum, dieses ist aber anders verteilt: sehr wenig Blauanteil aber dafür sehr viel Rot und Infrarot. Weißes LED-Licht wird meist mit einem blauen Chip, welcher einen Phosphor anregt und sich damit mischt, erzeugt. Dadurch entsteht das typische LED-Spektrum mit einer Lücke bei Cyan.

## 1.3 Dynamik

Bei heutiger Bürobeleuchtung ist meist nur das manuelle Dimmen und der Wechsel zwischen direkter und indirekter Beleuchtung möglich, selten lässt sich auch die Farbtemperatur ändern. Unter natürlichen Bedingungen ändern sich aber die Lichtfarbe, Lichtrichtung und Intensität ständig. Dazu gehören auch schnelle wetterbedingte Lichtwechsel wie sie durch Wolken hervorgerufen werden können. Studien zu dynamischem Licht in Büroumgebungen haben gezeigt, dass bereits leichte Änderungen positive Auswirkungen auf das Wohlbefinden des Menschen haben: Die Motivation erhöht sich und die Akzeptanz des dynamischen Lichts ist generell sehr hoch (Dehoff 2002). Auswirkungen auf Wohlbefinden und Motivation durch das Ändern von Licht wurde auch von Fleischer (Fleischer 2001) untersucht. Die Beleuchtung bestand aus Leuchten, die langsam zwischen direktem und indirektem Licht wechselten. Das Verhältnis zwischen direkter und indirekter Beleuchtung wurde entsprechend der Tageszeit oder witterungsbedingt geändert. Es hat sich gezeigt, dass mit höherer Beleuchtungsstärke und einer großen indirekten Komponente die Freude steigt. Fleischer legt jedoch nahe, dass eine solche Beleuchtung nicht ausschließlich über den ganzen Tag angewendet werden sollte, sondern sich verändern sollte. Dynamische Beleuchtung kann auch das Lernverhalten in Schulen beeinflussen (Schulte-Marktwort 2010). Es konnte gezeigt werden, dass eine kalte Farbtemperatur die Konzentration steigert und eine warme Farbtemperatur eine entspannte Atmosphäre bietet. Die Farbtemperatur (und Beleuchtungsstärke) wurde von 5600K bis 3000K nach 25 Minuten gewechselt. Eine Studie vom Fraunhofer IAO zeigte eine Präferenz von dynamischer gegenüber statischer Beleuchtung (Stefani, Spath 2010).

### 1.4 Polarisation

Direktes Sonnenlicht und Streulicht durch Wolken ist unpolarisiert. Das Licht eines blauen Himmels ist jedoch je nach Abstand und Richtung zur Sonne mehr oder weniger polarisiert. Der Mensch kann im Gegensatz zu z.B. Bienen kein (oder nur sehr schwach, Stichwort „Haidinger Büssel“) polarisiertes Licht wahrnehmen. Ein Einfluß von polarisiertem Licht auf den Menschen ist noch nicht endgültig ausgeschlossen. Eine Studie von Brainard (Brainard 2000) zeigte jedenfalls keinen Unterschied zwischen unpolarisiertem und polarisiertem Licht auf die Melatoninsuppression. Brainard schlägt jedoch vor, die möglichen Effekte von polarisiertem Licht genauer zu untersuchen.

### 1.5 Lichtverteilung

Provencio (Provencio et al. 2002) berichteten bereits im Januar 2002 in einer „brief communication“ an Nature, dass sich ein grob aufgelöstes Netz an photosensitiven Ganglienzellen über die Netzhaut von Mäusen erstreckt, welches die Aufgabe hat, Helligkeit zu detektieren. Später wird bei Primaten genauer festgestellt, dass die melanopsinhaltigen Ganglienzellen außer in der Fovea über die gesamte Netzhaut mit einer Dichte von 3-5 Zellen/mm<sup>2</sup> verteilt sind und ihre maximale Konzentration von 20-25 Zellen/mm<sup>2</sup> im Umfeld der Fovea haben (Daycey et al. 2005; Hattar et al. 2005). Da die melanopsinhaltigen Ganglienzellen im Auge großflächig über die Netzhaut verteilt sind, wird vermutet, dass die biologische Wirkung von Licht am größten ist, wenn das Licht von einer großflächigen Quelle, wie bei einer indirekten Beleuchtung einer großen, hellen Fläche oder wie in der Natur vom Himmel kommt. Wird nur ein kleiner Bereich der Netzhaut ausgeleuchtet, wie das der Fall beim gerichteten Licht eines Spots ist, vermutet man eine schwächere biologische Wirkung.

## 2. Nachbildung von natürlichen Lichtwechsel

Hypothese: Wenn man von der evolutionären Anpassung des Menschen an natürliche Lichtbedingungen ausgeht, müsste sich die Nachbildung von natürlichen Lichtbedingungen in der künstlichen Raumbelichtung positiv auf Befinden und Leistung auswirken. Diese Hypothese ist, wie oben gezeigt, bereits teilweise nachgewiesen. Die positive Wirkung von schnellen Lichtwechseln wie bei vorbeiziehenden Wolken gilt es noch zu belegen. Im Speziellen zielt diese Arbeit auf die optimierte Simulation von natürlichen Lichtwechseln. Die Nachbildung von natürlichen Lichtwechseln soll so optimiert werden, dass die positiven Lichtwirkungen auf den Menschen auch beim Kunstlicht nutzbar gemacht werden können. Die Lichtwirkung auf den Menschen setzt sich aus dem Wahrnehmungsaspekt (visuelle & emotional) und der biologischen Wirkung des Lichts zusammen. Die gesuchte Gesamtbeschreibung des dynamischen Lichtes (zeitlicher Intensitätsverlauf in Abhängigkeit von Spektrum, Lichtverteilung und Lichtrichtung) wird „L<sub>ges</sub>“ genannt. Es setzt sich aus dem circadian (oder biologisch) benötigtem Licht „L<sub>C</sub>“, dem für die Sehaufgabe benötigten Licht „L<sub>S</sub>“ und dem emotional benötigten Licht „L<sub>E</sub>“ zusammen. L<sub>C</sub> ist das circadian benötigte Licht zu einem bestimmten Zeitpunkt „t“ am Ort  $\vec{x} = (x, y, z)$ . L<sub>S</sub> ist das für die Sehaufgabe benötigte Licht zu einem bestimmten Zeitpunkt t am Ort  $\vec{x}$ , hierbei wird im Wesentlichen der Leitfaden zur DIN EN 12464-1

„Beleuchtung von Arbeitsstätten“ herangezogen.  $L_E$  ist Licht, das emotional Licht zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t$  am Ort  $\vec{x}$  benötigt wird. Hierbei spielt Ästhetik, Komfort und Wohlbefinden eine zentrale Rolle. „ $f_{ind}$ “ ist ein Faktor, mit welchem der Nutzer das Licht individuell anpassen kann (z.B. 10% heller, 20% kälter und 30% mehr indirekt Anteil).

### 3. Ermittlung der Lichtbedürfnisse

Die Lichtbedürfnisse für ein dynamisches Lichtsystem werden mit folgender Formel beschrieben:  $L_{ges}(\vec{x},t) = [L_c(\vec{x},t) + L_s(\vec{x},t) + L_E(\vec{x},t)] * f_{ind}$   
 Welche Ausprägungen und Dynamiken von Lichteigenschaften aus der Natur fördern das Wohlbefinden, die Leistungsbereitschaft und die Leistungsfähigkeit am Arbeitsplatz? Diese Frage wird durch Literaturrecherche, Befragungen, Beobachtung und Experteninterviews für die Nutzung dynamischer und nutzerzentrierter Lichtsysteme beantwortet. In einem Feldexperiment werden in einem Raum mit frei ansteuerbaren, spektraler, zeitlicher und räumlicher Lichtverteilung ( $L_{ges}(\vec{x},t)$ ) die Akzeptanz sowie die Effekte auf Müdigkeit und Wohlbefinden mit Hilfe von Fragebögen (z.B. Karolinska Sleepiness Scale) untersucht. Um Einflüsse auf die Aufmerksamkeit zu messen, werden aus der Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung (TAP) Testmodule (z.B. go/nogo, stroop) ausgewählt und angewendet. Die physiologische Wirkung des Lichts wird durch Messung der Herzfrequenzvariabilität (HRV) überprüft. Da Lichtdecken wie der Virtual Sky derzeit technisch aufwendige und teure Systeme sind, soll ein alternativer technischer Prototyp eines dynamischen Lichtsystems entwickelt werden, um die für den Menschen wichtigsten Lichtdynamiken abzubilden. Am Ende dieser Arbeit wird dieses optimierte System in einem Musterraum installiert und die Akzeptanz durch Experteninterviews abgefragt.

### 4. Diskussion bisheriger Untersuchungen zu dynamischem Licht

Der Virtual Sky im Labor des Fraunhofer IAO wurde bereits mit 30 Probanden untersucht (14 Frauen, 16 Männer von 22 bis 33 Jahre ( $\bar{\Delta}$  25 Jahre)). Er erstreckt sich über eine Fläche von 34m<sup>2</sup> und integriert insgesamt 34560 LEDs mit vier verschiedenen Grundfarben. Diese sind in einzeln ansteuerbare Quadrate gruppiert, die wie Pixel eines Displays angesteuert werden können. Durch die dynamische Steuerung lassen sich z.B. Videos von vorbeiziehenden Wolken anzeigen. Es wurde untersucht, ob die Nachbildung von natürlichen Lichtwechseln in der künstlichen Beleuchtung das Wohlbefinden beeinflusst und möglicherweise die Müdigkeit reduziert. In der Studie wurde jede Person unter drei verschiedenen Lichtbedingungen jeweils an einem Arbeitstag zwischen 9:00 Uhr und 17:00 Uhr untersucht:

1. Statisches Licht mit einem fixierten Wolkenbild am Virtual Sky (SD)
2. Seltene Dynamik: Alle 90 Minuten hat sich das Licht verändert
3. Ständige Lichtwechsel durch den animierten Wolkenhimmel (HD)

Die Ergebnisse der Befragung zeigen, dass die Teilnehmer um fünf Uhr abends unter SD etwas müder waren als unter dem bewegten Wolkenhimmel ( $\bar{\Delta}$  Unterschied

0.37,  $p = .07$ ). Zur Befragung wurde die Karolinska Sleepiness Scale verwendet (Gillberg, 1994). Betrachtet man die 15 Teilnehmer, die keinen Fensterplatz hatten, wird der Unterschied deutlicher:  $\emptyset$  Unterschied 0.93,  $p = .03$ . Die Unterschiede von Befindlichkeiten zwischen SD und HD, die nach sieben Stunden aufgetreten sind, wurden mit einer Befindlichkeitsskala abgefragt. Das Gefühl „ausgezeichnet“ weist einen hoch signifikanten Unterschied von 0.53 ( $p = .003$ ) auf, d.h. unter dem Wolkenhimmel haben sich die Probanden ausgezeichneter gefühlt. Nach jedem Testtag wurden die Teilnehmer gefragt, wie ihnen das Licht gefallen hat. Antwort auf einer visuellen Analogskala (VAS): 1 = „Gar nicht“, 100 = „Extrem gut“ (Funke, 2004)). Hier konnte über alle Teilnehmer gemittelt kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Unterscheidet man aber nach Art der durchgeführten Tätigkeiten, hat sich folgendes herausgestellt: Probanden, die konzentrierte Arbeiten durchgeführt haben, haben SD bevorzugt. Personen mit kreativer Arbeit (Grafikdesign, Konstruktion, Videobearbeitung) gefällt HD signifikant besser als SD ( $\emptyset$  statisches Licht = 61,  $\emptyset$  HD = 86,  $p = .001$ ) (Stefani et al. 2012).

## 5. Literatur

- Badia, P., Myers, B., Boecker, M., Culpepper, J., & Harsh, J. R. (1991). Bright light effects on body temperature, alertness, EEG and behavior. *Physiology & Behavior*, 50, 583–588. doi:10.1016/0031-9384(91)90549-4
- Berson, David M.; Dunn, Felice A.; Takao, Motoharu (2002): Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. In: *Science* 295 (5557), S. 1070–1073. DOI: 10.1126/science.1067262.
- Brainard, G. C.; Rollag, M. D.; Hanifin, J. P.; van den Beld, G.; Sanford, B. (2000): The effect of polarized versus nonpolarized light on melatonin regulation in humans. In: *Photochem. Photobiol.* 71 (6), S. 766–770.
- Brainard, G. C.; Hanifin, J. P.; Greeson, J. M.; Byrne, B.; Glickman, G.; Gerner, E.; Rollag, M. D. (2001): Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. In: *J. Neurosci.* 21 (16), S. 6405–6412.
- Brehm A, Brehm W: Zur Konzeptionalisierung und Messung der Befindlichkeit. Die Entwicklung der Befindlichkeitsskalen (BFS). *Diagnostica* 32 (1986) 3, 209-228
- Cajochen, C., Zeitzer, J. M., Czeisler, C. A., & Dijk, D.-J. (2000). Doseresponse relationship for light intensity and ocular and electroencephalographic correlates of human alertness. *Behavioural Brain Research*, 115, 75–83. doi:10.1016/S0166-4328(00)00236-9
- Cajochen, Christian (2007): Alerting effects of light. In: *Sleep Med Rev* 11 (6), S. 453–464. DOI: 10.1016/j.smrv.2007.07.009.
- Cajochen, C., Frey, S., Anders, D., Späti, J., Bues, M., Pross, A., Stefani, O. (2011). Evening exposure to a light emitting diodes (LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance. *Journal of Applied Physiology*, 110, 1432–1438. doi:10.1152/jappphysiol.00165.2011
- Campbell, S. S., & Dawson, D. (1990). Enhancement of nighttime alertness and performance with bright ambient light. *Physiology & Behavior*, 48, 317–320. doi:10.1016/0031-9384(90)90320-4
- Chellappa, S. L., Steiner, R., Blattner, P., Oelhafen, P., Götz, T., & Cajochen, C. (2011). Non-visual effects of light on melatonin, alertness and cognitive performance: Can blue-enriched light keep us alert? *PLoS ONE*, 6, e16429. doi:10.1371/journal.pone.0016429
- Chellappa, Sarah L.; Steiner, Roland; Oelhafen, Peter; Lang, Dieter; Götz, Thomas; Krebs, Julia; Cajochen, Christian (2013): Acute exposure to evening blue-enriched light impacts on human sleep. In: *J Sleep Res* 22 (5), S. 573–580. DOI: 10.1111/jsr.12050.
- Dacey, Dennis M.; Liao, Hsi-Wen; Peterson, Beth B.; Robinson, Farrel R.; Smith, Vivianne C.; Pokorny, Joel et al. (2005): Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal colour and irradiance and project to the LGN. In: *Nature* 433 (7027), S. 749–754. DOI: 10.1038/nature03387.
- Dehoff (2002) The impact of changing light on the well-being of people at work, Proceedings of the 5th International Conference on Energy Efficient Lighting, Nice, ISBN 91-631-2523-4 Session 14 Dynamic lighting

- Funke F.: Vergleich Visueller Analogskalen und Kategorienskalen in Offline- und Onlinedesign; Magisterarbeit im Studiengang Soziologie am Institut für Soziologie des Fachbereichs Sozial- und Kulturwissenschaften der Justus-Liebig-Universität Gießen; 2004
- Fleischer (2001) Die psychologische Wirkung veränderlicher Kunstlichtsituationen auf den Menschen, ETH Thesis Nr. 14033
- Gillberg M., Kecklund G. and Åkerstedt T., Relations between performance and subjective ratings of sleepiness during a night awake. *Sleep* 17, 236-241, 1994
- Hattar, S., Liao, H. W., Takao, M., Berson, D. M., & Yau, K. W. (2002). Melanopsin-containing retinal ganglion cells: Architecture, projections, and intrinsic photosensitivity. *Science*, 295, 1065–1070. doi:10.1126/science.1069609
- Lockley, S. W., Evans, E. E., Scheer, F. A., Brainard, G. C., Czeisler, C. A., & Aeschbach, D. (2006). Short-wavelength sensitivity for the direct effects of light on alertness, vigilance, and the waking electroencephalogram in humans. *Sleep*, 29, 161–168.
- Phipps-Nelson, J., Redman, J. R., Dijk, D.-J., & Rajaratnam, S. M. (2003). Daytime exposure to bright light, as compared to dim light, decreases sleepiness and improves psychomotor vigilance performance. *Sleep*, 26, 695–700.
- Provencio, Ignacio; Rollag, Mark D.; Castrucci, Ana Maria (2002): Photoreceptive net in the mammalian retina. This mesh of cells may explain how some blind mice can still tell day from night. In: *Nature* 415 (6871), S. 493. DOI: 10.1038/415493a.
- Schulte-Markwort (2010) Laborstudie zur Replizierung der Wirksamkeit von dynamischen Licht im Schulunterricht, Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf, Klinik und Poliklinik für Kinder- und Jugendpsychosomatik, Studie II: Ergebnisbericht
- Stefani, Bues, Pross, Hille, Spath (2010) Lichtdynamik am Wissensarbeitsplatz der Zukunft. In: *Neue Arbeits- und Lebenswelten gestalten* Dortmund, GfA-Press, 71–74
- Stefani, Bues, Pross, Spath, Frey, Anders, Mager, Cajochen (2010) Evaluation of human reactions on displays with LED backlight and a technical concept of a circadian effective display, International Symposium SID, Campbell/Calif.: SID, 2010, pp. 1120-1123
- Stefani O, Bues M, Pross A, Mebben S, Westner P, Dudel H, Rudolph H (2012): Moving Clouds on a Virtual Sky affect Well-Being and Subjective Tiredness positively, CIE Lighting Quality & Energy Efficiency, Hangzhou
- Terman M, Boulos Z, Campbell SS, Dijk D-J, Estman CI, Lewy AJ: Light treatment for sleep disorders: ASDA/SLTBR Joint Task, Force Consensus Report. *J Biol Rhythms* 1995; 10:101–176
- Terman, Michael (2005): Light Therapy. In: Meir H. Kryger, T. Roth und William C. Dement (Hg.): Principles and practice of sleep medicine. 4. Aufl. Philadelphia, PA: Elsevier/Saunders, S. 1424–1442.
- Thapan, Kavita; Arendt, Josephine; Skene, Debra J. (2001): An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. In: *J Physiology* 535 (1), S. 261–267. DOI: 10.1111/j.1469-7793.2001.t01-1-00261.x.
- Vandewalle, Gilles; Collignon, Olivier; Hull, Joseph T.; Daneault, Véronique; Albouy, Geneviève; Lepore, Franco et al. (2013): Blue Light Stimulates Cognitive Brain Activity in Visually Blind Individuals. In: *Journal of Cognitive Neuroscience* 25 (12), S. 2072–2085. DOI: 10.1162/jocn\_a\_00450.
- Viola, A. U., James, L. M., Schlagen, L. J., & Dijk, D.-J. (2008). Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality. *Scandinavian Journal of Work Environment and Health*, 34, 297–306.
- Rosenthal, N. E.; Sack, D. A.; Gillin, J. C.; Lewy, A. J.; Goodwin, F. K.; Davenport, Y. et al. (1984): Seasonal affective disorder. A description of the syndrome and preliminary findings with light therapy. In: *Arch Gen Psychiatry* 41 (1), S. 72–80.
- Rosenthal NE, Sack DA, Carpenter CJ, Parry BL, Mendelson WB, Wehr TA: Antidepressant effects of light in seasonal affective disorder. *Am J Psychiatry* 1985; 142:163–170
- Rüger, M., Gordijn, M. C., Beersma, D. G., de Vries, B., & Daan, S. (2006). Time-of-day-dependent effects of bright light exposure on human psychophysiology: Comparison of daytime and nighttime exposure. *American Journal of Physiology–Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 290, R1413–1420. doi:10.1152/ajpregu.00121.2005
- Zeitler, J. M., Dijk, D.-J., Kronauer, R. E., Brown, E. N., & Czeisler, C. A. (2000). Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: Melatonin phase resetting and suppression. *Journal of Physiology*, 526, 695–702. doi:10.1111/j.1469-7793.2000.00695.x

**Danksagung:** Diese Arbeit wurde und wird teilweise finanziell unterstützt durch Trilux und das BMBF-Projekt „OLIVE“.