



Circadiane Wirksamkeit Aml-basierter Beleuchtungssysteme: Wirkungsfragen circadianer Desynchronisation

D. Kunz

**Forschung
Projekt F 2302**

D. Kunz

**Circadiane Wirksamkeit
Aml-basierter Beleuchtungssysteme:
Wirkungsfragen circadianer
Desynchronisation**

Dortmund/Berlin/Dresden 2015

Diese Veröffentlichung ist der Abschlussbericht zum Projekt „Beleuchtung von Arbeitsstätten: Folgenabschätzung von Aml-basierten Beleuchtungssystemen“ – Projekt F 2302 – im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren: PD Dr. Dieter Kunz
Intellux Berlin GmbH c/o St. Hedwig Krankenhaus
Große Hamburger Str. 5 – 11, 10115 Berlin

Unter Mitarbeit von:
Dipl.-Wirtschaftsing. Stephan Krenz
Dr. Mirjam Münch
Dr. Erik Bes
Dr. Claudia Nowozin
Dr. Amely Wahnschaffe
Johannes Regente
Jan de Zeeuw, MSc.
Sven Hädel

Titelfoto: jaminwell/iStock

Umschlaggestaltung: Stephan Imhof
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Herstellung: Bonifatius GmbH, Paderborn

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
Friedrich-Henkel-Weg 1 – 25, 44149 Dortmund
Telefon 0231 9071-0
Fax 0231 9071-2454
info-zentrum@buaa.bund.de
www.buaa.de

Berlin:
Nöldnerstr. 40 – 42, 10317 Berlin
Telefon 030 51548-0
Fax 030 51548-4170

Dresden:
Fabricestr. 8, 01099 Dresden
Telefon 0351 5639-50
Fax 0351 5639-5210

Alle Rechte einschließlich der fotomechanischen Wiedergabe und des auszugsweisen Nachdrucks vorbehalten.



www.buaa.de/dok/6270912

ISBN 978-3-88261-148-9

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Kurzreferat	5
Abstract	6
1 Hintergrund	7
1.1 Licht und die innere Uhr	7
1.2 Effekte von Morgenlicht	8
1.3 Ziele und Studienhypothesen	9
2 Motivation für die Studie	11
3 Studiendesign	12
4 Zusammenfassung der Resultate	14
5 Ausblick	15
Literaturverzeichnis	17
Abkürzungsverzeichnis	20

Circadiane Wirksamkeit Aml-basierter Beleuchtungssysteme: Wirkungsfragen circadianer Desynchronisation

Kurzreferat

Die Bedeutung von Licht als Zeitgeber für die innere biologische Uhr erhält einen zunehmend höheren Stellenwert. Es besteht Grund zur Annahme, dass die Beleuchtung unserer Arbeitsplätze häufig nicht mehr ausreicht, um die innere Uhr täglich in ausreichendem Maß auf den äußeren 24-Stunden-Rhythmus zu synchronisieren. Damit einhergehende mögliche Risiken circadianer Desynchronisation müssen daher näher betrachtet werden. Darüber hinaus kann die Beleuchtung tagsüber maßgeblich zu unserer Wachheit und Leistungsfähigkeit beitragen. Die Studie hat sich zum Ziel gesetzt, Wirkungsmechanismen circadianer Desynchronisation durch Beleuchtung aufzuzeigen. In unserer Studie wollten wir testen, inwieweit eine effektive Beleuchtung am Morgen die Wachheit und die Leistungsfähigkeit akut verbessert und gleichzeitig mit einer Stabilisierung der circadianen Phasenlage einhergeht. Eine gezielte Auswertung und Analyse der verschiedenen Lichtsituationen sollte mögliche Risiken (z. B. negative Einflüsse auf Wachheit, Leistungsfähigkeit, Schlaf, innere Uhr etc.) identifizieren. Die Studie wurde mit 18 gesunden, jungen Probanden durchgeführt und dauerte insgesamt acht Tage. Die Probanden verbrachten die Abende, Nächte und Morgen im Labor und wurden am Abend jeweils für 30 Minuten drei verschiedenen Beleuchtungsbedingungen (blau-angereichertes Licht, gedimmte Glühlampenbeleuchtung, orangenes Licht) ausgesetzt. Am darauffolgenden Morgen erfolgte für drei Stunden entweder eine effektive Bürobeleuchtung mit blau-angereichertem Licht oder eine Kontrollbeleuchtung durch eine warm-weiße Glühlampe mit einer wesentlich tieferen Beleuchtungsstärke.

Die Resultate zur Studie über Wirksamkeitsfragen circadianer Desynchronisation zeigten, dass eine effektive Beleuchtung am Morgen einen akut wach-machenden Effekt und eine schnellere Reaktionszeit zur Folge hatte. Auch am Abend wirkte die Morgenbeleuchtung nach, und die Probanden fühlten sich abends wacher, und ihre Leistungsfähigkeit fiel weniger schnell ab, wenn sie am Morgen die blau-angereicherte Beleuchtung erhalten hatten. Mit allen Variablen fanden sich nach blau-angereicherter Morgenbeleuchtung auch positive Effekte über mehrere Tage. Der Schlaf wurde insofern beeinflusst, als dass die Probanden nach der Glühlampen-Beleuchtung weniger Zeit im Schlafstadium S2 verbrachten. Die Gesamtschlafzeit, der Tiefschlaf und der REM-Schlaf waren bei beiden Gruppen gleich. Die Quantifizierung der Schlaf-EEG-Aktivität ergab insgesamt eine höhere Aktivität in höheren Frequenzbereichen in Folge morgendlicher Glühlampen-Beleuchtung. Ein weiteres Kernthema dieser Studie war die circadiane Phasenverschiebung, welche durch zu wenig Licht oder eine Beleuchtung zur falschen Zeit induziert werden kann. Im Ergebnis war beim Einsatz von Glühlampen am Morgen eine auffällige Verschiebung der circadianen Phase feststellbar, die beim Einsatz von blau-angereichertem Licht weniger ausgeprägt auftrat.

Schlagwörter:

circadiane Desynchronisation, effektive Beleuchtung, Arbeitsplatzbeleuchtung, Leistungsfähigkeit, Melatonin, Nachtschlaf, subjektive Wachheit

Circadian effects of Aml-based lighting systems: Effects of circadian desynchronization

Abstract

The importance of light as 'Zeitgeber' for the internal biological clock receives an increasingly higher priority. There is evidence to assume that under daily life situations lighting conditions are often not sufficient to synchronize the internal clock to the external 24-h-rhythm. In addition, the lighting during the day can significantly contribute to our alertness and performance. In our study we wanted to test the extent to which blue-enriched light exposure in the morning can acutely improve subjective alertness and performance, and whether it can stabilize the circadian phase and improve sleep over several days. An additional goal was to evaluate and analyze different light situations with regard to potential risks (e. g. negative influences on alertness, performance, sleep, circadian clock, etc.). The study was conducted with 18 healthy young subjects in a cross-over within-subject design and lasted for 8 days. The volunteers spent the evenings, nights and mornings in the laboratory and were exposed for 30 minutes in the evening to three different lighting conditions (in a randomized order). The following morning, they were then exposed for three hours either to an office lighting with polychromatic blue-enriched light, or to control light with a polychromatic warm white light bulb at much lower illuminance. The results showed that the lighting in the morning had an acutely wake-promoting effect, and participants showed faster response times in a sustained vigilance task. In the evening, the morning light still had an impact on their performance, and subjective sleepiness increased less rapidly when they had received the blue-enriched light in the morning. With all variables, we also found positive effects over several days with the blue-enriched morning light. During nighttime participants spent less time in stage 2 sleep when they were in the warm-white lighting condition, whereas total sleep time, deep sleep and REM sleep were similar after both morning light conditions. The quantification of the sleep EEG activity revealed higher power in some frequency ranges (> 7 Hz) during NREM sleep after the morning warm white light bulb condition. A core topic of this study was the circadian phase shift, which can be induced by light at the wrong time. Under the blue-enriched lighting in the morning we found that the circadian phase of salivary melatonin was overall less shifted, in comparison with the warm white light in the morning. Our results give further evidence that a suitable morning light has a balancing, stabilizing effect on the circadian system, and so to speak, is a counter-strategy for insufficient lighting or light at the wrong time.

Key words:

circadian desynchronization, optimized lighting, task lighting, performance, melatonin, night sleep, subjective alertness

1 Hintergrund

1.1 Licht und die innere Uhr

Die Chronobiologie ist eine relative junge Disziplin, sie befasst sich mit den biologischen Rhythmen beim Menschen, von denen der wichtigste der Schlaf-Wachzyklus ist. Da die innere Uhr des Menschen nicht genau im 24-Stunden-Takt geht (im Durchschnitt sind es 24.2 Stunden [CZEISLER et al., 1999]), ist eine leichte tägliche Vor- oder Nachverschiebung notwendig. Der Frage, wie diese Anpassung der inneren biologischen Uhr mit dem äußeren 24-Stunden-Tag/Nacht-Rhythmus erfolgen kann, galt stets ein besonderes Augenmerk. Wie wir heute wissen, ist der wichtigste Faktor für diese tägliche Anpassung das Licht, daher ist dessen Einfluss auf die menschliche Physiologie sehr wichtig und reicht weit über den reinen Sehvorgang hinaus.

Die Wirkung von Licht auf den Menschen ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, die folgende Aufzählung einiger Faktoren soll dies verdeutlichen (siehe zum Beispiel die Übersichtsartikel von: CAJOCHEN, 2007; MÜNCH & BROMUNDT, 2012; MÜNCH & KAWASAKI, 2013).

- Tageszeit
- Intensität der Beleuchtung am Auge
- Spektrale Zusammensetzung, Lichtfarbe
- Einfallswinkel des Lichts
- Blickrichtung
- Licht-Verteilung im Raum (direkt-indirekt Anteil)
- Alter, Chronotyp, d. h. generell inter-individuelle Unterschiede
- Arbeitsaufgaben, die unter bestimmter Beleuchtung ausgeführt werden

Das Umgebungslicht wirkt dabei hauptsächlich auf drei Eigenschaften der inneren Uhr, welche vergleichbar mit einem technischen Oszillator sind (deshalb werden auch ähnliche Begriffe benutzt): *die circadiane Phase*, *die Amplitude* und *die Periodenlänge*. Diese circadianen¹ Marker lassen sich jedoch nicht unmittelbar messen, sondern bedürfen indirekter Messgrößen, wie beispielsweise die circadiane Hormonkonzentration von Melatonin (Melatonin stammt aus der Epiphyse des menschlichen Zwischenhirns; der glandula pinealis). Anhand dieser Melatonin-Konzentration, welche sich mittels mehrerer Proben am Abend und in der Nacht verlässlich im Speichel nachweisen lässt, können die circadianen Marker bestimmt werden. Es liegt in der Natur eines solchen circadianen Markers, dass die circadiane Wirkung einer Intervention (z. B. durch Licht) erst zu einem späteren Zeitpunkt (d. h. ca. 24 Stunden später) in Form einer circadianen Phasenverschiebung gemessen werden kann. Vereinfacht gesagt wird durch Licht am Abend und in der Nacht (bis vor das Körperkerntemperatur-Minimum) die circadiane Phase am nächsten Tag verlängert (d. h. auf einen späteren Zeitpunkt verschoben), und durch Licht am frühen Morgen vorverlegt (KHALSA et al., 2003). Licht zur „falschen“ Zeit führt deshalb auch zu einer Vor- oder Nachverschiebung der circadianen Phase (WAHNSCHAFFE et al., 2013).

¹ von lat.: circa = ungefähr; und dies = ein Tag; d.h. circadian = ungefähr ein Tag lang

Daneben besitzt Licht aber auch eine akute (aktivierende) Wirkung, welche sich mit der sofortigen Unterdrückung der nächtlichen Melatonin-Sekretion quantifizieren lässt. Der Grad der Melatonin-Unterdrückung hängt wiederum von den auf Seite 7 genannten Faktoren ab. Die spektrale Zusammensetzung einer Beleuchtung ist deshalb wichtig, weil sich die Empfindlichkeit der einzelnen Fotorezeptoren stark unterscheidet. Die maximale Empfindlichkeit der Zapfen liegt im grünen Bereich bei 555 nm (grüner sichtbarer Bereich), wohingegen die Stäbchen ihr Maximum bei 505 nm (blau-grüner sichtbarer Bereich) haben und die vor über 10 Jahren neu entdeckten lichtempfindlichen retinalen Ganglienzellen (ipRGC ²) bei 480 nm (blauer sichtbarer Bereich) maximal empfindlich sind (BRAINARD et al., 2001; THAPAN et al., 2001; ZAIDI et al., 2007).

Seitdem konnte in einer Vielzahl von Studien gezeigt werden, dass bei gleicher Photonenzahl ein höherer Blau-Anteil einer elektrischen Beleuchtung auch eine größere (aktivierende) Wirkung auf die subjektive und objektive Wachheit hat (CAJOCHEN et al., 2005; LOCKLEY et al., 2006a), auf den Schlaf (MÜNCH et al., 2006), die Kognition (VANDEWALLE et al., 2009) und die Emotionsverarbeitung (VANDEWALLE et al., 2011) und nachts auch stärker das Melatonin unterdrückt (BRAINARD et al., 2001; LOCKLEY et al., 2003). Daneben konnte auch bei anderen physiologischen Variablen gezeigt werden, dass das Photopigment der lichtempfindlichen retinalen Ganglienzellen für eine Vielzahl sogenannter nicht-visueller Lichtwirkungen, welche nicht nur via die innere Uhr vermittelt werden, eine dominante Rolle spielt, z. B. dem Verlauf der Körperkerntemperatur, der Herzfrequenz, der Genexpression und den Pupillenreflex (CAJOCHEN et al., 2005; CAJOCHEN et al., 2006; KAWASAKI & KARDON, 2007; MÜNCH et al., 2012a).

1.2 Effekte von Morgenlicht

Der Beleuchtung am Morgen scheint dabei eine besondere Bedeutung zuzukommen: Während Licht in der Nacht (bis vor das Körperkerntemperatur-Minimum) zu einer Verschiebung der circadianen Phase hin zu einem späteren Zeitpunkt führt, resultiert mit Licht am Morgen eine circadiane Phasenvorverschiebung (ACKERMANN et al., 2009; DIJK et al., 1989; BURKE et al., 2013; SMITH et al., 2009). Ergebnisse aus Studien, in welchen SchichtarbeiterInnen untersucht wurden, lassen vermuten, dass durch die Verlagerung des circadianen Rhythmus mit Licht sich auch das Schlaf-Fenster für einen optimal erholsamen Schlaf verschieben kann (BOIVIN & JAMES, 2002; WITTMANN et al. 2006). Dies kann entweder aufgrund einer Phasenverschiebung oder auch durch eine Veränderung der circadianen Amplitude (bzw. beides) hervorgerufen werden. Die Auswirkungen von Morgenlicht auf die Wachheit am Tage und den Schlaf in der folgenden Nacht sind bisher noch nicht umfassend untersucht worden. In den 1980er Jahren wurden die Einflüsse von Morgenlicht auf verschiedene physiologische Parameter untersucht (DIJK et al., 1989). Es zeigte sich, dass frühe Morgenlichtexposition nicht nur eine Phasen-Vorverschiebung verursachte, sondern auch den REM-Schlaf in der folgenden Nacht verkürzte. In der besagten Studie wurde die Lichtexposition von 06:00 bis 09:00 Uhr morgens durchgeführt.

² von engl.: intrinsically photosensitive retinal ganglion cells (ipRGC)

In einer kürzlich erschienenen Publikation, in welcher die Effekte von Morgenlicht auf die Wachheit und die kognitive Leistungsfähigkeit untersucht wurden, konnte unter blau-angereicherter künstlicher Morgenbeleuchtung kein akuter Effekt auf die Wachheit der Probanden gefunden werden. Die Resultate der kognitiven Leistungstests zeigten hingegen eine schnellere Reaktionszeit nach blau-angereicherter Morgenbeleuchtung als nach gewöhnlicher heller Beleuchtung im sogenannten n-back-Test (SANTHI et al 2013). Letztgenannte Studie untersuchte insbesondere den Effekt von Beleuchtung auf die sogenannte „sleep-inertia“, d. h. auf die Schlaftrunkenheit, welche direkt nach dem Aufwachen am größten ist und bis ca. zwei Stunden andauern kann, je nachdem, zu welcher Tageszeit man aufwacht.

Für eine Studie, welche Information über die Auswirkungen der Beleuchtung am Arbeitsplatz gewinnen sollte, müsste eine naturalistischere Zeit der Lichtexposition gewählt werden. Die üblichen Geschäftszeiten in Deutschland (öffentliche Departemente und Ämter) starten zwischen 08:00 und 09:00 Uhr. Bei einer Lichtexposition zu diesem Zeitpunkt könnte eine realistischere Einschätzung gemacht werden, wie sich eine Raumbelichtung zu dieser Tageszeit auf den Menschen auswirkte. Dies geschieht natürlich unter Vernachlässigung der Tatsache, dass es große individuelle Schwankungen der relativen Aufsteh- und Bettzeiten in der normalen Bevölkerung gibt, unter Einbezug auch der sogenannten Chronotypen (= extreme Früh- bzw. Spättypen). Ein weiterer Faktor, welcher in den meisten Studien (absichtlich) eingeführt wurde, um die akute Lichtwirkung zu verstärken, ist eine partielle Schlafdeprivation. Die Probanden wurden z. B. bereits nach 5 oder 6.5 Stunden im Bett (PHIPPS-NELSON et al., 2003; SANTHI et al. 2013) bzw. 1 Stunde vor habitueller Aufstehzeit (BURKE et al. 2013) geweckt und der experimentellen Beleuchtung ausgesetzt. Diese Intervention allein könnte einen zusätzlichen Einfluss ausgeübt haben, da der homöostatische Schlafdruck größer war als nach einer ganzen, ungestörten Schlafepisode.

1.3 Ziele und Studienhypothesen

Ein hauptsächliches Ziel des Projektes war es, nachzuweisen, dass herkömmliche, künstliche Beleuchtung tagsüber aufgrund ihrer zu geringen Zeitgeberstärke zu Beeinträchtigungen von Leistungsfähigkeit und Gesundheit führt. Eine zu geringe Zeitgeberstärke wird dabei als Mechanismus circadianer Desynchronisation vermutet. Die spezifischen Ziele und Studienhypothesen sind im Folgenden aufgeführt. Zum Nachweis sind folgende Hypothesen im Humanexperiment bei gesunden Probanden, im natürlichen Setting (siehe Abschnitt 4) getestet worden:

1. Im Vergleich zu herkömmlicher, künstlicher Tagesbeleuchtung verbessert biologisch effektives Licht am Vormittag akut die Leistungsfähigkeit.
2. Im Vergleich zu herkömmlicher, künstlicher Tagesbeleuchtung reduziert biologisch effektives Licht am Vormittag den negativen Effekt von biologisch wirksamem Licht am Abend.
3. Im Vergleich zu herkömmlicher, künstlicher Tagesbeleuchtung verbessert biologisch effektives Licht am Vormittag den folgenden Nachtschlaf.

4. Im Vergleich zu herkömmlicher, künstlicher Tagesbeleuchtung verbessert biologisch effektives Licht am Vormittag die Wirksamkeit von biologisch effektivem Licht am Vormittag des folgenden Tages.
5. Biologisch effektives Licht am Vormittag in einem natürlichen Setting führt nicht zu einer Phasenverschiebung des circadianen Systems.

2 Motivation für die Studie

Eine weitere Motivation, um auf die Optimierung von Innenbeleuchtung hinzuwirken, ist die Tatsache, dass wir uns unter den heutigen Arbeitsbedingungen sehr häufig in Gebäuden und nur selten im Freien aufhalten. Eine Messung, wie groß die Beleuchtungsstärke am Auge bei einer kleinen Stichprobe von Studenten in Berlin ist (N=10), ergab einen dramatisch tiefen Tagesdurchschnitt von 150 lux (Median; Dr. D. Kunz, unpublizierte Daten). Ein ähnliches Resultat wurde von HUBALEK et. al. (2010) gefunden. Bei deren Messungen mit 23 Büroangestellten ergab sich eine mittlere Beleuchtungsstärke von 183 lx (=Median tagsüber; für die Zeiten im Büro betrug die Beleuchtungsstärke 308 lx; [HUBALEK et al., 2010]). Wenn wir davon ausgehen, dass wir im Freien tagsüber immer eine mindestens 10-, maximal 100-mal höhere Beleuchtungsstärke haben, ist es naheliegend davon auszugehen, dass sich moderne Menschen tagsüber sozusagen in biologischer Dunkelheit aufhalten – mit einigen bekannten (z. B. circadiane Rhythmusstörungen, Schlafstörungen), größtenteils aber unbekanntem Langzeitwirkungen auf die körperliche und mentale Gesundheit.

3 Studiendesign

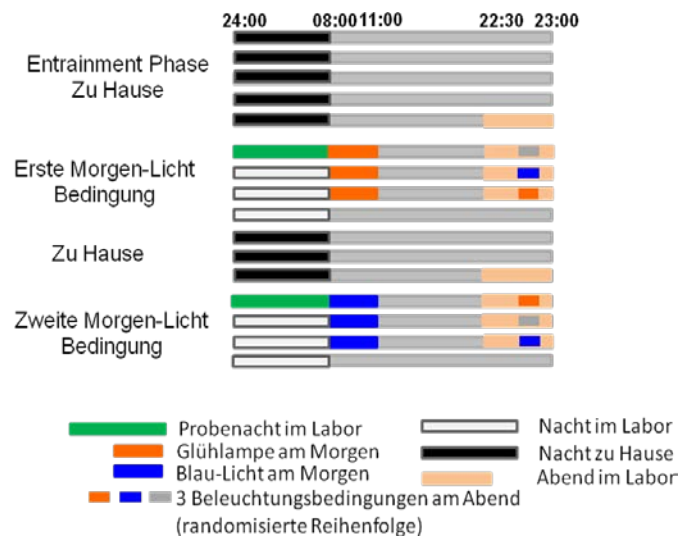


Abb. 3.1 Übersicht über das Studiendesign: 16-tägiges Protokoll

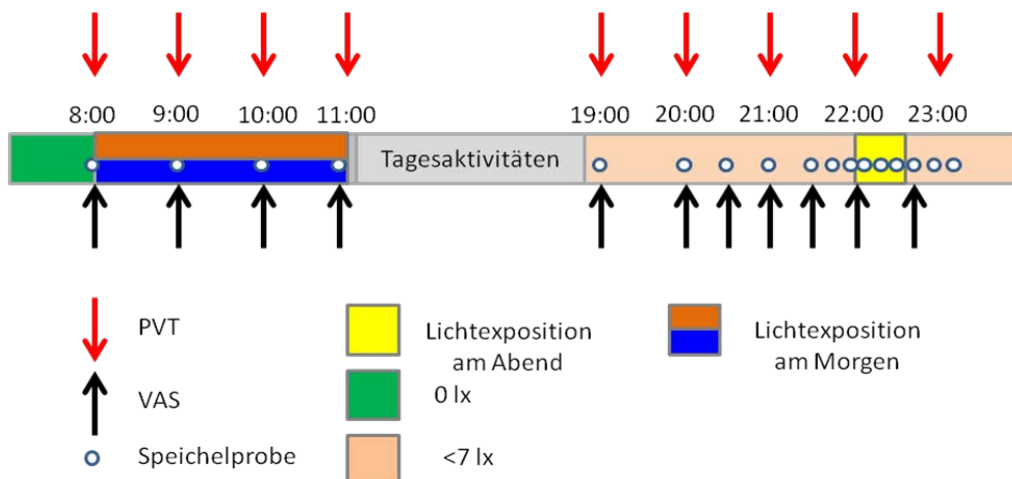


Abb. 3.2 Übersicht über das Studiendesign: zeigt anhand eines vergrößerten Ausschnittes den Ablauf von 19 Uhr bis zum nächsten Vormittag um 11:00 Uhr. VAS = Visual Analogue Scales (subjektive Befindlichkeits-skalen); PVT = Psychomotor Vigilance Test (PVT).

Tab. 3.1 Die verschiedenen Beleuchtungsbedingungen: Die drei verschiedenen Beleuchtungsbedingungen am Abend (a-c), und die beiden Beleuchtungssituationen am Morgen (d-e). Die Beleuchtungsstärke (lx) wurde in vertikaler Richtung auf Augenhöhe gemessen.

Abend	Farbtemperatur (Kelvin)	Beleuchtungsstärke (lx)	Verwendete Leuchte und Anbringung
a.) Orange Bürobeleuchtung (= PL)	1500	ca. 100	PLANON (Plasmaleuchte) Decke
b.) Kaltweiße Bürobeleuchtung (= BM)	6500	ca. 500	Blue Motion Fluoreszenzröhren Decke
c.) Dim Light (= DL)	2700	<7	Fluoreszenzröhren Decke

Morgen	Farbtemperatur (Kelvin)	Beleuchtungsstärke (lx)	Verwendete Leuchte und Anbringung
d.) Helle, blauangereicherte Bürobeleuchtung (= BL)	3537	ca. 750	Fluoreszenzröhren/LED Decke
e.) Schwache, warmweiße Bürobeleuchtung (= GB)	2600	40	Glühbirne Tischleuchte

4 Zusammenfassung der Resultate

Die Resultate mit der effektiven Beleuchtung (BL) am Morgen zeigen im Vergleich mit einer biologisch schwach anregenden Beleuchtung (GB), dass die Versuchspersonen im Verlaufe der Lichtexposition weniger schläfrig waren und sich schneller munterer fühlten als vor der Lichtexposition sowie im PVT generell eine schnellere Reaktionszeit und weniger Lapses aufwiesen. Die morgendliche Schläfrigkeit war nach DL am Vorabend am geringsten und die Reaktionszeit am schnellsten. Der Abbau der „sleep inertia“ ging im Verlauf der drei Studientage unter der BL-Bedingung rascher vonstatten als unter der GB-Bedingung, während sich für die Reaktionszeit am Morgen kein unterschiedlicher Effekt über mehrere Tage ergab.

Die 30-minütige abendliche Lichtexposition mit BM führte zu einer akut erniedrigten Schläfrigkeit im Vergleich mit der DL-Bedingung. Es zeigte sich auch, dass die morgendliche effektive Beleuchtung (BL) einen signifikant wacher-machenden Einfluss auf die abendliche Schläfrigkeit ausübte, selbst wenn die Versuchspersonen in DL saßen. Insgesamt führte die BL-Bedingung (im Vergleich mit der morgendlichen GB-Bedingung) auch zu weniger Lapses und einer schnelleren Reaktionszeit, welche den ganzen Abend lang außer in der letzten Stunde nachweisbar war. Verglichen mit dem letzten Zeitpunkt vor der abendlichen Lichtexposition wurde die Reaktionszeit am Ende der PL- und BM-Beleuchtung akut nicht langsamer, sondern stieg lediglich unter DL weiter an. Die BM-Bedingung führte im Mittel über drei Tage zu schnelleren RT am Ende der LE, aber nur, wenn am Morgen die BL stattgefunden hatte.

Wenn am Vorabend die DL-Exposition stattgefunden hatte, war der abendliche Anstieg der Melatonin-Konzentration im Speichel (DLMO) nach den morgendlichen BL- und GB-Expositionen ähnlich, was bedeutet, dass die morgendliche Bedingung per se nicht zu einer signifikanten circadianen Phasenverschiebung führte. Die abendliche Beleuchtung mit BM führte akut zu einer Melatonin-Suppression im Speichel im Vergleich zu DL-Exposition. Wenn die circadianen Phasenverschiebungen über drei Tage hinweg und in Abhängigkeit aller Beleuchtungen am Vorabend verglichen wurden, dann waren diese in der GB-Bedingung signifikant größer als mit der BL-Beleuchtung.

Die Analyse des Schlaf-EEGs von 18 Probanden ergab kürzere Schlafepisoden nach der abendlichen BM-Exposition im Vergleich mit der PL-Beleuchtung. Dieser Effekt war am dritten Tag am stärksten (auch im Vergleich mit DL). Es fand sich unter allen Beleuchtungsbedingungen im Verlaufe der Studie eine Zunahme des oberflächlichen Schlafstadiums S1. Der einzige Unterschied zwischen den beiden Beleuchtungsbedingungen am Morgen war, dass die Versuchspersonen nach BL länger im Stadium S2 verblieben, in der Gesamtschlafdauer oder für den Tiefschlaf gab es jedoch keinen Unterschied. Die REM-Schlafdauer nahm zwischen dem dritten und letzten Studientag signifikant ab. Bei der quantitativen Analyse der Schlaf-EEG-Aktivität (Spektren) ergaben sich höhere Werte in der GB-Bedingung als der BL-Bedingung für den NREM- und REM-Schlaf in den höheren Frequenz-Bereichen, d. h. im EEG-alpha-, sigma- und beta-Bereich (EEG-Aktivität > 7 Hz), nicht aber in den langsamwelligen Bereichen, welche im Tiefschlaf vorherrschen (EEG-Aktivität < 4.5 Hz).

5 Ausblick

Im Anschluss an die Studie zur Prüfung von Faktoren circadianer Desynchronisation können im Folgenden einige wenige qualitative Aussagen gemacht werden, die im Hinblick auf biologische Wirkungsmechanismen von Beleuchtung an Arbeitsplätzen bedeutsam sein könnten. Bei allen Punkten sind weitere inhaltliche Vertiefungen notwendig, um wissenschaftliche und beratende Tätigkeiten in Gremien in Bezug auf Arbeitsschutz am Arbeitsplatz vollumfänglich wahrzunehmen und umzusetzen.

Grundsätzlich muss sehr vorsichtig damit umgegangen werden, konkrete Angaben zur Bedeutung der Ergebnisse für die Beleuchtungsindustrie zu machen, da noch viele Fragen und Unklarheiten bestehen, die sorgfältig aufgearbeitet und beseitigt werden müssen.

- 1.) Eine effektive Beleuchtung am Morgen induziert unter semi-naturalistischen Bedingungen für sich allein keine circadiane Phasenverschiebung, im Vergleich mit einer suboptimalen Beleuchtung. Eine solche Beleuchtung ist als günstig für Gegenstrategien circadianer Desynchronisation anzusehen.
- 2.) Eine effektive Beleuchtung am Morgen reduziert akut die circadiane desynchronisierende Wirkung von falscher Beleuchtung am Vorabend im Hinblick auf das Verschwinden der sleep inertia und im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit.
- 3.) Vorsicht ist geboten, wenn die vorausgehende Schlafzeit infolge falscher Beleuchtung am Abend vorher verkürzt wurde. Eine effektive morgendliche Beleuchtung kann für sich allein nicht der Entstehung eines chronischen Schlafdefizites vorbeugen.
- 4.) Es konnten in dieser Studie keine negativen Wirkungen von effektiver morgendlicher Beleuchtung im Sinne eines „Lichtdopings“ gefunden werden.
- 5.) Die effektive Beleuchtung am Morgen kann durch eine bestimmte Intensität/spektrale Zusammensetzung akut anregend, aktivierend und in dem Sinne leistungssteigernd auf den Organismus wirken.
- 6.) Die effektive Beleuchtung am Morgen kann durch eine bestimmte Intensität/spektrale Zusammensetzung als Zeitgeber die Synchronisation von innerer Uhr mit dem äußeren Hell-Dunkel-Zyklus unterstützen (=Entrainment). Mögliche Wirkungsmechanismen sind Adjustierung der circadianen Phase und Amplitude (letztere wurde in der Studie nicht berücksichtigt). Dadurch werden längerfristige Verbesserungen erzielt.
- 7.) Eine effektive Beleuchtung an Arbeitsplätzen tagsüber/nachts stellt im Sinne einer Intervention den Schritt hin zur Wiederherstellung des natürlichen Zustandes her. Es geht darum, die Unterschiede zu natürlichen Tageslichtverhältnissen zu verkleinern falls möglich/erwünscht. Sollte dies nicht möglich/erwünscht sein, so ist bei den Übergängen Arbeit-Ruhe-Arbeit darauf zu achten, wie stark die circadiane Synchronisation bzw. Desynchronisation

durch eine bestimmte Beleuchtung unterstützt werden kann und soll (z. B. Beginn-Ende von Nachtschichtarbeit).

- 8.) Die Bedeutung und der Einfluss von Tageslicht mit großem Wirkungspotential zu Gegenstrategien circadianer Desynchronisation sollte in der Zukunft unbedingt betont und weiter erforscht werden (bzw. mit geeigneten Maßnahmen in die Beleuchtung integriert werden).
- 9.) Es sollten möglichst individuelle Beleuchtungslösungen am Arbeitsplatz gefunden werden, da sich diese an die Bedürfnisse einzelner Personen, bzw. Personengruppen anpassen ließe (Bsp. verschiedene Chronotypen; ältere versus jüngere Arbeitnehmer, Kinder).

Literaturverzeichnis

- Ackermann, K.; Sletten, T. L.; Revell, V. L.; Archer, S. N. & Skene, D. J.:
(2009) Blue-light phase shifts PER3 gene expression in human leukocytes. *Chronobiol Int* 26 (4) 769-779.
- Boivin, D. B. & James, F. O. :
(2002) Circadian adaptation to night-shift work by judicious light and darkness exposure. *J Biol Rhythms* 17(6), 556-567.
- Brainard, G.; Hanifin, J.; Greeson, J.; Byrne, B.; Glickman, G.; Gerner, E.; Rollag, M.:
(2001) Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. *J Neurosci* 21:6405-6412.
- Burke, T.; Markwald, R.; Chinoy, E.; Snider, J.; Bessman, S.; Jung, C.; Wright, Jr. K.:
(2013) Combination of light and melatonin time cues for phase advancing the human circadian clock. *Sleep* 36:1617-1624.
- Cajochen, C.:
(2007) Alerting effects of light. *Sleep Med Rev* 11:453-464.
- Cajochen, C.; Jud, C.; Münch, M.; Kobińska, S.; Wirz-Justice, A.; Albrecht, U.:
(2006) Evening exposure to blue light stimulates the expression of the clock gene PER2 in humans. *Eur J Neurosci* 23:1082-1086.
- Cajochen, C.; Münch, M.; Kobińska, S.; Kräuchi, K.; Steiner, R.; Oelhafen, P.; Orgül, S.; Wirz-Justice, A.:
(2005) High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation and heart rate to short wavelength light. *J Clin Endocrinol Metab* 90:1311-1316.
- Czeisler, C. A.; Duffy, J. F.; Shanahan, T. L.; Brown, E. N.; Mitchell, J. F.; Rimmer, D. W.; Ronda, J. M.; Silva, E. J.; Allan, J. S.; Emens, J. S.; Dijk, D. J.; Kronauer, R. E.:
(1999) Stability, precision, and near-24-hour period of the human circadian pacemaker. *Science* 284:2177-2181.
- Dijk, D. J.; Beersma, D. G. M.; Daan, S.; Lewy, A. J.:
(1989) Bright morning light advances the human circadian system without affecting NREM sleep homeostasis. *Am J Physiol Regulatory Integrative Comp Physiol*. 256: R106-R111.
- Hubalek, S.; Brink, C.; Schierz, C.:
(2010) Office workers' daily exposure to light and its influence on sleep quality and mood. *Lighting Res Technol* 42:33-50.
- Khalsa, S. B. S.; Jewett, M. E.; Cajochen, C.; Czeisler, C. A.:
(2003) A phase response curve to single bright light pulses in human subjects. *J Physiol* 549.3:945-952.

Lockley, S.; Evans, E.; Scheer, F.; Brainard, G.; Czeisler, C.; 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.

Lockley, S. W.; Brainard, G. C.; Czeisler, C. A.:
(2003) High sensitivity of the human circadian melatonin rhythm to resetting by short wavelength light. *J Clin Endocrinol Metab* 88:4502-4505.

Münch, M.; Bromundt, V.:
(2012) Light and chronobiology: implications for health and disease. *Dialogues Clin Neurosci* 14:448-453.

Münch, M.; Kawasaki, A.:
(2013) Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells: classification, function and clinical implications. *Curr Opin Neurol* 26:45-51

Münch, M.; Léon, L.; Crippa, S.; Kawasaki, A.:
(2012a) Circadian and wake-dependent effects on the pupil light reflex in response to narrow-bandwidth light pulses. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 53:4546-4555.

Münch, M.; Kobińska, S.; Steiner, R.; Oelhafen, P.; Wirz-Jeanner, A.; Cajochen, C.:
(2006) Wavelength-dependent effects of evening light exposure on sleep architecture and sleep EEG power density in men. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 290:R1421-1428.

Phipps-Nelson, J.; Redman, J.; 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.

Santhi, N.; Groeger, J. A.; Archer, S. N.; Gimenez, M.; Schlangen, L. J.; Dijk, D. J.:
(2013) Morning sleep inertia in alertness and performance: effect of cognitive domain and white light conditions. *PlosOne* 2013 8 (11):e79688.

Smith, M. R.; Revell, V. L. & Eastman, C. I.:
(2009) Phase advancing the human circadian clock with blue-enriched polychromatic light. *Sleep Med*, 10(3), 287-294.

Thapan, K.; Arendt, J.; Skene, D. J.:
(2001) An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *J Physiol* 535:261-267.

Vandewalle, G.; Maquet, P.; Dijk, D.:
(2009) Light as a modulator of cognitive brain function. *Trends Cogn Sci* 13:429-438.

Vandewalle, G.; Hebert, M.; Beaulieu, C.; Richard, L.; Daneault, V.; Garon, M.-L.; Leblanc, J.; Grandjean, D.; Maquet, P.; Schwartz, S.; Dumont, M.; Doyon, J.; Carrier, J.:
(2011) Abnormal hypothalamic response to light in seasonal affective disorder. *Biol Psychiatry* 70:954-961.

Wahnschaffe, A.; Haedel, S.; Rodenbeck, A.; Stoll, C.; Rudolph, H.; Kozakov, R.; Schoepp, H.; Kunz, D.:

(2013) Out of the lab into the bathroom: evening short-term exposure to conventional light suppresses melatonin and increases alertness perception. *Int J Mol Sci* 14:2573-2589.

Wittmann, M.; Dinich, J.; Mellow, M. & Roenneberg, T.:

(2006) Social jetlag: misalignment of biological and social time. *Chronobiol Int*, 23 (1-2), 497-509.

Zaidi, F.; Hull, J.; Peirson, S.; Wulff, K.; Aeschbach, D.; Gooley, J.; Brainard, G.; Gregory-Evans, K.; Rizzo, I. J.; Czeisler, C.; Foster, R.; Moseley, M.; Lockley, S.:

(2007) Short-wavelength light sensitivity of circadian, pupillary, and visual awareness in humans lacking an outer retina. *Curr Biol* 17:2122-2128.

Abkürzungsverzeichnis

BL	Blue-enriched bright light
BM	Blue Motion
DL	Dim-Light
DLMO	Dim light melatonin onset
EEG	Elektroenzephalogramm
EP	Entrainment Phase
GB	Glühbirne
ipRGC	intrinsic photosensitive retinal ganglion cells
NREM Schlaf	non rapid eye movement sleep
PL	Planon
REM Schlaf	rapid eye movement sleep